

Procédés de récupération/valorisation des énergies à bas niveau de température

Etat des connaissances



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**PROCEDES DE RECUPERATION / VALORISATION
DES ENERGIES A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE**

ETAT DES CONNAISSANCES

RAPPORT FINAL

septembre 2012

A. MANIFICAT - GRETh
O. MEGRET - Setec novae



setec novae

(nouvelle appellation de Cadet International)

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

RECORD, Procédés de récupération / valorisation des énergies à bas niveau de température.
Etat des connaissances, 2012, 437 p, n°10-0234/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2012

RESUME

L'objet de la présente étude est de réaliser un état de l'art sur les procédés de récupération et de valorisation des énergies à bas niveau de température. Les informations apportées dans ce rapport viseront en particulier les systèmes de valorisation énergétique des déchets et de la biomasse.

Après un rappel du contexte favorable au développement de ces solutions et à la définition de la portée de ce travail, l'étude débute par la définition des notions telles que la chaleur fatale et l'exergie, ainsi que la présentation des éléments liés au contexte fiscal, économique et réglementaire comme la TGAP, les tarifs de l'énergie et l'efficacité énergétique d'une installation.

Le second chapitre s'intéresse ensuite aux gisements d'énergie à bas niveau de température qui peuvent être valorisables pour en évaluer le potentiel et les caractéristiques. La détermination du spectre de température de la source énergétique permettra ensuite une mise en relation avec l'ensemble des besoins des utilisateurs et des demandes issues des différents secteurs d'activité.

La troisième partie de l'étude est une revue des technologies de valorisation des énergies à bas niveau de température. Il est utile de discerner les types d'échangeurs de chaleur intéressants à mettre en place. Des procédés innovants permettent la prise en considération de perspectives autres qu'une utilisation directe des thermies récupérées. On citera par exemple les systèmes de production d'électricité (cycle ORC, moteurs à air chaud, conversion thermoélectrique), de production de froid (machine frigorifique à absorption et adsorption, machine thermo-frigorifique à éjection) ou encore des techniques pour le stockage d'énergie par MCP (Matériaux à changement de phase).

Le dernier chapitre est consacré à la réalisation de quatre études de cas rédigées sous forme de fiches et visant à évaluer l'applicabilité des procédés préalablement considérés, concernant le domaine des déchets.

MOTS CLES

Valorisation énergétique / Récupération d'énergie / Traitement thermique des déchets / Bas niveau de température / Chaleur fatale

SUMMARY

This study aims to realize a state of art of the processes of energy recovery at low level of temperature and their valorizations. The informations provided will target particularly the thermal systems of waste and biomass treatment.

After reminding the adequate context of development with these solutions and define the scope of the current work, the study begins with the definition of different concepts such as low-grade heat (fatal energy) and exergy, and also the presentation of the fiscal environment as well as the economic and regulatory situation, with information about the TGAP, prices of energy and energy efficiency.

The second chapter focuses on the different sources of energy at low temperature level that can be recoverable in order to assess their potentials and their characteristics. The Determination of the temperature range of these energy sources will be put in relation with the needs and demands of users from different industrial sectors.

The third part of the study is a review of various technologies for energy recovery and valorization at low temperature. It is useful to distinguish different types of heat exchangers interesting to implement. Moreover, innovative processes allow us to consider new perspectives other than a direct use of heat recovered. For example, we can take into account systems for producing electricity (ORC cycle, hot air engines, thermoelectric conversion), or cold generation (sorption refrigeration machine, Thermo-ejector refrigeration machine) or techniques for energy storage with PCM (Phase Change Material).

The last chapter deals to the achievement of four study cases written in the form of sheet and aimed at assess the applicability of the processes previously considered, concerning the field of waste.

KEY WORDS

Energy recovery / Energetical valorization / Thermal waste treatment / Low level temperature / Low-grade heat / fatal energy

Sommaire

PARTIE 1 : Rapport principal

1. L'ÉTAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU TRAITEMENT DES DÉCHETS – CHAPITRE 1.....	7
1.1. CONTEXTE GENERAL	7
1.2. DEFINITION DE LA PORTEE DE L'ETUDE	8
1.3. ELEMENTS INTRODUCTIFS EN MATIERE DE VALORISATION ENERGETIQUE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE 10	
1.4. ASPECTS REGLEMENTAIRES	11
1.5. CONTEXTE FISCAL	12
1.5.1. <i>Incinération</i>	12
1.5.2. <i>Biogaz de décharge</i>	13
1.6. CONTEXTE ECONOMIQUE.....	14
1.6.1. <i>Tarifs d'obligation d'achat électricité</i>	14
1.6.1.1. Incinération	14
1.6.1.2. Méthanisation et Biogaz de décharge	14
1.6.2. <i>Coût moyen de la chaleur</i>	16
1.7. ASPECTS SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE	17
2. GISEMENTS / UTILISATEURS D'ÉNERGIE À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 2.18	18
2.1. INTRODUCTION AUX TECHNIQUES DE TRAITEMENT THERMIQUE DES DECHETS	18
2.1.1.1. Incinération	18
2.1.1.2. Co-incinération	19
2.1.1.3. Évapo-incinération.....	19
2.1.1.4. Vitrification et traitement des REFIOM.....	20
2.1.1.5. Oxydation par voie humide	21
2.2. CARACTERISATION DU GISEMENT D'ENERGIE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE VALORISABLE	22
2.2.1. <i>Gisement valorisable dans les unités de valorisation énergétique des déchets</i>	22
2.2.1.1. Gisement d'énergie à évacuer aux aérocondenseurs	24
2.2.1.2. Énergie des fumées rejetées à l'atmosphère.....	25
2.2.1.3. Gisement d'énergie dans les mâchefers et REFIOM.....	26
2.2.1.4. Gisement d'énergie dans les unités de traitement thermique des déchets dangereux.....	28
2.2.2. <i>Gisement d'énergie dans les unités de méthanisation et de valorisation du biogaz de décharge</i> 29	
2.2.3. <i>Gisement d'énergie dans le traitement des effluents méthanogènes</i>	30
2.3. CARACTERISATION DU BESOIN ET DES UTILISATEURS D'ENERGIE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE	31
2.3.1. <i>Présentation du principe des flux énergétiques et des rejets thermiques d'un processus dans le diagramme de Sankey</i>	31
2.3.2. <i>Sources d'énergie à bas niveau de température et besoins récepteurs</i>	32

2.3.3.	<i>Demande du résidentiel/tertiaire</i>	34
2.3.3.1.	Consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire en France	34
2.3.3.2.	Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel en France.....	35
2.3.4.	<i>Demande de l'industrie</i>	35
3.	INTRODUCTION AUX PROCÉDÉS DE RÉCUPÉRATION/VALORISATION DES ÉNERGIES A BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 3	38
3.1.	INTRODUCTION.....	38
3.2.	CONTEXTE DE L'ETUDE	38
3.1.	RAPPEL DU DOMAINE DE L'ETUDE	39
3.2.	LES TECHNOLOGIES	40
3.2.1.	<i>Les échangeurs de chaleur</i>	41
3.2.2.	<i>Les échangeurs / régénérateurs rotatifs</i>	42
3.2.3.	<i>Les échangeurs à caloducs</i>	43
3.2.4.	<i>Les cycles Organiques de RANKINE (ORC)</i>	44
3.2.5.	<i>Les machines frigorifiques à sorption</i>	45
3.2.6.	<i>Les Matériaux à Changement de Phase</i>	46
3.2.7.	<i>Les machines thermofrigorifiques à éjection</i>	46
3.2.8.	<i>Les cycles moteurs à air chaud</i>	47
3.2.8.1.	Les moteurs Stirling	47
3.2.8.2.	Le moteur Ericsson.....	48
3.2.9.	<i>La conversion thermoélectrique</i>	49
3.2.10.	<i>La turbine de TESLA</i>	50
3.2.11.	<i>L'effet magnétocalorique (EMC)</i>	51
3.2.12.	<i>Les pompes à chaleur</i>	51
3.3.	SYNTHESE	53
4.	EXPÉRIENCES À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 4	59
4.1.	LA COGENERATION DE LA VILLE DE SAINT-FELICIEN AU CANADA	60
4.2.	INCO ET PROGECO	61
4.3.	PROJET SUMMERHEAT.....	61
4.4.	RESEAU DE FROID DE MONACO (SMEG : SOCIETE MONEGASQUE D'ELECTRICITE ET DE GAZ)	62
5.	CONFRONTATION/APPLICABILITE : ETUDES DE CAS - CHAPITRE 5	63
6.	CONCLUSION	65

PARTIE 2 : Fiches de présentation des technologies et études de cas

7. ANNEXES	66
FICHES :	69
ANNEXE 1 : Les échangeurs de chaleur	69
ANNEXE 2 : Les régénérateurs rotatifs	108
ANNEXE 3 : Les échangeurs à caloducs	120
ANNEXE 4 : Les cycles organiques de RANKINE (ORC) et les turbines scroll	139
ANNEXE 5 : Les machines frigorifiques à sorption	160
ANNEXE 6 : Les matériaux à changement de phase à basse température (PCM)	178
ANNEXE 7 : Les machines thermofrigorifique à éjection	229
ANNEXE 8 : Les cycles moteurs à air chaud	242
ANNEXE 9 : La conversion thermoélectrique	265
ANNEXE 10 : La turbine de TESLA	278
ANNEXE 11 : Les systèmes à effet magnétocalorique (froid magnétique)	287
ANNEXE 12 : Les pompes à chaleurs	299
EXPERIENCES A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE :	330
ANNEXE 13 : La cogénération de la ville de Saint-Félicien au Canada	330
ANNEXE 14 : Le centre énergétique de Bruce au Canada	331
ANNEXE 15 : Kalundborg	332
ANNEXE 16 : Projet Alter Eco	335
ETUDES DE CAS :	339
ANNEXE 17 : Fiche N°1 : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les UVE	339
ANNEXE 18 : Fiche N°2 : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les moteurs biogaz	384
ANNEXE 19 : Fiche N°3 : Etude de cas de la valorisation en énergie électrique de l'eau chaude	406
ANNEXE 20 : Fiche N°4 : Etude de cas de la production de froid à partir de l'eau chaude	425

PARTIE 1

Rapport principal

1. L'ÉTAT DE L'ART DANS LE DOMAINE DU TRAITEMENT DES DÉCHETS – CHAPITRE 1

1.1. CONTEXTE GENERAL

En France, l'industrie consomme plus de 300 TWh de combustibles dont 46% de gaz naturel, 30% de fiouls, 14% de charbon, 8% de biomasse et 2% pour le reste mais rejette également sous formes gazeuse et liquide, des quantités très importantes d'énergie. Dans les process, les pertes énergétiques sont évaluées à un peu plus de 13%. Il en ressort que le gisement possible de récupération d'énergie thermique à partir des « rejets à basses températures » est estimé à plus de 40 TWh de combustibles dont des rejets liquides de 25 à 200°C et des rejets gazeux de 70 à 200°C.¹

Les rejets thermiques à basse température ou encore chaleur fatale constitue la chaleur qui peut être récupérée à plusieurs niveaux d'un processus industriel. Il s'agit donc de la chaleur produite par un processus dont le but premier n'est pas la production de cette chaleur. Pouvant être récupérée et valorisée, la récupération d'énergie à bas niveau de température s'inscrit fortement dans l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Dans le secteur de la valorisation énergétique des déchets, l'exploitation des énergies à bas niveau de température permettra entre autres de répondre aux engagements du Grenelle de l'Environnement. Cette valorisation peut permettre par exemple d'atteindre dans les unités d'incinération ou les installations de stockage le taux d'efficacité énergétique permettant l'abattement de la TGAP ou encore optimiser le « coût global » d'exploitation des unités en offrant une source d'économie dans l'auto-consommation du site voire la recette de vente d'énergie à des consommateurs de proximité (serres agricoles, réseau de chaleur, ou de froid ...).

L'enjeu énergétique principal de ces prochaines années est la réduction de la consommation d'énergie, notamment dans le secteur du bâtiment représentant 44% de l'énergie finale consommée en France.

La valorisation des rejets thermiques à bas niveau de température est l'une des réponses possibles aux besoins énergétiques dans le secteur du bâtiment résidentiels et tertiaire, et notamment pour le chauffage et la climatisation puisqu'il existe une cohérence des niveaux de température ($T < 100^{\circ}\text{C}$).

La présente étude porte sur l'ensemble de ces réflexions de récupération et de valorisation des énergies à bas niveau de température appliquées aux procédés de valorisation énergétique des déchets.

¹ Source GDF Suez

1.2. DEFINITION DE LA PORTEE DE L'ETUDE

L'étude est réalisée par le groupement GRETh/Cadet International et vise à dresser un état de l'art des procédés de récupération/valorisation des énergies à bas niveau de température.

Les applications visées par l'étude sont les procédés de valorisation énergétique des déchets et de la biomasse.

La structure de l'étude est la suivante :

A/ l'identification du besoin et des contraintes techniques associés aux procédés de valorisation thermique des déchets. Ce travail est porté par Cadet International

1/ caractérisation des gisements d'énergie calorifique à bas niveau de température disponibles :

- incinération
- méthanisation
- ...

2/ caractérisation du besoin et des récepteurs potentiels en distinguant le type de demande :

- la demande (directe / saisonnière et intermittente / industrie / du bâtiment)
- recensement des récepteurs potentiels en fonction des unités de traitement des déchets :
- autoconsommation
- utilisateurs de proximité
- ...

3/ identification des contraintes techniques associées aux procédés de valorisation thermique des déchets en faisant ressortir les contraintes dues au transport

4/ caractérisation des solutions de récupération de l'énergie à bas niveau de température par un rendu sous forme de :

- Fiches de retour d'expériences sur des applications énergétiques
- Analyse des critères :
 - o environnementaux
 - o réglementaires
 - o économiques
 - o performantiels (énergétiques)
 - o ...

B/ l'évaluation de l'offre technologique à partir des données provenant de solutions industrielles, de démonstrateurs et de travaux de laboratoire quelque soit la cible applicative retenue. Ce travail porté par le GRETh doit ainsi permettre de :

1/ **d'identifier et décrire les procédés/technologies** disponibles en matière de transfert thermique tel que :

- Les échangeurs de chaleurs à *bas niveau de température*
- Les systèmes permettant l'augmentation du niveau de température des rejets thermiques (pompe à chaleur)
- Les systèmes de production de froid (machine à sorption et machines frigorifiques à éjecteur de vapeur)

2/ **de décrire les procédés** liés à la production d'électricité à partir d'énergie à bas niveau de température :

- présentation des différentes technologies et de ses principales caractéristiques d'application :
 - o procédés de conversion par cycle thermodynamique (Cycles organiques de Rankine (ORC), Moteurs Stirling, Turbine Scroll)
 - o procédés de conversion directe par matériaux et composants thermoélectriques (effet Seebeck)
- domaines d'application
- état de développement
- références et exemples d'application en France, en Europe et dans le Monde

3/ **de synthétiser** sous forme de tableau général comparatif des avantages et inconvénients des différentes technologies identifiées

C/ la confrontation des deux approches sur les technologies identifiées par Cadet International et le GRETh

1.3. ELEMENTS INTRODUCTIFS EN MATIERE DE VALORISATION ENERGETIQUE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE

- **Chaleur fatale ?**

La Programmation Pluriannuelle des Investissements de production de chaleur (« PPI chaleur ») pour la période 2009-2020 donne la définition suivante : « *Par chaleur fatale, on entend une production de chaleur dérivée d'un site de production, qui n'en constitue pas l'objet premier, et qui, de ce fait, n'est pas nécessairement récupérée. Les sources de chaleur fatale sont très diversifiées. Il peut s'agir de sites de production d'énergie (les centrales nucléaires), de sites de production industrielle, de bâtiments tertiaires d'autant plus émetteurs de chaleur qu'ils en sont fortement consommateurs comme les hôpitaux, de réseaux de transport en lieu fermé, ou encore de sites d'élimination comme les unités d'incinération de déchets.* »

La chaleur fatale peut être issue des UVE, des unités de méthanisation,... La récupération et la valorisation de la chaleur fatale est possible mais comment y parvenir ?

- **Valorisation de la chaleur fatale**

La chaleur fatale peut être valorisée de différente manière. Il peut s'agir d'une valorisation directe secondaire via un réseau de chaleur pour le chauffage de bâtiments, de serres... Ou via les systèmes de production d'électricité et/ou froid à partir de la chaleur récupérée ou par l'augmentation de la température de la chaleur fatale via des pompes à chaleur. On parlera alors de valorisation indirecte.

La valorisation de la chaleur fatale par un réseau de chaleur prend sa source directement au niveau du site de production de la chaleur fatale. C'est le cas par exemple des réseaux de chaleur raccordés aux UVE. S'agissant des UVE, la principale contrainte technique réside dans la distance entre le site de production et le site utilisateurs.

La valorisation de la chaleur fatale pour la production d'électricité présente des avantages intéressants tels que le rachat par EDF via le tarif d'obligation d'achat et l'injection sur le réseau national de distribution électrique.

Une valorisation par cogénération/trigénération est également envisageable (chaud, froid et électricité).

- **Récupération de chaleur et utilisation des rejets thermiques**

Il faut distinguer récupération de chaleur (RC) et utilisation des rejets thermiques (URT).

En effet, la récupération de chaleur (RC) représente les inévitables rejets thermiques dégagés par un procédé **qui sont réinjectés dans le même procédé**, sans grand décalage de temps. La formule idéale consiste à faire coïncider source et récepteur en temps et en quantité, on obtient ainsi un meilleur rendement de l'installation. Tandis que l'utilisation des rejets thermiques (URT) représente les rejets thermiques inévitables dégagés par un procédé et **qui sont réinjectés dans d'autres procédés**, sans ou avec décalage dans le temps. L'attention sera axée sur l'offre et la demande de chaleur, il est souvent nécessaire de stocker la chaleur. Selon le lieu de l'utilisation de la chaleur, il faut faire une distinction entre l'utilisation à l'intérieur de l'entreprise dans un autre procédé (URT interne) et l'utilisation par des tiers à l'extérieur de l'entreprise (URT externe).

Les éléments principaux des installations de RC/URT sont les échangeurs de chaleur, tant que la température de la source est supérieure à la température d'utilisation. Si l'on inverse les conditions, la pompe à chaleur devient l'élément principal de l'installation.

Les rejets thermiques ont plusieurs origines. Pour leur utilisation, il faut faire une distinction entre rejets de chaleur intrinsèques et rejets de chaleur diffus :

- **Les rejets de chaleur intrinsèques** sont liés à des flux de matière. En font partie principalement : l'air vicié, les flux provenant des gaz de combustion, les fluides de refroidissement ainsi que la chaleur emmagasinée par la matière à la sortie d'un traitement. A ce propos, il faut distinguer la chaleur latente (par exemple condensation) de la chaleur sensible (changement de température).

- **Les rejets de chaleur diffus** sont obtenus principalement par rayonnement et convection de grandes surfaces (pertes surfaciques des installations, pertes par transmission des bâtiments chauffés).

La recherche et la récupération de rejets thermiques sont plus simples à réaliser pour la chaleur intrinsèque que pour la chaleur diffuse. De plus, notre étude se focalise sur les rejets de chaleur intrinsèques.

1.4. ASPECTS REGLEMENTAIRES

En mars 2007, les chefs d'Etat et de gouvernement des 27 Etats Membres de l'Union Européenne (UE) ont adopté un objectif contraignant de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale d'ici à 2020. En combinant cet objectif avec l'engagement d'augmenter l'efficacité énergétique de 20% d'ici à 2020, les leaders politiques européens ont ouvert la voie à un avenir énergétique plus durable pour l'Union européenne et pour les générations futures.

En janvier 2008, la Commission européenne a présenté un projet de directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources d'énergie renouvelables (Directive EnR) qui contient une série d'éléments nécessaires à la mise en place d'un cadre législatif permettant l'atteinte de l'objectif de 20%. La directive met en place un cadre législatif qui doit garantir l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale de 8,5% en 2005 à 20 % en 2020.

Tous ces objectifs visant à réduire de manière efficace et durable les émissions des gaz à effet de serres s'inscrivent dans une politique d'amélioration d'efficacité énergétique et donc de maîtrise de l'énergie, des consommations... sont définis dans de nombreux textes au niveau national et international.

- **Protocole de Kyoto**
 - **Le plan national de développement des énergies renouvelables de la France**
 - **Le paquet Energie-Climat**
 - **PPI chaleur-Loi « POPE » du 13 juillet 2005 (consolidée le 9 décembre 2010)**
 - **Le plan Climat 2004-2012**
-
- **Le Grenelle de l'Environnement**

Initié en 2007 par les autorités françaises, le grenelle de l'Environnement a abouti à 268 engagements en faveur de l'environnement.

Concernant la lutte contre les changements climatiques et la maîtrise de l'énergie, les objectifs issus du Grenelle de l'environnement sont de contribuer de manière ambitieuse et déterminée à l'objectif européen des « 3x20 en 2020 », d'inscrire la France dans le « facteur 4 » – division par quatre de nos émissions d'ici à 2050, « +20 Mtep en 2020 » : augmenter de 20 millions de tonnes équivalent pétrole notre production d'énergie renouvelable en 2020 et dépasser une proportion de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie,...

- La loi Grenelle 2

La loi Grenelle 2 est un projet de loi d'engagement national pour l'environnement qui permettra de mettre en œuvre concrètement les orientations du Grenelle de l'environnement et du « Plan d'action national de développement des énergies renouvelables » qui comportent plusieurs mesures opérationnelles dans l'ensemble des filières bioénergies, éolien,...

Présenté en Conseil des ministres le 7 janvier 2009, l'application de la loi Grenelle 2 repose sur la mise en place de plans régionaux et territoriaux tels que :

- La réalisation par chaque Préfet de Région et chaque Président du Conseil régional d'un Schéma Régional du Climat de l'air et de l'énergie (SRCAE) (article 68 loi « Grenelle 2 »). Les SRCAE intégreront les schémas ENR qui définiront notamment, par zones géographiques, les objectifs qualitatifs et quantitatifs à atteindre en matière de valorisation du potentiel énergétique terrestre, renouvelable et de récupération, conformément aux objectifs issus de la réglementation communautaire relative à l'énergie et au climat. Cette démarche territoriale, qui permettra de développer le potentiel des territoires, devra être compatible avec les PPI, sans que, pour autant, ces schémas régionaux s'apparentent à des PPI régionales, la notion d'équilibre offre-demande n'étant pas pertinente à cette maille.
- Le Plan Climat-Energie Territorial « PCET » (article 75 loi « Grenelle 2 »), est un projet territorial de développement durable pour la lutte contre le changement climatique. Les collectivités qui l'établissent doivent tenir compte de leurs compétences ainsi que de leur bilan des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans la perspective d'une réduction par 4 de leurs émissions. Le PCET est un projet qui permettra de lutter efficacement contre le changement climatique et vise la croissance des énergies renouvelables ainsi qu'une amélioration de l'efficacité énergétique.

1.5. CONTEXTE FISCAL

1.5.1. Incinération

- TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes

Cette taxe sur la tonne de déchet traité est une incitation certaine à l'amélioration du taux d'efficacité énergétique.

La directive européenne cadre du 19 novembre 2008 a introduit pour les unités d'incinération des déchets non dangereux, une évolution de taille, reprise par le Grenelle de l'environnement : l'incinérateur dont l'efficacité énergétique dépasse un certain seuil (60 % pour les incinérateurs existants ou 65% pour les nouvelles installations) pourra bénéficier du statut de valorisation.

La retombée est de taille en terme financier car le mode de traitement par incinération avec performances énergétiques élevées bénéficiera d'un dégrèvement de TGAP (taxe générale sur les activités polluantes) pouvant aller jusqu'à 50%. La loi de finances 2009 fixe la TGAP de 1,5 à 7 euros (14 euros en 2013) par tonne incinérée.

TGAP en €/Tonne de déchets traités	2010	2011	2012	2013
A - Base + ISO 14001	4,00	5,20	6,40	8,00
B - Base + performance énergétique	3,50	4,55	5,60	7,00
C - Base + NOx < 80 mg/Nm ₃	3,50	4,55	5,60	7,00
D - Base + A et B, A et C, B et C ou A et B et C	2,00	2,60	3,20	4,00
Autres	7,00	11,20	11,20	14,00

1.5.2. Biogaz de décharge

En application des dispositions de l'article 266 du code des douanes, modifié par la loi n° 2010-1658 du 29 décembre 2010 de finances rectificative pour 2010, la réfaction de TGAP s'applique aux tonnages de déchets réceptionnés entre la date de début d'exploitation du casier dans les conditions de l'arrêté préfectoral autorisant l'exploitation et le 31 décembre de l'année au titre de laquelle la taxe est due.

DESIGNATION DES MATIERES ou opérations imposables	Unité de perception	Quotité en euros	
		2010	2011
Déchets réceptionnés dans une installation de stockage de déchets ménagers et assimilés (DMA) non autorisée en application du titre 1 du livre V du code de l'environnement ¹ pour ladite réception	Tonne	60	70
Déchets réceptionnés dans une installation de stockage de déchets ménagers et assimilés (DMA) autorisée en application du titre 1 du livre V du code de l'environnement ¹ pour ladite réception : A. - Ayant fait l'objet d'un enregistrement dans le cadre du système communautaire de management environnemental et d'audit (EMAS) défini par le règlement (CE) n° 761/2001 du Parlement européen et du Conseil du 19 mars 2001, ou dont le système de management environnemental a été certifié conforme à la norme ISO 14001 par un organisme accrédité	Tonne	17	17
A. <i>bis</i> - cas A (EMAS/ISO 140001) pour les tonnages bénéficiant de l'alternodalité de transport (ferroviaire ou fluvial)	Tonne	16,40	16,40
B. - Faisant l'objet d'une valorisation énergétique du biogaz de plus de 75 %	Tonne	11	11
B <i>bis</i> - cas B (valorisation énergétique du biogaz de plus de 75 % pour les tonnages bénéficiant de l'alternodalité de transport (ferroviaire ou fluvial)	Tonne	10,40	10,40
C. - Stockés et traités selon la méthode d'exploitation du bioréacteur : dans un casier équipé dès sa construction des équipements de captage du biogaz et de réinjection des lixiviats, la durée d'utilisation du casier étant inférieure à 18 mois et l'installation étant équipée d'un dispositif de valorisation du biogaz mentionné dans l'arrêté préfectoral d'autorisation	Tonne		7
C <i>bis</i> - cas C (stockage et traitement selon la méthode d'exploitation du bioréacteur) pour les tonnages bénéficiant de l'alternodalité de transport (ferroviaire ou fluvial)	Tonne		6,40
D. - Autre	Tonne	20	20

1.6.1. Tarifs d'obligation d'achat électricité

1.6.1.1. Incinération

L'électricité produite à partir des énergies renouvelables et de la cogénération permet l'obtention d'un certificat donnant droit à l'obligation d'achat.

L'article 10 de la loi n°2000-108 du 10 février 2000 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité prévoit que diverses installations puissent bénéficier de l'obligation d'achat, par EDF ou les distributeurs non nationalisés, de l'électricité qu'elles produisent.

Peut bénéficier de l'obligation d'achat, l'électricité produite à partir :

- des installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés ou qui visent l'alimentation d'un réseau de chaleur ;
- des installations qui utilisent des énergies renouvelables ou qui mettent en œuvre des techniques performantes en termes d'efficacité énergétique, telles que la cogénération.

Pour les installations qui valorisent des déchets ménagers ou assimilés ou qui visent l'alimentation d'un réseau de chaleur, aucun plafond n'est fixé. Toutefois, pour les installations qui visent l'alimentation d'un réseau de chaleur, la puissance installée doit être en rapport avec la taille de ce réseau de chaleur existant ou à créer.

Les tarifs actuels sont les suivants :

Filière	Arrêtés régissant l'achat de l'électricité	Durée des contrats	Exemples de tarifs pour les installations mise en service à la date de parution des arrêtés
Cogénération	<u>31 juillet 2001</u>	12 ans	6,1 à 9,15 c€/kWh environ en fonction du prix du gaz, de la durée de fonctionnement et de la puissance
Déchets ménagers sauf biogaz	<u>2 octobre 2001</u>	15 ans	4,5 à 5 c€/kWh + prime à l'efficacité énergétique comprise entre 0 et 0,3 c€/kWh

1.6.1.2. Méthanisation et Biogaz de décharge

- Tarifs d'achats de l'électricité

Un arrêté du 19 mai 2011 fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz.

Conformément à l'article 1^{er} cet arrêté fixe les conditions d'achat de l'électricité produite par :

- les installations qui utilisent, à titre principal, l'énergie dégagée par la combustion ou l'explosion de gaz résultant de la décomposition ou de la fermentation de produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (comprenant les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes (comprenant les industries agroalimentaires) ou du traitement des eaux ;
- les installations qui valorisent, en utilisant le biogaz, des déchets ménagers ou assimilés mentionnés.

D'après l'article 3, une demande de contrat d'achat doit être déposée par le producteur auprès de l'acheteur concerné.

Les tarifs d'achats de l'électricité à partir des filières de méthanisation et de valorisation du biogaz de décharge sont les suivants :

Filière	Pmax	Tarif de base en (c€/kWh) : arrêté du 19 mai 2011	Prime à l'efficacité énergétique	Ancien tarif pour comparaison : arrêté du 10 juillet 2006 abrogé
Méthanisation	150 kW	13,37	La prime à l'efficacité énergétique V est comprise entre 0 à 4 c€/kWh	7,5 c€/kWh à 9 c€/kWh en France métropolitaine selon la puissance installée 10,3 à 8,6 c€/kWh dans les Départements d'Outre-mer et dans la collectivité territoriale de St-Pierre-et-Miquelon et à Mayotte + prime à l'efficacité énergétique comprise entre 0 et 3 c€/kWh + prime à la méthanisation de 2 c€/kWh
	300 kW	12,67		
	500 kW	12,18		
	1000 kW	11,68		
	2000 kW	11,19		
ISDND	150 kW	9,745		Entre 7,5 et 9 c€/kWh selon la puissance, + prime à l'efficacité énergétique comprise entre 0 et 3 c€/kWh
	2 MW	8,121		

L'arrêté prévoit aussi une prime pour le traitement des effluents d'élevage hors ISDND a été est comprise entre **0 et 2,6 c€/kWh** rendant ainsi les projets intéressant pour les éleveurs.

- Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique V de l'installation est calculée sur une base annuelle et est définie comme suit :

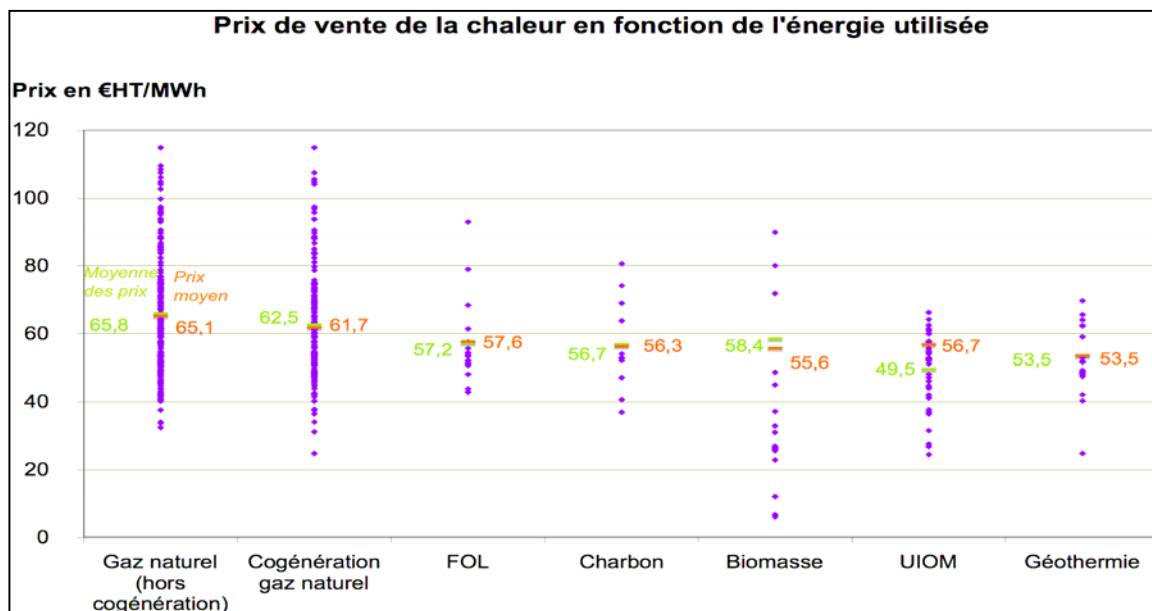
$$V = \frac{E_{th} - E_{elec}}{0,97 \times E_p}$$

- E_{th} est l'énergie thermique valorisée autrement que par la production d'électricité, l'autoconsommation (1) ou la transformation des intrants. Pour le calcul de V, seule est comptabilisée l'énergie thermique qui alimente une activité consommatrice en chaleur créée en même temps que l'installation ou vient en substitution d'un moyen de production d'énergie thermique fossile (charbon, gaz, pétrole et leurs dérivés) ;
- E_{elec} est l'énergie électrique produite nette, c'est-à-dire la production électrique totale produite laquelle on retire la consommation électrique des auxiliaires ;
- E_p est l'énergie primaire en PCI du biogaz en entrée de centrale.

A l'exception des phases de démarrage de l'installation, les besoins en énergie thermique nécessaires à la production du biogaz, tel que le chauffage des cuves de digestion pour une installation de méthanisation, sont obligatoirement satisfaits par l'énergie thermique dégagée de la valorisation du biogaz produit par cette même unité.

1.6.2. Coût moyen de la chaleur

Le prix moyen du MWh de chaleur en 2009 était de 60,2 €HT/MWh sur les réseaux de chaleur français.



Prix de vente en fonction de l'énergie majoritaire (30%) (Données AMORCE : RCE10_prix de vente de la chaleur en 2009)

Pour les réseaux de chaleur alimentés à plus de 30% par des UIOM, le prix moyen est de l'ordre de 56,7 €HT/MWh. Les principes de facturation des réseaux de chaleur sont, de façon simplifiée, ceux d'une tarification dite binomiale :

- une part fixe, ou abonnement, qui est dépendante de la « puissance souscrite » par l'utilisateur du réseau de chaleur et qui reprend en gros l'ensemble des charges d'exploitation du réseau de chaleur hors achat de combustible (mais y compris l'amortissement des installations),
- une part variable liée à la consommation d'énergie mesurée par compteur à calories en sous-station, qui correspond aux achats de combustible ou d'énergie « prête à l'emploi » à un fournisseur extérieur (comme c'est le cas pour l'achat d'énergie à une UVE).

La part fixe représente en moyenne 35% du prix de vente, la part variable est donc de 39 €HT/MWh livré en sous-station.

Le prix-plafond que peut engager le gestionnaire du réseau de chaleur pour que la récupération sur UIOM ne dégrade pas son prix de vente peut alors être déterminé (il est fonction du rendement moyen de distribution du réseau de chaleur).

Les prix, la composition des prix de vente de la chaleur et les rendements de distribution des réseaux de chaleur étant extrêmement variables d'un réseau à l'autre, ce raisonnement « moyen » doit être adapté au cas par cas.

Le constat fait sur les prix de vente de l'énergie par les réseaux de chaleur montre que ceux pour lesquels l'énergie issue des UVE représente plus de 30% du bouquet énergétique sont, en 2009, parmi les plus performants.

(Source Amorce)

1.7. ASPECTS SCIENTIFIQUE DE L'ETUDE

Bien qu'étant une source de chaleur favorable, il existe des limites physiques dans la valorisation d'énergie à bas niveau de température. Il s'agit notamment d'une barrière exergétique dépendant des interactions avec le milieu.

- **Quelques notions sur l'exergie**

En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de calculer le travail maximal que peut fournir un système à l'extérieur lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement. Le travail maximum récupérable est égal à l'opposé de la variation d'exergie au cours de la transformation

L'exergie est un travail réversible accompagnant toute interaction plus ou moins libre avec le milieu. Elle permet la mesure de la quantité et de la qualité d'une source énergétique. On distingue l'exergie primaire physique/réactionnelle, l'exergie secondaire réactionnelle/diffusionnelle et l'exergie (échange thermique avec le milieu).

- **Exergie primaire physique/réactionnelle** : on parle d'exergie primaire lorsqu'il y a un équilibre partiel entre le système et le milieu. Dans ce cas, l'exergie s'écrit : $ex = (h - h_0) - T_0 (s - s_0)$

L'indice 0 étant celui du milieu.

- **Exergie secondaire (réactionnelle/diffusionnelle)** : on parle d'exergie secondaire lorsqu'il y a équilibre total c'est-à-dire des interactions libre avec le milieu. Dans ce cas l'exergie s'écrit :

$$Ex = (h_{00} - h_0) - T_0 (s_0 - s_{00})$$

- **Echange thermique avec le milieu** : c'est la forme d'exergie la plus utilisée pour quantifier l'exergie d'un système. L'exergie s'écrit alors : $ex = Q (1 - T_0/T)$

Parmi les différentes formes permettant de quantifier l'exergie d'un système, dans le cadre de cette étude nous nous appuyerons sur l'échange thermique avec le milieu pour statuer sur les aspects scientifiques de l'étude.

- **Exergie dans le cadre de l'étude**

Dans le cadre de cette étude, on souhaite récupérer de la chaleur fatale à des températures comprises entre 70 et 200°C.

Les énergies échangées entre un système et son environnement peuvent être qualifiées d'énergies flux. Pour transformer l'énergie thermique en énergie mécanique il faut disposer d'au moins une source froide température absolue nulle. En effet, la transformation réversible en énergie mécanique W d'une quantité de chaleur Q à la température T nécessite l'utilisation d'un moteur de Carnot qui rejette une partie de cette énergie thermique à une source froide.

En admettant comme source froide l'environnement extérieur à température ambiante T_a (source froide gratuite), la quantité d'énergie thermique transformable en énergie mécanique s'écrit :

$$W = Q (1 - T_0/T) = h * Q \text{ où } h \text{ est le facteur de Carnot.}$$

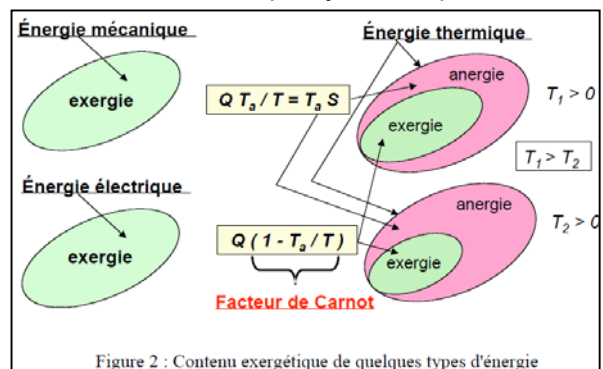


Figure 2 : Contenu exergétique de quelques types d'énergie

(Source : Journées internationales de Thermique ; Ali 28-30 août 2007)

2. GISEMENTS / UTILISATEURS D'ÉNERGIE À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 2

2.1. INTRODUCTION AUX TECHNIQUES DE TRAITEMENT THERMIQUE DES DÉCHETS

Le traitement thermique des déchets repose sur des processus différents parmi lesquels figurent l'incinération, la co-incinération, l'évapo-incinération, ... pour ne citer que ceux là.

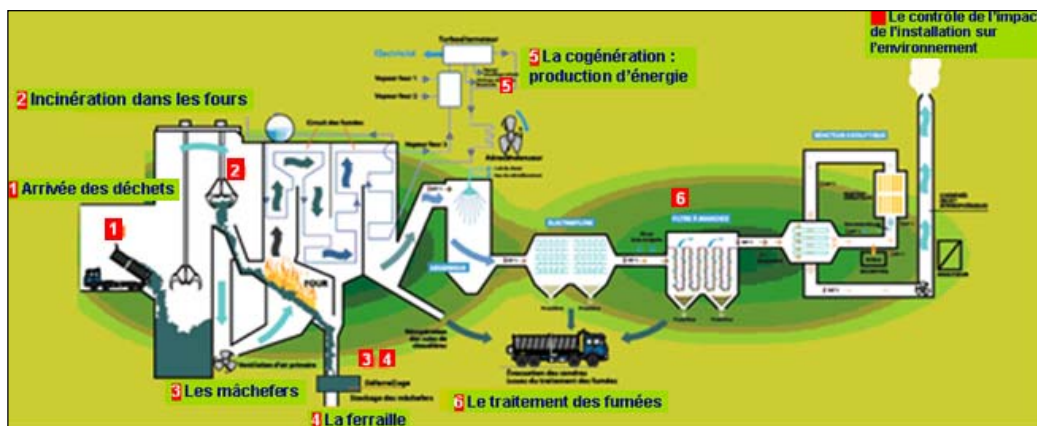
Avant d'évaluer le gisement potentiel d'énergie à bas niveau de température issu du traitement thermique des déchets, nous allons rappeler le principe de fonctionnement des principales méthodes.

2.1.1.1. Incinération

Ayant pour but de réduire de 90% du volume et 70% du poids des déchets, l'incinération désigne « l'action de réduire en cendre » et s'applique aux :

- ordures ménagères brutes ou mélangées à des déchets non dangereux ou à des boues ;
- déchets dangereux dans des fours spécifiques, en général en présence d'un appoint de combustible ;
- refus de tri (visant le recyclage ou le compostage)

L'incinération des déchets se produit à une température de fonctionnement comprise en 800 et 1000°C en milieu oxydant.



Le principe de fonctionnement des fours d'incinérations peut être résumé en 6 étapes :

- Arrivée des déchets
- Incinération dans les fours
- Extraction des mâchefers
- Récupération de l'énergie des fumées

- Le traitement des fumées
- Le rejet des fumées à l'atmosphère

2.1.1.2. **Co-incinération**

Définition réglementaire : Arrêté du 20 septembre 2002

Une installation de co-incinération est une installation fixe ou mobile dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels et:

- qui utilise des déchets comme combustible habituel ou d'appoint, ou
- dans laquelle les déchets sont soumis à un traitement thermique en vue de leur élimination.

Si la co-incinération a lieu de telle manière que l'objectif essentiel de l'installation n'est pas de produire de l'énergie ou des produits matériels, mais plutôt d'appliquer aux déchets un traitement thermique, l'installation doit être considérée comme une installation d'incinération au sens du point 4.

C'est le cas par exemple dans les cimenteries, les sidérurgies et les fours à chaux qui sont de gros consommateurs d'énergies. Dans ces filières, le déchet est utilisé comme combustible d'appoint ; l'énergie étant directement récupérée dans le processus.

Dans les cimenteries les déchets sont traités tout en produisant du ciment. Utilisés comme combustibles habituels ou d'appoint, ils servent comme matières de remplacement des produits carriers utiles à la fabrication du ciment.

A titre d'exemple, le processus de co-incinération est utilisé dans la cimenterie Calcia située à Airvault. Le principe est divisé en 2 parties amont et aval. La phase amont comprend l'extraction, le concassage et la préparation du cru. La phase aval comprend les étapes de cuisson, broyage, stockage et expédition.

2.1.1.3. **Évapo-incinération**

Elle est destinée au traitement des fluides usagés (huiles solubles, synthétiques ...).

L'évapo-incinération allie les techniques de l'incinération et du traitement physico-chimique. Le principe consiste à séparer par évaporation une fraction gazeuse (vapeur d'eau et composés organiques volatils) d'une fraction liquide concentrée.

Les vapeurs dégagées en tête de l'appareil subissent donc un traitement d'oxydation thermique à haute température. Ce traitement thermique détruit la totalité des polluants (phénols, ...) et la charge organique résiduelle. Le concentrât liquide d'hydrocarbures à haut pouvoir calorifique obtenu en fond d'évaporateur est quant à lui, soit valorisé, soit utilisé comme combustible pour l'incinération classique.

La fraction gazeuse est donc incinérée à haute température dans un four spécifique et la fraction liquide est incinérée avec les autres déchets dangereux dans le four classique (850 ou 1100°C).

L'évapo-incinération permet de séparer l'eau à l'état de vapeur et de concentrer les composés huileux qui peuvent être incinérés ou valorisés. Cette méthode s'applique à toutes les catégories de fluides aqueux.

2.1.1.4. Vitrification et traitement des REFIOM

L'incinération des déchets ménagers en particulier donnent naissance à deux sous-produits que sont les mâchefers et les REFIOM (Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères).

Plus précisément, les REFIOM sont générés lors du traitement d'épuration des fumées.

Les REFIOM, sont des déchets dangereux et sont généralement enfouis dans les installations de stockage de déchets dangereux (ISDD) dites de classe 1.

Les techniques de stabilisation par vitrification figurent parmi les techniques envisageables pour le traitement des REFIOM.

La vitrification des déchets consiste à chauffer les déchets à une température telle que la fraction non-combustible du déchet fonde (c'est-à-dire à une température supérieure au point de fusion). Ce liquide est ensuite refroidi. Le refroidissement est généralement brutal, pour donner lieu à un produit s'apparentant à un verre (structure amorphe) dénommé "vitrifiat". Le refroidissement rapide est souvent réalisé par une trempe à l'eau, ou à l'air. Dans certains procédés, le refroidissement peut aussi être beaucoup plus lent, ce qui permet d'obtenir un produit cristallisé dont la structure s'apparente à une roche basaltique.

Les procédés dont la fonction principale est de vitrifier le déchet traite généralement des déchets principalement minéraux, bien qu'ils soient à même de traiter également des déchets contenant une certaine quantité de matière combustible. L'énergie nécessaire à la fusion est apportée par une source externe telle que l'électricité ou gaz naturel, ou autre combustible.

Certains procédés de gazéification ont un étage de combustion à une température supérieure à la température de fusion des matériaux minéraux contenus dans le déchet. Ces procédés conduisent donc également à la production d'un vitrifiat, après refroidissement brutal du produit en fusion. La chaleur nécessaire pour obtenir la fusion peut être apportée par le déchet lui-même si son pouvoir calorifique est suffisant (ce qui est généralement le cas des ordures ménagères), ou par l'énergie des déchets complétée par une énergie externe (électricité, gaz naturel, etc.) si nécessaire.

Le vitrifiat est un solide obtenu par refroidissement d'un liquide surfondu :

- Si le refroidissement est brutal on parvient à une phase vitreuse (amorphe).
- Si le refroidissement est lent, on aboutit à une phase cristalline.

Les déchets concernés sont :

- les déchets dangereux de type REFIOM
- les déchets d'amiante
- les déchets radioactifs
- les résidus de gazéification

Pendant le processus de vitrification, les composés incombustibles fondent et sont transformés en « verre » (vitrifiat) qui piège de façon durable les polluants. C'est un produit inerte pouvant être envoyé en installation de stockage de classe III ou utilisé comme matériau de remblai ou agrégat pour le BTP. C'est un procédé qui assure la dissociation des dioxines et furanes.

Les produits générés par la vitrification sont :

En France, il existe un procédé de vitrification des déchets dangereux : Usine de Morcenx (40), usine INERTAM d'Eurolasma traitant les déchets d'amiante.

2.1.1.5. Oxydation par voie humide

L'oxydation par voie humide ou hydrothermale (OHT) est une technique qui consiste à oxyder dans l'eau les molécules organiques pour les transformer en produits minéraux en présence d'oxygène (air, air enrichi en oxygène ou oxygène pur) dans un réacteur fermé à une température de 150 à 450°C et une pression de 100 à 300 bars.

La matière organique oxydée peut être soit sous forme dissoute dans le liquide soit sous forme de matière en suspension ou les deux.

Tous les déchets contenant des matières oxydables, organiques ou minérales et pouvant se présenter sous forme solubles ou en suspension dans un milieu aqueux sont concernés par l'oxydation hydrothermale.

L'OHT est généralement utilisée pour traiter les déchets liquides chargés en matière organique pour lesquels les procédés de traitement conventionnels sont inefficaces (soit parce que les effluents sont trop dilués pour être incinérés, soit parce qu'ils sont trop toxiques pour subir un traitement biologique).

Appliquée au traitement des déchets ou d'effluents, l'OHT est destinée à traiter des produits contenant une forte proportion d'eau. La particularité de ces procédés est qu'ils ne nécessitent pas l'évaporation de l'eau avant oxydation de la matière organique.

L'oxydation est réalisée en phase liquide (par différence avec l'incinération). Elle permet de traiter des charges organiques difficilement traitables par voies biologiques (teneur en organiques trop élevée, DCO « dure » c'est-à-dire difficilement oxydable par voie biologique, organiques toxiques, etc.), ainsi que des flux ayant une charge organique trop faible (et donc un PCI trop faible) pour une incinération sans combustible d'appoint. Les déchets typiquement traités par l'OHT sont les boues urbaines et industrielles, des eaux process, des effluents liquides (aqueux), des déchets dangereux liquides...

Les applications visées et/ou réalisées par la technique OHT sont :

- Traitement ou stabilisation de boues de stations d'épuration
- Traitement des effluents générés par la synthèse organique,
- Traitement des déchets de l'industrie papetière
- Traitement de liqueurs caustiques de raffinerie (contenant des traces de cyanures et sulfures)
- Traitement des déchets des distilleries d'alcools
- Traitement d'effluents de l'industrie nucléaire
- Délignification du bois et blanchiment de la pulpe
- Sécurisation d'explosifs avant entreposage
- Traitement de déchets du métabolisme humain sur missions spatiales habitées

2.2. CARACTERISATION DU GISEMENT D'ENERGIE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE VALORISABLE

L'identification des gisements d'énergie à bas niveau de température intéresse les unités suivantes :

- Unité de traitement thermique des déchets non dangereux (incinération)
- Unités de traitement thermique des déchets dangereux :
 - o traitement des déchets dangereux
 - o vitrification
 - o plasma

Pour les installations traitant des déchets dangereux, on s'intéressera uniquement au traitement thermique où une grande quantité d'énergie est produite sans récupération (quench en sortie de l'unité) et il sera identifié l'incidence du caractère dangereux sur le dispositif.

- Unité de méthanisation :
 - o OMR
 - o Boues
 - o Effluents
- Valorisation de la chaleur excédentaire d'une cogénération
- Récupération chaleur en fonderie
- Récupération d'énergie sur les buées en sortie de séchoir

2.2.1. Gisement valorisable dans les unités de valorisation énergétique des déchets

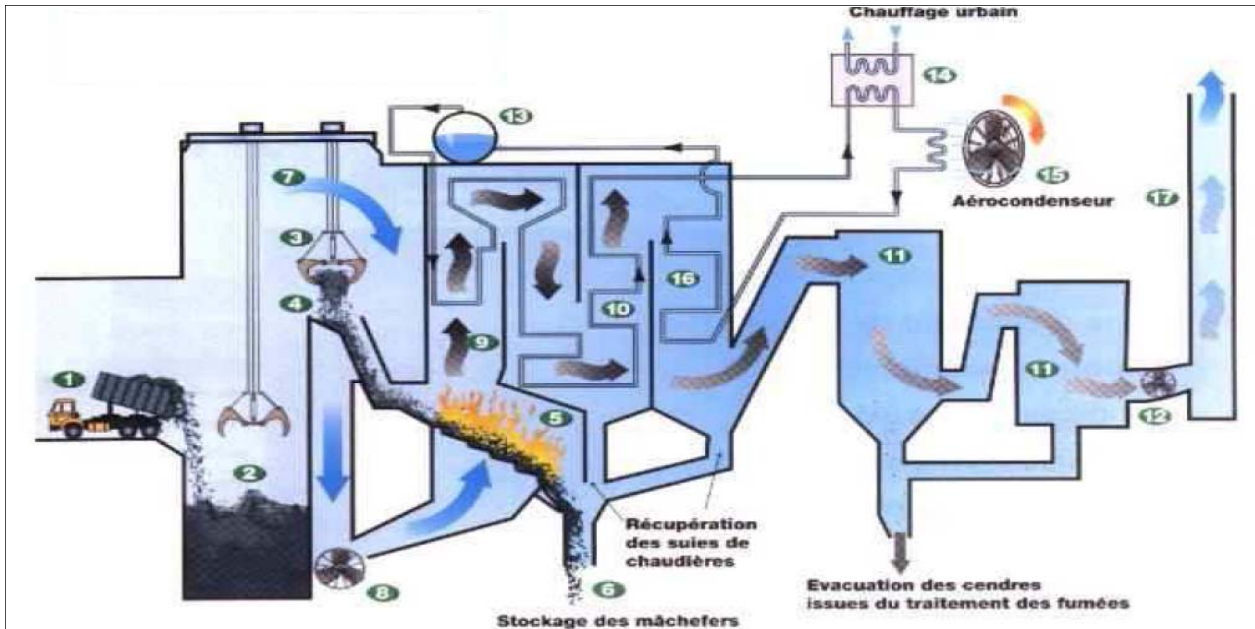
Les centres de valorisation énergétique des déchets sont constitués de plusieurs postes de récupération d'énergie sur toute la ligne de production. D'une manière générale, toutes les unités d'incinération des ordures ménagères et résiduelles avec valorisation énergétique disposent des postes de récupération et valorisation d'énergie suivant :

- Chaudière de récupération d'énergie (vapeur saturée ou surchauffée : 200-400°C) couplée à un réseau de chaleur ou à une turbine à vapeur
- Réchauffeur d'air

Mais il est possible de prévoir de récupérer et valoriser l'énergie sur les postes suivants :

- Gaine de fumées (variation température des fumées entre 150 et 300°C) suivant les dispositifs de traitement des fumées
- Aérocondenseurs (50-130°C)
- Cheminée (150 -200°C)
- Réseau de condensats (30-80°C)
- Extracteurs de mâchefers (buées : 90°C)
- Circuit de refroidissement (10-80°C)

Le schéma ci-après propose un synoptique type de fonctionnement d'un four d'incinération avec valorisation énergétique. Un zoom sur les principaux postes de récupération d'énergie à bas niveau de température plus précisément sera fait par la suite.



La France compte plus de 110 unités de valorisation énergétique des déchets sur près de 140 unités d'incinération de déchets ménagers. Nous allons évaluer le gisement d'énergie potentielle récupérable et valorisable à bas niveau de température en nous basant sur les caractéristiques annuelles de production à savoir :

- les tonnes de déchets incinérés sur une année
- la puissance totale électrique installée
- le rendement de conversion d'électricité
- le nombre d'heures de fonctionnement des fours
- le volume de fumées rejeté à l'atmosphère par tonne de déchets
- le pourcentage de production de mâchefers et de REFIOM par tonne de déchets incinérés

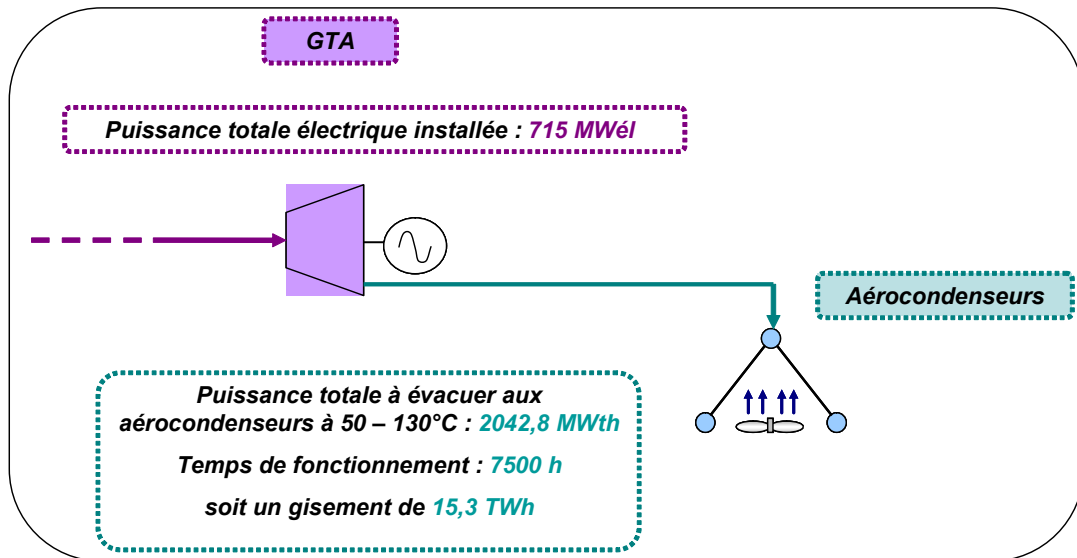
Tous ces paramètres vont nous permettre de caractériser :

- le gisement d'énergie à bas niveau de température évacué aux aérocondenseurs
- le gisement d'énergie récupérable au niveau des fumées
- le gisement d'énergie récupérable sur les extracteurs de mâchefers
- le gisement d'énergie récupérable sur le réseau de condensats

2.2.1.1. Gisement d'énergie à évacuer aux aérocondenseurs

En 2009, la puissance totale électrique installée pour la totalité des incinérateurs (112) valorisant leur énergie en turbine à vapeur était environ de 715 MW_{él}. En prenant un rendement de conversion de 35%, le gisement d'énergie à évacuer aux aérocondenseurs est estimé de la manière suivante :

- Puissance électrique : $P_{\text{élec}} = 715 \text{ MW}_{\text{él}}$
- Rendement de conversion : 0,35 (estimé selon les caractéristiques moyennes des turbines).
- Puissance à évacuer aux aérocondenseurs : $P_{\text{aéro}} = P_{\text{élec}}/0,35 = 2042,8 \text{ MW}_{\text{th}}$



Le gisement d'énergie à évacuer aux aérocondenseurs à une température de 50 à 130°C est donc estimé à 2042,8 MW_{th} soit **15,3 TWh** sur la base de 7500 h de fonctionnement moyen ($2042,8 * 7500 = 15,3 \text{ TWh}$).

La majorité des aérocondenseurs sont dimensionnés pour une condensation à une pression de 0,150 bar. A cette pression, **la température de la vapeur envoyée aux aérocondenseurs approche les 50-55°C. Il est donc difficile de valoriser cette chaleur.**

En revanche, si la température de rejet en sortie de turbine s'approche des 90°C pour une pression de 0,900 bar il est possible d'imaginer une valorisation de cette chaleur pour le chauffage de locaux à basse température. A cette température l'exergie calculée est la suivante :

EXERGIE = $Q (1 - T_0/T) = 5,95 \text{ TWh}$	<i>avec :</i>	$Q = 15,3 \text{ TWh}, T_0 = 55^\circ\text{C}^2 \text{ et } T = 90^\circ\text{C}$
---	---------------	---

En considérant un logement dont la consommation annuelle est de 11,7 MWh/an (exemple logement de type D), la quantité d'énergie évacuée aux aérocondenseurs correspond à la consommation annuelle en chauffage d'environ **508 500 foyers**.

Données AirParif

Chauffage et ECS hors consommation électrique :
180 kWh d'énergie utile par m² habitable pour le chauffage et l'ECS.
 Soit **180*65 = 11 700 kWh** énergie utile par logement de 65m² (surface moyenne d'un logement chauffé par un réseau de chaleur)

² T_0 est pris égale à 55°C pour correspondre aux besoins de chaleur basse température pour le chauffage de bâtiment.

2.2.1.2. Énergie des fumées rejetées à l'atmosphère

En 2009, les 112 UVE de France ont incinérées 11 millions de tonnes d'OMR.

Le volume généré de fumées par une tonne de déchets incinérées est estimé à 4 500 - 5 500 Nm³.

En considérant qu'en moyenne une tonne de déchets génère 5 000 Nm³ de gaz, le volume de gaz généré est estimé à 55 000 millions de Nm³.

Les UVE ont donc rejetées en 2009 près de 55 000 millions de Nm³ de fumées dans l'atmosphère sur une plage de température comprise entre 100 - 200°C suivant le dispositif de traitements des fumées mis en œuvre. En effet, il diffère suivant la date de mise en service correspondant à la date des mises aux normes et aux dispositifs de traitement choisis.

En termes d'énergie, si on tient compte :

- un coefficient volumique global de déperdition des fumées : 0,34 W.m⁻³.°C
- du volume généré : 55 Md m³
- de la température des fumées : 110 à 180 °C pour les températures les plus couramment rencontrées.

*Le gisement d'énergie s'élève à : 0,34 * volume * ΔT°C³ = Puissance valorisable sur les fumées*

Entre **1** et **2,3 TWh** d'énergie peuvent être valorisée sur les fumées, représentant la consommation annuelle de près de **85 000** à **200 000** foyers en chauffage pour des logements de classe D.

• **Limites de récupération des énergies des fumées (corrosion)**

La corrosion est la dégradation progressive d'un matériau de construction par l'action d'agents chimiques ou électrochimiques inhérente à une humidité agressive de l'air (pluies acides), respectivement de la pollution de l'air et de l'eau. Il existe plusieurs types de corrosion tous dépendants de l'environnement corrosif. L'acide sulfurique prend naissance à partir de SO₃ et de la vapeur d'eau produite par la combustion de l'hydrogène du fuel.

Causée par les gaz de combustion on compte dans les fours et les chaudières deux types de corrosion à savoir haute et basse température.

La corrosion à haute température peut être influencée par la température du métal, la température des fumées, l'excès d'air,... Tandis que la corrosion à basse température est influencée par la teneur en eau.

Les fours, les chaudières et globalement tous les générateurs de chaleur fonctionnant au fuel (domestique lourd ou résiduaire), au charbon,... sont exposés à la corrosion acide à basse température dès que le combustible utilisé contient quelques dixièmes de pourcent de soufre ou de chlore et que certaines conditions météorologiques sont réunies. C'est également le cas des incinérateurs de déchets.

Pouvant se développer lorsque les générateurs sont en fonctionnement, c'est pendant les arrêts longue durée que la corrosion est la plus intense.

L'amélioration du rendement des équipements modernes se traduit par l'abaissement de la température des fumées, ce qui rend vulnérable tous les équipements situés en aval du point de rosée acide.

³ T₀ est pris égale à 55°C pour correspondre aux besoins de chaleur basse température pour le chauffage de bâtiment.

Le mélange "eau-acide" se condense sur les parties froides dès que la température atteint le point de rosée-acide variant entre 100° et 150°C en fonction de la teneur en soufre. C'est notamment le cas dans les générateurs qui ne fonctionnent qu'une partie de la journée ou de la semaine ainsi que des chaudières à eau chaude communément utilisées (T<110°C).

Provenant de la formation d'acide survenant de l'oxydation du soufre contenu dans le combustible, le risque de condensation acide débute dès qu'on utilise le générateur de chaleur en dessous de la température de condensation de l'acide concerné.

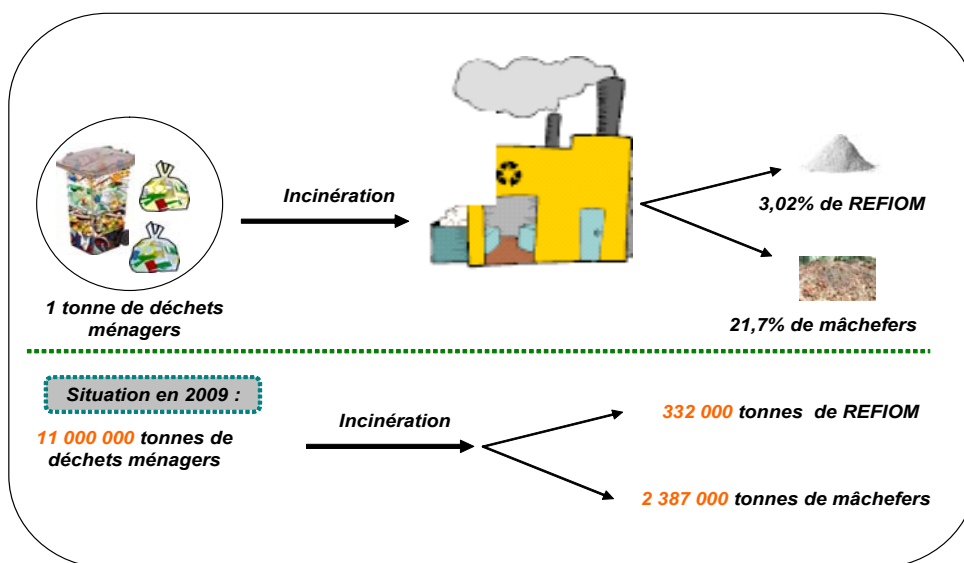
Les régulations de chaudière par exemple forcent la chaudière à monter rapidement au delà de la température de condensation en réalisant une boucle primaire, ou en empêchant le refroidissement de la chaudière (ex. : pas de circulation au démarrage).

La température des fumées ne peut donc être abaissée de manière excessive aux risques de corroder l'installation.

2.2.1.3. Gisement d'énergie dans les mâchefers et REFIOM

L'incinération des déchets donne naissance à deux types de résidus à savoir les mâchefers et les REFIOM.

1 tonne de déchet incinérée produit environ : 250 à 300 kg de mâchefers et 20 à 50 kg de REFIOM.

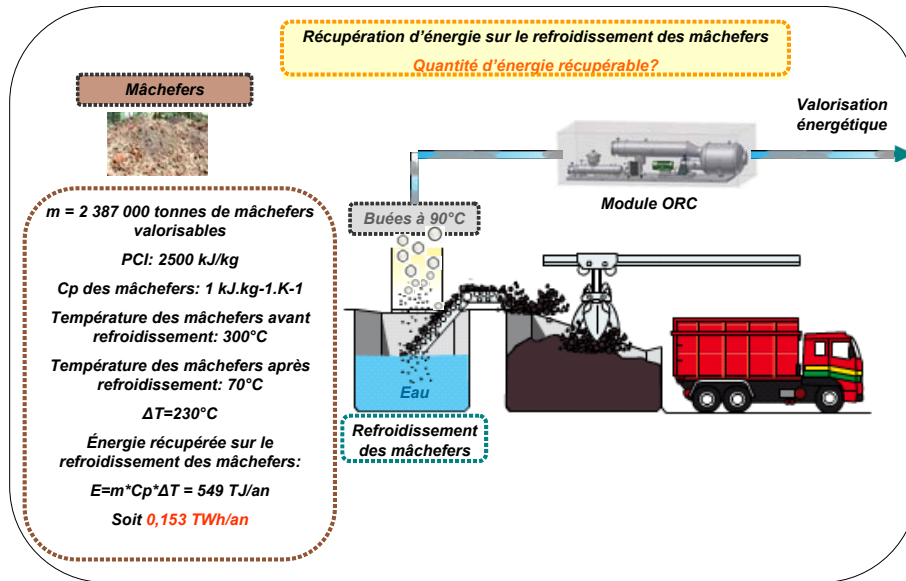


En considérant qu'une tonne de déchets incinérée génère en moyenne 21,7% de mâchefers valorisables, le gisement de mâchefers produits s'élève à 2 387 000 tonnes de mâchefers.

Sur la base de 3,02% de REFIOM valorisables produit par tonne de déchets incinérés, la production de REFIOM pour l'année 2009 est environ de 332 000 tonnes.

Il est possible, au niveau des extracteurs à mâchefers de récupérer de la chaleur latente de l'eau par refroidissement. En effet, les mâchefers chauds d'incinération à environ 300°C sont collectés puis refroidis au contact de l'eau en libérant de la chaleur ; des buées à environ 90°C. Ces buées pourraient être valorisées par utilisation de groupe de production électrique.

Dans la suite nous estimerons le gisement d'énergie récupérable sur les buées après refroidissement des mâchefers.



EXERGIE = $Q^4 (1 - T_0/T) = 47,6 \text{ GWh}$ avec : $Q = 15,3 \text{ TWh}$, $T_0 = 55^\circ\text{C}^5$ et $T = 90^\circ\text{C}$

La quantité d'énergie évacuée aux niveaux des installations de refroidissement des mâchefers correspond à la consommation annuelle en chauffage d'environ **4 050 foyers** (en moyenne 36 foyers par UVE).

Au vue des faibles quantités missent en jeu par UVE (112 unités en France), nous pouvons affirmer qu'il est aujourd'hui difficile de prévoir la valorisation énergétique de cette chaleur.

⁴ Prise en compte d'un coefficient d'échange de 0,80

⁵ T_0 est pris égale à 55°C pour correspondre aux besoins de chaleur basse température pour le chauffage de bâtiment.

2.2.1.4. Gisement d'énergie dans les unités de traitement thermique des déchets dangereux

En France, on dénombre plusieurs centres spécialisés dans le traitement des déchets dangereux. Classés en plusieurs catégories, les déchets dangereux les plus connus sont : emballages souillés, huiles usagées, fluides d'usinage usagés, solvants usés, déchets de traitement de surface, déchets organohalogénés, PCB et PCT, déchets de peintures, déchets de l'imprimerie et de l'industrie graphique, piles et accumulateurs, déchets contenant du mercure, déchets d'amiante, déchets d'activités de soin,...

Ces déchets peuvent être traités et valorisés de plusieurs façons. Dans le cadre de cette étude on ne s'intéressera qu'aux traitements thermiques (incinération, co-incinération, évapo-incinération, plasma, vitrification).

On compte une soixantaine de centres spécialisés dans le traitement des déchets dangereux en France :

- une dizaine de centres d'incinération spécifiques aux déchets dangereux ;
- une vingtaine de centres de co-incinération de déchets dangereux ;
- une dizaine de centres d'évapo-incinération de déchets dangereux ;

En 2009, 1 522 000 tonnes de déchets dangereux ont été traités par incinération dans des fours spécifiques, 1 700 893 par co-incinération et 350 600 par évapo-incinération.

Une quantité d'énergie fatale importante pourrait être valorisée sur ces installations notamment par récupération d'énergie après le quench thermique en vitrification.



2.2.2. Gisement d'énergie dans les unités de méthanisation et de valorisation du biogaz de décharge

En 2008, la production du biogaz s'élevait à 6 640 GWh_{PCI} dont :

- Méthanisation : 1740 GWh_{PCI} produit par des unités de méthanisation dont 1300 GWh_{PCI} valorisé
- ISDND : 4900 GWh_{PCI} produit dont 2600 GWh_{PCI} valorisé (53%).

✗ Biogaz torché :

2300 GWh_{PCI} de biogaz produit a été torché dont une partie représente un potentiel de gaz valorisable.

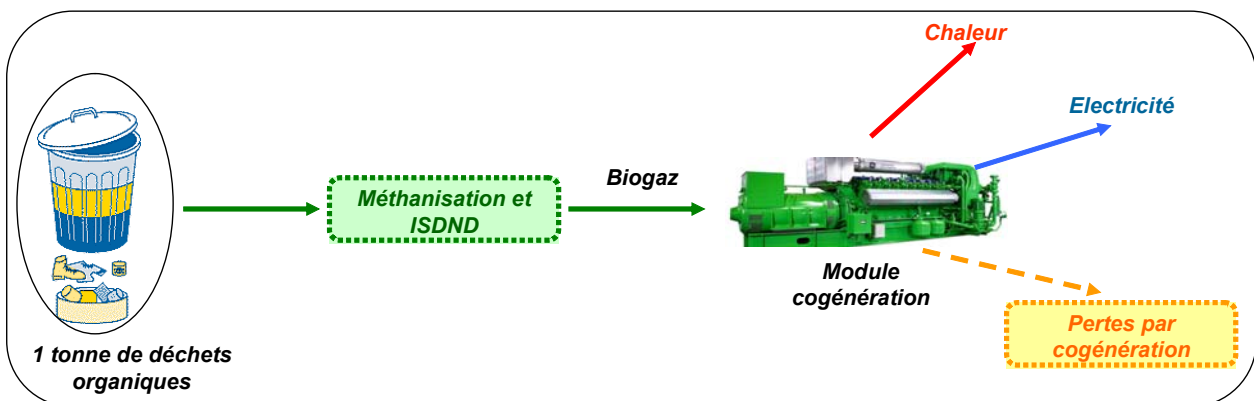
En effet, sans une teneur en méthane supérieure à 30%, la valorisation électrique n'est plus envisageable.

Si cette énergie était valorisée, elle contribuerait en terme de chauffage à la consommation annuelle en de près de **170 000 foyers** :

$$Q_{\text{valorisable}} = 2300 \times \zeta^6 = 2\,000 \text{ GWh}_{\text{th}}$$

✗ Chaleur excédentaire de cogénération

Le gisement de chaleur excédentaire de cogénération à partir des unités de méthanisation et d'ISDND avec valorisation énergétique s'élève à **1500 GWh** environ en considérant aussi les ISDND produisant la chaleur et l'électricité à partir de deux procédés distincts.



Si cette énergie était valorisée, elle contribuerait en terme de chauffage à la consommation annuelle en chauffage de près de **130 000 foyers**.

⁶ Rendement d'une chaudière gaz = 88%

2.2.3. Gisement d'énergie dans le traitement des effluents méthanogènes

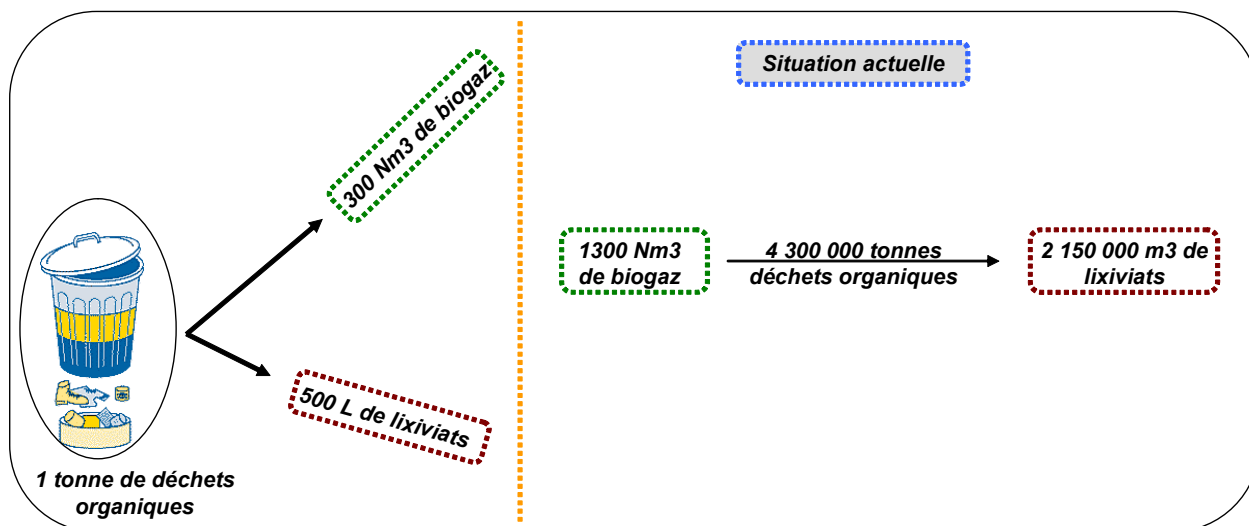
« L'effluent est un terme générique désignant les eaux usées. Le traitement des effluents intervient avant le rejet dans le milieu naturel. Ils nécessitent un traitement précisément adapté à la nature et au degré d'altération des eaux. »

Les effluents peuvent être classés par secteur d'activité à savoir :

- Assainissement urbain : c'est le cas des boues de station d'épuration
- Agro-alimentaire⁷ : c'est le cas par exemple des eaux résiduelles de lavage, pressage, procédé, nettoyage, blanchiment, transport ainsi que les effluents des locaux d'abattage, d'étables et de boyauderies,...
- Autres industries⁸ : c'est le cas des bouillons de culture usés (fabrications antibiotiques), des boues de mycélium, eaux de lavage ainsi que des eaux de procédé de fabrication de la pâte à papier, de la cuisson des chiffons, des cartonneries, de la production de papier.

Une tonne de déchets organiques produit 80 - 300 Nm³ de biogaz et 100 - 500 L de lixiviats. Les lixiviats étant composés à plus de 98% d'eau, on considère que leur masse volumique est de 1000 kg/m³.

En 2009, environ 1300 Mm³ de biogaz ont été produits. Si on considère que : 1 tonne déchets organiques produit 300 Nm³ alors environ 4 300 000 tonnes de déchets organiques ont été utilisés dans les centres de méthanisation et valorisation de biogaz de décharge.



Etant donné que 1 tonne de déchets organiques produit en moyenne 500 L de lixiviats alors les 4 300 000 tonnes de déchets organiques ont produits 2 150 000 m³ de lixiviats.

Une quantité d'énergie fatale pourrait être également valorisée à l'issue du traitement des lixiviats, qui ont une température positive toute l'année (entre 20 et 30°C en ISDND, source AfiteX).

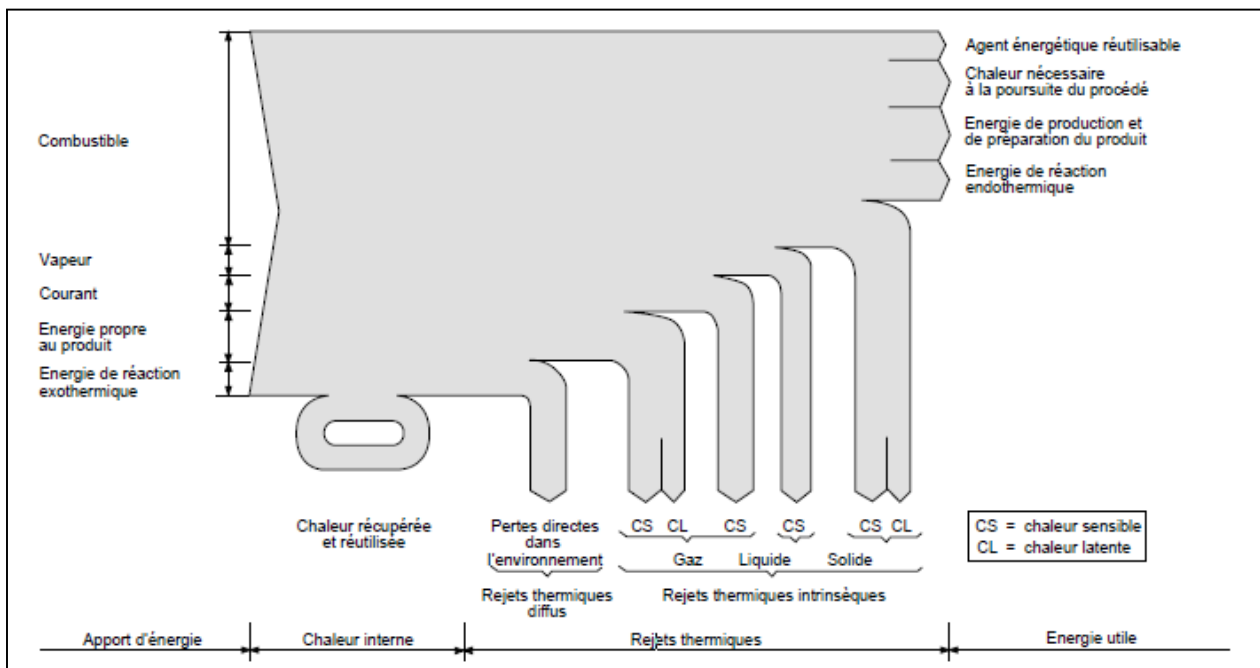
⁷ Laiterie, industrie sucrière, distilleries, abattoirs, industrie des jus de fruits, brasseries, industrie de la pomme de terre, production et conserveries de fruits et légumes, industrie vitivinicole, fabriques de margarines et d'huiles, préparation de café et de thé

⁸ Industrie pharmaceutique et cosmétique, Industrie papetière

2.3. CARACTERISATION DU BESOIN ET DES UTILISATEURS D'ENERGIE A BAS NIVEAU DE TEMPERATURE

2.3.1. Présentation du principe des flux énergétiques et des rejets thermiques d'un processus dans le diagramme de Sankey

Les énergies à bas niveau de température ont plusieurs origines et leurs utilisations peut être diverses. Pour l'utilisation des rejets thermiques, **on peut faire une distinction entre les rejets de chaleur intrinsèques et les rejets de chaleur diffus**. Les rejets de chaleur intrinsèque sont liés à des flux de matière à savoir air vicié, flux provenant des gaz de combustion, fluides de refroidissement mais aussi chaleur emmagasinée par la matière à la sortie d'un traitement. De ce fait, il est intéressant de distinguer la chaleur latente de la chaleur sensible respectivement par exemple condensation et changement de température. Les rejets de chaleur diffus quant à eux sont obtenus par rayonnement et convection de grandes surfaces (pertes surfaciques des installations, pertes par transmission des bâtiments chauffés).



Source : Ravel (Récupération de chaleur et valorisation des rejets thermiques)

Dans cette étude on ne s'intéresse qu'aux rejets thermiques intrinsèques. La figure qui suit propose une répartition imagée d'un processus général.

Le diagramme de Sankey ou diagramme de flux énergétique donne une vision globale des besoins énergétiques et des rejets thermiques intrinsèques et diffus.

C'est une représentation graphique des flux tels que les transferts d'énergie ou de matières dans les systèmes de procédés ou entre procédés. Il permet d'expliquer visuellement les données des flux massiques et énergétiques contribuant ainsi à maintenir une dynamique des initiatives en matière d'efficacité énergétique.

2.3.2. Sources d'énergie à bas niveau de température et besoins récepteurs

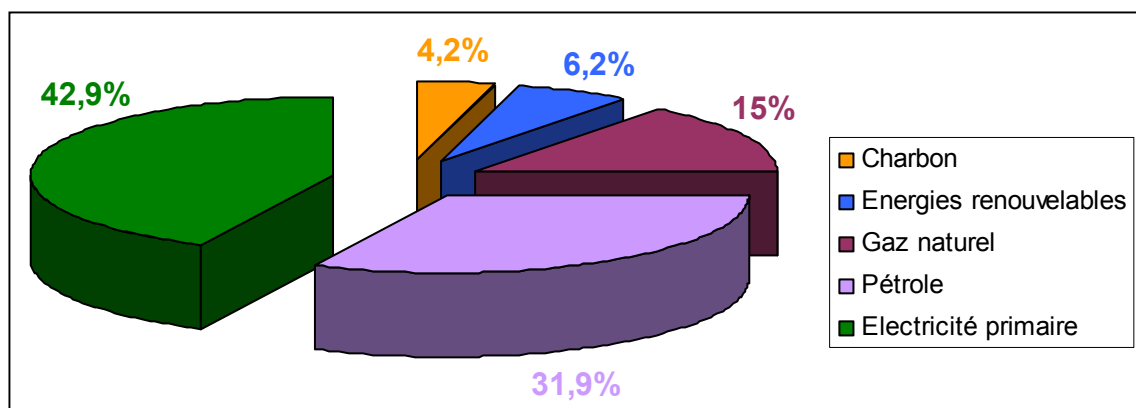
Les sources d'énergie à bas niveau de température sont diverses et leur utilisation est très variée. Il est représenté dans le tableau qui suit de manière non exhaustive :

- les sources d'énergie à bas niveau de température et le niveau de température associé
- les besoins des utilisateurs et le niveau de température associé

Gisements à bas niveau de température	Caractéristiques des gisements		Besoins des utilisateurs						
	Température des rejets		-20°C	0°C	30°C	70°C	110°C	150°C	200°C
1 - Chaleur fatale des UVE									
Gaines de fumées	100 - 250 °C							Chauffage des locaux	
Réseau de condensats	30 - 90 °C							Chauffage de serres	
Extracteur à mâchefers	90 °C							Séchage de bois	
Circuit de refroidissement	10 - 80 °C							Séchage de boues	
Aérocondenseurs	30 - 130 °C							Processus IAA	
2 - Méthanisation et ISDND (biogaz)								Séchage en général	
Chaleur excédentaire de cogénération	100 - 200 °C								
3 - Traitement thermique des DD									
	70 - 250 °C								
Plage de température			Très basse température		Basse température		Moyenne température		Haute température
Etat du fluide					ECS		ECBT		Eau Surchauffée
									Vapeur Saturée

Source Cadet/Greth

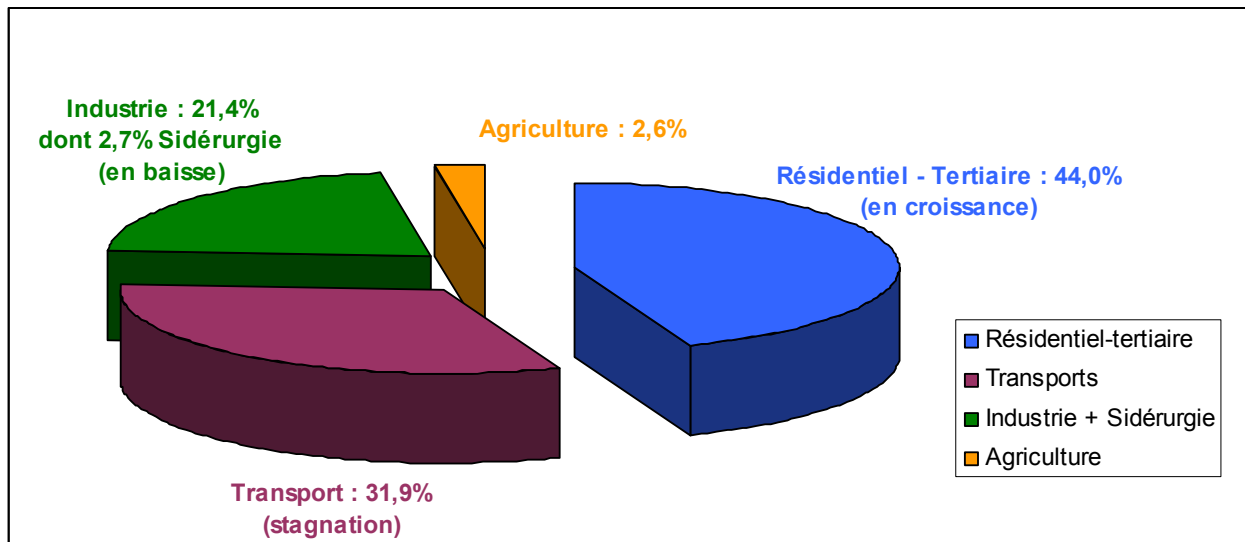
Comme le montre le diagramme qui suit, la part des énergies renouvelables dans l'utilisation des sources d'énergie en France demeure très faible environ 1/7 de l'utilisation de l'électricité primaire ou encore 1/5 de l'utilisation du pétrole.



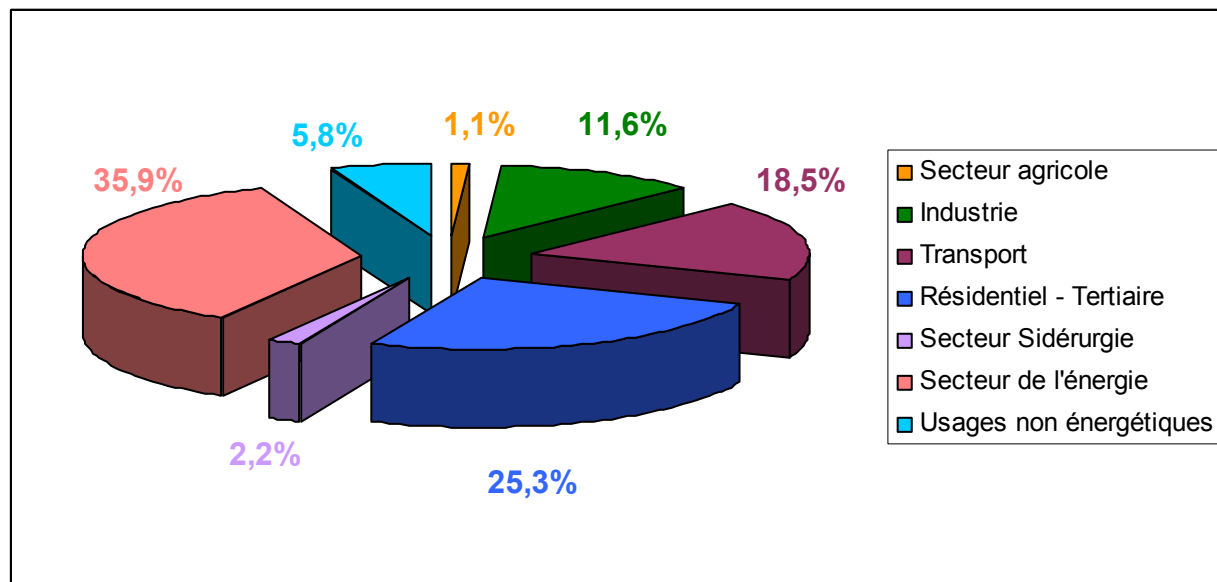
(Source : SOeS données 2009)

S'agissant de la consommation d'énergie finale, une diminution de la consommation dans l'industrie y compris la sidérurgie se fait remarquer tandis que la consommation dans le bâtiment (résidentiel et tertiaire) ne cesse d'augmenter.

Le diagramme sis à droite donne un résumé des consommations d'énergie finale en France en 2009.



Pour aller un peu plus dans le détail des consommations d'énergie finale, le diagramme qui suit présente une consommation détaillée par secteur.



Il en ressort que le secteur agricole et le résidentiel/tertiaire sont les plus gros consommateurs.

Dans la suite nous vous présenterons les bilans de consommation dans les secteurs les plus consommateurs d'énergie sauf transport à savoir : habitat, tertiaire, industrie et nous analyserons les demandes directe, indirecte et intermittente.

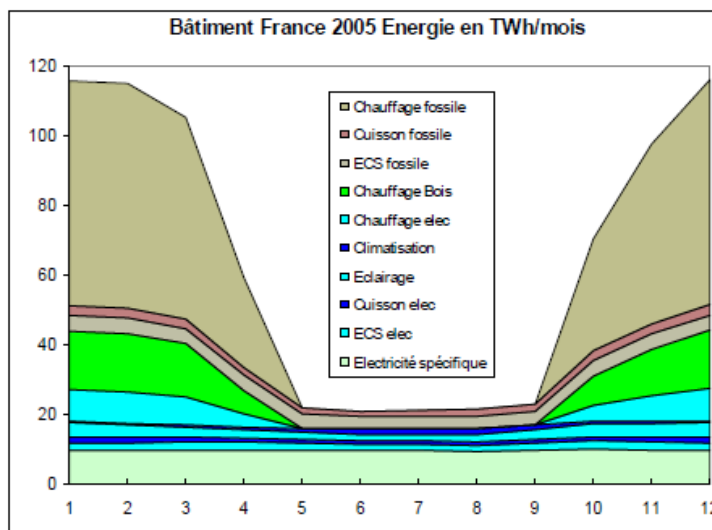
2.3.3. Demande du résidentiel/tertiaire

Pour la demande dans le résidentiel et le tertiaire, nous nous basons sur les consommations en 2005.

D'après le DGEMP et le CEREN, 90% du chauffage en France utilise les énergies fossiles. Dans le résidentiel, la consommation chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson et électricité spécifique était de 800 TWh dont 450 TWh d'origine fossile.

Le graphique sis à droite donne une représentation détaillée des différentes utilisations de l'énergie sur une année.

(Source : EDF ; énergie et politiques territoriales)



2.3.3.1. Consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire en France

Dans le tertiaire, les besoins en énergie sont essentiellement : chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, éclairage,... Le tableau suivant résume la consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire en France par usage :

Consommation énergie finale dans le secteur tertiaire en tep en 2005								
TWh	Autres	Fuel	GPL	Gaz	Elec	Biomasse	EnRt	Total
Chauffage	0,9	39,6	3,4	59,1	16,4	6,3	1,4	127,1
Eau Chaude Sanitaire		4,6	0,3	10,3	5,9			21,0
Cuisson		0,1		5,9	3,5			9,5
Electricité spécifique					56,2			56,2
Climatisation					11,7			11,7
Eclairage					17,6			17,6
Eclairage public					5,9			5,9
Total	0,9	44,3	3,7	75,3	117,0	6,3	1,4	248,9

(Source : EDF ; énergie et politiques territoriales)

Le chauffage correspond à un peu plus de 50% de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire contre seulement 8% pour l'eau chaude sanitaire.

2.3.3.2. Consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel en France

Dans le tertiaire, les besoins en énergie sont essentiellement : chauffage, eau chaude sanitaire, froid, éclairage,... Le tableau suivant résume la consommation d'énergie finale dans le secteur tertiaire en France par usage :

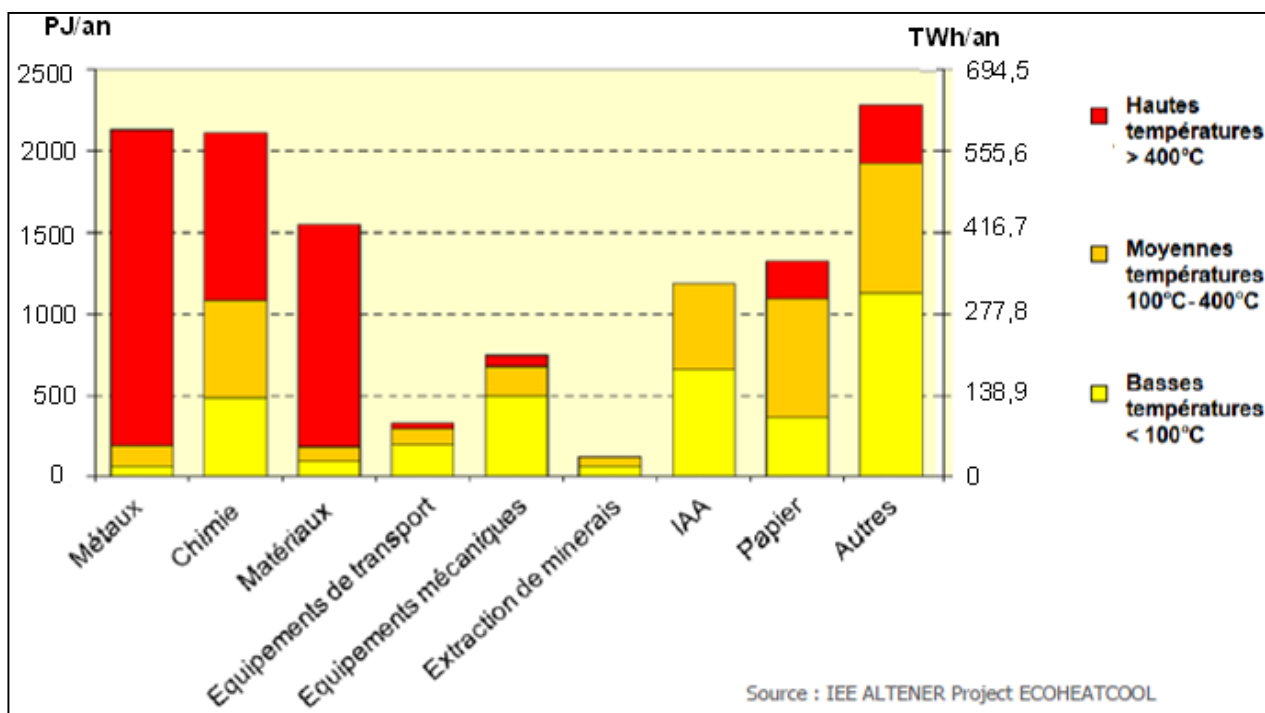
Consommation énergie finale dans le secteur résidentiel en 2005								
TWh	Charbon	Fuel	GPL	Gaz	Elec	Bois	EnRt	Total
Chauffage	3,0	93,2	9,1	151,8	34,8	87,9	3,9	383,6
Eau Chaude Sanitaire	0,4	11,4	2,3	19,8	19,5		0,2	53,6
Cuisson			9,8	12,8	11,1			33,7
Electricité spécifique					73,7			73,7
dont éclairage					12,3			
froid					17,7			
brun					10,2			
lavage					12,2			
Total	3,4	104,6	21,2	184,4	139,0	87,9	4,1	544,6

(Source : EDF ; énergie et politiques territoriales)

Le chauffage correspond à un peu plus de 70% de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel contre seulement 10% pour l'eau chaude sanitaire.

2.3.4. **Demande de l'industrie**

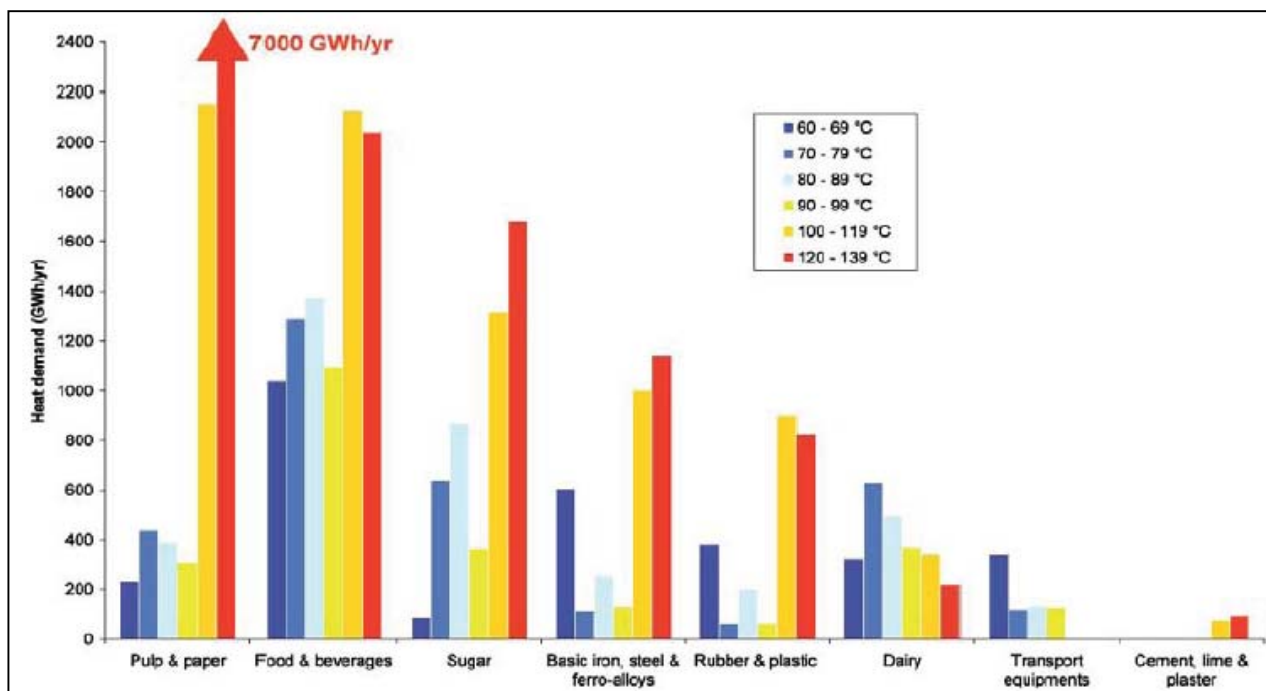
On peut classer les besoins en chaleur de l'industrie européenne en fonction des niveaux de température à savoir haute, moyenne et basse.



Dans l'industrie, la chaleur est principalement utilisée dans les process. Le tableau suivant résume la consommation d'énergie finale dans l'industrie en France par usage :

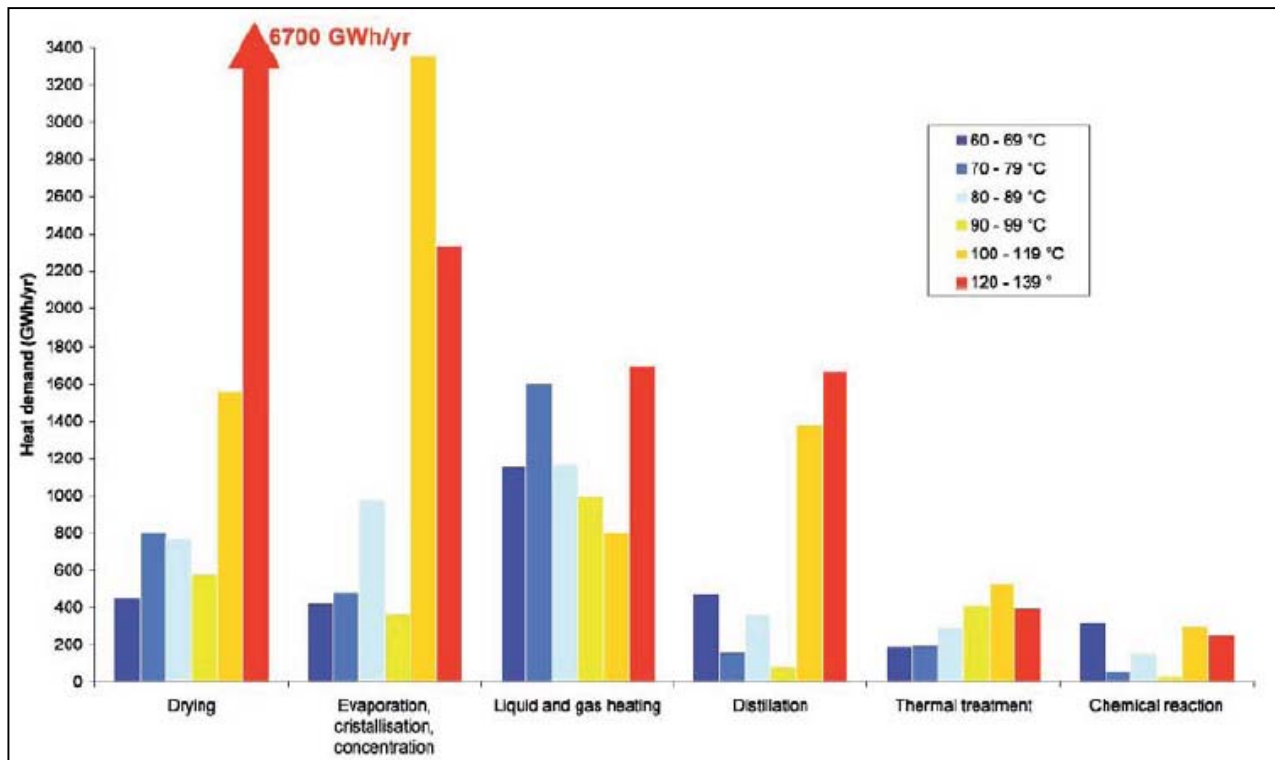
Consommation énergie finale dans l'industrie		
	%	TWh
Chaudière	34	102
Fours	23	69
Séchage et Evaporation	4	12
Moteurs (électricité)	9	27
Pompage et ventilation	8	24
Froid et air comprimé	4	12
Réactions chimiques	18	54
Total	100	300

La distribution du besoin de chaleur par secteur industriel en France, en fonction des températures des process est donnée dans l'histogramme qui suit :



(Source : CEREN)

La distribution du besoin de chaleur par usage dans l'industriel en France, en fonction des températures des process est donnée dans l'histogramme qui suit :



(Source : CEREN)

3. INTRODUCTION AUX PROCÉDÉS DE RÉCUPÉRATION/VALORISATION DES ÉNERGIES A BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 3

3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons introduire le contexte et le domaine de l'étude, mais aussi les différentes technologies utilisées pour la récupération et la valorisation des énergies à bas niveaux de température. Le travail du GRETh a été réalisé sous forme de fiches, une par technologie qui détaille les principes de fonctionnement des technologies considérées, leurs applications et leurs champs d'action, nous nous efforcerons aussi d'en lister les principaux fabricants, ainsi que des exemples de réalisations en France et dans le monde. Pour chaque technologie, un chapitre sera consacré aux différents axes de recherche et de développement. Enfin, la conclusion portera sur à la pertinence de l'utilisation de cette technologie, ainsi que sur l'actualité et le devenir de chacune sera rédigée.

3.2. CONTEXTE DE L'ETUDE

Les rejets thermiques, provenant de procédés industriels, sont devenus aujourd'hui une source d'énergie dont l'importance va croissante, jusqu'ici ils étaient souvent considérés comme non valorisables et donc simplement évacués (souvent dégradés par des aérorefrigérants). Aujourd'hui le coût de plus en plus élevé de l'énergie et la prise de conscience environnementale et donc le besoin de l'utiliser de façon plus rationnelle ont changé la donne. L'utilisation des rejets thermiques n'est pas seulement judicieuse du point de vue de l'écologie ou de l'énergie, mais souvent rentable dans de nombreux cas, voire également dans les installations de taille réduite. La rentabilité implique une gestion minutieuse dans les petits systèmes, davantage encore que dans les grandes installations. A partir d'une situation bien définie, la rentabilité ne peut être garantie qu'en présence de solutions techniques optimales offrant le meilleur rendement possible par une gestion dynamique des systèmes.

Compte tenu de la complexité des installations et du nombre important de techniques différentes, le choix du système le plus approprié devient une tâche difficile. Lorsque l'on parcourt les manuels d'enseignement disponibles, il est difficile de trouver des informations détaillées concernant le dimensionnement pratique d'installations de récupération de chaleur et l'utilisation des rejets thermiques.

En proposant une vue d'ensemble des différents systèmes et de leurs composants, cette étude a pour but de faire le point sur les techniques les plus matures et les plus récentes, comprenant celles qui sont encore à l'état de prototype de recherche. Nous mettrons en évidence le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénients des systèmes considérés dans des fiches détaillées, rédigées par technologie. Des exemples d'applications seront aussi mis en avant ainsi que leur retour d'expérience dans la mesure du possible.

Dans le cahier introductif et dans chaque fiche, il nous faudra distinguer la différence entre récupération de chaleur (RC) et utilisation des rejets thermiques (URT).

En effet, la récupération de chaleur (RC) indique que les rejets thermiques dégagés par un procédé **sont réinjectés dans le même procédé**, sans grand décalage de temps. La formule idéale consiste à faire coïncider source et récepteur en temps et en quantité, on obtient ainsi un meilleur rendement de l'installation.

Le secteur de l'URT (**Utilisation des Rejets Thermiques**) indique que les rejets thermiques dégagés d'un procédé **sont réinjectés dans d'autres procédés**, avec ou sans décalage dans le temps. L'attention sera axée sur les positionnements temporels de l'offre et de la demande de chaleur, on verra alors qu'il sera souvent nécessaire de stocker la chaleur pour solutionner le problème du décalage temporel entre cette offre et cette demande. Selon le lieu de l'utilisation de la chaleur, il faut faire une distinction entre l'utilisation à l'intérieur du site de l'entreprise dans un autre procédé (URT interne) et l'utilisation par des tiers à l'extérieur à l'entreprise (URT externe).

Les éléments principaux des installations de RC/URT sont les échangeurs de chaleur, tant que la température de la source est supérieure à la température d'utilisation. Si l'on inverse ces conditions, la pompe à chaleur devient l'élément principal de l'installation.

Les rejets thermiques ont plusieurs origines. Pour leur utilisation, il faut faire une distinction entre rejets de chaleur intrinsèques et rejets de chaleur diffus :

- **Les rejets de chaleur intrinsèques** sont liés à des flux de matière. Ils sont pour la plupart de l'air vicié, des gaz de combustion, des fluides de refroidissement ainsi que la chaleur emmagasinée par la matière à la sortie d'un traitement. Sur ce point, il faut distinguer la chaleur latente (par exemple condensation) de la chaleur sensible (changement de température).
- **Les rejets de chaleur diffus** sont obtenus principalement par rayonnement et convection de grandes surfaces (pertes surfaciques des installations, pertes par transmission des bâtiments chauffés).

La recherche et la récupération de rejets thermiques sont plus simples à réaliser pour la chaleur intrinsèque que pour la chaleur diffuse. De plus, notre étude se focalise sur les rejets de chaleur intrinsèques.

3.1. RAPPEL DU DOMAINE DE L'ETUDE

L'intérêt de ce travail est de caractériser des solutions qui ne sont pas à l'heure actuelle utilisées conventionnellement pour des gisements dont la gamme de température n'est pas valorisée et estimée entre 70°C et 200 °C.

Concernant la technologie de récupération des gisements de déchets thermiques, nous présenterons une liste de tous les procédés existants en Europe et dans le Monde répondant aux caractéristiques des températures concernés. Les technologies présentées seront de type thermo-transfert, nouveaux cycles moteurs/vapeur (Tesla), thermoélectricité.

3.2. LES TECHNOLOGIES

Il existe de nombreuses technologies, chacune étant éprouvée ou non, pour la récupération et la valorisation des énergies à bas niveaux de température. Nous allons présenter chacune d'entre elles dans ce cahier introductif. Elles seront ensuite détaillées dans des fiches spécifiques. Nous séparerons ces technologies en deux catégories : les technologies dites passives (sans apport d'énergie externe) et les autres dites actives (avec apport d'énergie). Voici la liste de celles que nous avons identifiées :

- fiche n°1 : les échangeurs de chaleur
- fiche n°2 : les régénérateurs rotatifs
- fiche n°3 : Les échangeurs à caloducs
- fiche n°4 : les cycles organiques de RANKINE (ORC) et les turbines scroll
- fiche n°5 : les machines frigorifiques à sorption
- fiche n°6 : les matériaux à changement de phase à basse température (PCM)
- fiche n°7 : les machines thermofrigorifique à éjection
- fiche n°8 : les cycles moteurs à air chaud
- fiche n°9 : la conversion thermoélectrique
- fiche n°10 : la turbine de TESLA
- fiche n°11 : Les systèmes à effet magnétocalorique (froid magnétique)
- fiche n°12 : les pompes à chaleurs

Cette étude fera l'objet, en aval de ce cahier introductif, de la rédaction de 12 fiches spécifiques, présentant chaque technologie identifiée. Suivant leur degré de maturité et de développement, certaines d'entre elles s'apparenteront plus ou moins à des cahiers.

***NB :** Un point très important doit être précisé sur la pertinence du choix des technologies dites actives. En effet, il sera indispensable de faire une approche énergétique globale précise lors de leur éventuelle utilisation. En effet, comme nous l'avons dit précédemment, ces technologies demandent un apport externe d'énergie qui doit absolument être pris en compte précisément dans le bilan. Cet apport d'énergie peut permettre de rehausser les niveaux de température pour pouvoir valoriser le rejet ou améliorer la part plus utile de chaleur initialement perdue. A l'évidence cet apport énergétique devra être le plus réduit possible, car le bilan global énergétique devra être suffisamment positif pour financer le retour d'investissement et la maintenance opérationnelle tout en satisfaisant le bilan CO₂. Par exemple, le choix d'une valorisation des rejets par des pompes à chaleur classiques (à compression) permet d'atteindre des COP entre 1,5 et 4, ce qui signifie que l'on récupère plus d'énergie que l'on en a injectée. Néanmoins, dans certains cas, on pourrait utiliser la chaleur non valorisée d'un process dans une machine à absorption qui bien qu'ayant des COP inférieurs aux PAC avec compresseur (entre 0.7 et 1.5 contre 1.5 et 4) permettrait de ne pas avoir besoin d'énergie externe pour le travail du compresseur. Ainsi, dans ce genre de solutions, le bilan énergie et CO₂ peut faire basculer le choix.*

3.2.1. Les échangeurs de chaleur

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels (90 %) transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie...etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.).

Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres tels que : les propriétés physiques des fluides, leur agressivité, les températures ainsi que les pressions de service de ces fluides. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain non négligeable de rendement et d'énergie des procédés.

Parmi les différentes technologies des échangeurs de chaleur, toutes liées à la récupération d'énergie, nous parlerons essentiellement des échangeurs à plaques pour leur compacité et leur efficacité qui sont essentiellement utilisés pour la récupération d'énergie, ainsi que les échangeurs en matière plastique pour leur faible coût et la facilité de nettoyage que leur confère la matière plastique. Les batteries à ailettes gaufrées feront aussi l'objet de cette fiche pour la récupération d'énergie sur les fumées issues de rejets industriels et qui nécessitent d'être refroidies.

Selon le niveau de température de la source de chaleur, l'exploitant peut profiter de ces rejets thermiques selon le but recherché : chauffage d'air froid ou d'eau, ou encore, en cas de rejets thermiques à très haute température, production de vapeur pour des procédés industriels.

Le raccordement hydraulique de deux échangeurs permet le transfert de chaleur d'un échangeur à l'autre. Le fluide caloporteur circulant dans le circuit intermédiaire a un effet régénérateur : il stocke et transporte la chaleur.

On parlera aussi des systèmes de récupération (via des échangeurs de chaleur) permettant d'optimiser et de diminuer les apports nécessaires au séchage de produit comme les boues d'épuration.

Les différentes technologies d'échangeurs de chaleur seront décrites plus précisément dans la fiche spécifique n°1.

3.2.2. Les échangeurs / régénérateurs rotatifs

L'échangeur de chaleur rotatif a été développé vers la fin des années 1950 pour des installations de climatisation en Amérique. Depuis longtemps, il fait partie de l'équipement standard de ces installations. Il est également très apprécié pour les équipements industriels, en raison de ces possibilités de récupération de l'humidité (chaleur latente) dans les flux d'air évacué et les gaz de combustion. Les nouvelles matières utilisées dans la fabrication des éléments de l'échangeur de chaleur rotatif rendent son installation possible dans une vaste plage de températures. Son mode de fonctionnement se distingue par les charges et les décharges périodiques de la chaleur et de la vapeur dans la masse de l'accumulateur.

La masse d'accumulation (rotor) a la forme d'un cylindre plat. Cette particularité donne la forme de sa construction. Le rotor tourne lentement, dans une direction, il est parcouru par de l'air chaud, et dans l'autre direction, par de l'air froid (cf. figure 1). Du côté du flux d'air chaud, il soutire la chaleur et l'humidité et les transmet au flux d'air froid.

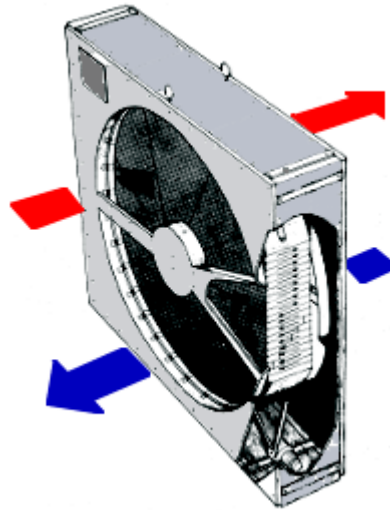


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un régénérateur rotatif

A l'heure actuelle, les rotors sont dotés le plus souvent de stries ondulées en aluminium (résistant à la corrosion) ou de structures gaufrées.

Notons que la forme géométrique du rotor favorise les fuites. Une zone de rinçage fonctionnant par dépression évite au maximum le transfert de particules d'air vicié dans l'air pulsé. Ce dispositif entraîne cependant une perte d'énergie, influencée également par l'emplacement des ventilateurs par rapport au rotor.

Selon l'utilisation, il est parfois souhaitable d'échanger de l'humidité entre les deux flux d'air. La transmission d'humidité peut se dérouler de deux façons :

- Echange de matière par condensation et évaporation : avec un rotor non hygroscopique, outre le transfert de chaleur, on obtient un transfert d'humidité que lorsque l'on descend en dessous du point de rosée de l'air humide (régénérateur à condensation).
- Echange de matière par adsorption et désorption: avec un rotor hygroscopique (par traitement de surface) on obtient un transfert de la chaleur sensible (température) et de chaleur latente (humidité) (régénérateur à adsorption).

Les détails techniques sur les échangeurs de chaleur rotatifs seront abordés plus précisément dans la fiche spécifique n°2.

3.2.3. Les échangeurs à caloducs

Le caloduc est une enceinte fermée possédant une très haute conductibilité thermique grâce à l'utilisation des phénomènes d'évaporation et de condensation d'un fluide interne. Cette conductivité thermique apparente peut ainsi atteindre plusieurs centaines voire plusieurs milliers de fois celle d'un conducteur métallique homogène de même volume. La principale caractéristique d'un caloduc est sa capacité à transmettre des flux thermiques élevés avec un faible écart de température, d'où son intérêt pour concevoir des échangeurs de chaleur.

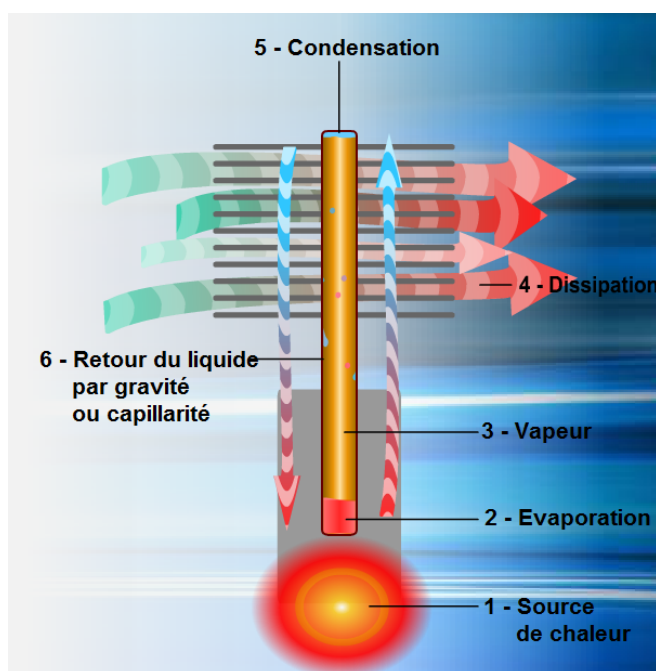


Figure 2 : Principe de fonctionnement d'un caloduc

Le domaine de prédilection des échangeurs à caloducs est la récupération de chaleur sur les fumées pour les raisons suivantes :

- La compacité qui leur permet de s'intégrer aisément dans des installations existantes.
- La faible perte de charge, notamment sur les fumées, qui leur permet de travailler en tirage naturel ou avec des ventilateurs de faible puissance.
- L'efficacité thermique et l'absence de point froid qui empêche la corrosion et qui autorisent un taux de récupération remarquable.

Nous reviendrons plus en détail sur cette technologie dans la fiche spécifique n°3.

3.2.4. Les cycles Organiques de RANKINE (ORC)

Les installations ORC (Organic Rankine Cycle) sont des installations thermiques dans lesquelles, via un circuit fermé, on produit de l'énergie électrique grâce à des rejets thermiques entre 70 et 300°C. Les premières expériences réalisées montrent que, dans des cas isolés, les installations ORC sont tout à fait aptes à utiliser des rejets thermiques. Toutefois, on ne peut pas s'attendre à une part importante d'ORC dans les systèmes d'URT.

L'ORC est une technologie mature permettant d'envisager la valorisation en énergie électrique et/ou thermique de ressources aujourd'hui peu utilisées comme les sources de chaleur résiduelles dans l'industrie, la biomasse ou le solaire à concentration sur des petites installations. Ces centrales ont la particularité d'être compactes, extrêmement fiables et compétitives sur le plan économique pour la production d'énergie jusqu'à des puissances de l'ordre du MWe.

La génération d'électricité à partir de sources thermiques à basse température est possible grâce à l'utilisation de fluides organiques (réfrigérants) qui alimentent des turbines selon le même principe que le fameux cycle à vapeur, d'où le nom de cycle ORC. Ces réfrigérants permettent en effet une exploitation plus efficace de la chaleur à basse température (en dessous de 250°C), pour les applications de petites puissances (de l'ordre de quelques kW à quelques MW). La Figure 3 suivante montre un exemple de ce système comprenant un évaporateur, une turbine, un condenseur et une pompe.

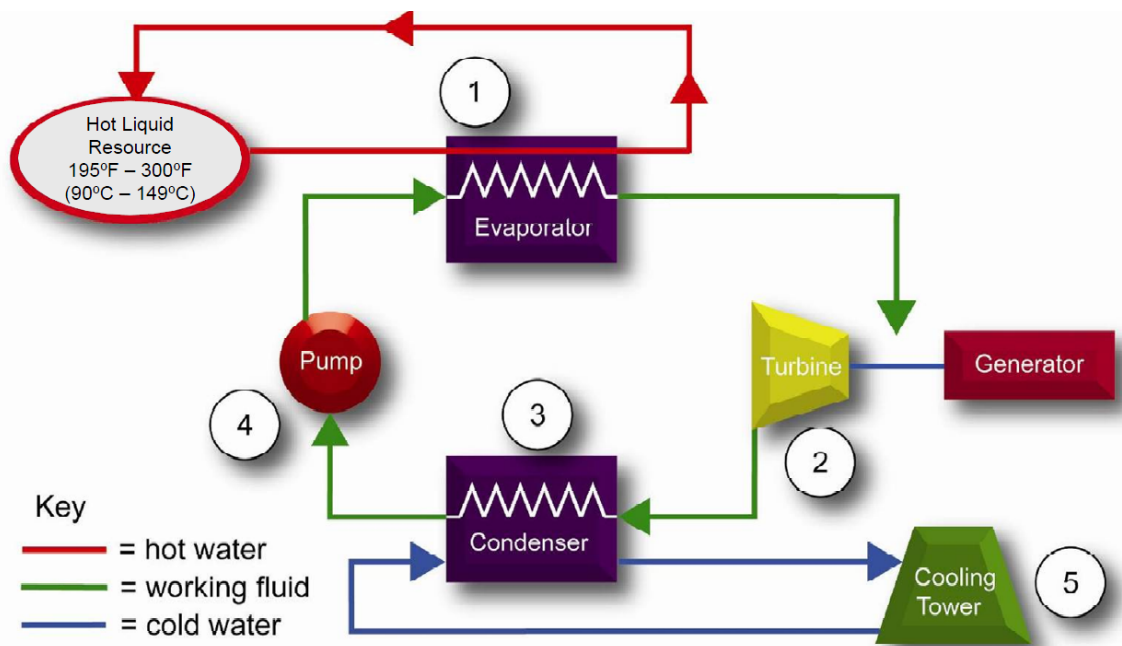


Figure 3 : Schéma du principe de fonctionnement d'un cycle organique de Rankine

De la vapeur haute pression d'un fluide (réfrigérant) est générée dans l'évaporateur chauffé par une source thermique (par exemple la chaleur solaire ou les rejets thermiques d'un moteur à combustion). Cette vapeur de réfrigérant est détendue dans la turbine, générant de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur électrique. Ensuite, la vapeur à la sortie de la turbine est condensée en utilisant comme fluide de refroidissement de l'eau de chauffage. Le liquide organique (réfrigérant) obtenu au condenseur est finalement dirigé vers l'évaporateur pour boucler le cycle. Dans le but d'améliorer les performances du cycle, différentes solutions technologiques de préchauffage du réfrigérant à l'entrée de l'évaporateur peuvent être utilisées en fonction des caractéristiques du fluide de travail. Par exemple pour un cycle avec

régénération, la vapeur basse pression issue de la turbine pourra être utilisée dans un échangeur-régénérateur pour préchauffer le fluide organique avant son entrée à l'évaporateur, ce qui permet d'améliorer de manière significative l'efficacité du cycle.

Une des technologies de valorisation des énergies à bas niveaux de température consiste en l'utilisation de ces turbines scroll au sein d'un mini système ORC. Ce couplage entre un ORC et une turbine scroll pouvant fonctionner à partir de sources thermiques à basse température entre 120 et 200°C.

Les turbines Scroll sont des unités converties à partir de compresseurs en spirale de type scroll, très répandus sur le marché. Les systèmes Scroll sont reconnus pour leur efficacité et leur robustesse, et ceci pour des applications diverses telles que la ventilation ou la réfrigération. Leur constitution est simple avec peu d'éléments, ce qui garantit un coût faible et de grande fiabilité. De plus, la machine Scroll produit de très faible vibration mécanique (bruit faible) et possède un processus de détente quasi-continu avec un excellent rendement volumétrique.

Nous détaillerons cette technologie dans la fiche spécifique aux ORC, qui connaît un réel regain d'intérêt depuis quelques années. Ces applications, les principaux fabricants mondiaux et les installations connues seront aussi inclus dans la fiche n°4.

3.2.5. Les machines frigorifiques à sorption

Les groupes à absorption peuvent utiliser la chaleur pour la production de froid. Aucun système d'alimentation électrique n'est requis pour ce faire. L'absorption, qui peut être directe (utilisation d'un brûleur à gaz comme source chaude) ou indirecte (utilisation d'eau chaude et de vapeur issue de rejets industriels par exemple), utilise le principe de l'affinité de la vapeur d'eau avec une solution aqueuse de bromure de lithium ou d'ammoniac. Le mélange bromure de lithium/eau est utilisé pour les applications de climatisation. Il ne permet pas de production de froid négatif, contrairement au mélange ammoniac/eau tout particulièrement adapté aux applications de froid industriel. Dans le cas d'une absorption eau/bromure de lithium, la chaleur de la cogénération chauffe un générateur dans lequel se trouve une solution concentrée de bromure de lithium (concentration d'environ 58%). L'effet de la chaleur permet d'entraîner de la vapeur d'eau dans une tour de refroidissement où il y a condensation et extraction de chaleur. L'eau vient ensuite réagir avec la solution aqueuse concentrée de bromure de lithium (62%). La réaction endothermique permet alors de refroidir dans un échangeur, l'eau qui sera utilisée pour des besoins en climatisation par exemple. L'absorption eau/ammoniac repose sur le même principe à la différence que l'ammoniac est dans ce cas le frigorigène.

Il existe actuellement des groupes à absorption à simple, double et triple effet. En moyenne, avec des variantes selon les constructeurs, les groupes à simple effet nécessitent une température de source de chaleur initiale de 100°C permettant la transformation de 35% de l'énergie primaire en froid et ont un COP (COP = coefficient de performance = puissance de froid de l'unité / chaleur consommée par l'unité) d'environ 0,7. De même les groupes à double effet se caractérisent par une température de source de chaleur initiale de 150°C, une transformation de 50% de l'énergie primaire en froid et un COP d'environ 1,2. Enfin, les groupes à triple effet se caractérisent par une température de source de chaleur de 180°C une transformation de 75% de l'énergie primaire en froid et un COP d'environ 1,5.

Nous reviendrons plus en détails sur le principe de fonctionnement ainsi que sur les différentes applications des groupes à absorption dans la fiche spécifique n°5. Bien que moins répandu sur le marché, nous parlerons aussi des groupes à adsorption.

3.2.6. Les Matériaux à Changement de Phase

Parmi les nouvelles technologies en forte voie de développement, on notera l'utilisation des matériaux à changement de phase. En effet, cette technologie connaît un développement croissant depuis quelques années du fait de sa capacité à stocker et restituer de grandes quantités d'énergie avec de faibles différentiels de température. Le principe essentiel de ces matériaux réside dans leur capacité à stocker de l'énergie durant leur changement d'état, l'énergie stockée correspondant alors à la valeur de l'enthalpie de changement de phase (qui se fait à pression et température constantes pour les corps purs). Nous avons pu voir dans une précédente étude réalisée pour RECORD que ces matériaux sont utilisés essentiellement pour le stockage de chaleur mais ils permettent aussi une récupération et une valorisation des énergies à bas niveaux de température avec une utilisation déphasée dans le temps grâce à leur utilisation couplée aux échangeurs de chaleur.

Nous reviendrons plus en détail sur ces matériaux à changement de phase dans la fiche détaillée n°6, mais le lecteur pourra aussi se reporter à l'étude RECORD «Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétiques des déchets » pour laquelle deux cahiers spécifiques (n°4 et 5) ont été réalisés sur les matériaux à changement de phase et leurs applications.

3.2.7. Les machines thermofrigorifiques à éjection

Contrairement aux installations frigorifiques courantes à compression, les machines frigorifiques à éjection de vapeur ne possèdent pas de compresseur mécanique mais un compresseur à éjection de vapeur. Pour cette raison, il est possible d'utiliser différentes sources de chaleur pour la production du froid. De telles sources peuvent être par exemple l'énergie solaire ou la chaleur perdue provenant de différents process. L'installation comprend deux circuits : un premier circuit sert à la production du froid (cycle frigorifique), l'autre circuit sert à la production de vapeur d'entraînement (cycle de vapeur).

Un cycle frigorifique à éjecteur (et sans compresseur) se présente comme suit (cf. figure 4) :

- en sortie de condenseur, une partie du débit est dirigé vers une pompe qui comprime le liquide, au prix d'un travail très faible.
- le liquide sous pression est vaporisé dans un générateur à relativement haute température (environ 100 °C), et éventuellement surchauffé, d'une valeur dépendant des propriétés thermodynamiques du fluide. L'énergie thermique fournie au générateur est une énergie payante (ou issu de rejets et donc potentiellement gratuite).
- cette vapeur surchauffée est ensuite utilisée comme fluide moteur dans l'éjecteur.
- la partie du liquide qui n'a pas été reprise par la pompe est détendue dans l'évaporateur, puis dirigée vers l'éjecteur, comme fluide secondaire.
- le mélange sortant de l'éjecteur est condensé dans le condenseur, et le cycle est bouclé.

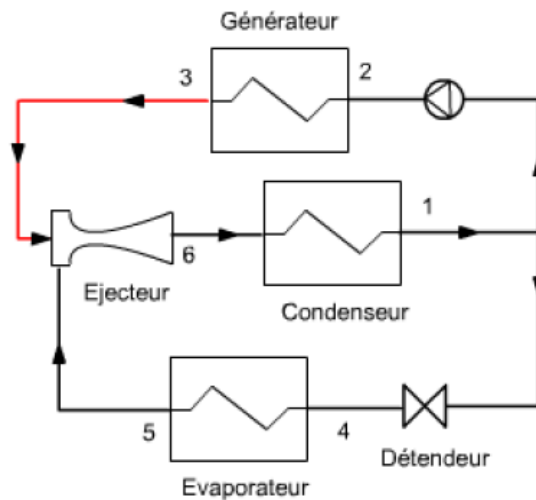


Figure 4 : Représentation d'un cycle thermofrigorifique à éjection de vapeur

L'intérêt de ce cycle est de remplacer l'énergie consommée par un compresseur par une énergie beaucoup plus petite consommée par la pompe, et par une chaleur fournie au générateur à moyenne ou haute température.

Nous reviendrons plus précisément sur le fonctionnement et les applications possibles de cette technologie dans la fiche n°7.

3.2.8. Les cycles moteurs à air chaud

Les cycles moteurs à air chaud font aussi partie des technologies envisageables pour la valorisation des énergies à bas niveaux de température. Cette catégorie classée dans les cycles moteurs inclue les technologies des moteurs de Stirling et d'Ericsson.

3.2.8.1. Les moteurs Stirling

Il existe des inventions oubliées par le grand public, soit par manque d'esprit visionnaire, ou bien volontairement car elles ne génèrent pas suffisamment de profit. C'est le cas du moteur Stirling qui connaît un réel regain d'intérêt depuis ces dernières années en partie à cause des problèmes d'efficacité énergétique dans l'industrie et des problèmes environnementaux.

Ancien, mais considéré à la pointe de la technologie de nos jours, il existe depuis 1816 et s'appelait à l'époque "moteur à air chaud". Il fut utilisé dans l'industrie et l'agriculture jusqu'au début du 20ème siècle, et fut remplacé progressivement par la machine à vapeur puis les moteurs à combustion interne que nous connaissons plus amplement.

Le moteur de Stirling (du nom de l'inventeur Robert Stirling qui a décrit ce cycle comme étant un cycle réversible fermé et régénératif par la présence d'un échangeur de chaleur interne qui permet d'accroître le rendement thermique de l'appareil) est d'un principe relativement simple : le fluide principal qui produit un

travail est un gaz (air, hydrogène ou hélium) soumis à un cycle comprenant 4 phases comme indiqué ci dessous :

- 1->2 : détente isotherme (à température constante)
- 2->3 : refroidissement isochore (à volume constant)
- 3->4 : compression isotherme
- 4->1 : chauffage isochore

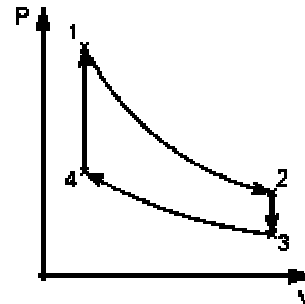


Figure 5 : Diagramme de Clapeyron (P-V) du cycle de Stirling

Le but est de produire de l'énergie mécanique à partir d'énergie thermique. Au début du cycle, le gaz à l'intérieur du moteur est déplacé vers un point chaud provenant d'une quelconque source d'énergie : pour un même volume sa température et sa pression augmentent. Ensuite, abaissement de température le gaz se dilate et transforme son énergie thermique en énergie mécanique. En fait, un gaz à haute pression qui se détend permet de fournir beaucoup d'énergie mécanique. Toutefois, le gaz ne peut pas se détendre indéfiniment : il faut compresser le gaz en utilisant le moins d'énergie possible. Pour ce faire, il faut déplacer le gaz du côté chaud vers le côté froid du moteur, diminuant ainsi la pression. En utilisant l'énergie mécanique précédemment fournie, on compresse le gaz à basse pression qui demande moins d'énergie que ce que sa détente à haute pression fournit, on obtient un bilan positif d'énergie mécanique à chaque fois qu'on répète ce cycle. Il faut constamment alimenter le moteur en énergie thermique pour que le cycle se répète.

La source chaude du moteur est alimentée par une source externe quelconque : combustion externe de dérivés du pétrole, gaz naturel, charbon, bois, mais aussi énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique et peut bien sur être alimenté par des rejets thermiques.

La principale invention de Stirling fut d'incorporer un **régénérateur** qui a permis d'améliorer considérablement les performances (rendement) de ce moteur.

Nous reviendrons plus en détail sur le principe de fonctionnement des différents type de moteurs Stirling (alpha, bêta, gamma, mixte), les avantages/inconvénients et les applications du moteurs Stirling dans la fiche spécifique n°8.

3.2.8.2. **Le moteur Ericsson**

Le moteur Ericsson est un moteur à air chaud qui utilise des soupapes pour contrôler son fonctionnement. Le moteur Ericsson (du nom de son inventeur John Ericsson) est constitué d'un cylindre de compression muni de soupapes, d'un échangeur de chaleur récupérateur à contre-courant, d'un échangeur de chaleur pour la source chaude et d'un cylindre de détente lui-aussi muni de soupapes. Le cycle thermodynamique réalisé dans cette machine est équivalent à celui de la turbine à gaz à récupération. Comme le moteur Stirling, le moteur d'Ericsson est un moteur à apport de chaleur externe, ce qui est un atout déterminant dans un certain nombre d'applications pratiques comme la valorisation de l'énergie solaire ou des inévitables rejets industriels.

La figure 6' présente les différents espaces de travail et les éléments constitutifs d'un moteur Ericsson et la figure 6 la représentation du cycle dans un diagramme P-V :

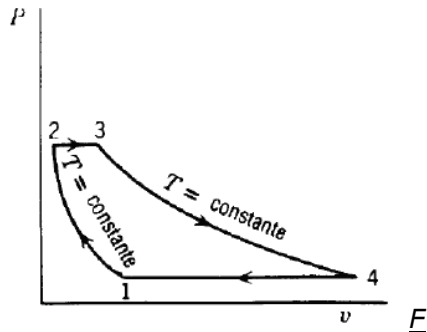


figure 6 : Cycle d'Ericsson

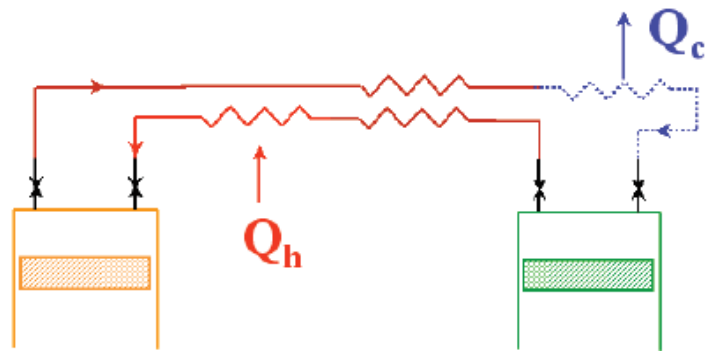


Figure 6' : Représentation d'un moteur d'Ericsson

Le moteur Ericsson fonctionne avec 2 transformations isobares et de 2 transformations isothermes au cours desquelles ont lieu les échanges de chaleur. La principale différence entre un moteur Stirling et Ericsson est la présence de soupapes et clapets autour des cylindres de compression et de détente. La présence de celles-ci donnent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients au moteur d'Ericsson, nous reviendrons plus amplement sur cette technologie dans la fiche spécifique n°8 : les cycles moteurs à air chaud.

3.2.9. La conversion thermoélectrique

L'effet Peltier (1831) c'est l'apparition d'un phénomène de transfert de chaleur en présence d'un courant électrique et de deux conducteurs de nature différente mis en contact. Sous l'effet du courant électrique, un des conducteurs devient plus chaud, l'autre plus froid, créant une différence de température entre eux.

L'effet inverse à l'effet Peltier, a été découvert un peu plus tôt (1821) par Mr Seebeck, physicien allemand. C'est donc l'effet Seebeck qui dit qu'en appliquant une différence de température à deux matériaux conducteurs différents mis en contact, il apparaît un courant électrique dans le circuit qui les relie. On parle du PTE d'un matériau, ou pouvoir thermoélectrique.

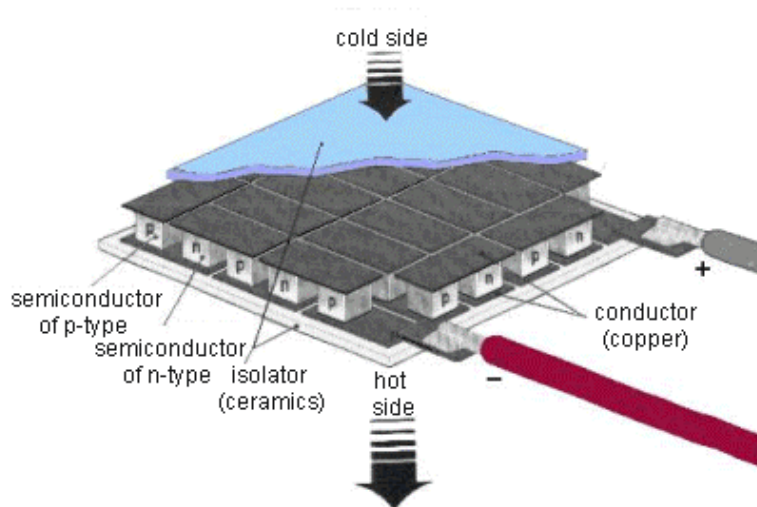


Figure 8 : représentation schématique de l'effet thermoélectrique

La circulation d'un courant électrique, nous l'avons vu, apparaît via le mouvement d'électrons. Mais le courant peut être favorisé par un autre type de porteurs : les trous. Un trou est lié à une absence locale d'électron au niveau d'un atome : cela crée des zones ionisées au sein du matériau et les charges électriques voyagent de zones ionisées vers d'autres. C'est le principe des semi-conducteurs, la circulation d'un courant est favorisée à la fois par le mouvement d'électrons et de trous (qui se déplacent dans un sens opposé, un électron qui saute d'un atome, laissant derrière lui un trou).

L'effet Seebeck est directement fonction des propriétés microscopiques du matériau. Les propriétés d'un matériau semi-conducteur sont liées au nombre de porteurs électrons et de trous. Lorsqu'un matériau possède plus de trous que d'électrons, on l'appelle semi-conducteur dopé P (car un trou est "Positif"). Lorsqu'un matériau possède plus d'électrons que de trous, on l'appelle semi-conducteur dopé N ("Négatif" car surcharge en électrons).

Pour une différence de température marquée, on utilise plusieurs modules P-N en cascade.

En faisant circuler un courant électrique dans un circuit avec deux semi-conducteurs (l'un N, l'autre P) mis en contact, à la jonction P-N, la conductivité est grande, les électrons circulent vite et accélèrent : l'énergie cinétique est convertie en chaleur. Au niveau de la jonction N-P, il y a décélération des électrons, impliquant une baisse de température.

Le rendement du phénomène thermoélectrique est cependant très faible et ne permet pas de concurrencer les systèmes classiques permettant de produire de l'électricité à partir de chaleur (machines thermiques).

Nous reviendrons plus en détails sur les diverses applications, principes de fonctionnement de cette technologie dans la fiche n°9 spécifique à la conversion thermoélectrique.

3.2.10. La turbine de TESLA

La turbine de Tesla (du nom de son inventeur Nikola Tesla) est un type de turbine **sans pales** breveté en 1913. Elle utilise l'effet de couche limite pour subir un entrainement et non pas l'impact d'un fluide contre des pales comme c'est le cas dans une turbine conventionnelle. La turbine de Tesla est également connue sous les noms de turbine à couche limite, turbine à cohésion, et en anglais : boundary layer turbine, cohesion-type turbine, et Prandtl layer turbine (du nom de Ludwig Prandtl). Son fonctionnement consiste en un jeu de disques lisses qui est entrainé par des buses appliquant un gaz sous pression sur les bords des disques. Il s'agit là d'une force exercée par frottement sur le disque et par un phénomène de viscosité et d'adhésion de la couche limite du gaz. A mesure que le gaz ralentit et cède de l'énergie au disque, il est entrainé par des mouvements en spirale vers l'échappement central.

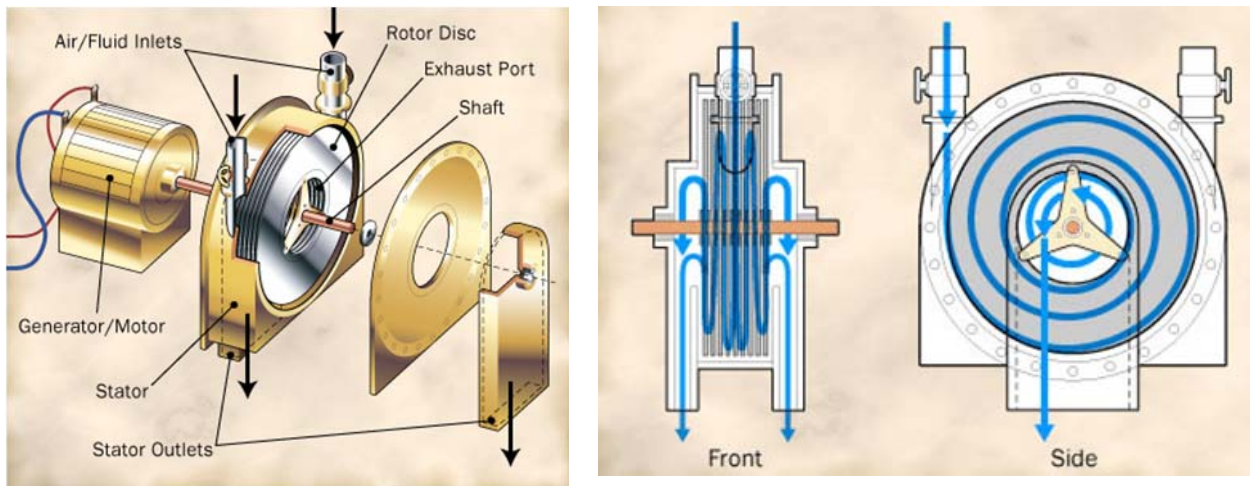


Figure 9 : Représentation du fonctionnement d'une turbine de Tesla

Pour ce qui est des applications de la turbine Tesla, on peut dire qu'elle n'a pas été utilisée commercialement depuis son invention (bien que certaines applications plus récentes pour l'utilisation de la turbine Tesla en tant que pompe soit « développées »), Nikola Tesla ne n'obtint pas de grand contrat de production notamment à cause des problèmes liés aux méconnaissances sur le comportement des matériaux à hautes températures. On peut néanmoins trouver quelques expérimentations (souvent des amateurs qui sont des admirateurs du génie de Nikola Tesla). Nous réaliserons tout de même la fiche n°10 qui détaillera un peu plus la technologie de la turbine de Tesla.

3.2.11. L'effet magnétocalorique (EMC)

La réfrigération magnétique (souvent appelé froid magnétique) est une technologie innovante de production de froid, qui peut remplacer la technique classique de compression-détente de fluides frigorigènes. Son principe est basé sur l'effet magnétocalorique (EMC) qui se traduit par le refroidissement ou l'échauffement de certains matériaux sous l'action d'un champ magnétique. Pour cela on utilise les propriétés magnétiques de certains matériaux comme le gadolinium, l'arsenic, le cobalt, manganèse, silicium, germanium et certains autres alliages (ayant un EMC dit « géant ») sachant que l'EMC de ses matériaux atteint son maximum à la température de curie (température à laquelle le matériau perd son aimantation spontanée). Actuellement, le principal obstacle à une industrialisation est le champ magnétique très élevé (de l'ordre de 5 Teslas) qu'il faut générer afin de pouvoir obtenir des rendements intéressants. Nous reviendrons plus amplement sur cette technologie dans la fiche spécifique n°11.

3.2.12. Les pompes à chaleur

Les pompes à chaleur (PAC) sont de très bons moyens pour rehausser les niveaux de températures de rejets thermiques. Parmi les PAC il existe plusieurs technologies :

- PAC basse température (BT)
- PAC Haute température (HT)
- PAC très haute température (THT)

Les deux dernières catégories sont celles qui nous intéressent en regard du contexte de l'étude.

Les PAC HT permettent de rehausser les niveaux de température jusqu'à environ 100°C tandis que les PAC THT permettent de les rehausser jusqu'à environ 140°C.

Le principe de fonctionnement est simple et repose sur le même principe que celui d'un groupe frigorifique à compression. En effet, on définit deux milieux : la source froide (d'où l'on extrait la chaleur) et la source chaude (où on la réinjecte). La température réelle des sources n'intervient pas dans cette définition, bien que le dispositif soit surtout efficace dans le cas où la source chaude a une température plus élevée que la source froide.

Un circuit frigorifique transfère l'énergie thermique grâce au changement d'état (liquide/gaz) du fluide qu'on oblige à circuler à l'intérieur. Il est constitué de différents organes (cf. figure 12) :

- 1 : le condenseur (source chaude) : le fluide frigorigène libère sa chaleur au fluide secondaire (eau, air...) en passant de l'état gazeux à l'état liquide.
- 2 : le détendeur : il réduit la pression du fluide frigorigène en phase liquide.
- 3 : l'évaporateur (source froide) : la chaleur est prélevée au fluide secondaire pour vaporiser le fluide frigorigène.
- 4 : le compresseur : actionné par un moteur électrique, il élève la pression et la température du fluide frigorigène gazeux en le comprimant.

Le compresseur assure la compression du fluide dans le condenseur (source chaude) afin que le changement d'état souhaité se produise à une température élevée. La pression du fluide est alors réduite au moyen d'un détendeur avant d'entrer dans l'évaporateur (source froide) pour que le changement d'état voulu se produise à basse température. Voici un schéma de principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur :

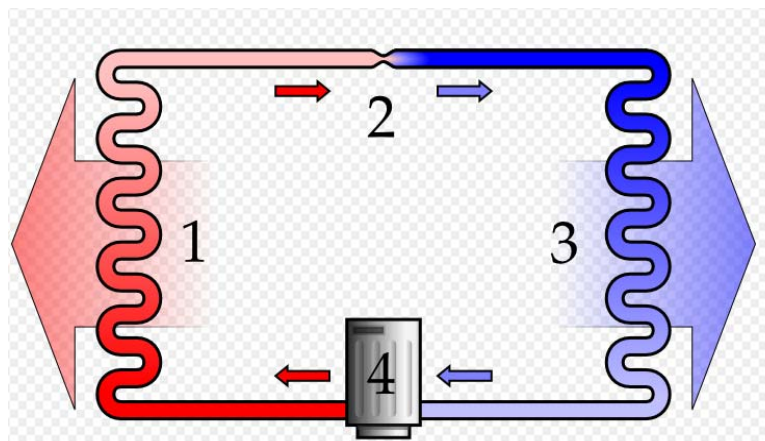


Figure 12 : Schéma de principe d'une PAC

Nous reviendrons plus en détail sur ces technologies dans la fiche spécifique n°12.

Les technologies des PAC gaz et des PAC à sorption seront-elles aussi décrites dans cette fiche.

3.3. SYNTHÈSE

Ce cahier a permis d'introduire les différentes technologies de conversion thermique et thermoélectrique qui sont détaillées en annexe dans des fiches spécifiques pour chacune d'entre elles. Celles-ci expliquent plus amplement leur principe de fonctionnement, les variantes, les applications (mature ou future), les avantages et inconvénients. En outre, il est inclus un listing des différents fabricants et, dans la mesure du possible, des différents exemples d'installation.

L'ensemble de ces données est résumé au niveau des tableaux récapitulatifs ci-dessous. L'objectif de la présente synthèse est d'identifier puis sélectionner plus rapidement et efficacement une technologie en lien avec les applications qui concernent le domaine de l'étude ainsi que le scope de température respectif.

<p>Le critère permet de quantifier grossièrement le comportement des différentes technologies identifiées vis-à-vis d'un fonctionnement avec des fluides encrassants - que sont bien souvent les rejets thermiques - qu'il soit liquides ou gazeux. Ce critère va de 0 (mauvais comportement) à 3 (très bon comportement) et permet de prendre en compte plusieurs paramètres inhérents au fonctionnement dans des conditions difficiles (sensibilité à l'encrassement des organes du système, nettoyage et inspection aisée ou non)</p>	<p>Le critère permet de quantifier le niveau de maturité de la technologie associée, de 0 (maturité quasi nulle) à 3 (technologie éprouvée) - il prend en compte si la technologie est disponible auprès de fabricants (nombre de fabricants (un ou plusieurs)), le niveau de développement (travaux de R&D important ou non) ainsi que la connaissance de la technologie par les acteurs dans le domaine</p>
--	---

	NOTE	NOTE
	Comportement de fonctionnement face à des rejets thermiques (par rapport au fluide de travail encrassant)	maturité
0	Les organes (pompes, échangeurs, vanne...) ont un potentiel d'encrassement très sensible: le nettoyage des différents organes peut être réalisé uniquement sur arrêt et démontage du système et de manière difficile (accès sur un seul coté d'échangeur par exemple) et les fréquences de nettoyages sont de l'ordre du jour, semaine (voir heures)	Pas de fabricants, technologie très peu connu et développement en R&D quasi nul
1	Les organes (pompes, échangeurs, vanne...) ont un potentiel d'encrassement faible néanmoins le nettoyage des différents organes peut être réalisé uniquement sur arrêt et démontage du système et ce de manière difficile (accès sur un seul coté d'échangeurs par exemple) et les fréquences de nettoyages sont courtes (semaine, mois)	Pas de fabricants, technologie peu connu, mais développement en R&D important
2	Les organes (pompes, échangeurs, vanne...) ont un potentiel d'encrassement très faible ; le nettoyage des différents organes peut être réalisé en continu - démontage du système de manière aisée et les fréquences de nettoyage sont de l'ordre de l'année	Peu de fabricants (ou un seul), mais technologie connu et développement en R&D important
3	Les organes (pompes, échangeurs, vanne...) ont un potentiel d'encrassement nul (ou quasi nul), ils sont sujet à des phénomènes d'auto-nettoyage ou alors des nettoyages en continu efficaces et éprouvés et permettent une fréquence de nettoyage très longues (de l'ordre de plusieurs années)	Nombreux fabricants, technologie éprouvée, développement en R&D toujours important

TABLEAU RECAPITULATIF DES TECHNOLOGIES POUR LA RECUPERATION/VALORISATION DES ENERGIES A BAS NIVEAUX DE TEMPERATURE - LES ECHANGEURS DE CHALEUR

Technologie	N° de fiche	Mode	Apport d'énergie supplémentaire pour assurer la récupération/valorisation	Quantité d'énergie en apport (faible/moyenne/forte)	Domaine d'utilisation (Pression et température)	Gamme de surface d'échange	Matériaux possible	Valeur usuelles de coefficient de transfert de chaleur global [W/m².K]	Performance	Comportement de fonctionnement face à des rejets thermiques par (rapport au fluide de travail encrassant)	Avantages	Inconvénients	Niveau de maturité	Coût	Principaux Fabricants/fournisseurs (liste non exhaustive)
Les échangeurs de chaleur (plaques et joints)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides essentiellement	Pompe de circulation fluide primaire et secondaire	Faible	De -35°C jusqu'à 200°C maximum (joint) et 20 bars	Jusqu'à 770 m² (modulable par le nombre de plaques)	<u>Plaque</u> : Acier inoxydable (304, 316), acier au carbone, Titane, Avesta 254 SMO, hastelloy, palladium <u>Joint</u> : Nitrile, EPDM, Butyl, Fluor, Viton, autres	<u>eau /eau</u> : 2000-5000 <u>huile/eau</u> : 800-1500 <u>huile/huile</u> : 200-500	élevée	1	pincement de température faible=> efficacité-compacité	fort potentiel d'encrassement dû au faible espacement interplaques	3	Faible	ALFALAVAL; TRANTER CIAT;GEA;BARRIQ UAND;VITHERM...
Les échangeurs de chaleur (plaques et joints à large canal)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides essentiellement	Pompe de circulation fluide primaire et secondaire	Faible	De -35°C jusqu'à 200°C maximum (joint) et 20 bars	Jusqu'à 770 m² (modulable par nombre de plaques)	<u>Plaque</u> : Acier inoxydable (304, 316), acier au carbone, Titane, Avesta 254 SMO, hastelloy, palladium <u>Joint</u> : Nitrile, EPDM, Butyl, Fluor, Viton, autres	Baisse des coefficients d'échange par rapport à la technologie classique d'échangeurs à plaques et joints	moyenne	3	fonctionne très bien avec des liquides encrassants (fibres, pulpes, particules grossières); pincement de température faible=> efficacité-compacité	diminution des coefficients de transferts de chaleur par rapport aux technologies classiques d'échangeurs à plaques et joints	3	Faible	Alfalaval (WideGap®); TRANTER (plaques GF);GEA PGHE (free flow);MAGNUM GS (plaque LYCE)
Les échangeurs de chaleur (plaques brasées/soudées)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides essentiellement	Pompe de circulation fluide primaire et secondaire	Faible	Jusqu'à 400°C et 40 bars	Jusqu'à 770 m²	<u>Plaque</u> : Acier inoxydable (304, 316), acier au carbone, Titane, Avesta 254 SMO, hastelloy, palladium	<u>eau /eau</u> : 2000-5000 <u>huile/eau</u> : 800-1500 <u>huile/huile</u> : 200-500	élevée	0	plus large plage de fonctionnement que les technologies à plaques jointées (tenue en pression); pincement de température faible=> efficacité-compacité	Non démontable=> inspection et nettoyage mécanique impossible	3	Faible	ALFALAVAL; TRANTER CIAT;GEA;BARRIQ UAND;VITHERM...

Les échangeurs de chaleur (tubulaires)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides essentiellement	Pompe de circulation fluide primaire et secondaire	Faible	Presque sans limites	Presque sans limites	Presque sans limites	<u>Gaz stagnant:</u> 5-15 <u>Gaz en écoulement:</u> 10-100 <u>Liquide stagnant:</u> 50-1000 <u>liquide en écoulement</u> (eau/eau:1000-2500; huile/eau : 300-600; huile /huile: 100/300)	élevée	1	tenue en température et en pression presque sans limites (avec l'augmentation de l'épaisseur des tubes);bon comportement vis-à-vis de l'encrassement coté tube	nettoyage difficile coté calandre (démontage du faisceau); surface au sol importante.	3	Faible	CIAT;BARRIQUAND ;VITHERM...
Les échangeurs de chaleur (spirale)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides essentiellement	Pompe de circulation fluide primaire et secondaire	Faible	De -100°C à 450°C et 40 bars	De 1 m² à 700 m²	<u>Standard :</u> Acier inoxydable, acier au carbone <u>Spécifique :</u> Tout métal pouvant être usinés à froid ou soudés : Titane, duplex, hastelloy, 904L	<u>liquide/liquide:</u> 700-2500 <u>condensation:</u> 900-3500	élevée	3	Action auto-nettoyante;compacité par rapport aux technologies tubulaires; bon coefficient de transfert de chaleur	Prix onéreux	3	Elevé	ALFALAVAL;TRAN TER et SPIREC
Les échangeurs de chaleur (les batteries à ailettes)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents gazeux (fumées, air, gaz)	Pompe de circulation fluide primaire et ventilateur/extracteur pour le fluide secondaire	Faible	Jusqu' 600°C et 100 bars	D'une nappe de tube à plusieurs dizaine de nappes sur des longueurs allant jusqu' à 10m	<u>Tube:</u> Cuivre, acier inox; <u>Ailette:</u> Aluminium, acier inoxydable, titane	De 5 à 100	moyenne	2	récupération de chaleur sur effluents gazeux (fumées, air, gaz); augmentation de surface par la présence d'ailettes; grandes variétés d'ailettes	corrosions; encrassement des ailettes rapides dû au faible pas d'ailettes (de l'ordre du mm au dixième de mm)	3	Moyen	CARRIER; CIAT; ALFALAVAL;WESPER;TRIANON ECHANGEUR;TRAN E;FRIGA-BOHN...
Les échangeurs de chaleur (les échangeurs en plastique)	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents liquides et gazeux (fumées, air, gaz)	Pompe de circulation et/ou ventilateur/extracteur pour le flux gazeux	Faible	Jusqu' 350°C (suivant les polymères utilisés)	Serpentin de plusieurs mètres et batterie à ailettes de petite taille	polymères thermoplastiques, polyamides, PET, plastique chargé de fibre de verre; PVDF (polyfluorure de vinylidène); FEP (fluorinate d'éthylène propylène); PFA (perfluoralkoxy); ECTFE (éthylène – monochlorotrifluoréthylène); PTFE (poly-tétrafluoroéthylène); Polyamide, réticulée et chargé en fibre; PP (polypropylène); PEHD réticulé (polyéthylène haute densité); PSU (polysulfone)	-	faible	2	Prix; facilité de fabrication en série ; pas de phénomène de corrosions ni d'attaques chimiques (condensation des composées acides);faible potentiel d'encrassement (parois lisses et donc faible adhérence des particules encrassantes)	grande surface d'échange nécessaire due aux faibles coefficients d'échanges thermiques; faible conductivité thermique des plastiques (comportement isolant);limitation de tenue en température	2	-	TET

les échangeurs à lit fluidisé/cont act direct	1	Récupération et transfert de chaleur sur effluents gazeux (fumées, air, gaz)	Pompe de circulation, appoint de sable éventuelle, séparateur, ventilation	Moyen	Presque sans limites	Surface d'échange très élevée-suivant le type de garnissage (contact entre particule/go utte)	<u>Lit :</u> céramique, verre, sable, métaux, copeaux <u>échangeur:</u> acier inox	De 500 à 2500	moyenne à élevée	3	Grande surface d'échange; action auto-nettoyante; amélioration du coefficient d'échange; intégrabilité sur système existant; action inertielle du lit; homogénéisation de la température	Pas de fabrication en série (à part pour des applications de niche/spécifique tel que la distillation sous vide); effet abrasif usant les parois; peu de réalisation dans le domaine de la récupération à bas niveaux de température	2	Sur mesure	H2O GmbH; Klaren
Les échangeurs/régénérateurs rotatifs	2	Récupération et transfert de chaleur sur effluents gazeux (fumées, gaz, air)	Extracteur/Ventilateur pour les 2 flux + 1 moteur d'entraînement pour la roue	Moyen	Jusqu' 800°C et 100 bars	de 0,6 à 6 m de diamètre de rotor	<u>Lamelles:</u> fines plaques d'acier formées par laminage ou en aluminium, elles possèdent parfois des revêtements émaillés spéciaux pour protéger les lamelles de la corrosion ou sont alors recouvertes d'un revêtement hygroscopique (silicagel)	De 5 à 100	moyenne	2	mise en œuvre simple et temps de retour sur investissement faible; possibilité de récupération de la chaleur latente (dessiccant cooling) grâce au revêtement hygroscopique (silicagel); revêtements anti-corrosion possible (émaillage)	taille des dispositifs importants; alimentation d'un moteur pour la rotation; nettoyage en phase d'arrêt (avec des jets sous haute pression);	3	Moyen	HOWDEN;HOVAL;K LINGENBURG Energy recovery
Les échangeurs à Caloducs	3	Récupération de chaleur sur effluents gazeux (fumées, gaz, air) et liquides	Pompes de circulation seulement pour le fluide secondaire	Très faible	Jusqu'à 400°C suivant le fluide de transfert / pour la pression respect des différentes limites (sonique, ébullition...etc .)	Diamètre de tube (ou tube aileté) standard ou sur mesure avec un nombre de caloducs limité par la perte de charge acceptable par le process (fonction de l'agencement du faisceau de caloducs).	<u>Suivant le fluide de transfert:</u> aluminium, aciers inoxydables cuivre, aciers , aciers doux carbone, acier inoxydable AISI 316, nickel tungstène, molybdène molybdène, alliage molybdène-rhénium	(Suivant le fluide de transfert externe et le fluide de transfert contenu dans le caloduc, le type de dynamique (capillaire/gravitaire). Les flux soutirables avec des caloducs à eau sont : <u>Eau</u> 20 à 100 W/cm ² (capillaire variés) 4,5 W/cm ² (capillaire toiles)	élevée à très élevée	2	Très grande compacité; très bon échange thermique; pas d'organe de circulation du fluide interne (pompe) fonctionnement par gravité et/ou capillarité; quasiment adiabatique; pas de contamination possible entre les deux effluents	encrassement possible par la présence d'ailettes; fabrication et mise en route fastidieuse et délicate	3	Moyen	DATE;THERMACORE;THERMOFIN;ATHERM;DAILYSOLAR

TABLEAU RECAPITULATIF DES TECHNOLOGIES POUR LA RECUPERATION/VALORISATION DES ENERGIES A BAS NIVEAUX DE TEMPERATURE

Technologie	N° de fiche	Mode	Apport d'énergie supplémentaire pour assurer la récupération/valorisation	Quantité d'énergie en apport (faible/moyenn e/forte)	Domaine d'utilisation (Pression r et température)	Performance	Comportement de fonctionnement face à des rejets thermiques par (rapport au fluide de travail encrassant)	Avantages	Inconvénients	Niveau de maturité	Coût	Principaux Fabricants/fournisseurs (liste non exhaustive)
Le Cycle Organique de Rankine (ORC)	4	Valorisation de la chaleur en électricité et chaleur	Une pompe pour le fluide de travail	Faible	valorisation des rejets à partir de 90°C avec des fluides organiques	faible (rendement entre 8 et 20%)	2	Valorisation électrique et de chaleur avec des rejets à basse température (à partir de 90°C) avec des fluides organiques; mise en œuvre simple et rapide; Technologie éprouvée et en grand développement; Temps de retour sur investissement suivant le coût du rachat de l'énergie => pour la France (5 à 7 ans); augmentation de durée de vie des turbines (pas de cavitation)	rendement faible (maximum 20% sur des hautes températures); pas de module de très forte puissance (maximum 2,5MWe)	2	moyen	TURBODEN; ORMAT; Pratt & Withney Power System; GMK; ENEFTECH; ENERTIME
Les machines frigorifiques à sorption	5	Valorisation de la chaleur en production de froid	Une pompe de circulation pour la solution	Très faible	adsorption à partir de 55°C; absorption suivant le nombre d'étages (simple effet: 70°C; double effet jusqu'à 150°C)	Faible : COP compris entre 0,6 et 1,4 suivant le nombre d'étages de compression (simple, double ou triple effet)	2	production de froid à partir d'une source chaude à basse température; pas de compresseur (seulement une pompe); fluides de travail non nocifs pour l'environnement (eau/bromure de lithium/ammoniac)	COP faible par rapport aux technologies à compression; machine à adsorption volumineuse et peu répandu; pas de machine de petite puissance (industrie et grand tertiaire/habitat seulement)	3	moyen	<u>Absorption:</u> TRANE; YORK; CARRIER; YAZAK I; MCQUAY; ROBUR BROAD <u>Adsorption:</u> NISHIYODO; MYCOM; SORTECH
Les matériaux à changement de phase (MCP)	6	Stockage de chaleur et valorisation déphasée dans le temps	Aucun (Stockage)	Nulle	De 5°C à 400°C (Suivant les MCP utilisés; eutectiques de sels; paraffine...)	élevée (grande capacité volumétrique de stockage)	-	Stockage de chaleur dans une vaste gamme de température de part la vaste gamme de MCP disponible; compacité des systèmes de stockages de part la forte enthalpie de changement d'état des matériaux; stockage de grande quantité de chaleur avec de faibles écart de température	conductivité thermique faible; prix onéreux; MCP inflammable et dangereux pour certains (nitrate et nitrite de potassium et de sodium; paraffine); mauvais comportement au vieillissement pour les paraffines; beaucoup de R&D mais peu d'exemple concret	2	élevé	RUBITHERM; EPS Ltd; TEAP; CLIMATOR; SGL; Mitsubishi chemical; PURE TEMP; ASTORTAT (Honeywell); Pluss Polymers;
Les machines thermo frigorifiques à éjection	7	Valorisation d'un rejet thermique pour la production de froid	Une pompe pour le fluide de travail	Faible	A partir de 90°C	Faible	2	Valorisation d'une source de chaleur pour évaporer un fluide frigo organique; Présence seule d'une pompe donc pas d'énergie de compression à fournir; fonctionnement à basse pression et donc possibilité d'utilisation de l'eau comme fluide de travail; étanchéité parfaite du système donc peu de fuite de fluide frigo dans l'environnement	faible adaptation du système éjecteur avec la variation des conditions de fonctionnement; peu d'applications réelle et pas de fabricant de machine attitré (frigoriste et fabricant d'éjecteur a part entière)	1	-	-

Les moteurs à air chaud (Stirling et Ericsson)	8	Valorisation d'un rejet thermique en électricité et en chaleur	Aucun	Nulle	A partir d'un différentiel de température (plus le différentiel est grand et plus grande est la production)	faible (nombreuse irréversibilité + grande taille par rapport à la puissance générée)	2	Possibilité de produire de la chaleur et de l'électricité; combustion externe (maîtrise de la combustion, pas de mélange avec les lubrifiants, pas d'explosions, donc systèmes silencieux et grande durée de vie); technologie passive	Taille importante des machines par rapport à la puissance générée; Pas de forte puissance pour le Stirling (pas de réalisation pour le moteur d'Ericsson); Difficulté du confinement des gaz de travail (hélium); puissance constante et donc difficilement changeable d'un niveau à un autre pour le Stirling (la présence de soupapes pour l'Ericsson n'inclue donc pas ce problème)	2	élevé	SOLO kleinsmotoren GmbH ; WhisperTech; Stirling BioPower
La conversion thermoélectrique (effet Seebeck)	9	Valorisation d'un rejet thermique en production d'électricité	Aucun	Nulle	De la très basse température 100K (cryogénique) aux très hautes températures (750K)	Faible	-	Exploitation sans système mécaniques fragiles; technologie transportable; large plage de température d'utilisation; technologie passive	Faible puissance seulement; faible performance; matériaux (antimoine; Plomb; bismuth; tellure et sélénium);	1	Très élevé	-
La turbine de TESLA	10	Utilisation d'un rejet gazeux ou liquide à basse température pour l'entraînement d'une turbine et la production d'électricité	Aucun	Nulle	Tout niveaux de température dans la limites des matériaux	moyenne	-	Pas de pales (aubes); permet d'atteindre de hautes vitesses; plus silencieuse que les turbines conventionnelles (utilise l'effet de la couche limite, adhésion + viscosité); faible frottement; alimentation par de l'air de la vapeur à basse température (présence d'une buse qui permet d'augmenter la vitesse d'éjection)	Faible couple moteur; ne convient pas dans la plupart des cas à un remplacement direct pour les turbines conventionnelles; améliorations de conceptions en cours, peu de travaux de R&D	0	-	-
La réfrigération magnétique	11	Production de froid	Energie nécessaire pour la création du champ magnétique	-	Application prometteuse autour de la température ambiante	-	-	Les démonstrateurs montrent des COP de production très important (environ de 10 donc facteur 2 par rapport au cycle thermodynamique); fluide de travail non nocif et ni proscrit (eau, glycol); système silencieux (pas de vibrations et donc de bruit)	génération de fort champs magnétiques (5 teslas) et donc besoin d'un refroidissement à l'hélium (énergivore); matériaux à EMC géant coûteux; encore beaucoup de travail de R&D	1	-	-
Les PAC	12	Rehausse des niveaux de températures d'un effluent	Energie pour le compresseur/ou énergie pour l'entraînement du moteur gaz	Moyenne	rejets jusqu' 70°C pour l'offre actuelle; PAC HT jusqu' à 100°C et PAC THT jusqu'à 140°C (R&D)	Bonne (COP entre 3 et 5)	2	Permet de rehausser le niveau de température des effluents habituellement non exploitable; fluide frigo R1234yf et R245fa prometteur (peu nocifs pour l'environnement); COP intéressant (entre 1,5 et 4)	Utilisation de fluides dangereux pour l'environnement (beaucoup de travaux de recherche pour trouver de nouveau fluide; travaux de recherche aussi sur les compresseurs	3	faible	CARRIER; JOHNSONS CONTROL; CIAT; VIESSMAN...

4. EXPÉRIENCES À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE - CHAPITRE 4

De nombreux projets d'écologie industrielle ont vu le jour ou sont en cours de développement dans de nombreux pays dans le monde. On note notamment de nombreux projets en cours de réalisation et réalisés en matière d'écologie industrielle. Nous vous présenterons dans ce chapitre, de manière succincte quelques exemples de réalisation. Des compléments d'informations et de nombreux autres exemples seront présentés en annexe sous forme de fiche. Il faudra pour cela se référer en annexe à la partie : « expériences à bas niveau de température ».

Vous retrouverez en annexes des expériences réalisées en plus de celles décrites ci-dessous :

- ANNEXE 14 : Le centre énergétique de Bruce au Canada
- ANNEXE 15 : Kalundborg
- ANNEXE 16 : Projet Alter Eco

4.1. LA COGENERATION DE LA VILLE DE SAINT-FELICIEEN AU CANADA

L'un des exemples les plus cités en matière d'écologie industrielle est celui de la cogénération de la ville de Saint-Félicien au Canada.



Dans le but de favoriser l'émergence d'une démarche d'écologie industrielle, la ville de Saint-Félicien a élaboré à travers l'implantation d'une unité de cogénération un réseau de valorisation de chaleur fatale issue du circuit de refroidissement du circuit condenseur de l'unité. En effet, dans le cadre d'un accord avec la ville de Saint-Félicien, de l'eau chaude provenant du circuit de refroidissement du condenseur est fournie gratuitement au parc agro-thermique situé à proximité. Cette source d'énergie thermique est mise à disposition d'entreprises de productions agricoles pour le chauffage de serres et d'entreprises de transformation agroalimentaire et agro-industrielles utilisant des procédés faisant appel au séchage ou au chauffage (séchage de fruits, légumes, foin, tourbe et rouissage à l'eau chaude de lin et de chanvre textile).

VOIR ANNEXE 13 : La cogénération de la ville de Saint-Félicien au Canada

4.2. INCO ET PROGECO

Parmi les acteurs d'écologie industrielle, on peut citer le groupe Inco ; partenaire français du groupe italien Progeco qui opère depuis 1992 dans le domaine des processus industriels, ainsi que de la production et de l'exploitation de l'énergie électrique.

Pour chaque projet, Inco étudie la meilleure solution pour adapter le générateur à l'installation, en optimisant le rendement global en termes d'énergie électrique produite, sans introduire de contraintes fonctionnelles dans le processus thermique.

Le fabricant du groupe ORC est choisi selon les caractéristiques spécifiques de chaque projet, parmi les marques les plus fiables au monde.

Pour la récupération d'énergie dans les processus thermiques industriels, Inco et Progeco proposent une solution basée sur le Cycle Organique de Rankine. Le turbogénérateur à ORC permet de récupérer l'énergie des fumées chaudes en aval des processus industriels qui produisent des fumées en quantité significative tels que les aciéries, les cimenteries, les verreries, les incinérateurs, etc., et assure une génération d'énergie électrique pouvant atteindre 17% dans certains cas.

4.3. PROJET SUMMERHEAT

En France et précisément à Montpellier, il existe un projet de valorisation de la chaleur fatale d'été de l'usine de méthanisation de Montpellier.

La trigénération du polygone consiste à valoriser la chaleur excédentaire d'une unité de cogénération par production de froid.

Le projet de valorisation doit permettre à terme :

- D'augmenter de 58% à 75% l'efficacité énergétique de la production d'électricité du CVO
- D'augmenter de 50% à 90% la valorisation de la chaleur produite par les moteurs
- De couvrir 70% des besoins de chauffage et d'ECS du futur quartier
- De climatiser environ 50 000 m² de bureaux
- D'économiser environ 3200 t/an de CO₂

4.4. RESEAU DE FROID DE MONACO (SMEG : SOCIETE MONEGASQUE D' ELECTRICITE ET DE GAZ)

A Monaco, la SMEG exploite la centrale thermo-frigorifique qui alimente le réseau urbain en chaleur et froid.

La production de froid est assurée depuis 1983 par deux machines à absorption de marque TRANE qui valorise la chaleur issue de l'usine d'incinération de la principauté et utilise l'eau comme frigorigène. La production de froid a été renforcée en 2000/2001 par des machines à compression.

La vapeur produite est utilisée en premier lieu pour alimenter un turboalternateur de 3 MW_{él} raccordé au réseau de SMEG.

La vapeur résiduelle alimente trois échangeurs de, chaleur d'une puissance totale de 20,2 MW et deux machines à absorption de marque TRANE de 2 MW chacune, la centrale comporte aussi 11 MW de groupe de froid traditionnel à compression, l'ensemble alimente un réseau de chaleur (95°C) d'une longueur de 2,5 km et un réseau de froid (6°C) d'une longueur identique (2,5 km), assurant ainsi la fourniture de chaleur et de froid au quartier de Fontvieille qui s'étend sur 22 ha, via 27 sous stations.

5. **CONFRONTATION/APPLICABILITE : ETUDES DE CAS - CHAPITRE 5**

Dans le cadre du présent rapport sur les procédés de récupération et valorisation des énergies à bas niveau de températures, la confrontation des connaissances techniques et technologiques avec l'étude de cas pratiques est primordiale. En effet, la question de l'intégration et de la mise en place des technologies recensées précédemment à des systèmes existants, constitue une finalité pour cette étude.

Ces études de cas s'adresseront tout particulièrement aux entreprises désirant promouvoir une plus grande efficacité énergétique de leurs installations. La valorisation des énergies fatales à basses températures correspond aujourd'hui à une démarche d'économie d'énergie, elle est révélatrice de la prise de conscience générale des entreprises pour réduire toutes formes de gaspillages énergétiques.

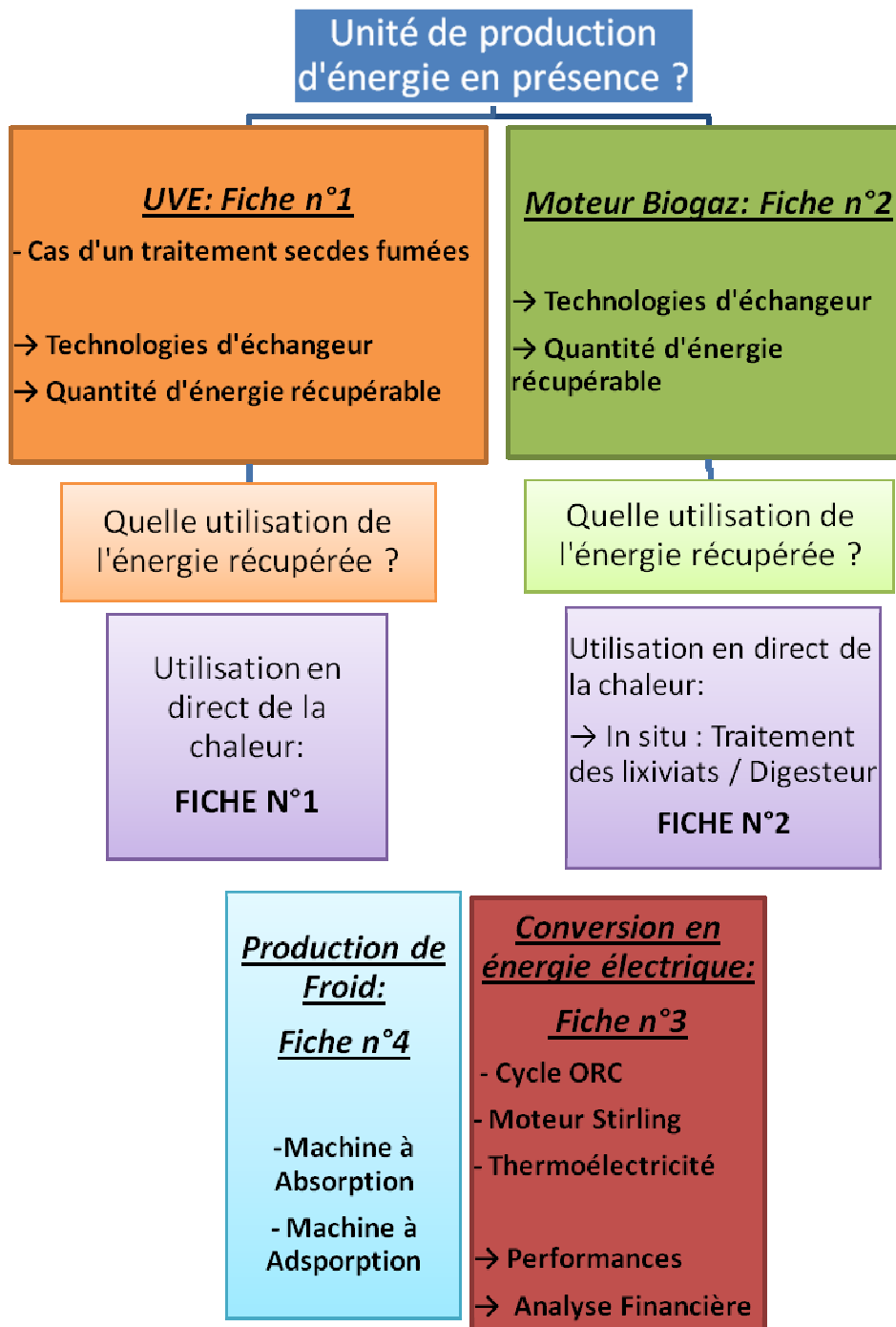
Dans ces documents, plusieurs hypothèses sont émises tout en gardant la volonté de traiter la plus grande gamme de paramètres possibles. Ceci dans le but d'assurer une adaptabilité des cas étudiés sur un large spectre d'installations existantes.

Les entreprises trouveront la réponse à plusieurs questions dans le but de faciliter leur volonté de favoriser et de mettre en œuvre ce type de technologie :

- ✓ **Où** récupérer cette énergie perdue?
- ✓ **Pourquoi ?** : Les champs d'utilisation de cette énergie récupérée
- ✓ **Comment ?** : Etude de la faisabilité technique
- ✓ **Est-ce rentable ?** : Etude économique

Pour répondre à ces questions, cette étude est divisée en quatre fiches qui présentent différents moyens techniques de valorisation des énergies à bas niveau de température :

- **Fiche N°1** : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les UVE
- **Fiche N°2** : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les moteurs biogaz
- **Fiche N°3** : Etude de cas de la valorisation en énergie électrique de l'eau chaude
- **Fiche N°4** : Etude de cas de la production de froid à partir de l'eau chaude



6. CONCLUSION

Dans un contexte actuel de maîtrise et d'amélioration de l'efficacité énergétique, la valorisation des énergies à bas niveau de température est une voie indispensable à explorer. Cette récupération d'énergie fatale est particulièrement adaptée aux installations de valorisation énergétique des déchets et de la biomasse, sur lesquels se focalise l'application de cette étude.

Dans une première partie de l'étude, nous avons mis en évidence que de nombreuses sources de thermies non exploitées sont disponibles. Nous pouvons notamment citer le potentiel de récupération énergétique sur les fumées en post-combustion ou sur l'énergie dissipée pour le refroidissement des réseaux fluides des process (vapeur, huile, ...). Nous avons pu démontrer qu'un véritable gisement énergétique non exploité est présent, notamment en France qui dispose d'un nombre important d'UVE, d'unités de méthanisation ou encore d'installations de stockage de déchets.

Dans le cadre de la seconde partie de l'étude, nous avons identifiés que ces sources d'énergie fatale à bas niveau de température correspondaient à des besoins de différents secteurs. En effet, nous avons pu montrer que le spectre de température de ces rejets thermiques (de 60 °C à 250°C) répondait à une demande des secteurs de l'industrie, du tertiaire... Cela permet de conclure que cette énergie est en mesure de se substituer à des énergies actuellement utilisées pour des usages existants et ainsi de compléter un mix énergétique.

L'étude présente, au sein de la troisième partie, les technologies et procédés susceptibles de transformer ce potentiel inexploité. En effet, nous avons pu voir qu'il existait des systèmes fiables, matures et présentant des retours sur expérience satisfaisants, susceptibles de réaliser cette récupération. Les douze fiches présentes en annexe du rapport portent attention à différents procédés permettant d'effectuer une transformation de l'énergie thermique en électricité (ORC, Stirling, ..), de produire du froid (machines à absorption...) ou encore de stocker de l'énergie calorifique (matériaux à changement de phase).

Enfin, quatre études de cas permettent de réaliser une confrontation de ces techniques avec la réalité, démontrant qu'il existe une véritable faisabilité technique de mise en place ces systèmes avec des installations existantes (UVE, moteur biogaz). De plus, d'un point de vue économique, cette partie a permis de mettre en perspective la viabilité économique de tels projets qui demeurent néanmoins intimement liée aux subventions (Fond Chaleur, CEE,...) ou incitations financières (TGAP), aux tarifs d'obligation d'achat (électricité) ainsi qu'à l'évolution du coût des énergies actuellement utilisées et pouvant être substituées à l'avenir.

PARTIE 2

Fiches de présentation des technologies et études de cas

7. ANNEXES

Fiches :

- ANNEXE 1 : Les échangeurs de chaleur
- ANNEXE 2 : Les régénérateurs rotatifs
- ANNEXE 3 : Les échangeurs à caloducs
- ANNEXE 4 : Les cycles organiques de RANKINE (ORC) et les turbines scroll
- ANNEXE 5 : Les machines frigorifiques à sorption
- ANNEXE 6 : Les matériaux à changement de phase à basse température (PCM)
- ANNEXE 7 : Les machines thermofrigorifique à éjection
- ANNEXE 8 : Les cycles moteurs à air chaud
- ANNEXE 9 : La conversion thermoélectrique
- ANNEXE 10 : La turbine de TESLA
- ANNEXE 11 : Les systèmes à effet magnétocalorique (froid magnétique)
- ANNEXE 12 : Les pompes à chaleurs

Expériences à bas niveau de température :

- ANNEXE 13 : La cogénération de la ville de Saint-Félicien au Canada
- ANNEXE 14 : Le centre énergétique de Bruce au Canada
- ANNEXE 15 : Kalundborg
- ANNEXE 16 : Projet Alter Eco

Etudes de cas :

- ANNEXE 17 : Fiche N°1 : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les UVE
- ANNEXE 18 : Fiche N°2 : Etude de cas de la valorisation d'énergie thermique basse température sur les moteurs biogaz
- ANNEXE 19 : Fiche N°3 : Etude de cas de la valorisation en énergie électrique de l'eau chaude
- ANNEXE 20 : Fiche N°4 : Etude de cas de la production de froid à partir de l'eau chaude



Groupement pour la Recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°1 : Les échangeurs de chaleur

Sommaire

1. INTRODUCTION	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT	4
3. LES TECHNOLOGIES D'ÉCHANGEURS USUELLES POUR LA RECUPERATION DE CHALEUR	7
3.1 Les échangeurs à plaques - Généralités	8
3.1.1 Les échangeurs à plaques et joints	9
3.1.1.1 Avantages	10
3.1.1.2 Inconvénients.....	11
3.1.1.3 Applications usuelles	11
3.1.2 Les échangeurs à plaques brasées	11
3.1.2.1 Avantages	12
3.1.2.2 Inconvénients.....	12
3.1.2.3 Les applications usuelles	12
3.1.3 L'échangeur WideGap de AlfaLaval	13
3.1.4 Les échangeurs à plaques soudées spiralée.....	14
3.1.4.1 Avantages	14
3.1.4.2 Inconvénients.....	15
3.1.4.3 Applications usuelles	15
3.2 Les échangeurs tubulaires	15
3.1.4.1 Avantages	17
3.1.4.2 Inconvénients.....	17
3.1.4.3 Applications usuelles	17
3.3 Les batteries à ailettes	17
3.4 Les échangeurs en matière plastique	19
3.5 Les échangeurs à contact direct	21
3.5.1 Les échangeurs à lit fluidisé.....	25
3.6 Les sécheurs pour le traitement des boues	21
3.6.1 Les différentes techniques de séchage	30
3.6.2 Les sécheurs directs	31
3.6.3 Les sécheurs indirects	33
3.6.4 Le séchage mixte	35
3.6.5 Le BDS (Belt drying system) de Andritz.....	35
4. LES DIFFERENTS CAS D'UTILISATION POSSIBLE	37
4.1 Cas Simple d'échange entre deux fluides	37
4.2 Cas de la valorisation du refroidissement des fumées issues de combustion	37
6. RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT – CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	38
8. BIBLIOGRAPHIES	39

1. Introduction

Dans le contexte énergétique actuel, la hausse des prix de l'énergie et la raréfaction des sources d'énergies fossiles poussent la société industrielle contemporaine à devenir de plus en plus performante, tant sur l'aspect financier, environnemental que sur l'aspect maîtrise de l'énergie. Ce dernier point amène donc les industriels à opter pour une politique d'efficacité énergétique où la recherche des meilleurs rendements de leurs processus et la baisse de leurs consommations énergétiques deviennent indispensables. Cette étape passe donc par l'optimisation des différents organes process mais aussi par la valorisation énergétique des actuels et nombreux rejets thermiques industriels. C'est là qu'intervient, et ceci depuis longtemps, les échangeurs de chaleur.

En effet, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels (90%) transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie...etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.).

Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : les propriétés physiques des fluides, leur agressivité, les températures ainsi que les pressions de service de ces fluides. Les contraintes d'encombrement et de maintenance doivent aussi être prises en compte, ainsi que les considérations économiques. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain non négligeable de rendement et d'énergie des procédés.

Selon le niveau de température de la source de chaleur, l'exploitant peut profiter de ces rejets thermiques selon le but recherché : chauffage d'air froid ou d'eau, ou encore, en cas de rejets thermiques à très haute température, production de vapeur pour des procédés industriels.

Le but de ce document n'étant pas de réaliser un état de l'art des échangeurs de chaleur (qui serait un travail seul de longue haleine au vue du nombre de technologies d'échangeurs de chaleur existantes), ni de démontrer les principes de fonctionnement des échangeurs, nous n'aborderons donc que brièvement les principes fondamentaux du calcul d'échangeurs et nous irons plus en détails sur l'aspect technologique des échangeurs les plus employés et intéressants dans le domaine de la récupération d'énergies.

Parmi les différentes technologies des échangeurs de chaleur, toutes liées à la récupération d'énergie, nous parlerons donc essentiellement des échangeurs à plaques pour leur compacité et leur efficacité qui sont essentiellement utilisés pour la récupération d'énergie, ainsi que les échangeurs en matière plastique pour leur faible cout, leur résistance à la corrosion et la facilité de nettoyage que leur confère la matière plastique. Les batteries à ailettes feront aussi l'objet de cette fiche pour aborder la récupération d'énergie sur les fumées issues de rejets industriels qui nécessitent d'être refroidies avant rejets atmosphériques. Nous aborderons aussi le cas du traitement des boues d'épuration et plus spécifiquement celui du séchage. Dans ce domaine, la consommation d'énergie est très importante – car on le sait la chaleur latente de vaporisation de l'eau est très forte (≈ 2500 kJ/kg) – et il est nécessaire de maîtriser au mieux cette partie du processus. Pour cela, il existe plusieurs procédés mais nous nous concentrerons sur le séchage thermique (sécheurs direct, indirect, mixte) régit par le transfert de chaleur et de masse, et qui représente actuellement, au vue des quantités de boues traités annuellement, un besoin énergétique grandissant.

Les échangeurs à caloducs et les échangeurs/régénérateurs rotatifs sont eux traités à part entière, respectivement dans les fiches n°2 et n°3.

2. Principes de fonctionnement

Nous allons donc rappeler brièvement le fonctionnement des échangeurs de chaleur :

Le but premier de l'échangeur de chaleur est de pouvoir échanger entre deux média (similaire ou non) une quantité de chaleur, soit pour refroidir l'un ou pour réchauffer l'autre, ou alors pour générer un changement de phase. Le transfert se fait - en général - au travers d'une paroi solide métallique, ou en matière plastique comme nous le verrons dans la suite de ce document (sauf pour les échangeurs à contact direct où l'échange se fait directement entre deux corps en contact direct).

Il existe de nombreuses technologies d'échangeurs de chaleur, mais ils fonctionnent tous suivant les mêmes processus physiques d'échanges, c'est-à-dire :

- la conduction
- la convection
- le rayonnement (bien que ce dernier soit souvent négligeable)

On distingue aussi 3 modes d'écoulement différents :

- celui à co-courants (écoulements parallèles des fluides et dans la même direction)
- celui à contre-courants (écoulements parallèles des fluides mais dans des directions inverses)
- et celui à courants croisés (écoulement perpendiculaire entre les deux fluides)

Le mode de circulation influe aussi sur la qualité et l'efficacité du transfert, à noter qu'une configuration à contre-courant favorise l'échange elle est de manière générale la meilleure configuration à adopter. Grâce aux figures 1 et 2 ci-dessous, vous pouvez voir que lors d'une configuration à co-courant, l'échange thermique est tel que la température de sortie du fluide froid ne peut pas dépasser celle d'entrée du fluide chaud, tandis que pour une configuration à contre-courant, cela est possible :

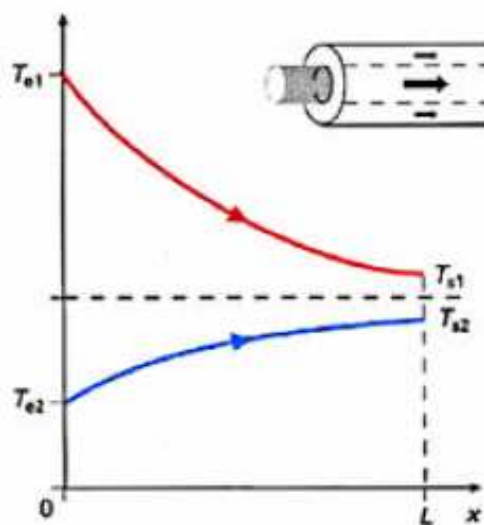


Figure 1 : Évolution qualitative des températures dans un échangeur à co-courant

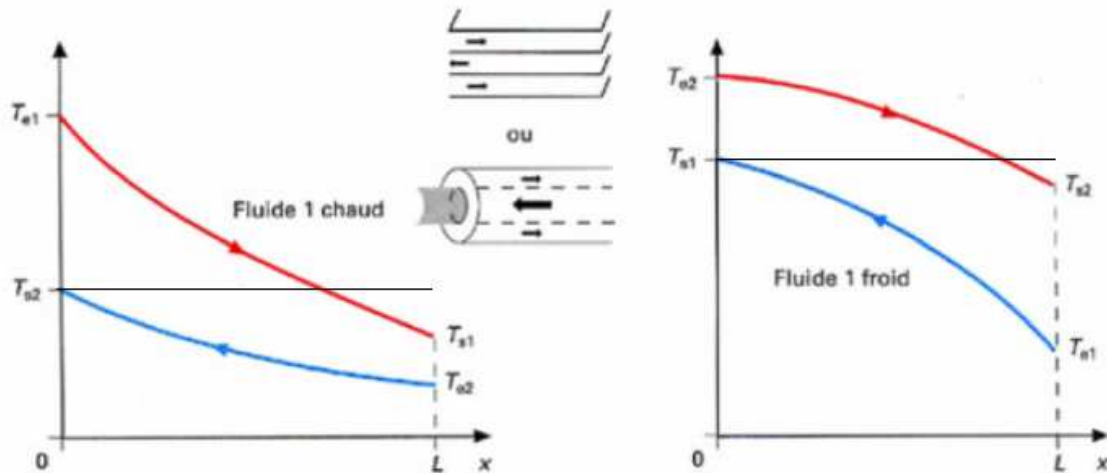


Figure 2 : Évolution qualitative des températures dans un échangeur à contre-courant

La puissance échangée entre les deux fluides, dépend aussi et essentiellement de l'écart de température que celui-ci subit lorsque que l'échange se réalise sous forme sensible, ou alors essentiellement de la valeur de la chaleur latente (correspondant à l'enthalpie de changement d'état) lorsqu'il y a un changement de phase.

La manière la plus simple de représenter un échangeur est la suivante (configurations co-courant):

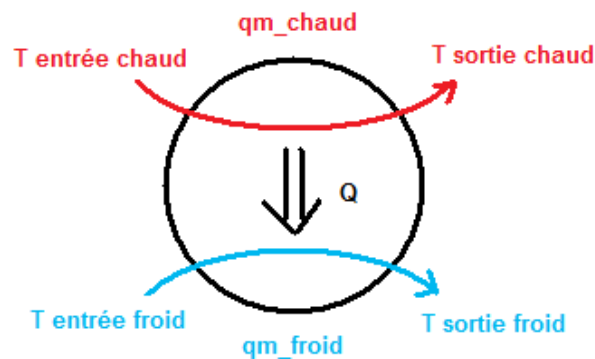


Figure 3 : Représentation soimplifiée d'un échangeur de chaleur

La chaleur se dirigeant toujours du fluide chaud vers le fluide froid, on a :

$T_{\text{entrée chaud}} > T_{\text{sortie chaud}}$ avec $P_{\text{chaud}} = - P_{\text{froid}}$ (cas adiabatique)

$T_{\text{entrée froid}} < T_{\text{sortie froid}}$ avec $P_{\text{froid}} = - P_{\text{chaud}}$ (cas adiabatique)

Avec $P = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$ ou $P = U \times S_{\text{échange}} \times \Delta T_m$

Ou $P = \dot{m} \times L$ (Cas d'un changement de phase ; ex : condensation ; évaporation)

NB : Dans un cas réel, il existe toujours des pertes vers l'ambiance (cas non adiabatique).

Avec U coefficient d'échange global rapporté à la surface de référence [W/m².K]

ΔT_m la différence de température moyenne logarithmique [K]

ΔT la différence de température entre l'entrée et la sortie du fluide considéré [K]

C_p la chaleur spécifique du fluide considéré [J/kg.K]

\dot{m} le débit massique du fluide considéré [kg/s]

P la puissance [W]

S_ échange la surface d'échange de référence (coté chaud ou coté froid)
 L la chaleur latente (correspondant à l'enthalpie de changement d'état) [J/kg]

Le coefficient d'échange global U ce calcul à partir des différentes résistances thermiques de convection (interne et externe), de conduction (paroi solide) et éventuellement des résistances d'encrassement (dépôt biologique, tartre...etc.) :

- La résistance de conduction due à la présence d'une paroi solide s'exprime grâce à l'équation de la chaleur, elle est fonction de la géométrie de la paroi (coordonnées plan, cylindrique ou sphérique). Elle dépend aussi de la nature du matériau (conductivité thermique).

- Les résistances thermiques de convection sont en fait l'inverse du coefficient d'échange convectif (interne et externe). Chaque coefficient d'échange convectif est calculé à partir de la valeur du nombre adimensionnel de Nusselt qui est évaluée par des corrélations empiriques données en fonction de la géométrie, des régimes d'écoulement (laminaire, transitoire ou turbulent) et de nombre adimensionnels (Reynolds, Prandtl). Ces corrélations sont spécifiques à beaucoup de constructeur et possèdent des domaines de validité bien précis qu'il est impératif de respecter pour minimiser les erreurs sur ces données.

- Enfin, les valeurs des résistances d'encrassement sont - en général - données par les standards TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association) qui font office de référence. Leur prise en compte dans le calcul du coefficient d'échange global permet de simuler le fonctionnement de l'échangeur en conditions dégradées (avec une résistance d'encrassement suite à un nombre d'heures de fonctionnement) et permet ainsi un surdimensionnement justifié due à une potentielle future baisse de performance.

La différence de température moyenne logarithmique ΔT_m est définit de la manière suivante :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Elle dépend aussi du mode d'écoulement

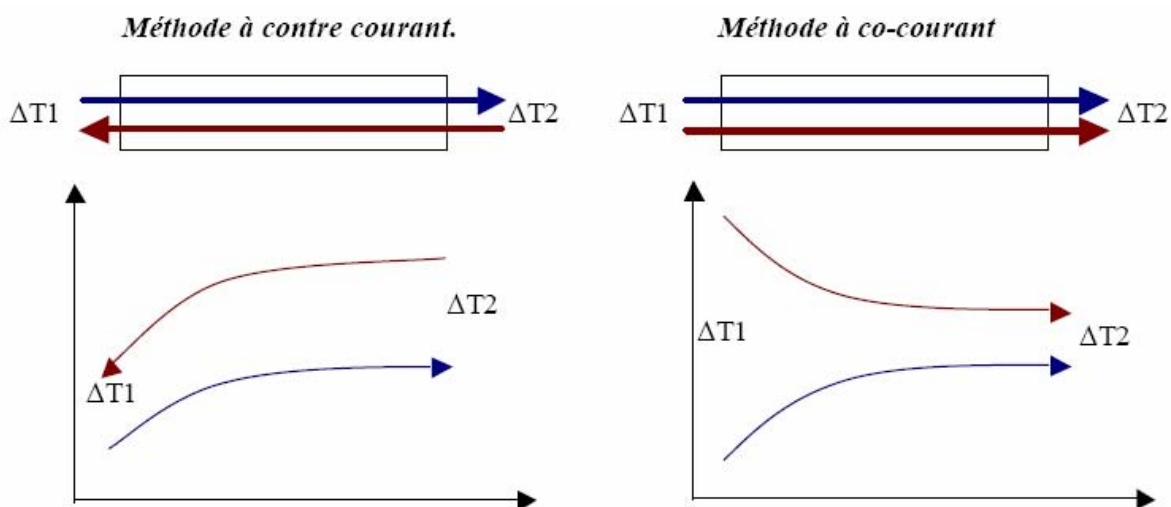


Figure 4 : Représentation de ΔT_1 et ΔT_2 en fonction du mode d'écoulement

Pour les échangeurs à courants croisés, la différence de température moyenne logarithmique correspond à la valeur en courants croisés multiplié par un facteur de correction F répertorié dans des abaques spécifiques aux configurations à courants croisés possible (1 fluide brassé, 2 fluides brassé...etc.). Ce facteur F à donc une valeur comprise entre 0 et 1.

Le but, et ceci pour atteindre une efficacité maximale, est d'avoir un pincement de température le plus petit possible. En effet, le pincement (ou « pinch » en anglais) représente la différence de température entre le medium chaud et froid en entrée de l'échangeur.

En effet, sachant que l'on peut définir l'efficacité d'un échangeur en fonction des différentiels de température, on dira que plus le pincement est petit et plus l'efficacité est grande :

$$\varepsilon = \frac{qm_chaud * Cp_froid * DT_chaud}{(Cmin * (Tce - Tfe))} \quad \text{Ou} \quad \varepsilon = \frac{qm_froid * Cp_chaud * DT_froid}{(Cmin * (Tce - Tfe))}$$

Avec ε efficacité de l'échangeur

Cmin capacité calorifique minimal=min(qm_chaud x Cp_chaud ; qm_froid x Cp_froid)

Ainsi, un échangeur bien dimensionné permet d'atteindre la meilleur efficacité possible dans ces conditions de fonctionnement, et donc une capacité de récupération de chaleur la plus importante et efficace possible.

Maintenant que nous avons décrit brièvement et de façon générale le fonctionnement des échangeurs de chaleur, nous allons entrer plus spécifiquement dans la technologie de l'échangeur.

3. Les technologies d'échangeurs usuelles pour la récupération de chaleur

Le choix d'un échangeur de chaleur – nous l'avons brièvement vu - dépend de nombreux facteurs, alors pourquoi choisir telle ou telle autre technologie. Ce choix s'avère être parfois fastidieux et voire même ambigu. Prenons pour exemple le cas d'une récupération de chaleur entre deux fluides liquides en permanence monophasiques. On pourrait alors se demander quelle serait la meilleure typologie d'échangeur à adapter sachant que toutes les technologies d'échangeurs – ou presque – peuvent réaliser ce transfert.

Pour répondre à cette question nous allons, dans ce chapitre tout d'abord décrire les principales technologies d'échangeurs de chaleur, réaliser une description du principe de fonctionnement des différentes technologies. Ensuite nous dresserons un listing des applications usuelles associées à chaque technologie, les avantages et inconvénients seront rassemblés et un listing non exhaustif des principaux fournisseurs sera dressé. Ainsi, lors de cette étude, le lecteur pourra aisément réaliser un choix technologique en fonction de l'application visée et des niveaux de pression et température. Enfin, un tableau récapitulatif sera créé afin que le lecteur puisse, et ceci pour n'importe quelle application rentrant dans le scope de cette étude, identifier rapidement et simplement une technologie adéquate pour son procédé de récupération. Un critère aussi très important à prendre en compte lors de cette étude puisse qu'elle porte, rappelons-le, sur la valorisation des énergies à bas niveaux de température, est le facteur de l'encrassement.

En effet, la valorisation des énergies à bas niveaux de température consiste à utiliser l'énergie potentiellement récupérable par des rejets, qui n'étaient pas ou ne sont pas de nos jours utilisés. Ainsi, ces rejets industriels sont souvent des effluents à caractéristiques encrassantes, c'est-à-dire comprenant des particules créant un dépôt éventuel (bio film) ou alors des composés chimiquement agressifs. Ce facteur d'encrassement qui induit l'ajout

d'une résistance thermique fait nettement baisser les performances des échangeurs par l'abaissement du coefficient d'échange global. C'est une variable à prendre impérativement en compte. Chaque technologie d'échangeur étant nécessairement différente, nous nous efforcerons d'indiquer le potentiel de résistance à l'encrassement de chaque technologie de manière purement indicative.

3.1 Les échangeurs à plaques - Généralités

Le concept d'échangeur à plaques date du début du XX^{ème} siècle. Ces échangeurs ont été étudiés à l'origine pour répondre aux besoins de l'industrie laitière, puis utilisés par la suite dans diverses branches de l'industrie (chimie, nucléaire, ...). On regroupe sous ce vocable d'échangeur à plaques différentes technologies dont certaines sont d'un développement assez récent. On peut distinguer :

- * Les échangeurs à plaques et joints
- * Les échangeurs à plaques soudées ou brasées (plates ou spiralées)

Les applications des échangeurs à plaques et joints sont limitées par la pression maximale de service ainsi que par la pression différentielle entre les deux fluides. Bien qu'il soit possible de concevoir et de construire des échangeurs à plaques et joints avec une pression maximale de 25 bars, on peut admettre aujourd'hui fréquemment des pressions de service de l'ordre de 16 à 20 bars.

La température maximale de service limite également le domaine d'utilisation des échangeurs à plaques et joints. Celle-ci est fonction de la nature des joints et on admet comme limite supérieure d'utilisation des joints standards, une température de l'ordre de 150°C. On trouve néanmoins chez certains fabricants des joints en polymère capable de résister à des températures proches de 200°C.

Les échangeurs à plaques soudées permettent d'utiliser ces surfaces d'échange performantes avec des niveaux de pression et de température plus élevés que dans les échangeurs à plaques et joints du fait d'une tenue mécanique plus importante grâce à la soudure (ou brasure). Tous les fluides peuvent être véhiculés dans ces échangeurs **néanmoins les fluides chargés sont à utiliser avec précaution**. En effet, les échangeurs à plaques possèdent des corrugations pour améliorer le transfert de chaleur. Celles-ci, dans le cas d'utilisation de fluides encrassants, génèrent des zones qui favorisent la création et le développement prématuré et localisé de sites propices à l'accumulation de particules encrassantes, qui rappelons le, font abaisser fortement les performances thermiques d'un échangeur.

Pour caractériser le service d'un échangeur à plaques, on utilise en général les paramètres suivants :

- * Les débits primaire et secondaire, qui déterminent les dimensions des tubulures de raccordement de l'échangeur et par là même fixent approximativement les dimensions des plaques (dans le cas des échangeurs à plaques et joints).

- * Le nombre d'unités de transfert (NUT), qui détermine le service thermique demandé. Qualitativement ce nombre est défini comme étant la différence de température sur un fluide rapportée à l'écart de température moyen entre les deux fluides. Ce nombre est relié aux caractéristiques thermohydrauliques des plaques (coefficients d'échange de chaleur et de perte de pression) et peut aider à choisir le type de cannelure le mieux adapté au problème posé.

- * La perte de pression, qui est en général imposée par le client.

Les principaux fabricants sont les suivants :

GEA, CIAT, ALFALAVAL, BARRIQUAND, VITHERM, TRANTER.

Nous allons maintenant entrer plus en détails sur les différentes typologies d'échangeurs à plaques.

3.1.1 Les échangeurs à plaques et joints

Les échangeurs à plaques et joints sont reconnus depuis longtemps pour leur compacité et leur modularité. Ils donnent aussi entière satisfaction en ce qui concerne les performances atteignables, aussi bien thermiquement grâce aux bons coefficients d'échange, qu'en hydraulique avec la génération de faible perte de charge.

Voici ci-dessous, une vue éclatée et de principe du fonctionnement d'un échangeur à plaques et joints :

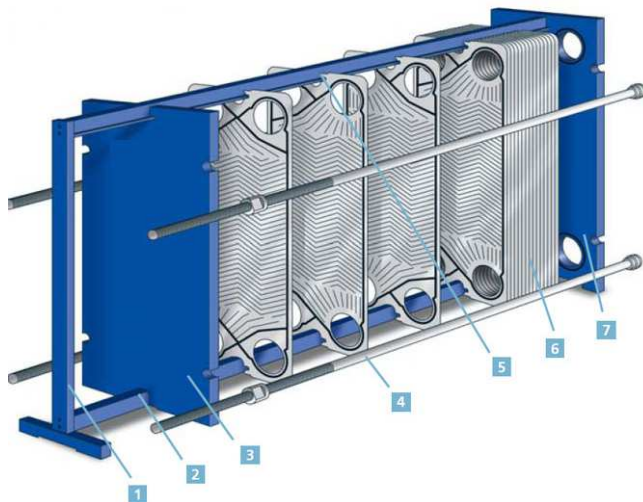


Figure 5 : Vue éclatée d'un échangeur à plaques et joints



Figure 6 : Joints

L'appareil est constitué d'un lot de plaques embouties (6) et de joints serrés entre 2 plateaux : un fixe (7) et un mobile (3) au moyen de tirants (4). Les joints (cf. figure 6) permettent une circulation dirigée (montage U ou Z) des fluides entre les plaques et l'étanchéité vers l'extérieur. Le raccordement des fluides est réalisé par 4 tubulures (2 entrées et 2 sorties).

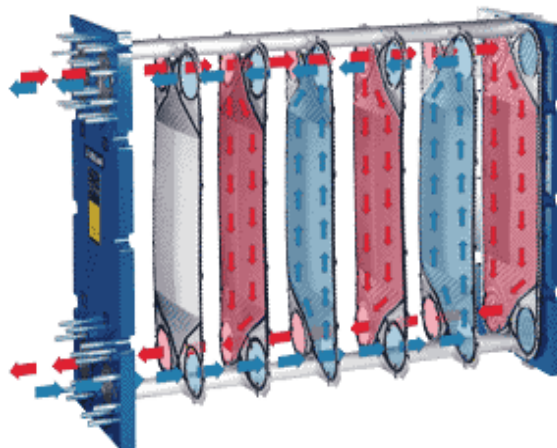


Figure 7 : Schéma de principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques et joints

Les pertes de pression sont aussi fonction du type de plaque. Il en existe différents types avec différents angles de corrugations et de chevrons, servant à améliorer le transfert thermique. Ci-dessous, différents profils sont présentés:

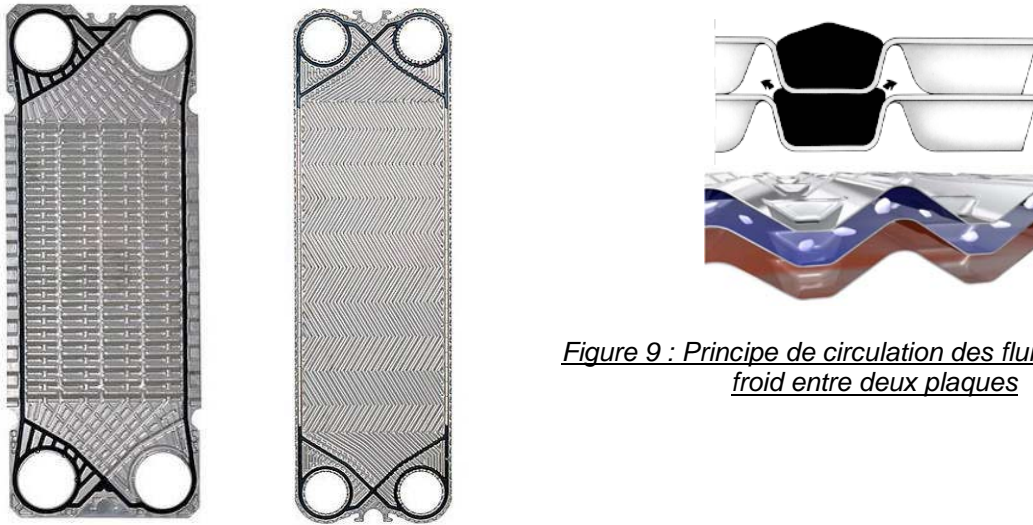


Figure 8 : Différents profils de plaques

Figure 9 : Principe de circulation des fluides chaud et froid entre deux plaques

On définira donc une plaque dure par des angles de chevron d'environ 60° et des plaques douces par des angles de chevron plus faible (30°).



Figure 10 : Plaque dite 'douce' angle 30°

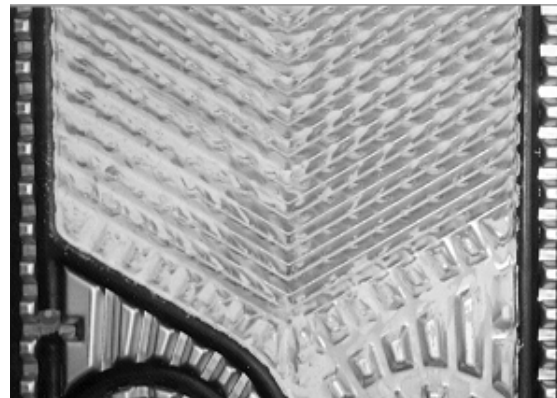


Figure 11 : Plaque dite 'dure' angle 60°

Le type de plaques influe autant sur la qualité de l'échange thermique, les pertes de charges mais aussi sur l'encrassement. D'une manière général, les échangeurs à plaques et joints ne sont pas réellement adéquate pour un fonctionnement avec des fluides chargées, bien que leur modularité engendre une facilité de démontage (donc de nettoyage) et de remplacement des plaques trop encrassées. Ces opérations nécessitent une intervention humaine ainsi qu'un démontage de l'échangeur.

3.1.1.1 Avantages

- Très bon coefficient d'échange, donc surface réduite et réduction du cout des matériaux
- Possibilité de très faibles pincements de températures et donc une très bonne efficacité
- Grande résistance à la corrosion

-Faible encombrement (compacité importante (compacité=rappel entre la surface d'échange et le volume de l'échangeur))

-Facilité d'installation

-Faible capacité des circuits et du volume de rétention des fluides (moins de charge de fluide, ce qui peut être un gain financier important pour des fluides frigorigènes par exemple)

-Possibilité d'extension de surface aisée

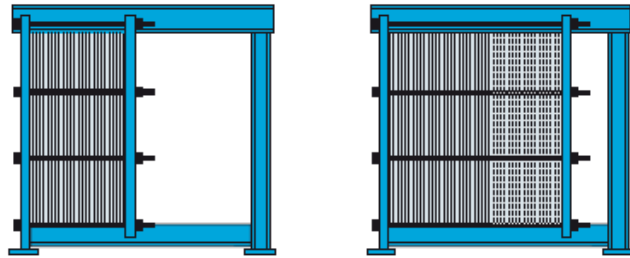


Figure 12 : Évolution du nombre de plaques sur un même échangeur

3.1.1.2 Inconvénients

- L'étanchéité est assurée par des joints, la limite de fonctionnement est donc tributaire de leur nature (Température maximale de 200°C avec des joints polymères)

- Forte sensibilité à l'encrassement (surtout dans le cas d'utilisation de fluide chargé comme par exemple pour les rejets industriels des eaux usées (STEP))

- Faible résistance aux fortes pressions (max 25 bars)

3.1.1.3 Applications usuelles

Les échangeurs à plaques et joints sont particulièrement adaptés aux échanges entre 2 liquides, et les applications sont donc nombreuses :

- échangeurs sous-stations de chauffage ; procédés industriels
- réchauffage d'eau sanitaire ; réchauffage d'eau de piscine
- tampon sur pompe à chaleur
- récupération sur rejets corrosifs
- géothermie
- réfrigération d'huile

3.1.2 Les échangeurs à plaques brasées



L'échangeur à plaques brasées assure le transfert de chaleur entre 2 fluides ou toutes les fonctions d'échange du cycle frigorifique pour le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et la santé. La seule différence avec les échangeurs à plaques et joints réside dans le système d'assemblage et d'étanchéité. En effet, ici se ne sont plus les joints qui assure l'étanchéité entre les plaques ainsi que les tirants et les plaques fixes, seul une brasure (ou soudure quand il ne s'agit pas de cuivre) permet de maintenir l'ensemble étanche et solidaire. Cela lui confère des propriétés plus intéressantes pour l'étanchéité, mais aussi quelques inconvénients par rapport à son homologue.

Ci-dessous, un schéma de principe de circulation des fluides, ainsi qu'une vue éclatée d'assemblage des plaques avant brasure, et après brasure :

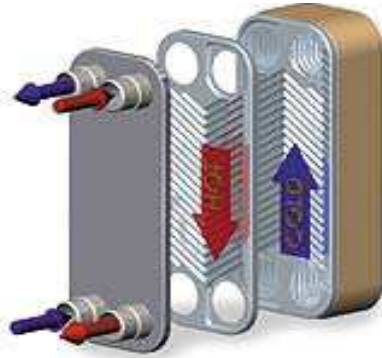


Figure 13 : Schéma de principe



Figure 14 : Vue d'empilement de plaques embouties en acier inoxydable et brasure en cuivre



Figure 15 : Vue interne après brasure

Le fonctionnement est donc identique à celui d'échangeurs à plaques et joints et les fabricants aussi.

3.1.2.1 Avantages

- Très bon coefficient d'échange, surface réduite, cout de matériau réduit
- Très compact, faible encombrement au sol
- Très économique
- Légèreté
- Entièrement soudé
- Résistance mécanique exceptionnelle
- Parfaite étanchéité (tenue en pression jusqu'à 40 bar suivant les constructeurs)
- Facilité d'installation
- Possibilité de très faible pincement de température (= bonne efficacité)
- Grande résistance à la corrosion
- Faible capacité des circuits (moins de charge de fluide, ce qui peut être un gain financier important pour des fluides frigorigènes par exemple)

3.1.2.2 Inconvénients

- non démontable
- non modulable
- pas d'inspection possible
- forte sensibilité à l'encrassement (surtout dans le cas d'utilisation de fluide chargé comme les rejets industriels des eaux usées (STEP))

3.1.2.3 Les applications usuelles

L'échangeur à plaques brasées assure le transfert de chaleur entre 2 fluides ou toutes les fonctions d'échange du cycle frigorifique (diphase) pour le résidentiel, le tertiaire, l'industrie et la santé.

3.1.3 L'échangeur WideGap de AlfaLaval

La société Alfa Laval a breveté un échangeur nommé WideGap, conçus pour réchauffer et refroidir les fluides qui encrasseraient n'importe quel échangeur standard, les échangeurs à canaux larges WideGap sont la solution idéale pour les applications de chauffage ou refroidissement de liquides encrassants comprenant des fibres et des particules grossières. Il est aussi idéal pour les liquides très visqueux (pâtes, jus...etc).

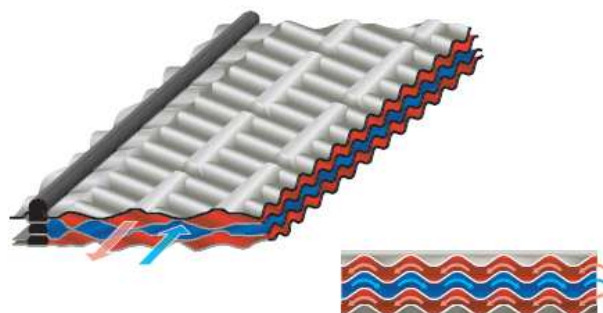
Outre leur efficacité thermique, les échangeurs à canaux larges WideGap comportent d'autres avantages. Ils sont particulièrement compacts, simples à installer et à entretenir.



Comme pour les échangeurs classiques à plaques et joints, leur capacité peut être modifiée en ajustant le nombre de plaques. D'autre part la surface d'échange est entièrement accessible pour toute inspection éventuelle.

L'échangeur WideGap a été développé pour répondre à la demande accrue du marché pour des échangeurs à canaux plus larges et de tailles plus importantes qui soient en mesure de répondre aux besoins des sucreries-distilleries et des usines de production d'éthanol dont les capacités sont en constante augmentation.

L'espace inter-plaques de WideGap varie en moyenne de 5 mm à 17 mm (5, 8, 11 et 17mm) ce qui permet d'adapter l'échangeur de chaleur aux caractéristiques particulières des fluides « chargés ». Cet échangeur peut être configuré en canal large/canal standard ou en canal large sur les deux circuits dans le cas du traitement de fluides chargés de part et d'autre.



De nouveaux profils de plaques ont été développés pour obtenir une efficacité thermique supérieure mais l'espace inter plaques étant relativement grand, les coefficients d'échanges sont nettement inférieurs à ceux obtenus par les échangeurs à plaques et joint classiques, qui eux ont un espace inter plaques d'environ 2 à 3 mm. En effet, le fait d'augmenter l'espace inter-plaques diminue les turbulences et ne permet donc pas d'obtenir de bons coefficients d'échange, néanmoins cela permet de diminuer les cinétiques d'encrassement.

Les échangeurs WideGap sont munis de joints en élastomère autorisant l'augmentation de la température d'étude et de service à 170°C. Les modèles sont disponibles pour des surfaces d'échanges jusqu'à 770m², les plaques sont disponibles en alliages acier inox 316, alliages 254 SMO ou en titane.

Malgré les faibles performances thermiques (par rapport à ses homologues), il est avec la technologie d'échangeur spiralé (qui est présenté dans le chapitre suivant) un des échangeurs pouvant fonctionner durablement avec des fluides chargés. D'autres constructeurs proposent ce type d'échangeur à plaques jointées à large canal : Les plaques « free flow » chez GEA, les plaques « LYCE » pour MAGNUM GS et les plaques de type « GF » pour TRANTER.

3.1.4 Les échangeurs à plaques soudées spiralée



Le concept de l'échangeur thermique spiralé est à la fois très simple et très étudié. De deux à quatre plaques de métal sont roulées en spirale et créent ainsi de deux à quatre canaux de circulation pour les fluides. Ces canaux sont maintenus grâce à la présence d'écarteurs sur toute la longueur de ces plaques.

La forme concentrique des canaux et les écarteurs créent des turbulences, y compris avec un nombre de Reynolds faible. En optimisant le relief des plaques, l'échange thermique est optimisé et l'encrassement est limité.

Cela aboutit à un ensemble à la fois compact, nécessitant peu d'espace et qui peut être directement intégré dans une usine en activité pour réduire ses coûts de fonctionnement. Comme nous venons de le dire, les échangeurs de chaleur spiralés présentent des caractéristiques d'échange thermique et de gestion des fluides idéales pour un large éventail d'applications industrielles dites « difficiles ». Ces échangeurs de chaleur sont adaptés aux produits visqueux et aux produits contenant des particules solides susceptibles de causer un encrassement ou une corrosion importants sur d'autres types d'échangeurs de chaleur.

L'échange de chaleur n'est pas aussi bon que celui de l'échangeur à plaques classiques, car la surface d'échange ne possède pas en règle générale de profil (corrugations), mais pour une même capacité d'échange, un échangeur spiralé nécessite 20% de moins de surface d'échange qu'un échangeur à faisceau tubulaire.



Figure 16 : Vue d'un échangeur spiralé ouvert

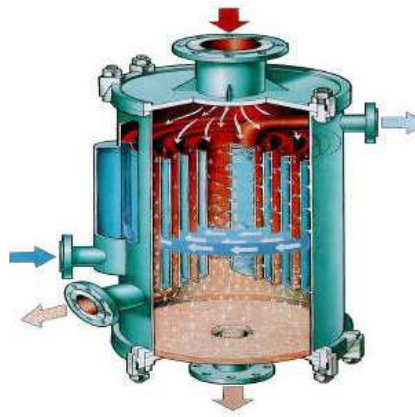


Figure 17 : Schéma en coupe d'un échangeur spiralé



Figure 18 : Schéma de principe de circulation des fluides

Les principaux fabricants de cette technologie d'échangeur sont ALFALAVAL et TRANTER.

3.1.4.1 Avantages

- Grande surface de contact
- Large passage
- Encombrement réduit
- Excellent condenseur
- Autonettoyant
- Très résistant au dépôt d'encrassement

3.1.4.2 Inconvénients

- Non démontable
- Écart de Température limités
- Prix onéreux

3.1.4.3 Applications usuelles

- Fonctionne très bien dans le cas d'utilisations de fluides « chargé »
- Refroidisseur/chauffage
- Liquide
- Condenseur
- Évaporateur

Dans le domaine du traitement des eaux usées, les échangeurs de chaleur spiralés préchauffent la boue jusqu'à 60°C, facilitant ainsi sa déshydratation. Ils sont également utilisés pour la pasteurisation des boues afin de satisfaire aux réglementations les plus strictes sur l'environnement, ainsi que pour le chauffage de la digestion et le refroidissement de l'effluent afin d'optimiser les performances globales.

On pourra donc conclure, que lors d'utilisation de fluides chargés, l'échangeur spiralé (outre l'échangeur coaxial tubulaire abordé dans le chapitre suivant et l'échangeur WideGap de Alfa Laval) est un des échangeurs les plus performants et qui résiste très bien à l'encrassement. Cette qualité lui confère donc un bon avantage pour la récupération, par exemple, sur des eaux usées.

3.2 Les échangeurs tubulaires

Les échangeurs tubulaires font partie des échangeurs les plus employées dans le domaine industriel. Il se distingue essentiellement en deux catégories les plus usuelles : les échangeurs à tubes et calandre (Shell & Tubes) et les échangeurs coaxiaux.

Ils présentent un certains nombres d'avantages, en particulier ils sont faciles à fabriquer, relativement bon marché, de maintenance aisée et surtout ils peuvent être utilisée à de fortes pressions et températures. Ce dernier point en fait souvent un des seuls échangeurs adéquate pour ce genre de process (Haute température et haute pression).

Dans cette partie, nous traiterons uniquement des échangeurs coaxiaux, bien que les échangeurs à tubes et calandre fassent partie des échangeurs de chaleurs les plus utilisés – notamment dans l'industrie pétrolière et chimique – ils ont tout de même un fort désavantage quand ils sont utilisés avec des fluides encrassés, représentant la majeure partie des fluides rejetées actuellement. En effet, en regardant un échangeur à tubes et calandre on ne doute pas de la difficulté du nettoyage qu'il peut engendrer, notamment celui qui concerne le faisceau tubulaire (que ce soit externe ou interne).

Pour illustrer ces propos, les figures ci-dessous montre des faisceaux tubulaires ayant subi un encrassement :

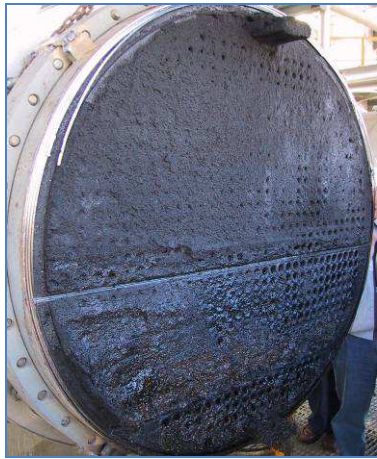


Figure 19 : Echangeurs à tubes et calandre ayant subi des encrassements



Figure 20 : Échangeur coaxial

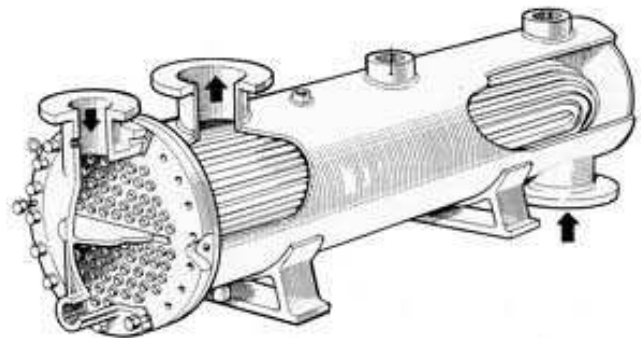


Figure 21 : représentation d'un échangeur tubes et calandre

Les échangeurs de chaleur coaxiaux représentent la forme la plus simple des échangeurs de chaleur et sont utilisés en priorité pour la transmission de chaleur en cas de haute pression ou entre des fluides à viscosité élevée (boues d'épuration). Les échangeurs coaxiaux sont en fait constitués de deux tubes, un interne et un externe, délimitant ainsi un espace annulaire entre les deux.

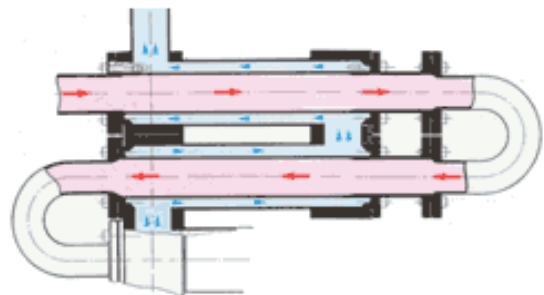


Figure 22 : schéma de fonctionnement d'un échangeur tubulaire coaxial

En récupération de chaleur on fait circuler en général le fluide chaud dans le tube interne et le fluide froid dans l'espace annulaire. Ainsi, le fait de faire circuler le fluide chaud dans le tube interne permet de s'affranchir des pertes du fluide chaud vers l'ambiance et donc d'optimiser l'échange de chaleur sans dépense pour un calorifugeage dispendieux.

Les principaux fabricants sont CIAT, ALFALAVAL, BARRIQUAND, TRANTER, BOWMAN...etc.

3.1.4.1 Avantages

- Simplicité de conception => prix faible
- Résiste aux hautes pressions et hautes températures
- Limite le dépôt de particules encrassantes et permet donc de fonctionner durablement avec des fluides chargés

3.1.4.2 Inconvénients

- Démontage difficile
- Nettoyage difficile
- Fort encombrement (compacité très faible par rapport à des échangeurs à plaques)

3.1.4.3 Applications usuelles

- Récupération sur fluides (encrassant ou non)
- Pasteurisation
- Process fonctionnant sous de hautes pressions et de fortes températures

Il existe une multitude d'autres technologies qui ne sont pas décrites dans ce cahier mais qui sont toutes des dérivées des technologies présentées précédemment, à savoir :

- Les échangeurs de type « compabloc », « Packinox » et « Platulaire » (plaques soudées) (technologie breveté par Alfa Laval ou Barriquand)
- Les échangeurs de type plaques et calandre
- Les échangeurs soudés « Heatrics »
- Les échangeurs à plaques et ailettes brasées

3.3 Les batteries à ailettes



Les batteries à ailettes sont des échangeurs utilisés principalement en conditionnement d'air ou en réfrigération (PAC, aéroréfrigérant, aérocondenseurs etc...). Certaines sont aussi utilisées comme récupérateurs en sortie de foyers de combustion ou comme unités de refroidissements dans les véhicules automobiles (les radiateurs par exemple).

Elles sont constituées d'un faisceau de tubes, les tubes sont reliés entre eux par des coudes afin de définir le circuitage de la batterie.

Ces tubes sont répartis en nappes (ou rangs). La taille des batteries peut considérablement varier suivant l'application (de plus d'une dizaine de nappes pour les tours de refroidissement ou les récupérateurs, à une nappe pour certaines batteries de climatisation).

Une batterie est alimentée par un fluide au collecteur d'entrée (figure 23) qui est ensuite récupéré par un collecteur de sortie. Le fluide de travail extérieur étant un gaz (air, fumées) et la perte de charge externe admissible ne dépassant pas quelques Pa (donc vitesse d'air faible), on est amené à augmenter la surface d'échange extérieure pour diminuer l'écart entre les résistances thermiques internes et externes.



Figure 23 : Collecteur entrée ou sortie

Cette augmentation se fait par l'intermédiaire d'ailettes. Ces ailettes peuvent être continues (épaisseur de l'ordre de quelques dixièmes de mm) ou individuelles (c'est-à-dire propre à un tube). Quand elles sont rapportées et planes, l'espacement entre deux ailettes (pas d'ailette) peut être de l'ordre du mm. Suivant le type utilisé, les ailettes sont serties mécaniquement (dudgeonnage) ou hydrauliquement, ou formées à partir du tube même (extrusion). Les tubes sont généralement en cuivre (quelquefois en acier inoxydable), les ailettes sont en aluminium (quelquefois en cuivre ou en acier inoxydable).

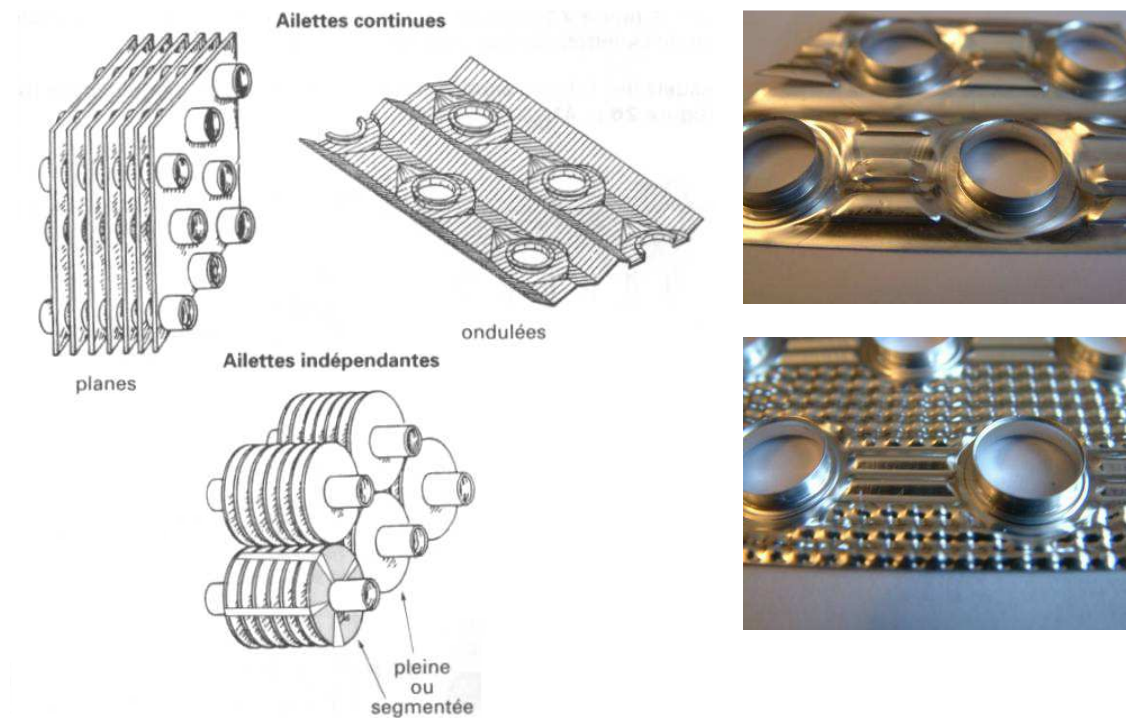


Figure 24.a) : exemple d'ailettes

Suivant l'application, le fluide interne utilisé dans les batteries peut être à l'état gazeux (vapeur surchauffée dans certains aérothermes par exemples), liquide ou diphasique (fluide frigorigène dans les condenseurs à air ou les batteries à détente directe).

Les ailettes utilisées dans les batteries ont considérablement évolué ces dernières années. D'ailettes lisses, on est passé aux ailettes ondulées ou gaufrées, puis aux ailettes persiennées ou cisailées. A la diminution de la résistance thermique externe qui en résulte correspond cependant une augmentation de la perte de charge. A puissance échangée égale (et à perte de charge équivalente), le gain en volume occupé (et donc en poids de matière) est toutefois suffisant pour justifier l'emploi de telles surfaces.

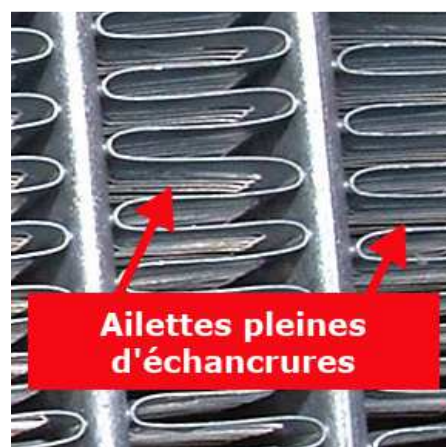


Figure 24.b) Ailettes persiennées

Pour calculer les coefficients d'échange et de frottement extérieurs, on peut utiliser des corrélations que l'on trouve dans différents ouvrages (notamment dans le Manuel Technique du GRETh), il est difficile néanmoins d'obtenir une bonne précision tant les surfaces ailetées sont variées (chaque constructeur ayant son propre type d'ailette).



Figure 25 : exemples de tubes corruquées interne

L'augmentation des performances des surfaces ailetées, parce qu'elles diminuent l'écart entre les résistances thermiques externes et internes, permet quelquefois l'emploi de tubes dits « à hautes performances ». Ces tubes ont alors une surface interne rainurée ou poreuse suivant l'utilisation désirée. On peut utiliser aussi parfois des inserts qui augmentent la turbulence du fluide interne.

La aussi, le calcul des coefficients d'échange peut se faire grâce à des corrélations plus classiques, cependant un certain nombre de facteurs peuvent altérer la précision de ces corrélations (tubes courts, coudes, présence d'huile, effet d'entrée).

Dans le cas de l'utilisation de ces batteries à ailettes en refroidissement de l'effluents gazeux (air ou fumées issue de combustion par exemple), on doit tenir compte d'éventuelle condensation de vapeur d'eau contenue dans l'air humide et, dans certaines applications, du givrage des condensats (la formation du givre peut affecter fortement l'efficacité d'une installation de refroidissement d'air par la diminution notable de la section de passage d'air).

Pour éviter le « bouchage » trop rapide de la section de passage, on peut, soit espacer les ailettes, soit traiter la surface avec une substance hydrophile qui favorise la formation d'un film et le drainage continu du condensat.

Cette étude traitant de la valorisation des énergies à bas niveaux de température, il nous semble inévitable d'aborder les problèmes du traitement des fumées. En effet, lors du refroidissement des fumées issues de combustion, de nombreux problèmes apparaissent en par la condensation de composés acides contenus dans les fumées. Ce problème engendre une usure prématurée ainsi qu'une baisse importante de la performance.

Voici une liste, non exhaustive des principaux fabricants de ce type d'échangeur :

Carrier, CIAT, Friga-Bohn, AlfaLaval, Trane, Wesper, Trianon Échangeur...etc.

3.4 Les échangeurs en matière plastique

L'économie d'énergie dans l'industrie passe souvent par la réduction du coût des appareils thermiques : l'introduction de matériaux moins onéreux dans les procédés permet en effet d'améliorer leur efficacité sans supplément de coût par rapport aux cycles actuels (en multipliant le nombre d'appareils de récupération de chaleur par exemple, ou en augmentant les surfaces de transfert de chaleur ou de masse), donc d'économiser l'énergie.

La hausse actuelle des prix des matériaux est donc un véritable problème, que ce soit pour les fabricants d'échangeur et pour les exploitants. Lorsqu'on désire abaisser le coût des surfaces d'échange de chaleur, on pense tout de suite aux matières plastiques, qui sont nettement moins chères que la plupart des matériaux métalliques couramment employés dans l'industrie, aciers inoxydables la plupart du temps, voire titane. Mais le problème de l'utilisation des matières plastiques en tant que matériau d'échange de chaleur est celui de leur mauvaise conductibilité thermique. Quand on les utilise sous forme de tubes de même épaisseur que les tubes métalliques, on est obligé d'accroître la surface d'échange d'un

facteur qui peut atteindre plusieurs unités, ce qui augmente énormément le volume, donc le coût des enveloppes et rend en fin de compte le matériel aussi cher sinon plus cher que le «tout métallique» classique.

L'état de développement atteint par les matières plastiques depuis une vingtaine d'années, notamment en ce qui concerne les nouveaux polymères (polymères thermoplastiques, polyamides, PET, plastique chargé de fibre de verre) et les traitements de la matière après moulage (réticulation), autorisent aujourd'hui, sous certaines conditions (pression et température), leur utilisation pour la fabrication d'échangeurs de chaleur. Voici les principales caractéristiques avantageuses obtenues :

- *Résistance à la corrosion
- *Légèreté
- *Facilité de mise en œuvre (moulage, collage, extrusion, soudage, etc...)
- *État de surface lisse, conférant des propriétés non propices à l'encrassement
- *Faible coût

En revanche, un certain nombre de faiblesses inhérentes à leur formulation sont nuisibles à leur utilisation dans les échangeurs de chaleur :

- *Faible conductibilité thermique (environ 0,1 à 0,4 W/m.K)
- *Résistance mécanique peu élevée, diminuant avec le temps et lorsque la température augmente

En milieu corrosif, les polymères les plus couramment utilisés sont les polymères fluorés :

- *PVDF (polyfluorure de vinylidène)
- *FEP (fluorinate d'éthylène propylène)
- *PFA (perfluoralkoxy)
- *ECTFE (éthylène – monochlorotrifluoréthylène)
- *PTFE (poly-tétra-fluoroéthylène)
- *Polyamide, réticulée et chargé en fibre

Ces différents polymères peuvent résister jusqu'à des températures comprises entre 140 et 350°C. D'autres polymères, moins nobles, ayant de bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques à basse température ($T < 100^\circ\text{C}$) peuvent être également utilisés :

- *PP (polypropylène)
- *PEHD réticulé (polyéthylène haute densité)
- *PSU (polysulfone)

Exemples d'applications possibles :

- Récupération de chaleur dans l'industrie :

- * sur circuit d'eau jusqu'à 100°C
- * sur fluide (gaz ou liquide) chargé en particules, poussières, dépollution de fumée: condensation des composés acides, ...
- * Sur les fumées de combustion (récupération de chaleur jusqu'à 200°C ; pour fumées encrassantes (fioul, biomasse,...etc.))

- Récupération sur eaux chargées et boueuses :

- * nettoyage facile (surface chimiquement inerte)
- * traitement d'eaux usées (applications en papeterie, alimentaire,...)

- * adapté pour les basses températures
- * faible coût de la surface d'échange
- * traitement de l'eau
- * chimie
- * pétrochimie



Figure 26: Différents types d'échangeurs plastiques

Le modèle présenté sur la photo ci-contre a une longueur de plaque de 35 cm, une largeur de 20 cm et 18 plaques soudées au pas d'un cm. Il échange 25 kW pour un écart moyen de 60°C entre de l'eau chaude et de l'eau froide.

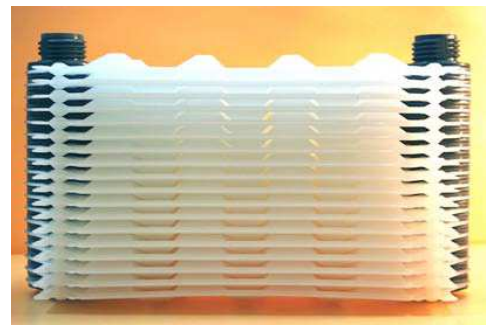


Figure 27 : Modèle d'échangeur à plaques de TET

Caractéristiques techniques :

- Conductance volumique: de 40 à 100 kW/°C/m³ (pour des échanges liquide/liquide)
- Pression de travail : du vide jusqu'à 3 bars
- Température de travail : - 40° à + 100°C (ou +200 °C avec des parois polyamide)
- Totale inertie chimique (acides, sels, chlore, tartre...).

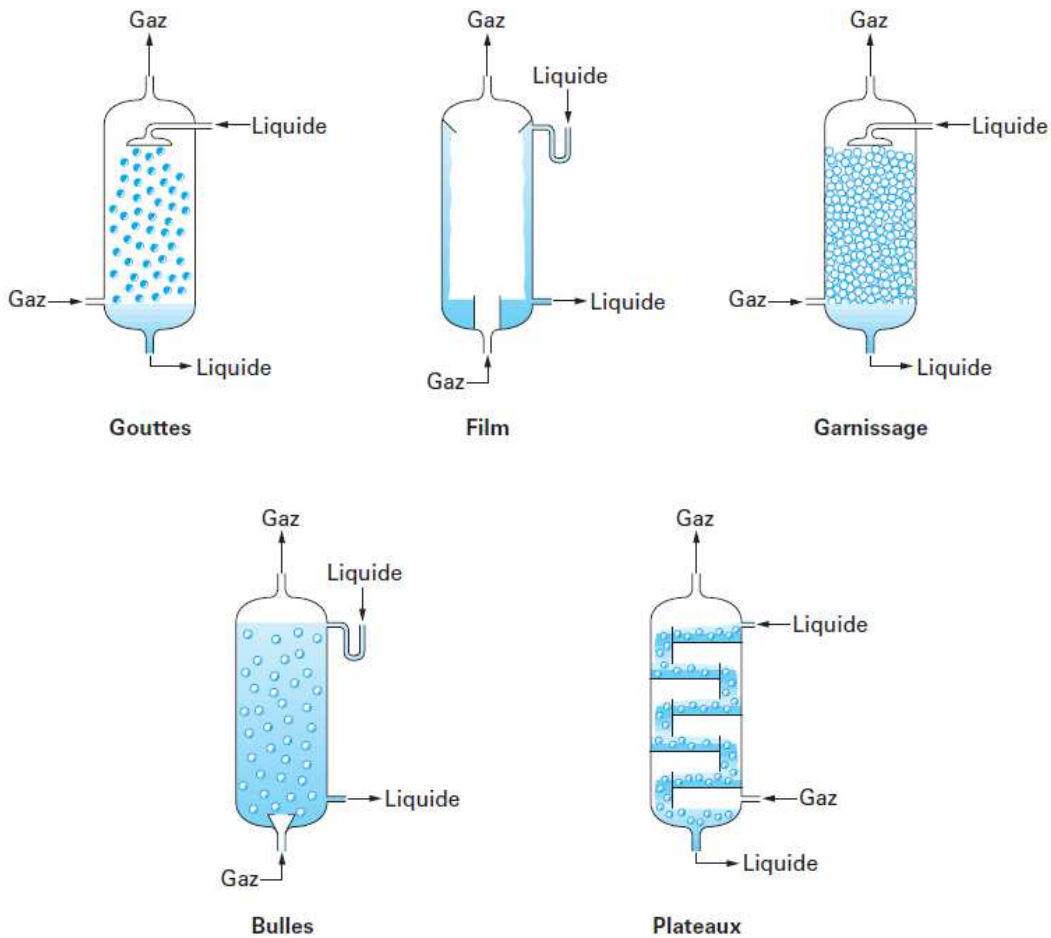
3.5 Les échangeurs à contact direct

A coté des échangeurs de chaleur conventionnels qui assurent un transfert de chaleur au travers d'une paroi matérielle (généralement métallique) entre deux fluides à températures différentes, on trouve toute une gamme de dispositifs industriels permettant le transfert de chaleur (et/ou de masse) où la paroi d'échange est supprimée. Parmi ces dispositifs, on notera les plus courants que sont les tours de refroidissement, les échangeurs récupérateurs solide-gaz, les humidificateurs d'air...etc. On appelle ces dispositifs des échangeurs à contact direct.

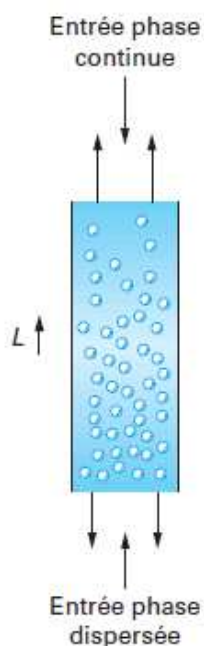
Pour réaliser un échangeur à contact direct, il faut réaliser un contact intime entre les deux fluides de façon à créer une aire interfaciale élevée. Il existe deux types d'échangeurs à contact direct :

- 1- Soit les phases sont séparées par une interface continue ou par une interface rendue discontinue par l'interposition de nombreux obstacles : c'est le contact direct surfacique. Une configuration type d'échangeur à contact direct surfacique est le film ruisselant. Elle est généralement utilisée pour réaliser une évaporation ou une

condensation. Le transfert de chaleur est augmenté lorsque l'interface est perturbée, augmentation due à l'amélioration du coefficient d'échange et à l'accroissement de la surface. C'est pourquoi, le génie chimique utilise des colonnes à plateaux et/ou à garnissage pour réaliser les contacts liquide-liquide, liquide-gaz et gaz-solide.



Différents types de contacteurs [5]



2- Soit les phases s'interpénètrent de façon homogène par dispersion d'un fluide ou de particules au sein de l'autre fluide : c'est le contact direct volumique. Le principe consiste à injecter un corps en mouvement dans une phase continue en circulation. Ce sont typiquement la colonne à pluie de particules avec un solide ou un liquide dispersé dans un courant gazeux ascendant ou descendant et la colonne à pulvérisation liquide-liquide constituée d'une enceinte tubulaire verticale avec le disperseur placé en haut ou en bas de colonne selon les valeurs des masses volumiques des deux liquides. La surface d'échange résultante entre les deux phases est modulable, car elle dépend directement de la taille et de la concentration des entités dispersées : particules, gouttes, bulles.

Avantages et inconvénients :

La mise en contact des deux phases conduit – par rapport à des échanges par paroi - aux avantages suivants :

- un coefficient d'échange thermique global élevé du fait de la suppression de la résistance thermique pariétale;
- une aire interfaciale importante, quasiment gratuite et modulable dans une certaine fourchette ;
- les risques d'entartrage et de corrosion sur les parois de l'échangeur classique sont reportés sur l'enveloppe externe réalisée dans une simple cuve;
- une perte de pression faible ;
- la disparition des dilatations différentielles entre les effluents et la paroi;
- une diminution potentielle du coût d'investissement du fait de la simplicité de l'échangeur.

Cependant, l'utilisation d'un ECD pour des transferts de chaleur n'est pas sans contraintes. Ainsi, les deux matériaux doivent être :

- non miscibles
- non émulsifiable
- non solubles
- chimiquement inertes l'un vis-à-vis de l'autre.

En effet, dans le cas d'un transfert de chaleur par contact direct, l'un des deux effluents doit être récupérer en fin d'échange. Cet opération de mise en contact nécessite donc une étude physico chimiques des corps en présence afin de préciser le degré de miscibilité et de qualifier la compatibilité des différents matériaux.

Les ECD posent donc le problème de la séparation des phases après l'échange thermique. La séparation avec un fluide continu gazeux est relativement simple et s'effectue généralement dans un cyclone en sortie de l'échangeur (que la phase dispersée soit solide ou liquide). De même, la séparation d'une phase continue liquide et d'une phase dispersée gazeuse est facilement réalisable du fait des différentiels des masses volumiques. La séparation d'une phase continue liquide et d'une phase dispersée liquide est réalisée par la coalescence de la phase dispersée sur une interface de décantation située en partie haute ou basse de la colonne suivant les valeurs respectives des masses volumiques des deux phases. Toutefois, la séparation d'une phase dispersée solide et d'une phase continue liquide nécessite des moyens plus lourds, la séparation s'effectuant par tamisage sur un plan incliné ou par une vis d'Archimède.

Enfin, une dernière contrainte naît dans le fait de la nécessité que les phases mises en contact soient à la même pression, imposant par la même occasion des conditions d'utilisation restrictives et inhérentes à leurs propriétés physiques.

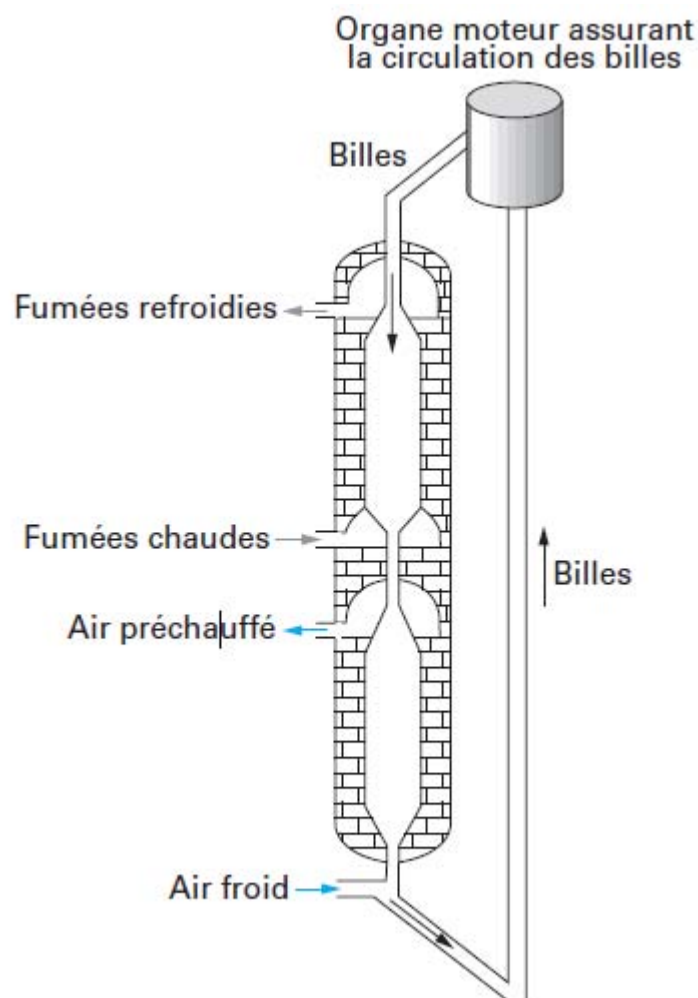
Domaine d'applications :

De façon générale, les ECD trouvent leurs applications dans l'exploitation d'effluents encrassants et corrosifs (géothermie, dessalement de l'eau de mer, refroidissement de gaz et condensation de vapeurs, opérations de raffinage où les problèmes de perte de pression et d'entartrage interdisent l'emploi d'échangeurs tubulaires).

Ils sont aussi bien adaptés à la valorisation de rejets thermiques dans les secteurs industriels notamment pour la récupération de chaleur latente et de chaleur sensible sur des rejets gazeux ou des fumées.

Enfin, les échangeurs à contact direct sont présents dans le stockage et le déstockage de l'énergie principalement sous forme de chaleur sensible dans les régénérateurs.

Sur la figure ci-dessous, on voit l'exemple d'un échangeur à contact direct avec - comme médium solide - des billes. Elles sont en premier lieu chauffées par des fumées chaudes (qui sont refroidit par contact avec ces billes froides). Ensuite, ces billes chaudes passent dans la deuxième partie de l'échangeur où elles vont permettre - toujours par des échanges à contact direct - de réchauffer l'air de combustion (par exemple). Les billes sont ensuite récupérées et réinjectées pour un nouveau cycle.



Echangeurs à billes en lit mobiles [5]

Les échangeurs à contact direct (ECD) restent cependant assez peu répandus du fait de contraintes intrinsèques et d'une méconnaissance des comportements hydrodynamique et thermique de ces systèmes où interviennent des processus physiques complexes (milieux multiphasiques en écoulement avec/sans changement d'état). Il est clair que les ECD ne sont pas une panacée aux problèmes des industriels liés à l'utilisation d'échangeur à paroi, mais dans certains cas spécifiques ils constituent une alternative intéressante car ils offrent la possibilité de réduire le coût d'investissement et d'accroître les performances d'échange par rapport à un échangeur classique. Pour la réalisation de ce type de dispositifs, il faut alors s'appuyer sur des bureaux d'ingénierie (cf. TECHNIP ; FIVES ;...etc.)

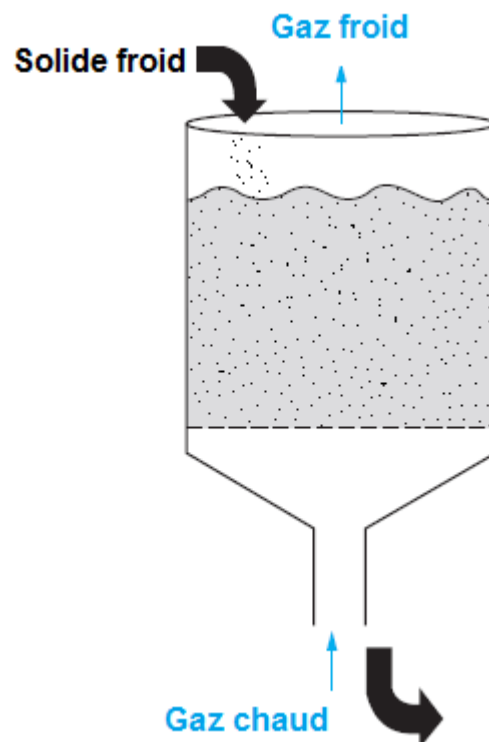
3.5.1 Les échangeurs à lit fluidisé

Les échangeurs à lit fluidisé peuvent aussi être utilisés à des fins de récupération d'énergie. Nous avons arbitrairement choisi de le distinguer des généralités sur les échangeurs à contact direct (décrit plus avant) pour des raisons de disponibilité de ces échangeurs par des fournisseurs. L'avantage est encore l'excellent contact gaz/particules qui est mis à profit dans les lits fluidisés inertes ou actifs pour filtrer et neutraliser certaines particules (suie) ou des gaz nocifs (SO₂, NO_x...) sur des fumées.

On distingue différentes conceptions d'échangeurs à lits fluidisés :

- Lit minces et épais (entre 0.25 m et 1 m)
- Lit fluidisé à étages (mise en place de plusieurs étages qui permet d'assurer un accroissement de l'efficacité thermique globale de récupération)
- Lit fluidisé indirect (Un faisceau de tubes est immergé dans un lit de particules et transfère la chaleur vers un fluide (gaz, eau/vapeur...) qui traverse les tubes.)

L'agitation des particules ainsi que leur brassage par des bulles gazeuses font de ces couches fluidisées des volumes dans lesquels les solides divisés sont fortement mélangés. Ils peuvent ainsi échanger par contact direct (avec le gaz ou avec un échangeur immergé) de la chaleur (et de la matière) avec une grande efficacité grâce à une importante surface spécifique. La couche fluidisée solide constitue alors un volume pratiquement isotherme du fait de la forte capacité thermique massique des solides par rapport à celle d'un gaz, mais aussi par leur renouvellement au contact des surfaces d'échange.[6]



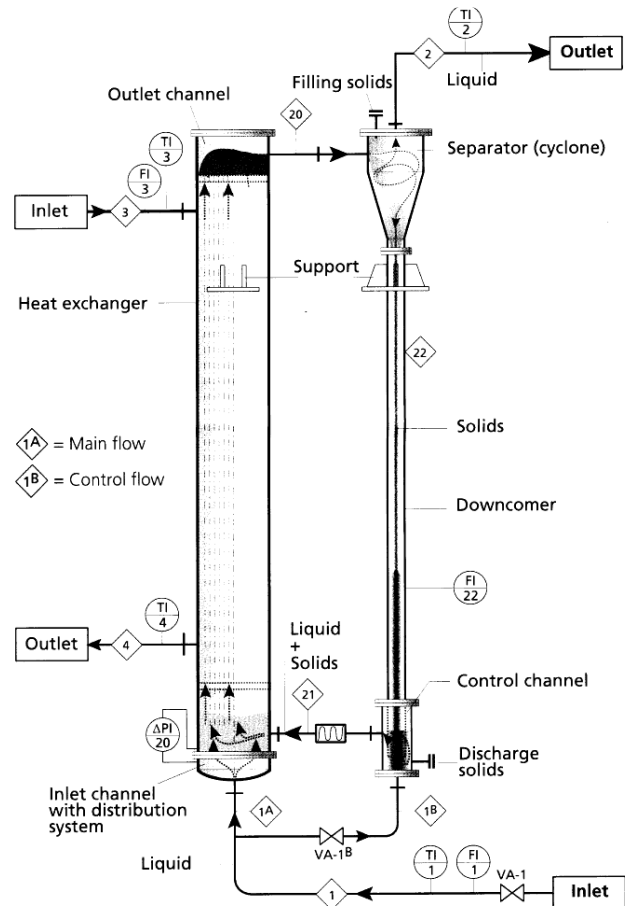
Echangeur à lit fluidisé ouvert (1 étage) [6]

Avec ce type d'échange, on peut escompter des valeurs de coefficient d'échange bien au-delà que ce que pourrait donner un échange pariétal, c'est-à-dire entre 500 à 600 W/m²-K.

Un autre type d'échangeur à lit fluidisé dit autonettoyant fonctionne suivant le principe suivant : des petites particules solides de l'ordre de 2mm à 8mm de diamètre sont fluidisées par le fluide ascendant (gaz) à l'intérieur de tubes parallèles verticaux. Ces particules solides sont généralement en verre, céramique ou en métal.

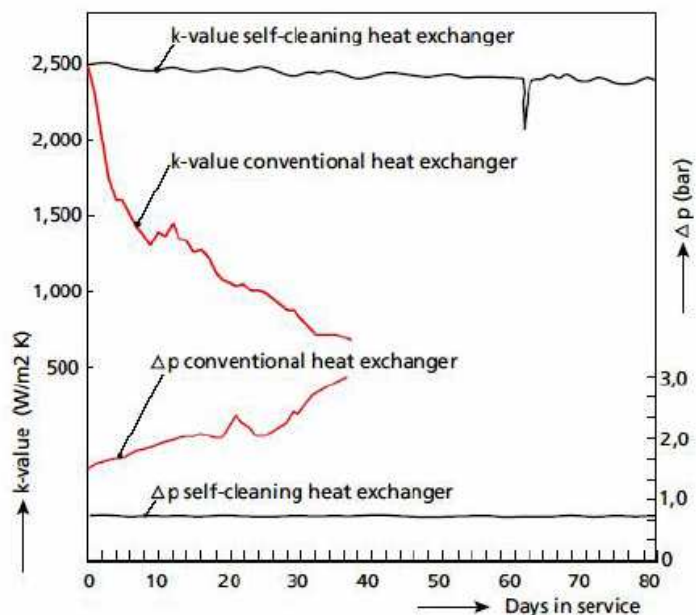
Ces particules ont un léger effet abrasif sur les parois des tubes et permettent ainsi d'éliminer le dépôt présent dès sa formation. Outre cette aspect de nettoyage qui leurs est conféré, elles améliorent aussi le coefficient de transfert de chaleur en cassant régulièrement la couche limite et sont donc bénéfiques aux transferts thermiques.

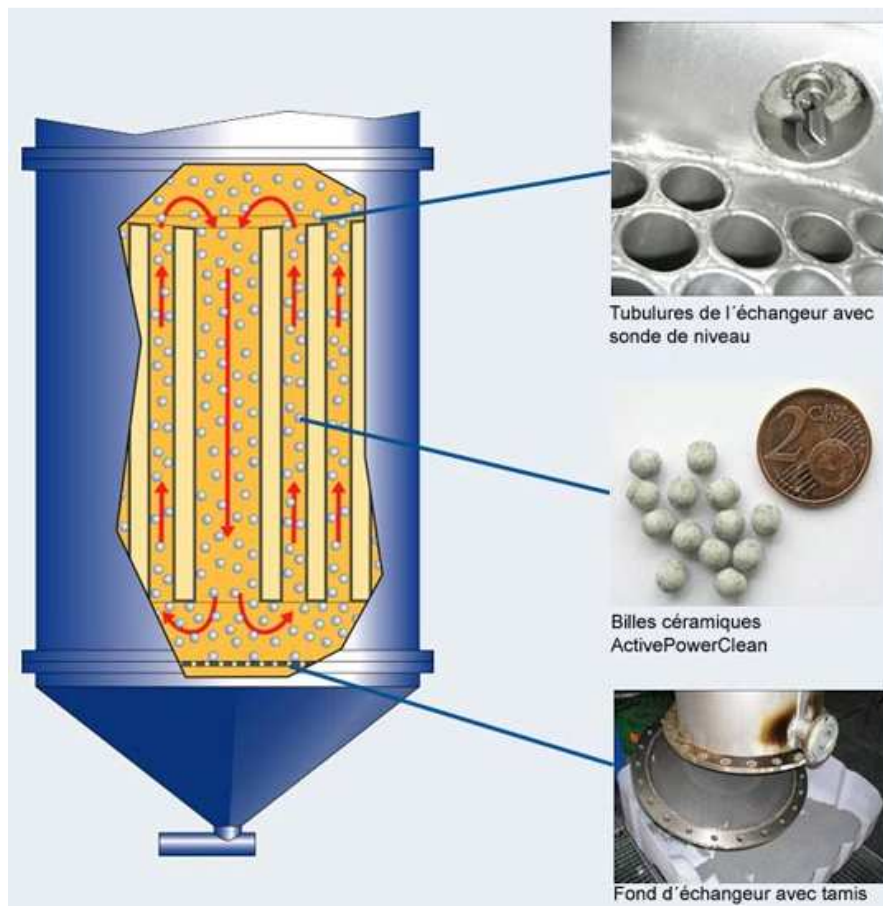
Les lits fluidisés existent avec circulation interne et avec circulation externe des particules, mais ce dernier présente les avantages de contrôler le procédé d'auto-nettoyage, de pouvoir être installé sur des installations existantes et d'être applicable sur des échangeurs dans lesquels le liquide encrassant s'évapore dans les tubes.



Ces échangeurs peuvent ainsi rester propres sur de longues périodes, voire même indéfiniment et sont rentables économiquement par rapport à des échangeurs conventionnels qui subissent des encrassements rapides.

Tous les types de dépôts durs ou mous, biologique ou chimique, fibreux ou protéiniques peuvent être traités par un échangeur à lit fluidisé auto-nettoyant.





Les billes du lit fluidisé de l'échangeur de chaleur auto-nettoyant **ActivePowerClean** fonctionnent en continu et empêchent la formation de dépôt sur les parois internes.

Procédé ActivePowerClean (APC)

Domaines d'application :

- Les récupérateurs de chaleur sur les eaux usées
- L'industrie papetière
- Les réseaux collectifs de chaleur ou les générateurs de chaleurs par géothermie
- La désalinisation d'eau de mer
- L'industrie agro-alimentaire (IAA) et l'industrie laitière
- Les procédés de refroidissement ayant de gros problèmes d'encrassement par entartrage ou biologique
- Évaporateurs et bouilleurs en circulation forcée
- Les procédés chimiques où le chauffage ou le refroidissement génèrent de l'encrassement par polymérisation ou par des dépôts résineux

Avantage :

- auto-nettoyant
- amélioration du coefficient de transfert de chaleur
- intégrable sur des systèmes existants

Ces types d'échangeurs de chaleurs sont en fait la plupart du temps des réalisations sur mesure faites par les industriels eux-mêmes, ou aidés par des bureaux d'études/d'ingénierie spécialisés (cf. Klaren BV : www.klarenbv.com; www.klarex.com).

Néanmoins, il existe des technologies fabriquées en série pour des applications bien spécifiques comme par exemple l'entreprise H2O GmbH (www.vacudest.com) avec son produit ActivePowerClean (APC) pour des applications de distillation sous vide.

3.6 Les sécheurs pour le traitement des boues

L'effort en matière d'assainissement réalisé par les différentes collectivités se traduit par une augmentation des performances épuratoires et un accroissement de la capacité de collecte et de traitement de la pollution. Ce phénomène induit directement une augmentation de la quantité de boues produites. Pourtant, les destinations finales des boues sont de moins en moins variées. En effet, les mesures adoptées (par les directives de l'Union européenne) ont pour objectif de favoriser la valorisation et le recyclage tout en renforçant les dispositions techniques des filières de traitement, l'incinération et le stockage. De plus, la mise en décharge des boues résiduelles urbaines est interdite et seuls les déchets ultimes sont acceptés dans les centres de stockage.

En effet, l'élimination et la valorisation des boues d'épuration ont fait l'objet d'un ensemble de directives européennes, de législations françaises et de réglementations de droit interne, mais aujourd'hui cette législation a été clarifiée par un arrêté qui classe désormais les boues comme déchet, levant l'ambiguïté déchet/produit. Les grandes lignes de la nouvelle réglementation sont les suivantes:

- Le producteur de boues est responsable de la filière épandage et de son suivi, de la production de la boue à son épandage.
- Une filière d'épandage doit être organisée et encadrée sous la responsabilité du producteur de boues.
- Cette filière est réglementée et contrôlée par l'État (préfets de départements).
- La qualité des boues doit assurer leur innocuité.
- La traçabilité des opérations doit être assurée.
- Le stockage ne doit pas engendrer de pollution ni de nuisances.

Pour répondre à ces contraintes de plus en plus exigeantes une technique s'est développée qui est le séchage thermique de la boue. Cette voie est attrayante car elle présente des avantages aussi bien pour la valorisation agricole que pour l'incinération.

En général, ces boues ont pendant longtemps été récupérées pour les épandre comme engrais sur les surfaces agricoles. Si cette filière de valorisation demeure intéressante - malgré parfois les craintes de la population - elle est supplantée dorénavant par celle de l'incinération : les boues deviennent un combustible qui peut servir à la production d'électricité.

Dans de nombreuses stations de traitement, les boues sont incinérées au même titre que les autres déchets résiduels entrants (dont les ordures ménagères), assurant l'autonomie énergétique des installations et permettant même la revente sur le réseau de quantités importantes d'électricité.

Cependant le pouvoir calorifique des boues dépend pour une grande part de leur taux de séchage. L'obtention d'une matière la plus sèche possible constitue ainsi un important enjeu pour le développement d'une filière de recyclage prospère et efficace. C'est un objectif qui attire l'attention des chercheurs mais aussi de nombreux industriels. D'autant que le séchage diminue la masse et le volume des boues, donc aussi les coûts de transport, de stockage et de manutention. Par ailleurs, le séchage stabilise voire «hygiénise» le produit, ce qui présente un intérêt évident en agriculture.

De la déshydratation au séchage et à la valorisation, diverses techniques sont aujourd'hui étudiées ou mises en œuvre pour augmenter l'intérêt du matériau.

Au sortir des installations de déshydratation mécanique des stations d'épuration, les boues contiennent encore 70 à 80% d'eau. Après contrôle de leur qualité, en particulier l'absence de métaux lourds, les boues peuvent servir à l'épandage agricole. Mais elles sont lourdes, pâteuses, difficiles à manipuler. D'où l'intérêt de trouver des solutions pour améliorer l'étape de la déshydratation.

Après la déshydratation, le séchage est une étape essentielle pour envisager d'autres filières de valorisation que l'agriculture. Il existe trois grandes technologies de séchage, direct (par injection d'air chaud et donc principalement par convection forcée), indirect (par contact avec une surface chaude et donc par conduction (et une faible participation de la convection naturelle) et mixte (qui reprend les deux principes précédents de séchage). Au terme du processus, il ne reste, en général, plus que 10% à 0% d'humidité.

Des dispositifs permettent de sécher à basse température en récupérant de la chaleur provenant de la cogénération. On examine aussi l'intérêt du séchage solaire, sous serres ou en extérieur (lit de séchage). En extérieur, la réduction des odeurs est une préoccupation sociétale nouvelle.

Parfaitement séchées, les boues peuvent alors devenir des combustibles au pouvoir calorifique aussi intéressant que des ordures ménagères, et participer ainsi à des filières de production d'électricité et de cogénération (par exemple, l'industrie cimentière y trouve un double intérêt, la matière sèche servant à la fois de combustible et de complément minéral au ciment).

De nouvelles technologies de valorisation sont aujourd'hui au stade de la recherche : la pyrolyse (portées à très haute température en l'absence d'oxygène, les boues distillent un gaz qui peut être récupéré, la matière carbonée résiduelle pouvant être valorisée comme combustible secondaire) ou la gazéification (les boues sont oxydées par réaction avec de l'oxygène, dégageant un gaz composé de CO, CO₂, H₂, ... qui peut être récupéré).

Par ailleurs, on trouve aussi les techniques d'oxydation par voie humide (OVH) : oxydées à chaud, les boues encore à l'état liquide produisent un résidu minéral recyclé à 97% dans les bétons, et un peu de gaz.



Figure 28 : Exemple d'une chaîne de traitement des boues

3.6.1 Les différentes techniques de séchage

Il est possible de classer les sécheurs selon leur procédé ou selon leur siccité finale obtenue.

Suivant son degré de siccité S, la boue passe par des états différents:

- liquide pour $S < 10\%$,
- pâteuse pour $10\% < S < 25\%$
- solide pour des siccités supérieures.

Le comportement solide diffère: la boue est pompable jusqu'à 40 % de siccité et entre 50% et 60% elle devient extrêmement visqueuse, collante et très difficilement manipulable. Cette phase est appelée phase plastique. Au delà de 60%, la boue commence à devenir granuleuse.

Siccité de la boue (teneur en matière sèche en %)

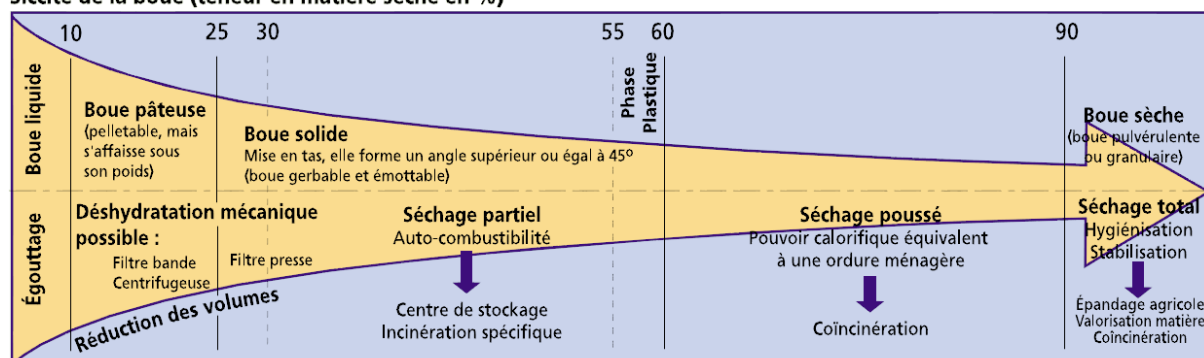


Figure 29 : Évolution de la caractéristique des boues en fonction de leur siccité [2]

Le séchage permet d'atteindre des gammes de siccité beaucoup plus élevées que la déshydratation. On distingue trois types de séchage:

- Le séchage partiel à 30-45% de siccité.
- Le séchage poussé à 60-90%.

- Le séchage total à 90-95%.

Pour sécher les boues, il faut disposer du sécheur lui-même (corps du sécheur) et d'équipements périphériques. Il existe trois types de sécheurs:

- direct
- indirect
- mixte (direct et indirecte)

3.6.2 Les sécheurs directs

La boue est séchée par contact direct avec un gaz chaud, donc par convection. Les gaz extraits contenant l'eau d'évaporation ont un volume très important. Les techniques utilisant le phénomène de convection sont les sécheurs à tambour, à bandes simples, à lit fluidisé, à courant d'air chaud, à courant d'air froid et solaire.

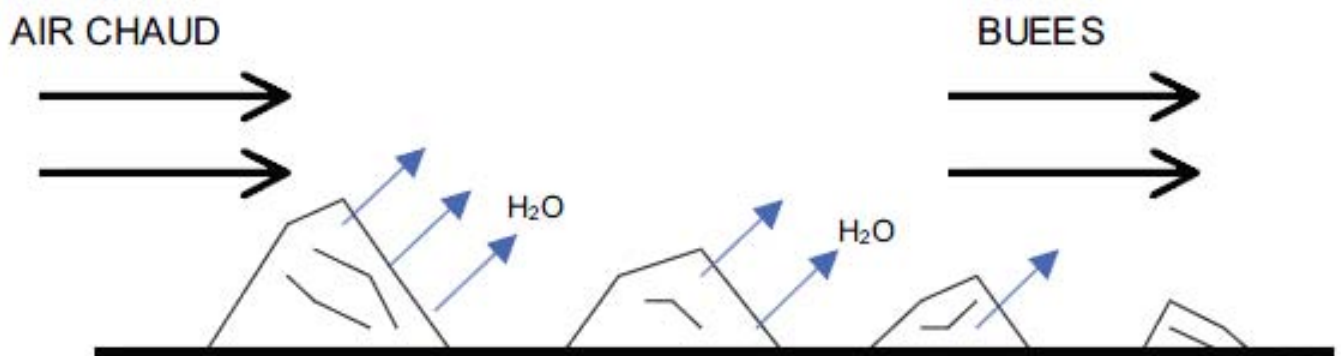


Figure 30 : Schématisation du séchage par convection (direct)

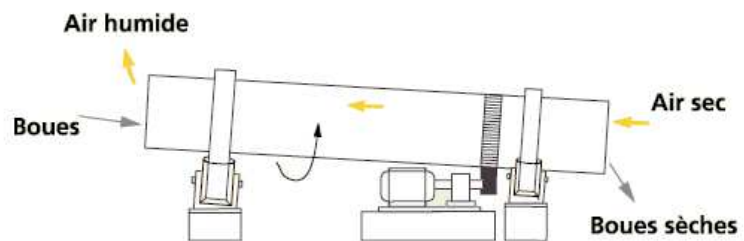
Tout d'abord, la boue déshydratée peut être mélangée avec une partie des boues séchées recyclées. Le recyclage des boues séchées n'existe pas sur tous les procédés. Il permet cependant de s'affranchir des problèmes liés à la phase plastique des boues, puisqu'elles entrent dans le sécheur avec une siccité supérieure à 60%.

Ensuite elle est pulvérisée dans l'enceinte de séchage. Elle est entraînée et séchée par le fluide par convection. A la sortie du sécheur, le séparateur gaz-solides de type cyclone ou filtre à manche permet d'extraire d'un côté la boue séchée et de l'autre l'air chargé en vapeur. Après séparation de la boue séchée par condensation de la vapeur d'eau, le fluide est renvoyé à l'atmosphère ou partiellement recyclé après réchauffage au niveau de la chaudière.

Avantages	Inconvénients
Conception simple	Forte quantité de buées à épurer
Souplesse d'adaptation aux variations de siccité en entrée	Volume malodorant important besoin d'un traitement des odeurs = grande taille des installations de traitement des odeurs
Capacités importantes	Moins rentables pour les petites installations
Granulation plus aisée de la boue	Fonctionnement plus bruyant
Faible temps de séjour de la boue dans le sécheur	Volume important des buées
Nombreux points de contact entre la boue et l'air de séchage	Équipements périphériques sophistiqués et volumineux (traitement des buées)

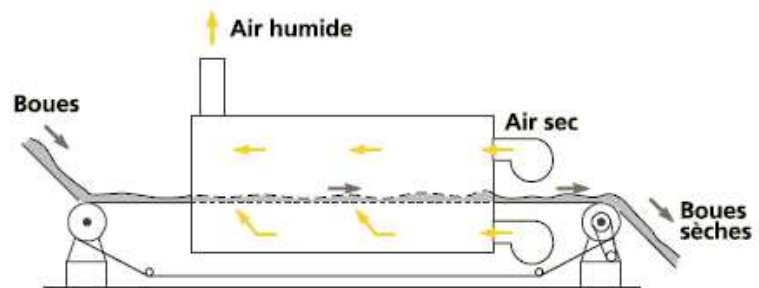
-Tambours rotatifs : Andritz, Comessa, KHD, Maurer Söhne, Promeca, Swiss Combi, Vadeb

Les éléments constitutifs de ces sécheurs sont les mêmes que dans le cas des sécheurs indirects, mais les parois en contact avec les boues ne sont pas chauffées. Le séchage s'effectue par une circulation d'air chaud dans le même sens ou en sens inverse des boues.



-Sécheurs à bandes : Mabarex, Sevar, STC

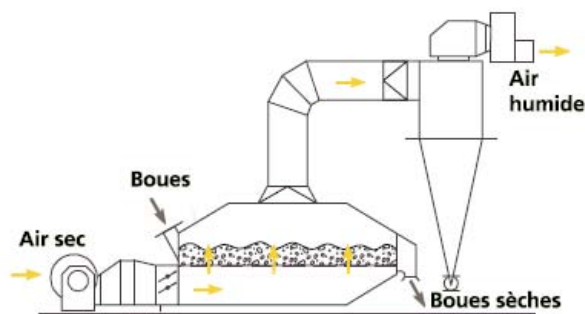
Généralement, le produit est d'abord mis en forme dans une extrudeuse (ou un granulateur) pour augmenter la surface d'échange. Les boues sont ensuite disposées sur des bandes transporteuses où elles sont soumises à un écoulement d'air chaud parallèlement ou perpendiculairement à leur sens de déplacement.



-Sécheurs à transport pneumatique : Andritz, Barr Rosin, CQVB

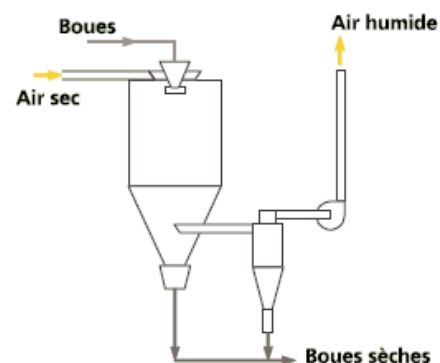
Sécheurs à lit fluidisé

Sécheurs à lit fluidisé : Ils sont composés d'un caisson étanche à deux compartiments séparés par une sole de fluidisation sur laquelle est disposé le produit à sécher. L'air ou la vapeur surchauffée est injectée par le bas, ce qui fragmente et fluidise le produit.



Sécheurs flash

Sécheurs flash ou atomiseurs : la matière à sécher est transportée jusqu'à l'entrée du sécheur où elle est dispersée dans le réacteur par un injecteur. Le courant d'air chaud transporte ensuite les particules, puis le produit sec est séparé des buées.



-Autres sécheurs directs :

- Sécheurs utilisant l'énergie solaire : les boues sont épandues sur une épaisseur d'environ 30 cm. Elles doivent être régulièrement mélangées.
- Séchage par injection directe de gaz chaud dans les boues à traiter.

3.6.3 Les sécheurs indirects

Le transfert de chaleur s'effectue par conduction. La chaleur est transmise aux boues à travers une paroi. Cette technique met principalement en œuvre des sécheurs comprenant une enveloppe cylindrique fixe, souvent chauffée, dans laquelle tournent un ou plusieurs rotors. Les vapeurs libérées par le séchage sont soit aspirées, soit entraînées par un gaz de balayage dont le débit est toujours faible en comparaison de celui nécessaire à un séchage convectif. Les différentes techniques de séchage utilisant le phénomène de conduction sont les sécheurs à couche mince, à disques entiers ou partiels, à segments, à pales, double ou quadruple arbres, à plateaux multi-étagés, à vis et pas progressif, à vis et à doigt, et rotatifs.

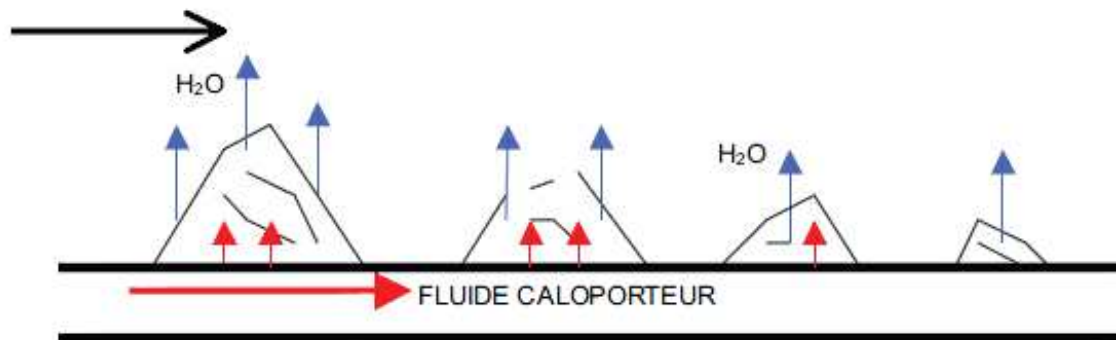


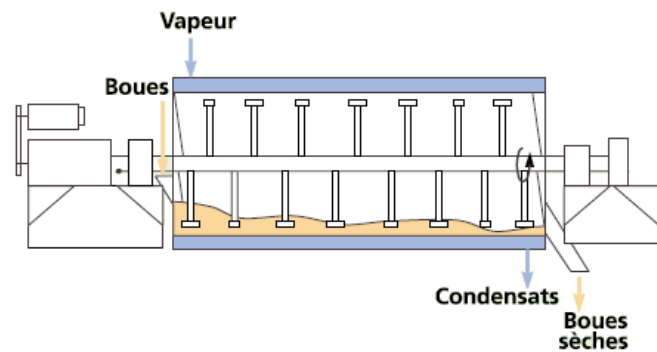
Figure 31 : Schématisation du séchage par conduction (indirect)

Le sécheur indirect est constitué d'une enveloppe cylindrique dans laquelle tourne un rotor doté de palettes ou de disques. La chaleur nécessaire à l'évaporation est apportée par circulation d'un fluide caloporteur dans l'enveloppe extérieure et/ou dans le rotor. Les racleurs, palettes ou disques, et la forme du rotor conditionnent l'avancée du produit.

Avantages	Inconvénients
Quantités de gaz à épurer faible	Construction compliquée
Buées condensables	Usure/maintenance
Unité compacte	Inertie thermique
Traitement aisé des odeurs	Capacité évaporatoire limitée
Risque d'explosion et d'inflammation faible	Fort temps de séjour
Équipements périphériques simples	Risque plus important de collage des boues sur les parois d'échange
Haute performance en termes de siccité	-
Nuisances olfactives moindres	-

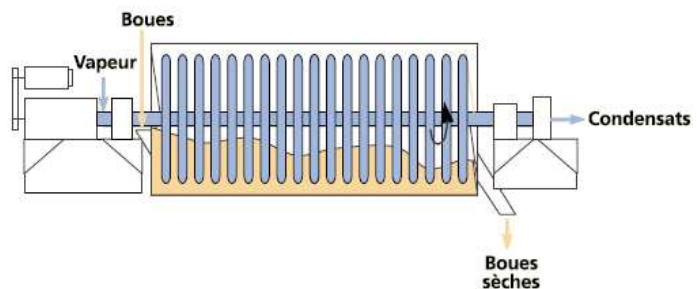
-Sécheurs à palettes (ou sécheurs malaxeurs) : Buss-Rovactor, GMF, List

Les sécheurs à palettes disposent d'une double enveloppe extérieure immobile et d'un ou plusieurs rotors sur lesquels sont fixées les palettes. Le fluide caloporteur circule dans la double enveloppe, les rotors et les palettes.



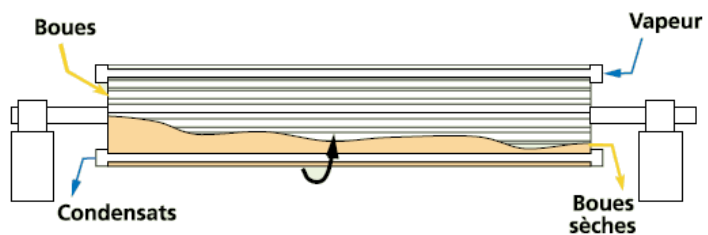
-Sécheurs à disques : Atlas, KHD, Kvaerner, MSE, Procalex, SIL, Stord

Ces sécheurs sont conçus de la même façon que les sécheurs à palettes, mais des disques remplacent les palettes. Le malaxage des boues est donc moins important et le temps de séjour allongé.



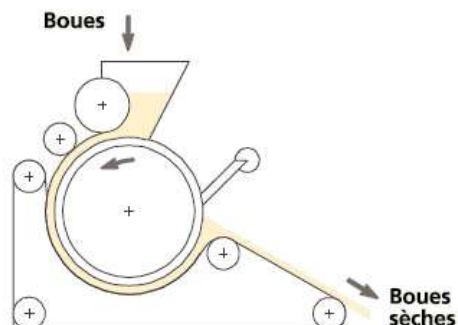
-Tambours rotatifs : Andritz, Comessa, Elino, Mannesman, Maquin, Vadeb, Mitchell Lödige

Ils sont constitués d'un cylindre tournant ont l'axe est légèrement incliné par rapport à l'horizontale pour favoriser l'avancée des boues. La rotation lente du tambour partiellement rempli assure le renouvellement du produit sur la surface d'échange.



-Sécheurs à couche mince : Buss DAS, Duprat, GEA Canzler, GMF

Ce sont des sécheurs utilisés depuis longtemps dans l'industrie pour le séchage de produits difficiles. Les boues sont disposées en fines couches sur un cylindre chauffé, selon différents procédés. En fin de rotation, les boues séchées sont raclées par un couteau.



-Autres sécheurs indirects :

- Sécheurs sous vide (Lödige) dans une cuve cylindrique horizontale chauffée dans laquelle est inséré un agitateur muni de pales.

- Sécheurs radiatifs (Hytec) : un convoyeur de séchage dirige les boues sous des émetteurs infrarouges gaz ou électriques.

3.6.4 Le séchage mixte

On appelle sécheur mixte un appareil qui regroupe les deux techniques de séchage par convection et par conduction (bien que dans les sécheurs par conduction réside aussi un phénomène de convection naturelle, qui est bien moins prépondérant que le séchage par convection forcée).

Avantages	Inconvénients
Meilleure efficacité thermique	Quantité de phase gaz importantes
Durée de séjour nécessaire réduite	Grande taille des installations de traitements des odeurs
Produit sec non obligatoirement recyclé	-

- Généralité :

Dans tous les cas, la vapeur d'eau générée par le séchage est condensée par refroidissement. Les condensats sont renvoyés en tête de station et les incondensables sont recyclés dans le sécheur ou renvoyés dans l'atmosphère après désodorisation éventuelle. Les matériels utilisant le mode de transfert thermique par rayonnement peuvent être des sécheurs de type direct ou indirect selon que les boues sont en contact ou non avec les produits de combustion.

3.6.5 Le BDS (Belt drying system) de Andritz

Le système breveté de séchage à bande d'ANDRITZ, le BDS, se distingue par sa haute versatilité et la possibilité d'utiliser un grand nombre de sources énergétiques différentes et surtout l'énergie «perdue» de faible valeur calorifique. Le BDS se prête au séchage d'un grand nombre de produits comme les boues communales et industrielles, fumier de vache, biomasse, déchets communaux, solides prétraités, etc.

Grâce aux basses températures et à un temps de séjour important du produit traité, on atteint un séchage très efficace des produits. Le libre choix de la source d'énergie la plus appropriée (y compris les fumées d'échappement) constitue un avantage particulier.

En effet, avec son circuit fermé, le système BDS utilise l'énergie de façon optimale. Sa construction permet l'utilisation économique d'énergie primaire conventionnelle (gaz naturel, fuel,...). Sa conception permet aussi d'utiliser des fumées d'échappement à partir des procédés thermiques sous forme de vapeur d'échappement, d'eau chaude, des fumées de combustion, etc.

L'air de séchage est chauffé à la température d'entrée (120-150°C). L'air chaud passe par la couche de boues et reprend l'humidité de la matière. Pour assurer une efficacité thermique optimale, le sécheur fonctionne avec une haute quantité de matière recirculée. C'est ainsi que l'air est recyclé vers la génération de chaleur, et réchauffé en grande partie. Une partie de l'air de circulation passe au condensateur pour éliminer les polluants acides et alcalins. Tous les composants du sécheur fonctionnent en dépression pour éviter les émissions poussiéreuses et malodorantes.

-Production de chaleur

Le sécheur se trouve chauffé soit directement par les gaz chauds produits par la combustion de gaz naturel ou indirectement par des échangeurs de chaleur utilisant de la chaleur d'échappement de différents procédés (gaz d'échappement des fours à ciment, waste-to-energy plants, turbines ou moteurs à gaz dans les stations de cogénération ainsi que de l'eau chaude des moteurs à gaz).

Les gaz chauds provenant du brûleur à gaz sont directement mélangés dans une chambre de combustion avec de l'air de séchage refroidi, et retournés au sécheur. Dans le cas de chaleur d'échappement, l'air de séchage est chauffé indirectement avec un échangeur de chaleur, normalement monté au-dessus du sécheur. L'air de séchage passe à travers la couche de boues humides et se refroidit de nouveau. L'excédant de vapeur résultant de l'évaporation est nettoyé moyennant le condensateur et le scrubber (épurateur).

Avantages supplémentaires réalisés avec récupération de chaleur:

- Aucune dépense pour l'énergie thermique, réduction substantielle du coût d'exploitation
- Solution durable, toute augmentation future du prix d'énergie reste sans influence, économie des combustibles primaires et conservation pour l'avenir
- Conception écophile, réduction considérable des émissions des gaz à effet de serre
- Conditions optimales pour utilisation partielle ou complète de la chaleur perdue recyclée sous forme de gaz brûlé, vapeur, eau chaude, des usines de cogénération, stations d'incinération de déchets, usines génératrices, et autres process

Schéma de principe du procédé BDS

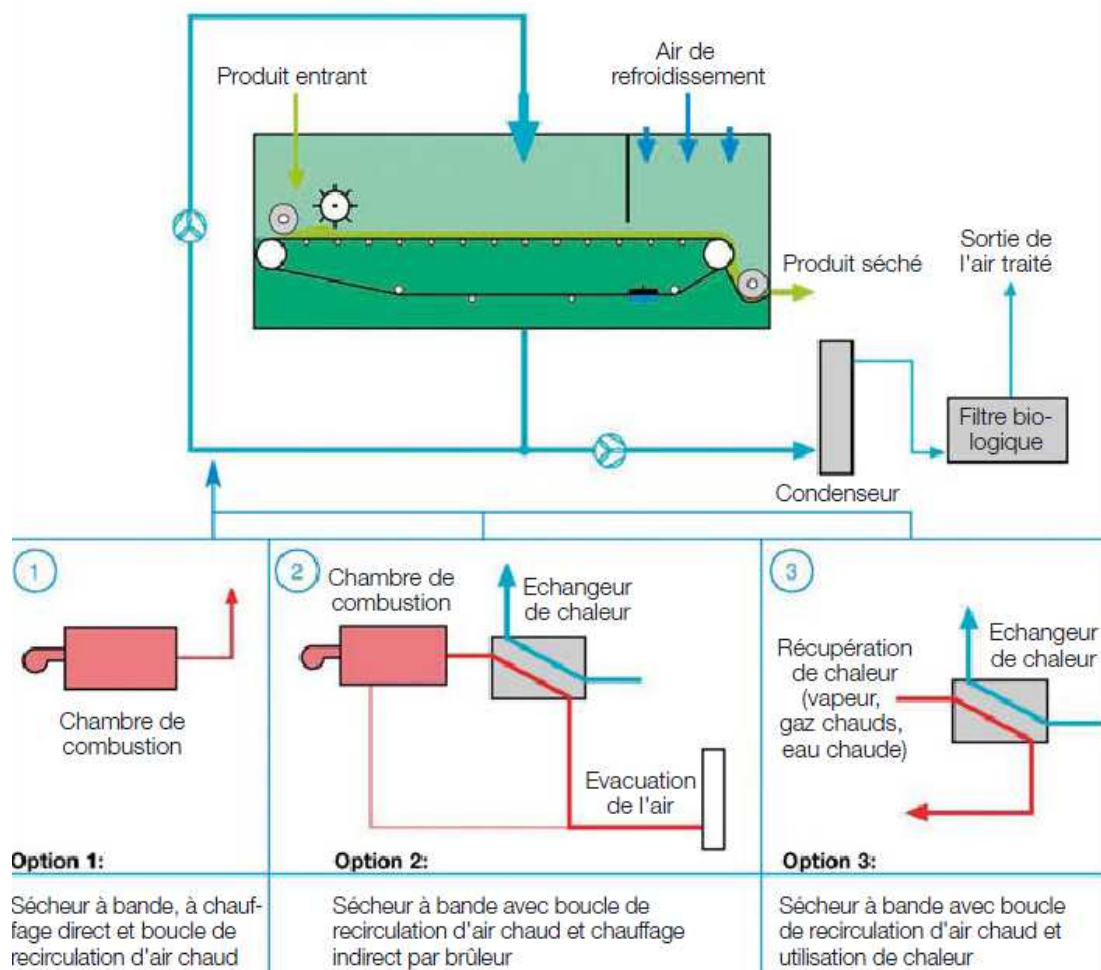


Figure 32 : Schéma de principe de fonctionnement avec les différentes options

4. Les différents cas d'utilisation possible

Dans cette partie, nous allons aborder plusieurs cas que de valorisation par des échangeurs de chaleur. En premier lieu, nous aborderons un cas simple de valorisation par échange entre deux fluides. Dans un deuxième temps, nous traiterons la valorisation du refroidissement des fumées issues de combustion par le biais d'un échangeur gaz/liquide muni d'ailettes (batterie à ailettes).

Ces études, nous permettront d'analyser les technologies les plus employées dans le domaine de la valorisation énergétique, d'en ressortir les principales caractéristiques, d'appuyer sur les points essentiels de conception et d'intégration dans les processus (notamment l'aspect d'encrassement et de corrosion).

4.1 Cas Simple d'échange entre deux fluides

Le cas le plus simple d'une valorisation énergétique est donc le cas où les effluents chauds sont toujours disponibles et les besoins sont de même nature et à une température plus basse. Dans ce cas, une chaîne de récupération d'énergie (valorisation énergétique) est simplement constituée d'échangeur de chaleur. Cette solution, certes très hypothétique mais tout de même réaliste, représente la solution la plus simple, et ayant un ratio gain/performance sur investissement très important.

4.2 Cas de la valorisation du refroidissement des fumées issues de combustion

Lors des processus de combustion, les fumées doivent être traitées avant rejet dans l'atmosphère et il est souvent intéressant de récupérer l'énergie contenue dans ces fumées, soit pour préchauffer un gaz en amont d'une combustion, pour chauffer un fluide qui peut permettre par exemple de chauffer les locaux de l'usine ou alimenter une PAC. Ainsi, des échangeurs gaz/liquide sont dans la plupart du temps utilisés en amont des sorties de cheminées. Lors de ces refroidissements de fumées, on trouve souvent des composés acides qui viennent se condenser sur les parois froides de l'échangeur, donc celui-ci devra être très résistant à la corrosion et aux attaques chimiques. Il n'est pas rare de voir des échangeurs à ailettes se décomposer littéralement sous l'action chimique et perdre ainsi leur étanchéité : C'est donc un problème majeur pour ces installations, problème qui est souvent résolu par l'utilisation de métaux et d'alliages nobles qui résistent mieux à ces effets néfastes, comme l'inox et le titane. Néanmoins, avec le prix actuel toujours croissant des matériaux, une conception optimisée d'un échangeur permettant de diminuer les coûts de matériau devient donc indispensable en amont des nouvelles solutions qui nécessitent souvent des technologies de ruptures, comme les échangeurs en matières plastiques. En effet, nous l'avons vu, ceux-ci permettent d'éviter les problèmes de corrosion (liée aux matériaux métalliques) et à un prix bien plus abordable que les matériaux nobles.

D'autres problèmes surviennent aussi lors du fonctionnement de ces échangeurs, et plus particulièrement lors de leur intégration dans les systèmes eux-mêmes. En effet, un côté souvent négligé des études thermiques est l'intégration process. Si celle-ci n'est pas prise en compte, on peut parfois arriver à des sous dimensionnement. Pour cet exemple de traitement des fumées, on peut facilement deviner que l'échangeur se trouve dans une conduite (cheminée ou gaine) et que celle-ci possède des accidents de parcours (singularité, coude...etc.). Ainsi, ces différents accidents peuvent, et selon la place de l'échangeur de chaleur dans cette conduite, influencer sur le transfert thermique par une distorsion du flux d'air et donc une mauvaise distribution (inhomogénéité des vitesses d'air). Cette hétérogénéité est donc le siège de performance fluctuante et entraîne un effet de surdimensionnement pour atteindre le refroidissement désiré. Dans de nombreux cas, cette facette de l'étude d'intégration de l'échangeur dans le système lui-même est souvent négligée et engendre des

appareils mal dimensionnés. C'est donc encore un point à améliorer pour tous les bureaux d'études et d'ingénierie en phase avec ces problèmes.

6. Recherche et développement – Conclusions et perspectives

De nos jours, les recherches pour l'échangeur thermique s'orientent notamment vers la maîtrise de l'encrassement (détection, étude des cinétiques), la haute température avec la connaissance et la maîtrise de nouveaux matériaux, l'intensification des transferts thermiques via les microstructures, les nanomatériaux et nanoparticules, l'amélioration des surfaces d'échanges pour la compacité et l'efficacité...etc. Tous sont de vastes domaines porteurs d'espoir dans l'amélioration des performances de nombreux process.

Sans conteste les échangeurs de chaleurs sont des éléments indispensables et irremplaçables de toutes industries actuelles. Le nombre de recherches dans ce domaine se développe avec une course à la performance et à la compacité : échanger un maximum de flux avec la plus petite surface possible. La course aux différents artifices pouvant réaliser ces prouesses est déjà lancée depuis un certains temps, et les récentes avancées dans les nanostructures et les nanomatériaux promettent de nombreuses avancées technologiques et intuitivement des gains de performance. Néanmoins, la question de l'encrassement pose encore beaucoup de problème, surtout pour l'utilisation d'effluents de type rejets industriels, qui sont dans la plupart des cas des fluides ou des gaz encrassées (suie, particules organiques, calcaire, tartre...etc.).

Le développement de cet axe de recherche sur l'encrassement est donc une priorité, notamment dans la récupération des rejets thermiques qui représente globalement une source non négligeable d'énergie perdue. Il faudrait de ce fait que dans la stratégie de recherche amont, mais aussi dans la R&D appliquée et impliquée dans le développement industriel en général, que ce point soit traité en priorité. Des procédés de nettoyage en charge ou non existent d'ores et déjà sur le marché, mais avec des résultats peu satisfaisants. En effet, les dépôts encrassants sont aussi d'ordre chimique et organique, et il est parfois dur, voir impossible de les supprimer.

Ainsi des sondes de détections d'encrassement pourrait palier ce problème et prévenir l'encrassement avant la détérioration des performances de l'échangeur. Des mesures *in situ* et des analyses de ces mesures permettrait de dresser des profils plus précis des cinétiques et phénomènes d'encrassement. Notons des travaux très intéressants sur des sondes à ultra sons qui permettent de prévenir l'encrassement grâce à la mesure de la modification du signal ultra son par l'augmentation graduelle de la couche d'encrassement. Cette méthode prometteuse de détection de l'encrassement est une chose mais le nettoyage de celui-ci en est une autre.

En effet, de nos jours, il existe différents procédés pouvant réaliser un nettoyage d'échangeur suite à un encrassement. Tous d'abord, nous citerons les techniques de nettoyage qui nécessite un arrêt et un démontage, celle-ci sont donc les moins séduisantes (mais parfois indispensable au vue de la nature de fluides utilisés et les importants encrassements que son utilisation occasionne) car nécessite soit l'achat et l'investissement d'un deuxième échangeur de rechange pour pouvoir faire fonctionner le process en continu pendant que l'échangeur principal est en cours de nettoyage, soit l'arrêt totale de la chaine de production afin d'opérer ce nettoyage. Ces procédés de nettoyage sont ceux réalisés à l'aide de pulvérisateur de billes de glace ou de dioxyde de carbone, des lances à eau haute pression ou des traitements chimiques (acides, solvant...etc.), tous ces traitements nécessitent le démontage et l'arrêt de l'échangeur (démontage des plaques ou des faisceaux tubulaires).

Les techniques nécessitant seulement un arrêt de l'échangeur sont plus préférables car elles ne nécessitent pas un démontage (et donc des coûts de main d'œuvre et d'interventions en moins). Elles sont en fait des opérations mécaniques faites à l'aide de boules de caoutchouc, ayant une densité similaire à celle du fluide utilisé mais d'un diamètre légèrement plus grand que celui des tubes afin que celles-ci soient écrasées et raclent les parois de l'échangeur pour effectuer ce nettoyage. La plupart du temps, ces billes sont en circulation dans un circuit parallèle à celui du circuit principal et une connexion de ce circuit se réalise simplement en by-passant le circuit primaire où le fluide process circule.

Enfin, en ce qui concerne le nettoyage en continu, c'est-à-dire sans arrêt du process, on trouve un système de spire (ressort) qui racle les parois de l'échangeur grâce à la rotation de celle-ci dans le milieu tubulaire, où alors des systèmes vibrants, qui par contact et mise en vibration, décolle les dépôts encrassants (ou du moins facilite leur décollement).

Il reste donc encore de nombreuses avancées technologiques à réaliser avant de régler tous les problèmes liés à l'utilisation des échangeurs de chaleur en milieu encrassant.

Pour conclure, les échangeurs de chaleur sont des éléments indispensables à toute politique de maîtrise de l'énergie. A la fois d'un principe simple mais de technologies parfois bien plus complexes, ils sont la manière la plus simple pour récupérer l'énergie et la transmettre. Les récentes avancées en ce qui concerne les MCP (Matériaux à Changement de Phase) permettent d'envisager l'utilisation d'échangeurs-stockeurs qui aideraient ainsi à décaler dans le temps l'utilisation de cette chaleur récupérée. En effet, le stockage est tout aussi important, surtout que les besoins ne sont pas souvent en phase avec l'utilisation des rejets. Nous amenons donc le lecteur à se reporter à l'étude RECORD n°09-0233/1A concernant le stockage de chaleur et plus spécifiquement aux annexes 4 et 5 qui traitent de l'utilisation et la mise en œuvre des MCP pour le stockage de chaleur.

8. Bibliographies

[1] GRETh - Manuel Technique du GRETh

[2] ADEME – GDF - AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE - Séchage thermique des boues urbaines et industrielles – État de l'art.

[3] BONTEMPS. A ; GARRIGUE. A ; GOUBIER. C ; HUETZ. J ; MARVILLET. C ; MERCIER. P et VIDIL. R – Les échangeurs de chaleur - TI B2340.

[4] BRICARD.A ; TADRIST. L - Initiation aux échangeurs thermiques à contact direct – Edition GRETh

[5] BRICARD.A ; TADRIST. L – Echangeurs de chaleur à contact direct - TI BE 9 565

[6] ANTONINI. G - Lits fluidisés – Caractéristiques générales et applications - TI BE 8255

Site Web :

www.tmw-technologies.com

www.andritz.com

www.alfalaval.com

www.ciat.com



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°2 : Les échangeurs/régénérateurs rotatifs



Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	3
2. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	6
2.1 Avantages	6
2.2 Inconvénients	6
2.3 L'utilisation des matériaux hygroscopiques – Déshydratation - Dessiccant cooling	7
3. LES APPLICATIONS /EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	8
3.1 Modernisation et rénovation d'un réchauffeur d'air.....	8
3.1.1. Les avantages de la rénovation/modernisation d'un préchauffeur d'air	9
3.1.2 Amélioration des réchauffeurs d'air - Centrale électrique de Matra (Hongrie)	10
3.1.3 Remplacement des réchauffeurs d'air - Centrale électrique de Shajiao (Chine).....	10
4. PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS	10
4.1 HOWDEN.....	10
4.2 HOVAL.....	11
4.3 KLINGENBURG Energy Recovery	11
5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	11
6. CONCLUSIONS.....	12
7. BIBLIOGRAPHIES.....	12

1. Introduction

L'échangeur de chaleur rotatif a été développé vers la fin des années 1950 pour des installations de climatisation en Amérique. Depuis longtemps, il fait partie de l'équipement standard de ces installations. Il est également très apprécié pour les équipements industriels, en raison de ces possibilités de récupération de la chaleur latente (humidité) dans les flux d'air évacué et les gaz de combustion. Il fait ainsi partie intégrante et indispensable des centrales de production électrique afin d'augmenter l'efficacité des chaudières. De nos jours, les nouvelles matières utilisées dans la fabrication des éléments de l'échangeur de chaleur rotatif rendent son installation possible dans une vaste plage de températures. Son mode de fonctionnement se distingue par les charges et les décharges périodiques de la chaleur et de la vapeur dans la masse de l'accumulateur.

2. Principe de fonctionnement

La masse d'accumulation (rotor) a la forme d'un cylindre plat. Cette particularité donne la forme de sa construction. Le rotor tourne lentement et il est parcouru, dans une direction par un gaz chaud (air, fumées), et dans l'autre direction, par un gaz froid. Du côté du flux de gaz chaud, il soutire la chaleur et l'humidité et la transmet au flux de gaz froid (air).

A l'heure actuelle, les rotors sont dotés le plus souvent de stries ondulées en aluminium (résistant à la corrosion) ou de structures gaufrées.

Notons que la forme géométrique du rotor favorise les fuites. Une zone de rinçage fonctionnant par dépression évite au maximum le transfert de particules d'air vicié dans l'air pulsé (cf. Figure 2). Ce dispositif entraîne cependant une perte d'énergie, influencée également par l'emplacement des ventilateurs par rapport au rotor.

Selon l'utilisation, il est parfois souhaitable d'échanger de l'humidité entre les deux flux d'air. La transmission d'humidité peut se dérouler de deux façons :

- Echange de matière par condensation et évaporation : avec un rotor non hygroscopique, outre le transfert de chaleur, on obtient un transfert d'humidité que lorsque l'on descend en dessous du point de rosée de l'air humide (régénérateur à condensation).

- Echange de matière par sorption (adsorption et désorption): avec un rotor hygroscopique (par traitement de surface) on obtient un transfert de la chaleur sensible (température) et latente (humidité) (régénérateur à adsorption). Nous noterons donc que certains constructeur fournissent ces appareils avec des revêtements de type Silicagel.

Une faible consommation d'énergie électrique est nécessaire pour entraîner la rotation de la roue qui tourne en général entre 5 et 20 tours/min. Les pertes de charge sont donc assez faibles. Les rendements d'échange sont généralement très élevés, ils sont essentiellement fonction de la nature du matériau accumulateur, de la vitesse de l'air et de la vitesse de

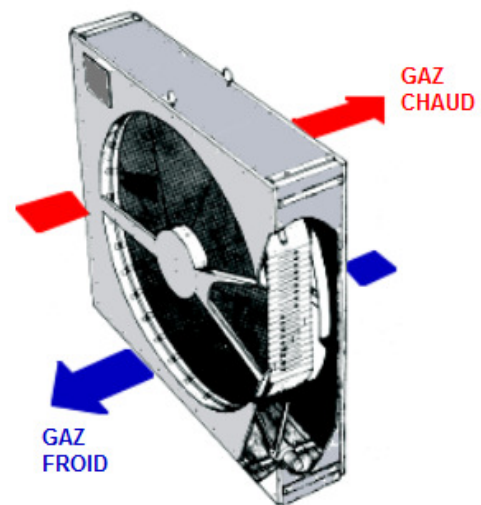


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un régénérateur rotatif

rotation de la roue, ces deux dernières variables déterminant le temps de passage de l'air dans l'échangeur.

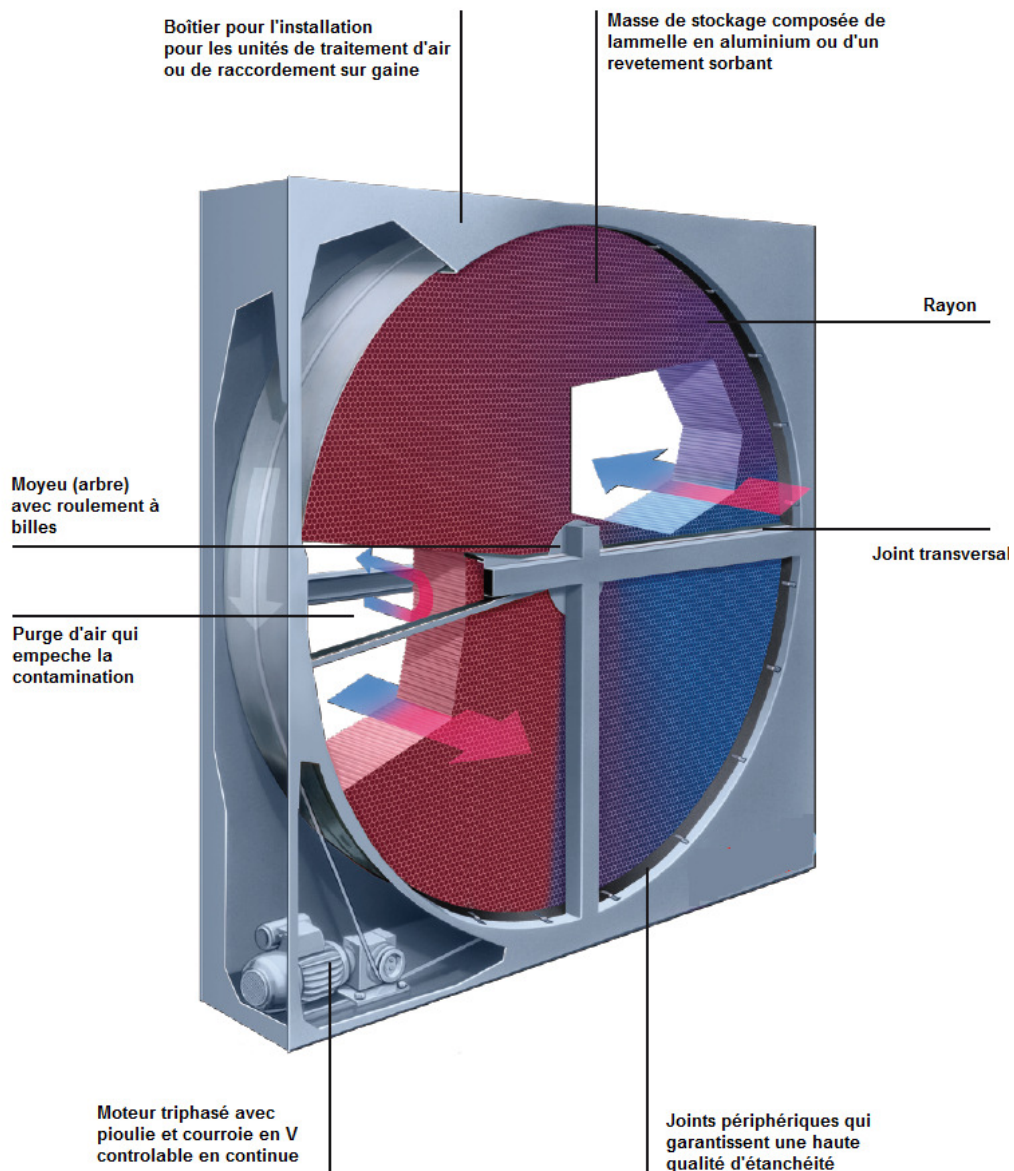


Figure 2 : Schéma détaillé d'un échangeur rotatif (Hoval)

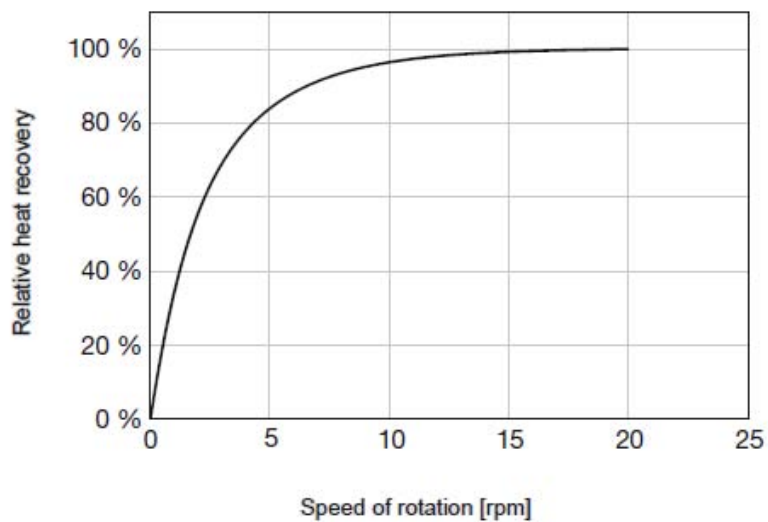


Figure 3 : Evolution de l'énergie récupérée en fonction de la vitesse de rotation

Le design de ces appareils incorpore un système d'étanchéité avec des joints d'étanchéité fixes. Il est important de maintenir la fuite d'air vers le gaz aussi réduite que possible, car elle entraîne une consommation de puissance accrue du ventilateur. Ce système d'étanchéité fixe inclut un joint couvrant l'ensemble du rotor, qui maintient la fuite à un niveau réduit. Cela permet de garantir d'une part qu'il n'y ait pas d'augmentation de pertes sur une période prolongée de fonctionnement, et d'autre part pour les réchauffeurs gaz-gaz, de ne pas engendrer une augmentation des niveaux de SO₂ vers l'échappement.

Le rendement thermique des réchauffeurs gaz-gaz est critique, car la température de sortie du gaz réchauffé doit être maintenue au dessus du minimum déterminé pour obtenir une impulsion adéquate des gaz de combustion et assurer la dispersion de l'échappement.

Ils intègrent aussi des dispositifs combinés de nettoyage efficaces, totalement ou partiellement rétractables, avec l'équipement nécessaire pour un ramonage normal et un nettoyage à l'eau à haute pression et à basse pression, afin de maintenir une faible perte de charge. Ces dispositifs permettent d'offrir des possibilités de maintenance - en charge - essentielles pour maintenir la disponibilité des réchauffeurs gaz-gaz sur des périodes prolongées de fonctionnement.

La partie principale du préchauffeur et des réchauffeurs - la surface d'échange thermique - est composée de multiples plaques de métal appelées des lamelles. Les lamelles collectent la chaleur dans le flux de gaz chaud et la transfèrent alors au flux de gaz froid. Étant donné que les deux surfaces des plaques de lamelles sont utilisées simultanément pour le transfert de chaleur, ce type d'échangeur thermique est très efficace et compact. Il est particulièrement bien adapté pour le traitement de grandes quantités de gaz chaud et d'air froid.

Les lamelles sont de fines plaques d'acier formées par laminage, elles possèdent parfois des revêtements émaillés spéciaux pour protéger les lamelles de la corrosion.



Figure 4 : lamelle émaillée

Ces lamelles existent sous différents profils afin de s'adapter au mieux à divers combustibles et à diverses applications et permettent aussi de combiner une chute de pression minimale, un rendement élevé, une profondeur réduite et une facilité de nettoyage.

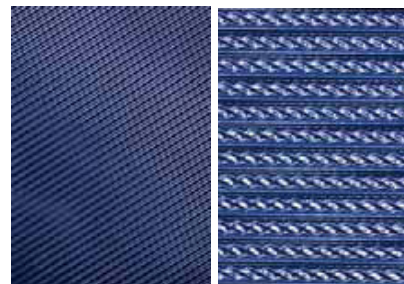
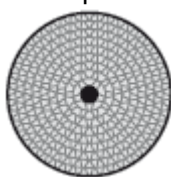


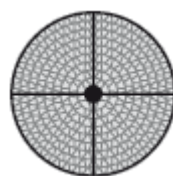
Figure 5 : différent profil et agencement des lamelles dans les paniers

Ces lamelles sont agencées et confinées dans ce qu'on appelle un panier.

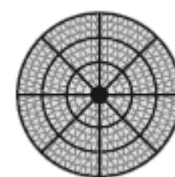
Il existe aussi plusieurs configurations du rotor et du carter extérieure :



a) une pièce



b) 4 segments



c) 8 segments

Figure 6 : Différentes configurations de construction du rotor



a) Carter une seule pièce en tôle d'acier

b) Carter en acier, partagé

c) Construction de sections

Figure 7 : Différentes configurations de construction de l'enveloppe externe

Ainsi, il est possible de créer plusieurs configurations en s'adaptant aux positions d'entrée et de sortie des effluents gazeux.

Nous allons maintenant citer les principaux avantages et inconvénients quant à l'utilisation de cette technologie.

2. Avantages et Inconvénients

2.1 Avantages

La technologie des échangeurs rotatifs permet de disposer de nombreux avantages en ce qui concerne la fiabilité et les performances de l'échangeur mais aussi en terme d'exploitation des installations. Voici les principaux avantages qu'on lui attribue :

- En fonction du média de transfert choisi, l'énergie sensible et latente peut-être transférée
- Une variation de la vitesse de rotation de la roue permet de faire varier l'efficacité de récupération et permet donc une régulation du système
- Perte de charge très faible
- Rendement élevé
- Faible encombrement
- Utilisation de matériau hygroscopique (dessiccant, Silicagel...)
- Pas d'évacuation de condensats
- Encrassement et givrage limité du fait de l'inversion régulière du sens des flux d'air (la filtration reste cependant obligatoire)
- Si risque de givre, on fait varier la vitesse de rotation de la roue

2.2 Inconvénients

Malgré les nombreux avantages que cette technologie apporte, elle a tout de même quelques inconvénients pour son utilisation :

- Amenée et évacuation d'air doivent être adjacentes

-
- Consommation d'énergie pour l'entraînement du rotor
 - Nécessité de l'entretien du système d'entraînement (moteur, courroie...etc.)
 - La section de purge qui limite la contamination réduit l'efficacité de récupération
 - Le rendement est influencé par les positions relatives de l'échangeur de récupération et des ventilateurs de pulsion et de reprise (inhomogénéité du flux d'air = effet de distorsion des flux d'air).

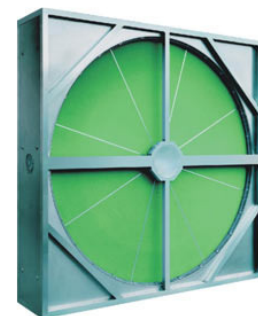
2.3 L'utilisation des matériaux hygroscopiques – Déshydratation - Dessiccant cooling

Un échangeur rotatif à adsorption se caractérise par l'utilisation des propriétés particulières d'un agent solide ayant une grande affinité avec l'eau, dans ce cas, ce sont les surfaces des micropores qui adsorbent l'humidité.

De nombreuses applications comme l'industrie, l'agro-alimentaire ou la pharmaceutique nécessitent – pour leur production et leur stockage – une hygrométrie très faible (<35%) à des températures basses (15°C). Or pour atteindre l'objectif d'une température faible avec une basse hygrométrie il est nécessaire de réaliser une déshumidification. Le procédé standard de déshumidification par circuit thermodynamique atteint ici ses limites de fonctionnement et de rendement. En effet, avec une température ambiante inférieure à 15°C, l'évaporateur prend souvent en glace et il est ainsi difficile, même avec la présence d'un système de dégivrage, qui est fourni par la plupart des installations, d'avoir une installation qui fonctionne en continu et avec un bon rendement.

Ainsi, la déshydratation via des échangeurs rotatifs à adsorption s'impose comme un des moyens les plus efficaces en termes de performances pour atteindre les objectifs des industriels. Le cycle est une combinaison de rafraîchissement évaporatif avec une déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être aussi bien liquide que solide.

La technologie la plus courante aujourd'hui utilise des roues à dessiccation rotatives, avec du Silicagel (SiO_2 = gel de silice) ou du chlorure de lithium comme matériau de sorption. Ces composants, grâce à leur capacité hautement hygroscopiques adsorbent en quantité importante la vapeur d'eau contenue dans l'air qui circule dans l'échangeur. On peut ainsi utiliser la chaleur latente de l'eau afin de refroidir le média sortant et de réchauffer le média entrant grâce à l'évaporation de l'eau piégée dans le matériau adsorbant. L'utilisation de cette chaleur latente fait ainsi augmenter l'efficacité de ces échangeurs.



La roue déshydratante d'un échangeur rotatifs en Silicagel est la plus couramment utilisée dans les applications industrielles ou de conditionnement d'air, elle fonctionne sans aucun problème avec de l'air saturé en humidité à partir du moment où des gouttelettes ne sont pas introduites dans la roue et ne nécessite pas de protection particulière pendant les périodes d'arrêt.

Avantages & applications

- Utilisation de la chaleur latente et sensible de l'eau
- Utilisation pour la valorisation de rejets thermiques
- Application dans des unités d'humidification et de refroidissement.

-
- Réduction de la consommation d'énergie de refroidissement due à la dessiccation et le refroidissement de l'air de retour.
 - en traitement de l'air : amélioration de la qualité de l'air intérieur par l'effet bactéricide des matériaux adsorbants

3. Les applications /exemples de réalisations

Nous allons maintenant vous présenter plusieurs études de cas sur l'amélioration des préchauffeurs d'air. Ces différentes études de cas vont vous permettre de comprendre plus aisément les performances atteignables par un échangeur rotatif ainsi que ses limites de fonctionnement.



3.1 Modernisation et rénovation d'un réchauffeur d'air

Les réchauffeurs d'air jouent un rôle important, notamment dans le rendement des centrales électriques. En effet, à mesure que les conditions d'exploitation au sein de la centrale électrique changent – notamment en termes de carburant ou de cycles de fonctionnement – la demande au niveau des réchauffeurs d'air varie également. Ainsi, il n'est pas rare de voir les conditions de fonctionnement d'un préchauffeur d'air changé et engendré une perte de performance. Une rénovation de cet échangeur est donc souvent préconisée.

En effet, la mise à niveau ou la rénovation d'un réchauffeur d'air est une des méthodes les plus efficaces et les plus rentables pour améliorer les performances d'une installation (par exemple des chaudières). De très bons résultats peuvent être obtenus soit en améliorant les performances thermiques, soit en réduisant les fuites. Avant de moderniser l'unité DGC (Désulfuration des Gaz de Combustion) en aval de la chaudière, il est toujours intéressant de rechercher d'éventuelles fuites au niveau du réchauffeur d'air. L'amélioration du système d'étanchéité de ce réchauffeur peut réduire nettement la taille de l'unité DGC, et donc permettre de réaliser des économies importantes. Dans de nombreux cas, la récupération de chaleur peut être accrue soit en installant des composants plus performants, soit en augmentant leur portée globale, ou les deux.

Dans de nombreux cas un composant de rechange permet d'améliorer les performances de manière significative, tout particulièrement si les conditions d'exploitation ont changées depuis la mise en route initiale du système (ce qui est fréquent). Une meilleure utilisation de l'espace dans le rotor peut également contribuer à l'amélioration globale des performances de la chaudière. Sur plusieurs modèles de réchauffeur d'air, les fuites peuvent s'aggraver avec le temps. Ceci peut affecter le fonctionnement de la chaudière de plusieurs manières. En augmentant la consommation d'énergie du ventilateur, en augmentant la vitesse et donc en réduisant le rendement des électro-filtres, en réduisant le débit d'air chaud en direction des broyeurs ou encore en diminuant de manière conséquente la marge d'exploitation du ventilateur de tirage.

Les réchauffeurs d'air des usines sont sujets à un certain degré de corrosion, causée par l'approche du point de condensation de l'eau ou de l'acide sulfurique. L'encrassement, généré par l'acide, dépend du contenu en soufre du carburant et de la quantité de conversion SO_2-SO_3 au niveau de la chaudière et de l'unité DGC. La corrosion peut être minimisée via l'application d'un revêtement en acier fin de haute qualité avec traitement à froid ou d'un revêtement émaillé.

Le processus d'émaillage est le suivant : après la cuisson de l'email, il y a deux phases définies - l'interphase et la phase vitreuse - la couche d'interphase sert à assurer l'adhésion entre l'email et le substrat d'acier par l'entremise de réactions chimiques entre l'acier et les oxydes de cobalt et de nickel, tandis que la phase vitreuse ou couche extérieure se compose essentiellement de composants inertes se présentant sous la forme d'oxydes de silicium, titane et borax qui confèrent des propriétés spéciales de résistance aux attaques chimiques et de tenue aux contraintes thermomécaniques.

Pour garantir et maintenir des performances optimales au niveau des réchauffeurs d'air, il est aussi essentiel de s'assurer que les composants sont soigneusement nettoyés périodiquement. Dans le cas contraire, le système s'encrassera rapidement, augmentant les pertes de charge et diminuant le transfert de chaleur. Il existe ainsi des souffleurs de suie très efficaces qui permettent le désencrassement, associant un jet de vapeur ou d'air à un jet d'eau à basse ou haute pression, suivant les besoins.



Figure 8.1 : Lance de lavage à eau haute pression

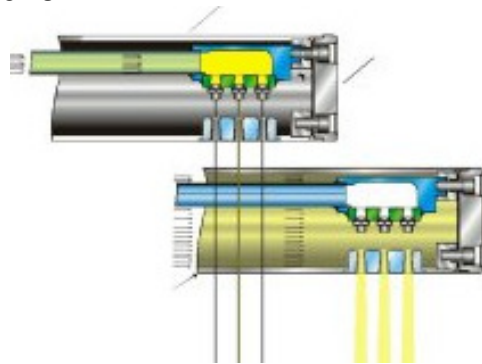


Figure 8.2 : souffleurs pour désencrassement des lamelles

3.1.1. Les avantages de la rénovation/modernisation d'un préchauffeur d'air

- Réduction de la consommation d'énergie du ventilateur, augmentant ainsi la production d'énergie commercialisable.
- Si les conditions d'exploitation ont changé, le remplacement de composants (joints d'étanchéité, lamelles) peut permettre d'améliorer les performances globales de manière significative.
- Elimination de l'effet de dilution de la température, dû aux fuites d'air, ce qui permet de réduire la corrosion en aval du réchauffeur d'air.
- En réduisant les fuites, la quantité d'air disponible au niveau du broyeur est plus importante, garantissant une bonne alimentation des brûleurs en charbon pulvérisé (tout particulièrement lorsque le charbon est humide), ce qui compense les baisses de production.
- De même, la diminution des fuites régule le débit au niveau des ventilateurs de soufflage et de tirage, éliminant ainsi les baisses de production dues à une surcharge des ventilateurs.
- Un nettoyage périodique des composants à l'aide d'un souffleur de suie efficace garantit un transfert de chaleur régulier et réduit les chutes de pression au niveau du système d'exploitation.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons vous présenter 2 cas d'études, l'un portant sur l'amélioration/rénovation d'un réchauffeur d'air dans la centrale électrique de Matra en

Hongrie, et l'autre sur le remplacement de réchauffeurs d'air dans la centrale électrique de Shajiao en Chine.

3.1.2 Amélioration des réchauffeurs d'air - Centrale électrique de Matra (Hongrie)

L'unité 3 de Matra est une centrale électrique alimentée en lignite de 200 MW en Hongrie. Les préchauffeurs d'air (2 par chaudière) ont été équipés de plaques de secteur mobiles radiales et axiales prévues pour l'espace entre le rotor et le stator afin de minimiser les fuites d'air.

Les joints d'étanchéité s'étaient détériorés à tel point qu'une grande quantité d'air court-circuitait le système à travers le préchauffeur d'air, by-passant de ce fait le fourneau. De plus, la détection d'une fuite d'une partie de l'air et du gaz par des espaces entre les paniers de lamelles et les parois du rotor engendrait une non contribution de ceux-ci, donc une baisse de performance du processus d'échange thermique. L'effet immédiat était l'acheminement d'un flux important de gaz de combustion à température élevée vers la cheminée, réduisant ainsi le rendement de la chaudière.

Une modification du système d'étanchéité existant a réduit les pertes d'air de 24% à 4,7% et le débit de gaz de combustion a ainsi chuté d'une quantité correspondante. La température des gaz de combustion qui sortaient du préchauffeur d'air a chuté de 205°C à 164°C (sans dilution), et le rendement de la chaudière a augmenté de 1,9%. L'avantage supplémentaire a été la réduction considérable du débit passant par les ventilateurs de soufflage et de tirage, ce qui a permis de réaliser une économie importante en énergie auxiliaire.

3.1.3 Remplacement des réchauffeurs d'air - Centrale électrique de Shajiao (Chine)

Shajiao est composée de 3 chaudières à charbon de 200 MW chacune et les préchauffeurs d'air régénératifs provoquaient des pertes excessives d'air dans le flux de gaz de combustion au bout d'un an d'exploitation. Cela provoquait une chute de la production électrique d'environ 20 MW. La meilleure solution était de supprimer les réchauffeurs en place et de les remplacer. Le deuxième objectif du projet était d'améliorer la récupération de chaleur et d'accroître la température de l'air entrant dans la chaudière.

Le remplacement des préchauffeurs d'air de la centrale électrique de Shajiao par les préchauffeurs neufs (de marque Howden) a permis une augmentation de la production de chaque unité de 20 MW et un retour sur investissement en moins de 2 ans. Les tests ont confirmé que les pertes ont été réduites à un taux inférieur à 6%. De même, la température de l'air vers la chaudière a augmenté de 20°C, ce qui équivaut à une augmentation du rendement de la chaudière d'environ 1%.

4. Principaux constructeurs

4.1 HOWDEN

Howden fournit des ventilateurs, des échangeurs thermiques rotatifs, des équipements de nettoyage des gaz et des compresseurs à travers le monde à des secteurs clé, comme la production d'énergie électrique, l'industrie pétrochimique, la sidérurgie, la production minière et de ciment, ayant des exigences extrêmement élevées en termes de rendement et de fiabilité de leurs parcs machines.

L'échangeur thermique rotatif régénératif de Howden est largement utilisé comme réchauffeur gaz-gaz dans le cadre des processus de désulfuration des gaz de combustion humides. Une sélection prudente des matériaux, associée à des caractéristiques de

conception avancées lui permet de produire un échangeur thermique présentant un rendement élevé et une grande résistance aux conditions d'humidité et de froid des stations de désulfuration de gaz de combustion (DGC), où l'encrassement et la corrosion sont des défis de chaque instant. L'entreprise possède de nombreuses références et s'impose comme un des principaux fabricants et maitres d'œuvre de ce type d'installation.

4.2 HOVAL

Les échangeurs de chaleur rotatifs Hoval sont utilisés dans les installations de ventilation et de process pour des débits d'air jusqu'à 150'000 m³/h. Les dimensions du rotor peuvent varier de 0.6 à 6.0 m de diamètre. C'est pourquoi, les différents rotors et les différentes masses d'accumulation permettent de définir exactement l'échangeur rotatif ayant les caractéristiques optimales pour chaque application. En fonction des applications, différents média de récupération peuvent être utilisés (aluminium, Silicagel...etc.).

4.3 KLINGENBURG Energy Recovery

L'entreprise allemande Klingenburg Gmbh propose une gamme d'échangeurs de chaleur pour la récupération d'énergie, notamment des échangeurs rotatifs pour des applications de type HVAC (Heating-Ventilation- Air Conditioning) mais aussi pour des applications à haute température (autour de 300 °C). Elle propose aussi des échangeurs de type VMC double flux comme des échangeurs à plaques à courant croisés mais aussi des systèmes d'humidification. Des échangeurs avec des roues dessicantes (silicagel) font aussi partie de leurs produits.

5. Recherche et développement

Dans le domaine des échangeurs rotatifs et plus globalement dans le domaine des échangeurs de chaleur, les mêmes axes de recherche sont à privilégier.

De nos jours, les recherches pour l'échangeur thermique s'orientent notamment vers la maîtrise de l'encrassement (détection, étude des cinétiques), la haute température avec la connaissance et la maîtrise de nouveaux matériaux, l'intensification des transferts thermiques via les microstructures, les nanomatériaux et nanoparticules, l'amélioration des surfaces d'échanges pour la compacité et l'efficacité...etc. Tous sont de vastes domaines porteurs d'espoir dans l'amélioration des performances de nombreux process. Néanmoins, le développement de l'axe de recherche sur l'encrassement est une priorité, notamment dans la récupération des déchets thermiques qui représente globalement une source non négligeable d'énergie perdue. Les fluides à traiter sont dans la plupart des fluides encrassants, point souvent très dommageables pour les équipements. Il est impératif que dans la stratégie de recherche amont, mais aussi dans la R&D appliquée et impliquée dans le développement industriel en général, ce point soit traité en priorité.

Du fait que le domaine privilégié des échangeurs rotatifs soit la récupération de chaleur sur les effluents gazeux (air/gaz-gaz/gaz-air/air), une véritable résistance d'encrassement peut se créer sur les surfaces ailetées et ainsi faire baisser les performances. L'enjeu de la mise en place de sondes d'encrassements serait de prévoir et prévenir l'encrassement critique de l'échangeur (l'encrassement critique dans les limites de baisse de performance admissible par le process) afin de limiter les dégâts d'un encrassement quasi irréversible. Puis, une fois la détection de l'encrassement faite, il faut aussi apporter une importance cruciale aux dispositifs qui permettent de limiter l'encrassement, voir de désencrassement de l'échangeur. Dans cette optique, les dispositifs tels que des ressorts, des billes ou des systèmes à vibration sont d'ores et déjà commercialisés avec plus ou moins d'efficacité dans la limitation de l'encrassement selon les systèmes et leur intégration dans le process.

Dans ce même axe, il existe de véritable recherche en ce qui concerne les matériaux intégrés dans les matrices de rotor, qui permettent d'améliorer considérablement l'efficacité de ces échangeurs. On pourra ainsi noter différentes publications et travaux de recherche sur l'incorporation de structures poreuses aux seins du rotor [3]. Ces structures permettent de diminuer le temps de séjour nécessaire au refroidissement/réchauffage des effluents sans pour autant impacter sur les performances souhaitées, mais aussi de diminuer la profondeur nécessaire de l'échangeur et ainsi diminuer les pertes de charges induites, et donc de diminuer la puissance de ventilation nécessaire (ou alors d'augmenter les débits traiter pour une même profondeur).

Ces vastes domaines sont donc toujours porteurs d'espoir, et se veulent être dans une politique efficiente : la recherche de l'efficacité et de la compacité maximale, avec un cout le plus faible possible.

6. Conclusions

Pour conclure, nous savons pertinemment que la globalité d'un projet tient sur 4 niveaux, à savoir une bonne conception de ces échangeurs, une bonne réalisation des études thermiques et énergétiques en amont, un montage sur site dans les règles de l'art ainsi qu'un suivi de l'installation 'en charge' (pour maîtriser les problèmes de fuite, d'usure et d'encrassement) est indispensable pour obtenir les performances souhaitées d'une installation.

A l'heure actuelle où les économies d'énergie (et donc d'argent) et la protection de l'environnement semble être au cœur des préoccupations mondiales, l'air chaud qui s'échappe d'une conduite d'extraction et qui se diffuse dans l'atmosphère est un symbole qui choque tout esprit soucieux de préserver l'environnement... Même si un récupérateur n'est pas toujours rentable dans le sens souhaité par les financiers qui exigent des temps de retour sur investissement toujours plus courts, en aucun cas un récupérateur ne représente une dépense, puisque son investissement se récupère toujours sur sa durée de vie par les économies d'énergie qu'il génère. **Investissons donc dans la technologie plutôt que dans le combustible.**

De plus, au commencement d'une révolution énergétique, et ceux suite aux différents problèmes liés à l'exploitation du nucléaire et à la demande toujours plus grande en énergie, mais aussi par la course à l'autarcie énergétique, aucun financier ne s'engagerait sur l'évolution des prix de l'énergie dans 20 ans (pouvant à la fois devenir exorbitant si la situation et le climat énergétique ne change pas, ou alors diminuer si des technologies de ruptures sont développées avec une prise de conscience de l'importance de la sobriété et de l'efficacité énergétique). Pour une nouvelle installation, le placement d'un récupérateur représente donc, dans la plupart des cas, un investissement raisonnable et sûr en rentabilité.

7. Bibliographies

[1] **Marbaix J.C ; UCL – DGTRE (Ministère de la Région Wallone)** - Les récupérateurs de chaleurs en ventilation et conditionnement d'air – 2003

[2] **Manuel Technique du GRETh**

[3] **Jonathan Dallaire, Louis Gosselin, Alexandre K. da Silva** - Conceptual optimization of a rotary heat exchanger with a porous core - International Journal of Thermal Sciences 49 (2010) 454–462

[4] **D. La, Y.J. Dai, Y. Li, R.Z. Wang, T.S. Ge** - Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review - Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 130-147

Site Web: www.howden.com; www.hoval.fr



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°3 : Les échangeurs à caloducs

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	3
2.1 LE CALODUC.....	3
2.1.1 Le choix du fluide.....	6
2.1.2 Le choix du matériau de l'enveloppe.....	7
2.2 LES ÉCHANGEURS À CALODUCS.....	8
2.2.1 Les caloducs à basse température (-20 °C à +60 °C).....	9
2.2.2 Les caloducs à moyenne température (+60 °C à 250 °C).....	10
3. UTILISATION ET MISE EN ŒUVRE.....	10
3.1 Les avantages.....	10
3.2 Les limites de fonctionnement.....	12
3.3 Fabrication.....	13
3.4 Précautions de démarrage.....	14
4. LES APPLICATIONS / EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	15
5. PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS.....	17
6. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	17
7. CONCLUSIONS.....	19
8. BIBLIOGRAPHIES.....	19

1. Introduction

A l'heure actuelle, où les problèmes énergétiques sont grandissants, la recherche de performances et d'efficacité dans les processus industriels est une préoccupation internationale. Pour arriver à ces objectifs de performance, la récupération de chaleur des inévitables rejets industriels actuels devient donc incontournable. A cet effet, véritables outils de maîtrise de l'énergie, les échangeurs de chaleurs sont mis au premier plan. En effet, la récupération de chaleur via des échangeurs est la manière la plus simple qu'il existe de réaliser un transfert de chaleur, et ceci avec des temps de retour sur investissement souvent très bas. Les différentes typologies d'échangeurs de chaleur existantes laissent entrevoir une large gamme de choix pour les ingénieurs et ce pour différentes applications et process. Parmi la vaste gamme d'échangeurs de chaleurs que les fabricants proposent (cf. Fiche n°1 : les échangeurs de chaleur), il existe une technologie particulière - souvent oubliée par les ingénieurs occidentaux de nos jours – et idéal pour la récupération d'énergie : le caloduc.

En effet, le caloduc, véritable machine thermique à lui seul, permet de s'affranchir des consommations énergétiques d'organes auxiliaires de circulation des fluides, des problèmes de confinement et fonctionne (une fois la mise en route effectuée et le régime nominal établi) quasiment en autonomie. C'est donc une technologie idéale.

Dans cette fiche, spécifique à la technologie des échangeurs à caloducs, nous allons expliquer le principe de fonctionnement détaillé du caloduc et des échangeurs à caloducs, les avantages et inconvénients à son utilisation et nous nous efforcerons aussi de lister les principaux fabricants d'échangeurs à caloducs. Nous illustrerons aussi cette fiche par des exemples de réalisations concrets, appliqués ou non au domaine non-conventionnel des déchets.

Cette fiche a donc pour but de renseigner les différents acteurs voulant utiliser cette technologie, tout d'abord sur la technologie elle-même, puis sur ces applications possibles.

2. Principes de fonctionnement

2.1 Le caloduc

Les caloducs sont des enceintes fermées possédant une très haute conductibilité thermique grâce à l'utilisation des phénomènes d'évaporation et de condensation d'un fluide interne. Sa conductivité thermique apparente peut ainsi atteindre plusieurs centaines voire plusieurs milliers de fois celle d'un conducteur métallique homogène de même volume. La principale caractéristique des caloducs qui est utilisée dans les échangeurs est leur capacité à transmettre des flux thermiques élevés avec un faible écart de température.

Le caloduc (« Heat Pipe ») est une enceinte étanche qui contient un liquide en équilibre avec sa vapeur en l'absence totale d'air ou de tout autre gaz. Dans la zone chauffée (évaporateur), le liquide s'évapore et la vapeur vient se condenser dans la zone refroidie (condenseur) (cf. Figure 1). Le condensat retourne vers l'évaporateur grâce à l'effet de la capillarité développée dans un milieu porteur qui tapisse la paroi interne du caloduc. Ce réseau capillaire peut revêtir différentes formes, telles que des toiles métalliques simples (cf. figure 3), frittée (le frittage est un procédé qui permet de réaliser des pièces mécaniques ou d'autres objets à partir de poudres plus ou moins fines), rainures axiales...etc. (cf. Figure 2,3 et 4).

La zone située entre l'évaporateur et le condenseur, qui n'échange pas de chaleur avec l'extérieur, est appelée zone adiabatique.

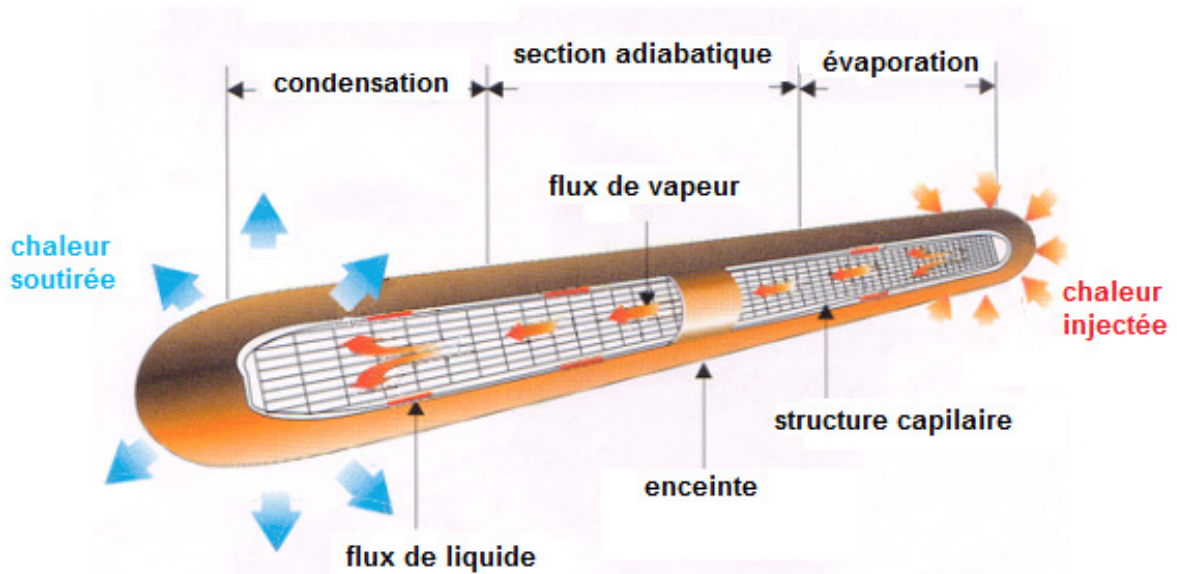


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un caloduc

Bien souvent pour les caloducs utilisés dans les échangeurs, cet effet capillaire véritable moteur du caloduc, est aidé voire remplacé par la gravité. Pour ce faire, il suffit de pouvoir disposer le caloduc dans une position inclinée, tel que l'évaporateur se trouve plus bas que le condenseur. Dans ce cas, le réseau capillaire se réduit à un simple rainurage intérieur peu profond, destiné essentiellement à améliorer le coefficient d'échange thermique. Il peut même être totalement absent pour diminuer les coûts, on parle alors de thermosiphons. On conservera cependant dans la suite de ce document, le terme général de caloduc pour désigner aussi bien les caloducs avec dynamique capillaire que les thermosiphons afin qu'aucune confusion ne soit possible.

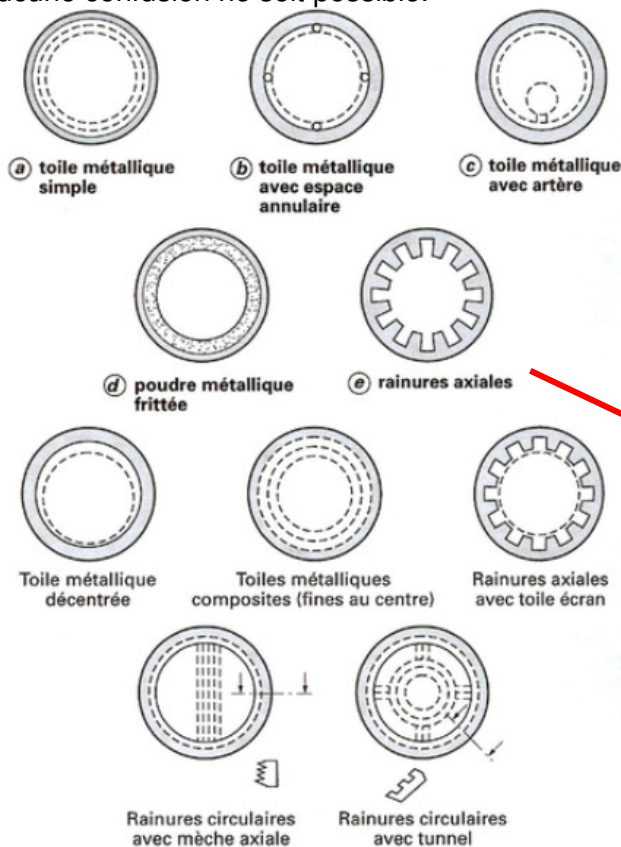


Figure 2 : différents types de réseaux capillaires [2]

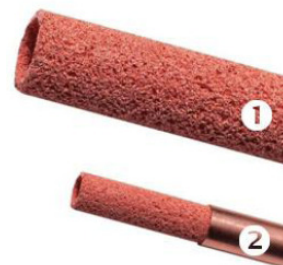
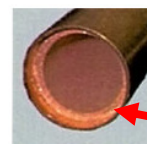
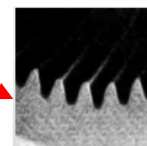


Figure n°3 : mousse métallique de cuivre inséré dans un tube de cuivre



poudre frittée


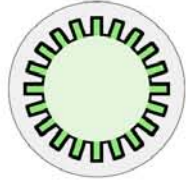
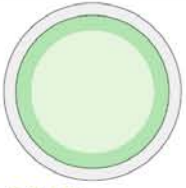
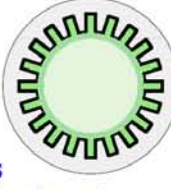
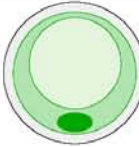
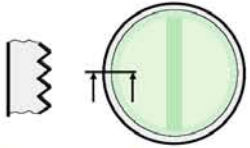
TYPE	Pompage capillaire	Coefficient d'échange thermique	Perméabilité	Remarques
 <p><u>Mèches tissées</u></p>	Elevé	Faible	Faible à moyenne	<p>Le diamètre moyen des pores de la trame peut être ajusté.</p> <p>Fabrication très facile Mauvaise reproductibilité</p>
 <p><u>Rainures longitudinales</u></p>	Faible	Très élevé	Moyenne à élevée	<p>Il existe de nombreux profils de rainures : -rectangulaire, -triangulaire, -circulaire, -trapézoïdale, -ré-entrant</p> <p>Fabrication de série facile et bon marché.</p>
 <p><u>Métal frité</u></p>	Très élevé	Moyen	Faible à moyenne	<p>Le diamètre moyen des pores peut être ajusté.</p> <p>Fabrication assez délicate mais coût pouvant être faible.</p>
 <p><u>Rainures longitudinales et mèches</u></p>	Elevé à Très élevé	Elevé	Moyenne à élevée	<p>Fabrication délicate (positionnement de la mèche). Risques importants de création de bulles de vapeur ou de gaz dans les rainures</p>
 <p><u>Métal frité avec artère liquide intégrée</u></p>	Elevé à Très élevé	Moyen	Moyenne à élevée	<p>Le diamètre moyen des pores peut être ajusté ainsi que la section du canal liquide.</p> <p>Fabrication délicate .</p>
 <p><u>Rainures radiales et milieu poreux central</u></p>	Elevé à Très élevé	Elevé à Très élevé	Moyenne à élevée	<p>Difficulté importante pour la réalisation de rainures radiales sur de grandes longueurs</p> <p>Difficulté de maintien de l'élément central.</p>

Tableau n°1 : Comparaison des différentes structures poreuses [7]

On peut donc dire que dans un caloduc, le transfert de chaleur se fait d'une manière continue par transformation de la chaleur sensible en chaleur latente, transmise par un transfert de masse (la vapeur et le liquide se déplaçant dans le caloduc). Ce sont ces phénomènes qui expliquent la conductibilité apparente exceptionnelle du caloduc.

2.1.1 Le choix du fluide

Le choix du fluide est la première étape dans la détermination d'un type de caloduc adapté à une application donnée. Ce choix est, en effet, déterminé d'abord par la gamme de température de travail du caloduc et ensuite par le niveau des performances souhaitées. Voici dans le tableau suivant, pour les différents fluides utilisés pour les caloducs, les domaines de températures associés, la température de fusion et d'ébullition ainsi qu'une indication sur le coût de mise en œuvre et un paramètre de performance :

Fluide	T°C fusion	T°C ébullition à 1 bar	Domaine de température °C	Coût de mise en œuvre	Performance
Hélium	-272	-269	-271 à -269		
Azote	-210	-196	-203 à -160		
Ammoniac	-78	-30	-60 à 70	Elevé	Elevée
R11	-111	24	-40 à 120	Faible	Faible
Pentane	-130	28	-20 à 120		
R113	-35	48	-10 à 100	Faible	Faible
Acétone	-95	57	0 à 120		
Méthanol	-98	64	10 à 130	Moyen	Moyenne
Ethanol	-112	78	0 à 130	Moyen	Moyenne
Heptane	-90	98	0 à 150		
Eau	0	100	30 à 250	Moyen	Elevée
Toluène	-95	111	70 à 270	Faible	Moyenne
Diphényle	12	250	130 à 350	Faible	Moyenne
Naphtalène	80	218	150 à 430	Moyen	Moyenne
Mercure	-39	357	220 à 600	Elevé	Elevée
Césium	29	670	430 à 800	Elevé	Elevée
Potassium	64	760	500 à 850	Elevé	Elevée
Sodium	98	892	550 à 1100	Elevé	Elevés
Lithium	180	1342	1000 à 1700	Très élevé	Très élevée
Argent	960	2212	1800 à 2300	Très élevé	Très élevée

Tableau n°2 : Fluides les plus courants utilisés pour les caloducs [3]

En fonction du fluide utilisé et de la nature de l'écoulement (par capillarité ou gravité), une certaine densité de flux pourra être extraite :

Fluide	Type de capillaire	T° de la vapeur (°C)	Densité de flux radial (W/cm ²)
Helium	toiles	-269	0.09
ammoniac	variés	20 à 40	5 à 15
R113	toiles	10 à 60	1 à 3
Eau	variés	140 à 180	20 à 100
Eau	toiles	90	4.5
Mercure	toiles	360	180
Sodium	toiles	700 à 900	200
Lithium	toiles	1250	200
Argent	rainures	2000	150

Tableau 3 : densité de flux en fonction du type de fluide et d'écoulement [3]

2.1.2 Le choix du matériau de l'enveloppe

La nature du matériau d'enveloppe d'un caloduc est d'abord conditionnée par la nature du fluide interne que l'on a préalablement choisi. En effet, aucune réaction chimique, si faible soit-elle, ne peut être tolérée entre le fluide et son enveloppe car les gaz dégagés par cette réaction conduiraient irrémédiablement au blocage du fonctionnement du caloduc (même en très faible quantité).

Il faut également prêter une grande attention au fait que la corrosion de l'enveloppe par le fluide peut être beaucoup plus sévère dans le caloduc que dans les conditions rencontrées habituellement dans d'autres échangeurs classiques. Cela provient du fait que le fluide interne est sous forme diphasique et qu'il est toujours purifié (le fonctionnement du caloduc provoquant une distillation permanente), il peut donc beaucoup plus aisément dissoudre ou attaquer le tube constituant l'enveloppe du caloduc par un transfert de masse du condenseur vers l'évaporateur.

Enfin, il est impératif de s'assurer que le matériau, avec son épaisseur préalablement choisie, résiste bien à la pression interne qui peut être importante. On prendra garde, en particulier, au risque de surchauffe qui, lorsque la vapeur reste saturante dans le caloduc, peut conduire à des surpressions accidentelles importantes. Voici dans le tableau suivant, les matériaux d'enveloppe adaptés et compatibles pour quelques fluides pour caloducs :

Fluide Caloduc	Matériaux d'enveloppe usuels compatibles
Ammoniac	aluminium, aciers inoxydables
Fréon	aluminium, cuivre, aciers
Acétone	cuivre, aciers
Méthanol, éthanol	cuivre, aciers
Eau	cuivre, aciers doux
Toluène	aciers, aciers inoxydables
Gilotherm DO	aciers, aciers inoxydables
Naphtalène	aciers, aciers inoxydables
Mercure	aciers bas carbone, aciers inoxydables jusqu'à 500 °C
Potassium	acier inoxydable <i>AISI 316</i> , nickel
Sodium	acier inoxydable <i>AISI 316</i> , nickel, tungstène, molybdène
Lithium	tungstène, molybdène, alliage molybdène-rhénium

Tableau n°4 : Compatibilité entre matériau d'enveloppe et fluide caloduc [3]

2.2 Les échangeurs à caloducs

L'idée de base des échangeurs à caloducs est d'utiliser les remarquables propriétés thermiques des caloducs, que nous venons de décrire, pour transférer de la chaleur entre deux fluides circulant à l'extérieur des caloducs.

Dans un tel échangeur, les caloducs sont disposés en un faisceau tubulaire maintenu en place par une plaque centrale séparant les deux gaines contiguës dans lesquelles les fluides circulent à contre-courant, perpendiculairement au faisceau tubulaire (figure 4), l'échange entre le fluide externe et les caloducs est donc à courant croisés.

La chaleur est transmise du fluide le plus chaud vers le fluide le plus froid par l'intermédiaire des caloducs. Les échangeurs à caloducs sont le plus souvent utilisés pour des échanges gaz-gaz (notamment pour la récupération de chaleur sur les fumées industrielles et en climatisation), mais aussi pour des échanges gaz-liquide, liquide-liquide et même pour des générateurs de vapeur.

Les tubes caloducs sont toujours ailetés (cf. Figure 4) lorsqu'il s'agit d'échange avec des gaz, afin de développer la surface et pouvoir drainer un flux thermique suffisant par caloduc, en dépit de coefficients d'échange thermique externes en convection qui, pour les gaz, sont toujours très faibles (de l'ordre de 20 à 50 W/m² K). De plus, ce coefficient d'échange convectif coté air est celui qui dominera l'échange thermique globale, d'où la nécessité de l'améliorer.

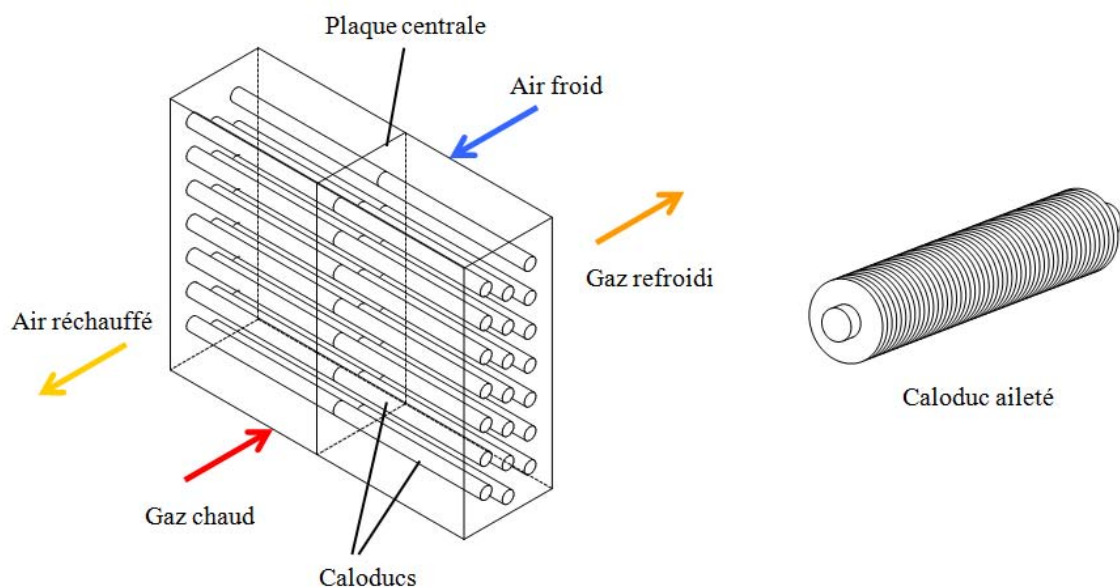


Figure 4 : Principe d'un échangeur à caloduc

Les longueurs courantes des caloducs pour échangeurs s'échelonnent entre 1 et 5 m avec des diamètres de 15 à 50 mm. Les flux thermiques transmis varient de 1 à 10 kW par caloduc selon les dimensions et la nature du fluide interne.

Comme nous l'avons précédemment dit, lorsque l'échangeur travaille sur des gaz, les coefficients d'échange thermique médiocres obligent à augmenter la surface d'échange des tubes afin de drainer un flux thermique suffisant pour utiliser pleinement les capacités élevées de transfert de chaleur de chaque caloduc et en limiter ainsi le nombre. Cependant, pour les liquides, les coefficients d'échange sont meilleurs et les surfaces d'ailéage peuvent être réduites, voire inexistantes (tubes lisses).

Il existe deux types principaux d'ailetage :

- Les tubes ailetés (continue ou discontinue): les ailettes sont fixées sur les tubes un certain espace restant libre entre les ailettes des tubes voisins dans le faisceau. La fixation des ailettes sur les tubes peut être faite par sertissage ou par soudage, selon la température de travail et les matériaux. Elles peuvent aussi être directement extrudées et éviter ainsi une résistance de contact.



Figure 5 : Tubes ailetés

- Les ailettes plaques (continue) : qui sont constituées d'un empilement de plaques percées à travers lesquelles sont enfilés les tubes du faisceau. La fixation de ces plaques sur les tubes est en général réalisée par un serrage mécanique, le plus souvent obtenu par un olivage intérieur des tubes une fois les plaques mises en place. Ce dernier procédé oblige à effectuer le remplissage des caloducs après la fabrication du faisceau de tubes.



Figure 6 : ailette plaques en aluminium

De ce fait, les tubes ailetés présentent l'avantage de préserver l'indépendance totale des caloducs jusqu'à la fixation sur la plaque centrale et de permettre ainsi un découplage total entre les opérations de fabrication des caloducs et celles de fabrication de l'échangeur.

De plus, les tubes à ailettes soudées peuvent supporter des températures élevées (jusqu'à 400°C et plus avec des aciers spéciaux). Les ailettes plaques permettent en général une fabrication moins coûteuse pour des réalisations en série. Elles permettent d'obtenir une surface d'échange plus importante avec une bonne efficacité lorsqu'elles sont en matériaux bons conducteurs de la chaleur (cuivre ou aluminium). Par contre, la tenue en température est limitée (de l'ordre de 150°C), c'est pourquoi ce type de conception se rencontre surtout dans les échangeurs à caloducs utilisés dans les domaines de la climatisation ou de la récupération de chaleur industrielle à basse température.

Le contrôle de l'état de propreté de l'équipement de récupération est primordial. En effet, l'encrassement des surfaces d'échanges a deux conséquences néfastes sur la récupération :

- la réduction du coefficient d'échange de chaleur
- la réduction des débits traités

Nous reviendrons plus amplement sur la problématique de l'encrassement dans le chapitre recherche et développement.

Dans la suite de ce document, nous allons vous présenter les différents caloducs, c'est-à-dire à basse température ($-20^{\circ}\text{C} < T < 60^{\circ}\text{C}$) et moyenne température ($60^{\circ}\text{C} < T < 250^{\circ}\text{C}$). La gamme des hautes températures ($T > 250^{\circ}\text{C}$) ne sera pas présentée car ne faisant pas partie du scope de cette étude.

2.2.1 Les caloducs à basse température (-20°C à +60°C)

Il s'agit dans la plupart des cas de caloducs destinés à des échangeurs utilisés en climatisation. Le fluide interne est (presque toujours) un fluide frigorigène dont le type est choisi en fonction de la gamme de température à couvrir (voir tableau 1). Très courants dans l'industrie, les fluides frigorigènes sont peu coûteux et d'une mise en œuvre simple pour les

caloducs (remplissage par ébullition). Leurs performances thermiques moyennes sont en général bien adaptées à l'usage des caloducs dans les échangeurs.

Dans les autres fluides caloducs couvrant le même domaine de températures, on peut citer les alcools (méthanol et éthanol) et l'acétone. Ces fluides, plus performants que les fluides frigorigènes, sont plus difficiles à manipuler et sont moins utilisés. Enfin, l'ammoniac, fluide très performant mais nécessitant une technologie de remplissage délicate et coûteuse, est réservé aux applications à très hautes performances, dans l'industrie spatiale notamment.

Le matériau d'enveloppe le plus utilisé est l'aluminium, bon conducteur thermique et facile à travailler par extrusion (pour le rainurage intérieur et l'ailetage). Le cuivre est aussi parfois utilisé, bien que plus coûteux. Enfin, dans quelques cas particuliers on rencontre des aciers au carbone et les aciers inoxydables pour résister à la corrosion par le milieu extérieur au caloduc. Les réseaux capillaires sont presque toujours constitués de rainures longitudinales, parfois de rainures hélicoïdales. A noter que les tubes lisses (pas de réseau capillaire) sont presque toujours utilisés dans le cas des aciers.

2.2.2 Les caloducs à moyenne température (+60 °C à 250 °C)

Ces sont essentiellement des caloducs à eau ou à fluide organique. Les caloducs à eau, très performants, nécessitent une enveloppe en cuivre, seul matériau courant compatible avec l'eau sans précaution particulière. Il est à noter que des traitements spéciaux permettent de rendre compatible l'eau en tant que fluide caloduc et l'acier comme enveloppe (acier noirs). Ce type de caloduc est à la fois résistant, performant et peu coûteux.

Les caloducs à fluide organique transportent des flux thermiques moins importants mais en général suffisant pour les échangeurs. En revanche, ce type de fluide est peu agressif chimiquement et il est compatible avec une large gamme de matériaux d'enveloppe, en particulier les aciers, plus résistants aux efforts mécaniques et à la corrosion des agents externes que le cuivre.

Les fluides organiques les plus couramment employés sont :

- Le toluène qui peut fonctionner jusqu'à 280 °C environ et ne se décompose qu'à partir de 400 °C.
- Le mélange eutectique de diphényle et d'oxyde de diphényle connu sous différents noms commerciaux (Gilotherm D0, Dowtherm A, Thermex) qui peut fonctionner jusqu'à 350 °C mais qui commence à se décomposer lentement (dégradation du caloduc) au-delà de 300 °C.

Nous allons maintenant énumérer les avantages et les éventuels inconvénients à l'utilisation d'échangeurs à caloducs.

3. Utilisation et mise en œuvre

3.1 Les avantages

Les échangeurs à caloducs présentent, par rapport aux échangeurs traditionnels, un certain nombre d'avantages :

- **Très bonne étanchéité entre les deux fluides** : la jonction plaque centrale-tubes peut être rendue parfaitement étanche (à l'aide d'une soudure, par exemple) tandis que les caloducs eux-mêmes constituent une double paroi entre les fluides.

- **Grande fiabilité de l'échangeur** : les caloducs étant des éléments indépendants et nombreux (quelques dizaines à plusieurs centaines par échangeur), la défaillance de

quelques-uns d'entre eux n'empêche pas le fonctionnement de l'ensemble et n'altère que faiblement les performances de l'échangeur.

- **Souplesse de conception** : elle est due au fait que les caloducs étant indépendants (non raccordés entre eux), ils peuvent être disposés selon une géométrie quelconque, adaptée aux contraintes de l'installation.

- **Légèreté et compacité** : ces qualités proviennent des flux élevés que peuvent transférer les caloducs.

- **Efficacité élevée** : en raison des très forts coefficients d'échange thermique internes des caloducs et de la possibilité d'avoir des surfaces très développées sur les deux fluides (ailetage des caloducs des deux côtés de la plaque centrale).

- **Isothermie des caloducs** : cette propriété, qui résulte du principe même du caloduc, permet d'éviter les points froids générateurs de condensation, donc de corrosion.

- **Faibles pertes de charge** : les deux fluides passant à l'extérieur du faisceau des caloducs, les pertes de charge γ sont toujours nettement plus faibles que pour un fluide circulant dans un tube.

- **Entretien réduit** : les caloducs sont des éléments passifs, fixes et scellés, donc sans entretien (avantage par exemple, par rapport aux régénérateurs tournants en récupération de chaleur).

- **Faibles contraintes dues à la dilatation** : en raison du fait que les caloducs ne sont fixés rigidement que sur une plaque centrale et sont seulement guidés aux extrémités, à la différence des échangeurs classiques comportant des tubes fixés sur deux plaques tubulaires. Les échangeurs à caloducs supportent donc très bien les cyclages thermiques : ils sont bien adaptés aux installations soumises à des charges thermiques variables ou à des arrêts et démarrages fréquents. En outre, la faible inertie thermique des caloducs assure une montée en régime rapide de l'installation.

- **Régulation possible du flux échangé** : en utilisant les propriétés inhérentes aux caloducs, il est possible de moduler le flux transmis par l'échangeur en faisant varier la résistance thermique des caloducs. Cela peut se faire, par exemple, en jouant sur l'inclinaison des caloducs ou bien encore en utilisant des caloducs à conductance variable par gaz incondensable.

Comme on peut le voir, l'échangeur à caloduc possède de nombreux avantages par rapport aux autres technologies des échangeurs à chaleurs mais possède néanmoins quelques inconvénients :

- Pour de la récupération sur des gaz (fumées, air...etc), le flux doit être radial.

- Dans un caloduc, à une température donnée la pression est très voisine de la pression de saturation du fluide interne à cette température (elle est même exactement égale à la pression de saturation à l'équilibre), c'est-à-dire lorsque le caloduc n'échange pas de chaleur. Il en résulte qu'un caloduc ne peut fonctionner que dans un domaine limité de température (qui peut néanmoins atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius), pour lequel la pression interne n'est ni trop faible ni trop élevée.

3.2 Les limites de fonctionnement

Comme vous avez pu le constater, les échangeurs à caloducs possèdent de nombreux avantages quand à leur utilisation, néanmoins nous avons aussi pu voir dans le premier chapitre qu'ils sont d'une tout autre conception et nécessitent donc un dimensionnement plus complexe que les échangeurs « classiques ». En effet, lors du dimensionnement il faudra prendre en compte toutes les limites de fonctionnement du caloduc qui sont énoncées et expliquées dans la suite de ce document.

Voici la définition et l'explication de ces phénomènes :

- limite visqueuse : La limite visqueuse se rencontre pour des caloducs fonctionnant à une température correspondant à une pression de saturation du fluide interne extrêmement basse. Son origine réside dans le fait que la pression à l'évaporateur n'est pas suffisante pour permettre à la vapeur de vaincre les frottements visqueux au cours de son écoulement jusqu'au condenseur.

- limite sonique : la très faible densité de la vapeur due à la faible pression dans le caloduc (quelques millibars) conduit à des vitesses de vapeur proches de la vitesse sonique, cette limite sonique intervient essentiellement en phase de démarrage dans les caloducs fonctionnant à température supérieure à 300°C (pour les métaux liquides) et bloque le fonctionnement des caloducs à cause de la création d'une onde de choc.

- limite d'entraînement : la limite d'entraînement provient du fait que la vapeur et le liquide circulent à contre-courant sans séparation physique complète et lorsque la vitesse de la vapeur devient élevée, celle-ci tend à arracher des gouttelettes de liquide et l'écoulement liquide peut se trouver totalement interrompu, bloquant ainsi le fonctionnement du caloduc.

- limite capillaire : l'écoulement de la vapeur de l'évaporateur jusqu'au condenseur (et inversement) s'accompagne d'une légère chute de pression, pour que le caloduc puisse continuer de fonctionner, il faut que ces chutes de pression soient compensées par la pression motrice capillaire.

- limite d'ébullition : La limite d'ébullition a pour origine la naissance de bulles de vapeur au sein du réseau capillaire lorsque la densité de flux thermique radial à l'évaporateur devient trop importante. Ces bulles empêchent une irrigation correcte du capillaire par le liquide et créent des points chauds par assèchement qui peuvent conduire, dans certains cas, à la destruction du caloduc par fusion locale de l'enveloppe.

Une pression trop faible, donc une vapeur trop peu dense, conduit à des limites de types visqueux ou sonique tandis qu'une pression trop élevée conduit à une limite de type ébullition, à un non-fonctionnement dû à l'approche du point critique du fluide, ou enfin à un risque de rupture mécanique de l'enveloppe.

Lorsque le caloduc fonctionne dans son domaine de température optimal, il existe deux autres limitations importantes aux flux thermiques que peut transporter le caloduc : ce sont la limite d'entraînement et la limite capillaire, chacune constituant respectivement la base du calcul pour le dimensionnement d'un thermosiphon et/ou d'un caloduc.

On pourra voir sur la figure 7 l'influence de ses limites de fonctionnement sur les performances d'un caloduc :

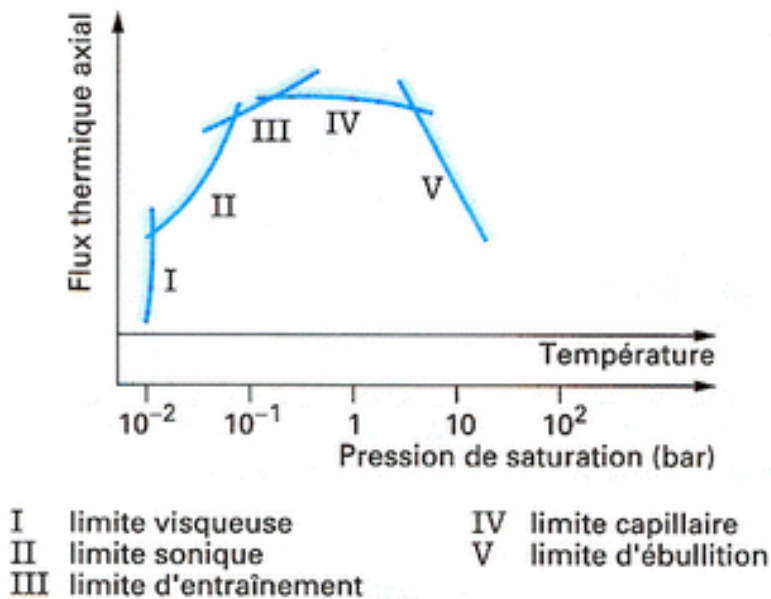


Figure 7 : Influences de limites de fonctionnement des caloducs sur le flux thermique radial extrait [3]

Bien que les caloducs possèdent de très nombreux avantages, les conditions d'utilisation (et surtout de démarrage, nous y reviendrons dans le chapitre 3.4) ainsi que le respect des limites de fonctionnement sont très importants pour un fonctionnement efficace et une utilisation pérenne. La fabrication du caloduc est aussi une étape essentielle et cruciale qui influe, en grande partie et essentiellement sur la durée de vie du caloduc.

3.3 Fabrication

Dans ce chapitre, nous allons donc décrire brièvement les principales étapes nécessaires de la fabrication d'un caloduc. Comme nous venons de le dire dans le chapitre précédent, la fabrication du caloduc est une étape forcément essentielle mais qui, en général, n'influe que peu sur les performances immédiates du caloduc (sauf pour le mouillage dans le caloduc fonctionnant par capillarité pure) mais qui est tout à fait déterminante dans la durée de vie du caloduc (qui se situe en général entre 5 et 10 ans (en moyenne), voire plus pour des fabrications qui nécessitent une haute qualité de fabrication, comme dans le domaine spatial par exemple).

1 - Dégraissage et décapage de l'enveloppe et du réseau capillaire :

Cette opération – indispensable - permet d'assurer une propreté parfaite de l'intérieur du caloduc avant le remplissage avec le fluide caloporteur. Cette étape est nécessaire pour éviter l'encrassement de l'évaporateur et l'altération progressive des performances du caloduc par la génération de gaz dû à la dégradation d'impuretés résiduelles (matières organiques).

2 - Purification du fluide :

Nous l'avons vu auparavant, du fait de la présence d'un fluide diphasique, le fonctionnement du caloduc équivaut à une distillation permanente du fluide interne, il faut donc que ce fluide soit parfaitement pur pour éviter toute séparation en plusieurs composants, ce qui altérerait l'uniformité de la température du caloduc. Il faut également que le fluide soit exempt de traces de certains corps qui pourraient être des catalyseurs de corrosion ou de décomposition chimique. Le processus de purification est propre à chaque fluide mais est réalisé par distillation, et selon le fluide utilisé, il peut être nécessaire de réaliser une ou plusieurs distillations.

3 - Dégazage de l'enveloppe et du fluide :

La propreté de l'enveloppe et la pureté du fluide qui sont recherchés dans les étapes de fabrication précédente n'excluent pas qu'ils contiennent des gaz (dissous dans le liquide ou occlus dans l'enveloppe). Ces gaz se dégagent au cours du fonctionnement du caloduc et viennent bloquer plus ou moins complètement le transfert de chaleur au condenseur, il faut donc les éliminer avant le remplissage du caloduc. Le dégazage de l'enveloppe se fait en général par un recuit sous vide dont la température et la durée sont à ajuster selon le matériau, son type d'élaboration et la température de fonctionnement du caloduc. Le dégazage du fluide se fait par diverses techniques telles que cycles fusion-solidification sous vide, évaporation sous vide ou pompage sous ultrasons. Là encore, la technique est à mettre au point pour chaque type de fluide.

4 – Transfert du fluide dans l'enveloppe :

La technique la plus simple consiste à introduire le fluide à l'état liquide ou solide dans l'enveloppe, puis à chasser l'air par une ébullition suffisamment prolongée avant la fermeture (de l'ordre de 30 s à 1 ou 2 min). Cette technique est peu onéreuse mais elle ne permet pas un contrôle précis de la quantité de fluide restant dans le caloduc après fermeture et surtout elle ne permet pas d'éliminer tout à fait complètement l'air du caloduc. Des traces d'oxygène peuvent subsister et amorcer une corrosion réduisant ainsi la durée de vie. La technique la plus élaborée consiste à faire le transfert du fluide dans le caloduc sous vide après dégazage de l'enveloppe et du fluide, et ce, sans rupture du vide entre les diverses opérations. Plus coûteuse, au moins au niveau des investissements nécessaires à une fabrication de série, cette technique assure au caloduc une qualité et une fiabilité nettement supérieures au remplissage par ébullition.

5 - Fermeture du caloduc :

Cette étape consiste essentiellement à assurer une parfaite étanchéité à chaud et sous pression en tenant compte, éventuellement, des conditions de fonctionnement accidentelles (surchauffe). Elle se fait en général par pincement et soudure d'un queue-sot (tube court de faible diamètre situé à l'une des extrémités du caloduc par où a lieu le transfert du fluide) comme sur les circuits frigorifiques classiques.

D'autres méthodes telles que le rétreint et le repoussage du métal à l'extrémité du tube caloduc, assurant à la fois la fonction de bouchon et l'étanchéité complète grâce à une soudure locale, sont parfois utilisées.

Les diverses méthodes possibles sont, bien entendu, fonction du matériau et aussi de l'importance des séries à fabriquer.

3.4 Précautions de démarrage

Le démarrage d'un échangeur à caloducs, nous l'avons mentionné, est une étape cruciale qui nécessite une grande attention.

En effet, le problème lors des phases de démarrage de caloduc réside essentiellement sur le fait que, pendant la montée en température de l'échangeur (et donc que le caloduc se trouve en dessous de sa température de fonctionnement nominale), la pression de vapeur saturante au sein du caloduc n'est que très faible, et de ce fait diminue fortement le flux limite transportable (cf. limite sonique). Ainsi, il faut pendant ces phases de démarrage, veiller à ce que le flux injecté ne dépasse pas celui fixé par la limite sonique. Le problème est proportionnel à la température d'utilisation du caloduc, c'est-à-dire :

- pour les caloducs à basse température (20°C – 150 °C), c'est-à-dire utilisant des fluides comme l'eau, les fréons, les alcools, l'ammoniaque ou l'acétone, ce problème ne se pose pas car la pression de vapeur saturante à température ambiante est assez grande.

- pour les caloducs à haute température (150°C – 300°C), c'est-à-dire utilisant des fluides Gilotherm DO, Dowtherm ou mercure, le problème se pose. Pour palier celui-ci, il est parfois nécessaire d'arrêter la convection forcée coté froid (condenseur) durant la montée en température.

L'application de ces précautions de démarrage conduit inévitablement au bon fonctionnement d'un caloduc, c'est-à-dire un temps de réponse très faible et donc une grande efficacité de récupération de chaleur en régime transitoire.

4. Les applications / exemples de réalisations

Le caloduc étant un dispositif statique capable de transmettre des flux thermiques importants avec un très faible gradient de température, on pourra envisager son application dans tous les cas où l'on a besoin soit de transférer des flux thermiques élevés, soit d'uniformiser la température d'un ensemble, soit éventuellement les deux à la fois.

Il existe une multitude d'applications possibles pour les caloducs (climatisation, refroidissement de composants électroniques, fours à caloducs...etc.).

Néanmoins, le domaine de prédilection des échangeurs à caloducs est la récupération de chaleur sur les fumées pour les raisons suivantes :

- La compacité qui leur permet de s'intégrer aisément dans des installations existantes.
- La faible perte de charge, notamment sur les fumées, qui leur permet de travailler en tirage naturel ou avec des ventilateurs de faible puissance.
- L'efficacité thermique et l'absence de point froid qui empêche la corrosion et qui autorisent un taux de récupération remarquable.

On peut voir sur la figure suivante, une installation avec échangeurs à caloducs pour la récupération de chaleur sur des fumées et le réchauffage de l'air frais pour la combustion :

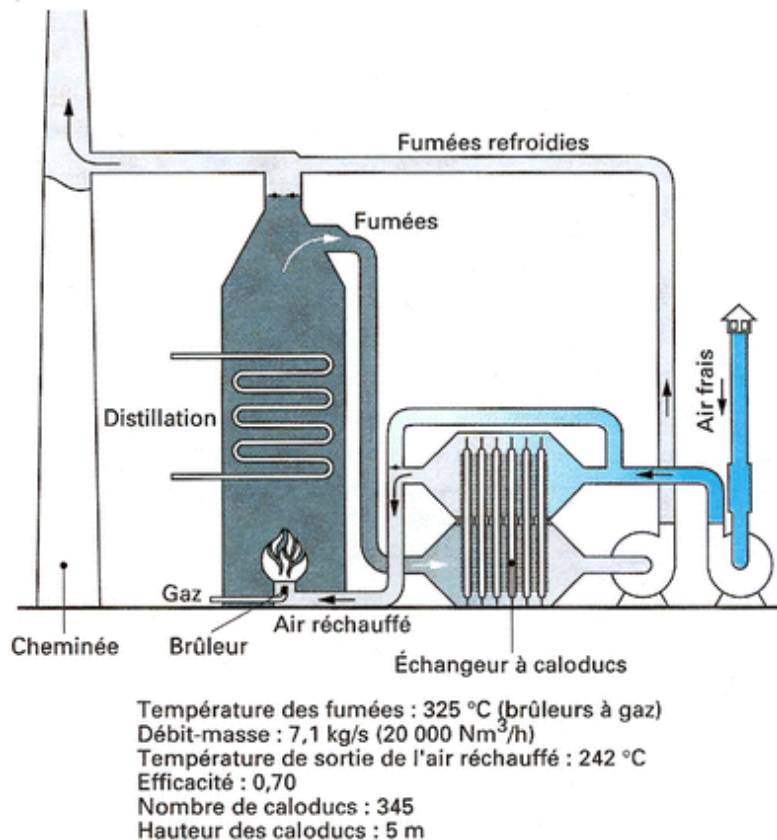


Figure 8 : Récupérateur de chaleur 1 300 kW avec des caloducs (thermosiphons) au toluène (ELF-CEA) [3]

Ici, la température des fumées en sortie de brûleur atteint 325°C et réchauffe de l'air d'admission jusqu'à 242°C. Ce système à caloducs permet tout d'abord de limiter la consommation des auxiliaires nécessaire au fonctionnement, comme une pompe qui devrait servir à la circulation du fluide dans un échangeur normal (batterie ailette), mais aussi de diminuer le coût en matériaux des éventuelles tuyauteries nécessaires à la réalisation de la boucle échangeur. Ainsi, seul un groupe moto-ventilé est nécessaire pour la circulation de l'air d'admission.

Bien que le domaine de prédilection des échangeurs à caloduc soit la récupération de chaleur sur les fumées, et cela du fait de la maturité de cette technologie, une gamme de produits variés est proposée, notamment :

- la tête caloduc d'un moteur Stirling (CEA/ECA) (figure 9).
- les capteurs solaires en concentration utilisés comme source chaude d'un moteur à cycle de Stirling (Thermacore Inc).
- les minis/micros caloducs et les caloducs oscillant pour le domaine de la micro électronique.

D'autres applications sont plus exotiques, comme les capteurs solaires plans pour la fonte de neige servant à la production d'eau dans les refuges ou le chauffage d'eau (CEA/Sté DATE).

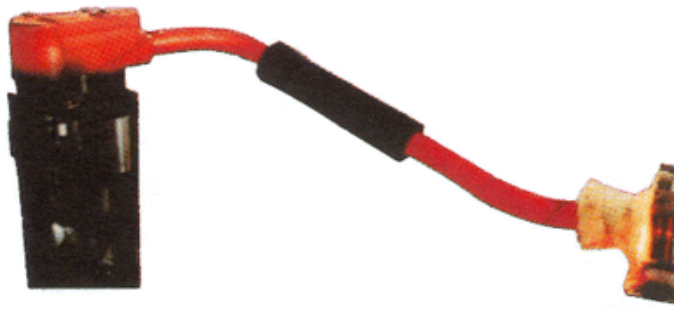


Figure 9 : Tête de caloduc au sodium d'un moteur à cycle de Stirling (CEA/ECA)[3]



Figure 10 : Capteur solaire à caloduc : principe [3]

Les caloducs et les thermosiphons ont maintenant gagné le domaine industriel courant, et sont largement utilisés pour résoudre, de façon simple, divers problèmes thermiques (comme le maintien en température des cellules photovoltaïques). On voit cependant depuis ces dernières années une augmentation continue des puissances ou des densités de flux thermique à gérer dans les systèmes et procédés industriels, ces technologies s'avèrent aujourd'hui parfois insuffisantes, et de nouveaux concepts de systèmes de contrôle thermique par voie diphasique sont en développement (notamment les micro-caloducs et les caloducs oscillants).

5. Principaux constructeurs

Il existe une multitude de fabricant d'échangeurs à caloduc, nous allons donc citer les principaux fournisseurs, en sachant que cette liste n'est pas exhaustive :

Thermacore, D.A.T.E, Thermofin, Atherm, DailySolar...etc.

6. Recherche et développement

Dans le domaine des caloducs, et comme dans le domaine plus global des échangeurs de chaleur, les mêmes axes de recherche sont à privilégier.

De nos jours, les recherches pour l'échangeur thermique s'orientent notamment vers la maîtrise de l'encrassement (détection, étude des cinétiques), la haute température avec la connaissance et la maîtrise de nouveaux matériaux, l'intensification des transferts thermiques via les microstructures, les nanomatériaux et nanoparticules, l'amélioration des surfaces d'échanges pour la compacité et l'efficacité...etc. Tous sont de vastes domaines porteurs d'espoir dans l'amélioration des performances de nombreux process. Néanmoins, le développement de l'axe de recherche sur l'encrassement est une priorité, notamment dans la récupération des déchets thermiques qui représente globalement une source non négligeable d'énergie perdue. Les fluides à traiter sont pour la plupart des fluides encrassants, point souvent très dommageable pour les équipements. Il faudrait de ce fait que dans la stratégie de recherche amont, mais aussi dans la R&D appliquée et impliquée dans le développement industriel en général, ce point soit traité en priorité.

Du fait que le domaine privilégié des caloducs soit la récupération de chaleur sur les effluents gazeux, une véritable résistance d'encrassement peut se créer sur les surfaces ailetées des caloducs et ainsi faire baisser les performances. L'enjeu de la mise en place de sondes d'encrassements serait de prévoir et prévenir l'encrassement critique de l'échangeur à caloducs (l'encrassement critique dans les limites de baisse de performance admissible par le process) afin de limiter les dégâts d'un encrassement quasi irréversible. Puis, une fois la détection de l'encrassement faite, il faut aussi apporter une importance cruciale aux dispositifs qui permettent de limiter l'encrassement, voir de désencrassement de

l'échangeur. Dans cette optique, les dispositifs tels que des ressorts, des billes ou des systèmes de vibration sont d'ores et déjà commercialisés avec plus ou moins d'efficacité dans la limitation de l'encrassement selon les systèmes et leur intégration dans le processus. On pourra noter des travaux de recherche concernant le désencrassement (ou la limitation de l'encrassement) par des systèmes à ultrason.

On pourra aussi noter des recherches dans l'amélioration des fluides contenu dans les caloducs, notamment par l'ajout de nanoparticule dans les fluides. En effet, plusieurs publications et thèse ont fait l'objet de recherche plus ou moins poussées vers l'ajout en différentes concentration de nanoparticule de fluides ayant comme propriétés d'améliorer les coefficients d'échanges locaux. Cependant, de nombreux frein à cette technologie viennent perturber l'avancement de ces travaux, notamment pour les caloducs. En effet, du fait d'une circulation par force capillaire ou gravitaire, les nanoparticules créées de fortes pertes de charges. Ces nanoparticules sont bien sur localisé dans la zone de condensation du fait que celles-ci ne s'évapore pas.

On peut ainsi voir [5], l'évolution de l'efficacité d'un caloduc en fonction du flux reçu et de la concentration en nanoparticule, voici le graphique obtenu :

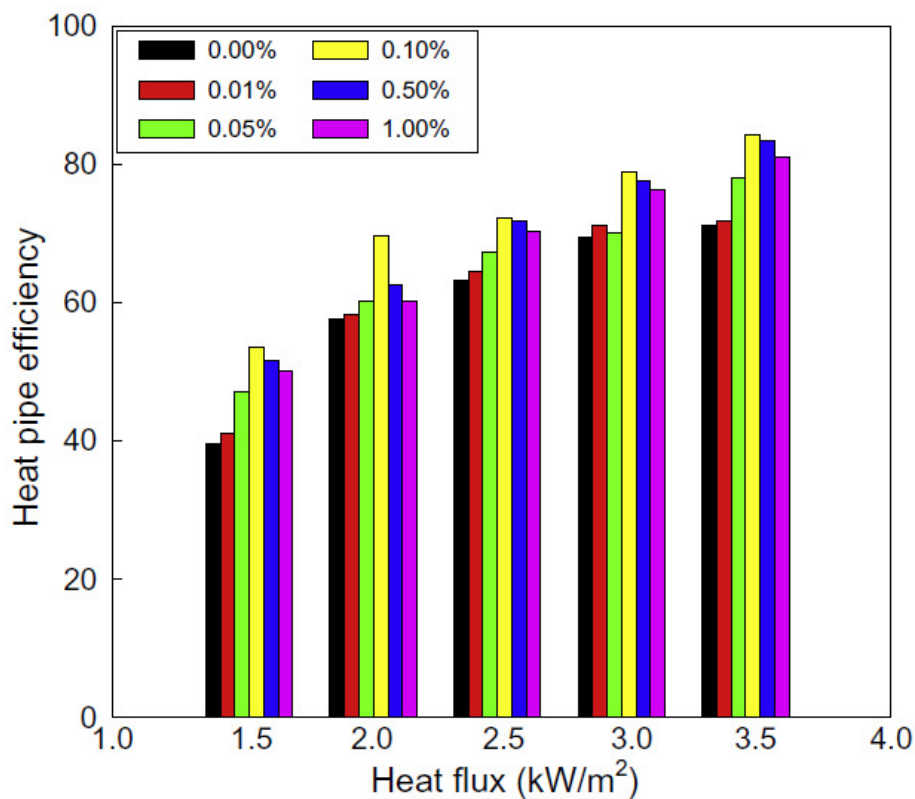


Figure 11 : Evolution de l'efficacité d'un échangeur à caloducs en fonction du flux et du pourcentage en nanoparticule dans le fluide [5]

Taille des particules	21 nm
Forme	Sphérique
Densité	130g/l
Surface par unité de masse	63 m²/g

Tableau 5 : Propriétés physique des nanoparticules de titane [5]

Sur cette publication, l'auteur conclut qu'une concentration optimale dans le fluide en nanoparticule permet d'augmenter l'efficacité du caloduc, même à flux constant. Ces

différents essais permettent de montrer que de nombreuses améliorations restent à faire dans ce domaine, et que les résultats sont encourageants.

7. Conclusions

Sans conteste la technologie des échangeurs à caloduc est une technologie mature est sûre en ce qui concerne la récupération de chaleur. Néanmoins, les améliorations et différents axes de recherches émis dans le chapitre précédent nous montre que tous n'est pas réaliser dans ce domaine et que certaines améliorations techniques et technologiques pourraient permettre d'aboutir à des dispositifs et échangeurs à caloducs extrêmement efficaces, fiables, et d'un fonctionnement et d'une utilisation pérenne, ce qui est en phase avec une politique d'efficacité énergétique et de développement durable.

8. Bibliographies

[1] Manuel Techniques du GRETh, Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques

[2] CHAUDOURNE S.- Les échangeurs à caloducs pour la récupération de chaleur dans les processus industriels. Revue Phys. Appl. 17 (1982), pp.625-632, sept. 1982

[3] CHAUDOURNE S, BRICARD A - Caloducs, Techniques de l'Ingénieur, B9545, 1997.

[4] Vincent PLATEL, Cyril ROMESTANT, Vincent AVEL, Valérie SARTRE, Jocelyn BONJOUR, Yves BERTIN, Frédéric LEFÈVRE - Systèmes diphasiques de contrôle thermique - Thermosiphons et caloducs – Techniques de l'ingénieur Référence BE9545

[5] Paisarn Naphon, Dithapong Thongkum, Pichai Assadamongkol - Heat pipe efficiency enhancement with refrigerant-nanoparticles mixtures - Energy Conversion and Management 50 (2009) 772-776

[6] Sébastien FEROUILLAT- Etude du micro-mélange pour la caractérisation des performances d'échangeurs-réacteurs compact multifonctionnels - Thèse de DOCTORAT

[7] Remi Bertossi – Thèse 2009 - MODELISATION DES TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MASSE DANS LES CALODUCS CONTRIBUTION A L'ANALYSE DES PHENOMENES D'INTERFACES INTERVENANT DANS LES ECOULEMENTS DIPHASIQUES

Site Web:

www.atherm.com



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°4 : Les cycles organiques de Rankine (ORC)

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	3
2.1 Cycle Organique de Rankine	3
2.2 Cycle de Rankine Supercritique (SRC)	8
3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	10
4. LES APPLICATIONS DES ORC/EXEMPLES DE RÉALISATIONS	11
4.1 Les turbines Scroll intégrés dans les systèmes ORC.....	14
4.1.1 Principes de fonctionnement.....	14
5. PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS	16
5.1 ORMAT	16
5.2 TURBODEN	17
5.3 P&W PS (Pratt & Whitney Power System) de UTC Power.....	17
5.4 GMK.....	18
5.5 ENEFTECH	18
5.6 ENERTIME.....	19
6. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	19
7. CONCLUSIONS.....	20
8. BIBLIOGRAPHIES.....	21

1. Introduction

Le secteur industriel est un des plus grands consommateurs d'énergie et la hausse actuelle des prix de l'énergie notamment due à la raréfaction des énergies fossiles pousse les industriels à devenir de plus en plus efficace et performant concernant la maîtrise de l'énergie. Dans ce contexte là, l'énergie perdue par les innombrables rejets industriels représente de nos jours une quantité importante d'énergie gaspillée qu'il serait bon de valoriser en chaleur et/ou en électricité à condition d'avoir les systèmes pouvant réaliser cet objectif. En effet, les rejets thermiques sont parfois à des niveaux de température trop bas pour être directement valorisés par des systèmes conventionnels, ainsi les nouveaux progrès réalisés en matière de récupération et valorisation de ces énergies permet de réaliser ces objectifs. Dans ce cadre là, les cycles organiques de Rankine sont une voie prometteuse pour produire en même temps de l'électricité et de la chaleur par le biais de rejets thermiques à basse température. De plus, comme nous venons de le dire, la hausse des prix de l'énergie, qu'elle soit fossile ou électrique permet maintenant d'avoir des temps de retour sur investissement nettement plus bas et permet donc aux industriels, sur critères financiers d'envisager avec engouement ce genre de valorisation.

2. Principes de fonctionnement

2.1 Cycle Organique de Rankine

Les installations ORC (Organic Rankine Cycle) sont des installations thermiques dans lesquelles, via un circuit fermé, on produit de l'énergie électrique grâce à des rejets thermiques entre 70 et 300 °C. Les premières expériences réalisées montrent que, dans des cas isolés, les installations ORC sont tout à fait aptes à utiliser des rejets thermiques. Toutefois, on ne peut pas s'attendre à une part importante d'ORC dans les systèmes d'URT.

Les ORC constituent une technologie mature permettant d'envisager la valorisation en énergie électrique et/ou thermique de ressources aujourd'hui peu utilisées comme les sources de chaleur résiduelles dans l'industrie, la biomasse ou le solaire à concentration sur des petites installations (nous reviendrons par la suite, dans le chapitre 3, sur les applications possibles des ORC). Ces centrales ont la particularité d'être compactes, extrêmement fiables et compétitives sur le plan économique pour la production d'énergie jusqu'à des puissances de l'ordre du MWe.

La génération d'électricité à partir de sources thermiques à basse température est possible grâce à l'utilisation de fluides organiques (réfrigérants) qui alimentent des turbines selon le même principe que le fameux cycle à vapeur, d'où le nom de cycle ORC. Ces réfrigérants permettent en effet une exploitation plus efficace de la chaleur à basse température (en dessous de 250 °C), pour les applications de petites puissances (de l'ordre de quelques kW à quelques MW). La Figure 1 suivante montre un exemple de ce système comprenant un évaporateur, une turbine, un condenseur et une pompe.

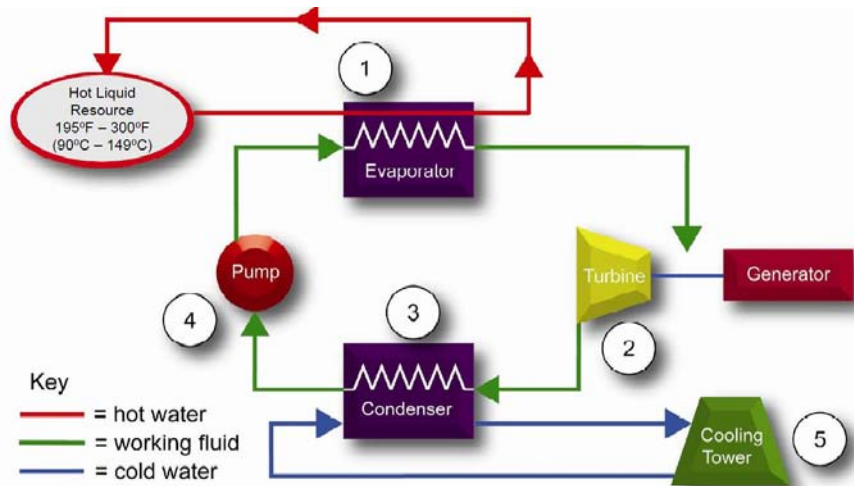


Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un cycle organique de Rankine sans régénérateur

De la vapeur haute pression d'un fluide (réfrigérant) est générée dans l'évaporateur chauffé par une source thermique (par exemple la chaleur solaire ou les rejets thermiques d'un moteur à combustion). Cette vapeur de réfrigérant est détendue dans la turbine, générant de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur électrique. Ensuite, la vapeur à la sortie de la turbine est condensée dans le condenseur en utilisant comme fluide de refroidissement de l'eau de chauffage. Le liquide organique (réfrigérant) obtenu au condenseur est finalement pompé à l'évaporateur pour compléter le cycle. Dans le but d'améliorer les performances du cycle, différentes solutions technologiques de préchauffage du réfrigérant à l'entrée de l'évaporateur peuvent être utilisées en fonction des caractéristiques du fluide de travail. Par exemple pour un cycle avec régénération (cf. Figure 1'), la vapeur basse pression issue de la turbine pourra être utilisée dans un échangeur-régénérateur pour préchauffer le fluide organique avant son entrée à l'évaporateur, ce qui permet d'améliorer de manière significative l'efficacité du cycle.

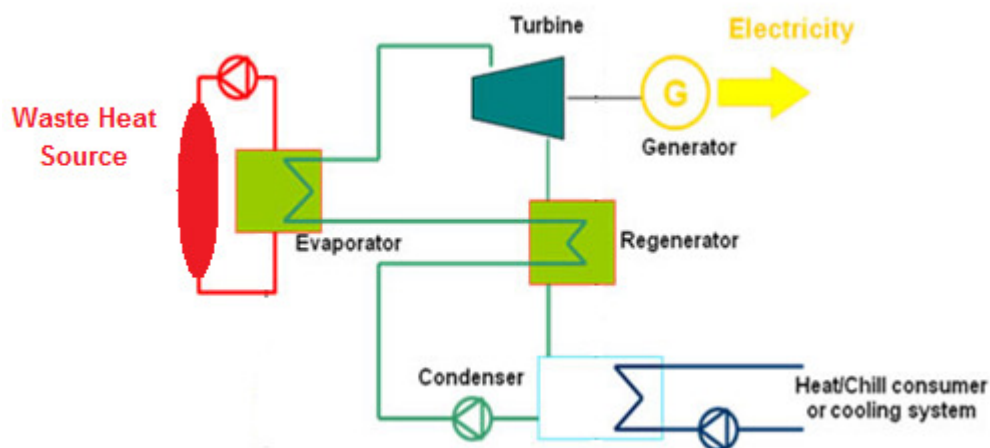


Figure 1' : Schéma du principe de fonctionnement d'un cycle organique de Rankine avec Régénérateur

Comme expliqué précédemment, la différence entre les cycles classiques de Rankine (vapeur d'eau) et les cycles organiques de Rankine réside dans le choix du fluide de travail : dans les ORC, l'eau est remplacée par un fluide organique, ce qui permet d'améliorer le rendement du cycle (nous reviendront par la suite sur les avantages et inconvénients de l'utilisation des différents fluides pour les ORC). Le panel de fluides organiques potentiellement utilisables dans un module ORC est très large et permet de s'adapter au

mieux à la température de la source chaude tout en garantissant des risques très faibles de toxicologie et des nuisances pour l'environnement.

Les fluides utilisés par les principaux constructeurs sont :

- Des réfrigérants (comme le R245fa) qui sont utilisés pour les sources basse température.

- Des hydrocarbures qui permettent de valoriser des sources à température moyenne.

- Enfin pour les sources chaudes avec des températures plus élevées on utilise une catégorie de fluides appelés « siloxanes » (chaînes d'atomes de carbone avec des atomes de silicium) ou certains composés organiques de la famille des alkyl-benzène.

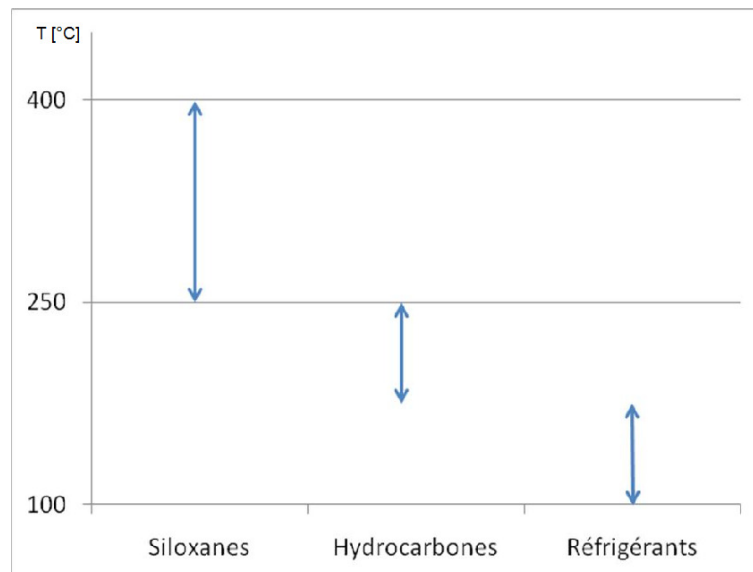


Figure 2 : Domaine de température d'utilisations des fluides pour les ORC

On peut voir sur la figure suivante les différents fluides utilisés pour l'utilisation des ORC pour des sources à basses températures. Cette figure représente les différentes efficacités obtenues avec les différents fluides réfrigérants en fonction de la température de la source :

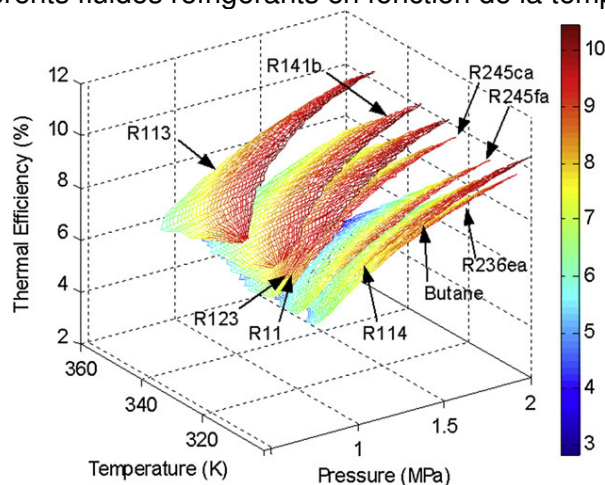


Figure 3 : Efficacité de différents fluides utilisés pour des ORC en fonction de la température et de la pression

On peut voir que chaque fluide possède une efficacité optimale à une température donnée et qu'il est donc nécessaire d'adapter le fluide contenu dans l'ORC en fonction du niveau de température de la source chaude.

Les fluides utilisés, notamment les nouveaux réfrigérants comme le R245fa présentent une ODP nul (Ozone Depletion Potential), puisqu'il ne contiennent pas de chlore. De plus, ininflammables ils garantissent des bonnes conditions de sécurité.

La puissance électrique générée par le module ORC varie en fonction des conditions des sources chaudes et froides auxquelles il est accouplé. Dans le tableau suivant sont

reportées 3 exemples de prestations du module PureCycle® de PWPS (fabricant présenté dans le chapitre 5) :

Données De Performance / Cas	2		3		4	
SOURCE CHAUDE (Evaporateur)						
Température de l'eau en entrée (°C)	138	138	116	116	93	93
Température de l'eau en sortie (+/- 5 °C)	77	85	78	90	78	78
Débit (L/s) (+ / - 10 %)	11	14	21	31	66	66
Matériel	Acier carboné		Acier carboné		Acier carboné	
EAU DE REFROIDISSEMENT (Condenseur)						
Température de l'eau en entrée (°C)	16	27	16	27	16	27
Température de l'eau en sortie (°C)	26	37	26	37	26	37
Débit (L/s)	56	63	69	70	88	90
Matériel	Cuivre		Cuivre		Cuivre	
PRODUCTION ELECTRIQUE						
Production Electrique Brute (kW) (+ / - 10 %)	272	272	272	272	272	200
Production Electrique Nette (kW) (+ / - 10%)	252	252	257	257	257	186
Voltage (V) /Fréquence (Hz)	400 / 50		400 / 50		400 / 50	

Tableau 1 : Performances des modules PureCycle® 280 de PWPS

On voit donc que l'on peut produire autant d'électricité avec différentes températures de source de chaleur mais que plus la température d'alimentation est basse est plus le débit de celle-ci doit être fort, on remarque ainsi un facteur 6 sur le débit de la source chaude pour des températures passant de 138°C à 93°C. De même pour les débits de refroidissement. Maintenant, nous allons comparer deux installations de deux différents fabricants (Turboden et PWPS) ayant des températures d'alimentation différentes et observer les puissances nettes de production électrique, les rendements associés ainsi que l'investissement et les temps de retour sur investissement :

	Unité de mesure	Pure Cycle
INPUT - HUILE THERMIQUE	-	Huile Thermique
Température nominale circuit haute température (entrée/sortie)	°C	130 / 74,5
Puissance thermique totale	kW	2272
OUTPUT - EAU DE REFROIDISSEMENT	-	Eau chaude
Température eau (entrée/sortie)	°C	24 / 31
Puissance thermique de l'eau	kW	2035
PERFORMANCES	-	
Puissance électrique active brute	kW	195
Puissance électrique active nette	kW	180
Puissance électrique utile*	kW	15
Rendement Electrique brut	%	8,6
PRIX (Montage Exclus)	\$	550.000,00

	Unité de mesure	Turboden 6 HR
INPUT - HUILE THERMIQUE	-	Huile Thermique
Température nominale circuit haute température (entrée/sortie)	°C	234 / 148
Puissance thermique totale	kW	2273
OUTPUT - EAU DE REFROIDISSEMENT	-	Eau chaude
Température eau (entrée/sortie)	°C	24 / 31
Puissance thermique de l'eau	kW	1789
PERFORMANCES	-	
Puissance électrique active brute	kW	460
Puissance électrique active nette	kW	443
Puissance électrique utile*	kW	18
Rendement Electrique brut	%	20,3
Générateur Electrique	-	asynchrone, triphase, 400 V, 710 kW
PRIX (Montage Exclus)	€	1.025.000,00

Tableau 1 : Comparaison des performances de 2 modules ORC différents

On voit donc que les températures d'alimentation sont différentes, mais néanmoins nous allons pouvoir comparer ces deux systèmes car les puissances thermiques d'alimentation sont égales. Les températures de refroidissement sont aussi égales. On voit donc que, pour une même puissance thermique en alimentation, le module PureCycle® demande un investissement nettement inférieur que celui de Turboden (facteur 2). Néanmoins, au regard

des puissances électriques nettes produites, ce facteur 2 se retrouve inversé. Ainsi, le module Tuurboden produira 443 kW avec un rendement électrique brut de 20.3% tandis que le module PureCycle® ne produira lui que 180 kW avec un rendement électrique de 8.6%. Le rendement électrique nette baisse légèrement est sera de 19.5% pour le module Turboden et de 7.9% pour le module Purecycle.

Outre les gains en rendement, s'il on compare le ratio investissement sur la puissance électrique nette fournit, on peut ainsi obtenir un ratio du prix par KW installé. Pour le module Turboden ce ratio est de 2313,8 €/kW tandis que pour le module PureCycle il est de 3055€/kW.

On peut ainsi en conclure qu'avec des mêmes durée de fonctionnement de 3500h par an, le module Purecycle produira 630 MWh électrique et le module Turboden produira lui 1550 MWh électrique. Cette différence est certes la même que la différence entre les puissances électriques brutes, mais avec des prix moyen de revente de l'électricité de 7c€/kWh (sans compter la prime d'efficacité énergétique), le bénéfice de revente de cette électricité rapportera 44 100 €/an pour le module Purecycle et 108500 €/an pour Turboden. Nous pouvons donc voir que le temps de retour sur investissement calculé juste sur la production d'électricité (donc sans compter la production de chaleur) serait de 12 ans pour le module PureCycle et de 9 ans pour le module Turboden.

Sur la figure 4 suivante on peut voir l'illustration d'un module ORC muni d'un récupérateur, ainsi qu'une photo d'un module ORC monté sur site (cf. Figure 4'):

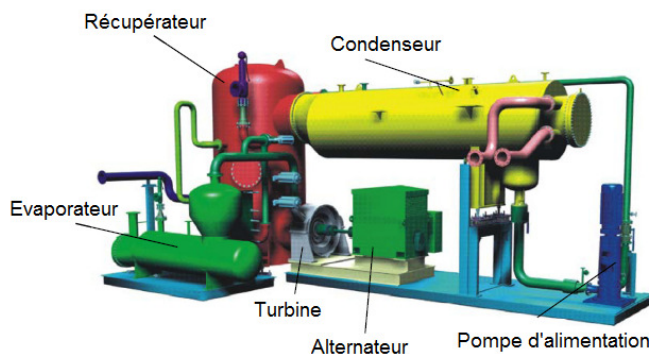


Figure 4 : Vue d'ensemble d'un module ORC muni d'un récupérateur



Figure 4' : Photo d'un module ORC

Le récupérateur, comme précédemment dit, permet d'augmenter significativement l'efficacité et donc les performances d'un cycle ORC. Voici sur la figure 5 suivante, la représentation d'un ORC sur un diagramme T-s (Température-Entropie) muni d'un récupérateur:

L'étape 0-1 représente le travail de la pompe, les étapes de 1-4 décrivent le travail de l'évaporateur (3-4 surchauffe), le passage de 4 à 5 représente le travail de la turbine et l'étape 5 à 6 celui du récupérateur. L'étape de 6 à 0 est donc la phase de condensation.

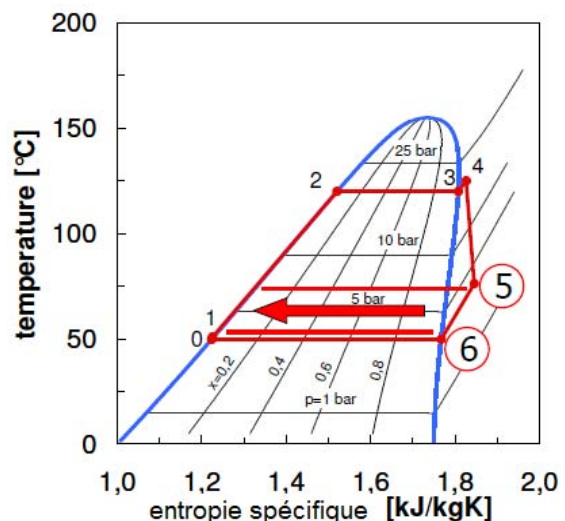


Figure 5 : Diagramme T-s d'un cycle ORC avec Récupérateur

2.2 Cycle de Rankine Supercritique (SRC)

Nous allons maintenant parler des cycles de Rankine supercritiques (SRC = Supercritical Rankine Cycle), c'est-à-dire utilisant un fluide à l'état hypercritique/supercritique. En effet, nous sommes habitués à utiliser des fluides à l'état liquide, solide ou gazeux. Cependant, dans certaines conditions de température et de pression, un autre état existe, l'état hypercritique ou supercritique. La figure 6 ci-dessous montre la présence de cet état dans un diagramme P-T (Pression – Température) :

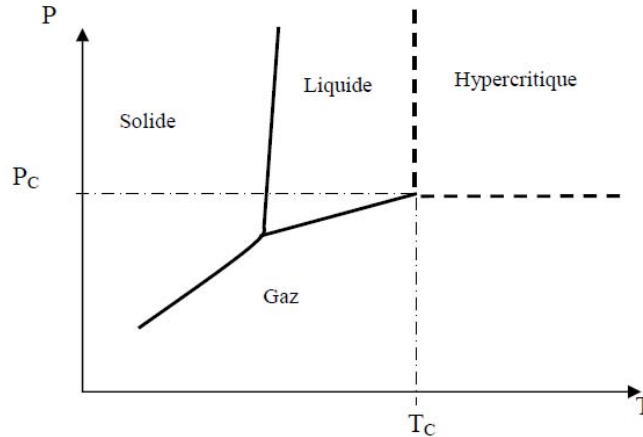


Figure 6 : Diagramme d'état (P-T)

L'idée d'un cycle supercritique est de franchir cet état, et d'utiliser les propriétés particulières du fluide dans cet état. Ainsi, il n'y aura plus dans notre cycle la présence du palier d'évaporation, mais le cycle se décrira comme suit (la numérotation se réfère à la figure 7) :

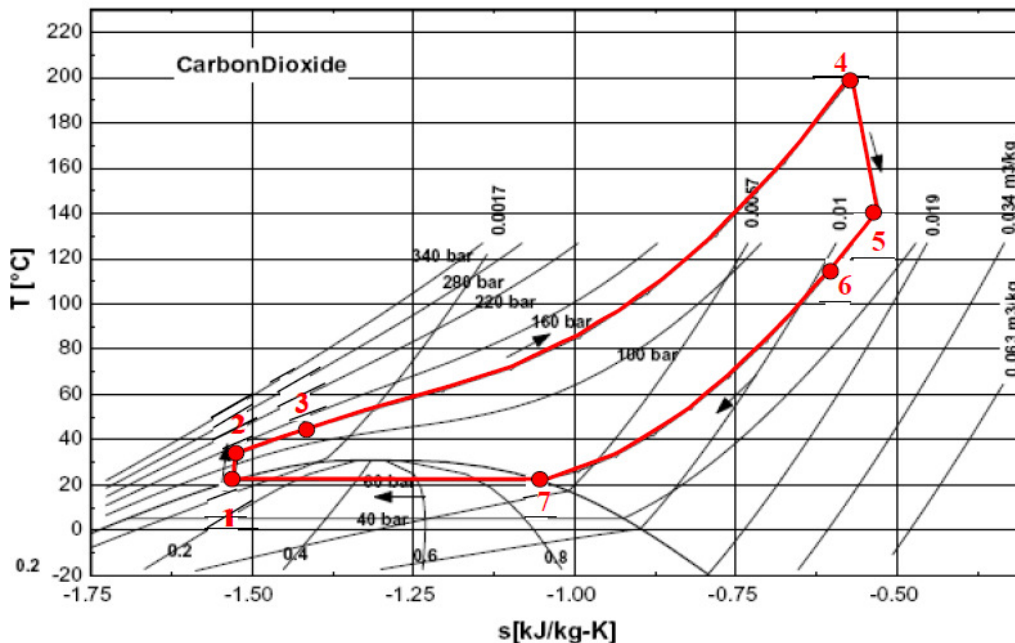
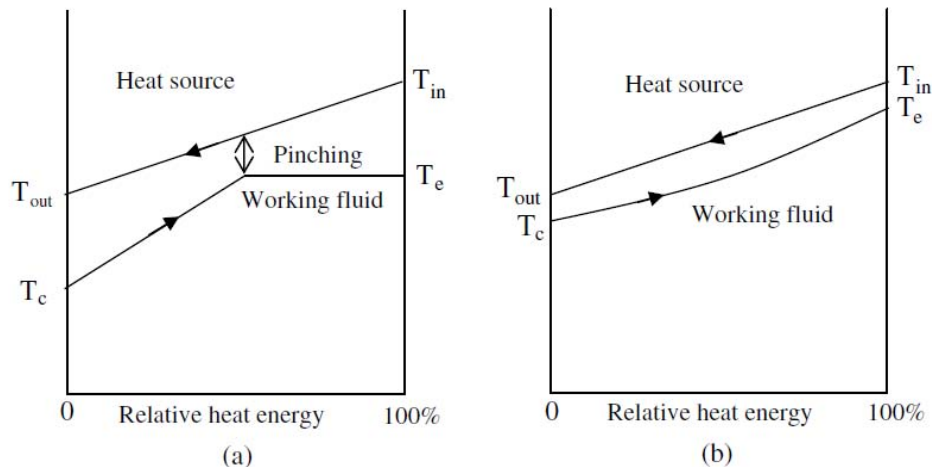


Figure 7 : Diagramme T-s d'un cycle de Rankine Transcritique avec du CO₂

- Un fluide, à l'état liquide, est comprimé, à une pression supérieure à sa pression critique P_c (point 1 à 2).
- Ce fluide comprimé est alors chauffé jusqu'à une température supérieure elle aussi à la température critique T_c (point 2 à 4).
- Ce fluide hypercritique est alors détendu au travers d'une turbine fournissant de ce fait un travail, une énergie mécanique en sortie d'arbre (point 4 à 5).
- Ce fluide détendu est refroidi pour retrouver son état initial (point 5 à 1). Il y a alors une phase de condensation (point 7 à 1).

On sait aussi qu'afin de garantir une plus grande efficacité possible du cycle de Rankine il est nécessaire de disposer d'échangeurs performants et ayant donc une efficacité maximum, afin de récupérer au mieux la chaleur issue des rejets thermiques par exemple. On peut donc voir, contrairement à un cycle de Rankine classique, que le profil de température du fluide de travail (CO₂ à l'état hypercritique) peut ici suivre la même évolution que la source chaude car l'état hypercritique apporte une continuité et une homogénéité de phase : il n'y a plus d'évaporation.

La figure 8 ci-après montre, en fonction du pourcentage d'énergie transféré, les profils de température. On y voit l'absence de température de pincement ("pinching »).



*Figure 8 : Evolution des températures au sein de l'échangeur principal suivant le fluide utilisé :
(a) : fluide organique, (b) : CO₂ hypercritique*

La qualité de cet échange est essentielle, car c'est de lui qu'en découle la production globale d'énergie de notre système. En effet, le rendement thermodynamique du système n'est rien s'il n'est pas associé à un rendement d'échangeur thermique lui aussi important. L'objectif final est, rappelons-le, la production d'électricité la plus importante possible. De plus, la densité d'un fluide hypercritique, tel que le dioxyde de carbone, permet un échange de très bonne qualité ainsi qu'une réduction de l'encombrement de l'échangeur.

Un problème existant dans les cycles de Rankine est le problème de cavitation au niveau de la turbine de détente (cf. Chapitre 2). Or, avec un SRC, le fluide qui se détend reste dans une phase homogène. Ainsi, aucune goutte ne se crée, et le problème de cavitation est ainsi évité sans qu'il y ait besoin de surchauffe. De plus, en ce qui concerne la turbine, il est annoncé dans la littérature qu'une forte réduction de la taille des installations est envisageable en cas d'utilisation du CO₂ hypercritique.

Malgré les avantages que présente le cycle supercritique, il reste quelques points qui ne sont pas en sa faveur :

- Le rendement de la turbine à cumuler au rendement thermodynamique : on estime à environ 70% le rendement d'une turbine pour ce type d'application.
- Le rendement du compresseur : on estime à 80% le rendement d'un compresseur pour dioxyde de carbone hypercritique. Rappelons que ce compresseur devra être capable de monter à des pressions avoisinant les 130-160 bars.

A l'heure actuelle, les cycles de Rankine supercritique sont un sujet prisé de recherche et plusieurs publications (cf. Chapitre 7 : Bibliographie) font l'objet de cette amélioration technologique pour les cycles de Rankine.

Dans le chapitre suivant nous allons énumérer les principaux avantages et inconvénients des cycles ORC.

3. Avantages et Inconvénients

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les ORC sont donc des cycles de Rankine (plus communément appelé cycle à vapeur) où l'eau a été remplacée par des fluides organiques. On peut tout d'abord expliquer l'intérêt du remplacement de l'eau par des fluides organiques, sachant en plus que l'eau est abondante et peu chère (par rapport aux fluides organiques). De plus, elle ne cause aucuns risques pour l'Homme et pour l'environnement et est largement utilisée depuis le 18^{ème} siècle pour de nombreuses applications liées aux cycles thermodynamiques.

Néanmoins, avec l'eau il est nécessaire de posséder une source chaude à plus de 400°C pour obtenir une efficacité de cycle économiquement rentable. De plus, un fonctionnement à des pressions supérieures à 40 bars oblige à une surveillance permanente et à des normes très contraignantes. L'eau doit aussi être la plus saine possible et la mise en place de système de déminéralisation est aussi dispendieuse. Ces coûts fixes empêchent la réalisation des installations de petites tailles.

On doit noter un fort désavantage à utiliser l'eau dans les cycles de Rankine notamment pour l'usure de la turbine en fin de détente avec la présence d'eau. Ce dernier point est particulièrement important lorsque l'on compare cycle ORC et cycle à vapeur. L'eau est un fluide dit **mouillant** et lorsqu'on détend la vapeur d'eau dans la turbine, des gouttes de liquide peuvent apparaitre et endommager les pales des turbines, c'est l'effet bien connu de la cavitation (cf. Figure 9).



Figure 9 : Photo d'une turbine ayant subi un endommagement sur ses pales par un phénomène de cavitation

Pour résoudre ce problème, Hirn a proposé de surchauffer la vapeur, ce qui permet une détente ne présentant aucune condensation, néanmoins cette surchauffe de la vapeur a un cout en chaleur et diminue donc le rendement globale du cycle.

Au contraire, les fluides organiques utilisés dans les cycles ORC sont des fluides dits **séchant**, c'est-à-dire que la détente dans la turbine se fait en permanence à l'état de vapeur et il n'y a donc pas de présence de bulle de liquide qui peuvent engendrer les phénomènes de cavitation. Ceci permet d'augmenter la durée de vie des turbines et de ce fait diminuer les coûts d'exploitation et de maintenance.

Le net avantage de cette technologie ORC, rappelons-le, est de permettre la production d'électricité à partir d'une source de chaleur à basse température (à partir de 70°C). En fonction de la température de la source chaude, il est également possible de faire de la cogénération (production combinée d'électricité et de chaleur). Les rendements thermodynamiques des ORC se situent en général entre 8% et 20%.

Les modules ORC permettent une production décentralisée grâce à leur puissance relativement faible, entre 100kW et 2,5MW. Les modules ORC sont **compacts**, autonomes, l'exploitation et la maintenance sont légères et possèdent une durée de vie supérieure à 20 ans. Les cycles organiques de Rankine sont donc **matures** est largement utilisés.

Aujourd'hui, il existe plus de 400 sites opérationnels d'ORC à travers le monde pour une puissance installée supérieure à 1,5GW. A ceux-ci il convient de rajouter un grand nombre de références en cours d'installation. Leur nombre et la puissance globale installée sont en augmentation continue depuis plus de 20 ans et plus fortement depuis les années 2000.

4. Les applications des ORC/exemples de réalisations

En principe, chaque flux de chaleur dont la température est considérablement plus élevée que celle de l'environnement entre en ligne de compte pour la réalisation d'un ORC. Les possibilités d'applications sont donc très nombreuses.

Néanmoins, en s'intéressant de plus près aux différentes installations des ORC, on le constatera par ailleurs dans les chapitres suivants de cette fiche, le plus grand nombre de machines installées est majoritairement à destination d'applications pour la biomasse et la géothermie. Les applications liées à la récupération de chaleur sont donc minoritaire. On notera aussi quelques installations pour les applications du solaire thermique mais avec très peu de référence. En revanche, s'il on résonne en terme de puissance installée, les applications exploitant le potentiel géothermique deviennent cette fois prépondérantes.

Les références ORC sont principalement situées dans 4 pays : l'Allemagne, l'Autriche, l'Italie et les USA (on pourra aussi le constater dans le chapitre 4). Pour les 3 premiers pays, ceci est principalement dû à une volonté politique de développer le marché des petites centrales biomasses grâce à l'octroi de tarifs attractifs de rachat de l'électricité.

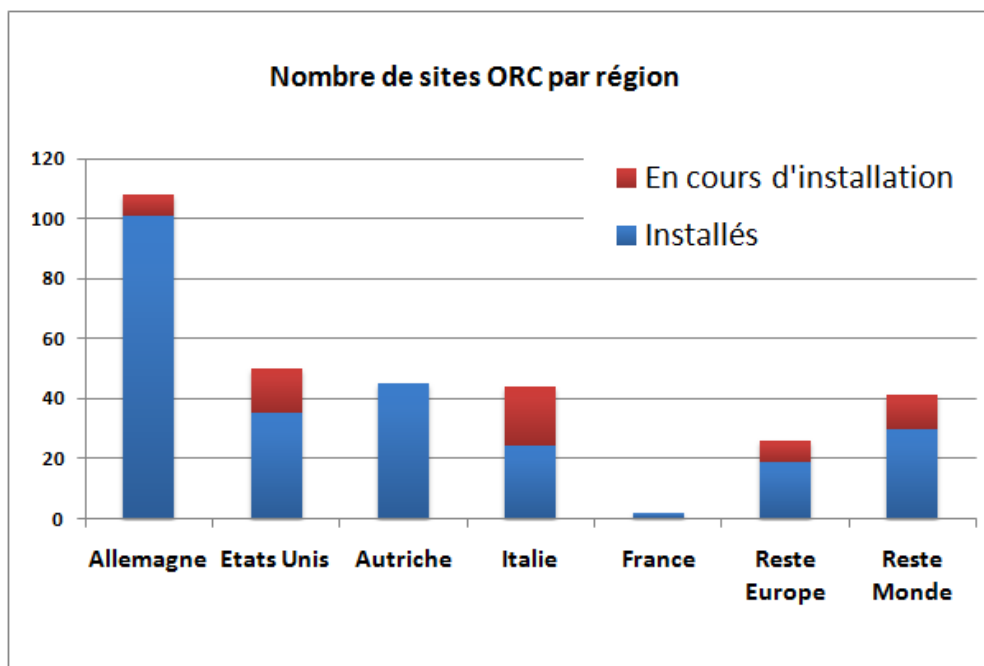


Figure 10 : Répartition des Installations ORC par pays

Les USA profitent eux de nombreuses sources géothermiques à basse température qui ne pouvaient pas être valorisées jusqu'à présent par des cycles vapeur classiques et pour lesquelles la technologie ORC est très intéressante. On peut voir (cf. Figure 10) que la France est considérablement en retard par rapport à ses voisins Allemand, Italien et Autrichien. Il existe à l'évidence un véritable marché à prendre sur ce secteur de développement.

Comme dit précédemment, le rendement thermodynamique d'un ORC se situe entre 8% et 20%, la température de la source de chaleur est ce qui importe le plus. Au sein de l'industrie, on trouve des sources de chaleur appropriées pour toutes sortes de fours (la production du

ciment, de papier et d'acier...etc.), post-brûleurs de solvants, gaz résiduels pour lesquels on utilise actuellement la combustion en torchère,...etc. Un ORC est aussi en mesure de valoriser des gaz d'échappement de moteurs.

Si le combustible est du biogaz ou du gaz de décharge, l'ORC produit du courant vert, pour lequel on peut obtenir des certificats verts. Pour des chaudières de biomasse, un ORC produisant du courant vert peut également être intégré.

De l'énergie solaire thermique peut déjà être convertie en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Néanmoins, celles-ci sont onéreuses, si bien que l'ORC peut, dans ce cas aussi, apporter une alternative moins coûteuse. La chaleur solaire du collecteur est cédée dans un échangeur au fluide à surchauffer. Cette technologie est principalement référencée en Australie.

La technologie OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) utilise la différence de température entre de l'eau en grande profondeur (environ 6°C) et de l'eau de surface (environ 28°C) dans des océans tropicaux pour alimenter un ORC. Les rendements sont plutôt faibles, à cause du faible écart de température, mais en revanche, il y a d'énormes quantités de chaleur disponibles. Des prototypes de diverses puissances ont été réalisés ou sont envisagés, notamment à Hawaï et à Tahiti. Dans tous les cas, la nécessité de véhiculer de très grands débits et de pomper l'eau froide à très grande profondeur induit une consommation d'énergie importante par les équipements auxiliaires. Cette application montre les limites actuelles de ce qui est techniquement réalisable.

Dans la suite de ce document et dans le souci de se concentrer essentiellement sur le scope de l'étude, nous vous présentons plus précisément quelques exemples de réalisations de modules ORC pour des applications de récupération de chaleur de rejets industriels.

Par l'intégration d'un ORC aux installations de cogénération plus anciennes (d'avant 2002), ces dernières peuvent parfois obtenir le statut d'installation "renouvelée" et permettre à nouveau l'octroi d'un certificat. Pour cela, quelques ORC appropriés se trouvent déjà sur le marché, par exemple le module de Tri-O-Gen (cf. Figure 11) :

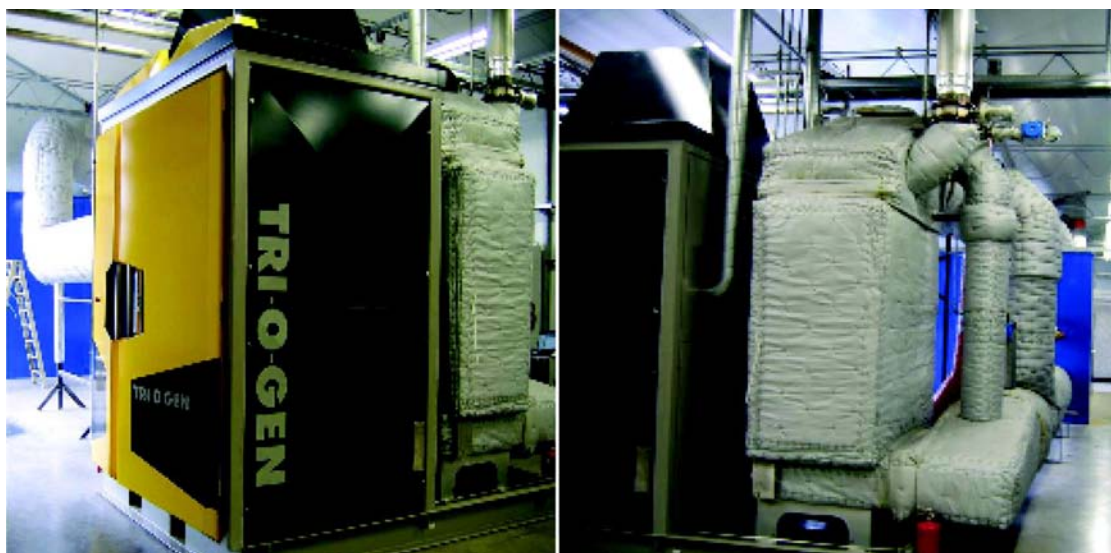


Figure 11 : ORC de 165 KWe de Tri-O-Gen sur la chaleur de l'échappement d'un moteur à gaz de 2 MWe dans l'entreprise d'un rosieriste "Olij" à De Kwakel, Pays-Bas

Un autre exemple, au printemps 2008, le tout premier ORC a été mis en service en Belgique. Des excédents du réseau de chaleur (180°C) de l'incinérateur de déchets de MIROM (Roeselare/ Roulers) alimentent l'installation de 2,5 MWe (cf. Figure 12) :



Figure 12 : Installation ORC de 2,5 MWe de TURBODEN sur des excédents du réseau de chaleur de l'incinérateur de déchets MIROM, Roeselare (Roulers)

Cette installation permet de produire 2,5MW électrique avec une source de chaleur d'eau chaude sous pression à 180°C (retour à 140°C) et la source froide est assurée par de l'eau et de l'air. Cette installation devrait atteindre une efficacité d'environ 16,5% (prévision TURBODEN).

On peut aussi citer l'exemple de Nant-de-Châtillon (GE, Suisse) où sont déjà installés 2 modules ORC (appelé par la suite ORC-1 et ORC-2) sur le site de méthanisation pour la valorisation des rejets thermiques provenant de moteurs de cogénération à biogaz (cf. figure 13). Le premier module ORC-1 est équipé avec une seule turbine scroll (dispositif décrit dans le chapitre suivant) tandis que l'autre module (ORC-2) est équipé avec 2. Les modules ORC fonctionnent avec le réfrigérant R134a.

La puissance électrique totale installée est de 21 kW (7 kW pour l'unité ORC-1 et 14 kW pour l'unité ORC-2). L'efficacité mesurée pour cette installation est d'environ 7% pour des rejets de chaleur des moteurs d'environ 100°C (atteignant 90-95°C dans certains cas). On peut tout de même noter que pour une valeur de température de 95°C, l'efficacité théorique maximum (correspondant évidemment au cycle de Carnot) est de 17%. Le rendement exergetique (prenant en compte les niveaux de température des sources) est d'environ 40%. On peut aussi remarquer qu'une amélioration de ces rendements pourrait être réalisée grâce à la diminution de la pression de condensation à 6 bars au lieu de 8 bars actuellement utilisée à cause du sous-dimensionnement du condenseur. On peut ainsi constater l'importance du bon dimensionnement des échangeurs de chaleur dans une installation ORC, on reviendra sur ce point dans le chapitre réservé aux axes de recherche.

Au final, il résulte tout de même que cette installation nécessite une présence humaine afin de palier d'éventuels problèmes de gel (et donc des problèmes du refroidissement), d'arrêts intempestifs et de sécurité des modules ORC.



Figure 13 : Installation à l'usine de Nant-de-Chatillon (Genève)

Cette dernière installation (cf. Figure 13) à été mise en place par l'entreprise ENEFTECH qui commercialise un système de récupération de rejets thermiques basé sur un cycle ORC. Ce produit, ainsi que l'entreprise ENEFTECH vous seront présentés dans le chapitre suivant qui a pour but de répertorier les principaux constructeurs de modules ORC.

4.1 Les turbines Scroll intégrés dans les systèmes ORC



Une des technologies de valorisation des énergies à bas niveaux de température consiste en l'utilisation de turbines scroll au sein d'un mini système ORC. Ce couplage entre un ORC et turbine scroll pouvant fonctionner à partir de sources thermiques à basse température entre 120 et 200 °C.

4.1.1 Principes de fonctionnement

Les turbines Scroll sont des unités converties à partir de compresseurs en spirale de type scroll, très répandus sur le marché. Les systèmes Scroll sont reconnus pour leur efficacité et leur robustesse, et ceci pour des applications diverses telles que la ventilation ou la réfrigération. Leurs constitution est simple avec peu d'éléments, ce qui garantit un coût faible et de grande fiabilité. De plus, la machine Scroll produit de très faible vibration mécanique (bruit faible) et possède un processus de détente quasi-continu avec un excellent rendement volumétrique.

La figure 14 montre les éléments constituant l'unité hermétique de turbine scroll. Soit une chambre d'expansion volumétrique délimitée par deux volutes d'un scroll fixe supérieur et d'un scroll mobile inférieur, l'ensemble est positionné avec un déphasage de 180° de manière à former une série successive de sous-chambres d'expansion séparées

Le scroll mobile est monté sur un arbre moteur comportant un système de palier excentrique et un accouplement particulier (bague/joint de Oldham = permet de compenser un défaut d'alignement de 2 axes tout en assurant un mouvement homocinétique) permettant de réaliser un mouvement orbital par rapport au scroll fixe, et ceci par un simple mouvement de rotation de l'arbre.

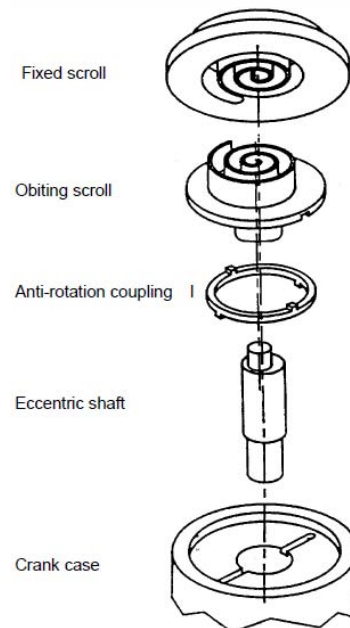


Figure 14 : vue éclatée d'une turbine Scroll

Le mouvement orbital du scroll mobile entraîne une augmentation du volume de ces chambres qui se déplacent du centre vers la périphérie (cf. figure 15). Ainsi, durant l'expansion, du gaz réfrigérant à haute pression est introduit au centre de l'unité en formant une poche centrale de gaz (position 1).

Ce gaz, évoluant progressivement vers la périphérie (position 1 à 8), atteint sa pression de décharge et s'échappe au niveau des flancs périphériques (position 8 à 1).

Un alternateur électrique de type asynchrone est couplé à l'arbre moteur et l'ensemble est isolé de l'atmosphère par une enveloppe formant ainsi l'unité hermétique.

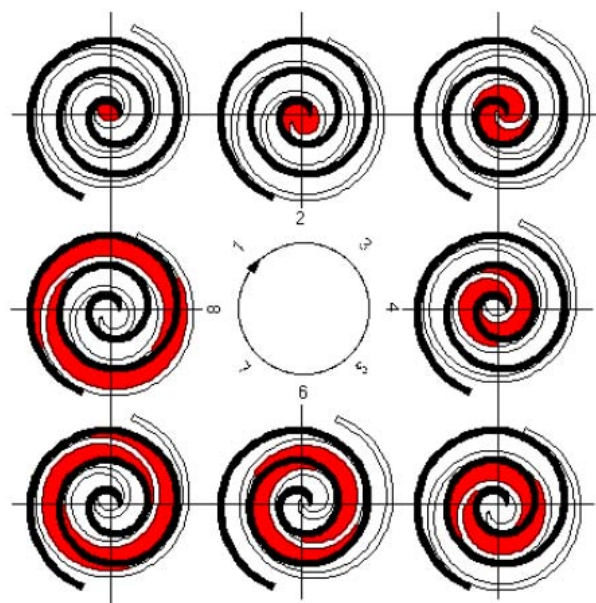


Figure 15 : décomposition du principe de fonctionnement d'un compresseur scroll

Nous noterons aussi le développement de turbines scroll de nouvelles générations (High Tech Scroll Turbine) développées par certains fabricants (notamment Eneftech). Ces turbines de nouvelle génération (actuellement en développement) sont des turbines spirales à haut rapport de volume installé et travaillant avec des températures d'entrée de l'ordre de 200°C .

Les caractéristiques de ses nouvelles générations de turbine scroll sont choisies pour répondre aux besoins des nombreuses applications à faible puissance (1-5 kWe) où une réduction des coûts des composants auxiliaires (électronique, pompes, ...) est nécessaire, de même qu'une densité de puissance plus importante. En voici les conditions d'utilisations :

Conditions d'utilisation:

- Température d'entrée maximale: 200 °C
- Vitesse de rotation : 1500 - 6000 t/min
- Puissance électrique maximale : 5 kW
- Différentes configurations de la machine lui permettront d'être opérationnelle en mono-étagé ou bi-étagé, ainsi qu'avec différents fluides réfrigérants.

5. Principaux constructeurs

Du fait que cette technologie connaît un réel regain d'intérêt depuis quelques années, le nombre de constructeurs de machines à cycle ORC a donc considérablement augmenté mais on peut distinguer quelques leaders sur les différents marchés mondiaux. Nous citerons donc les principaux constructeurs :

ORMAT, TURBODEN, P&W PS (Pratt & Whitney Power System) et GMK font partie des plus gros constructeurs mondiaux de machine à cycles ORC. Les autres entreprises comme Tri-O-Gen (Pays-Bas), ENEX (Islande) ou GE/Calnetix (USA) ont eux moins de références.

Nous pourrions aussi citer l'entreprise ENEFTECH ainsi que le bureau d'ingénierie ENERTIME qui réalise des études d'installation de modules ORC pour des puissances inférieures à 2 MW.

5.1 ORMAT

ORMAT est une société israélienne elle probablement la première à s'être lancée sur le marché des Cycles Organiques de Rankine il y a plus de 40 ans (1965). Elle commercialise depuis plus de 20 ans des modules pour des applications géothermiques et de récupération de chaleur.

Elle commercialise des modules appelés OEC (pour Ormat® Energy Converter) de 250kW à 20MW.

ORMAT a installé à ce jour plus de 1200MW à travers le monde. Cette Société peut fournir des équipements ou une centrale clé en main et être l'exploitant de la centrale en rachetant la chaleur potentiellement valorisable. En effet, ORMAT semble tendre depuis plusieurs années vers le développement et l'exploitation de centrales ORC pour son propre compte.

Sur la figure 16 suivante, on peut voir que les projets sont principalement situés en Amérique du Nord mais ORMAT possède aussi des références en Asie (Japon, Inde, Philippines) et en Afrique (Kenya) pour des applications géothermiques.



Figure 16 : Installations ORC réalisées par ORMAT

Ces installations ont une puissance élevée (généralement supérieure à 10MWe). L'installation la plus puissante atteint 130MWe sur une source géothermique implantée aux Philippines.

Nous pourrions constater par la suite que la puissance totale installée par ce constructeur est donc très largement supérieure à celle de ces concurrents, malgré un nombre de sites moins important que le constructeur TURBODEN, l'un de ces principaux concurrents.

5.2 TURBODEN

TURBODEN, constructeur italien, développe des modules ORC depuis 1980 et les commercialise depuis 1992. Il est aujourd'hui le leader sur le marché européen. Il propose des modules pour des applications de géothermie, biomasse et de récupération de chaleur.

Il possède environ 193 références essentiellement en Allemagne, en Autriche et en Italie comme on peut le voir sur la figure 15. Néanmoins, lorsque l'on s'intéresse uniquement aux installations réalisées pour des applications de récupérations de chaleur, on voit que le nombre d'installation concerné est beaucoup plus faible et représente moins de 10% (cf. figure 17 et 18) :

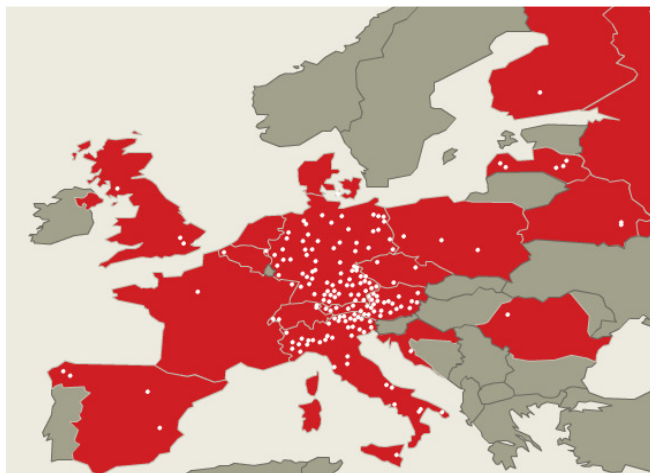


Figure 17 : Carte des installations réalisées par TURBODEN

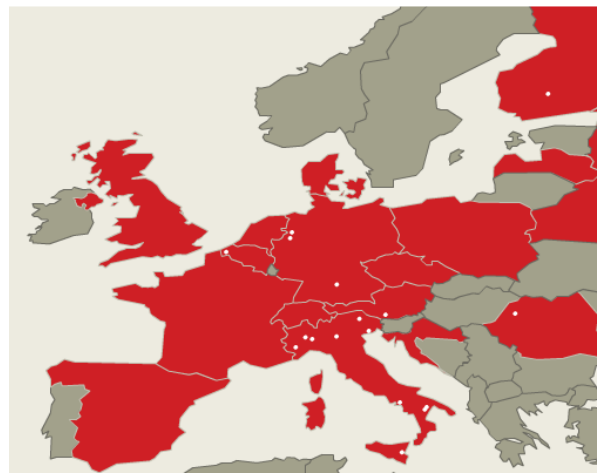


Figure 18 : Carte des installations pour la récupération de chaleur réalisées par TURBODEN

La puissance des modules ORC de ce constructeur s'échelonne de 400kW à 2,2MW pour des applications de biomasse, de récupération de chaleur mais aussi pour le solaire thermoélectrique. La grande majorité de ses références concerne des installations entre 700 et 1500 kWe. Comme dit précédemment, TURBODEN comptabilise plus de références que la société ORMAT mais la puissance totale installée est nettement inférieure (environ 210 MW). A noter que depuis 2009, TURBODEN fait partie du groupe UTC présenté dans le chapitre suivant.

5.3 P&W PS (Pratt & Whitney Power System) de UTC Power

UTC Power (United Technologies Company Power) est un groupe américain regroupant une dizaine de divisions. La branche P&W Power System regroupe les activités de piles à combustible, microturbines et modules ORC (commercialisé sous le nom PureCycle®).

P&W Power commercialise des modules ORC de 280 KW (pour des applications de 90°C à 350°C et des installations allant de 1MW à 7MW), elle compte de nombreuses références

aux Etats-Unis en géothermie basse température grâce à un partenariat avec le développeur de projet Raser qui a acquis en 2007 plus de 100 modules ORC.

Une des premières références de son module Pure Cycle® est celle de Chena Hot Springs en Alaska. Depuis 2006, 2 modules ORC sont installés et produisent de l'électricité à partir d'une source chaude à 70°C en profitant de la présence d'une source froide à 5°C.

En Juin 2009 P&W a acquis une part majoritaire dans le capital de TURBODEN dans le but de développer son activité en Europe et sur les applications haute température. Ce rachat confirme le potentiel de la technologie ORC.

5.4 GMK

GMK est une entreprise allemande commercialisant des modules ORC essentiellement pour des applications Biomasse (Bois). La société GMK compte à son actif 10 installations en Allemagne dont 2 utilisant des rejets industriels de chaleurs (à ESSEN et à ZEHNA). Les modules ORC de GMK fonctionnent à partir d'une source chaude à 350°C mais peuvent être utilisés avec des sources chaudes allant jusqu'à à 300°C en réalité. La gamme de puissance proposée s'échelonne de 500kW à 15MW. La gamme des ORC pour des applications de récupération de chaleur s'appelle INDUCAL® elle inclue une version de 5MWe.

5.5 ENEFTECH

Eneftech, crée en 2004 en Suisse, conçoit, réalise et commercialise des systèmes de micro-cogénération appelés ENFCOGEN® utilisant des énergies renouvelables pour des applications comme la valorisation de chaleur fatale basse température (rejets thermiques, géothermie...etc.) en s'appuyant sur les cycles organiques de Rankine et les micro-turbines (de type Scroll). La gamme ENFCOGEN® est composée de modules de 10kWe à 30kWe. Sur la figure suivante on peut voir l'intégration de leur système dans un process ayant des rejets thermiques entre 120°C et 160°C :

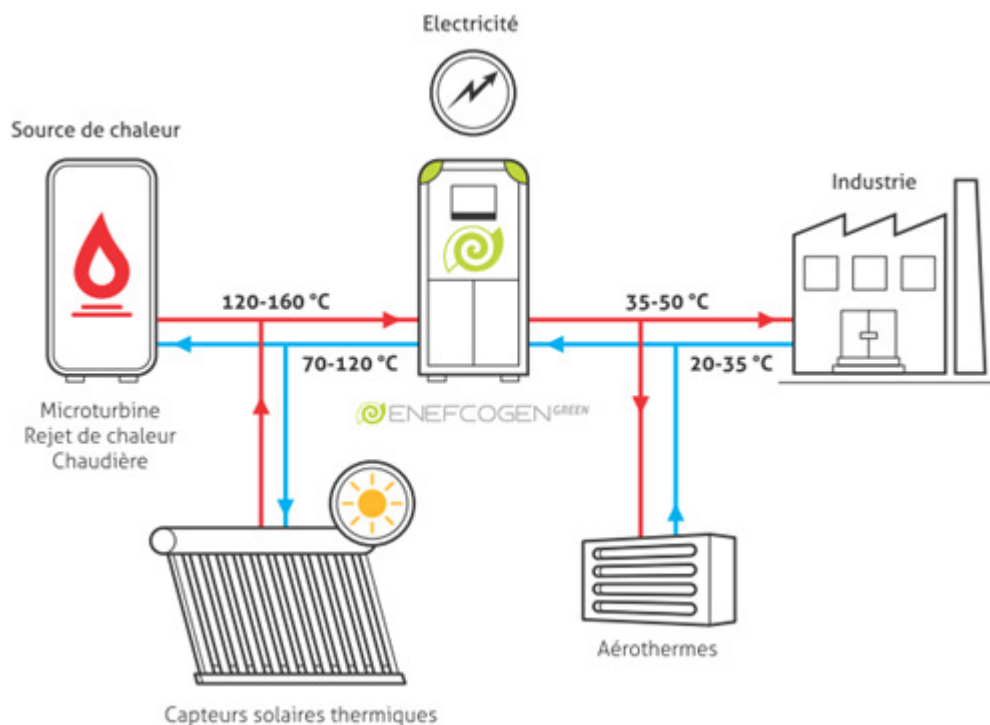


Figure 19 : Exemples d'applications du produit ENFCOGEN® de la société Eneftech

Ce système peut donc assurer la production d'électricité mais aussi de chaleur. Les résidus thermiques à basse température résultant du fonctionnement d'une unité d'Enefttech peuvent aussi être valorisés et donc utilisés, par exemple pour le chauffage de locaux.

5.6 ENERTIME

Le bureau d'étude ENERTIME réalise des études de faisabilité pour des partenaires institutionnels ou privés pour des applications ORC, en particulier dans le domaine de la récupération de chaleur industrielle. Une étude a ainsi été menée avec le soutien de l'ADEME pour étudier les applications de chaleur dans l'industrie sidérurgique. L'entreprise développe aussi des projets pour des investisseurs ou des municipalités pour des applications de valorisation de biomasse et solaire thermoélectrique dans le sud de la France et la côte méditerranéenne. ENERTIME travaille depuis sa création avec des partenaires académiques français et européens pour étudier la technologie des ORC et en particulier des applications innovantes comme la production d'électricité pour les réseaux isolés. On pourra aussi noter des partenariats avec différents organismes reconnus, comme le laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège, le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ENSAM et l'Université d'Athènes mais aussi, et ceci grâce à ses activités de R&D, un soutien financier de la part de OSEO.

6. Recherche et développement

La recherche dans le but d'obtenir de meilleures performances est constante de ce domaine qui est ancien par le concept mais relativement récent par les applications. Parmi les axes de recherche on notera bien sûr les recherches sur :

- l'amélioration des fluides organiques :

Le choix d'un fluide approprié est d'une importance capitale. Chaque fluide a une relation pression-température qui lui est propre. Ce n'est que si la température de la source de chaleur et la température de condensation souhaitée correspondent aux pressions réalisables que le fluide peut entrer en ligne de compte.

La pression de vapeur, la densité et le volume spécifique du fluide dans le condenseur et à l'entrée de la turbine sont déterminants pour la construction de l'installation. En effet, de grands volumes spécifiques impliquent de plus grands condenseurs et turbines et si, lors de l'expansion, il faut pallier une chute de pression très importante, on devra choisir des turbines multi-étages plus coûteuses (comme dans le cas de l'utilisation de vapeur).

En fonction de la forme de la courbe du diagramme entropique (diagramme de température-entropie (T-s)), des substances chimiques peuvent être cataloguées en trois catégories qui sont les suivantes :

- Les fluides mouillés qui sont plutôt indésirables, parce que, pour une raison déjà mentionnée, il faut les surchauffer.
- Les fluides secs ne présentent pas ce problème car après expansion le fluide reste surchauffé. Il y a donc libération de chaleur sensible lors du refroidissement jusqu'à la température de condensation. Ensuite, par le biais d'un échangeur de chaleur supplémentaire (récupérateur), le liquide peut après la pompe d'alimentation, être préchauffé. Néanmoins même avec un rendement amélioré, cela nécessite une installation trop coûteuse.
- Les fluides isotropes qui constituent la solution idéale. Il n'ont pas besoin d'être surchauffés et l'utilisation d'un récupérateur est superflue. Néanmoins, il y a peu de fluides appartenant à cette catégorie de sorte que, la plupart du temps, des fluides secs sont utilisés dans les ORC.

Un point important est de bien définir et de pouvoir réguler précisément les paramètres de l'installation (pression, température) pour rester dans le domaine le plus favorable des caractéristiques physiques/chimiques des fluides choisis.

D'autres caractéristiques sont également souhaitées: stabilité thermique élevée, temps de dégradation important, faible viscosité, non polluant et compatible avec les autres composants dans l'installation. Les aspects de sécurité, coût et disponibilité jouent également un rôle quant au choix du fluide.

Comme nous l'avons vu précédemment, les fluides les plus souvent utilisés sont les suivants : alcanes (isoptane), hydrocarbures aromatiques (toluène), hydrocarbures halogénés ou réfrigérants (R134a, R245fa), siloxanes (MDM, D4), perfluoropolyéthers et mélanges de deux composants ou plus (cf. Solkatherm). Les mélanges zéotropiques sont sans doute les plus intéressants parce que la température augmente durant le trajet d'évaporation, on peut ainsi maintenir une plus petite différence de température moyenne par rapport à la source de chaleur, ce qui engendre une augmentation du rendement thermique.

Dans cet axe là, plusieurs constructeurs et laboratoire déposent des brevets sur de nouveaux fluides permettant d'exploiter les rejets thermiques avec des températures encore plus basses et avec encore plus d'efficacité. On pourra trouver en bibliographie quelques publications faisant référence à ceux-ci. Par exemple, dans le cas d'utilisation comme fluide des mixtures zéotropiques comme des zéolithes, on parlera alors de cycle de Rankine supercritique (SRC). On utilise aussi les fluides à l'état supercritique comme le CO₂ (cf. Chapitre 1.2).

- l'amélioration des échanges thermiques :

En effet, par la présence de l'évaporateur, du condenseur et des régénérateurs dans les cycles ORC, les échangeurs thermiques sont une partie essentielle de ces modules. Il convient donc que ces échangeurs soient d'une efficacité remarquable afin de limiter les pertes de ces thermo-transformations. De nos jours, les recherches pour l'échangeur thermique s'orientent notamment vers la maîtrise de l'encrassement (détection, étude des cinétiques), la haute température avec la connaissance et la maîtrise de nouveaux matériaux, l'intensification des transferts thermiques via les microstructures, les nanomatériaux et nanoparticules, l'amélioration des surfaces d'échanges pour la compacité et l'efficacité...etc. Tous sont de vastes domaines porteurs d'espoir dans l'amélioration des performances de nombreux process. Néanmoins, le développement de l'axe de recherche sur l'encrassement est une priorité, notamment dans la récupération des déchets thermiques qui représente globalement une source non négligeable d'énergie perdue. Les fluides à traiter sont dans la plupart des fluides encrassants point souvent très dommageables pour les équipements. Il faudrait de ce fait que dans la stratégie de recherche amont, mais aussi dans la R&D appliquée et impliquée dans le développement industriel en général, ce point soit traité en priorité. C'est vraiment un point important qui concerne les évaporateurs dans les cycles ORC car ils permettent de valoriser un rejet d'effluent thermique encrassant dans la plupart des cas.

Le lecteur pourra se reporter à la fiche n°1 qui offre plus de détails sur les différents systèmes étudiés pour cet axe de recherche.

7. Conclusions

Sans conteste la technologie des modules ORC est en voie d'un grand développement elle est une des technologies les plus matures en ce qui concerne la production d'électricité via l'utilisation de rejets thermiques industriels. La multiplication des projets et donc des acteurs

dans ce milieu montre bien le potentiel de cette technologie. Par ailleurs, les axes de recherche dans ce sens sont prometteurs et pour l'heure encore au stade de développement en laboratoire, au mieux au stade de test préindustriels. Nous verrons sans doute dans un futur plus ou moins proche (suivant les priorités financières accordées aux différents axes de R&D) une amélioration des modules ORC via les fluides organiques qu'ils contiennent mais aussi par l'amélioration et l'intensification des échanges thermiques.

On notera tout de même le faible développement de cette technologie en France ce qui est inquiétant en regard de la situation actuelle de consommation énergétique mais qui est aussi une opportunité pour les entrepreneurs qui désirent se lancer sur ce marché.

8. Bibliographies

[1] **Huijuan Chen, D. Yogi Goswami, Muhammad M. Rahman, Elias K. Stefanakos** - A supercritical Rankine cycle using zeotropic mixture working fluids for the conversion of low-grade heat into power - *Energy* 36 (2011) 549-555

[2] **Evelyn Defoer, Sergei Gusev et Bruno Valambrouck** - De la chaleur résiduelle à l'électricité - 12/2008

[3] **Y. Chen, P. Lundqvist, A. Johansson, P. Platell** - A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic Rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery - *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 2142–2147.

[4] **Y. Chen** - Novel cycles using carbon dioxide as working fluid: new ways to utilize energy from low-grade heat sources, Thesis, KTH, 2006.

[5] **Y. Chen, P. Lundqvist, and P. Platell** - Theoretical research of carbon dioxide power cycle application in automobile industry to reduce vehicle's fuel consumption, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, 2005, pp. 2041-2053.

[6] **E.H. Wang, H.G. Zhang, B.Y. Fan, M.G. Ouyang, Y. Zhao, Q.H. Mu** - Study of working fluid selection of organic Rankine cycle (ORC) for engine waste heat recovery - *Energy* 36 (2011) 3406-3418

Site Web :

www.ormat.com;

www.turboden.eu;

www.pw.utc.com;

www.gmk.info;

www.eneftech.com;

www.cycle-organique-rankine.com



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°5 : Les machines frigorifiques à sorption

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	3
2.1 Production d'eau glacée par une machine à absorption ou à adsorption - Performances	4
2.2 Machines à absorption.....	5
2.2.1 Cycles à simple effet avec échangeur interne.....	9
2.2.2 Cycle GAX.....	10
2.2.2 Cycles à double effet	10
2.3 Machines à adsorption.....	12
3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	13
4. EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	14
4.1 Le réseau de froid de Monaco	14
4.2 Production décentralisée de froid sur réseaux de chaleur : nouveau service en préparation à Grenoble (CCIAG)	15
5. PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS	16
6. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT - CONCLUSIONS	18
7. BIBLIOGRAPHIES.....	18

1. Introduction

En été, les besoins en chaleur étant réduits, une grande partie de la chaleur produite par les cogénérations et les incinérateurs en Europe n'est pas valorisée. Par ailleurs, c'est aussi en été que l'utilisation de systèmes de production de froid est en constante augmentation.

De plus, depuis quelques années, la surface utile rafraîchie et/ou climatisée a augmenté, et des études nationales et internationales prévoient que cette tendance va continuer. Il y a plusieurs raisons majeures à ce développement :

- un changement dans la conception des bâtiments avec des normes d'isolation plus précises et une quantité croissante de façades en verre.

- l'utilisation des bâtiments (par exemple, un besoin croissant de climatisation des salles informatiques et des bureaux) ;

- l'augmentation des charges internes due à une quantité croissante d'appareils électriques ;

- une demande plus forte de confort ;

- une augmentation quantitative de bureaux et de bâtiments de service.

Du point de vue des ressources environnementales et énergétiques, il serait préférable de satisfaire la demande de refroidissement sans utiliser de combustible fossile, ce qui est souvent possible directement par de l'air ou de l'eau (« free-cooling »).

Par ailleurs, les normes de constructions en France dans le cadre de la Réglementation Thermique (RT) ont naturellement tendance à réduire ou même à éviter une demande importante de climatisation des bâtiments neufs ou en rénovation. Les mesures de réduction de la demande sont à réaliser en priorité avant de dimensionner la production de rafraîchissement.

Cependant, dans beaucoup de situations, le cumul des deux points précédents n'est pas suffisant pour satisfaire la demande effective d'un site et/ou diminuer suffisamment les besoins de celui-ci. Dans ce cas, le concept de production de froid en utilisant le surplus de chaleur issue de la cogénération et des usines d'incinération est une alternative pertinente pour faire face à ce besoin résiduel.

2. Principes de fonctionnement

Les systèmes les plus répandus de rafraîchissement utilisant du chaud pour produire du froid sont les groupes à absorption et à adsorption.

Un groupe de production de froid à sorption (absorption et adsorption) produit de l'eau glacée, utilisable aussi bien dans une centrale de traitement d'air (refroidissement, déshumidification), que dans un réseau d'eau glacée alimentant des installations décentralisées (ventilo-convecteurs par exemple). Les groupes de froid existants sur le marché et adaptés aux basses températures sont les machines à absorption (les plus répandues) et les machines à adsorption (quelques centaines de machines dans le monde, mais présentant un fort intérêt pour le rafraîchissement solaire).

Les groupes à absorption peuvent utiliser la chaleur pour la production de froid. Aucun système d'alimentation électrique n'est requis pour ce faire. L'absorption, qui peut être directe (utilisation d'un brûleur à gaz comme source chaude) ou indirecte (utilisation d'eau

chaude, de vapeur ou d'effluents issuent de rejets industriels par exemple), utilise le principe de l'affinité de la vapeur d'eau (H₂O) avec une solution aqueuse de bromure de lithium (LiBr) ou d'ammoniac (NH₃). Le mélange bromure de lithium/eau est utilisé pour les applications de climatisation. Il ne permet pas de production de froid négatif, contrairement au mélange ammoniac/eau tout particulièrement adapté aux applications de froid industriel. Dans le cas d'une absorption eau/bromure de lithium, la chaleur de la cogénération chauffe un générateur dans lequel se trouve une solution concentrée de bromure de lithium (concentration d'environ 58%). L'effet de la chaleur permet d'entraîner de la vapeur d'eau dans une tour de refroidissement où il y a condensation et extraction de chaleur. L'eau vient ensuite réagir avec la solution aqueuse concentrée de bromure de lithium (62%). La réaction endothermique permet alors de refroidir par un échangeur, l'eau qui sera utilisée pour des besoins en climatisation par exemple. L'absorption eau/ammoniac repose sur le même principe à la différence que l'ammoniac est dans ce cas le frigorigène.

2.1 Production d'eau glacée par une machine à absorption ou à adsorption - Performances

Les machines à sorption (absorption et adsorption) peuvent être caractérisées par trois températures :

- une température haute (T_c) correspondant à la chaleur motrice fournie au système (circuit d'eau chaude) ;

- une température basse (T_f) correspondant à celle de la production de froid (circuit d'eau glacée) ;

- une température intermédiaire (T_m) au niveau de laquelle la quantité de chaleur prélevée sur l'eau glacée et la chaleur motrice doivent être évacuées, le plus souvent au moyen d'une tour de refroidissement ouverte ou d'un aéroréfrigérant (circuit de refroidissement).

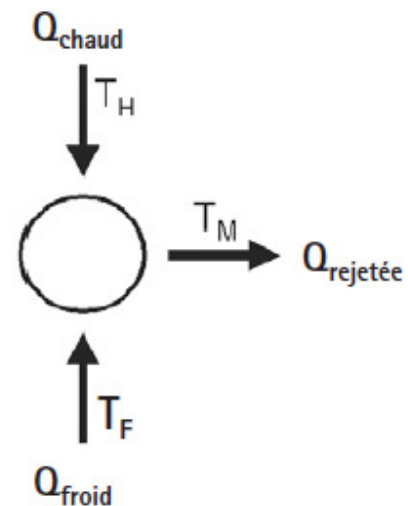


Figure 1 : Schéma de principe [1]

- Q_{froid} est la quantité de chaleur extraite de l'eau glacée au niveau de l'évaporateur.

- Q_{chaud} est la quantité de chaleur requise pour faire fonctionner le processus (chaleur motrice).

- $Q_{rejetée}$, somme de Q_{froid} et Q_{chaud} , est la quantité de chaleur à évacuer à la température moyenne T_m .

Q_{chaud} peut être fournie soit par différentes sources de chaleur, autant par des capteurs solaires thermiques, par un système d'appoint (réseau de chaleur ou chaudière gaz par exemple) et enfin par des rejets d'effluents thermiques industriels.

Un paramètre clé pour décrire l'efficacité d'une machine à sorption est le **C**oefficient de **P**erformance thermique (**COP**), défini par le rapport entre la chaleur extraite de l'eau glacée (production de froid) et la chaleur motrice du processus :

$$\text{COP thermique} = Q_{\text{froid}} / Q_{\text{chaud}}$$

Ce paramètre est différent du COP d'un groupe de froid classique à compression électrique, défini par :

$$\text{COP} = \text{Qfroid} / \text{Eélectrique}$$

Où Eélectrique représente la consommation électrique du groupe de froid.

La définition du COP thermique n'inclut pas les consommations électriques annexes. Une comparaison plus satisfaisante des différentes technologies nécessite la prise en compte de l'ensemble des consommations énergétiques (chaleur motrice, consommations électriques des pompes et ventilateurs). On peut noter que, plus le COP est faible, plus la quantité de chaleur à fournir au système et celle qui doit être évacuée dans la tour de refroidissement sont élevées. A l'inverse, une valeur élevée du COP est un avantage permettant de réduire à la fois le besoin en chaleur motrice et la consommation électrique des pompes et autres auxiliaires.

La température de l'eau glacée dépend du système de distribution installé dans les pièces. Lorsqu'une déshumidification de l'air est nécessaire, la température de l'eau glacée doit être inférieure au point de rosée (6 °-9 °C, en général). Lorsque l'on souhaite uniquement un abaissement de température, sans déshumidification, une température d'eau glacée de 12 °C-15 °C est suffisante, conduisant à de meilleures performances de la machine.

2.2 Machines à absorption

Ce sont les machines les plus répandues. La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique.

Pour de l'eau glacée au dessus de 0°C, comme c'est le cas en climatisation, c'est le couple eau/bromure de lithium (H₂O/LiBr) qui est utilisé, l'eau étant le réfrigérant. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité, afin d'assurer la circulation. Dans un système H₂O/LiBr, la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle interne de la température du circuit de refroidissement.

La production de froid est basée sur l'évaporation du réfrigérant (l'eau) dans l'évaporateur à très basse pression. La vapeur d'eau est alors aspirée dans l'absorbeur, contribuant à la dilution de la solution H₂O/LiBr. L'efficacité du processus d'absorption nécessite un refroidissement de la solution. Cette dernière est pompée en continu dans le générateur où elle est chauffée (chaleur motrice). La vapeur d'eau ainsi générée est envoyée dans le condenseur, où elle se condense. L'eau liquide, après passage dans une vanne de détente, retourne ensuite à l'évaporateur.

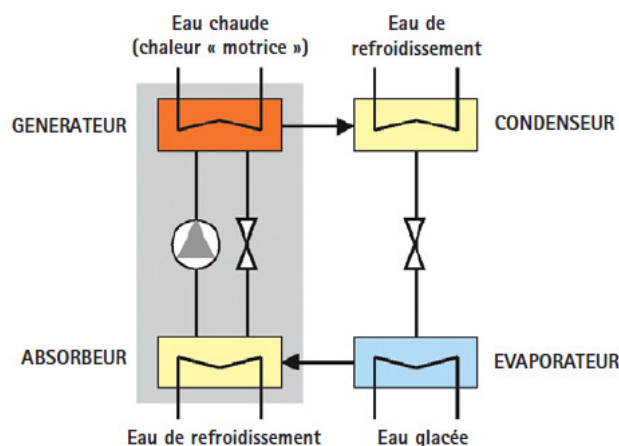


Figure 2 : Schéma de principe d'une machine à absorption

La mise en œuvre d'un cycle de base nécessite les quatre composants actifs énumérées ci-dessous et présent sur la figure 3 suivante.

Le condenseur :

Composant analogue à celui des machines à compression de vapeur, c'est la température T_m du fluide caloporteur alimentant le condenseur qui fixe la température de condensation et donc la pression de l'ensemble désorbeur/condenseur. La condensation du frigorigène nécessite le rejet de la chaleur de condensation Q_{cond} à la température T_m . Sur la figure 4, qui représente le diagramme d'Oldham, le trajet 7-1 correspondant comprend une phase de désurchauffe, la condensation ainsi qu'un éventuel sous refroidissement.

L'évaporateur :

A la sortie du condenseur (1), le frigorigène liquide subit un laminage à travers un détendeur (1-2), puis s'évapore produisant ainsi la puissance frigorifique Q_{evap} . La température d'évaporation et par la suite la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur est fixée par la température T_b de la source froide (medium à refroidir). Nous noterons aussi l'éventuel présence d'une surchauffe en sortie de cet échangeur.

Le bouilleur ou désorbeur :

La solution diluée (5) (riche en frigorigène) y reçoit la quantité de chaleur Q_{des} à une température T_h ce qui provoque ainsi la désorption d'une partie du fluide frigorigène dissout dans la solution. Le désorbeur produit ainsi une vapeur de frigorigène (7) et une solution concentrée (6) (pauvre en frigorigène). Cet organe effectue donc une concentration du sorbant lors du trajet 5-6 (ou un appauvrissement en frigorigène suivant la convention choisie).

L'absorbeur :

La vapeur issue de l'évaporateur (3) y rencontre la solution concentrée (pauvre) provenant du désorbeur (8). Elle est absorbée par cette solution qui s'enrichit donc en frigorigène. La chaleur absorbée Q_{abs} dégagée par cette transformation qui est exothermique est évacuée par un fluide caloporteur à la température T_m . En sortie de l'absorbeur (4), on obtient ainsi une solution diluée (donc riche en frigorigène). Ce composant effectue donc une dilution du sorbant lors du trajet 8-4 (ou un enrichissement en frigorigène suivant la convention choisie).

La différence de pression entre l'ensemble absorbeur/évaporateur (BP) et désorbeur/condenseur (HP) nécessite en outre la présence des différents organes suivants :

- 2 détendeurs sur les circuits frigorigènes (1-2) et solution concentrée (6-8)
- 1 pompe sur le circuit de la solution diluée (4-4')

Nous noterons tout de même que le travail effectué par cette pompe est nettement inférieur à celui que nécessiterait un compresseur, qui pourtant dans les deux cas seraient nécessaires pour passer de la pression P_{evap} à P_{cond} , mais dans le cas d'une pompe il s'agit d'un liquide alors que pour le compresseur il s'agit de vapeur. Le travail se calculant à partir de la forme de l'intégrale du volume et du différentiel de pression ($W = \int V \cdot dP$), on en conclut que le travail de la pompe vaut environ 1/1000 du travail du compresseur car ($V_{liq} \approx V_{vap} / 1000$).

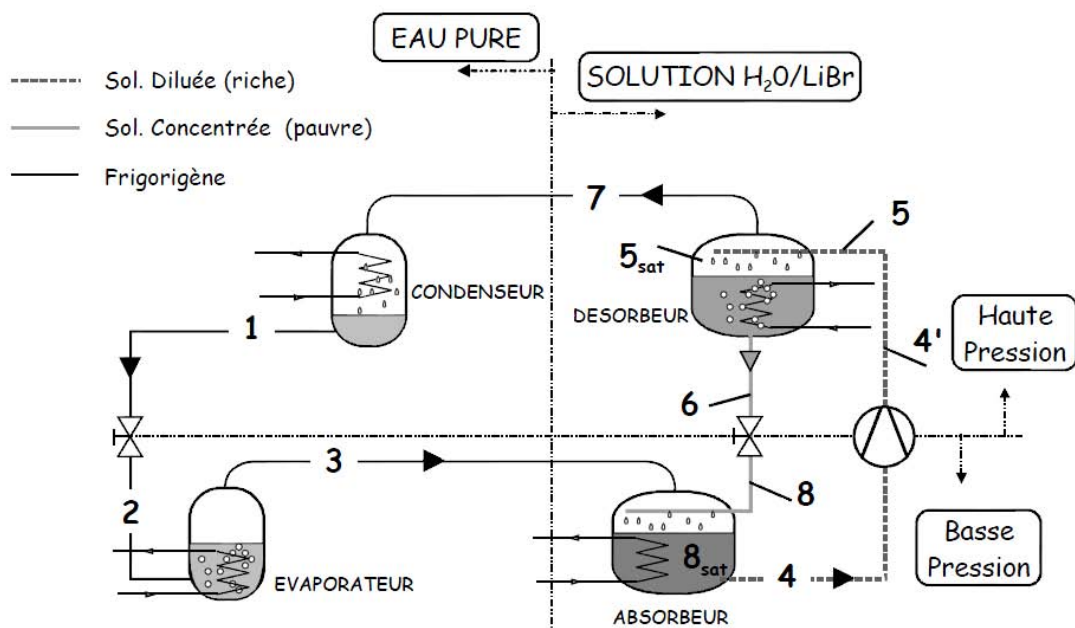


Figure 3 : Schéma plus détaillé de principe d'une machine à absorption liquide [2]

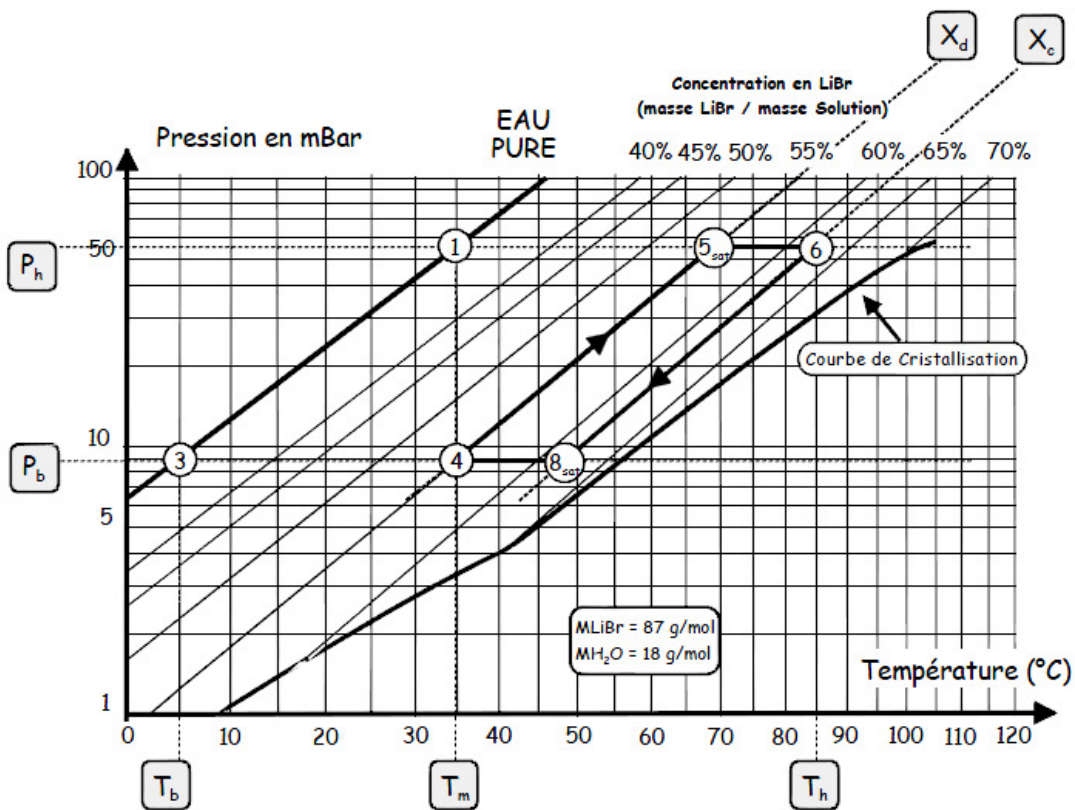


Figure 4 : Représentation des points caractéristiques dans un diagramme de Oldham d'un cycle à absorption pour un couple H₂O/LiBr

Les puissances frigorifiques des machines à absorption sont généralement de l'ordre de plusieurs centaines de kW froid. Elles sont généralement alimentées par un réseau de chaleur, de la chaleur résiduelle ou une cogénération.

La température de la source chaude est généralement au dessus de 80 °C pour des machines à simple effet, avec un COP entre 0,6 et 0,8 (moyenne à 0.7). Les machines

double effet, utilisant la chaleur motrice sur 2 niveaux, nécessitent des températures supérieures à 140 °C, pour des COP pouvant atteindre 1, 2.

	Absorption simple effet	Absorption double effet
Source chaude	Eau chaude 70/80°C 90°C	Eau surchauffée 150°C
COP	0,6 – 0,75	1,1-1,2
Gamme de puissance (MW)	0,035 – 5,8	0,1 – 5,3
Surface m ² /kW	0,01 – 0,03	0,01 – 0,03
Poids kg/kW	8,5 – 22	8,5 – 22

Tableau 1 : Récapitulatif des performances et besoins des groupes à absorption simple et double effet [1]

Couple	H ₂ O/LiBr	NH ₃ /H ₂ O
Pression	Inférieure à la pression atmosphérique 5 °C ~ 8.7 mb 45 °C ~ 96 mb	-30 °C ~ 1.2 b -5 °C ~ 3.5 b 45 °C ~ 17.8 b
Températures/Applications	Température d'évaporation > 0°C Climatisation exclusivement	Froid industriel et climatisation
GAX	Non	Oui
Double effet	Oui	Oui
Matériau/corrosion	Inhibiteur anti-corrosion nécessaire	Cuivre interdit
Pertes de charges	Vigilance : ΔP ~ P	Classique (cf Compression)
Volume massique	Important 5°C : 147 m ³ /kg => diamètres de canalisation importants	Classique 5°C : 0.34 m ³ /kg -30°C : 0.96 m ³ /kg
Alimentation énergétique	Gaz : oui Vapeur : oui Solaire : oui	Gaz : oui Vapeur : oui Solaire : non
Rectifieur	Non	Oui
Dispositif anti cristallisation	Oui	Non
Dispositif de purge (incondensables)	Oui	Non
Chaleur latente De vaporisation (kJ/kg)	H ₂ O 5°C : 2490 kJ/kg 45°C : 2394 kJ/kg	NH ₃ -30°C : 1357 kJ/kg 5°C : 1243 kJ/kg 45°C : 1080 kJ/kg

Tableau 2 : Principales caractéristiques physico-chimiques des 2 couples utilisées en absorption

Quelques machines à absorption de capacité inférieure à 50 kW sont disponibles. Pour le rafraîchissement solaire à absorption, ce sont souvent ces petites machines qui sont utilisées. Une machine, développée récemment pour des petites capacités, permet un fonctionnement à charge partielle, avec une température de 65 °C et un COP d'environ 0,7, ce qui la rend particulièrement intéressante pour une alimentation solaire. Ceci montre le fort potentiel d'amélioration qui existe encore pour ce type de machines.



Figure 5 : Machine à absorption – Hôtel de Rethymnon – Crète (Grèce)

2.2.1 Cycles à simple effet avec échangeur interne

Toutes les machines simple effet actuelles utilisent aujourd'hui un échangeur interne (appelé quelquefois transmetteur interne) entre la solution diluée sortant à T_m de l'absorbeur et la solution concentrée sortant du bouilleur à T_h . Cet échangeur permet de préchauffer la solution diluée avant son entrée dans le bouilleur et de sous refroidir la solution concentrée avant détente, ce qui permet de réduire les quantités de chaleur à fournir au désorbeur (Q_{des}) et à évacuer à l'absorbeur (Q_{abs}).

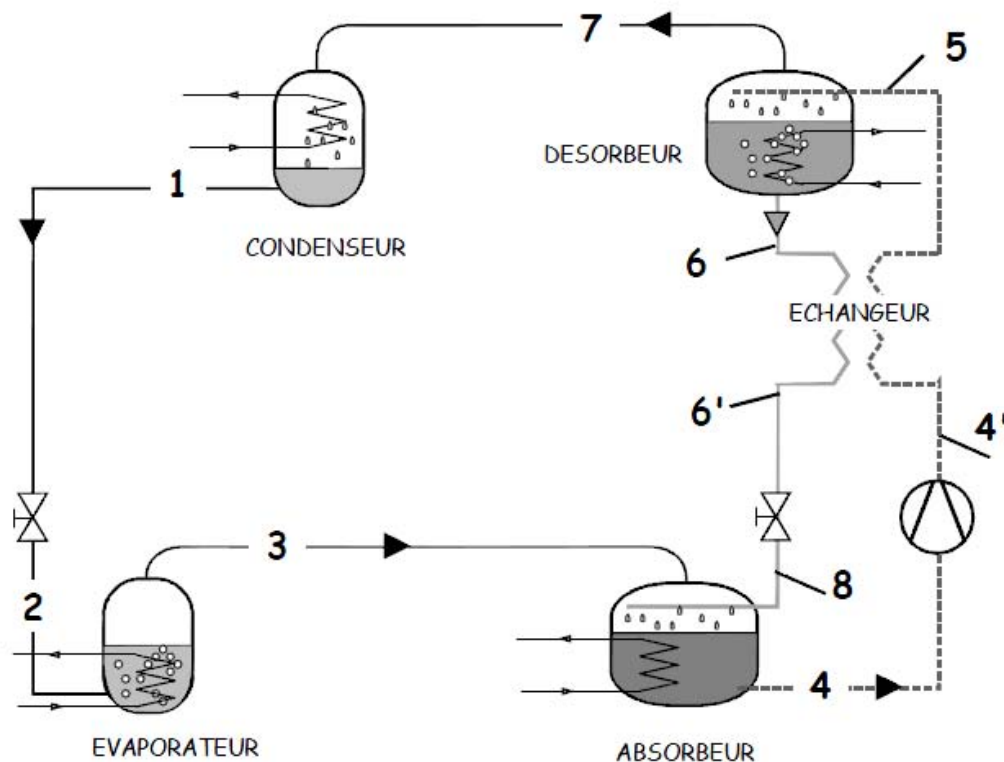


Figure 6 : Représentation schématique d'une machine à absorption dotée d'un échangeur interne

L'ajout de cet échangeur permet un gain de COP d'environ 16% par rapport à un cycle sans échangeur interne.

2.2.2 Cycle GAX

Le cycle **GAX**, de l'anglophone **Generator Absorber heat eXchanger**, a la particularité de la récupération d'énergie à la fois sensible et latente lors de la descente en température et d'une partie de l'absorption, au profit de la montée en température d'une partie de la désorption. Sur la figure X suivante, on peut voir le schéma de principe de ce cycle. Cette figure nous montre aussi qu'un écart important entre les températures T_m et T_h est nécessaire pour assurer une récupération d'énergie à des niveaux de températures suffisamment intéressants.

Son utilisation est réservée uniquement au couple $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ qui n'est soumis à aucune cristallisation et donc à aucune limitation de cet ordre vers les hautes températures, contrairement au couple $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ qui lui est soumis à des problèmes de cristallisation.

La récupération d'énergie se traduit au final par une réduction de la part à fournir au désorbeur et donc des COP plus élevés que des cycles standards.

Les COP théoriques sont ici supérieurs à l'unité, mais pour les mêmes raisons que pour la machine à deux étages (irréversibilités dues aux transferts thermiques) les COP réels restent voisins de 1.

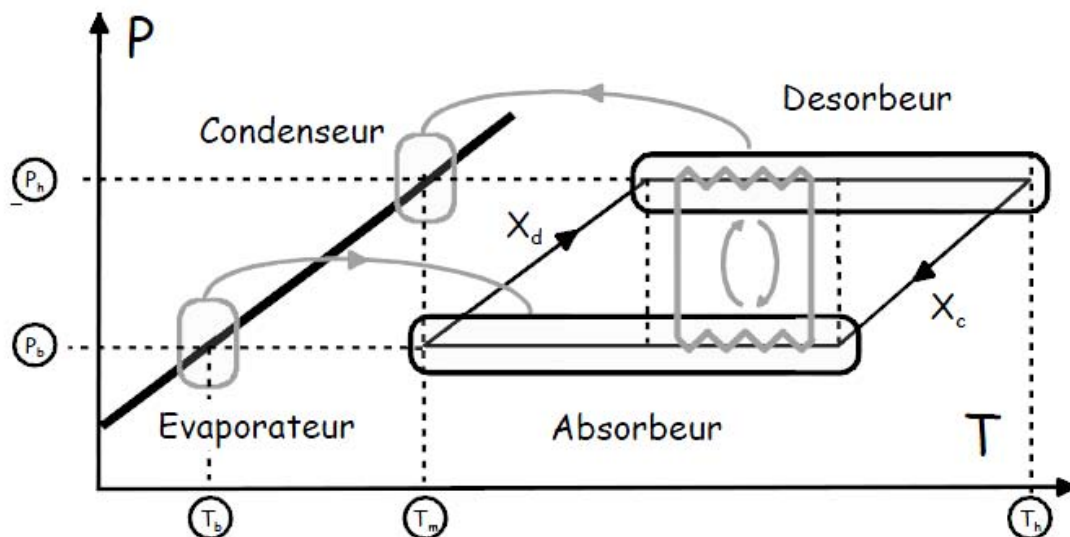


Figure 7 : Schéma de principe d'un cycle GAX

2.2.2 Cycles à double effet

Cette machine fonctionne avec deux désorbeurs et deux condenseurs, suivant trois niveaux de pression. La figure 8 représente le cycle de la solution dans un diagramme d'Oldham, et la figure 9 donne une représentation schématique de l'installation.

La partie de la machine qui fonctionne entre les pressions P_b et P_1 (évaporateur, condenseur C1, absorbeur et désorbeur D1) a un fonctionnement analogue à la machine simple effet décrite précédemment. La différence porte sur les transformations que va subir la solution intermédiaire sortant du désorbeur D1. Au lieu d'être détendue et réinjectée dans l'absorbeur, elle subit une nouvelle augmentation de pression par l'intermédiaire d'une pompe, puis est introduite dans un deuxième désorbeur (D2), fonctionnant à une pression plus élevée P_2 . Le niveau de pression est choisi de façon à ce que la température de condensation du frigorigène soit légèrement supérieure à la température de la solution intermédiaire qui sort du premier désorbeur D1. Ainsi, c'est la chaleur de condensation produite dans le condenseur C2 qui va chauffer le désorbeur D1. Pour l'utilisateur, seul le désorbeur D2 consomme de la chaleur avec l'extérieur. La production de froid due au frigorigène désorbé par D1 est donc gratuite. On notera la présence de deux échangeurs,

l'un (E1) entre la solution riche et solution intermédiaire, l'autre (E2) entre la solution intermédiaire et la solution pauvre.

En théorie, ce procédé permet l'obtention d'un COP deux fois supérieur à celui d'une machine simple effet. En fait, la présence de deux pompes, ainsi que les irréversibilités dues aux transferts thermiques entre le désorbeur D1 et le condenseur C2, et dans les deux échangeurs E1 et E2 font que les machines actuellement commercialisées fonctionnent avec des COP ne dépassant pas l'unité (0,8 à 1).

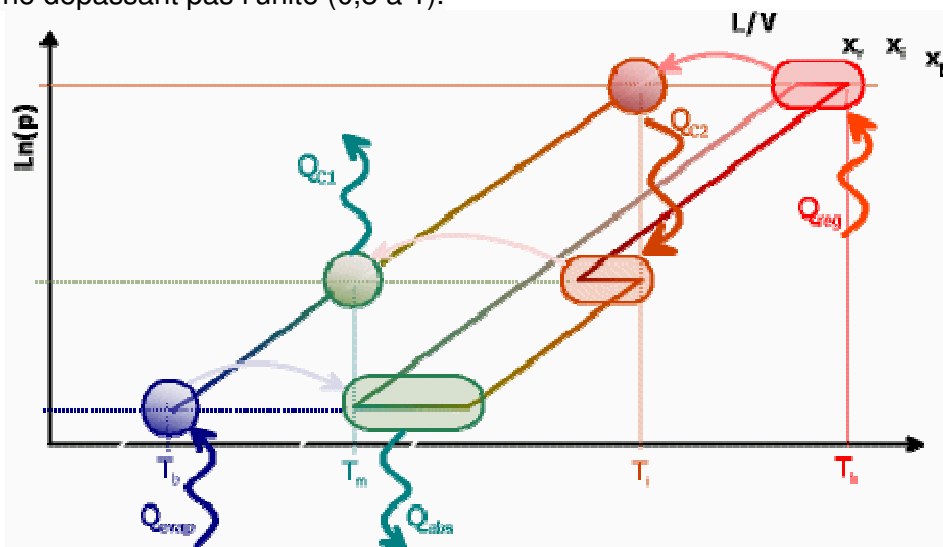


Figure 8 : Machine à double effet à deux étages. Représentation du cycle dans le diagramme d'Oldham

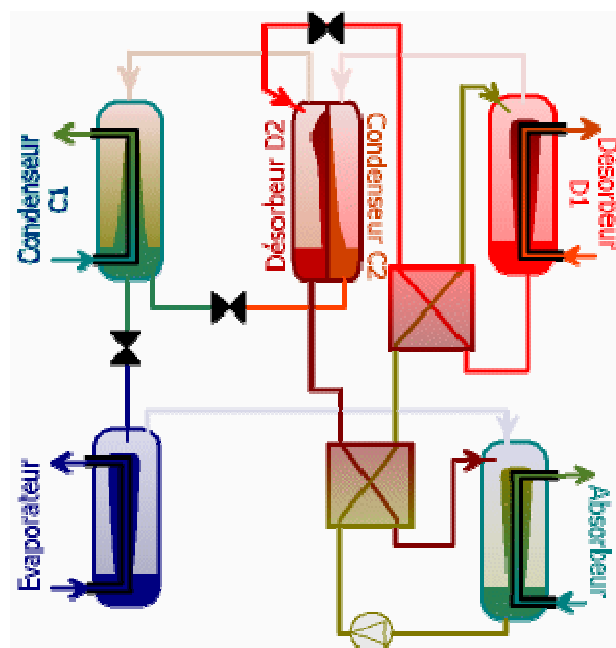


Figure 9 : schéma d'une machine à absorption liquide double effet à deux étages. Circuits solutions : — rouge — : riche, — orange — : intermédiaire, — vert — : pauvre.

D'autres cycles de hautes performances ont été définis (au moins sur le papier !) : cycle à triple effet, quadruple effet et même à cinq effets. Théoriquement, le nombre d'effets donne le facteur par lequel il faut multiplier le COP de la machine simple effet pour obtenir le COP que l'on peut attendre avec la machine étudiée. A ce jour, certaines machines triple effet ont déjà été expérimentées. Leur principe est analogue à celui de la machine à deux étages, à

laquelle on rajoute un troisième étage, donc un troisième condenseur, un troisième désorbteur et une troisième pompe. Les COP atteints expérimentalement sont de l'ordre de 1,5.

En conclusion, on peut s'attendre dans les années à venir à un développement important des machines à absorption liquide. Ce domaine semble d'ailleurs très prometteur et fait l'objet de programmes de R&D importants notamment au Japon et aux USA.

2.3 Machines à adsorption

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le Silicagel comme adsorbant. La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2 de la figure 10), un évaporateur et un condenseur.

L'adsorbant du premier compartiment (1) est régénéré par chauffage (source chaude), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de production de froid).

L'adsorbant du compartiment (2) maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la «production de froid» diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets. Actuellement, seuls quelques fabricants asiatiques proposent ce type de machines à adsorption.

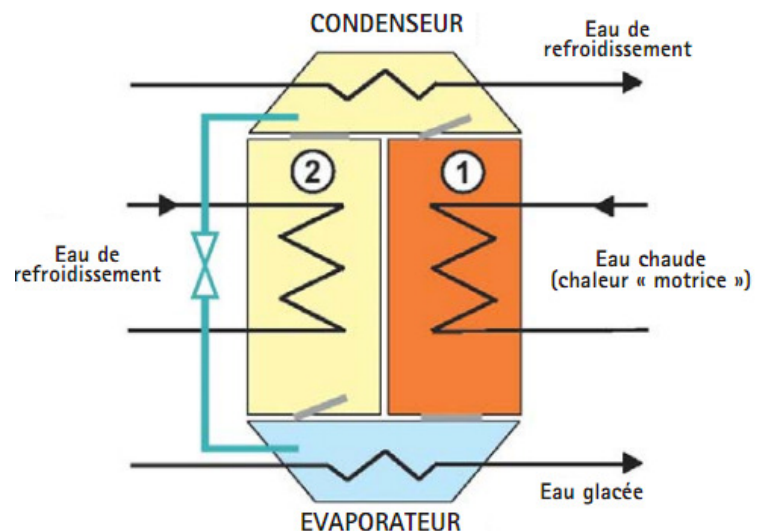


Figure 10 : Schéma de principe d'un groupe à adsorption

Avec une température de source chaude d'environ 80 °C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 50 °C. La capacité des machines va généralement de 50 à 500 kW froid.

	Adsorption
Source chaude	Eau chaude 55-70°C
COP	0.55 – 0,65
Gamme de puissance	50-430 kW
Surface m ² /kW	Taille élevée
Poids kg/kW	Poids élevé

Tableau 3 : Caractéristiques des machines à adsorption [1]

La robustesse de ces machines à adsorption est un atout. Il n'y a, d'autre part, aucun danger de cristallisation et donc, pas de contrainte sur la température intermédiaire de refroidissement. Il n'y a pas de pompe à solution et les consommations électriques sont donc particulièrement réduites. Seuls leur taille et leur poids élevés sont un inconvénient. Il existe cependant un potentiel important d'amélioration au niveau des échangeurs dans les compartiments d'adsorption, et donc de réduction de poids et de volume pour les futures générations de machines à adsorption.



Figure 11 : Machine à adsorption à Sarantis (Grèce)

D'autre part, étant donné le faible nombre de machines produites, le coût des machines à adsorption est actuellement élevé. Deux constructeurs sont connus : Mycom et Nishiyodo, mais il existe que peu de références en France.

3. Avantages et Inconvénients

Valoriser la chaleur d'été des systèmes de cogénération et des incinérateurs de déchets en l'utilisant pour produire du froid présente de multiples avantages :

- améliorer la rentabilité des infrastructures du réseau de chauffage urbain, particulièrement les unités de cogénération et les installations d'incinération de Déchets ;

- réduire la consommation d'énergie primaire du fait de la meilleure efficacité énergétique de cette solution par rapport aux systèmes de refroidissement habituels et ainsi réduire les émissions de gaz à effet de serre ;

- réduire notre dépendance vis-à-vis des importations d'énergie et de l'augmentation du prix des énergies fossiles.

Ces avantages, dont un résumé est présenté ci-dessous, seront développés dans les chapitres suivants.

Du point de vue de la collectivité, le concept de production de froid à partir de chaleur permet de respecter :

- les objectifs fixés par le protocole de Kyoto
- les normes environnementales devenant de plus en plus strictes, de réduire les pointes de consommation d'électricité en été.
- et d'utiliser plus efficacement l'énergie primaire.

En produisant du froid pendant l'été avec l'utilisation de la chaleur en surplus, la collectivité pourra bénéficier d'économie de combustible, d'économie d'électricité et d'une réduction d'émissions de CO₂ allant jusqu'à 65% ainsi que la suppression des émissions de CFC/HCFC.

Pour les propriétaires ou gestionnaires de bâtiments, le service de refroidissement issu de ce concept s'intègre bien dans la tendance générale d'externaliser les aspects

énergétiques pour le fonctionnement du bâtiment. Le propriétaire profitera à plusieurs niveaux de ce service :

- réduction des coûts de maintenance et du prix/coûts compétitifs et prévisibles comparés aux alternatives usuelles
- réduction du bruit (absence de compresseur)
- maintenance effectuée par des professionnels avec une garantie
- diminution de la complexité du système de livraison ou de production et donc d'une diminution des risques associés
- diminution des pointes de consommation électrique qui peut s'associer à une diminution de la puissance souscrite auprès du fournisseur
- réduction et substitution des gaz frigorigènes dont la législation est de plus en plus contraignante
- amélioration de l'image du propriétaire, cette démarche s'inscrivant pleinement dans le développement durable et la protection de l'environnement.

Pour les gestionnaires des réseaux de chaleur, ce nouveau service est une opportunité forte intéressante pour pérenniser et développer leur activité économique. Par ailleurs, la valorisation de la chaleur de surplus issue d'une UIOM ou d'une cogénération améliorera la performance globale de ces installations. Dans le secteur tertiaire, l'offre de chaleur seule peut être insuffisante dans un futur proche par rapport aux exigences croissantes du maître d'ouvrage qui doit couvrir pour son bâtiment aussi bien les besoins en chaleur qu'en refroidissement.

4. Exemples de réalisations

4.1 Le réseau de froid de Monaco

Le contexte méditerranéen de la ville de Monaco implique des besoins en climatisation aussi importants qu'en chauffage. Ainsi, la production de froid est assurée depuis 1983 par deux machines à absorption qui valorise la chaleur issue de l'usine d'incinération de la principauté et utilise l'eau comme frigorigène. La production de froid a été renforcée en 2000/2001 par des machines à compression.

La totalité des besoins en chaleur et en refroidissement de ce quartier est assurée par un réseau urbain exploité par la SMEG (Société Monégasque d'Électricité et de Gaz).

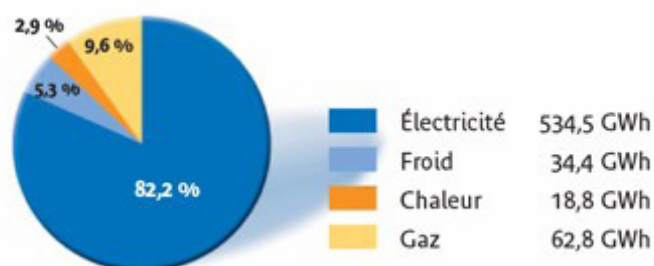


Figure 12 : Répartition de la fourniture par la SMEG [1]

L'usine d'incinération de Monaco traite les déchets urbains de la principauté ainsi que ceux de plusieurs communes françaises limitrophes et valorise l'énergie sous forme d'électricité ainsi que de vapeur qui alimente une centrale de production de chaleur et de froid. Équipée de trois fours chaudières, elle peut incinérer jusqu'à 10 t/h de déchets ménagers. Entièrement intégrée à l'architecture du centre ville monégasque, elle est dotée d'un traitement de fumées performant depuis 5 ans et respecte ainsi les normes européennes en matière d'environnement.

La vapeur produite est utilisée en premier lieu pour alimenter un turboalternateur de 3 MWe raccordé au réseau de la SMEG. La vapeur résiduelle alimente trois échangeurs de chaleur d'une puissance totale de 20,2 MW et deux machines à absorption de marque TRANE de 2 MW chacune, la centrale comporte aussi 11 MW de groupe de froid traditionnel à compression, l'ensemble alimente un réseau de chaleur (95°C) d'une longueur de 2,5 km et un réseau de froid (6°C) d'une longueur identique (2,5 km), assurant ainsi la fourniture de chaleur et de froid au quartier de Fontvieille qui s'étend sur 22 ha, via 27 sous stations.

La production d'électricité de l'usine d'incinération pour les années 1998 à 2004 montre que, généralement, 30% de la production électrique est autoconsommée, le reste est vendu sur la base du tarif Vert haute tension.

En 2006, en matière de production de froid et de chaleur, 56 GWh ont été produits et distribués répartis comme suit :

- 36 GWh froid → 64,3%
- 20 GWh chaleur → 35,7%

Les données financières de ce réseau ne sont pas connues, néanmoins la SMEG affirme que, depuis leur installation, les machines à absorption (bientôt 25 ans de service), fonctionnent normalement et ne nécessitent pas beaucoup de maintenance. Elles nécessitent simplement une surveillance accrue pour éviter les pannes.

4.2 Production décentralisée de froid sur réseaux de chaleur : nouveau service en préparation à Grenoble (CCIAG)

Le site CEMOI est une ancienne chocolaterie, construite en 1920 et qui a cessé son activité au début des années 1970. Cet ensemble immobilier de 13000 m², représentatif du patrimoine industriel grenoblois, a été racheté par la Ville de Grenoble et reconverti en 1979 en Centre d'Entreprises : bureaux, ateliers, entrepôts de stockage.

La Compagnie de Chauffage Intercommunale de l'Agglomération Grenobloise (CCIAG), dont le réseau de chaleur dessert le quartier assurera la fourniture de chaleur pour les besoins de chauffage et la fourniture d'eau glacée pour les besoins de refroidissement et de climatisation du site CEMOI. La centrale de production d'eau glacée, située dans un local technique du bâtiment, est constituée :

- En première phase d'un groupe à absorption de 300 kW et d'un groupe à compression de 200 kW (livraison des locaux de la première tranche depuis Janvier 2010)

- A terme, et selon l'évolution de la demande, il est prévu une extension de la puissance frigorifique installée, avec un deuxième groupe à absorption, d'une puissance de 300 à 500 kW.

Le refroidissement des condenseurs des machines frigorifiques (absorption et compression) est réalisé avec l'eau de la nappe phréatique présente entre 3,50 et 4,00 m de profondeur. La production de froid par absorption permet de valoriser la chaleur excédentaire issue de l'incinération des ordures ménagères à Grenoble (UIOM Athanor) pendant la période d'été. L'énergie frigorifique annuelle nécessaire pour satisfaire les besoins du site, a été estimée à 680 MWh, dont 450 MWh pour la période estivale (de mai à septembre) et 230 MWh pour la période hivernale. Cela représente une consommation de 690 MWh de chaleur et 75 MWh électrique (hors fonctionnement des équipements auxiliaires).

Les impacts environnementaux (exprimés en gaz à effet de serre et énergie primaire) de cette opération ont été évalués en utilisant les facteurs de ressource primaire (PRF) et les

facteurs d'émissions de CO₂ définis par le projet européen Ecoheatcool et la norme européenne EN 15316-4-5. Il en ressort les résultats présentés dans le tableau suivant :

Mode de production de froid	PRF (facteur ressource primaire)	Facteur CO ₂ gCO ₂ /kWh froid	Energie primaire consommée MWh/an	Emissions CO ₂ t/ an
Machine à compression (COP de 3)	0,86	13	585	8,8
Machine à absorption sur le réseau de chaleur de Grenoble en été	0,073	5	50	3,4
67% absorption et 33% compression	0,332	7,6	226	5,2
Gains (énergie primaire ou CO ₂)			359	3,6

Tableau 1 : Résultats [1]

Les deux critères pris en compte (utilisation de la ressource primaire et les émissions CO₂) montrent l'avantage de la production de froid à partir du réseau de chaleur de Grenoble (alimenté par l'UIOM). En effet l'exploitation de la future installation permettra une économie en énergie primaire de l'ordre de 359 MWh/an (- 61%) et environ 3,6 tonnes de CO₂ évitées par an (- 42%).

Le coût du refroidissement des locaux tertiaires pour le site CEMOI est estimé de 10 à 12€ HT/m²/an (valeur juin 2008 sur la base d'une consommation de 100 kWh/m²/an).

Ce coût comprend l'investissement correspondant à la centrale de production d'eau glacée réalisé par la Compagnie de Chauffage, l'énergie (chaleur et électricité) nécessaire à la production de froid, la conduite, la maintenance, les réparations et le renouvellement des équipements. L'utilisateur dispose ainsi d'eau glacée sans investissement ni coût de maintenance liés à la production frigorifique. Ce coût est tout à fait comparable à des solutions de production de froid avec des groupes à compression (en coût global, intégrant l'investissement et le fonctionnement des installations).

Acteur de l'aménagement urbain depuis près de 50 ans, la Compagnie de Chauffage met en œuvre des solutions performantes sur le plan énergétique et environnemental, cette opération d'offre globale de fourniture de chaleur et de froid s'inscrit dans cette démarche et permet un retour d'expérience dans le contexte énergétique français.

5. Principaux constructeurs

Il existe actuellement des groupes à absorption à simple, double et triple effet. En moyenne, avec des variantes selon les constructeurs, les groupes à simple effet nécessitent une température de chaleur initiale de 100°C permettant la transformation de 35% de l'énergie primaire en froid et ont un COP d'environ 0,7.

De même les groupes à double effet se caractérisent par une température de chaleur initiale de 150°C, une transformation de 50% de l'énergie primaire en froid et un COP d'environ 1,2.

Les machines à triple effet existent et sont viables techniquement cependant leur coût d'investissement ne les rend pas encore commercialisables. Elles fonctionnent avec une température en entrée de 180°C et ont un COP voisin de 1,5.

Les solutions décentralisées de production de froid par absorption sur réseau de chaleur devraient majoritairement conduire à de l'absorption simple effet du fait d'un niveau de température moins élevée de la source chaude. Une production centralisée permettrait plus facilement l'utilisation d'absorbeur à double effet avec un meilleur rendement.

En général, la gamme de puissance des groupes frigorifiques à absorption se trouve plutôt dans la tranche des moyennes à hautes puissances, et nous verrons ainsi que peu de machines de petites puissances existent sur le marché, alors que le marché de l'habitat pourrait être très demandeur. Cela laisse donc entrevoir une perspective d'évolution des futurs marchés, d'une part vers l'amélioration des performances de ces machines (amélioration des COP) mais aussi vers un élargissement de la gamme vers des plus petites puissances destinés à équiper l'habitat. En effet, ce dernier point nous amène encore une fois vers un des secteurs les plus énergivores qui est l'habitat, et qui plus est en demande de froid croissante depuis quelques années, notamment du faite du réchauffement climatique qui accentue les fortes températures lors des périodes estivales (ex : canicule de 2003 en France) mais aussi par le gain de confort que procure l'usage des climatisations. Ainsi, équiper le parc de l'habitat avec des petits groupes à absorption (individuelle ou collectif) alimentés par des réseaux de chauffage urbain (RCU) permettrait d'avoir des gains considérables, d'une part en termes d'émission de CO₂ et d'autre part en terme de valorisation et d'entretien des RCU.

En effet, la baisse de demande en chaud lors des périodes estivales oblige les fournisseurs de chaleur des RCU (entre autres pour des usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM)) d'abaisser leur capacité de production de chaud. De là, les fours d'incinération et autres chaudières fonctionnent donc à des régimes transitoires qui fait abaisser les rendements de production. De plus, l'arrêt de la circulation d'eau chaude surchauffée ou de vapeur dans les RCU n'est pas conseillé du fait d'une usure des canalisations qui serait prématurée (usure prématurée des joints d'étanchéité, corrosion accélérée des canalisations...etc.).

Dans ce chapitre, nous allons donc vous présenter les principaux fabricants de machines à absorption, mais en premier lieux voici une liste non exhaustive des fabricants de ces machines frigorifiques à absorption :

Marque	TRANE	YORK	CARRIER	YAZAKI	MCQUAY	ROBUR	BROAD
Gamme en kW	352 à 6000	350 à 5300	17 à 5300	105 à 350	350 à 5300	10 à 105	116 à 46520

Tableau 2: Gamme de puissance des principaux fabricants [3]

On peut donc voir que bien que cette liste soit non exhaustive, il existe de nombreux fabricants de ces machines, ainsi nous ne présenterons que les 2 principaux en essayant tout de même de présenter l'essentiel des gammes disponibles sur le marché.

TRANE offre la gamme la plus étendue de refroidisseurs de liquide à absorption disponibles sur le marché, soit 22 tailles de 352 à 6000 kW de capacité frigorifique. Complètement assemblés en usine, les refroidisseurs de liquides à absorption TRANE, modèle «C», à enveloppe unique fonctionnent sur la base du cycle bromure de lithium /eau, et sont particulièrement destinés à la production d'eau glacée pour applications industrielles ainsi que de conditionnement d'air. Cette réalisation est une version hautement améliorée de la première machine à absorption lancée sur le marché par TRANE en 1959. L'entreprise fut un précurseur en introduisant le premier sur le marché une machine de conception hermétique pour des puissances frigorifiques supérieures à 200 kW. Un progrès significatif fut ainsi réalisé concernant la fiabilité des machines à absorption.

Quant à ROBUR, leur gamme qui est peu étendue ne permet pas d'entrer en concurrence directe avec les autres fabricants mais cela est dû au fait que ROBUR s'étend sur une gamme où les acteurs manquent, la tranche 10-100kW que les machines à LiBr ne permettent pas.

En ce qui concerne les machines frigorifiques à adsorption, comme nous l'avons déjà mentionné, seuls quelques constructeurs asiatiques comme Nishiyodo et Mycom proposent ce genre de machines, ainsi qu'une entreprise allemande SORTECH qui propose des systèmes de production de froid par adsorption de 5 et 75kW.

6. Recherche et développement - Conclusions

Dans cet axe là, les recherches sont encore réellement actives avec la recherche des meilleurs coefficients de performance (COP). Cet objectif passe donc par l'amélioration et l'optimisation des composants des cycles à réfrigération à sorption.

Dans un premier temps, les échangeurs de chaleur qui encore et toujours sont des éléments essentiels de ces machines afin d'obtenir le meilleur taux de récupération. A cet effet là, l'objectif de la maîtrise de l'encrassement est encore une fois une des voies les plus importantes pour améliorer l'efficacité de récupération sur des effluents encrassants qui représente, à plus ou moins court terme, une source de chaleur gigantesque et peu valorisée encore de nos jours. En ce qui concerne cet axe de recherche, le lecteur pourra se référer à la fiche n°1 qui reprend ces axes majeurs de recherche et développement dans le domaine des échangeurs de chaleur.

Dans un deuxième temps, l'amélioration des performances passe aussi par le développement des cycles à triple effet encore en marge du système commercial. Des recherches sont encore en cours dans ce domaine là et devrait arriver à conclusion dans les années à venir. Ces machines promettent de bien meilleurs coefficients de performance ainsi qu'une production massive de froid à partir de chaleur à plus ou moins haute température ($T \approx 180^\circ\text{C}$).

Sans conteste la technologie des machines frigorifiques à sorption est en forte voie de développement et est d'ores et déjà largement utilisée en ce qui concerne les machines à absorptions simple effet. Pour les machines à adsorption, il reste encore des efforts à faire, notamment en ce qui concerne les matériaux sorbants.

7. Bibliographies

[1] Reinhard SIX ; Jean-Éric MESMAIN - RhôneAlpénergie-Environnement - Faire du froid avec la chaleur d'été des réseaux de chaleur – Guide et Rapport technique SUMMERHEAT décembre 2008

[2] Jean CASTAING-LASVIGNOTTES – CNAM – IFF – Aspect thermodynamiques et technico-économiques des systèmes à absorption liquide - 2001

[3] FICHE OX « CLIMATISATION A ABSORPTION » - ADEME -25/02/2002

Site Web :

www.trane.com

www.chaleurfraicheur.org

www.robur.com

www.sortech.de



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°6 : Les matériaux à changement de phase

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. LES CRITÈRES DE CHOIX D'UN MATÉRIAU À CHANGEMENT DE PHASE (MCP) POUR LE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE À HAUTE TEMPÉRATURE.....	4
2.1 Terminologie.....	4
2.2 Propriétés thermo-physiques.....	5
3. MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE.....	6
3.1 Classification.....	6
3.2 Les MCP commercialisés.....	9
3.2.1 Les produits de EPS Ltd.....	9
3.2.2 Les produits de RUBITHERM®.....	12
3.2.3 Les produits de Mitsubishi Chemical.....	16
3.2.4 Les produits PURETEMP.....	18
3.2.5 Les produits Astorstat® (by Honeywell):.....	19
3.2.6 Les produits Pluss Polymers Pvt. Ltd.....	19
3.2.7 Les produits de TEAP.....	20
3.2.8 Les produits de Climator.....	21
3.2.9 Le produit E-STOCKER de KAPLAN ENERGY.....	21
3.2.10 Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température (>150°C).....	22
4. LA MISE EN ŒUVRE DES MCP DANS UN SYSTÈME DE STOCKAGE.....	25
4.1 Les échangeurs de chaleurs tubulaires avec MCP intégrés.....	25
4.1.1 Méthode d'intensification des transferts de chaleur – Étude 1 - Ailettes.....	26
4.1.2 Méthode d'intensification des transferts de chaleur – Etude 2 – Le graphite.....	32
4.2 Les systèmes de stockage a lit à garnissage de MCP.....	36
4.2.1 Étude des transferts de chaleur d'un garnissage type rempli de MCP.....	36
4.2.2 Autres mise en œuvre de MCP pour le stockage.....	40
4.2.3 Le système RHTS.....	41
4.3 Les prototypes développés par le DLR.....	44
5. CONCLUSIONS - RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES.....	49
6. BIBLIOGRAPHIE.....	50

1. Introduction

Parmi les nouvelles technologies en forte voie de développement, on pourra noter l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). En effet, cette technologie connaît un développement croissant depuis quelques années du fait de sa capacité à stocker et restituer de grandes quantités d'énergie avec de faibles différentiels de température. Le principe essentiel de ces matériaux réside dans leur capacité à stocker de l'énergie durant leur changement d'état, l'énergie stockée correspondant alors à la valeur de l'enthalpie de changement de phase (qui se fait à pression et température constantes pour les corps purs).

Ces matériaux sont utilisés essentiellement pour le stockage de chaleur et ils permettent ainsi une récupération et une valorisation des énergies à bas niveaux de température avec une utilisation déphasée dans le temps grâce à leur utilisation couplée aux échangeurs de chaleur.

En effet, que ce soit pour contrôler les flux des énergies renouvelables intermittentes ou pour récupérer la chaleur contenue dans les rejets industriels, le stockage de l'énergie constitue une étape technologique incontournable pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représentent une grande part d'énergie perdue dans notre société. C'est aussi un point fort pour de la stratégie globale d'efficacité énergétique mais elle est en fait une étape critique.

Une piste prometteuse consiste à stocker l'énergie sous forme de chaleur, pour la restituer ensuite en fonction des besoins. Il existe plusieurs formes de stockage (sous forme de chaleur sensible dans un média solide ou liquide ; sous forme de chaleur latente ; par thermo-physique/thermochimie) mais dans ce cahier nous aborderons le thème du stockage par chaleur latente pour des applications à basse et moyenne température qui rentrent dans le scope de l'étude, à savoir dans la gamme des 70 °C-200 °C.

Le stockage par chaleur latente est lié au changement d'état des corps (solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz ou encore solide-solide). Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lors d'une transition de phase de la matière (le plus souvent solide - liquide), l'énergie injectée dans le matériau ou enthalpie de changement d'état, lui sert à changer de phase et la transformation inverse permet de libérer l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur.

Ces transformations se produisent généralement à température et pression constantes (pour les corps purs) et mettent en jeu des chaleurs latentes intéressantes (> 150 kJ/kg). Ainsi, par rapport au stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des volumes réduits et des différentiels de température très faibles (cf. Figure 1).

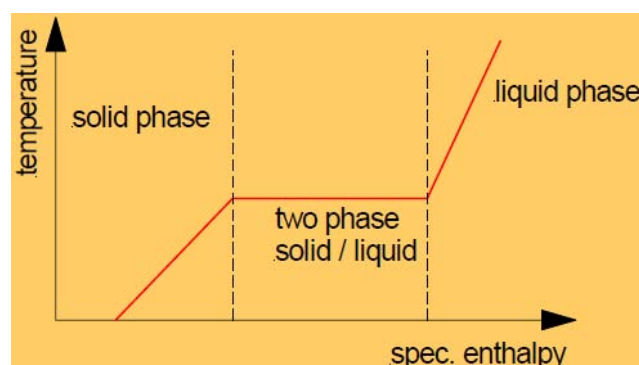


Figure 1 : Représentation du changement de phase d'un matériau

L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. De plus (et contrairement au stockage sensible) ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. Par exemple, comparons l'énergie stockée pour un $DT=10K$ pour 1kg d'un MCP ayant une enthalpie de changement d'état de 150kJ/kg, une capacité thermique massique de 2kJ/kg.K, et pour 1kg d'eau ($C_{p_{eau}}=4.18kJ/kg.K$) [Source Cadet/GRETh] :

Avec le MCP (sensible+ latent) :

$$Q = m.C_p.\Delta T + m.\Delta H = 1*2*10 + 1*150 = 170 \text{ kJ} = 47.2 \text{ Wh}$$

Avec l'eau (sensible) :

$$Q = m.C_p.\Delta T = 1*4.18*10 = 41.8 \text{ kJ} = 11.6 \text{ Wh}$$

} Facteur 4

Dans le domaine de la valorisation des énergies à bas niveaux de température, l'étude de l'intégration de systèmes de stockage avec MCP est donc intéressante du fait d'un temps différé entre l'utilisation et la production. En effet, la plupart des industries produisent continuellement des rejets thermiques à un degré plus ou moins haut de température, mais la possible utilisation de ces derniers est parfois en déphasage avec la production et il est donc nécessaire de pouvoir stocker la chaleur efficacement et de pouvoir la restituer en fonction de besoins. De plus, la recherche de compacité est actuellement au cœur des préoccupations des industriels, que ce soit dans le domaine des échangeurs de chaleur que dans les process eux-mêmes, ainsi un système de stockage se doit d'être lui aussi compacte mais doit pour autant pouvoir stocker des quantités importantes de chaleur. Dans ce cadre là, les MCP ont des atouts indéniables en termes de rapport entre volume de matériau est quantité d'énergie stockée. C'est donc pour toutes ses raisons que cette fiche fait l'objet d'un état de l'art dans le domaine des matériaux à changement de phase dans la gamme de température que le scope de l'étude a fixé (70°C-200°C).

2. Les critères de choix d'un matériau à changement de phase (MCP) pour le stockage par chaleur latente à haute température

Les matériaux à changement de phase utilisés pour le stockage doivent présenter un coût attractif, une forte enthalpie de changement de phase et une bonne conductivité thermique. La stabilité de ces produits, leurs propriétés thermo-physiques et leur comportement au changement de phase (effet d'hystérésis, ..) sont aussi des paramètres importants. La méthode de production de ses matériaux est aussi un critère qui influe sur son prix et son empreinte carbone.

2.1 Terminologie

MCP : Matériau à Changement de Phase (Phase Change Material (PCM))

HTF : Heat Transfer Fluid (fluide caloporteur)

Micro-encapsulation: La micro-encapsulation est un procédé par lequel on enferme un produit, solide, liquide ou pâteux, dans des microparticules. Leur taille varie de 1μ à $1000\mu m$. Le MCP est encapsulé dans une microcapsule. Il y a donc une paroi étanche qui sépare le MCP du fluide porteur.

2.2 Propriétés thermo-physiques

Les principales propriétés thermo-physiques à prendre en compte pour caractériser le MCP ainsi que les paramètres de performances qui en découlent sont résumés dans les tableaux suivants :

Propriétés thermiques	Propriétés physiques	Propriétés chimiques	Propriétés économiques
Température de changement de phase liée à l'application	Faible variation de densité	Stabilité mécanique et thermique	Abondant et bon marché
Haute enthalpie de changement d'état à la température d'utilisation	Forte densité	Pas de séparation de phase	
Une conductivité thermique élevée dans les deux phases liquide et solide	Pas de sous-refroidissement (ou faible)	Compatible avec les matériaux de stockage (corrosion) Non toxique, non inflammable et non polluant	

Tableau 1 : Paramètres de choix d'un MCP [Cadet/GRETh]

Propriétés thermo-physiques de stockage	Paramètres de performances	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Température de congélation, vaporisation et liquéfaction (à P atmosphérique)	Température minimale et maximale de stockage comprise entre 70 °C et 200 °C	Choix des matériaux du contenant de stockage
-Masse volumique ρ [kg/m ³] solide et liquide -Chaleur latente de changement de phase [J/kg]	-Capacité thermique massique de stockage (kWh/kg ou J/kg) -Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ ou J/m ³)	-Volume et masse du dispositif de stockage -Prise en compte du changement de volume dû au changement d'état
Solide : -Conductivité thermique λ [W/m.K]	Temps de décharge	Conception/Dimensions

<p>Liquide : -Conductivité thermique λ [W/m.K] -viscosité cinématique ν [m²/s]</p>	<p>Temps de charge</p>	<p>des briques élémentaires de stockage pour répondre à la dynamique de la source.</p>
--	------------------------	--

Tableau 2 : Propriétés thermo-physiques des MCP pour le stockage en chaleur latente [Cadet/GRETh]

3. Matériaux et mise en œuvre

3.1 Classification

Le stockage d'énergie thermique, comme on a pu le voir dans le cahier introductif, se réalise sous différentes formes qui sont résumées dans la figure 2 suivante :

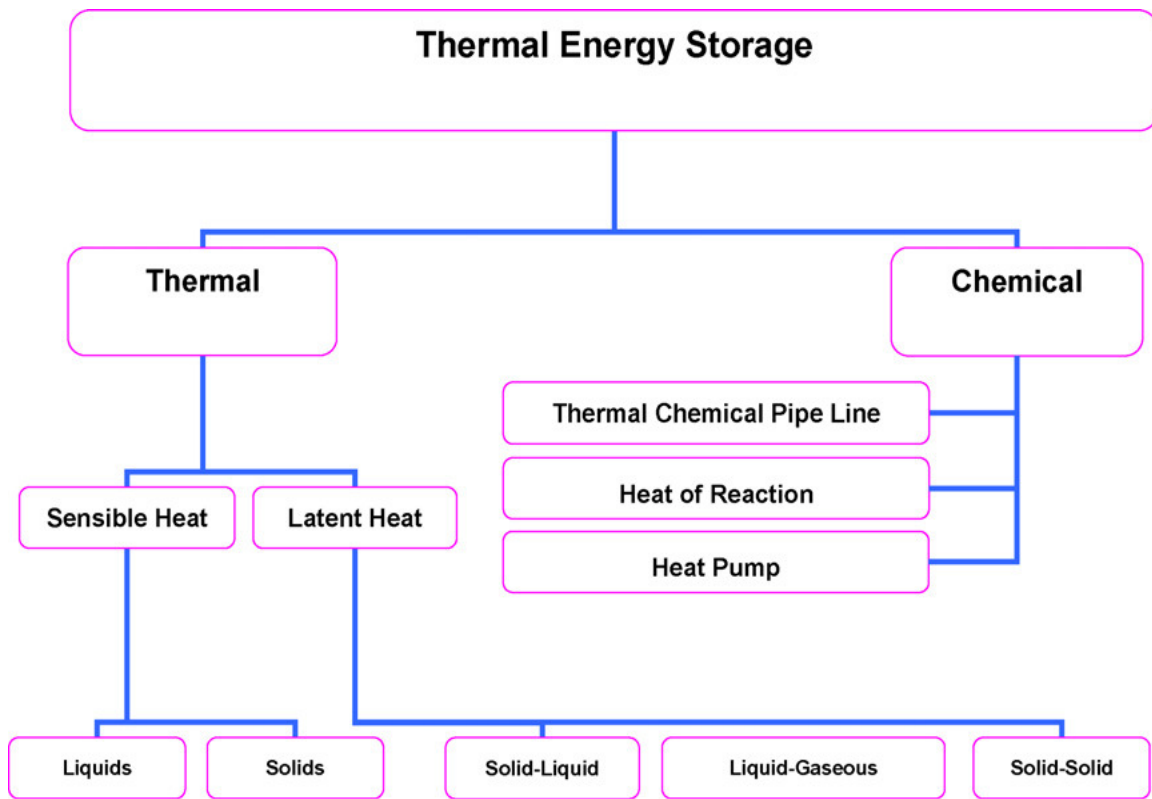


Figure 2 : Classification des techniques de stockage de chaleur [4]

Parmi les différents modes de stockage en chaleur latente (solide/liquide ; liquide/gaz ; solide/solide), il existe plusieurs catégories de MCP suivant leur composition :

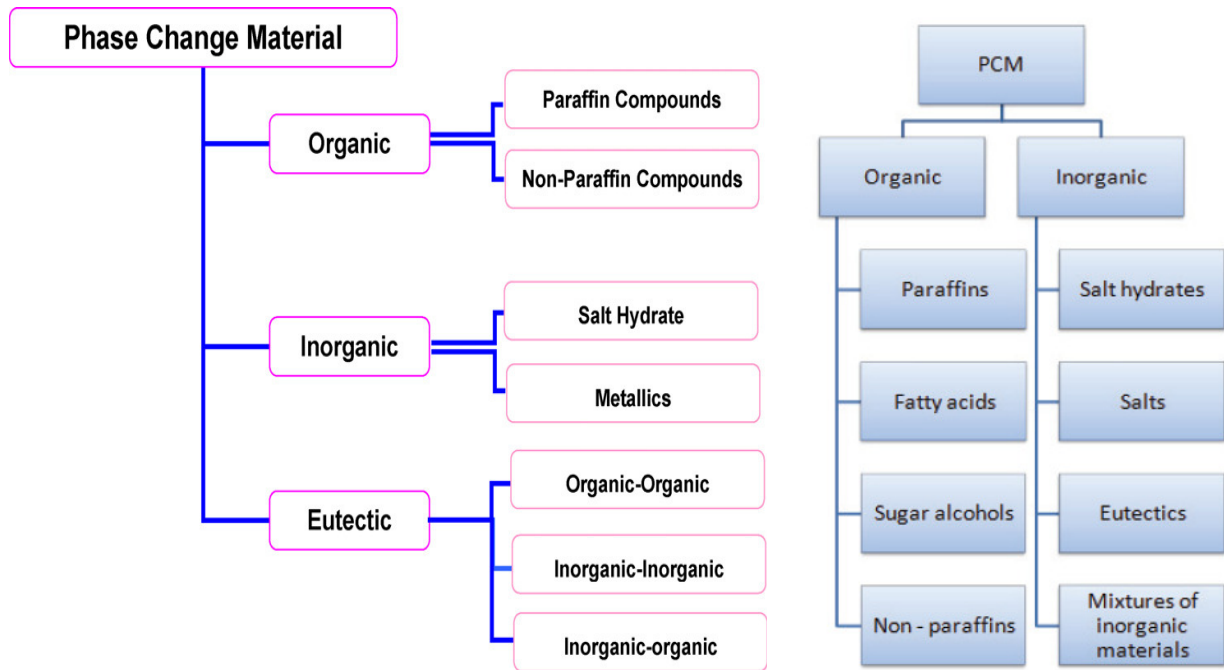


Figure 3 : Classification des types de MCP pour le stockage de chaleur [4]

-**Les sels hydratés** (hydrates) sont des composés de sel et d'eau qui ont l'avantage de posséder une forte chaleur latente de fusion en raison de leur forte teneur en eau, mais ces sels ont également des inconvénients majeurs qui influent défavorablement dans la stabilité de leur propriété enthalpique. En effet, au fur et à mesure des cycles de Charge/Décharge, il apparaît une ségrégation de phases, qui se traduit par une décantation du sel au fond de la solution et, par conséquent, la capacité thermique de stockage de la solution diminue. Le processus est progressif et irréversible.

-**Les Eutectiques.** Chacun d'entre eux est un mélange de deux corps purs, voire plus, qui fond et se solidifie à température constante, contrairement aux mélanges habituels. Il se comporte en fait comme un corps pur du point de vue de la fusion/solidification.

Le mélange fond complètement à la température de fusion, et celui-ci possède, dans les phases liquide et solide, les caractéristiques physiques d'un MCP.

-**Les Organiques** ont une faible densité et une faible conductivité thermique. Ils sont relativement coûteux et inflammables. Le premier exemple est une cire de paraffine.

-**Les clathrates** sont des composés chimiques constitués par un complexe d'inclusion formé d'une ou plusieurs molécules hôtes qui emprisonnent une autre molécule. Dans la pratique, pour les applications de stockage d'énergie thermique, l'eau forme la structure de liaison pour les clathrates. Les clathrates les plus couramment utilisés sont les fluides frigorigènes.

Vous trouverez dans le tableau 3 les principaux avantages et inconvénients des MCP organique et inorganique :

	Avantages	Inconvénients	Exemples de MCP
Organique	<ul style="list-style-type: none"> -Simple d'utilisation -Non corrosif -Pas de surfusion -Aucun agent de nucléation 	<ul style="list-style-type: none"> -Généralement cher -Faible chaleur latente/densité -large plage de changement d'état -Peut être inflammable -fortes variations de volume lors du changement de phase 	<ul style="list-style-type: none"> -La cire de paraffine -polyéthylène glycol -le polyéthylène haut densité -l'acide stéarique (C18H36O2) -l'acide palmitique (C16H32O2)
Inorganique	<ul style="list-style-type: none"> -forte chaleur latente de fusion -bonne conductivité thermique -non-inflammable - bon marché 	<ul style="list-style-type: none"> -corrosif pour la plupart des métaux -décomposition de phase - surfusion 	<ul style="list-style-type: none"> -Hexahydrate de chlorure de calcium (CaCl2 6H2O.) -sulfate de sodium décahydraté -le sel de Glauber (Na2SO4 10H2O.) -carbonate de sodium décahydraté (Na2CO3 10H2O.)

Tableau 3 : Avantages et Inconvénients des MCP organique et inorganique [Cadet/GRETh]

On peut aussi identifier les MCP en fonctions de leur gamme de température d'utilisation :

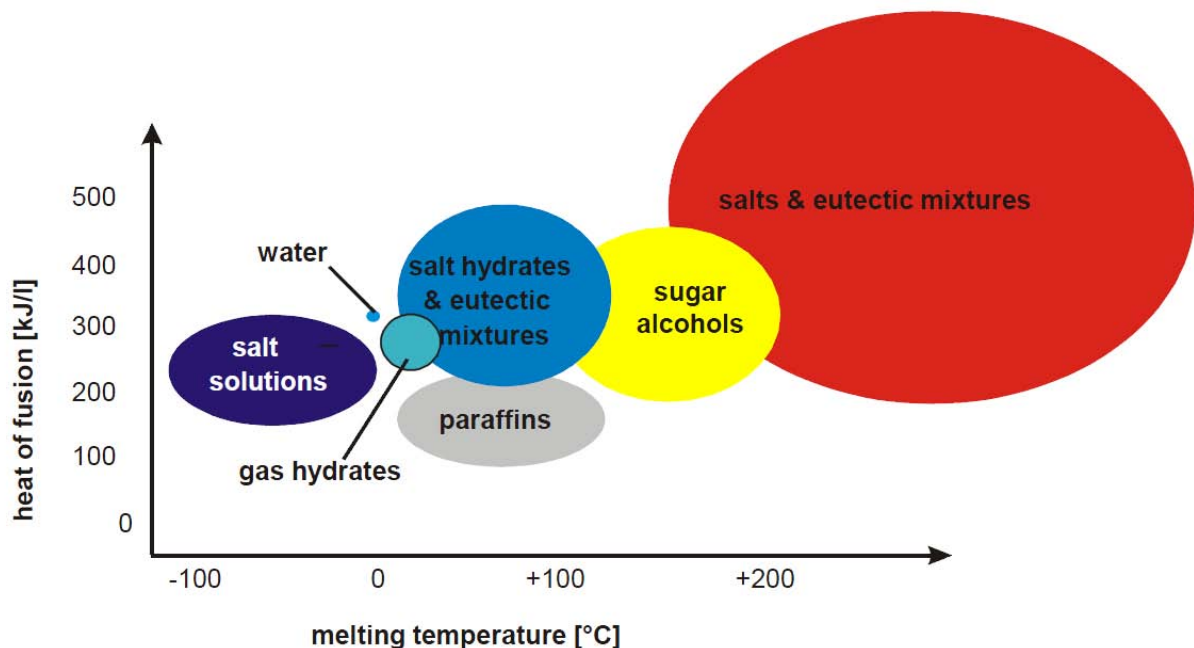


Figure 4 : Répartition des différents MCP en fonction de leur gamme de température d'utilisation

On peut observer sur la figure 5 qui suit, la capacité de stockage des actuels MCP comparée à celle des stockages thermiques à chaleur sensible liquide (eau) et solide (pierre) pour des applications à basse température :

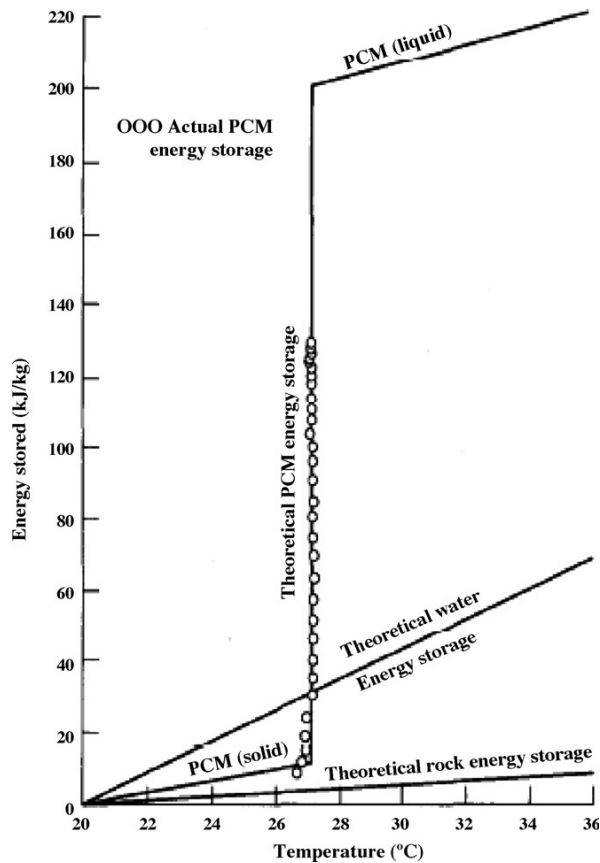


Figure 5: Performance comparison of PCM, water and rock heat storage system [2]

3.2 Les MCP commercialisés

Ces dernières années, de nombreux MCP ont été développés pour des applications à basse température (<70°C), qui sont aussi et surtout en lien avec les applications de la thermique du bâtiment (stockage solaire, isolation, chauffage et climatisation passive).

Dans ce chapitre, nous allons détailler les différents produits (Température d'application, type d'application, confinement, densité...etc.) que commercialisent les différents fabricants dans la gamme de température de l'étude (70°C et 200°C) qui est plus restreint que celle des basse températures.

3.2.1 Les produits de EPS Ltd

L'entreprise EPS Ltd., est une des entreprises qui fabrique des matériaux à changement de phase, notamment des MCP de différents types (sels hydratés, solutions salines, organique, MCP solide/solide). Voici une liste de ses produits pour des températures de changement d'état comprises entre 70°C et 200°C :

PlusICE PCM RANGE (HYDRATED SALT)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m ³]- [kWh/m ³]	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]
S117	117	1450	169	245-68	2.61	0.7
S89	89	1550	163	253-70.2	2.48	0.670
S83	83	1600	152	243-67.5	2.31	0.620
S72	72	1666	140	233-64.7	2.13	0.580

Tableau 4: hydrated salt based PCM solution (Tm<100 °C) (EPS Ltd)

PlusICE PCM RANGE (ORGANIC)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m ³]-[kWh/m ³]	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]
A164	164	1500	306	459-127.5	-	-
A144	144	880	230	202-56.1	2.2	0.230
A133	133	880	222	195-54.2	2.2	0.230
A95	95	900	202	182-50.5	2.2	0.220
A82	82	850	170	145-40.3	2.21	0.220
A70	70	890	220	196-54.4	2.2	0.230

Tableau 5: organic PCM solution (EPS Ltd)

PlusICE SOLID-SOLID SOLUTIONS						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]		Chaleur Latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	
		Avant Changement de phase	Après Changement de phase		Avant Changement de phase	Après Changement de phase
X180	180	1330	1220	301	0.993	0.508
X80	80	1193	1120	192	0.31	0.335

Tableau 6 : solid-solid PCM solution (T_m<100 °C) (EPS Ltd)

PlusICE PCM RANGE (Salt Based Solution)				
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m ³] – [kWh/m ³]
H110	110	2145	243	521-144.7
H125	125	2220	221	491-136.4
H134	134	2200	-	-
H143	143	2360	248	585-162.5
H157	157	1550	-	-
H167	167	1910	-	-
H191	191	2300	165	380-105.5
H220	220	2000	-	-
H227	227	1553	-	-
H254	254	2380	160	381-105.8

Conductivité thermique d'environ 0.5 W/m.K pour la phase solide et de 1 W/m.K pour la phase liquide.

Tableau 7 : Salt based PCM solution (EPS Ltd)

La catégorie des MCP SOLID/SOLID est encore en cours de développement et la gamme devrait s'élargir. Ce type de « MCP » dit à transition « solide/solide » vient du fait de leur changement de structure cristalline, leur enthalpie de transition est comparable aux plus efficaces des MCP solide/liquide. En outre, parce que c'est un changement de phase solide/solide, il n'y a pas de changement visible du MCP (autre qu'une légère expansion / contraction volumique), et il n'y a pas de problème lié à la manipulation de liquides, à savoir le confinement, la possibilité de fuite...etc.

On peut donc voir que l'entreprise EPS Ltd développe de nombreux MCP pour des applications à basse et moyenne température mais elle propose aussi un système global d'encapsulation du MCP sous forme de barreaux (PlusICE beam, cf. Figure 12), de tube (TubelCE Concept pour les hydrates de sels, cf. Figure 10), ainsi ces macro-encapsulations de MCP sont intégrés directement dans les réservoirs de stockage.

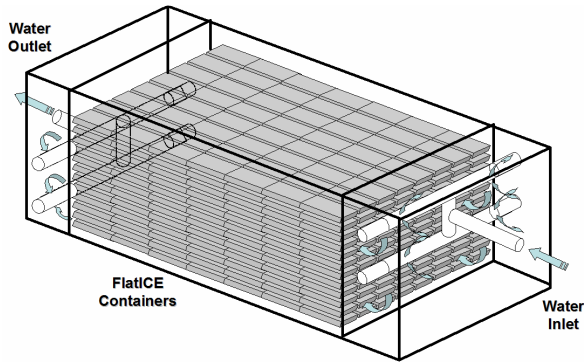


Figure 6 : MCP containers (HTF:water)

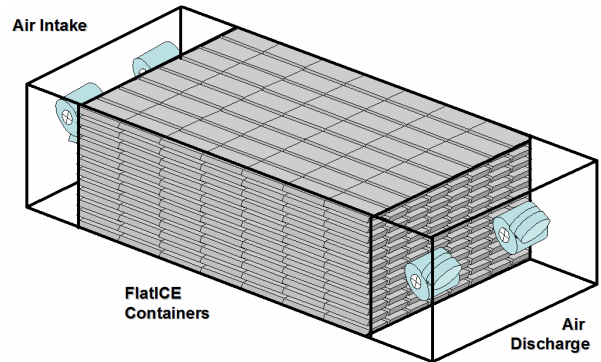


Figure 7 : MCP containers (HTF:air)

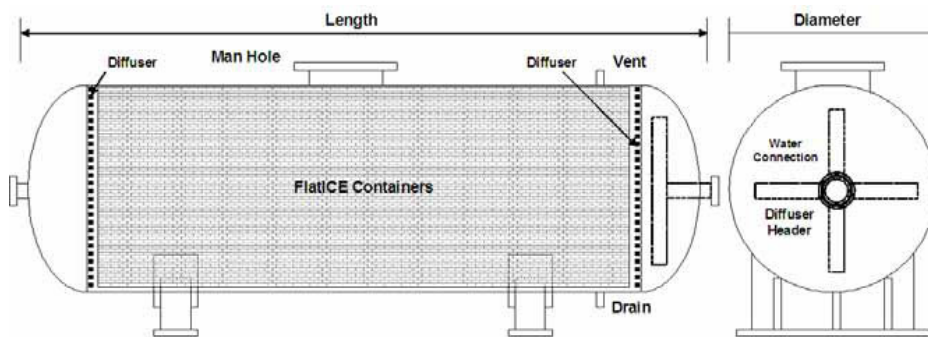


Figure 8 : cylindrical Tank



Ses réservoirs peuvent être disposés à l'extérieur, à l'intérieur d'un bâtiment ou dans le sol (enfouissement). Les encapsulations peuvent être agencées dans des réservoirs en acier ou en GRP (Glass Reinforced Polyester), mais aussi en béton, qui est une bonne solution pour une installation pratique et économique.

-TubelICE & PlusICE beam :

Le produit TubelICE est constitué d'un contenant plastique dans lequel est confiné un MCP. Ce produit TubelICE, se présente donc comme un tube (cf. Figure 10), sa gamme de températures d'utilisation est plus large, elle permet de stocker les MCP de la gamme S72 à S117 pour des températures positives ($72^{\circ}\text{C} < T_{\text{fusion}} < 117^{\circ}\text{C}$). (Le produit peut aussi contenir la gamme de MCP E0 à E-37 pour des stockages à températures négatives ainsi que la gamme de S7 à S72 qui ne concernent pas cette étude).

Le MCP peut aussi être confiné dans des barres en métal. (cf. Figure 12).

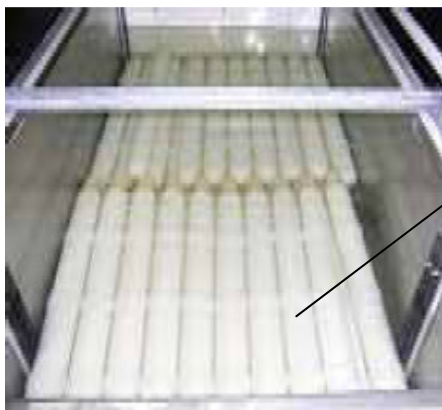


Figure 9 : TubelICE storage

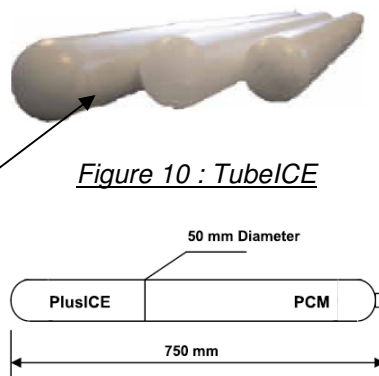


Figure 10 : TubelICE

Figure 11 : TubelICE Dimensions

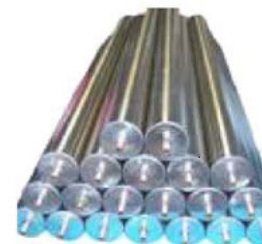


Figure 12 : PlusICE beam

Il peut être entreposé dans des réservoirs de mêmes technologies.

-BallICE :

Le produit BallICE, sous forme de balles (sphères) en caoutchouc/plastique, est destiné à de plus petites installations, comme par exemple des installations de stockage solaire domestiques.



Figure 13 : BallICE Design

Il permet de stocker les MCP de la gamme organique pour les références A70 à A95 ($70^{\circ}\text{C} < T_{\text{fusion}} < 95^{\circ}\text{C}$). Il peut être produit avec différents diamètres de sphère et n'importe quel MCP de la gamme A. Mais avec, par exemple, une taille optimum de sphère de 40 mm de diamètre en utilisant les références de MCP A82, l'expérience valide cette solution comme étant la plus intéressante pour un stockage de chaleur. Les sphères peuvent être introduites dans des réservoirs rectangulaires ou cylindriques et fonctionner aussi bien à pression atmosphérique que sous pression plus élevée offrant ainsi une grande variété d'applications de stockage de chaleur.

3.2.2 Les produits de RUBITHERM®

RUBITHERM propose de nombreux MCP pour une gamme comprise entre -3°C et 100°C et ne commercialise donc qu'un seul MCP pour une température de 100°C appelé RT100. C'est un MCP à base de n-paraffine et de cire dont voici ses principales caractéristiques :

Propriétés:

- Grande capacité de stockage d'énergie thermique
- Stockage de la chaleur et la libération lieu à une température relativement constante
- Aucun effet de surfusion
- Produit à longue vie, avec des performances stables à travers les cycles de changement de phase
- Écologiquement inoffensif et non toxique
- chimiquement inerte



Gamme de température de fusion	90°C-112°C (typ. 100°C)
Capacité thermique de stockage (chaleur latente)	124kJ/kg soit 28.4 kWh/m ³
Densité solide	880 kg/m ³
Densité liquide	770 kg/m ³
Expansion de volume	14%
Conductivité Thermique	0.2 W/m.K
Viscosité cinématique	63.75 mm ² /s
Point éclair	312°C
corrosion	chimiquement inerte vis-à-vis de la plupart des matériaux

Tableau 8 : Principales propriétés physiques du MCP RT100 de RUBITHERM

Nom du MCP	Temp. de fusion [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	Expansion de volume [%]	Densité [kg/m ³]	
					liquide	solide
RT82	82	176	0.2	14	770	880
RT100	100	124	0.2	14	770	880

Tableau 9 : Propriétés thermo-physiques de la gamme RUBITHERM® RT

Ce MCP peut être confiné dans un module de stockage compact développé par RubiTherm appelé CSM-Panels.

On pourra constater que ces MCP organiques ont une forte enthalpie de changement d'état, mais une très faible conductivité thermique ce qui est en fait pénalisant pour des applications de stockage thermique. Néanmoins, cette gamme est la seule de RUBITHERM à avoir un MCP avec une température de fusion proche de 100°C.

-GR pour les granulés :



Ce sont des granulés dans lesquels sont liés au moins 35% de MCP.

Ce système offre l'avantage de conserver sa forme macroscopique solide au cours du changement de phase. Le MCP est inséré au sein d'une structure secondaire de soutien de type minérale poreuse. Ce système garanti que le MCP ne fuit pas du granulé à l'état liquide.

Caractéristiques du produit

- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- pas d'expansion de volume pendant le changement de phase
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- performances stables au cours des cycles de changement de phase
- élimine la manipulation de liquide
- existe en différentes tailles de granulés

Nom du MCP	Temp de fusion [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	Expansion de volume [%]	Densité Apparente (en vrac) [kg/m ³]	Compo.	Chaleur latente volumétrique [KWh/m ³]
GR82	82°C (Tmax utilisation= 110°C)	58	0.2	aucune	800	SiO ₂ , Paraffine	12.9

Tableau 10 : Propriétés thermo-physiques de la gamme RUBITHERM® GR

On constate encore la faible conductivité thermique de ce MCP mais aussi une faible chaleur latente de fusion (facteur 3 à 4 par rapport à la gamme RT), du fait des faibles quantités de MCP liées aux granulés, en revanche il n'a aucune expansion volumique au changement d'état.

-PX pour les poudres :

Fine poudre sèche composée n de MCP (60% environ) contenue dans une poudre de silice hydrophile écologique. Le point de fusion du matériau de stockage à chaleur latente est défini par l'application.

La poudre permet le remplissage des réceptacles de n'importe quelle géométrie i possible.



Caractéristiques du produit

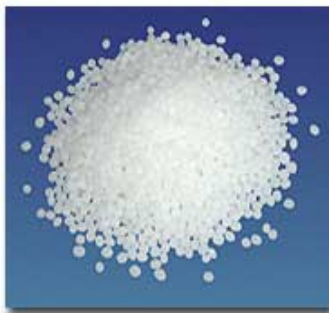
- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- performances stables au cours des cycles de changement de phase
- manipulation facile

Nom du MCP	Temp. de fusion [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	Exp. de volume [%]	Densité Apparente(en vrac) [kg/m ³]	Taille de particule [µm]	Chaleur latente volumétrique [KWh/m ³]
PX82	82°C (Tmax utilisation =110°C)	116	0.1	aucune	694	250	22.3

Tableau 11 : Propriétés thermo-physiques de la gamme RUBITHERM® PX

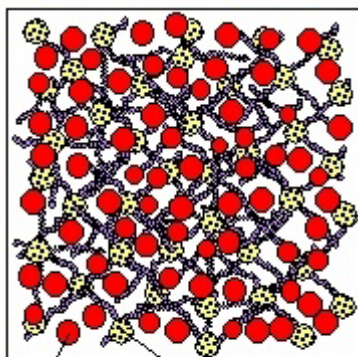
De même que tous les MCP précédents, on note une faible conductivité thermique.

-PK pour les composés :



RUBITHERM PK est un composé avec une teneur très élevée en MCP et donc à capacité de stockage élevée, ce qui rend ce matériau intéressant pour une utilisation dans les unités de stockage par chaleur latente. Un additif spécial est incorporé, qui lie le MCP dans une structure réticulée (cf. Figure 14). Cela garantit que le MCP ne s'échappe de la structure porteuse, même à l'état liquide ou en cas de dommages physiques.

En fonction de la température de fusion du MCP lié au produit PK, le produit est plus ou moins flexible et de couleur blanche à l'état solide. Lorsque le produit est chauffé jusqu'à l'origine du point de fusion, le matériau devient transparent et très flexible.



PCM Cross-linked structure

Figure 14 : MCP dans une structure réticulée

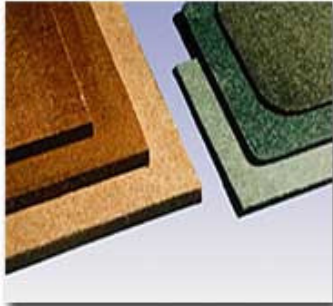
Caractéristiques du produit

- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- élimination de la manipulation de liquide
- très flexible (surtout à l'état liquide)
- petit changement de volume lors du changement de phase
- Disponible pour des températures de fusion supérieures à 40°C.**

On pourra remarquer que sa conductivité thermique est très proche de celle de l'eau liquide, qui est donc une très bonne caractéristique pour le stockage thermique, ainsi que leur très forte chaleur latente de fusion (>150kJ/kg). On pourra utiliser ce MCP pour des applications à basse température comme par exemple, pour un chauffage/refroidissement passif.

-FB pour (Fiber Boards) les panneaux de fibres :

Ce produit est un matériau à changement de phase lié au sein d'une structure secondaire, dans ce cas, un panneau en fibre de bois naturel. Il contient environ 65% de MCP.

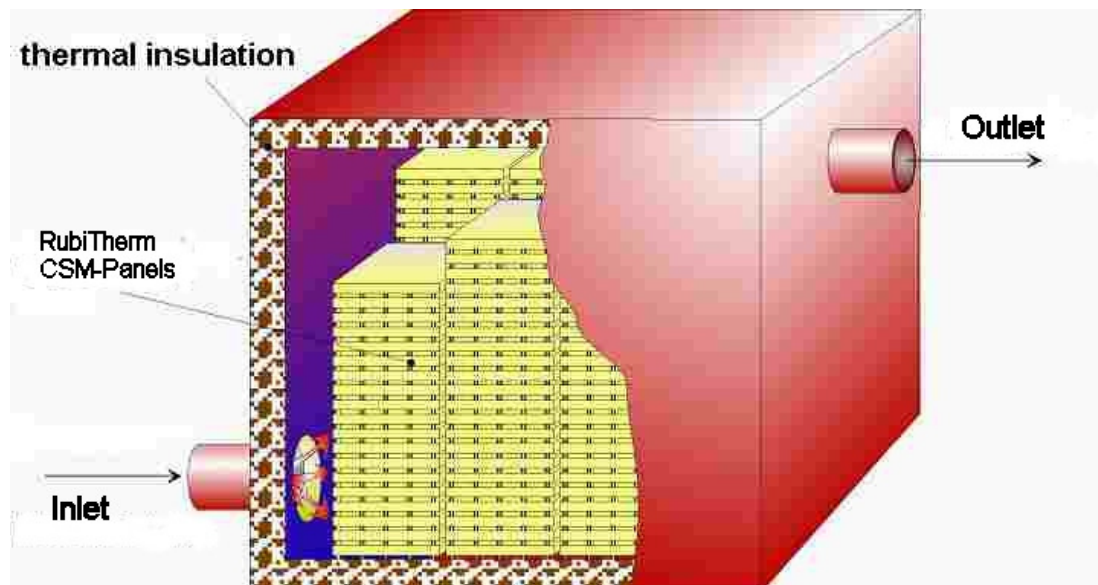


Caractéristiques du produit

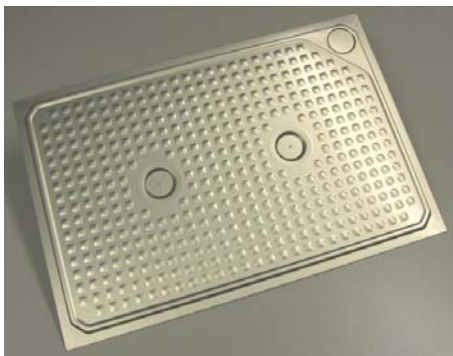
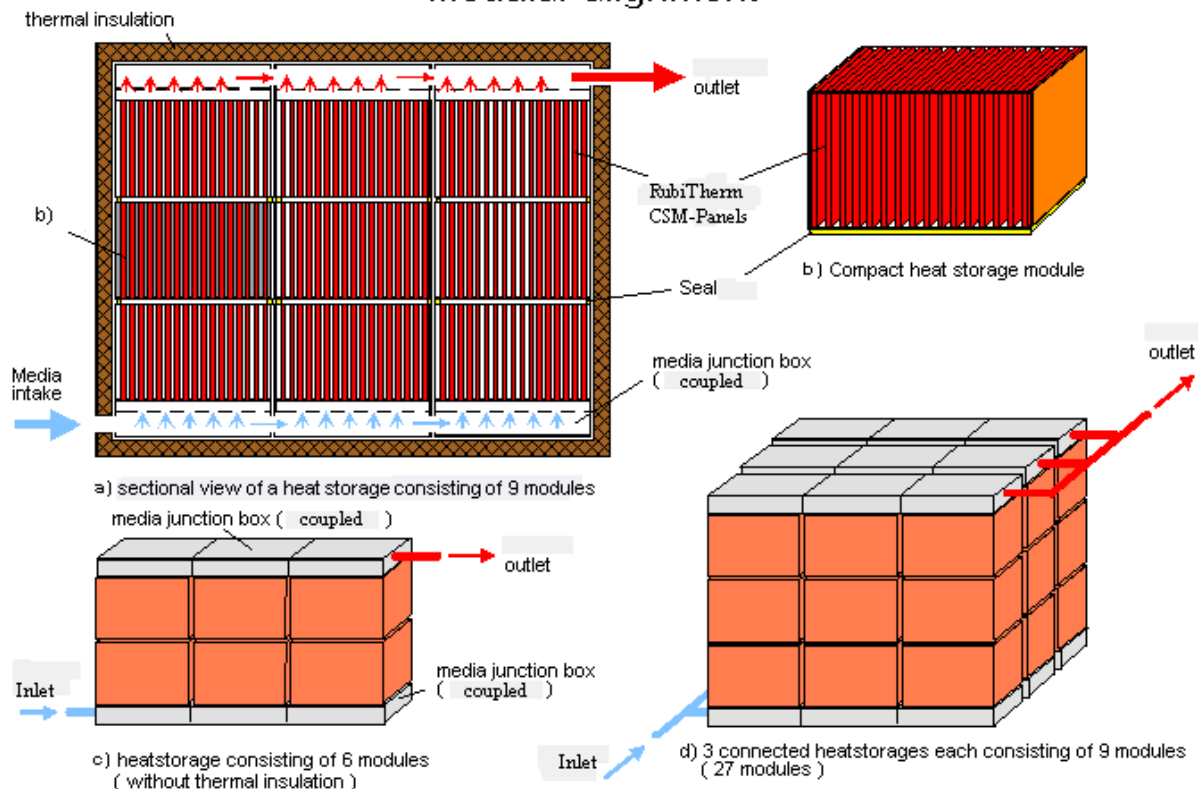
- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- élimine la manipulation des liquides
- plusieurs épaisseurs de panneau sont disponible (5.5mm, 7mm et 9mm)

Ce type de confinement de PCM est surtout utilisé pour le transport de nourriture, plats chauds...etc.

RUBITHERM propose aussi un système de stockage compact, qui se présente sous la forme d'un réservoir, entouré d'isolation, dans lequel se trouvent des panneaux de modules de stockage compact (CSM Panels) dans lesquels est placé le MCP.



Modular alignment



RubiTherm CSM Panel

- statiquement stable
- non-inflammable
- bonne conductivité thermique
- volume adaptable
- revêtement anticorrosion
- utilisable avec n'importe quel médium
- utilise le volume maximal
- facile à nettoyer
- pas d'évacuation supplémentaire
- adapté à de grandes quantités
- accessible dans les modules
- Remplissage avec le MCP en correspondance avec l'application.

Dimensions: 45,3 x 30,3 x 1 cm avec la bordure

Dimensions effective: 43 x 28 x 1 cm

Volume de remplissage: environ 700 ml

Ce type de panneau en métal permet d'accroître la conductivité thermique par rapport au MCP seul.

En résumé, la gamme des MCP RUBITHERM® offre une variété de MCP et de confinement pour différentes applications.

3.3.3 Les produits de Mitsubishi Chemical

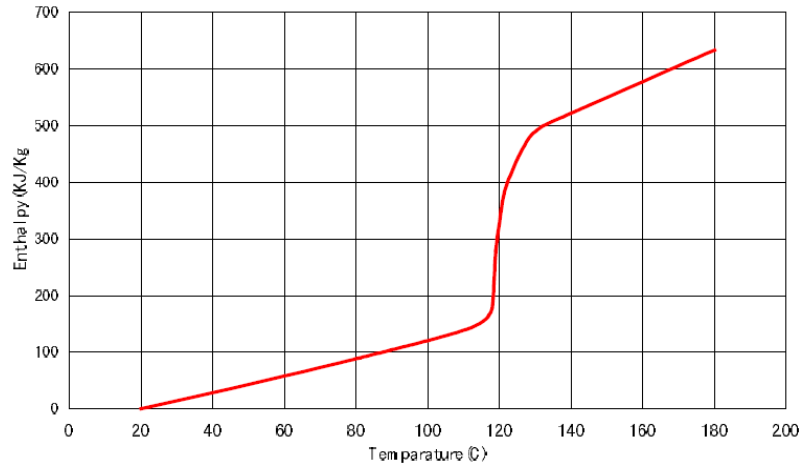
Mitsubishi Chemical propose des MCP pour une gamme de température de 10°C à 118°C. Néanmoins, il est très difficile de trouver, aussi bien dans les ouvrages et articles, que sur leur site internet, les noms associés à ses PCM ainsi que leur caractéristiques. Voici tout de même une liste de ses PCM pour des températures de fusion supérieure à 100°C :

Produit	Composant	Temp changement de état [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]
STL 120	erythritol	120	320
?	Meso-erythritol	118	339.8

Tableau 12 : Principales propriétés physiques des MCP de Mitsubishi Chemical [13]

L'erythritol est à un prix d'environ 5US\$/kg.

Voici la courbe enthalpique en fonction de la température de l'erythritol [13]:



Néanmoins dans une publication sur l'erythritol de Mitsubishi, une étude cinétique a été réalisée. Un conteneur cylindrique en acier inoxydable de volume $6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ a été construit, pour évaluer le comportement de solidification et de fusion de ce produit. Il a été introduit 0,05 kg dans un récipient et un capteur placé à 10 cm du fond mesure le changement de température qui est enregistré. Des thermocouples de type T (cuivre-constantan) ont été utilisés pour la mesure. Le récipient contenant de l'erythritol a été coulé dans un bain d'huile à température contrôlée et chauffé pour faire fondre l'erythritol de 30°C à 140°C en 3 heures. Puis, en tenant à 140°C pendant 6 heures, l'erythritol a complètement fondu. Ensuite, le chauffage a été coupé pour solidifier l'erythritol, le bain d'huile est refroidi naturellement. Un changement de température de l'erythritol est illustré sur la figure 12. Lorsque le chauffage a commencé, la température de l'erythritol a augmenté avec l'huile et s'est stabilisée vers 119°C. Dans le processus de refroidissement, le changement de température n'a pas été observé. Après cela, l'erythritol a cristallisé à 82°C et la température s'est élevée au niveau de la température de fusion. Il se trouve que l'erythritol cristallise entre 60°C et 100°C. Nous pensons qu'un agent de nucléation devient nécessaire afin d'inhiber la surfusion si il est utilisée dans un système de stockage de chaleur de type capsule.

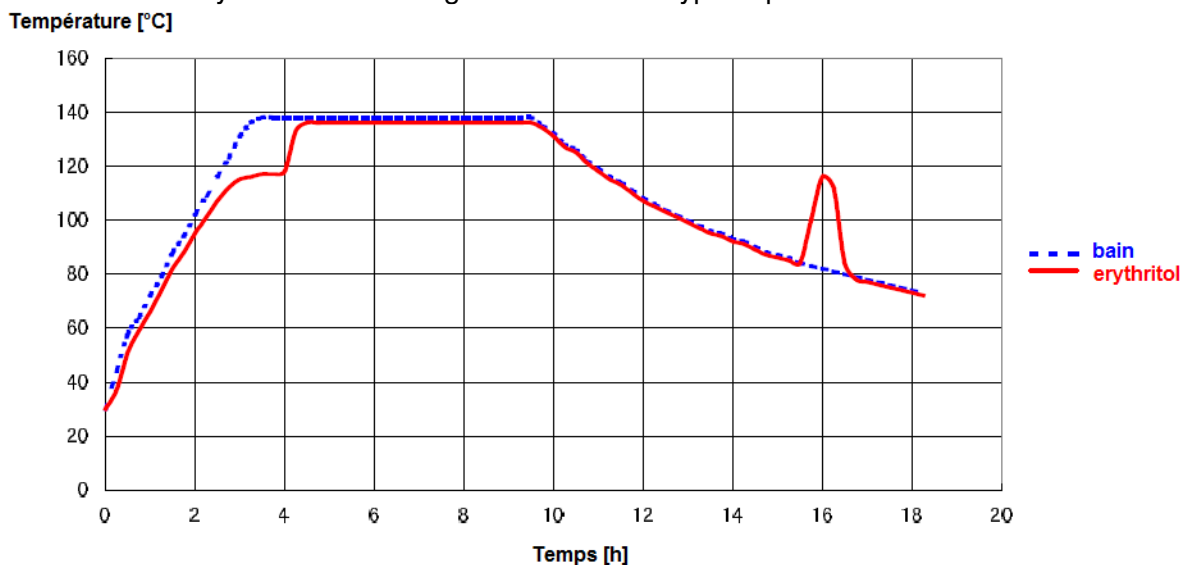


Figure 15 : évolution de la température de l'erythritol (fusion et solidification) [13]

L'erythritol à fondu de manière congruente et la séparation de phase n'a pas été observée. Aucun phénomène de surfusion ne s'est manifesté. Cette étude a permis de constater que l'erythritol cristallise dans une gamme de température comprise entre 60°C et 100°C degrés.

Durant cette étude, le MCP a montré une bonne stabilité thermique, ainsi qu'un bon taux de décharge. (97% de l'énergie théorique). Nous verrons par la suite que ce comportement a mieux été étudié par Agyenim [10] et [11].

3.3.4 Les produits PURETEMP

Le fabricant de **PURETEMP** propose lui aussi une gamme assez large de MCP (plutôt à basse température). Aujourd'hui, la plupart des PCM sont des formulations chimiques issues de produits pétroliers, de sels ou d'eau. Les MCP PURETEMP brevetés sont à base végétale dérivée de graisses et d'huiles naturelles. Ces MCP ont été soumis à plus de 65000 cycles thermiques et l'expérience a montré qu'il n'y a pas de dégradation des performances thermiques. Voici sur la figure suivante une analyse des performances pour un des MCP PURETEMP :

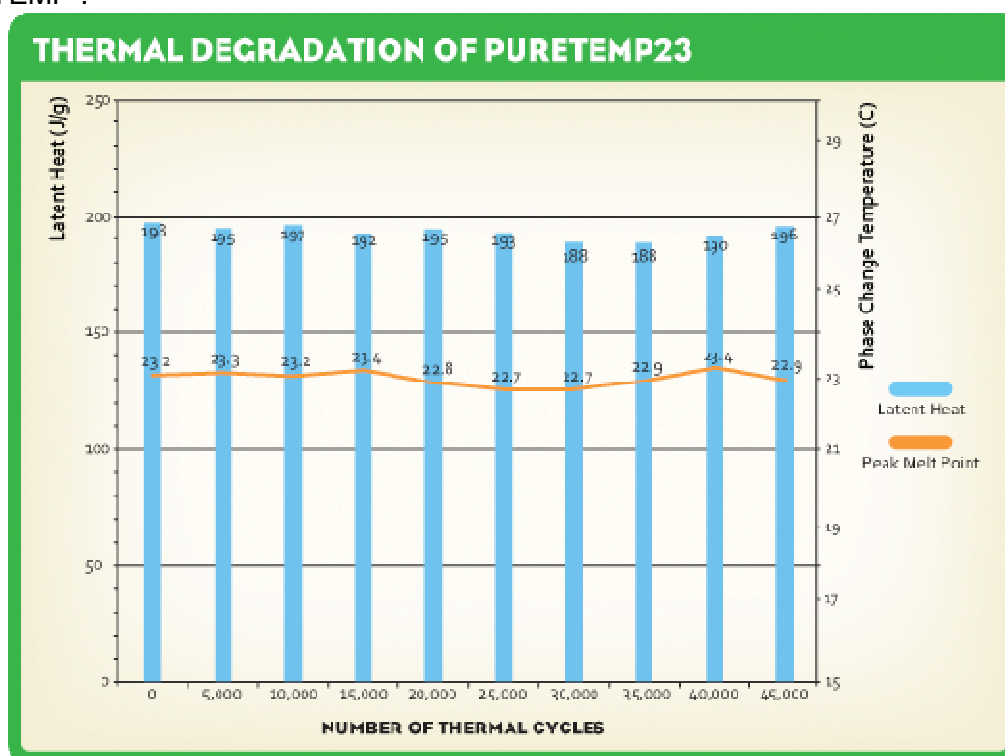


Figure 16 : Analyse des performances thermiques d'un MCP PURETEMP en fonction du nombre de cycles thermiques

Dans leur gamme de MCP, nous avons pu identifier 4 MCP ayant une température de changement de phase de plus de 70°C :

Produit	Température de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]	Chaleur latente [kJ/kg]	Chaleur spécifique [J/kg.k]		Chaleur latente volumétrique [MJ/m ³]-[kWh/m ³]
				Solide	liquide	
PT103	103	1220	157	2.09	2.28	191.5-53.2
PT130	130	-	-	-	-	
PT142	142	-	-	-	-	
PT151	151	1360	170	2.06	2.17	231.2-64.2

Tableau 13 : Les MCP de PureTemp ayant une Température de fusion supérieure à 70°C

Les produits PURETEMP propose plusieurs méthodes de confinement pour ces MCP (micro et macro encapsulation, films souples, tuyaux métalliques, panneaux et sphères en plastiques). Le confinement d'un MCP est dépendant de nombreux facteurs et il convient d'adapter le choix du confinement en fonction des gammes de température et de l'application.

3.2.5 Les produits Astorstat® (by Honeywell):

L'entreprise **Honeywell Chemical** développe aussi des matériaux à changement de phase sous la gamme **Astorstat®**, il s'agit de cires de paraffine synthétiques. Elles sont utilisées par le bureau d'ingénierie **PCM Thermal Solutions** pour de nombreuses applications tel que le stockage de chaleur. Voici la liste des produits pour des applications à haute température :

Nom de Produit	Température de congélation [°C]	Expansion de volume
Astorstat 174	78.4-79.5	13-15
Astorstat 181	82.3-83.4	14-16
Astorstat 200	92.8-94	14-16
Astorstat 215	101.2-102.3	14-16
Astorstat 10069	105.1 °C-106.2 °C	14-16%
Astorstat 10316	109 °C-110.6 °C	15-17%
Astorstat 6920	124 °C-129.5 °C	16-18%
Astorstat 6988	129.5 °C-135.1 °C	16-18%

Tableau 14 : Astorstat® products

Nous ne disposons pas non plus d'informations techniques et de références à leur propos, néanmoins le bureau d'ingénierie PCM Thermal Solutions les exploite dans de nombreuses applications pour le stockage de chaleur.

3.2.6 Les produits Pluss Polymers Pvt. Ltd.

En 2006 PLUSS ® est devenue la première société à introduire un large éventail de matériaux à changement de phase en Inde. Les produits ont une bonne acceptation dans les secteurs des télécommunications et de la chaîne du froid.

Avantages du MCP SavE® :

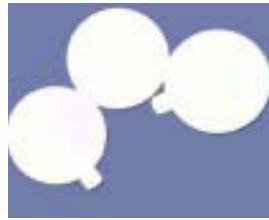
- Très forte chaleur latente
- Peut être fait sur mesure pour les exigences spécifiques de température
- Manipulation aisée et peut remplir dans une grande variété d'encapsulations
- bon marché
- Performances stables tout au long du cycle de changement de phase
- pas de surfusion
- Faible ou peu d'inflammabilité
- Non toxique et non inflammable

L'entreprise développe des MCP dans une gamme de températures de changement d'état comprise entre -39 °C et 89 °C sous différentes matières de confinement (HDPE, PP, ou acier inox). Le produit savE® (hydrates de sels) est confiné sous forme de nodules ou de panneaux. Voici les principales propriétés des produits savE®:



HDPE Panels

-profils rigides avec des cavités remplies de MCP.
-peuvent être installés dans des plans verticaux ou horizontaux



PP balls



HDPE balls



Stainless Steel balls

-Diamètre de 80 mm
-Peut prendre env. 240 à 260 ml de MCP
-Poids d'une boule vide d'environ 198 g
-Compatible avec la plupart des MCP
-Utile pour les applications à haute température.

Pour les applications à la température (HS 89), les billes utilisées sont en PP ou SS (Stainless Steel).

Nom	Composants	Temp. de chang. de phase [°C]	Operating range [°C]	Densité [kg/m ³] Liquide	Chaleur latente [kJ/kg]- [kWh/m ³]	Sous refroidissement	Inflammabilité	Tmax d'utilisation [°C]
HS 89	Inorganic Salts	87 à 89	82 à 94	1540	180-77	Aucun	Non	~ 105

Tableau 15 : PLUS@ products

3.2.7 Les produits de TEAP

Voici une liste des MCP vendus par TEAP au dessus de 70°C.

Température de fusion [°C]	Gamme d'utilisation	Chaleur latente [kJ/kg]	Chaleur latente dans la gamme d'utilisation	Densité [kg/m ³]	Chaleur latente volumétrique [kWh/m ³]
70°C	40 à 75°C	230	290	1800	145
78°C	40 à 80°C	240	300	1800	150
89°C	50 à 100°C	145	185	1500-1600	77.1-82.2

Tableau 16 : TEAP MCP products

Voici les différents modes de confinement (encapsulation) de MCP que TEAP propose :



Aluminum bottles



HDPE Balls



Stainless Steel Balls



Tube d'aluminium rempli de MCP



Panneau rempli de MCP

Au final, TEAP comme la plupart de ses concurrents offre différents confinements et différents MCP pour des applications dans de nombreux domaines (Telecom, stockage thermique, électronique...etc.).

3.2.8 Les produits de Climator

L'entreprise suédoise Climator développe des MCP appelés ClimSel dans un intervalle de températures compris entre 7°C et 70°C (pour les températures positives), mais seulement certains d'entre eux sont utilisés pour le stockage d'énergie (de C48 à C70), les autres sont utilisés pour le rafraîchissement passif dans l'habitat, le confort des textiles et la protection incendie. Voici les principales caractéristiques du MCP C70 :

Nom	Type de MCP	T _{fusion} [°C]	T _{max} [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]	Densité [kg/l]	Conductivité thermique [W/m.K]	Chaleur latente volumétrique [kWh/m ³]
ClimSel C70	Sodium pyrophosphate/ water & additive	70	85	280.8	2.088	1.7	0.6-0.7	132.6

Tableau 17 : Principales propriétés physiques des MCP de Climator

Pour résumer, Climator possède de nombreuses références quant à l'utilisation et la mise en œuvre de ses MCP.

3.2.9 Le produit E-STOCKER de KAPLAN ENERGY

La société Kaplan Energy a commercialisé au cours de l'année 2009 une solution de stockage de l'énergie solaire thermique baptisé « e-stocker ». Ce système innovant, mis au point avec l'aide de l'INSA de Lyon, du CNRS, et du Centre Thermique de Lyon CETHIL, permet à un chauffe-eau solaire d'augmenter sa capacité de stockage sans augmenter le volume du ballon.

L'E-STOCKER® est un accumulateur d'énergie thermique à base de MCP, conçu pour les installations solaires, les installations de chauffage dont celles à bois et les pompes à chaleur.



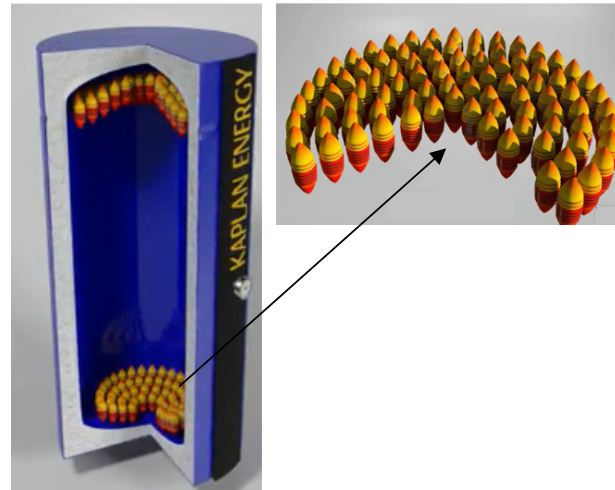
E-STOCKER

L'E-STOCKER® contient des MCP en proportion élevée pour protéger les systèmes de chauffage contre les variations de production thermique. Les accumulateurs E-STOCKER peuvent stocker l'énergie et la restituer aux moments où les systèmes de chauffages thermiques ne produisent pas ou plus d'énergie. L'E-STOCKER® est un accumulateur prêt à l'emploi pouvant être directement introduit dans les ballons de chauffage, les ballons tampons et les ballons de décantation.

L'E-STOCKER® est adapté aux installations solaires, aux installations thermiques avec chauffage au bois, aux installations pompe à chaleur en période de dégivrage et particulièrement aux installations fonctionnant à hautes températures. Lorsque les systèmes se mettent en chauffe et s'arrêtent, les ballons d'accumulation subissent une variation de température. Pour récupérer cette perte d'énergie thermique due à un arrêt provisoire des systèmes de chauffe, les batteries thermiques E-STOCKER stockent l'énergie thermique au-dessus de 55°C au moment du fonctionnement et la restituent au moment où les systèmes en ont besoin (pertes thermiques statiques ou puisage de l'énergie par l'utilisateur). Exposé en continu à des températures supérieures à 120°C l'E-STOCKER subit un vieillissement prématuré. A des températures supérieures à 200°C la composition chimique de l'E-STOCKER peut se modifier et mettre en danger les installations de chauffage.

Caractéristiques

- Volume des nodules E-Stockers 32000mm³
- Durée de vie des E-Stockers 30 ans
- Garantie 10 ans
- Température maximale de service +120°C
- Température minimale de service -30°C
- Chaleur massique 2000 J/Kg.K
- Température de changement de phase entre 55°C et 65°C
- Pression d'utilisation (à 95°C) 5 bars
- Compatibilité avec glycol, antigel, antioxydant, régulateur de PH, dispersants, séquestrant, biocides, algicides, fongicides (éviter l'utilisation de bains d'huile, acides et bases fortes)
- MCP100% biodégradables, non toxique (E-stocker 100% recyclables)



Coupe d'un Ballon de stockage solaire Kaplan

3.2.10 Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température (>150°C)

Les recherches actuelles dans ce domaine concernent d'une part les technologies, d'autre part, les matériaux de stockage. On constate, en général, des préoccupations différentes selon les niveaux de température. Cependant, l'un des problèmes majeurs réside dans la capacité à manager plus ou moins rapidement le transfert de l'énergie : la notion de puissance de stockage et de déstockage devient un élément majeur. Or, les matériaux à forte capacité de stockage n'ont généralement pas de bonnes conductivités thermiques.

En effet, les matériaux à changement de phase solide-liquide possèdent des conductivités thermiques faibles (de 0,2 à 1 W/m.K) pénalisant fortement les modules de stockage. L'enjeu est donc de lever ce verrou par l'association des propriétés complémentaires du graphite (conducteur de la chaleur) avec des matériaux à changement de phase (stockeurs d'énergie). L'élaboration de matériaux aux propriétés optimisées nécessite l'analyse fine des transferts thermiques et des problèmes éventuels de surfusion/sous refroidissement.

Selon la nature du MCP et du graphite sélectionnés, plusieurs modes d'élaboration des composites ont été mis au point. Les paraffines, qui mouillent très bien le graphite, sont mises en œuvre par imprégnation capillaire de matrices de graphite naturel expansé et préalablement consolidées. On obtient ainsi des composites de conductivités thermiques comprises entre 2 et 70 W/m.K selon le taux de graphite utilisé. Les sels inorganiques ne présentent généralement pas une telle affinité pour le graphite. Il est alors nécessaire de disperser le graphite pulvérulent dans le MCP fondu ou de comprimer le mélange des deux matériaux solides. En termes de caractérisation thermique, la détermination de l'évolution de

la conductivité avec la température s'avère primordiale pour les matériaux cyclés à haute température comme ceux utilisés pour les centrales électro-solaires. L'ensemble des propriétés thermiques issues des caractérisations thermiques (température de fusion, enthalpie de fusion et/ou capacité calorifique équivalente) constitue les données de base des modèles de comportement de réservoir de stockage développés par ailleurs et qui prennent en compte les couplages effectifs entre transfert de chaleur interne au PCM et externe à la paroi des échangeurs avec les fluides caloporteurs.

On note ainsi, des recherches très prometteuses sur un procédé de stockage thermique à haute température (de 200 à 600 °C) utilisant du graphite poreux (12 W/m.K, 95 % de porosité, pores de 10 à 500 µm de diamètre) comme matériau conducteur et un sel comme matériau à changement de phase. Cette même technique de couplage de deux matériaux est étudiée pour un stockage à plus basse température avec du graphite imprégné de paraffine ou du graphite contenant des microcapsules (10 µm environ) remplies de paraffines. Cette technique permet d'éviter une exsudation toujours possible dans le cas où le MCP est libre dans la matrice de graphite. L'intérêt principal d'utiliser de tels mélanges est qu'ils permettent des solutions solides en toutes proportions. Le diagramme de phase présente alors un liquidus et un solidus très proches indiquant un intervalle de température de fusion très étroit. Le déstockage a quasiment lieu à température fixe. Mais l'avantage d'utiliser un mélange est qu'il est possible de choisir cette température de fusion en choisissant la composition du mélange.

Une méthode a été proposée et développée par la société **SGL** (Allemagne), il s'agit d'une compression isostatique à froid d'un mélange de particules de GNE broyé et de sel. Les pressions appliquées, ainsi que la taille des grains de sel (quelques mm) et des particules de graphite (500µm) utilisés, sont bien plus élevées que pour les autres méthodes. Dans ces composites, le graphite forme une phase isotrope (invariant selon la direction), continue et dense où viennent s'incruster les particules millimétriques du sel (Fig. 17).

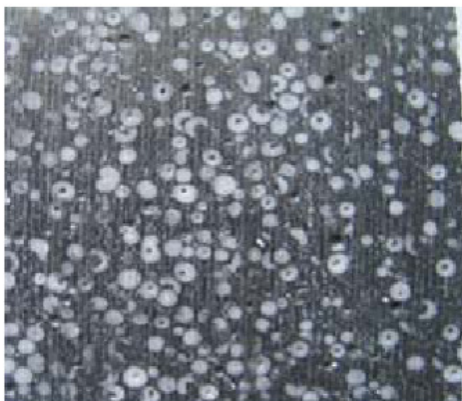


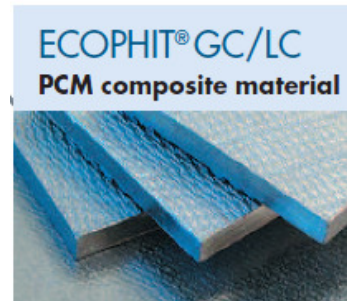
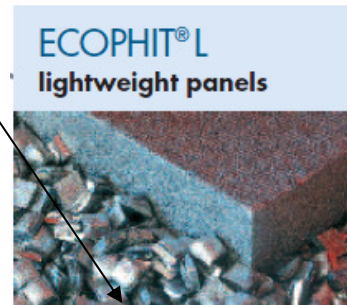
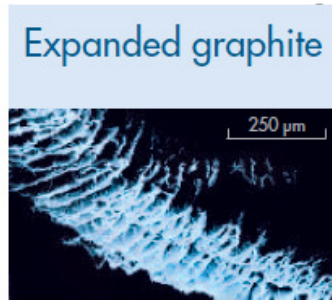
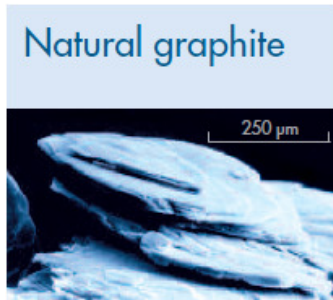
Figure 17 : Coupe transversale d'un matériau élaboré par le SGL (Allemagne) [6]



Figure 18 : matrice PCM/graphite (haut) et composé PCM/graphite (bas) [SGL]

En effet, a travers sa gamme ECOPHIT®, la société allemande SGL GmbH commercialise des matrices et composés graphites dopés en MCP pour des applications de stockage de chaleur. L'incorporation des MCP dans une matrice graphite permet d'accroître considérablement la conductivité thermique du MCP, ce qui en fait un matériau très efficace, compact et dynamique.

ECOPHIT® englobe des matériaux de construction en graphite pour les techniques de construction et pour les systèmes de stockage d'énergie. (Granulés, poudres, feuilles souples et feuilles de graphite pur).



Les systèmes de stockage d'énergie peuvent être fabriqués pour une large gamme d'applications et de températures. La gamme de produits s'étend du refroidissement des batteries d'exploitation à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à des systèmes à haute température pour le chauffage processus de stockage jusqu'à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, par exemple.

Sur la figure suivante, on peut voir une représentation comparative des performances entre différents systèmes de stockage :

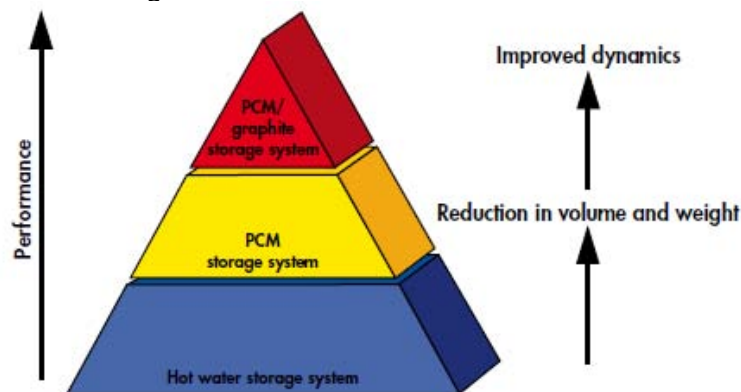


Figure 19 : représentation comparative entre un système de stockage d'eau chaude, de MCP et d'un composé MCP/Graphite [SGL]

Ces matériaux sont disponibles pour une large plage de température (température de fusion ≈ -20 à 250 °C) et l'entreprise développe également des systèmes de stockage de chaleur compacts en combinant MCP et graphite (cf. Figure 20).



Figure 20 : Système de stockage compact [SGL]

Toutefois, la plupart des indications qu'elle donne concerne des applications liées aux bâtiments et donc aux basses températures ($T \approx 20$ °C).

4. La mise en œuvre des MCP dans un système de stockage

Il existe différentes manières de mettre en œuvre les MCP pour un stockage de chaleur.

4.1 Les échangeurs de chaleurs tubulaires avec MCP intégrés

Les échangeurs tubulaires font partie de ces mises en œuvre de MCP pour des systèmes de stockage. Par exemple, pour des échangeurs coaxiaux, le fluide de transfert (HTF) peut circuler soit dans l'espace annulaire soit dans l'espace cylindrique, à co-courant ou contre courant. On trouve aussi des échangeurs à tubes et calandre (Shell & Tubes). Les différents MCP sont confinés grâce à une paroi solide (cf. Figure 21).

Lors de la charge, le fluide de transfert transmet ses calories au MCP qui les stocke sous forme de chaleur latente. Au moment de la décharge, la quantité de chaleur absorbée par le MCP est restituée au fluide de transfert. Sur la figure suivante les illustrations des échangeurs de chaleurs intégrant des MCP sont présentées.

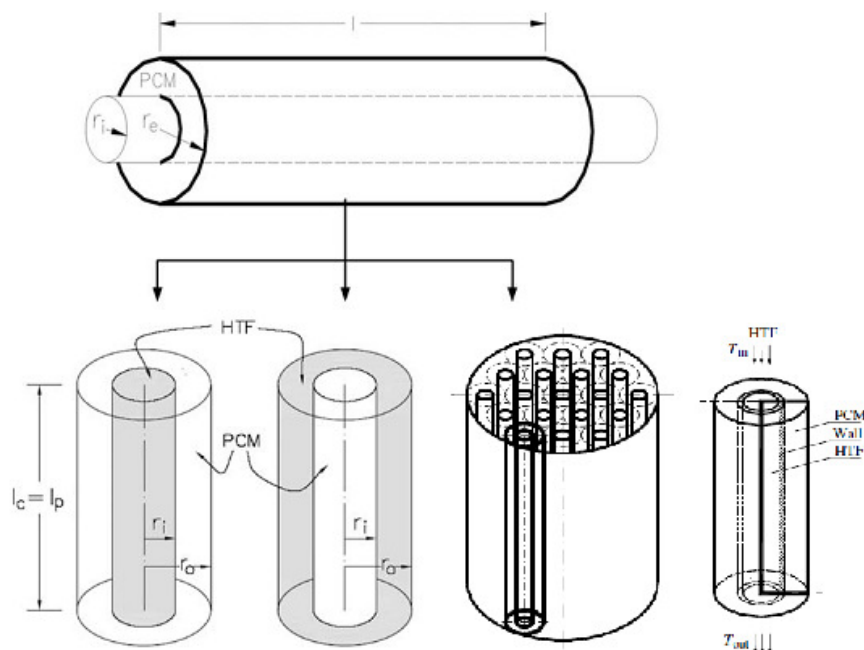


Figure 21 : échangeurs coaxiaux et multi-tubes intégrant des MCP [10]

4.1.1 Méthode d'intensification des transferts de chaleur – Étude 1 - Ailettes

La figure qui suit montre les différentes techniques communes étudiées pour améliorer le transfert de chaleur avec des MCP.

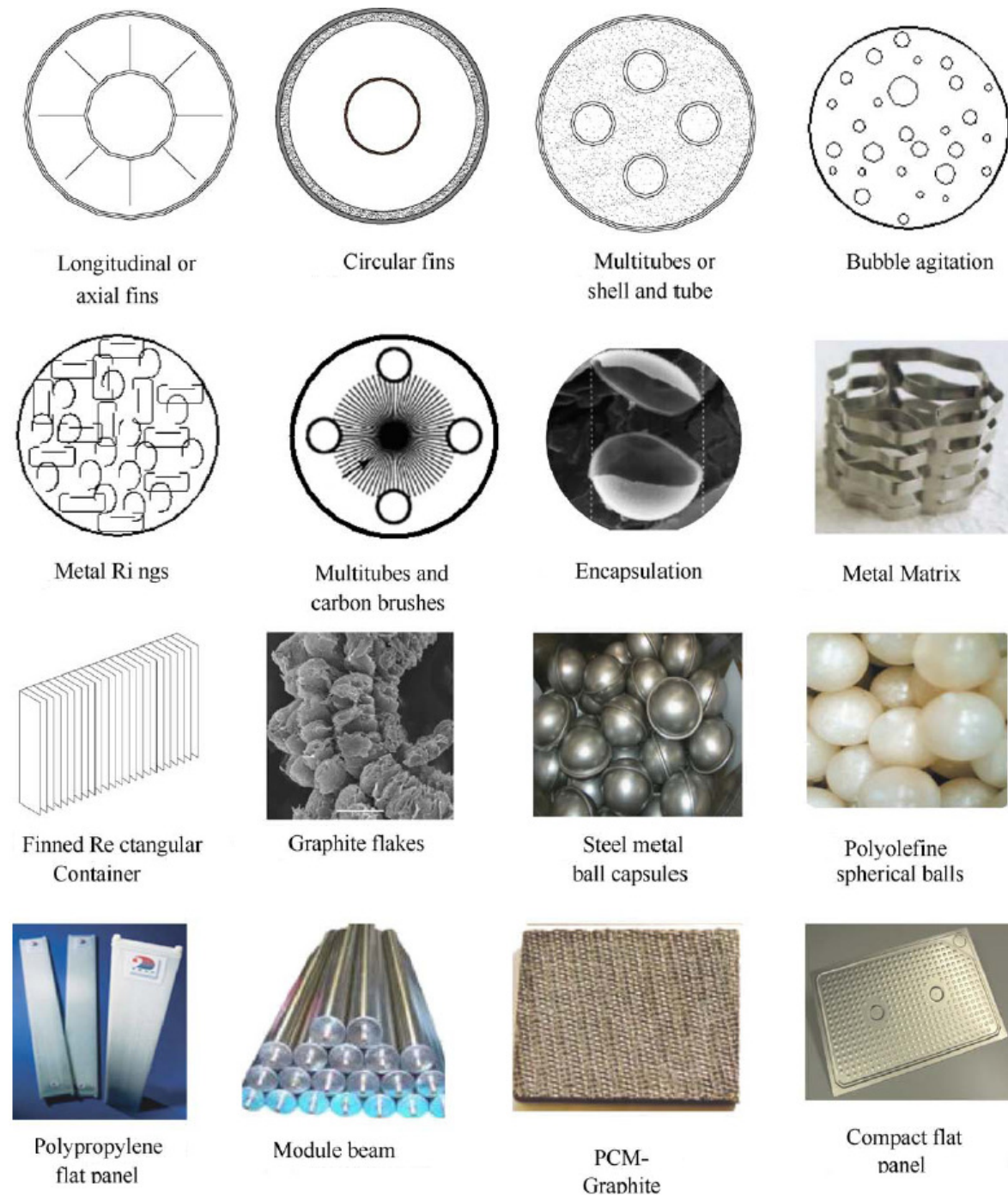
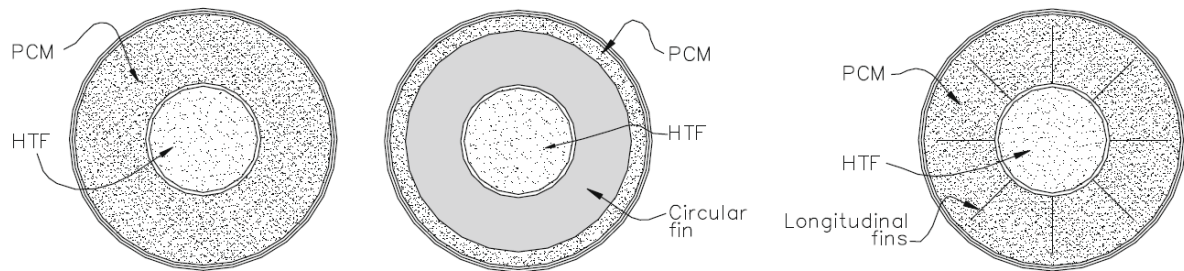


Figure 22: Heat transfer enhancement methods employed in phase change material research [10]

Le problème majeur pour l'intégration des MCP dans des échangeurs de chaleurs est dû aux phases de solidification des MCP dans lesquelles apparaissent de grandes résistances thermiques et diminuent donc le coefficient global de transfert de chaleur. Ceci est dû à l'ajout d'une résistance thermique de conduction par l'épaisseur croissante de la couche solidifiée sur la paroi de l'échangeur.

Nous avons vu les différentes technologies utilisées pour améliorer le transfert de chaleur pour les MCP et nous allons maintenant voir plus amplement la différence de performance

pour un même type de stockage entre 2 améliorations de surface par l'ajout d'ailettes et la solution sans amélioration. Cette étude réalisée en 2009 (*Agyenim*) permet de juger sur la performance entre deux types d'ailettes pour une amélioration du transfert de chaleur dans un échangeur avec MCP qui se trouve dans la partie coaxial d'un échangeur tubulaire comme la figure suivante le montre :



a) sans amélioration

b) avec ailette circulaire

c) avec ailette longitudinal

Figure 23 : Les 3 différents systèmes [11]

Le stockage MCP se compose d'un tube horizontal de 1 m de long en aluminium d'une épaisseur de 3 mm et de diamètre intérieur 146,4 mm. Un tube de 54 mm de cuivre situé au centre du tube permet la circulation du fluide de transfert (huile). Les propriétés du MCP ont été mesurées par DSC (Differential Scanning Calorimetry) pour des températures comprises entre 20°C et 140°C pour 20 cycles, en voici les résultats [11] :

Nombre de cycle	Chaleur latente (kJ/kg)	Domaine de température de fusion (°C)
1	339.30	118.39 - 119.96
2	338.77	116.49 - 119.71
5	338.77	115.56 - 119.70
10	323.39	115.29 - 119.61
20	313.75	114.39 - 118.71

Les résultats montrent un changement dans les caractéristiques thermiques de l'erythritol avec l'augmentation du nombre de cycles : une diminution de 7,53% de la chaleur latente après 20 cycles est à noter. Une étude plus approfondie pour mesurer les propriétés thermo-physiques pour une plus longue période et donc un plus grand nombre de cyclages serait nécessaire pour tirer une conclusion significative ou non quant à la détérioration de l'erythritol avec des cycles répétés.

Le MCP utilisé est l'erythritol et le fluide de transfert utilisé est l'huile DOW Corning 550, (charge à 140°C et décharge à 70°C pour $m=60\text{kg/min}$) voici les principales caractéristiques de cet échangeur [11]:

Propriétés	Without fin (Control)	Circular finned	Longitudinal finned
Nombre d'ailette	-	8	8
Matériel de l'ailette	-	Copper	Copper
Epaisseur de l'ailette (m)	-	0.001	0.001
Pas d'ailette (m)	-	0.040	0.040
Diamètre d'ailette (m)	-	0.134	-
Longueur de l'ailette (m)	-	-	0.95
Surface tube + surface d'ailette en contact avec le MCP (m ²)	0.1697	0.3587	0.7777
Masse de MCP (kg)	20.2	20.2	20.2

Cette étude a permis de mesurer les cinétiques de charge et de décharge :

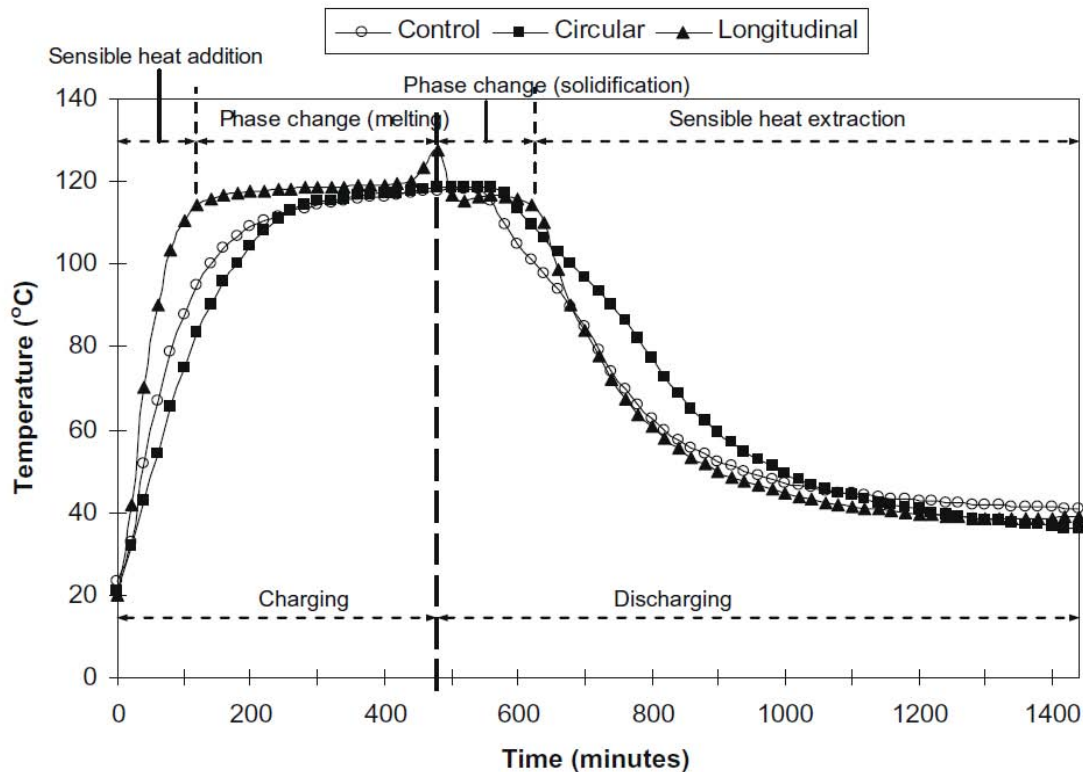


Figure 24 : Comparaison de la température moyenne dans le MCP (charge à 140 °C et $m = 30 \text{ kg/min}$ et décharge) [11]

Analyse de la charge :

En analysant la figure précédente, on peut voir 3 étapes (1 ; 2 et 3) distinctes pour le système avec les ailettes longitudinales et 2 étapes (1 et 2) avec les ailettes circulaires et le système sans ailette :

1) L'erythritol reste dans son état solide jusqu'à la température limite basse (115.6°C) de la gamme de température de changement d'état. L'énergie absorbée par le MCP lors de cette phase de charge est alors transférée sous forme de chaleur sensible, cela se traduit par l'échauffement du MCP de 20°C à 115.6°C.

2) L'erythritol est à l'état diphasique (solide/liquide) pour des températures comprises entre 115.6°C et 119.7°C. Pendant cette phase de transition, l'énergie absorbée par le tube de transfert et l'énergie transférée au MCP pour fondre est alors sensiblement la même.

3) (valable seulement pour le système avec les ailettes longitudinales) L'erythritol est à l'état liquide avec des températures au-delà de la limite haute de changement de phase (119.6°C). L'énergie absorbée l'est alors par chaleur sensible et la température du MCP continue de croître.

La température moyenne pour le système équipé d'ailettes longitudinales est plus importante comparée aux autres systèmes. La forte hausse, après 430 min, de la température pour le système à ailettes longitudinales indique la fonte complète du MCP. La température moyenne du MCP dans le système à ailettes circulaires indique donc que ce système n'a pas amélioré le transfert de chaleur lors de l'absorption par chaleur sensible alors que le transfert de chaleur était principalement contrôlé par la conduction (même si le système à ailettes circulaires a augmenté la surface de transfert de chaleur par la présence d'ailettes).

Analyse de la décharge :

Au tout début de la décharge, la température dans le système à ailette longitudinale décroît très rapidement : c'est à cause de la température finale de 127.4°C qui est atteinte ce qui signifie que le MCP est à l'état liquide. L'énergie dissipée l'est alors principalement par chaleur sensible avec un grand écart de température entre le MCP et le fluide de transfert (57°C) qui est moteur. Le début de la solidification à une température de 115,8°C indique que le système à ailettes longitudinales n'a pas d'effet de sous-refroidissement, c'est essentiellement dû aux surfaces ailetées qui agissent comme site de nucléation à partir desquels la solidification a été lancée et favorisée.

Les ailettes circulaires et le système sans ailette ne présentent pas de baisse de température notable dans la partie initiale du cycle de décharge parce que la température finale obtenue lors de la charge a indiqué que la fusion était incomplète pour le temps de charge imposé de 8h. La différence de température entre le MCP et le fluide de transfert en entrée dans les deux systèmes (48°C) est inférieure par rapport au système à ailettes longitudinale (57°C).

Au début de la décharge, la conduction contrôle le transfert de chaleur pour les 2 systèmes (control & circular finned). On voit aussi que la température reste constante au cours du processus de solidification. Lors de l'approche de la solidification complète, l'énergie thermique libérée sous forme latente devient progressivement de plus en plus faible jusqu'à ce que la température commence à diminuer plus rapidement et que la chaleur sensible de l'état solide du MCP soit dissipée. Le temps pour atteindre la solidification pour les différents systèmes est donné dans le tableau suivant [11] :

	Without fin (Control)	Circular finned	Longitudinal finned
Temps de solidification (min)	80	100	130

Les différences dans les temps requis pour la solidification ne sont pas entièrement comparables en raison de la fusion incomplète dans les systèmes sans ailette et avec ailette circulaire, en raison du temps de charge de 8 h imposées qui ont abouti à des différences dans la quantité d'énergie stockée pendant la charge.

Sur le tableau suivant, nous pouvons voir les différentes performances atteinte par les différents types d'amélioration (Source : [11] et [Cadet/GRETh]) :

	Without fin (Control)	Circular finned	Longitudinal finned
Cumul de l'énergie chargée (kJ)	9035	10418,2	12429,2
Cumul de l'énergie perdu (kJ)	475.3	583	670
Efficacité de charge (%)	94.7	94.4	94.6
Cumul de l'énergie déchargée (kJ)	4977,8	7293,1	8813,1
Rendement de stockage (%)	55.0	70.0	70.9
Surface d'échange (m²)	0,1697	0,3587	0,7777
temps de charge (h)	8	8	8
temps de décharge (h)	16	16	16
Densité de flux en charge (W/m²)	1848,6	1008,5	554,9
Densité de flux en décharge (W/m²)	509,3	353,0	196,7
Puissance charge(W)	313,7	361,7 (+13.2%)	431,6 (+27.3%)
Puissance décharge (W)	86,4	126,6 (+31.7%)	153,0 (+43.5%)

Interprétation des résultats :

On voit donc que les dispositifs à ailettes circulaires et longitudinales ont permis d'améliorer considérablement le rendement de stockage (22% d'augmentation par rapport au système sans ailette). On note aussi que les pertes de chaque système sont équivalentes et permettent d'atteindre une efficacité de charge d'environ 95%. En revanche, lorsque l'on regarde plus attentivement les valeurs des densités de flux transférés durant la charge et la décharge, on constate une nette baisse de ceci pour les systèmes avec ailettes : on explique ces faibles valeurs de flux par deux points :

- l'augmentation considérable de la surface d'échange par l'apport des surfaces ailetées qui fait nettement augmenter le dénominateur surface.
- la forte domination du transfert par diffusion (conduction)

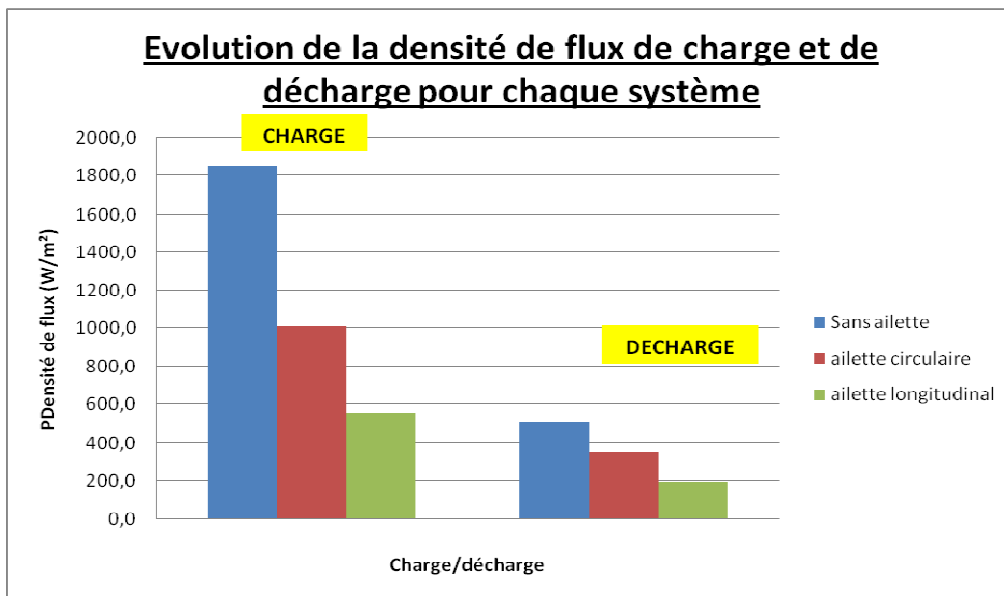


Figure 25 : Evolution de la densité de flux entre les différents systèmes ([11] et [Cadet/GRETh])

Néanmoins, lorsque l'on calcule la puissance délivrée ou absorbée par chaque système, on constate une nette augmentation de la puissance :

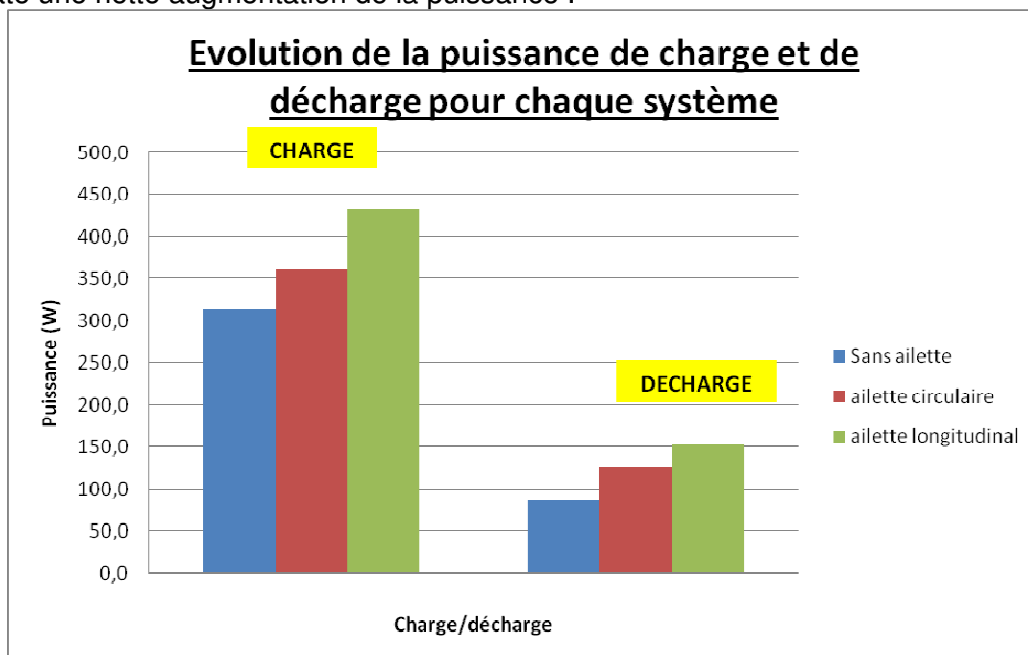
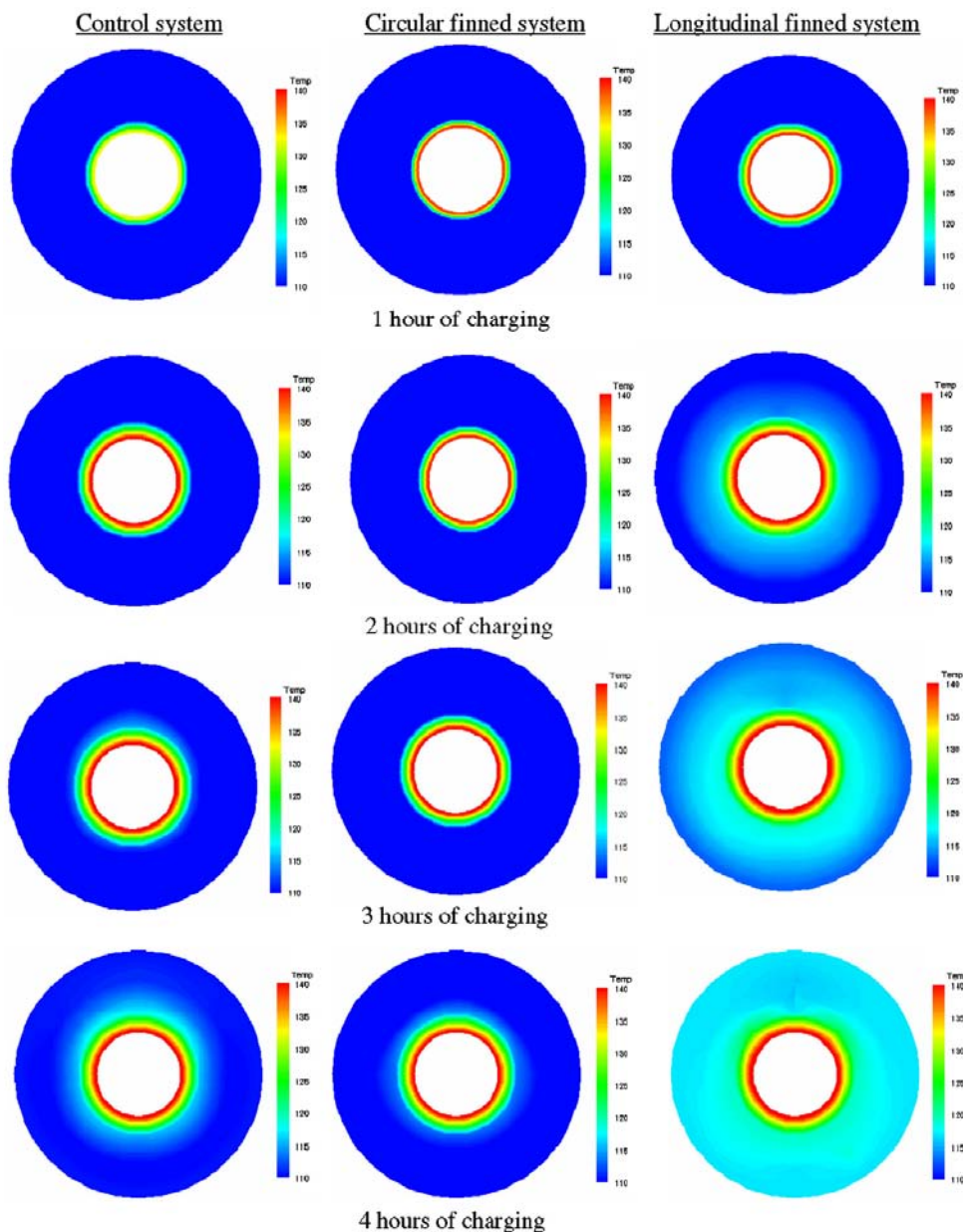


Figure 26 : Evolution de la puissance entre les différents systèmes ([11] et [Cadet/GRETh])

Si on résonne en termes d'augmentation de puissance par rapport à la solution sans ailette, on peut constater que les pourcentages atteignent quasiment 50% d'augmentation de puissance avec le même poids de MCP.

Cette analyse confirme donc bien que la mise en place d'ailettes augmente le transfert thermique seulement par l'augmentation notable de la surface d'échange (la surface en contact avec le MCP). On confirme encore une fois la prépondérance du transfert par diffusion.

Sur les figures qui suivent, voici une évolution des températures du MCP au sein du système, qui confirme nos analyses précédentes :



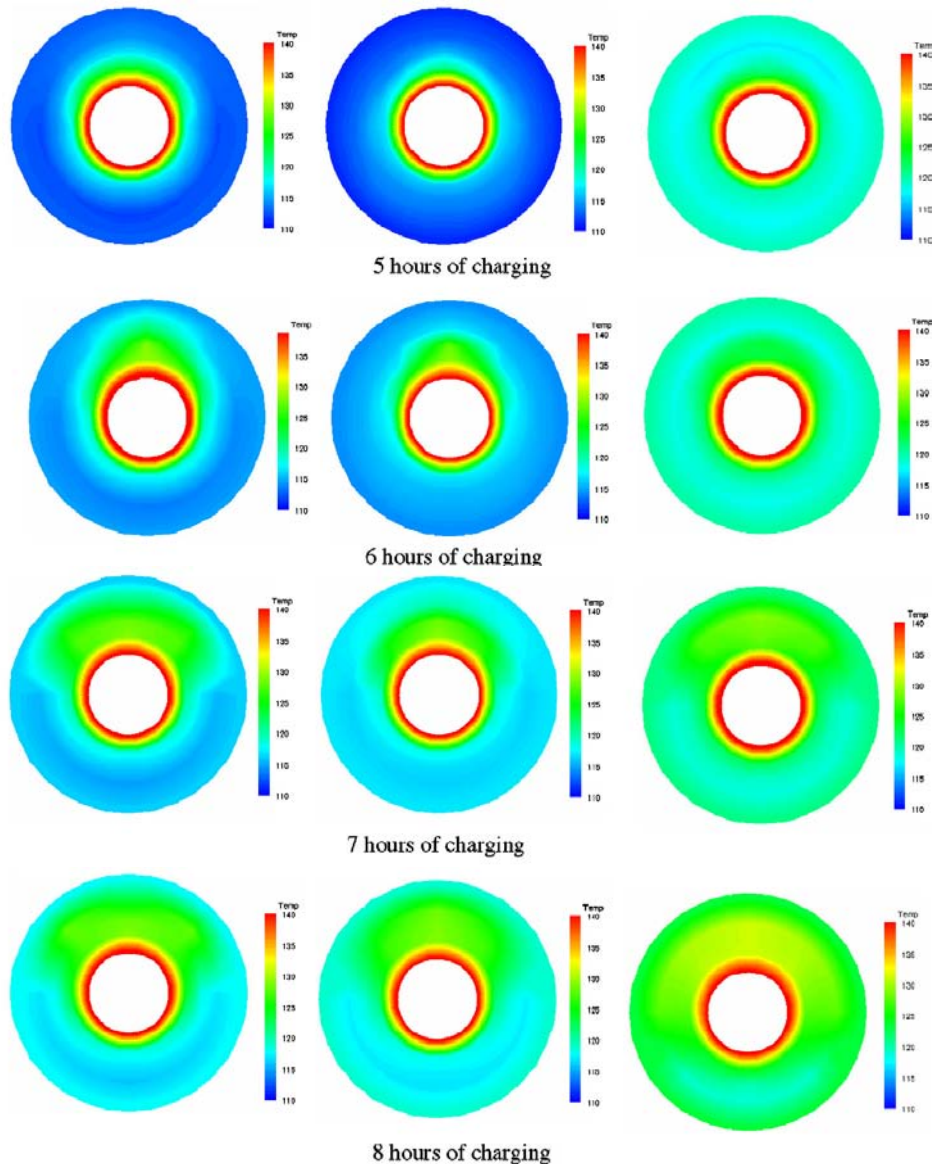


Figure 27 : Evolution des températures du MCP pour les 3 systèmes au milieu de l'échangeur (500mm) [11]

Grâce à cette simulation CFD, on peut voir que la distribution de température pour le système à ailette longitudinale est nettement amélioré et permet d'atteindre la fusion complète du MCP (contrairement aux autres systèmes où seule une partie de la masse de MCP à fondu).

Pour conclure sur cette étude d'amélioration du transfert thermique dans un échangeur avec MCP, on peut voir que l'influence d'une amélioration de transfert n'est pas négligeable. Cette étude a permis de montrer que les ailettes longitudinales ont plus d'impact que des ailettes circulaires sur l'amélioration du transfert de chaleur dans des échangeurs tubulaires.

4.1.2 Méthode d'intensification des transferts de chaleur – Etude 2 – Le graphite

Une des meilleures solutions envisageable pour améliorer le transfert est l'intégration de matrices graphite/MCP aux seins de l'échangeur (cf. Figure 28). En effet, de nombreuses recherches ont été effectués et sont en toujours en cours pour ce type d'échangeur afin de modéliser les échanges de chaleur et les cinétiques de charge et décharge. Ils sont encore au stade de prototype de recherche mais sont très prometteurs.

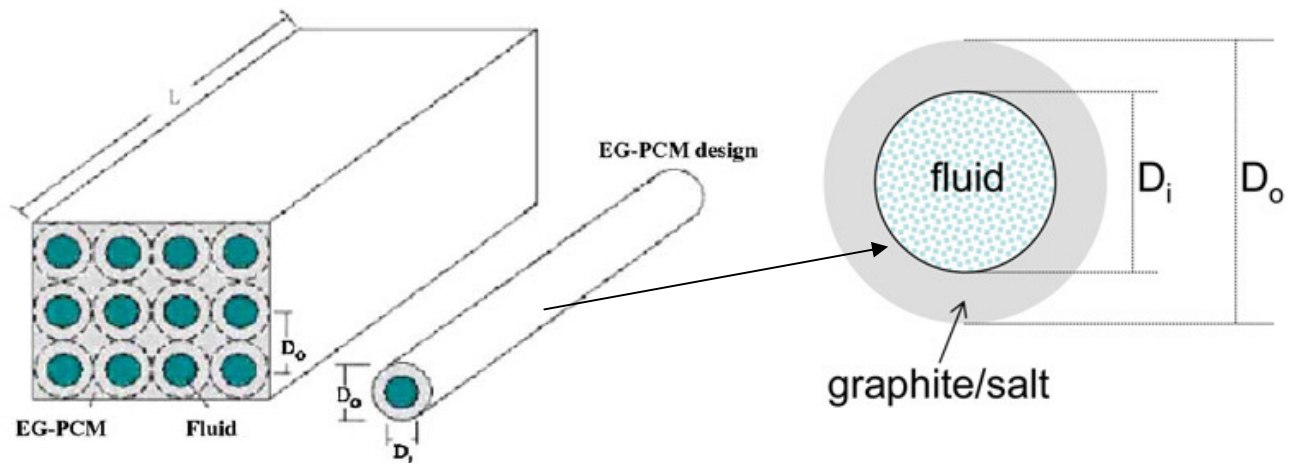


Figure 28 :échangeurs avec matrice Graphite/MCP intégrés [7]

Des tests en laboratoire avec différentes compositions en sels et en graphite ont été réalisés dans le cadre du projet DISTOR :

Propriétés du sel [7]	Propriétés du graphite [7]
Densité= 2100kg/m ³	Densité = 2220 kg/m ³
Chaleur spécifique=1.822 kJ/kg.K	Chaleur spécifique=
Température de fusion=223°C	0.712kJ/kg.K
Chaleur latente=106 kJ/kg	
Conductivité thermique associé au taux de masse de GNE :	
0% wt ENG=1.2 W/m.K	
5% wt ENG= 2 W/m.K	
10% wt ENG=10.5 W/m.K	
15% wt ENG=20 W/m.K un diamètre de tubes internes de Di = 20mm. Le fluide de transfert est à 10°C au dessus de la	

Le prototype est conçu avec température de fusion du sel. Le coefficient de transfert de chaleur entre les tubes et le fluide est de 1000W/m.K.

Différentes longueurs et diamètres extérieurs du module de stockage ont été dimensionnés et testés avec différentes capacités de stockage (20, 100,500 kWh pour respectivement 680kg, 3396 kg et 16981,1 kg de sel), différents temps de charge (2h et 8h) et différents taux de graphite (0, 5, 10 et 15 % wt en GNE).

Capacité de stockage [kWh]	Temps de charge [h]	% wt de GNE	L _{tubes} [m]	Do[m]	M _{sel} [kg]	M _{GNE} [kg]
20	2	0	121.5	0.03	679.25	0
20	2	5	90.1	0.08	679.25	35.8
20	2	10	36.3	0.12	679.25	75.5
20	2	15	27.8	0.14	679.25	119.9
20	8	0	44.1	0.10	679.25	0
20	8	5	31.5	0.13	679.25	35.8
20	8	10	11.2	0.21	679.25	75.5
20	8	15	8.1	0.26	679.25	119.9
100	2	0	607.5	0.06	3396.3	0
100	2	5	450.5	0.08	3396.3	178.8
100	2	10	181.4	0.12	3396.3	377.4
100	2	15	138.9	0.14	3396.3	599.3
100	8	0	220.5	0.10	3396.3	0
100	8	5	157.5	0.13	3396.3	178.8
100	8	10	55.8	0.21	3396.3	377.4
100	8	15	40.5	0.26	3396.3	599.3
500	2	0	3037.5	0.03	16981.1	0
500	2	5	2252.3	0.08	16981.1	893.7
500	2	10	907	0.12	16981.1	1886.8
500	2	15	694.5	0.14	16981.1	2996.7
500	8	0	1102.7	0.10	16981.1	0
500	8	5	787.2	0.13	16981.1	893.7
500	8	10	278.8	0.21	16981.1	1886.8
500	8	15	202.7	0.26	16981.1	2996.7

Tableau 18 : Résultats du pré-dimensionnement du système ([7] et [Cadet/GRETh])

L'amélioration de la conductivité thermique par l'augmentation du taux de graphite permet donc de réduire les coûts d'investissement.

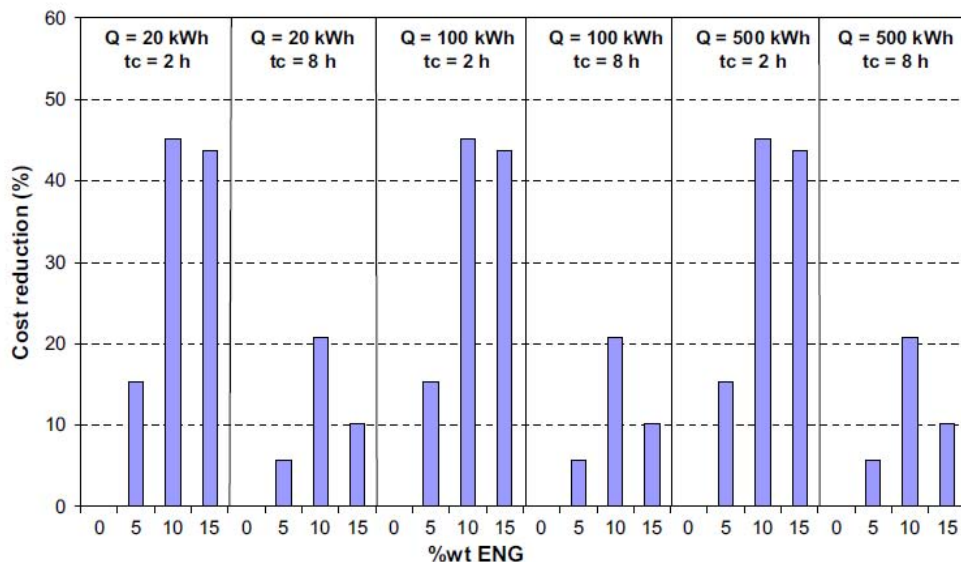


Figure 29 : Réduction des coûts d'investissement induits par l'amélioration de conductivité thermique (basé sur les prix de 0.6€/kg de sel ; 6€/kg de GNE et 25€/m d'acier 316L) [7]

En effet, l'amélioration de la conductivité thermique des sels grâce aux propriétés thermo-physiques du graphite permet de diminuer considérablement la longueur de l'échangeur pour

une même capacité de stockage, ce qui entraîne donc une diminution du coût de l'investissement. (cf. figure 30 et 31)

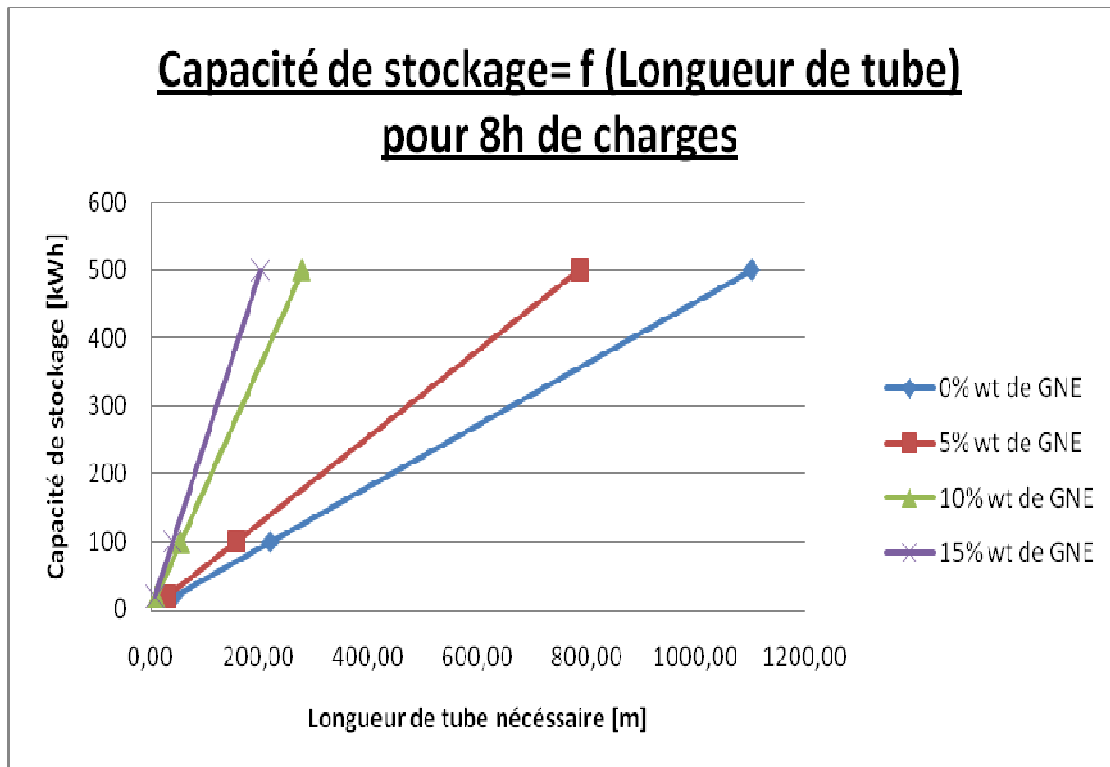


Figure 30 : Evolution de la capacité de stockage en fonction de la longueur de tube pour différentes compositions en GNE ([7] et [Cadet/GRETh]).

Sur cette dernière figure, on voit donc que pour une même capacité de stockage de 500 kWh, l'augmentation du pourcentage en poids de GNE entraîne la réduction de la longueur de l'échangeur. Néanmoins, le rapport entre la réduction en longueur de tubes d'échange et l'augmentation en masse du GNE ne reste favorable économiquement que jusqu'à 10% en masse de GNE. Une composition de 10% de GNE en masse permet donc d'avoir la meilleure configuration dans chaque cas. (cf. Figure 17 et 19).

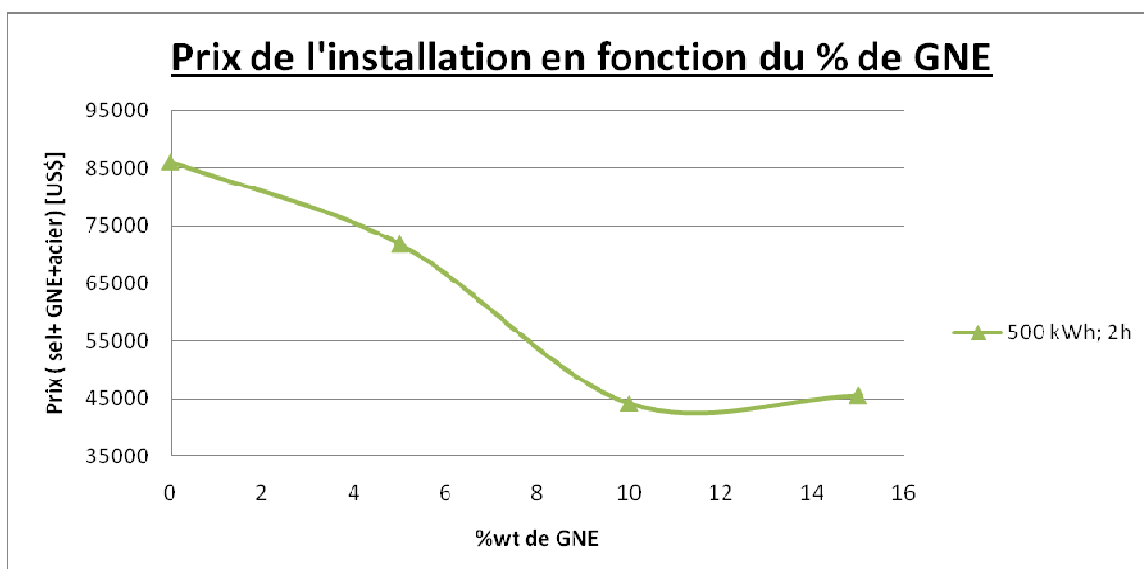


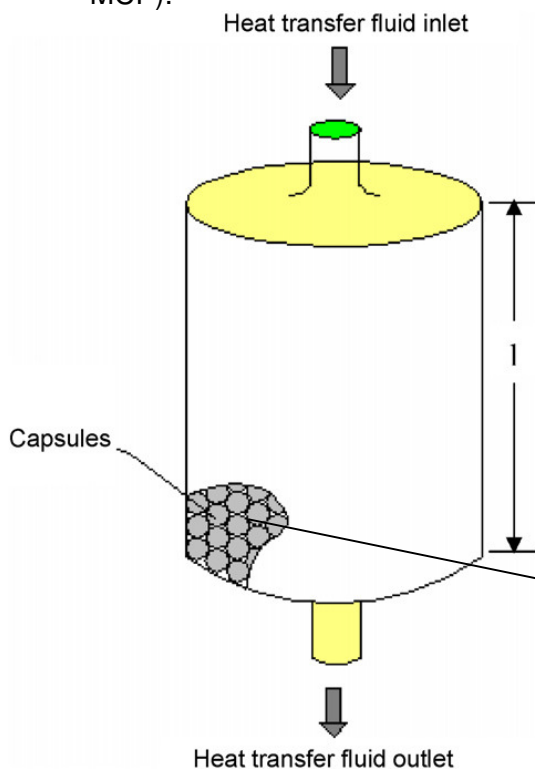
Figure 31 : Evolution du prix total (sel+GNE+acier) en fonction du pourcentage de GNE ([7] et [Cadet/GRETh]).

4.2 Les systèmes de stockage a lit à garnissage de MCP

Comme pour les stockages solides par chaleur sensible, on trouve des réservoirs en lit à garnissage. Les réservoirs sont de même conception si ce n'est que les matériaux solides (gravier, bille d'acier...etc.) sont remplacés par des matériaux à changement de phase, qui sont la plupart du temps encapsulés.

L'avantage de remplacer le matériau solide par des MCP est, un choix entre deux options :

- Soit un gain significatif de volume de stockage pour une capacité thermique équivalente à la solution du stockage sensible,
- soit un gain significatif de capacité thermique de stockage pour un même volume de garnissage (remplacement des garnissages solides par des garnissages à base de MCP).



Ils se présentent le plus souvent sous forme de billes de plastique dans lesquelles se trouve le MCP, qui sont disposées en lit au travers duquel passe le fluide chaud.

L'entreprise Cristopia développe des nodules de MCP contenus dans des réservoirs horizontaux mais seulement pour une gamme de température allant de -33°C à $+27^{\circ}\text{C}$.

L'entreprise EPS Ltd développe aussi ce genre de nodules de stockage pour des températures comprises entre 50°C et 82°C .

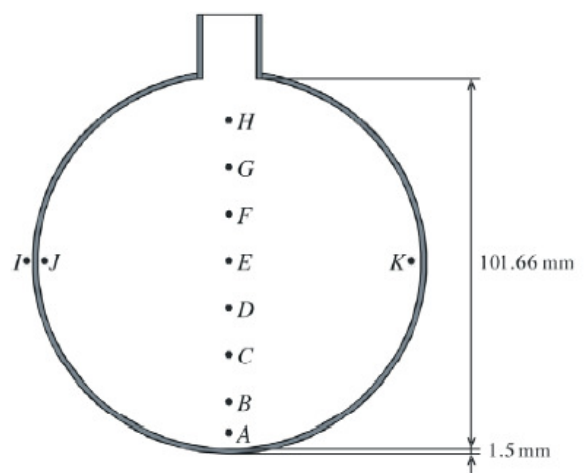


Heat transfer fluid outlet
Figure 32 : Réservoir cylindrique avec garnissage en billes de MCP

4.2.1 Étude des transferts de chaleur d'un garnissage type rempli de MCP

Nous allons vous présenter une étude sur les cinétiques de charges et décharges pour un nodule sphérique encapsulant un MCP [16]. Il s'agit d'une étude sur un MCP de type n-octadécane (paraffine) possédant une température de fusion de 28.2°C . Ce MCP est encapsulé dans un nodule sphérique de taille typique qui vous est présenté sur la figure de droite.

Ce nodule est donc une sphère de diamètre 101.66mm et d'épaisseur 1.5mm . Les points A à K montrent l'implantation des thermocouples pour l'expérimentation.



Voici les propriétés de la paraffine dans le tableau suivant [16]:

Température de fusion	28.2°C
Densité	772 kg/m ³
Viscosité cinématique	5x10 ⁻⁶ m ² /s
Capacité thermique massique	2330 J/kg.K
Conductivité thermique	0.1505 W/m.K
Chaleur latente de fusion	243.5 kJ/kg
Coefficient d'expansion thermique	0.00091 K ⁻¹

Le solide est sous-refroidi à 1°C en dessous de la température de fusion de la paraffine (28,2°C) et la température de surface de la sphère a été maintenue à 40°C. Des photographies réalisées lors de cette expérimentation et celles données par d'autres auteurs fournissent un historique détaillé de la contrainte de la fusion d'un MCP à l'intérieur d'une capsule sphérique. Voici sur la figure suivante des photographies de l'expérimentation réalisée à des intervalles réguliers de 20 minutes.

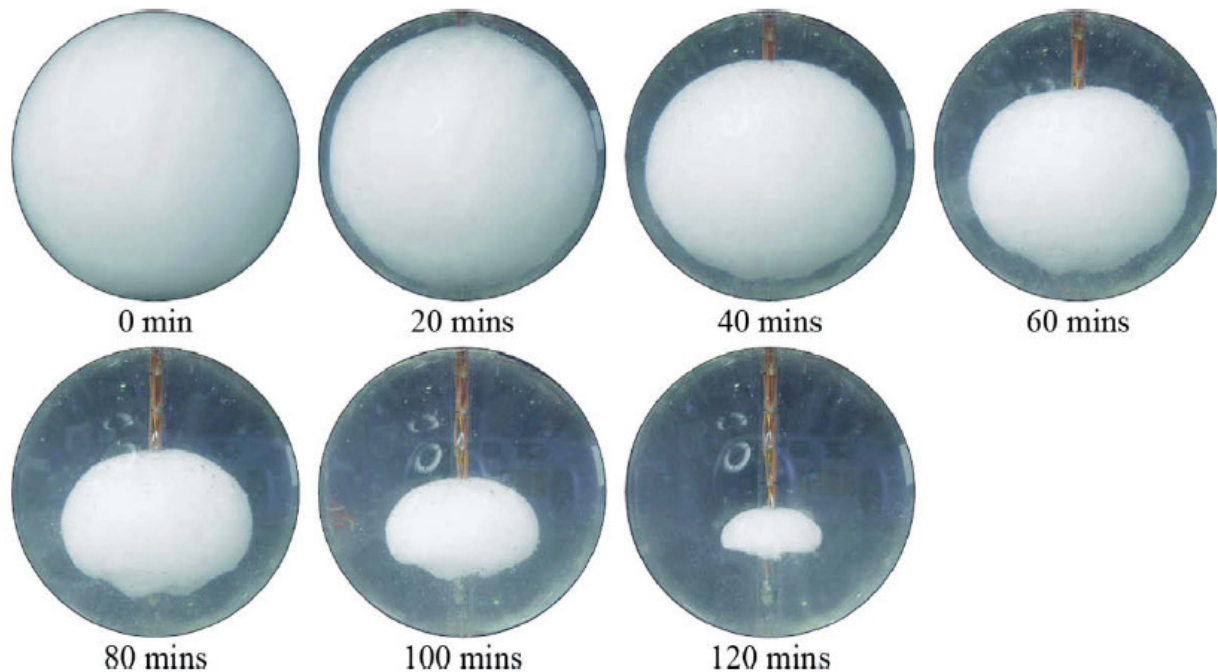


Figure 33 : Photographie de la fonte du MCP pendant la phase de charge [16]

En raison de la faible valeur du sous-refroidissement, le MCP solide est dès le début rapidement enveloppé dans un film très mince de liquide. Ce phénomène est clairement visible sur la figure 33 pour un temps de 20 minutes. La fusion du MCP solide se poursuit et les photographies de la figure 33 prises après 40 et 60 min d'exposition montrent une fusion importante dans la zone supérieure comparée à la partie inférieure : on peut attribuer cela à une forte contribution de la convection naturelle dans la région supérieure de la sphère. En bref, le liquide en fusion entre la paroi intérieure de la capsule et le MCP solide monte le long de la paroi remplaçant ainsi le liquide plus froid qui descend le long du bloc solide de MCP.

La forme aplatie du MCP que l'on remarque sur les photographies prises après 80 et 100 min montrent bien l'intensité de la convection induite par ce phénomène responsable de la fonte accélérée dans la zone supérieure. Une autre observation intéressante est l'ondulation de la surface au fond de la matière MCP solide. Ce phénomène est observé dans les photographies prises après 60, 80 et 100 min.

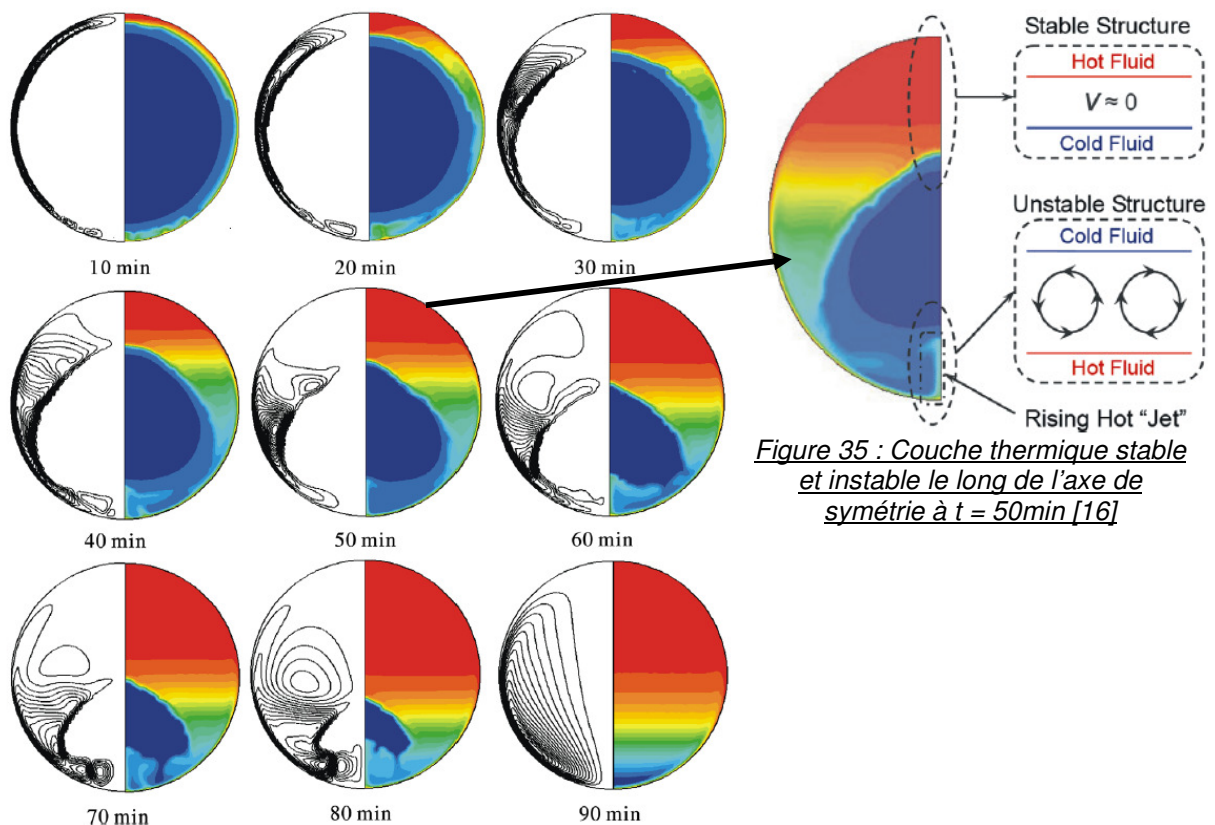


Figure 34 : Contours des lignes de courants et de température par simulation [16]

Figure 35 : Couche thermique stable et instable le long de l'axe de symétrie à t = 50min [16]

Les tracés instantanés des lignes de courants et des champs de température après 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 90 minutes après le début du chauffage sont donnés dans la figure 34. Les lignes de courants sont modélisées sur la moitié gauche de chaque sphère, tandis que les tracés de température sont indiqués sur la moitié droite.

La partie en bleu foncé des tracés de température qui occupent le centre de la sphère indique la phase non fondue de MCP (solide). En l'absence de mouvement de convection, la diffusion (conduction) qui engendre le processus de fusion provoque un changement de phase partiel en surface du MCP est lui permet de rester à l'état de sphère quasi parfaite (cf. Figure 34) à t= 10 et 20 min).

Toutefois, après la fusion rapide du MCP à côté de la paroi intérieure de la sphère, le film liquide chaud à côté de la paroi monte, absorbant ainsi plus de chaleur au cours de son voyage vers le sommet de la sphère. Simultanément le liquide le plus froid passe du sommet vers le bas le long de la surface de MCP solide. Ainsi, un tourbillon de recirculation est formé entre le MCP solide et la paroi intérieure de la sphère qui est visible à 10, 20, et 30 min. Naturellement, la taille de ce vortex augmente à mesure que le MCP fond.

Même si la forme sphérique du MCP solide est bien conservée dans les 30 premières minutes du processus, les profils de température de la figure 34 montrent distinctement que le champ thermique est assez différent du phénomène de fusion contrôlée par la diffusion. Avec le liquide chaud qui occupe la partie supérieure de la sphère, la stratification thermique est bien amorcée.

A l'instant t= 20 min, on peut commencer à voir la formation d'une couche de convection

instable conduisant ainsi à une élévation aisée du fluide chaud parallèlement à l'axe vertical. Dans le même temps, une petite zone de recirculation est observée dans le bas de la sphère. On reviendra sur ce point par la suite avec la définition des couches thermiquement stables / instables.

A la 70e minute, le point culminant de la matière solide (seulement 20% du MCP solide à cet instant) coïncide avec une fonte par le milieu de la sphère.

A la 80e minute, le MCP est un solide en forme de dôme avec des surfaces concaves sur le dessus et le dessous. A la 90e minute, la sphère est complètement remplie de liquide en fusion et le conteneur sphérique est entièrement stratifié.

On observe une caractéristique très intéressante du changement de phase et du suivi de la convection naturelle dans une capsule sphérique par l'existence simultanée de couches de fluides thermiquement stables et instables dans le voisinage de l'axe de symétrie. Ceci est illustré schématiquement sur la figure 35 qui montre une vue agrandie de ces deux zones de fluides.

A l'instant $t = 50$ min, sur la plus grande partie de l'axe de symétrie au dessus du centre, des couches de fluides horizontalement stratifiées sont observées avec le fluide chaud le plus léger sur le dessus et les couches froides les plus denses en dessous. Ce système, dans lequel le mouvement du liquide est négligeable et la conduction thermique dominante, est dit thermiquement stable.

En revanche, la portion comprise entre le fond ondulé du MCP solide et le fond de la sphère le long de l'axe de symétrie montre alternativement des couches de fluide froid et chaud. Cette zone est thermiquement instable et promotrice de zones de recirculation. On peut observer aussi la montée verticale d'une colonne de liquide chaud du fond vers la surface inférieure du MCP solide (cf. Figure 35)). Des constatations similaires ont été également observées par les différents auteurs qui ont étudié la convection naturelle dans un conteneur sphérique. La création de couches instables a également été observée dans la fonte de MCP dans des tubes cylindriques. Cette étude nous permet de conclure en 3 points :

1) Grâce à la visualisation du processus de fusion, on observe que le transfert de chaleur par conduction domine durant la première période de charge, la forme quasi-sphérique du MCP le met en évidence. On observe que la fonte dans la région supérieure de la sphère est beaucoup plus rapide que dans la région inférieure à cause des phénomènes de convection naturelle.

2) Les résultats de l'étude de visualisation sont corroborés par les résultats de calcul (CFD) qui montrent une forte stratification thermique du liquide en fusion dans la moitié supérieure de la sphère. Ce phénomène est dû à l'augmentation du liquide en fusion le long de la surface intérieure de la sphère qui remplace le liquide le plus froid. (*On pourra aussi noter que l'utilisation d'une structure de soutien pour maintenir la sphère pourrait avoir inhibé la chaleur et l'empêcherai d'atteindre le fond de la sphère*).

3) Les données de température mesurée au fond de la sphère mettent en évidence la mise en place d'une couche de fluide thermiquement instable qui est le siège de fluctuations chaotiques.

Cette étude a permis de décrire la complexité du processus de fusion – solidification pour un nodule sphérique contenant une quantité de MCP. Des études pour chaque type d'encapsulation devront être réalisées pour mieux connaître le processus et les phénomènes prépondérants qui limitent les densités de flux soutirable.

4.2.2 Autres mise en œuvre de MCP pour le stockage

Nous allons maintenant continuer à présenter les différentes mises en œuvre des MCP pour le stockage de chaleur. A la fin de ce chapitre, une partie sera consacrée aux effets de dilatation volumique des matériaux à changement de phase conséquence de leur transition solide/liquide. Ce paragraphe mettra en avant les effets néfastes mais aussi des remarques sur les effets de retassure et de dilatation volumique.

Ci-dessous sont présentés les réservoirs de stockage cylindriques, dans lesquels sont arrangés des modules de confinement intégrant des MCP sous forme de barres, de bouteilles ou de panneaux.

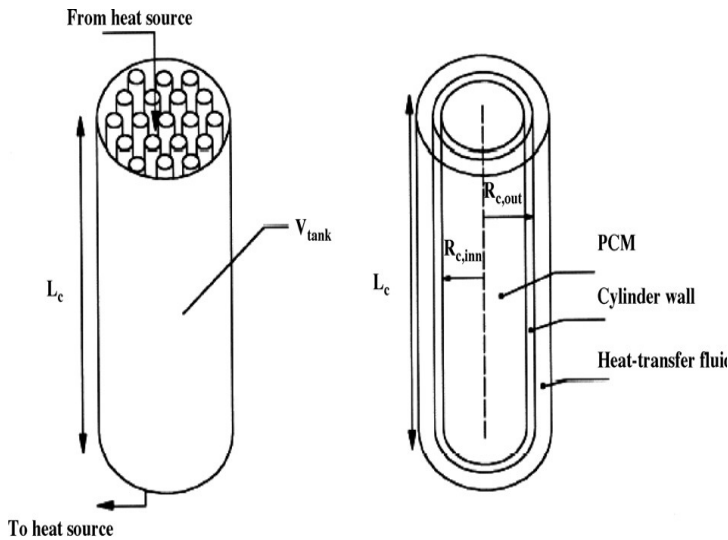


Figure 36 : Réservoir cylindrique avec barres de MCP intégré [4]

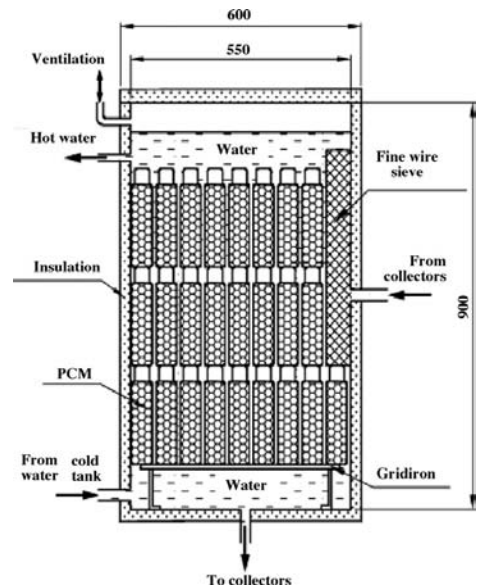


Figure 37 : Cross-sectional view of the cylindrical heat storage tank combined with PCM bottle [4]

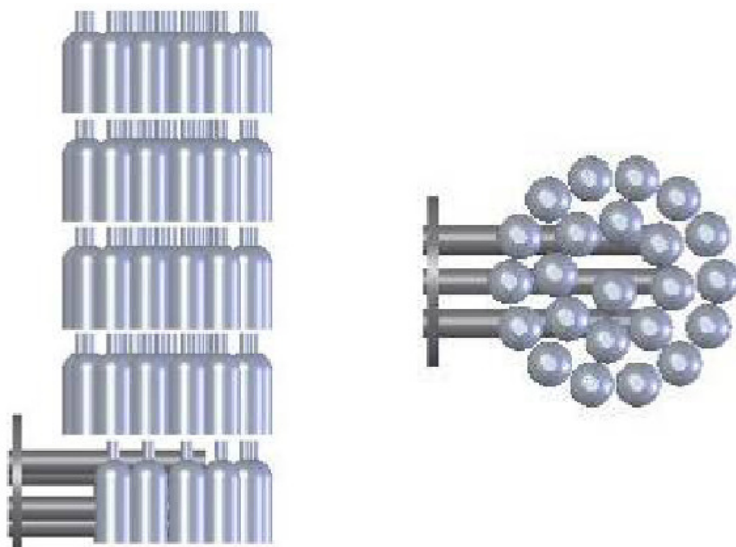


Figure 38 : réservoir rempli avec des bouteilles de MCP intégré (Projet POWER PCM) [15]



L'entreprise Kaplan Energy et bien d'autres encore proposent des systèmes solaires combinés intégrant des stockages à MCP.

On trouve aussi des réservoirs dans lesquels l'échangeur de chaleur est noyé dans un MCP,

mais ce type de stockage pose des problèmes lors de la phase de solidification du MCP. En effet, la couche solidifiée qui croît graduellement dans le temps de décharge, crée de fortes résistances thermiques et limite les échanges entre les deux média.

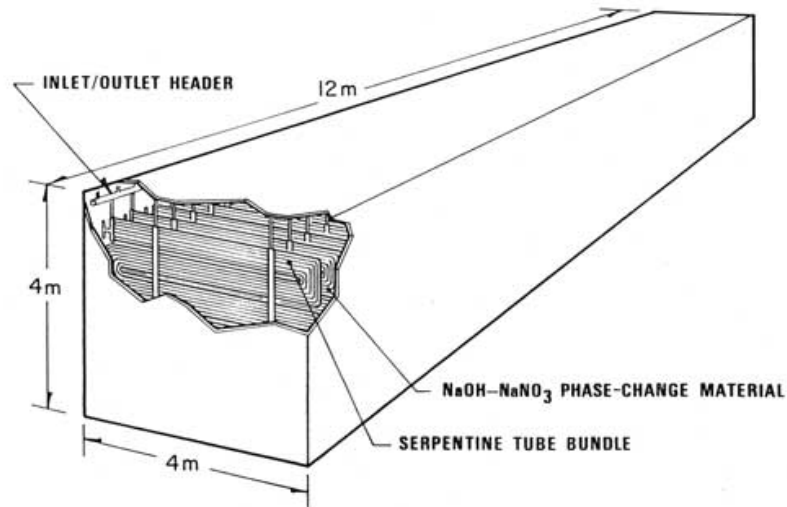


Figure 39 : réservoir horizontal avec échangeur noyé dans un MCP

On remarque donc que la mise en œuvre de MCP dans des réservoirs de stockage présente de nombreuses solutions. Chaque solution doit être adaptée en fonction :

- de l'application
- du niveau de température de stockage
- du fluide de transfert
- du MCP et du type de confinement du MCP

Dans cette optique, une amélioration **des géométries de confinement des MCP** (autres que sphères simples et cylindres) pourrait accroître les capacités de stockage ainsi que les temps de charge/décharge.

L'ajout de MCP confinés dans les stockages d'eau, accroît fortement les capacités de stockage pour de faibles différences de température.

4.2.3 Le système RHTS

Un nouveau système de stockage appelé le **RHTS** (Reflux Heat Transfert Storage) dans lequel, le fluide de transfert est utilisé comme véhicule thermique entre un échangeur en pied de stockage et une autre au sommet. En intermédiaire est placé le MCP. L'énergie de charge arrive par l'échangeur du bas, la décharge se faisant par celui du haut entre le milieu de stockage thermique en MCP et deux échangeurs (HE) de chaleur placés à l'extérieur, en bas et en haut et de la cuve de stockage (cf. Figure 40).

L'échangeur du haut de la cuve est un générateur de vapeur, il est alimenté en eau à haute pression (de retour de condensat) pour produire de la vapeur surchauffée pendant le cycle de décharge de stockage. L'échangeur du bas est utilisé pour charger le stockage thermique. Il est immergé dans le liquide de transfert et connecté au fluide solaire de travail, par exemple un flux de vapeur surchauffée ou de l'huile synthétique.

Au cours de cycles de charge, due à l'ébullition du fluide de transfert, il ya un écoulement intensif de la vapeur à travers les canaux de transport qui distribue la chaleur dans le MCP en se condensant sur les tubes, l'énergie latente des vapeurs est transférée à travers les parois pour le MCP. Pour la décharge, la direction du flux de chaleur est inversée. Le MCP chaud provoque l'évaporation du fluide de transfert et les vapeurs transmettent la chaleur au générateur de vapeur situé en haut via le processus de condensation.

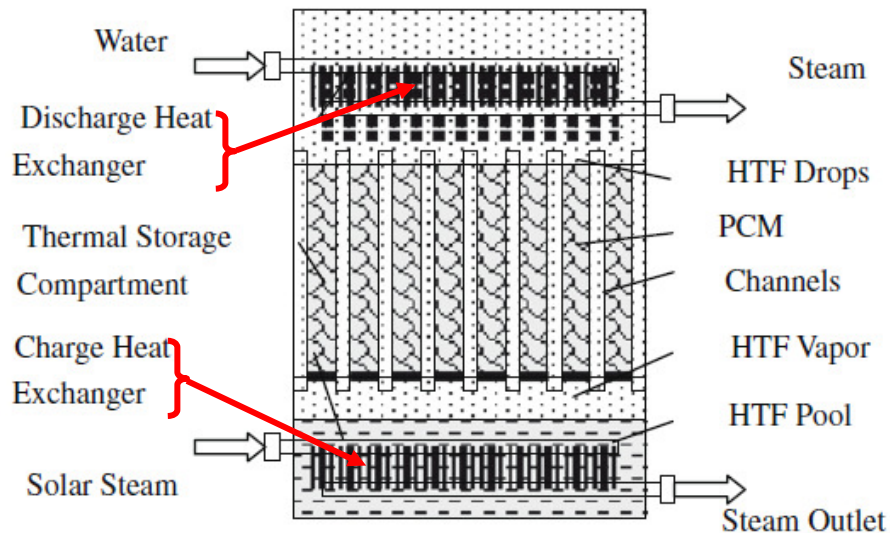


Figure 40 : Schéma du concept RHTS [9]

Un concept de RHTS pour la production à haute température de vapeur surchauffée dans la gamme 350°C-400°C a été développé et testé. Le support de stockage thermique est une substance métallique, alliage Zinc(Zn)-Etain(Sn), qui sert de matériau à changement de phase (MCP). Un fluide caloporteur à haute température de transfert (HTF) (mélange eutectique des oxyde de biphényle / diphényle) est ajouté au MCP de stockage afin d'améliorer l'échange de chaleur dans le système de stockage, qui comprend des unités de MCP et les échangeurs de chaleur associé servant à charger et décharger le stockage.

Le mécanisme de transfert de chaleur appliquée est basé sur le reflux du HTF créé par un processus combiné d'évaporation-condensation. Ce système a confirmé qu'un MCP avec une fraction de 70% en poids de Zn dans l'alliage (Zn70Sn30) est optimale pour atteindre une température de stockage de 370°C, à condition que la source de chaleur, vapeur ou l'huile synthétique, chauffée par le soleil soit à une température d'environ 400°C. Ce MCP fond progressivement entre 200 et 370°C et sa valeur d'enthalpie de changement d'état est constante dans toute cette plage de fusion.

Le concept de stockage thermique a été étudié expérimentalement en utilisant un appareil à l'échelle du laboratoire. Il a permis de mener simultanément la recherche sur les matériaux de stockage, la réalisation de mesures de performances thermiques et une observation critique des profils de transfert de chaleur dans le système. Les tests ont donné des résultats satisfaisants en termes de stabilité thermique et de compatibilité des matériaux de stockage utilisés comme l'alliage Zn70Sn30 et le mélange eutectique d'oxyde de biphényle et de diphényle, jusqu'à une température de fonctionnement de 400 °C. Sur la figure suivante, on peut voir un montage de 2 RHTS (stockage thermique + tampon) mise en parallèles avec 2 sources de production d'énergie intermittentes.

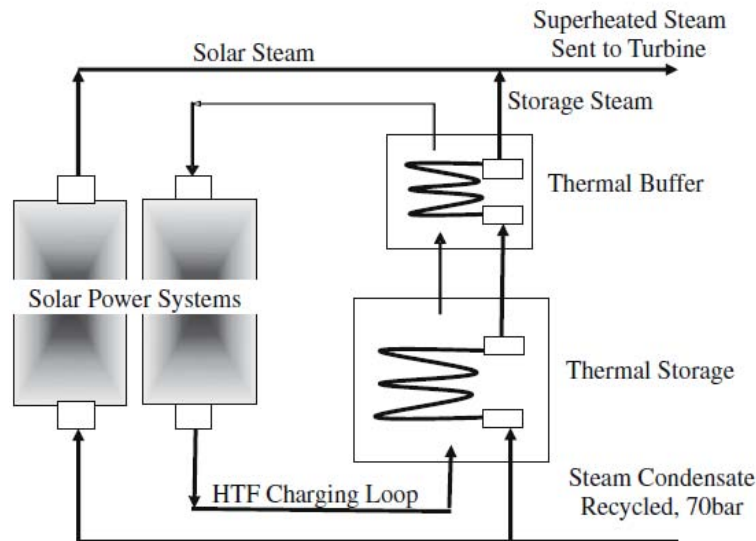


Figure 41: système à deux RHTS intégré en parallèle dans une centrale solaire (stockage + tampon) [9]

Sur la figure 41, on peut voir qu'une des deux sources d'énergies charge en permanence le système de stockage tandis que l'autre fonctionne normalement pour produire de l'électricité. Lorsque que l'énergie par l'intermittente est indisponible, alors l'énergie précédemment accumulée dans le MCP prend la relève pour générer de la vapeur surchauffée et au final l'électricité. Une simulation de ce système de stockage a été réalisée. Elle met en œuvre 2000t de MCP pour le stockage, 600t pour le tampon et offre une capacité de stockage de 52MWh.

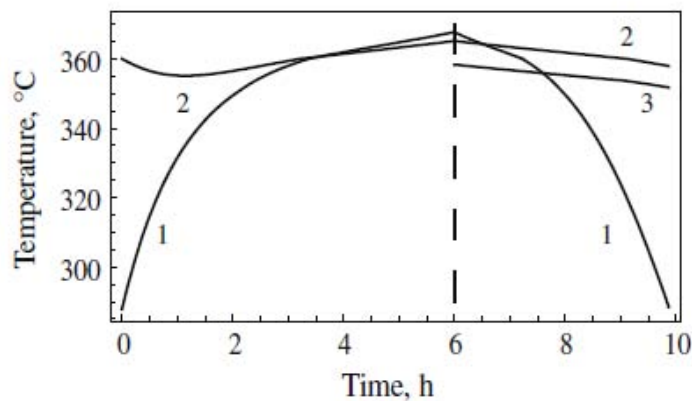


Figure 42 : profil de température pour le branchement en // (1- stockage principale MCP; 2- stockage tampon MCP; 3- sortie vapeur surchauffé) [9]

Sur la figure 42 suivante, on peut observer les cinétiques de charge et décharge fournit par le système. Ainsi un temps de charge de 6h permet un temps de décharge de 4h donc une production de vapeur pendant 4 heures. Il prend alors la relève de production d'électricité pendant les phases creuses de l'intermittence.

Il nécessite toutefois, l'adjonction d'une centrale solaire de production de vapeur surchauffée indépendante pour le stockage et augmente significativement le cout de l'installation.

Malgré le surcout financier par rapport à système simple à sels fondus, les résultats expérimentaux de ce travail ont montré la faisabilité d'un stockage par chaleur latente (RHTS) composé de matériaux disponibles dans le commerce. En effet, l'alliage Zn70Sn30 (MCP) et le mélange eutectique des oxydes de biphényle / diphényle (HTF) possèdent les propriétés thermo-physiques appropriées, ils sont chimiquement compatibles et possèdent la stabilité et les performances thermiques nécessaires pour un stockage de chaleur destiné à alimenter une machine à vapeur surchauffée à une température de près de 350 °C.

4.3 Les prototypes développés par le DLR

Le DLR développe des nouveaux concepts de stockage par chaleur latente avec lesquels de la vapeur industrielle est produite à une température comprise entre 120 et 250 °C. Différents mélanges de sels, chacun développé pour une température de fusion dans la gamme de température du processus, sont utilisés comme MCP. Le stockage combine une forte chaleur spécifique avec une possibilité de fournir de la vapeur d'eau à la température appropriée. Le problème dominant dans le développement de systèmes utilisant des MCP est la limitation de la densité de puissance qui résulte de la faible conductivité thermique du matériau de stockage car ces mélanges salins ont une faible conductivité thermique. A l'instar des réflexions qui ont conduit à utiliser des ailettes pour des échangeurs à air, les scientifiques du DLR ont conçu un système de transfert de chaleur avec du graphite ou de l'aluminium, qui possèdent tous les deux une forte conductivité thermique, pour augmenter la densité de flux surfacique. Cela permet d'atteindre des cycles rapides de Charge/Décharge. Dans cette optique, le DLR à lancé plusieurs projets :

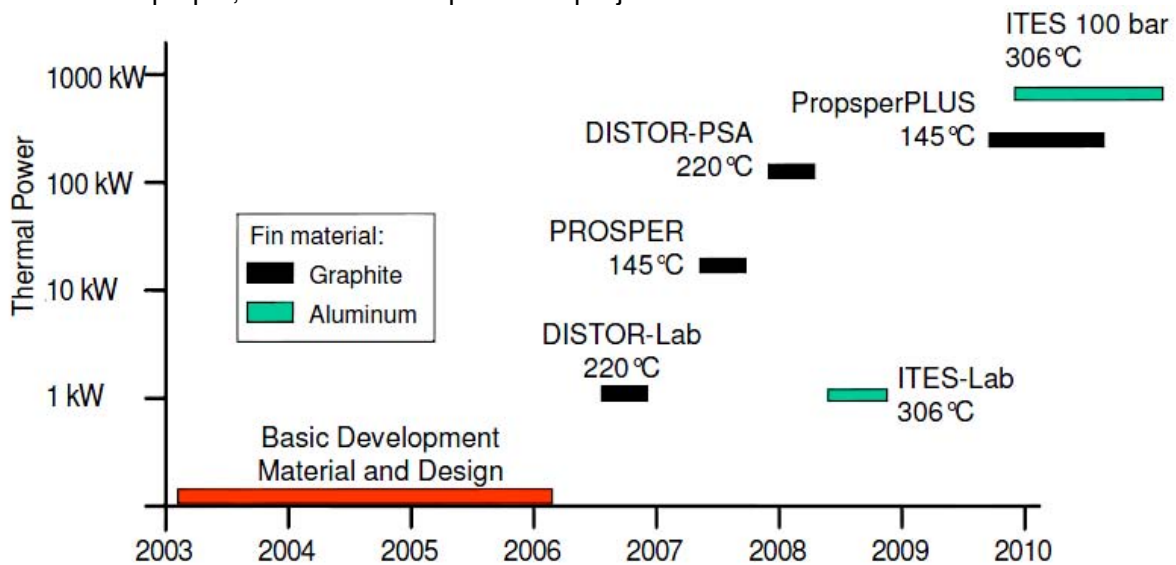


Figure 43 : historique du développement de système de stockage par le DLR [DLR]

Voici les principales propriétés des MCP utilisée pour les projets du DLR :

PCM	Melting temperature [°C]	Heat of fusion [kJ/kg]	Density liquid [kg/m ³]	Capacity Latent heat [kWh/m ³]	Estimated costs in \$/kWh only mater. Only latent heat
KNO ₃ -NaNO ₂ -NaNO ₃	142	60	1980	33	52.5
KNO ₃ -NaNO ₃	222	100	1960	54	17.5
NaNO ₃	306	175	1910	93	9.5

Tableau 19: MCP utilisés par le DLR pour du stockage par chaleur latente [DLR]

Parmi de nombreux concepts basiques, celui du sandwich à été retenu comme ayant le plus grand potentiel de commercialisation d'un stockage par MCP. Ce système consiste en l'assemblage en parallèle de fine plaques de graphite (ailette de 1mm) entre lesquels est introduit un MCP à base de sels fondus. La vapeur d'eau (ou le fluide transfert) circule à l'intérieur des tubes (cf. Figure 44). Le choix du MCP s'est tourné vers des mélanges eutectiques de sels qui possèdent une température de fusion propre à l'application. Dans

son état fondu, le MCP est versé dans un récipient, dans lequel l'échangeur de chaleur, constitué de tubes et ailettes en graphite, est placé à l'avance. Le choix du graphite en tant que matériel d'ailette offre de nombreux avantages car il possède une très forte conductivité thermique mais aussi des propriétés mécaniques très intéressantes. En effet, en raison de sa résistance à la corrosion et aux attaques chimiques, sa forte conductivité thermique et sa faible masse volumique, le graphite s'est imposé comme moyen d'augmenter la conductivité thermique des sels.

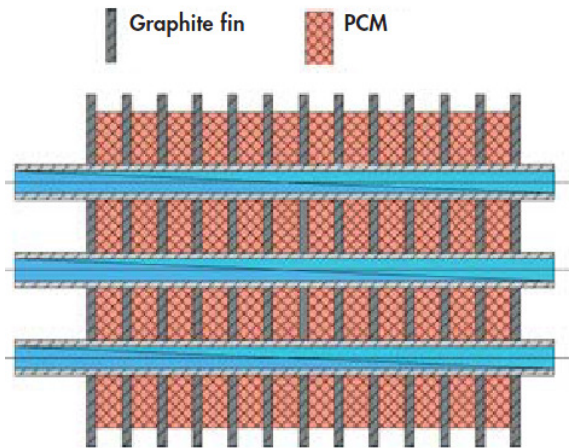


Figure 44 : Schéma du concept « sandwich »

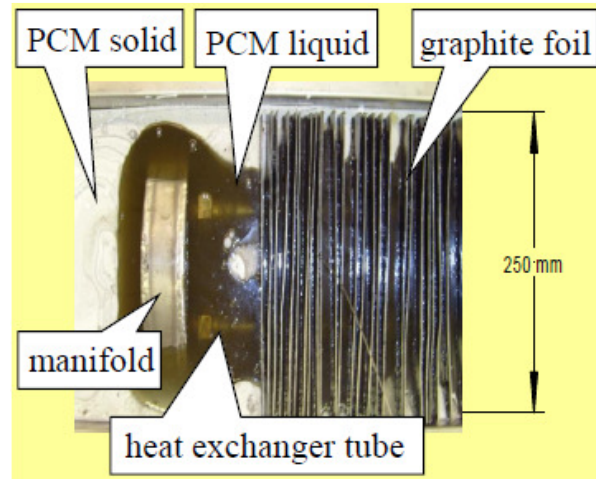


Figure 45 : maquette développée par le DLR

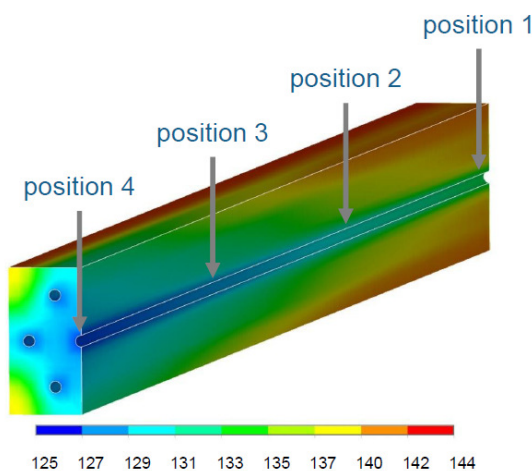


Figure 46 : Simulation du profil de distribution de température du MCP (t=30min)

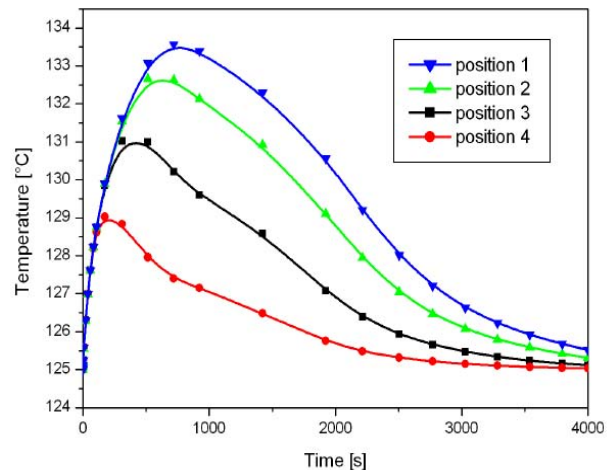


Figure 47 : profil de température du fluide de transfert en fonction du temps (température initiale du MCP=155°C ; Température d'entrée d'eau=125°C ; vitesse d'eau =2.3m/s)

La simulation montre que ce procédé est capable de produire de la vapeur d'eau à plus de 125°C pendant plus d'une heure grâce au changement d'état du MCP avec une température initiale de 155°C (cf. Figure 46). On constate bien l'augmentation en température de la vapeur d'eau due à la libération de chaleur du MCP (précédemment emmagasiné durant la phase de charge), puis la mise en équilibre du système qui tend vers une température de 125°C.

Le pilote industriel pour des applications de rejets de chaleur industrielle, développé en partenariat avec la société allemande SGL a les caractéristiques suivantes :

- type de PCM : $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$
- Melting Point= 142°C
- Masse de PCM : 5.7 t
- Volume totale : 4.4 m^3
- environ 290 ailettes de graphite
- Pression maximale : 16 bars
- puissance de Charge/décharge : 100kW
- capacité thermique : 200kWh
- Mise en service en Avril 2010



Source: SGL Carbon GmbH

Figure 48 : Prototype industriel

Les résultats ont montré une bonne capacité thermique de stockage et la faisabilité d'un système de stockage de chaleur PCM/Graphite. Les prochaines étapes sont maintenant sa commercialisation en plusieurs gammes de 100kW et d'augmenter cette puissance jusqu'à un MW.

Un autre système de stockage, aussi bien pour les rejets industriels chauds que pour les centrales DSG (Direct Steam Generator) a été développé. Une fois les tests et simulations réalisés, le DLR a testé des prototypes sur la plateforme Solar de Almeria (Espagne).



Figure 49 : Vue de dessus du prototype du système de stockage PCM /ailette de graphite

Pour ce prototype, le PCM utilisé est un mélange de nitrate de potassium et de nitrate de sodium ($\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$) ayant une température de fusion de 222°C . Plus de 2 tonnes de MCP et 120 kg de plaques de graphites ont été utilisées. La pression maximale de 40 bar était atteinte. Les tests ont été réalisés avec succès au cours de l'été 2007 atteignant une capacité de stockage de 100kWh.

Un autre prototype, destiné à la condensation et à l'évaporation de la vapeur est réalisé avec un stockage de nitrate de sodium (NaNO_3) dont la température de fusion est de 306°C . Le module de stockage utilise une « conception sandwich » développée par le DLR pour atteindre des taux élevés de transfert de chaleur. Ici, des ailettes en aluminium œuvrent pour optimiser les temps de charge et les temps de décharge, elles ont été développées en collaboration avec le sous-traitant Spanner RE². En effet, au delà de 250°C , des ailettes en aluminium sont préférées à des ailettes en graphite expansé. Après des essais concluants en laboratoire, le prototype industriels contient environ 14 tonnes de sel avec une capacité de stockage par chaleur latente avoisinant 680kWh et adaptées aux paramètres de conception de la boucle d'essai (128 bar, 400°C). Les pertes de pression à travers le module de stockage PCM sont très faibles, car le fluide s'écoule à travers de nombreux tubes parallèles qui atteignent 7 m de longueur, ce qui entraîne une faible vitesse d'écoulement.

En mode charge, la vapeur à une température légèrement au-dessus des propriétés de saturation (typiquement 107 bar, 320°C) est acheminée dans le module PCM où elle se condense. Le sens de circulation pendant la charge est de haut en bas afin que le condensat s'évacue par gravité assurant ainsi que le medium quitte le module sous forme liquide. Ce module doit être capable de condenser l'écoulement de 0,8 kg / s. Pour la décharge, il est alimenté avec de l'eau liquide à une température juste au-dessous des propriétés de saturation (typiquement 81 bar, 295 C). Pendant cette phase, la direction d'écoulement est de bas en haut et permet de fournir de la vapeur d'eau.



Figure 50 : Vue avant l'assemblage complet [8]

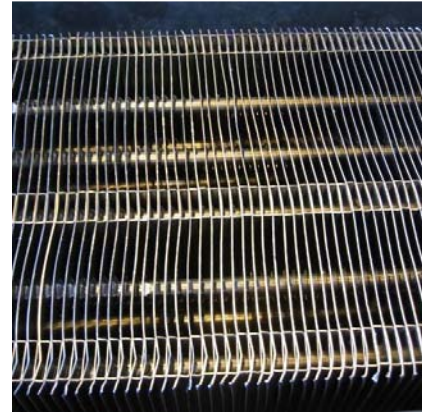


Figure 51 : assemblage des ailettes en aluminium [8]



Figure 52 : PCM test module at the test site (with and without insulated) [8]

Caractéristique de l'installation:

- type de PCM: NaNO₃
- Melting Point:306°C
- Volume de PCM: 8.4m³
- hauteur total: 7.5m
- masse total: 14t
- capacité de stockage : 700kWh
- Mise en service en mai 2010

L'isolation est à l'évidence un paramètre important pour tout ses systèmes de stockage qui sont équipés de plus de 40cm de laine de verre afin de limiter les déperditions vers l'extérieur et donc d'augmenter l'efficacité.

Ces tests montrent que ce concept sandwich améliore le transfert de chaleur avec une puissance de sortie significative, même lorsque les températures sont élevées et en dépit de la faible conductivité thermique du MCP. Après 172 cycles de fusion/solidification à 306°C, aucune dégradation n'a été détectée.

Pour des DSG, ces types de stockage par chaleur latente sont couplés avec des systèmes de stockage par chaleur sensible. Le système proposé est en trois parties (cf. figure 53). Il est constitué d'une unité de préchauffage de béton, un évaporateur en MCP et une unité de surchauffeur béton. Pendant la décharge, l'eau d'alimentation entre dans le préchauffeur (A), elle est chauffée à une température proche de la courbe d'ébullition (B), puis l'eau est distribuée à travers le stockage en MCP, où une partie s'évapore (C). Une séparation vapeur/eau se fait dans le ballon, la vapeur est surchauffée dans l'unité de béton (D), tandis que l'eau résiduelle est recyclée à travers le stockage PCM.

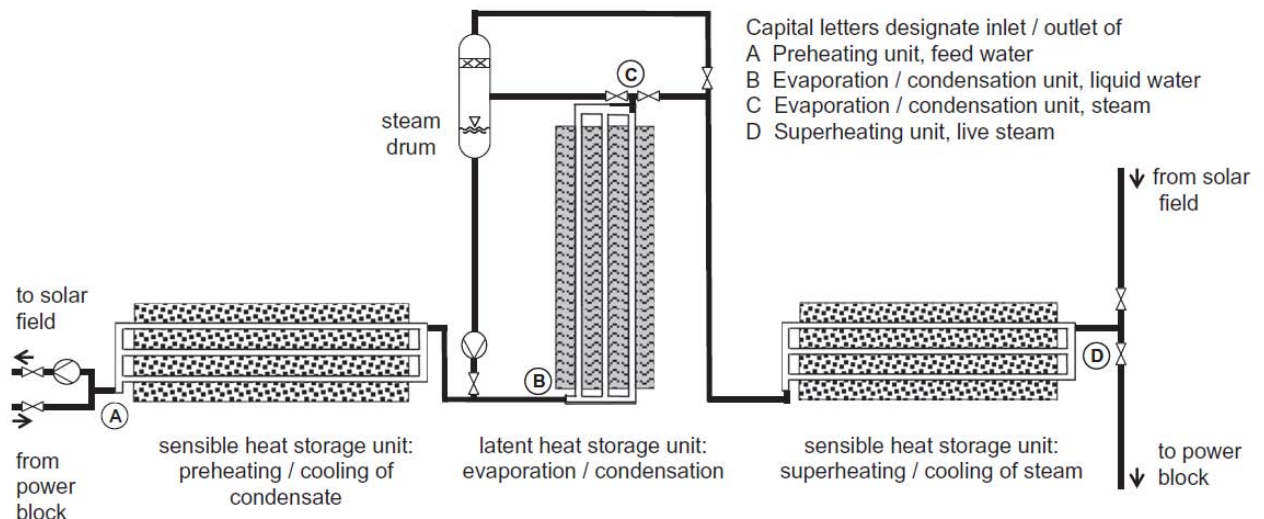


Figure 53: Thermal Energy storage system for DSG combining latent and sensible storage [8]

Ce procédé de stockage s'avèrent être très performant et prometteur. Par sa production de vapeur d'eau il peut être directement connecté à un système de production d'électricité via turbine et alternateur.

Les effets de dilatation volumique des MCP :

Lorsque le MCP change de phase, sa masse volumique, passe de la valeur à l'état solide à celle de la valeur liquide, sachant que cette dernière est dans la plupart des cas la plus grande cela provoque une dilatation volumique (fonction de la température) qui ne peut pas être négligée. En effet, lors de la lecture de ce cahier, on a pu constater cette différence entre masse volumique solide et liquide, mais aussi on a pu voir que pour chaque encapsulation il convient de laisser un espace libre pour permettre l'expansion volumique lors du passage de l'état solide à l'état liquide. Si celle-ci n'est pas prévu, il en résulte une augmentation de la pression au sein de l'encapsulation lors de la phase de liquéfaction, et donc à des efforts supplémentaires sur la paroi de l'encapsulation. A long terme, le matériau d'encapsulation subissant à chaque cycle de fusion/solidification des efforts et contraintes sur sa paroi se fatigue et peut ainsi se détériorer rapidement (perçage rupture), laissant ainsi s'échapper le matériau à changement de phase.

Lors de la phase de rétraction (liquide--> solide), un effet de retassure peut avoir lieu. En effet, la retassure qui intervient lors du refroidissement (la rétraction due à un changement de température qui provoque un changement d'état) cause la formation de zone de vide qui par la suite engendre une baisse de performance et une détérioration des nodules par la création d'une résistance thermique supplémentaire qui agit comme une isolation, on aura donc besoin de plus d'énergie pour provoquer le changement de phase totale.

Les effets de retassure sont encore mal définis et très peu renseignés car très difficilement modélisable même avec des outils performant de CFD, ils sont surtout étudiés pour palier

des problèmes dans le domaine de la soudure ainsi que de la fonte et le moulage de pièces (métallique ou plastique).

NB : Nous avons fait apparaître, dans la mesure du possible et ceci pour chaque MCP identifié, les valeurs de masse volumique solide et liquide. Le lecteur pourra ainsi calculer pour un même poids de MCP dans un nodule, quelle augmentation de volume il devra compenser (par un vide) lors du changement de phase. Aussi, lorsque les informations sont données, il apparaît un coefficient de dilatation volumique (en K^{-1} ou en %) qui permet de quantifier l'augmentation lors de ce changement de phase).

5. Conclusions - Recommandations générales

Lors de cette étude nous avons pu identifier de nombreux fabricants de matériaux à changement de phase, ainsi que les différentes mise en œuvre. Quelques MCP commercialisés rentrent dans la gamme des hautes températures (>100°C).

Il est montré que le stockage de chaleur latente, par le biais de matériaux à changement de phase, est technologiquement intéressant du point de vue de la quantité d'énergie stockée et des performances thermiques atteignables. Néanmoins, pour les gammes de haute température (100°C-400°C), les applications industrielles sont quasi inexistantes et restent au point de pilotes de recherche (prototype de recherche). En effet, pour des températures supérieures à 100°C, les MCP sont difficiles à mettre en œuvre pour leur confinement, la maîtrise des transferts de chaleurs, leur durée de vie et restent encore à un prix unitaire trop important. Dans le cadre de ces MCP, seules des solutions pour des applications à basse température (et donc souvent liée à la thermique du bâtiment) sont à un bon niveau de maturation. On notera néanmoins les projets de recherche du DLR qui sont prometteurs mais encore au stade d'essai.

Pour conclure, le choix d'un stockage de chaleur par le biais de MCP est fonction de nombreux paramètres à prendre en compte. Le MCP et son confinement seront choisis en fonction de la température de fusion du MCP et de celle à laquelle il doit travailler. Un regard attentif doit être porté sur les problèmes liés au processus surfusion/sous-refroidissement mais aussi à la dégradation des performances due au nombre de cycle thermique (hystérésis, vieillissement...etc.). Les développements à ce jour ont principalement porté sur des formes simples sans aucune intensification des transferts de chaleur et des capacités de stockage (étude de la cinétique de charge et de décharge).

Au final, cette étude sur les MCP a clairement identifié qu'une amélioration des géométries des nodules et autres confinements des MCP pourrait permettre d'accroître les performances de tels systèmes.

Beaucoup de ces MCP sont issus des industries pétrolière et chimique qui utilisent des processus énergivores pour leurs productions.

Pour être conforme aux directives européennes, aux accords de Kyoto ainsi qu'aux enjeux du Grenelle de l'environnement concernant les émissions de gaz à effet de serre, on devra faire un bilan en CO₂ et évaluer la consommation d'énergie grise, et cela pour tout système utilisant un MCP dans le stockage ou le transport d'énergie. Il s'agit en vérité d'une approche globale (fabrication, utilisation, démantèlement). La part de l'énergie grise d'un système est souvent oubliée. En effet, une solution par approche trop simplifiée paraît souvent énergétiquement et économiquement viable, alors qu'une étude globale la montre très énergivore et émettrice de CO₂.

La prise en compte de ces paramètres sera donc une partie importante pour satisfaire ces exigences réglementaires et éthiques.

Pour mémoire : l'énergie grise correspond à la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, à la fabrication, à l'utilisation et enfin au recyclage des matériaux ou des produits industriels. En théorie, un bilan d'énergie grise additionne l'énergie dépensée lors :

- de la conception du produit ou du service.
- de l'extraction et le transport des matières premières.
- de la transformation des matières premières et la fabrication du produit.
- de la commercialisation du produit ou du service.
- de l'usage ou la mise en œuvre du produit.-de l'entretien, des réparations, des démontages du produit dans son cycle de vie et du recyclage du produit.

6. Bibliographie

[1] **Andreas Hauer, Harald Mehling, Peter Schossig, Motoi Yamaha, Luisa Cabeza, Viktoria Martin, Fredrik Setterwall** - International Energy Agency (IEA), Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage, Annex 17 (ECES), "Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration projects" - Final Report

[2] Rapport scientifique PROMES (PROcédés, Matériaux et Energie Solaire) & CNRS 2007-2008-2009

[3] **Rainer Tamme, Doerte Laing, Hans Müller-Steinhagen, Wolf-Dieter Steinmann.** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Institut für Technische Thermodynamik (DLR) - "Energieautonomie durch Speicherung Erneuerbarer Energien", 30. – 31.10, 2006, Gelsenkirchen, Germany High Temperature Heat Storage for Industrial Process Heat and Power Generation

[4] **Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 318–345. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications.

[5] **Thomas Hasenöhr** - Project Report 2009 MVK 160 Heat and Mass Transport May 09, 2009, Lund, Sweden - An Introduction to Phase Change Materials as Heat Storage Mediums.

[6] **Z. Acem (Doc), Y. Jannot (IR CNRS), J. Lopez (Doc), V. Morisson (Doc), E. Palomo (Pr), A. Boudenne (ATER), Y. Candau (Pr), L. Ibos (MdC) J.P. Dumas (Pr), J. Lopez (Doc), J. Zeraoui (MdC)(TREFLE, LaTEP, CERTES)** - Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température HTP-STOCK (ACI Energie 2003) Rapport final, juillet 2006

[7] **Jérôme Lopez, Zoubir Acem, Elena Palomo Del Barrio** - Applied Thermal Engineering 30 (2010) 1586-1593. KNO₃/NaNO₃ Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part II. Phase transition properties

[8] **Laing, D. et al** - Thermal energy storage for direct steam generation - Sol. Energy (2010), doi:10.1016/j.solener.2010.08.015

[9] **R. Adinberg, D. Zvegilsky, M. Epstein** - Heat transfer efficient thermal energy storage for steam generation - Energy Conversion and Management 51 (2010) 9–15

[10] **Francis Agyenim, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth** - A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS) - Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 615–628

[11] **Francis Agyenim, Philip Eames, Mervyn Smyth** - A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins - Solar Energy 83 (2009) 1509-1520

[12] **Marc Medrano; Antoni Gil; Ingrid Martorell; Xavi Potau; Luisa F. Cabeza** - State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2 - Case studies - Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 56-72

[13] **H.Kakiuchi; M.Yamazaki; M.Yabe; S.Chihara; Y.Terunuma; Y.Sakata and T.Usami** - A Study of Erythritol as Phase Change Material Tsukuba Research Center, Mitsubishi Chemical Corporation - IEA Annex 10 – PCMs and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage 2nd Workshop, November 11-13 1998, Sofia, Bulgaria

[14] **Horst Michels; Robert Pitz-Paal** - Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants - Solar Energy 81 (2007) 829-837

[15] **S. Citherlet ; J. Bony et J. Morel** - Projet POWER PCM - Rapport final. Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD/LESBAT)

[16] **F.L. Tan; S.F. Hosseinizadeh; J.M. Khodadadi; Liwu Fan** - Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule - International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 3464–3472

Site web:

www.Rubitherm.com

www.PureTemp.com

www.SGLgroup.com

www.zae-bayern.de

www.thermal-design.com/synthetic.html

www.epsltd.co.uk/pcm.htm

www.teappcm.com

www.kaplan-energy.comwww.Rubitherm.com

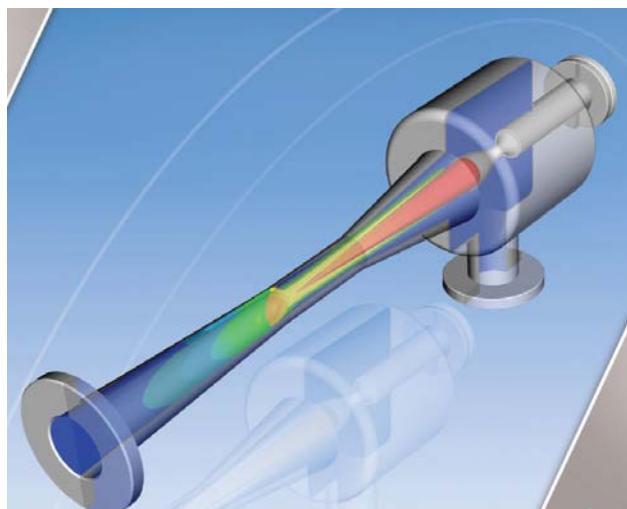


Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°7 : Les machines thermofrigorifique à éjection



Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	3
2.1 L'éjecteur- Principe de fonctionnement.....	5
2.1.1 L'éjecteur supersonique.....	5
2.2. Avantages et Inconvénients	7
2.3 Les cycles à éjecteur et compresseur	7
2.4 Cycle à compresseur et éjecteur au CO₂ supercritique.....	9
3. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	10
4. CONCLUSIONS.....	12
7. BIBLIOGRAPHIES.....	13

1. Introduction

Parmi les machines thermodynamiques à trois sources de chaleur, la machine à éjecto-compresseur présente un intérêt certain en raison de sa simplicité de conception dans le cas d'une utilisation d'énergie gratuite (énergie solaire) ou à bas niveau de température (rejets thermiques). En effet, la plupart des procédés industriels génèrent des rejets énergétiques qui sont disponibles à un très bas cout et certains de ces procédés ont aussi des besoins en réfrigération. On pourrait donc envisager de valoriser cette énergie perdue pour la production de froid *in situ*. Cette technique de faire du froid par du chaud est une des voies prometteuses en ce qui concerne la valorisation des rejets thermiques à bas niveaux de température. Dans ce cadre là, plusieurs technologies existent d'ores et déjà sur le marché avec des degrés de développement et de performance différents comme les machines frigorifiques à compression et les PAC (détaillées dans les fiches n°12), les machines frigorifiques à sorption (ab et ad ; qui font sujet à la fiche n°5), mais dans cette fiche nous allons parler des systèmes de réfrigération avec éjecteur.

En effet, la technologie de réfrigération avec éjecteur est plus attractive que la technologie conventionnelle à compression car elle est moins couteuse et ne nécessite pas d'apport d'énergie fossile ou électrique pour entrainer le compresseur. En général, les cycles de réfrigération à éjecteurs utilisent les rejets thermiques industriels comme source de chaleur dans la gamme de +60 °C à +150 °C pour produire un froid positif à des niveaux compris entre 0 °C et +20 °C : la technologie entre donc totalement dans le scope visé de cette étude, qui rappelons le vise les technologies de récupération/valorisation des énergies à bas niveaux de température dans une gamme comprise entre 70 °C et 200 °C.

2. Principes de fonctionnement

Ce système thermofrigorifique a été introduit par les travaux de l'ingénieur français Maurice Leblanc (1857-1923) sur les cycles à eau (1903, brevet sur l'éjecteur de vapeur d'eau – 1908, brevet d'une machine frigorifique à éjection de vapeur d'eau). Il est peu utilisé car les problèmes qu'il pose sont plus des problèmes de mécanique des fluides que des problèmes de thermodynamique. Un éjecteur performant est difficile à réaliser, surtout lorsque les débits volumiques de vapeur à déplacer ne sont pas très importants. C'est encore l'eau le frigorigène le mieux adapté à ce système.

Le système frigorifique à éjection, bien que fondamentalement différent du système à compression, utilise néanmoins, lui aussi, une méthode mécanique pour extraire la vapeur formée dans l'évaporateur frigorifique. Dans le système à compression, l'extraction de la vapeur résulte de l'aspiration mécanique du compresseur qui maintient la pression dans l'évaporateur à un niveau suffisamment bas. Dans le système à éjection, l'extraction de la vapeur est aussi le fait de l'aspiration mécanique de la vapeur par l'abaissement de pression qui résulte de la mise en vitesse de cette vapeur dans la partie convergente de l'éjecteur.

Comme nous venons de le dire, contrairement aux installations frigorifiques à compression courantes, les machines frigorifiques à éjection de vapeur ne possèdent pas de compresseur mécanique mais un compresseur à éjection de vapeur. Pour cette raison, il est possible d'utiliser différentes sources de chaleur pour la production du froid. De telles sources peuvent être par exemple l'énergie solaire ou la chaleur perdue provenant de différents processus.

L'installation basique comprend deux circuits :

- un premier circuit sert à la production du froid (cycle frigorifique ou de réfrigération)
- l'autre circuit sert à la production de vapeur d'entraînement (cycle de vapeur ou de puissance)

Dans le cycle de puissance (ou de vapeur), l'énergie fournie au générateur (par le biais de rejets thermique par exemple) sert à évaporer une partie du réfrigérant qui représente le fluide moteur (primaire) qui est à haute pression, il traverse ensuite l'éjecteur où il est mélangé à l'autre partie du réfrigérant qui représente le fluide entraîné (secondaire), provenant de l'évaporateur et où s'effectue aussi un recouvrement de pression. Puis la totalité du réfrigérant passe à travers le condenseur où il est condensé jusqu'à l'état liquide. Ce liquide sera ensuite pompé (augmentation de pression) vers le générateur et complète ainsi le cycle.

Dans le cycle de réfrigération, une partie du réfrigérant à l'état liquide (qui représente le fluide entraîné : secondaire) passe à travers une valve de détente pour l'amener à une plus basse pression. Le réfrigérant entre par la suite dans l'évaporateur où est produit, en s'évaporant, le froid désiré. Le réfrigérant est mélangé avec l'autre partie dans l'éjecteur où il est comprimé et le mélange passe à travers le condenseur où il est condensé jusqu'à l'état liquide et complète ainsi le cycle.

Plus simplement, un cycle frigorifique à éjecteur (et sans compresseur) se présente comme suit (cf. figure 1) :

- en sortie de condenseur (1), une partie du débit est dirigé vers une pompe qui comprime le liquide (2), au prix d'un travail très faible.
- le liquide sous pression est vaporisé dans un générateur (2-3) à relativement haute température (environ 100 °C), et éventuellement surchauffé, d'une valeur dépendant des propriétés thermodynamiques du fluide. L'énergie thermique fournie au générateur est une énergie payante ou non (issu de rejets et donc gratuite).
- cette vapeur surchauffée (3) est ensuite utilisée comme fluide moteur dans l'éjecteur.
- la partie du liquide qui n'a pas été reprise par la pompe est détendue dans l'évaporateur (4-5), puis dirigée vers l'éjecteur, comme fluide secondaire.
- le mélange sortant de l'éjecteur (6) est condensé dans le condenseur, et le cycle est bouclé.

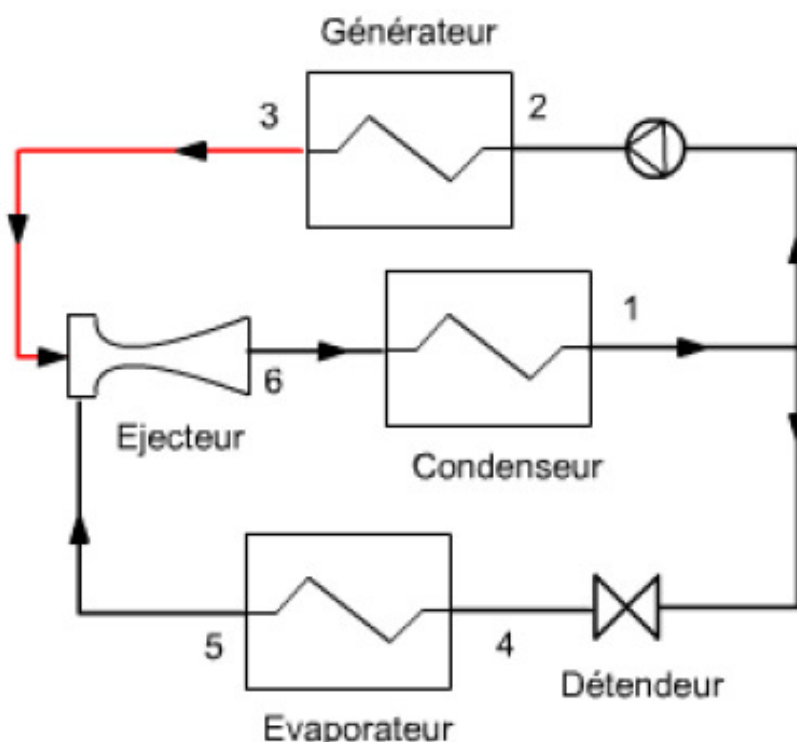


Figure 1 : Représentation d'un cycle thermofrigorifique à éjection

2.1 L'éjecteur- Principe de fonctionnement

Comme nous l'avons compris, la différence fondamentale entre un cycle frigorifique classique est due à la présence de l'éjecteur. Ce chapitre a pour but de décrire avec plus de détail le fonctionnement de ce composant.

L'éjecteur, qui est le cœur du système de réfrigération à éjecteur, a été inventé par Charles Parsons en 1901 pour éliminer l'air du condenseur de la machine à vapeur. Par la suite, comme nous l'avons déjà mentionné, le français Maurice Leblanc l'utilise en 1910 pour la première fois dans un système de réfrigération à jet de vapeur.

Les éjecteurs, appelés également appareils à éjecteur ou encore trompe, sont des appareils statiques destinés à aspirer, comprimer ou mélanger des gaz, des vapeurs et des liquides (voir même des solides) grâce à la détente d'un fluide primaire (moteur). Celui-ci peut être gazeux, en régime subsonique ou supersonique, ou liquide en régime incompressible, et apporte l'énergie nécessaire à l'entraînement du fluide secondaire.

Le principe de fonctionnement des éjecteurs repose sur l'utilisation de l'effet Venturi d'une tuyère convergente-divergente pour convertir l'énergie de pression d'un fluide moteur (flux principal) en énergie cinétique pour entraîner un fluide aspiré (flux secondaire), puis la recompression du fluide mélangé en reconvertissant l'énergie cinétique en énergie de pression.

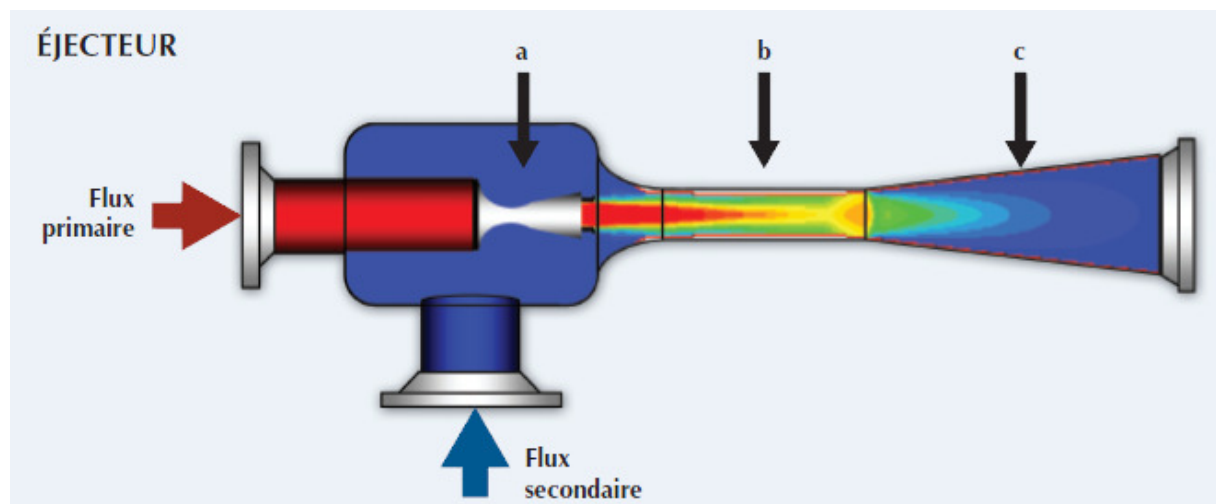


Figure 2 : Schéma de principe d'un éjecteur à gaz avec convergent-divergent mélangeur
a) chambre de mélange ;b) gorge ;c) diffuseur subsonique

Les éjecteurs sont des compresseurs statiques activés thermiquement qui comprennent une tuyère convergente-divergente, laquelle est intégrée à un corps principal généralement cylindrique. L'effet de compression résulte de l'interaction entre les deux flux de fluide. Le flux moteur est à haute pression et est produit dans un générateur utilisant une source de chaleur. Cette source peut provenir d'une chaleur de basse énergie. Les éjecteurs ont l'avantage de pouvoir être commandés par de la chaleur perdue et de servir de pompe à chaleur en effectuant les cycles appropriés pour produire des effets de valorisation de la chaleur (augmentation de température), de refroidissement ou de réfrigération, pourvu qu'une source thermique soit disponible.

2.1.1 L'éjecteur supersonique

Un éjecteur supersonique reçoit en entrée deux fluides généralement à l'état gazeux, mais qui peuvent aussi être liquide ou diphasiques :

- 1) le fluide à haute pression appelé fluide moteur (ou primaire)
- 2) le fluide à basse pression appelé fluide entraîné (ou secondaire)

La figure 3 montre l'évolution des pressions et des vitesses d'un éjecteur à gaz et à mélangeur convergent-divergent :

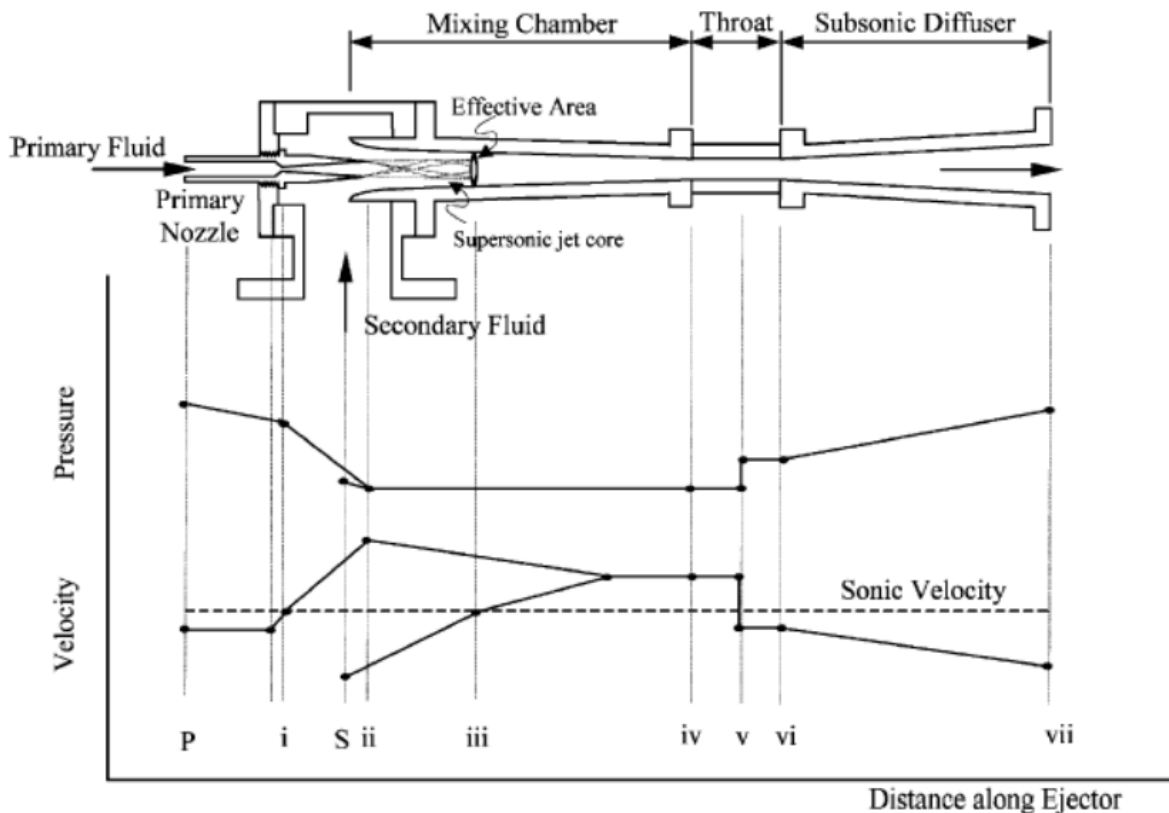


Figure 3 : Coupe d'un éjecteur à gaz avec mélangeur convergent-divergent- évolution des pressions et des vitesses [2]

Le principe de base du fonctionnement est le suivant:

- le fluide moteur est accéléré dans un convergent-divergent (tuyère primaire), créant une baisse de pression dans la zone de mélange, ce qui a pour effet d'aspirer le fluide secondaire.

- les deux fluides sont alors mélangés et une onde de choc peut prendre place dans la zone suivante (gorge). Il en résulte une augmentation de la pression du mélange et une baisse de sa vitesse qui devient subsonique.

- le diffuseur permet ensuite de convertir la vitesse résiduelle en une augmentation de pression.

Ainsi, l'éjecteur réalise une compression du fluide secondaire au prix d'une baisse d'enthalpie du fluide primaire.

Pour caractériser le fonctionnement global d'un éjecteur, trois paramètres importants sont pris en compte, à savoir :

- le rapport d'entraînement, rapport du débit-masse secondaire au débit masse primaire.
- le rapport de compression, rapport de la pression statique en sortie de diffuseur à la pression statique du fluide secondaire
- le rapport de sections de l'éjecteur qui détermine sa géométrie, à savoir le rapport de la section minimale sur la maximale.

Il existe évidemment une multitude de technologie différente d'éjecteur, mais le plus utilisé dans le domaine des machines à thermo-éjection est celui présenté précédemment : l'éjecteur à convergent-divergent mélangeur. Néanmoins, le lecteur pourra se référer à la bibliographie [2] qui fait état de l'art des technologies existantes des éjecteurs.

2.2. Avantages et Inconvénients

L'intérêt le plus notable de ce cycle, nous l'avons vu, est de remplacer le travail consommé par un compresseur par un travail beaucoup plus petit consommé par la pompe, et par une chaleur fournie au générateur à moyenne ou haute température. En effet, le principal avantage que procure l'éjecteur à un cycle de production de froid est : au lieu d'utiliser les énergies nobles (électrique, cinétique), il utilise des énergies thermiques gratuites ou non nocives (énergie solaire) où, il recycle les énergies perdues en forme de chaleur.

Un éjecteur est un système mécanique très simple, sans pièces mobiles et par conséquent il ne demande pas d'entretien ni de maintenance coûteuse (pas de lubrification ou de friction).

D'autres avantages :

- la fabrication d'une machine de réfrigération avec éjecteur est très simple.
- grande sécurité d'emploi.
- le système à éjecteur à une étanchéité parfaite et garantit donc que les fluides frigorigènes utilisés ne causent pas de pollutions à l'environnement (peu de risque de fuite).
- l'utilisation d'éjecteur dans les machines frigorifiques permet un fonctionnement à de bas niveaux de pression et permet ainsi l'utilisation de fluides qui d'habitude sont proscrits, comme l'eau.

Néanmoins, un certains inconvénient est à signalé. En effet, **les performances qui dépendent essentiellement des conditions de fonctionnement** : le rapport de compression obtenu est évidemment fonction du rapport d'entraînement et une variation de ce dernier induit directement une modification de la géométrie optimale de l'éjecteur, qui est bien évidemment impossible de réaliser une fois le système dimensionné. Il s'ensuit donc qu'un éjecteur s'adapte mal à un fonctionnement hors des conditions de fonctionnement établi lors du design. Une voie de résolution de ce problème serait la mise en place de stockage thermique en amont des alimentations du générateur afin de lisser les apports et donc de rendre les conditions de fonctionnement plus stable.

2.3 Les cycles à éjecteur et compresseur

Le principe des cycles éjecteur-compresseur repose sur le même principe de la machine frigorifique classique à compression mais avec l'ajout d'un éjecteur qui joue le rôle de détendeur.

Dans le but d'augmenter l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques conventionnels, une machine frigorifique à compression dans laquelle la détente du fluide frigorigène est assurée par un éjecteur au lieu d'un détendeur thermostatique classique, est présentée.

La naissance de ce cycle est due au fait que dans le cadre du développement durable, les efforts des chercheurs ont été concentrés d'une part, sur l'économie d'énergie des systèmes frigorifiques conventionnels à compression et d'autre part, sur le développement des technologies basées sur les fluides naturels tels que l'eau, l'ammoniac ou bien des fluides synthétiques plus respectueux de l'environnement (tel que le nouveau fluide HFO 1234yf dont le potentiel de destruction de la couche d'ozone (ODP) est nul et celui du réchauffement global (GWP) est égal à 4 selon le panel intergouvernemental sur le changement climatique (IIPCC); Le HFO 1234yf est destiné à remplacer le R134a (HFC, ODP=0 et GWP=1450) en Europe.)

Plusieurs solutions ont été proposées par différents chercheurs pour augmenter l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques à compression. Parmi celles-ci, on retient celle proposée par Kornhauser en 1990 qui consiste à remplacer le détendeur thermostatique de la machine par un éjecteur afin de récupérer une partie de l'énergie cinétique du processus de détente de la haute pression (HP) à la basse pression (BP) pour augmenter la pression d'aspiration du compresseur. Ceci entraîne une diminution du travail consommé par ce dernier et, par suite, une augmentation du coefficient de performance de la machine frigorifique par rapport à celui de la machine de base fonctionnant aux mêmes niveaux de températures des sources chaude et froide.

La machine frigorifique conventionnelle de base est simple. Elle se compose des quatre éléments importants habituels : évaporateur, compresseur, condenseur et détendeur thermostatique. Afin de réduire les pertes exergétiques liées au processus de détente isenthalpique, un éjecteur (Figure 4) est introduit dans la machine de base à la place du détendeur thermostatique afin de récupérer partiellement l'énergie de détente pour augmenter la pression à l'aspiration du compresseur ce qui entraîne une diminution du travail consommé par ce dernier, augmentant ainsi le COP du système. Ainsi on obtient le système modifié (Figure 4) qui comprend en dehors du compresseur, du condenseur et de l'évaporateur, l'éjecteur proprement dit, une bouteille séparatrice liquide-vapeur et une vanne de détente.

La vapeur saturante du réfrigérant de la bouteille est aspirée par le compresseur à la pression P_4 (état liquide). Elle est comprimée jusqu'à la pression P_5 passant ainsi à l'état surchauffé. Cette vapeur est désurchauffée puis condensée, à pression constante dans le condenseur. A la sortie, le condensât (éventuellement sous refroidi) est dans l'état (6). Ce point correspond à l'état du jet moteur (P) qui pénètre dans la tuyère primaire de l'éjecteur (Figure 4) avec les caractéristiques de stagnation T_{P0} et P_{P0} . Le frigorigène subit une détente dans cette tuyère. A la sortie (plan 1), le fluide primaire (S) provenant de l'évaporateur avec la température et la pression de l'état de stagnation (T_{S0} , P_{S0}) supposées confondues avec celles de l'état (8). Les flux primaire P_1 et secondaire S_1 se mélangent ensuite dans la chambre de mélange. Une première augmentation de pression, due à la formation d'une onde de choc droite, a lieu dans la partie cylindrique de la chambre de mélange suivie d'une seconde due à la compression dans le diffuseur. A la sortie de l'éjecteur, le mélange est à l'état diphasique (4). La vapeur saturante dans l'état vapeur est aspirée par le compresseur alors que le liquide saturé dans l'état liquide traverse un détendeur avant de pénétrer dans l'évaporateur pour produire l'effet frigorifique escompté.

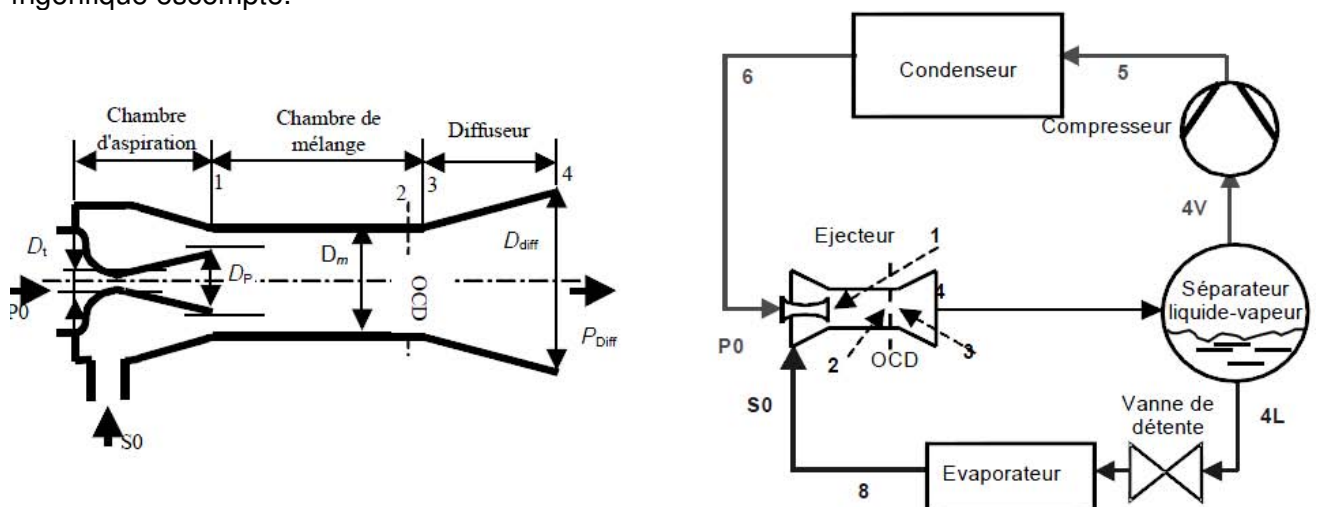


Figure 4 : Schéma d'un éjecteur de type mélangeur à section constante et schéma de principe d'un cycle frigorifique muni d'un détendeur à éjecteur

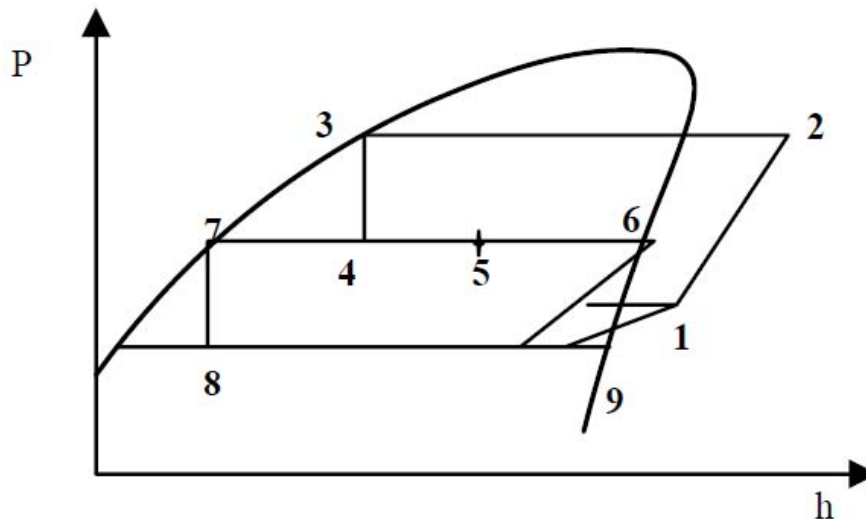


Figure 5 : Diagramme P-h d'un cycle à éjecto-compression

Les performances d'un éjecteur sont définies par un facteur d'entraînement U donné par :

$$U = \frac{m_S}{m_P}$$

Avec m_S et m_P les débits respectifs du fluide secondaire et du fluide primaire.

L'efficacité frigorifique ε ou COP de la machine tritherme à éjecto-compression est alors :

$$\varepsilon = U \frac{\Delta h_E}{\Delta h_B + w_P}$$

Où Δh_E et Δh_B sont respectivement les variations de l'enthalpie du fluide frigorigène aux bornes de l'évaporateur et du bouilleur et w_P est le travail massique consommé par la pompe.

On note ainsi que, par exemple dans la publication [3], pour des températures d'évaporation et de condensation égales respectivement à 0 et 55 °C, avec le frigorigène HFO 1234yf, l'emploi d'un éjecteur permettrait d'améliorer le COP de 42 %.

2.4 Cycle à compresseur et éjecteur au CO₂ supercritique

L'utilisation de CO₂ fait aussi nettement apparaître un gain de COP, néanmoins dans certaines conditions le cycle à compresseur et éjecteur présente une contrainte forte (notamment dans l'utilisation du CO₂ à l'état supercritique) : la répartition des débits entre les branches à haute et basse pressions doit impérativement être cohérente avec le titre du frigorigène en sortie de l'éjecteur, ce qui demande de mettre en œuvre des régulations particulières. C'est pour cette raison qu'apparaissent sur le schéma de la figure 6 le diviseur et le mélangeur en sortie de séparateur de la figure 6. On a considéré ici qu'on disposait au point 3 de 1 kg/s de CO₂ supercritique à 40 °C et 100 bars, et au point 1 en sortie d'évaporateur de CO₂ de vapeur à 40 bars et 10 °C, ce qui représente une surchauffe de 5 °C environ. Le CO₂ supercritique est détendu dans l'éjecteur, ce qui lui permet d'entraîner la vapeur, et de la recomprimer légèrement. Le mélange diphasique en sortie d'éjecteur est séparé, puis le complément à 1 kg/s de la vapeur est remélangé au flux liquide avant d'entrer dans le détendeur puis dans l'évaporateur. Le flux principal de vapeur est comprimé à 100 bars, puis condensé à 40 °C.

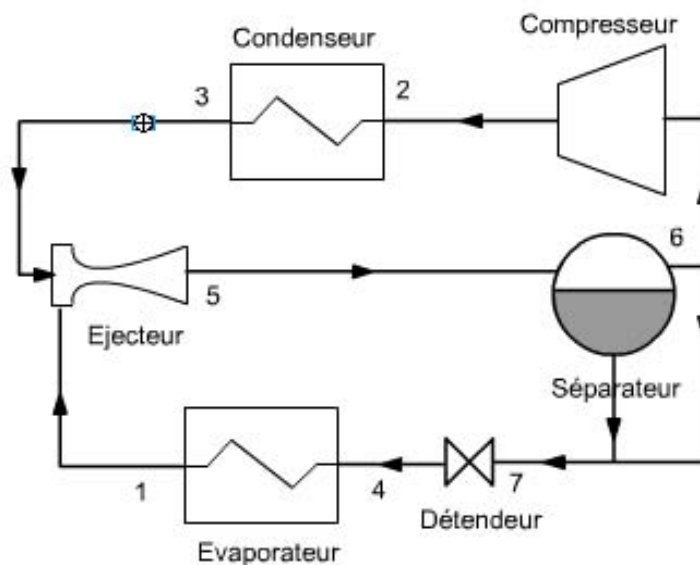


Figure 6 : cycle à éjecteur et compresseur pour CO₂ supercritique

3. Recherche et développement

Puisque l'utilisation de réfrigérants dans les éjecteurs est très récente, il existe très peu de données et de renseignements facilement accessibles au sujet de leur conception et fonctionnement. De plus, l'information accessible est même parfois contradictoire. Par conséquent, l'information de conception actuelle se fie à des données obtenues avec de l'air et de l'eau, ce qui limite l'utilisation des éjecteurs à un nombre très restreint d'applications. Seules quelques publications récentes font l'œuvre de l'utilisation d'éjecteur avec des frigorigènes, notamment par le professeur Lallemand.

De récents efforts visant à optimiser la conception de refroidissement et de chauffage ont permis de déterminer que les éjecteurs offrent un potentiel d'application important. Cependant, les connaissances particulières au fonctionnement et à la conception avec des fluides autres que l'air et l'eau, ou au contrôle du fonctionnement n'ont pas encore été développées. Dans le cas d'éjecteurs diphasiques (gaz-liquide), les connaissances sont encore plus limitées.

Le fonctionnement d'un éjecteur est déterminé par une interaction complexe entre différents mécanismes. Les méthodes de conception traditionnelles intègrent de nombreuses hypothèses de simplification et reposent sur des techniques empiriques. Dans les faits, le flux d'un éjecteur n'est ni unidimensionnel ni en équilibre thermodynamique. Cet état de non-équilibre vient compliquer considérablement le processus d'analyse, de sorte que la conception d'un éjecteur continue d'être empirique ou semi-empirique, et ce, malgré l'existence de plusieurs modèles, généralement pour des éjecteurs monophasiques et basés sur un modèle unidimensionnel de dynamique des gaz. Dans tous les types de modèles, il faut respecter les principes de base de conservation de la masse, de l'énergie, ainsi que de la quantité de mouvement. Ce sont les hypothèses, les conditions aux limites et les procédures de calcul utilisées qui distinguent les différentes approches.

Le comportement typique d'un éjecteur présenté à la figure 5 correspond à un autre phénomène qu'on est encore très loin de comprendre. Le rapport d'entraînement (correspondant au rapport du débit massique secondaire m_s au débit massique primaire). Avec la pression de sortie (représentée dans la figure 5 par la pression du condenseur), ce sont les paramètres principaux pour caractériser le fonctionnement de l'éjecteur.

Pour une géométrie et des conditions fixes, le rapport d'entraînement possède une valeur maximale qui demeure constante quand on augmente la pression de sortie. Cette situation persiste jusqu'à l'atteinte d'une pression maximale, appelée pression critique, au-dessus de laquelle le rapport d'entraînement commence à diminuer. Quand on conçoit un éjecteur, c'est ce point de pression critique qui est déterminé et au-delà duquel la baisse marquée de la performance indique la plage de fonctionnement hors conception de l'éjecteur. Le point critique correspond aux conditions optimales pour cette géométrie, lorsque les flux primaire et secondaire sont tous deux en régime sonique à leur col respectif.

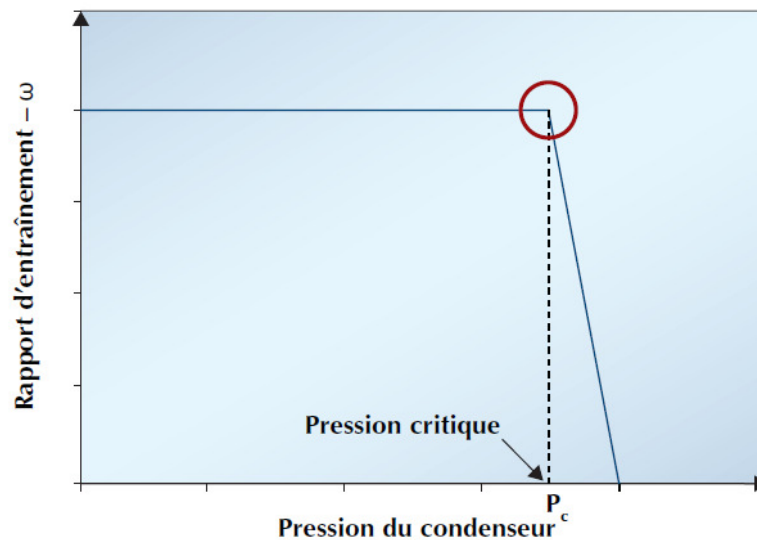


Figure 6 : Rapport d'entraînement en fonction de la pression au condenseur

La recherche consiste actuellement à élaborer des modèles unidimensionnels et par incrément adapté pour « surveiller » les paramètres dans l'ensemble de l'éjecteur et fournir leur distribution. En utilisant également les propriétés des fluides réels, ces modèles fournissent les dimensions axiales et le comportement hors conception de l'éjecteur. Ces outils peuvent servir à la conception et à la simulation. Pour la conception, ils permettent de déterminer les dimensions appropriées dans des conditions de fonctionnement données. Pour la simulation, ils fournissent toute l'information liée au fonctionnement (concernant la performance et le contrôle de la distribution des paramètres) pour les paramètres fixés.

Parallèlement, une analyse de CFD doit être effectuée pour les cas de l'air ou d'autres réfrigérants. Cette approche permet d'étudier localement les différents phénomènes des fluides concernés et leurs interactions, d'une façon encore plus réaliste puisque des simulations sont réalisées sur des géométries plus complexes, différentes conditions de turbulence, diverses conditions de fonctionnement, etc. Des publications sont donc réalisées pour pouvoir analyser le comportement de différents frigorigènes dans un éjecteur (les fluides considérés sont les suivants : R123, R124, R125, R134a, R141b, R142b, R143a, R152a). Une étude [5] montre que le nouveau cycle a un COP plus important que celui du cycle standard. Le R141b donne les meilleures performances.

La mise en place de bancs d'essais complets est aussi indispensable pour faire corroborer l'expérimentation et simulation pour tester les éjecteurs monophasiques (composants seulement), outils extrêmement utiles pour valider des modèles et colliger des données de performance, en plus donner confiance dans les résultats de modélisation.

Des modèles de simulation de différents systèmes utilisant un éjecteur sont également élaborés, afin de prédire la performance du système dans différentes conditions de fonctionnement (réfrigérants, températures) [4]. La construction de prototypes incluant un éjecteur comme dispositif de détente (diphase) et un système hybride de réfrigération

dans lequel l'éjecteur, activé par une source externe, refroidit le condenseur (par exemple), ces prototypes fourniront des données expérimentales pour valider les modèles et fournir de l'expérience pratique.

Cette combinaison de simulation-modélisation et d'outils expérimentaux fournira une expertise dans la compréhension des phénomènes se produisant pendant le fonctionnement d'un éjecteur afin de pouvoir concevoir des systèmes plus performants et augmenter le nombre d'applications des éjecteurs.

La réalisation de projets de démonstrateur est nécessaire afin d'acquérir de l'expérience pratique et de développer la crédibilité et la confiance requises pour des applications plus larges.

Nous noterons aussi des travaux quant à l'utilisation de ce genre de cycle avec du CO₂ supercritique.

Tous ces nombreux travaux sont actuellement en voie de regain d'intérêt, notamment dans le domaine de la réfrigération solaire qui est très active en ce moment. L'investissement financier dans ce domaine nous laisse penser que des avancées significatives devraient avoir lieu dans les prochaines années. Si celle-ci permettent de conclure sur de réelles applications industrielles et domestiques, cette technologie pourrait très bien supplanter celle des technologies de froid par sorption, qui présente de nombreux désavantages par l'effet de corrosion des fluides frigorigènes utilisés (LiBr, ammoniac).

4. Conclusions

Certes la technologie des machines à thermo-éjection est encore un objet de recherche et peine à s'imposer par rapport aux autres technologies usuellement déployées pour la production de froid, comme les groupes frigorifiques à compression mécanique ainsi que les groupes à sorption, et ce malgré les avantages de l'utilisation d'énergie thermique gratuite que procure l'utilisation d'un éjecteur dans un cycle frigorifique.

Ce faible développement est essentiellement dû à l'inconvénient mentionné auparavant à savoir que ce genre de système à éjection induit directement des baisses de performance notables lors d'une modification des conditions de fonctionnement. Or, les demandes en froid – et ceci même dans le domaine industriel – sont la plupart du temps variables et demandent donc aux machines d'avoir une bonne capacité d'adaptation. La mise en place de stockage en amont des alimentations du générateur pourrait pallier ce problème.

On notera tout de même que de nombreuses recherches dans ce domaine ont émergé ces dernières années en raison du développement accru des technologies du solaire (climatisation solaire ou froid solaire).

Néanmoins, nous avons pu voir que l'utilisation de ces éjecteurs en tant qu'organe de détente permet d'améliorer notablement les performances (COP) de ces machines frigorifiques. Des progrès sont donc à faire dans cette voie qui entre évidemment dans une notion d'efficacité énergétique par l'amélioration constante des performances énergétiques des machines frigorifiques.

Pour conclure, nous pourrions dire que cette technologie pourrait à terme – et ce si le développement et la recherche dans ce domaine sont vraiment actives – supplanter les machines à absorption.

7. Bibliographies

[1] **Abdelhakim Iimane** – Étude numérique d'un système de réfrigération à éjecteur – École des Mines de Nantes – Juin 2009

[2] **Jacques PAULON**- Éjecteurs - TI B4250 - 10 nov. 1993

[3] **Latra BOUMARAF, Philippe HABERSCHILL** - Performances d'une machine frigorifique munie d'un détendeur à éjecteur utilisant du HFO 1234yf

[4] **Boumaraf L. ; Lallemand, A.**- Comparaison des performances optimales d'un éjecteur dimensionné selon les modèles a pression constante et a section constante. Actes des 13^{ème} Journées Internationales de Thermique, Albi, France, 2007, *vol. 1*, p.371-375.

[5] **Mouna Elakdhar, Ezzeddine Nehdi, Lakdar Kairouani** - Développement d'un cycle hybride de réfrigération à compression/éjection - Congrès Français de Thermique, SFT 2007



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°8 : Les cycles moteurs à air chaud

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. LE MOTEUR STIRLING.....	3
2.1 Principes de fonctionnement.....	3
2.1.1 Moteur STIRLING type Alpha	6
2.1.2 Moteur STIRLING type Béta	8
2.1.3 Moteur STIRLING type Gamma.....	9
2.1.4 Les autres types de moteur STIRLING	10
2.2 Avantages et Inconvénients du moteur Stirling	12
2.3 Les applications des moteurs Stirling	13
2.4. Principaux constructeurs de moteur Stirling	14
2.4.1 SOLO kleinmotoren GmbH	15
2.4.2 Whisper Tech (WhisperGEN)	15
2.4.3 Stirling BioPower (PowerUnit).....	17
2.4.4 Autres fabricant	18
3. LE MOTEUR ERICSSON.....	19
3.1 Principe de fonctionnement.....	19
3.2 Avantages et Inconvénients	19
3.3 Les Applications.....	21
3.4 Comparaison entre Stirling et Ericsson.....	21
4. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	21
5. CONCLUSION	22
6. BIBLIOGRAPHIES.....	22

1. Introduction

Les cycles moteurs à air chaud font aussi partie des technologies envisageables pour la valorisation des énergies à bas niveaux de température. Cette catégorie classée dans les cycles moteurs inclus donc les technologies des moteurs de Stirling et d'Ericsson dont nous allons détailler les principes de fonctionnement, les avantages et inconvénients et les applications possibles de chacun. Ensuite nous parlerons des axes de Recherche et Développement pour l'amélioration de ces technologies.

2. Le moteur Stirling

2.1 Principes de fonctionnement

Il existe des inventions oubliées du grand public, soit par manque d'esprit visionnaire, ou bien volontairement car elles ne génèrent pas suffisamment de profit. C'est le cas du moteur Stirling qui connaît un réel regain d'intérêt depuis ses dernières années en partie à cause des problèmes d'efficacité énergétique dans l'industrie et des problèmes environnementaux.

Ancien, mais considéré à la pointe de la technologie de nos jours, il existe depuis 1816 et s'appelait à l'époque "moteur à air chaud". Il fut utilisé dans l'industrie et l'agriculture jusqu'au début du 20ème siècle, et fut remplacé progressivement par la machine à vapeur puis les moteurs à combustion interne que nous connaissons plus amplement.

Le moteur de Stirling (du nom de l'inventeur Robert Stirling qui a décrit le cycle de Stirling qui est un cycle réversible fermé et régénératif par la présence d'un échangeur de chaleur interne qui permet d'accroître le rendement thermique de l'appareil) est d'un principe relativement simple : le fluide principal qui produit un travail est un gaz, **air, hydrogène ou hélium**, soumis à un cycle comprenant 4 phases comme indiqué ci dessous :

- 1->2 : détente isotherme (à température constante)
- 2->3 : refroidissement isochore (à volume constant)
- 3->4 : compression isotherme
- 4->1 : chauffage isochore

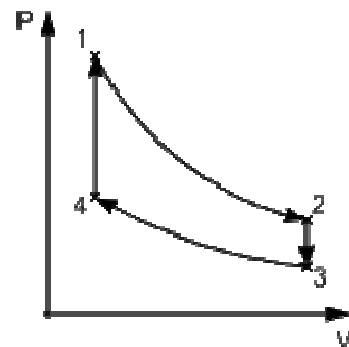


Figure 1 : Diagramme de Clapeyron (P-V) du cycle de Stirling

Le but est de produire de l'énergie mécanique à partir d'énergie thermique. Au début du cycle, le gaz à l'intérieur du moteur est déplacé vers un point chaud provenant d'une quelconque source d'énergie : pour un même volume sa température et sa pression augmentent. Ensuite, abaissement de température le gaz se dilate et transforme son énergie thermique en énergie mécanique. En fait, un gaz à haute pression qui se détend permet de fournir beaucoup d'énergie mécanique. Toutefois, le gaz ne peut pas se détendre indéfiniment : il faut compresser le gaz en utilisant le moins d'énergie possible. Pour ce faire, il faut déplacer le gaz du côté chaud vers le côté froid du moteur, diminuant ainsi la pression. En utilisant l'énergie mécanique précédemment fournie, on comprime le gaz à basse pression qui demande moins d'énergie que ce que sa détente à haute pression fournit, on obtient un bilan positif d'énergie mécanique à chaque fois qu'on répète ce cycle. Il faut constamment alimenter le moteur en énergie thermique pour que le cycle se répète.

La source chaude du moteur est alimentée par une source externe quelconque : combustion externe de dérivés du pétrole, gaz naturel, charbon, bois, mais aussi énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique et peut bien sur être alimenté par des rejets thermiques.

La principale invention de Stirling fut d'incorporer un **régénérateur** qui a permis d'améliorer considérablement les performances (rendement) de ce moteur.

De façon purement théorique, le cycle thermodynamique exécuté dans un moteur de Stirling est un cycle ayant le même rendement qu'un cycle de Carnot, à savoir un rendement thermodynamique théorique maximal. Au moment où le fluide de travail refroidit (entre les points 3 et 4 (cf. Figure 2)), la chaleur évacuée est sensée être récupérée pour chauffer le fluide entre les points 1 et 2. Ainsi, on utilise un régénérateur qui théoriquement récupère toute la chaleur à évacuer. C'est ainsi que l'on obtient un rendement égal à celui du cycle de Carnot.

Sur la figure 2 suivante, on peut voir une représentation d'un cycle de Stirling et d'un cycle de Carnot dans un diagramme T-s (température-entropie) :

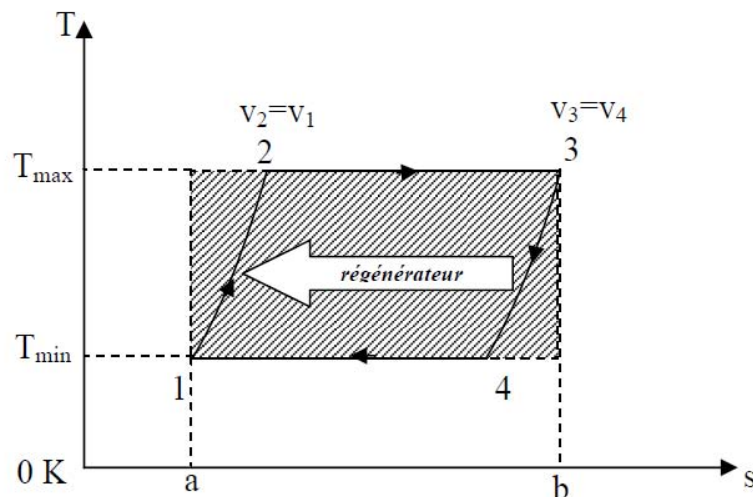


Figure 2 : diagramme T-s du cycle de Stirling et du cycle de Carnot associé (hachuré)

De façon théorique, on voit donc un certain intérêt au moteur de Stirling, puisque celui-ci atteint le rendement maximal autorisé par les lois de la thermodynamique, rendement prenant la forme suivante :

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}}}$$

Nous l'avons vu précédemment, au niveau des rendements théoriques et sous l'hypothèse de transformations idéales, le moteur de Stirling a un rendement maximal. Mais il faut maintenant relativiser ce résultat par rapport à la réalité des choses.

Pour qu'il y ait échange thermique, il faut qu'il y ait une différence de température. Donc, il est en réalité impossible de récupérer de façon totale l'énergie libérée lors du refroidissement isochore (qui devrait être intégralement stockée dans le régénérateur). Ainsi, il est nécessaire d'utiliser les sources pour combler ce "manque à gagner", mais qui plus est, de le faire avec des écarts thermiques importants (vitesse du système), ce qui consomme un supplément d'énergie, augmente les irréversibilités et diminue donc le rendement.

Bien que les transformations soient théoriquement isothermes et toutes réversibles, elles ont en réalité toutes un certain niveau d'irréversibilité. Les applications réelles montrent une forme du cycle relativement quelconque par rapport à leur support théorique :

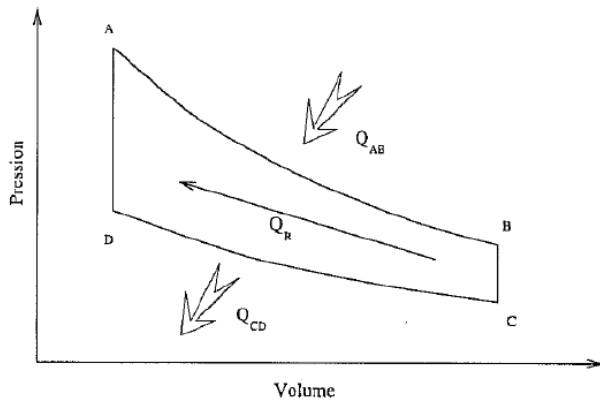


Figure 3 : Diagramme P-V d'un cycle de Stirling théorique

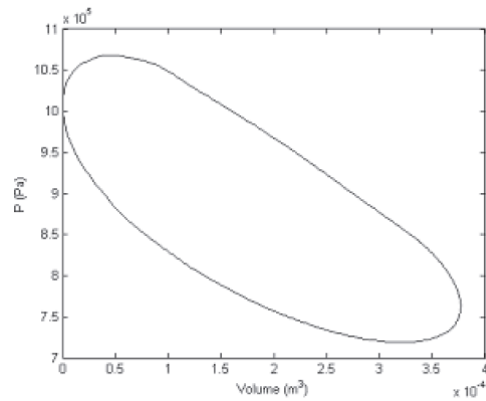


Figure 3' : Diagramme P-V d'un cycle de Stirling réel

Comme on peut le voir, en réalité le diagramme indicateur relevé expérimentalement sur un moteur Stirling sera très sensiblement différent du diagramme théorique. Il a une forme plus arrondie que ce dernier. Ceci est dû essentiellement aux mouvements continus des pistons, différents des mouvements théoriques, aux grandes hétérogénéités de température instantanée dans le moteur et aux nombreuses irréversibilités présentes lors du fonctionnement du moteur. Du fait de la non uniformité du champ de température instantanée dans un moteur Stirling réel, on ne peut pas parler d'un cycle thermodynamique réel : le travail mécanique produit résulte d'une infinité de cycles thermodynamiques différents subis par les particules fluides présentes dans le moteur. Si l'on superpose les deux cycles, on pourrait remarquer que l'aire du diagramme indicateur réel est plus petite que celle du diagramme indicateur théorique si on les compare à la même échelle. Cette diminution a pour conséquence de réduire la puissance fournie par le moteur car le travail est représenté par l'aire du diagramme fermé.

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un moteur de Stirling, nous pouvons prendre un exemple et analyser les différentes phases du cycle :

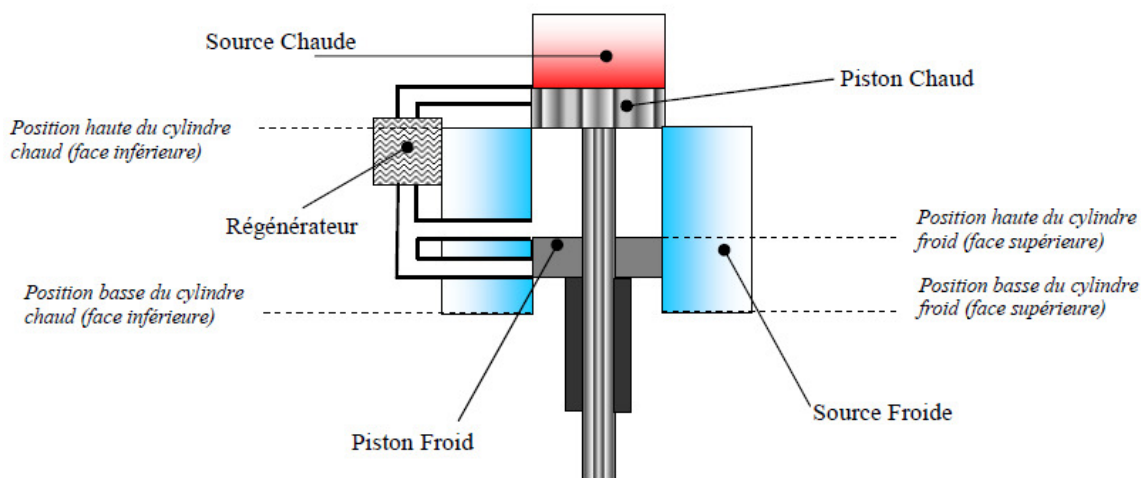


Figure 4 : schéma d'un moteur STIRLING

Pour respecter le cycle théorique de Stirling, le fonctionnement doit être le suivant (il ne s'agit ici que d'un exemple, pour un certain type de moteur de Stirling, constitué de deux pistons, le moteur de type Béta) :

- Dans un premier temps, le piston chaud reste à sa position haute (cf. Figure 4), alors que le piston froid gagne sa position haute. La totalité du gaz est donc soumise à une réduction du volume. Il cède de la chaleur à la source froide, et nous considérerons dans un premier temps cet échange comme isotherme.

- Puis, le piston chaud se met à descendre pour rejoindre le piston froid qui lui ne bouge pas. Le gaz a donc toujours le même volume à occuper, mais il est obligé de rejoindre la zone chaude par le biais des canaux sur le côté. Il passe donc par le régénérateur et récupère de l'énergie thermique stockée à l'intérieur.

- Les deux pistons se déplacent alors ensemble. Le fluide reste donc dans la zone chaude, mais il augmente de volume. On a donc une augmentation de volume isotherme.

- Enfin, on force le piston chaud à rejoindre sa position haute sans bouger le piston froid. Le fluide part donc de la zone chaude, en passant par le régénérateur auquel il laisse une partie de son énergie thermique, et rejoint la zone froide. On comprend donc bien qu'une certaine vitesse est nécessaire aux échanges thermiques pour une puissance respectable, donc il est nécessaire d'avoir un écart de température relativement important entre les sources et le fluide, ainsi qu'entre le régénérateur et le fluide.

La réalisation d'un moteur tel que celui décrit ci-dessus poserait des problèmes: allumer le brûleur, l'éteindre, asperger puis arrêter le refroidissement, chocs thermiques successifs...

En pratique, il est difficile de stocker plus de 50 % de l'énergie libérée lors du refroidissement du fluide chaud. De plus, la cinématique ici décrite n'est pratiquement pas réalisable. Les pistons étant en réalité reliés à un arbre de rotation, cela induit des mouvements sinusoïdaux et non linéaires comme cela serait nécessaire (pour avoir les transformations isochores). Mais il n'existerait alors plus de transformations isochores.

Finalement, le moteur de Stirling semble bien moins intéressant que ce que la théorie laisse supposer. Tout un panel de pertes diverses font que le rendement chute par rapport à la théorie. De plus, la cinématique nécessitant un gros écart de températures entre fluide et source chaude, il semble clair que pour une motorisation déjà existante, le rendement d'échange sera de mauvaise qualité, ou bien alors le système sera de taille très importante (augmentation de la surface d'échange), avec une cinématique très lente, un encombrement très important et un poids allant de paire.

Dans son article publié dans les "Techniques de l'ingénieur », le professeur André Lallemand souligne par exemple que pour un taux de récupération de 50% lors du refroidissement (par le biais du régénérateur, valeur usuelle), le rendement est optimal pour une température maximale du cycle de 300°C (donc une température de source chaude bien supérieure), et sa valeur est alors de 70% par rapport au rendement théorique. Mais cela ne prend pas en compte les autres pertes (anisothermie des transformations, impossibilité de conserver un volume strictement constant lors des transformations isochores).

Il existe une très grande diversité de moteurs Stirling. On les classe généralement en fonction de leur configuration géométrique. Selon ce critère, il y a trois types principaux de moteur Stirling : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma.

2.1.1 Moteur STIRLING type Alpha

Le moteur bicylindre ou alpha est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la

source froide et un autre est associé à la source chaude. Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume selon les phases s'approchant de celles décrites dans le diagramme indicateur théorique de Stirling.

Il utilise 2 cylindres à 90° avec un piston oscillant dans chaque cylindre. Chaque piston est attaché à un seul et même maneton du vilebrequin dont l'axe de rotation se trouve à l'intersection des axes des 2 cylindres. Les pistons oscillent ainsi en quadrature.

Ces machines sont généralement équipées d'un régénérateur qui est placé entre les 2 têtes des cylindres. Ces machines ne nécessitent pas de « piston déplaceur ». Par exemple, elles sont industrialisées par la société allemande SOLO pour des puissances mécaniques de 10 kW dans le cadre d'installations solaires de type « Dish Stirling ».



Figure 7 : Installation « Dish Stirling »

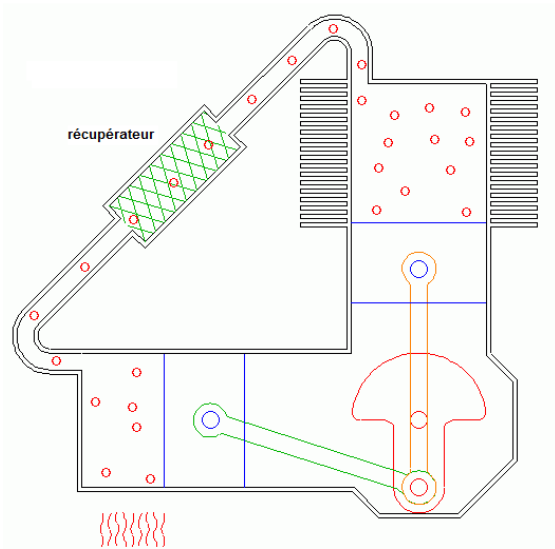


Figure 5 : Schéma d'un moteur Stirling de type alpha

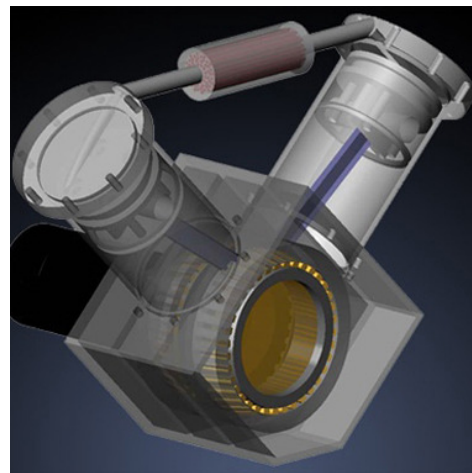


Figure 6 : représentation d'un moteur Stirling de type alpha



Figure 8 : moteur micro KWK SOLO161 10kW

Sur la figure suivante, voici les quatre étapes du fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (« Dish Stirling » pour une source de chaleur solaire) :

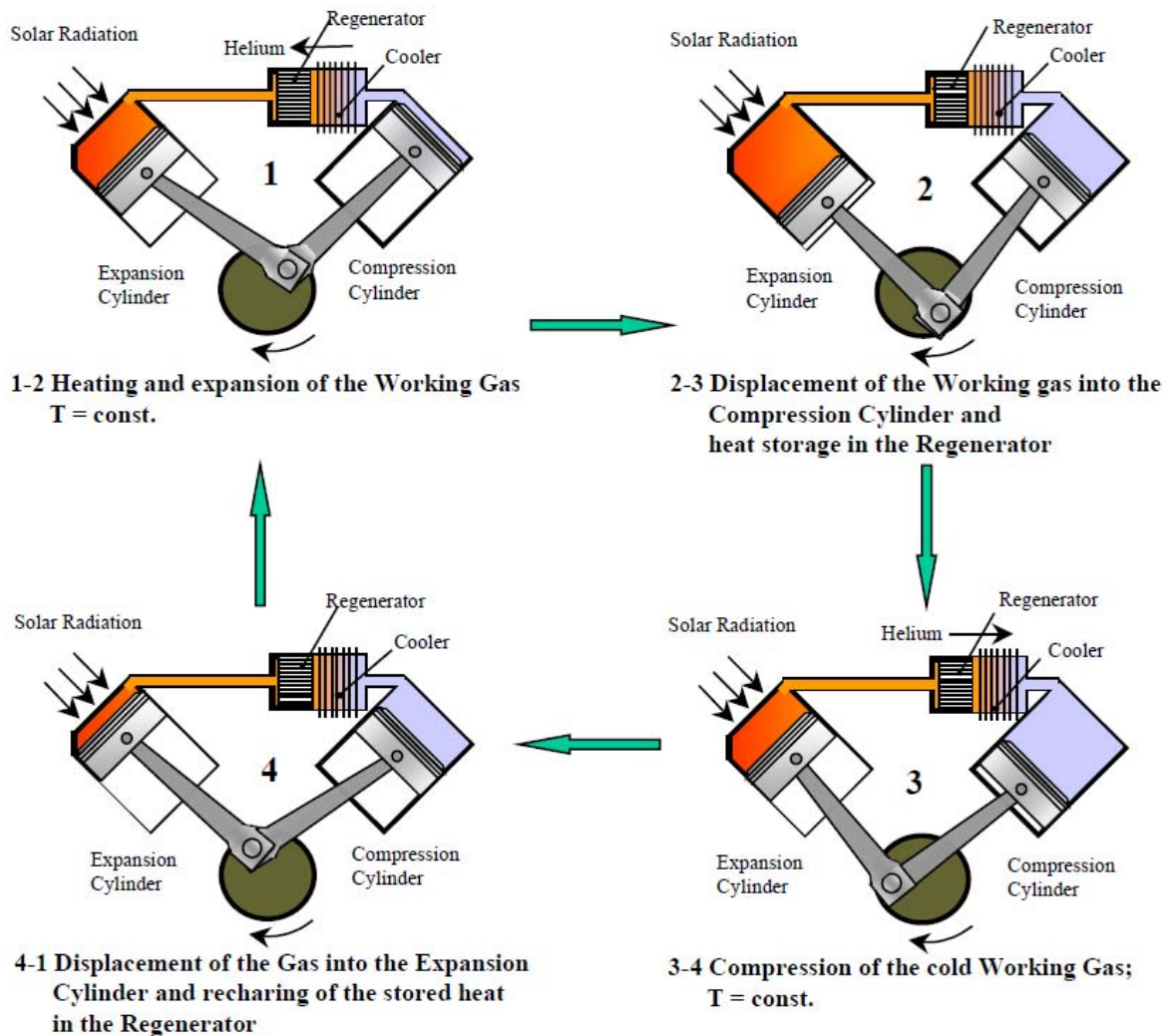


Figure 9 : les 4 étapes de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha pour une application « Dish Stirling »

2.1.2 Moteur STIRLING type Béta

- Moteur de « type beta » à embiellage simple :

Il utilise un seul cylindre dans lequel coulisent à la fois un piston de « travail » (piston en vert sur la figure 10) et un piston « déplaceur » (piston en bleu sur la figure 10). Ces deux pistons sont connectés sur le vilebrequin via 2 bielles, attachées sur 2 manetons décalés de 90° sur le vilebrequin. Le piston de travail est destiné à récupérer la puissance mécanique tandis que le piston déplaceur permet de chasser périodiquement, à volume à peu près constant, le fluide de la zone chaude vers la zone froide ou inversement. Ce transport se fait de préférence via un régénérateur placé sur le flanc du cylindre. Le déplaceur ne modifie ni la pression ni le volume du gaz, mais l'oblige à se situer soit vers la source chaude située en partie supérieure, soit vers la source froide située en partie inférieure. Lors du chauffage isochore, le volume reste donc constant mais le déplaceur, en descendant, chasse le gaz de la partie basse (froide) à la partie haute (chaude). Pendant la détente, le déplaceur suit le piston moteur pour que le gaz reste en contact uniquement avec la source chaude. Pour le refroidissement isochore, il s'agit de l'opération inverse que pour l'étape de chauffage isochore, c'est-à-dire que le volume reste constant, mais le déplaceur, en montant, fait passer le gaz de la partie haute (chaude) à la partie basse (froide). Enfin, pour l'étape de

compression, le déplaceur reste immobile en partie haute pour que le gaz reste en contact direct avec la source froide.

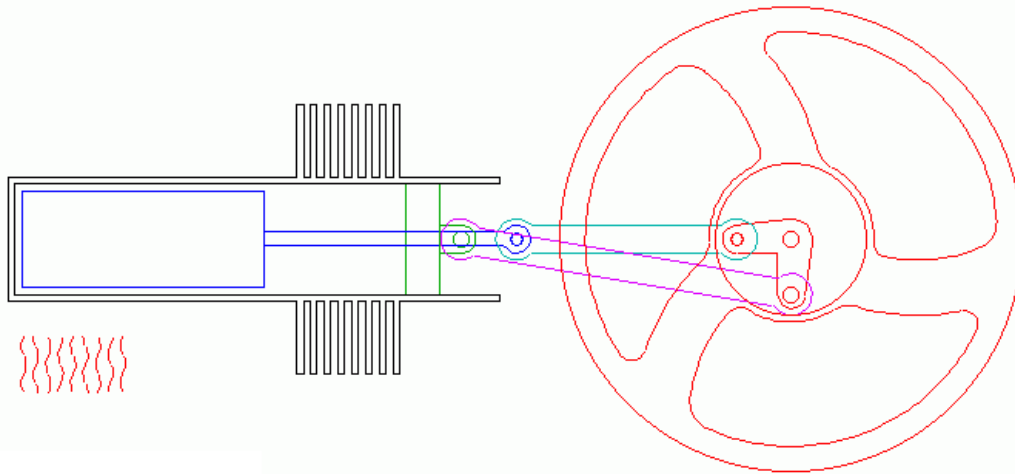


Figure 10 : Moteur Stirling de type Béta à embiellage simple

- Moteur de « type beta » à embiellage rhombique (ou rhomboïdal) :

Il fonctionne de la même manière, mais avec un embiellage à losange déformable permettant de mieux piloter le piston déplaceur et le piston de travail, et ainsi d'avoir un volume approximativement constant durant les phases idéalement isochores.

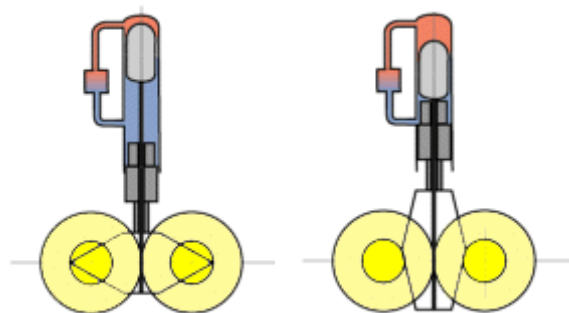


Figure 11 : Représentation d'un moteur Stirling de type Béta à embiellage rhombique

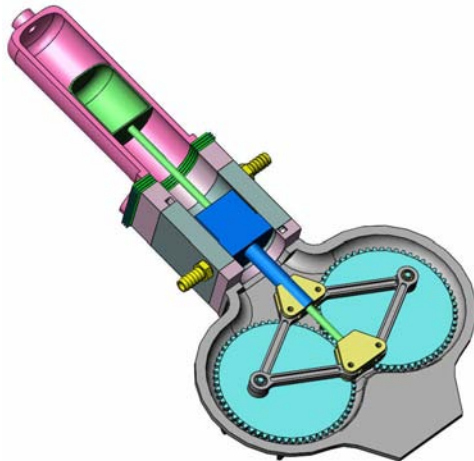


Figure 11' : Schéma détaillé d'un moteur Stirling de type Béta

2.1.3 Moteur STIRLING type Gamma

Il utilise 2 cylindres et 2 pistons qui ont chacun leur propre actionneur. Chaque piston est à la fois « déplaceur » et « de travail ». Un régénérateur peut être monté sur le côté. La synchronisation entre les pistons se fait notamment par engrenages, chaînes, courroies et/ou embiellages. Les machines de « type gamma » peuvent être vues comme une hybridation entre le type alpha et le type Béta.

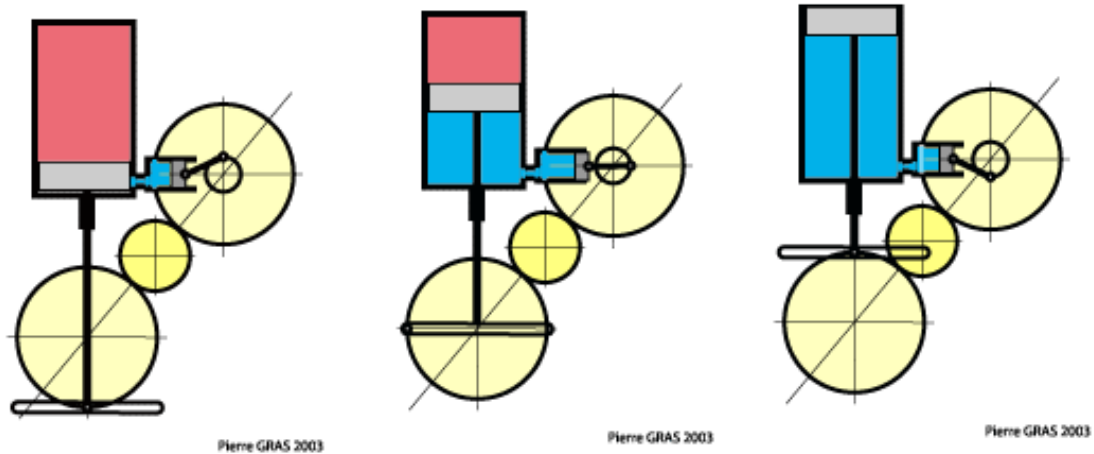


Figure 12 : Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type gamma

2.1.4 Les autres types de moteur STIRLING

En complément de ces moteurs de Stirling dit « habituels », il existe des moteurs de Stirling conventionnels, moins diffusés, restant au stade de prototype ou destinés à des applications très spécifiques (spatiales).

2.1.4.1 Moteur à piston libre Type Martini

Le piston moteur se déplace en fonction de la pression du moteur. Quand la pression monte, il est poussé dans un sens, et inversement lorsque la pression baisse. Quand la pression baisse, il revient dans l'autre sens à sa position initiale. Ceci nécessite la présence d'une force moyenne sur la face "extérieure" du piston, elle est générée par un gaz enfermé dans une enceinte ou par le tarage d'un ressort.

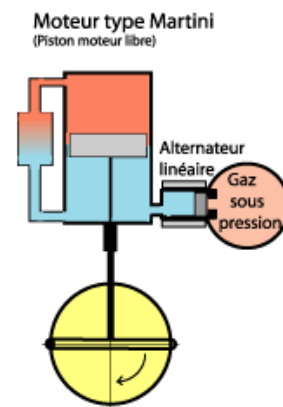


Figure 13 : Moteur Stirling type Martini

2.1.4.2 Moteur à déplaceur libre Type Ringbom

Contrairement au précédent moteurs Stirling de type Martini, le piston moteur est cette fois entraîné mécaniquement. Par contre, le déplaceur se positionne en fonction de la pression du gaz enfermé dans une chambre auxiliaire et de la pression du moteur.

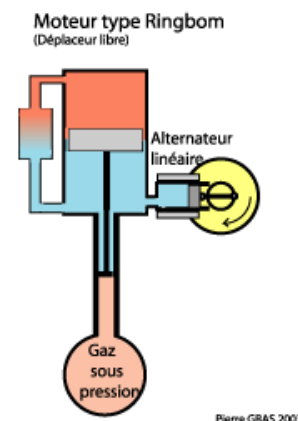


Figure 14 : Moteur Stirling type Ringbom

2.1.4.3 Moteur de type « piston libre »

Il n'existe aucune liaison mécanique avec l'extérieur. L'énergie produite est évacuée par au moins un alternateur linéaire. Ce moteur cumule les avantages des deux précédents. Le gros avantage est qu'on peut obtenir une étanchéité absolue car il n'existe aucune liaison mécanique avec l'extérieur.

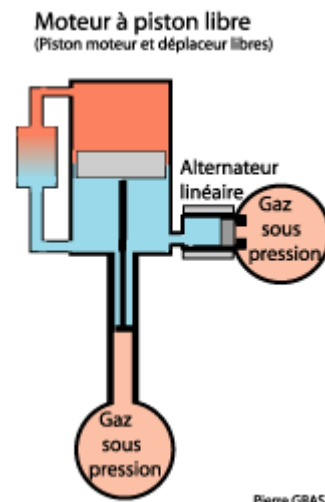


Figure 15 : Moteur Stirling type piston libre

2.1.4.4 Le moteur Stirling à double effet ou piston en série

Le principe consiste à mettre des moteurs de type alpha en "série". Il y a un seul piston par cylindre qui joue le rôle de déplaceur et de piston moteur. Le déphasage entre chacun des pistons est de 90° .

Il nécessite la mise en série de N pistons, généralement actionnés par N bielles et un vilebrequin commun. Sur le vilebrequin, le déphasage entre 2 manetons consécutifs est d'environ 90° , de manière à ce que deux pistons consécutifs soient en quadrature. Entre 2 pistons consécutifs est intercalé un régénérateur. Les pistons sont dit à double effet, c'est à dire qu'ils travaillent sur leurs 2 faces : il y a ainsi N volumes distincts de fluide caloporteur. Généralement, les têtes de cylindres (« haut moteur ») constituent la source chaude et les pieds de cylindres (« bas moteur ») sont la source froide (l'inverse est aussi possible).

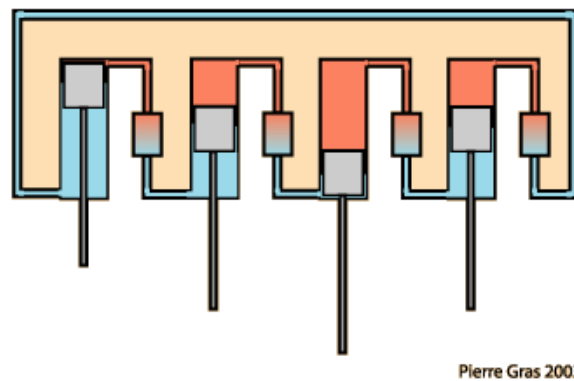


Figure 16 : Moteur Stirling à double effet

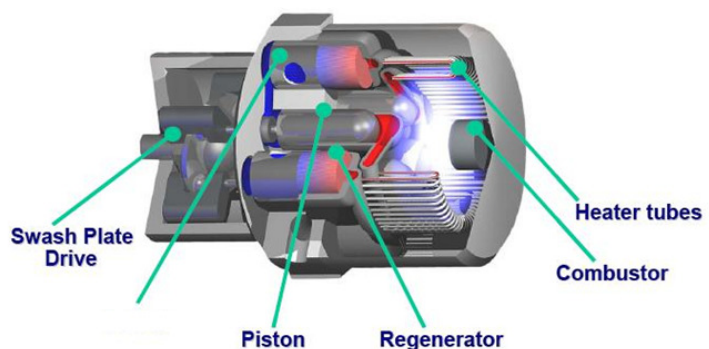


Figure 17 : STM 4 Piston Double Acting Stirling Cycle Engine (STM Power (Stirling BioPower))

Dans le chapitre suivant nous allons énumérer les principaux avantages et inconvénients des moteurs Stirling.

2.2 Avantages et Inconvénients du moteur Stirling

Les moteurs Stirling possèdent, par rapport à d'autres types de moteurs thermiques, un certain nombre d'atouts parmi lesquels on peut citer les suivants :

- Le moteur Stirling accepte tout type de source de chaleur, et en particulier :
 - * la chaleur provenant de la combustion de tout type de combustible (solide, liquide, gazeux, biomasse, etc.)
 - * l'énergie solaire (concentrée ou non)
 - * l'énergie nucléaire
 - * la chaleur provenant d'un stockage thermique, la chaleur géothermique...
- Du fait que la combustion à la source chaude est externe et continue, elle peut donc être correctement maîtrisée et les rejets de gaz polluants peuvent être réduits considérablement.
- Les moteurs Stirling actuels ont des performances énergétiques comparables à celles des meilleurs moteurs Diesel de même puissance.
- Il n'y a ni explosions, ni combustion interne, le fonctionnement est donc extrêmement silencieux.
- Le couple produit est très régulier et les pièces mécaniques sont moins sollicitées.
- Le moteur a une très grande durée de vie.
- Le lubrifiant n'est pas contaminé par des résidus de combustion, il n'est donc pas nécessaire de procéder à des vidanges périodiques.
- Les besoins en maintenance sont très réduits.
- Un coût de fabrication en grande série potentiellement du même ordre de grandeur, voire légèrement plus faible qu'un moteur à combustion interne de puissance comparable du fait du fonctionnement à relativement basse pression qui diminue fortement le poids des matériaux (épaisseur des enceintes (chemise) et des pistons).

Néanmoins, même si celui-ci possède de nombreux avantages, on pourra tout de même citer quelques inconvénients :

- Les moteurs Stirling nécessitent des échangeurs de chaleur qui doivent contenir la pression du fluide de travail, et qui doivent résister à tous les effets corrosifs en raison de la source de chaleur. Ceux-ci augmentent le coût du moteur surtout quand ils sont conçus pour atteindre de haut niveau d'efficacité, nécessaire pour optimiser le fonctionnement du moteurs avec le meilleur échange possible avec les deux sources.
- Par rapport à leur capacité de production, la taille importante des moteurs Stirling fonctionnant avec de faible différentiel de température, cet inconvénient est essentiellement dû aux échangeurs de chaleurs.
- Les moteurs Stirling ne démarre pas instantanément et ont donc besoin d'être amorcer par réchauffage par la source de chaleur. Néanmoins le moteurs Stirling demande moins de temps de préchauffage que les autres moteurs à combustion externe.

- La puissance que génère un moteur Stirling est constante et difficile à changer rapidement d'un niveau à l'autre. Généralement, les changements de production sont réalisés en faisant varier la cylindrée du moteur (souvent grâce à l'utilisation d'un arrangement mécanique de type vilebrequin/plateau cyclique (arbre à came)) ou en changeant la masse de fluide de travail (en général l'hélium ou d'hydrogène).

- L'hydrogène est la molécule qui a le plus faible poids moléculaire et comme c'est une petite molécule, il est très difficile de le garder à l'intérieur du système moteur et des auxiliaires doivent être ajoutés pour maintenir la quantité appropriée de fluide de travail. Ces systèmes peuvent être aussi simples qu'une bouteille de stockage de gaz ou plus complexes comme un générateur de gaz. En tout cas, ils ajoutent du poids et augmentent les coûts.

2.3 Les applications des moteurs Stirling

Il existe une multitude de machines appelées moteur Stirling. Cette multitude se retrouve donc au niveau du champ d'application de ce moteur : il s'étend du gros moteur de sous-marin en passant par les installations de récupération sur des effluents gazeux à basse température ou les systèmes de conversion de l'énergie solaire.

Les atouts du moteur Stirling lui donnent un avantage dans certains domaines sur ses concurrents et il pourrait y connaître un bel essor. Parmi ces domaines d'applications les plus crédibles, il convient de citer :

- La propulsion des navires et des sous-marins : Plusieurs sous-marins actuellement en service, tant civils que militaires, sont propulsés par des moteurs Stirling cinématique. Outre qu'il est silencieux, le moteur Stirling possède un autre avantage déterminant sur le moteur à combustion interne pour ce type d'application : la chaleur peut être fournie par combustion continue de fuel et d'oxygène sous pression. La chambre de combustion étant pressurisée, les gaz de combustion peuvent être directement rejetés dans l'eau de mer sans devoir être comprimés au préalable, ce qui accroît considérablement l'autonomie en plongée.

- La production d'électricité à partir de biomasse en zone rurale. Il y a actuellement un créneau important pour la conversion énergétique de combustible peu noble dans un domaine de puissance de l'ordre de 0,5 kWe à 1MWe à partir de charbon, de combustible industriel, de déchets commerciaux et agricoles ainsi que de la biomasse (bois ou carburant d'origine végétale).

- La production d'électricité à basse puissance à partir de combustible fossile pour des besoins locaux : campings, bâtiments isolés, marchés, travaux publics, bateaux de plaisance... Les concurrents immédiats du moteur Stirling pour de telles applications sont les moteurs à combustion interne, les éoliennes ou encore le photovoltaïque. Ils ont tous des désavantages comme le bruit, les mauvaises conditions météorologiques ou l'encombrement.

- La production d'électricité pour véhicules hybrides, le moteur Stirling étant une alternative intéressante à la turbine à gaz ou au moteur à combustion interne pour cette application.

- La production d'électricité à partir d'énergie solaire pour application stationnaire, cette application a été particulièrement développée aux Etats- Unis et a bénéficié d'un support important de la NASA. De telles installations peuvent être munies de brûleurs d'appoint de combustible fossile permettant de garantir la production d'électricité quelles que soient les conditions climatiques ainsi que la nuit.

- La production d'électricité à partir d'énergie solaire pour application spatiale, très étudiée aux Etats-Unis et au Japon. Les satellites artificiels sont de plus en plus gourmands en électricité. Or, la conversion de l'énergie solaire en électricité par cellules photovoltaïques s'effectue avec mauvais rendement, conduisant à de grandes surfaces de captation. Ces panneaux solaires posent un double problème : il est délicat d'assurer un pointage précis vers le soleil de ces grandes surfaces. En outre, ces surfaces augmentent la traînée du satellite dans l'atmosphère résiduelle, et donc diminuent sa durée de vie. Il est donc important de trouver des systèmes de conversion d'énergie plus performants. Le moteur Stirling est un candidat potentiel, grâce à ses bonnes performances énergétiques et parce qu'il peut être parfaitement équilibré. A cet égard, il possède un avantage sur les cycles de Rankine à vapeur organique (ORC), également étudiés pour ce type d'application, car l'effet gyroscopique provoqué par la rotation de la turbomachine pose problème.

- La cogénération (ou micro-cogénération) dans le secteur tertiaire et résidentiel : les qualités intrinsèques de propreté, de stabilité, d'absence de besoin de maintenance mais surtout de silence autorisent l'utilisation du moteur Stirling comme élément de cogénération à l'échelle de l'habitat individuel, ce qui n'est pas possible avec les moteurs à combustion interne. En effet, grâce au couplage entre chaudière et moteurs Stirling, on peut produire de la chaleur et de l'électricité pour l'habitat par exemple. Cette application est l'une des plus envisageable et les plus développée par les industriels (notamment l'entreprise WhisperGen et Microgen qui commercialise des appareils de ce type).

2.4. Principaux constructeurs de moteur Stirling

En réalisant différentes recherches, il apparait qu'un certain nombre d'amateur soit passionné par la technologie du moteur de Stirling, au point où des dizaines de produits de type moteur de Stirling sont disponibles à l'achat sur le net. Il s'agit pour certains de gadget (comme un moteur Stirling qui fonctionne grâce à la chaleur dégager par une tasse à café !) où alors de véritable engin mécanique d'une très bonne réalisation. Tous ces moteurs sont disponibles sur le marché pour des prix allant de 100\$ à 500\$ pour certains d'entre eux. Ils sont soit pré montés où alors livrés en Kit et donc à monter manuellement. Néanmoins, ils sont d'une puissance dérisoire car fonctionnant la plupart grâce à la combustion d'alcool ou d'une bougie. Nous nous intéresseront donc plus au constructeur qui réalise des Stirling de plus forte puissance et à une échelle industrielle.



Figure 18 : Moteur Stirling BHB28 4 cylindres par Bohm Stirling Technik



Figure 19 : Moteur Stirling avec dynamo et lampadaire par WileSCO

2.4.1 SOLO Kleinmotoren GmbH

La société allemande SOLO Kleinmotoren GmbH existe depuis 1948 et commercialise essentiellement des machines comme des pulvérisateurs, tondeuses et tailles haies. Néanmoins, depuis 1990, cette société s'est aussi investit sur la technologie Stirling. En effet, entre 1991 et 1992, la société prend en charge un projet de construction de moteur Stirling (notamment pour les systèmes de type « Dish Stirling »), Il y a eu au début 3 moteurs de 9kW conçus et fabriqués en version solaire (basée sur la version à gaz) pour une station de tests de Schlaich, Bergemann and Partner (SBP) ingénieurs de Stuttgart. Ces appareils ont été testés à Almería depuis 1992, sur plus de 40000 heures de fonctionnement. Solo a acquis la licence auprès de SBP.



*Figure 20 : moteur micro KWK SOLO161
10kW*

Le projet Stirling obtient la certification CE après avoir réussi les tests d'essai. Cela permet au module micro KWK SOLO STIRLING 161 d'être le premier moteur au monde utilisant une énergie mixte à être produit en série.



*Figure 21 : Système de SOLO pour une
application de Dish Stirling*

Voici les caractéristiques du moteur Stirling micro KWK SOLO 161 :

Fuels	Natural gas, LPG	Working gas	Helium
Electrical output	9,5 kW	Service intervals	5.000 - 8.000 h
Thermal output	8 - 26 kW	Emissions CO	40-60 mg/m ₃
Fuel input	16 – 40 kW	Emissions NO_x	80 - 120 mg/m ₃
Engine speed	1500 rpm	Dimensions(LxBxH)	128 x 70 x 98 cm
Electrical efficiency	24 %	Weight	450 kg
Total efficiency	In condensing mode 92 - 96 %		

Output and efficiencies are based on flow temperature of 50 °C in the heating system

Ce moteur permet aussi une alimentation de type biomasse pour la source chaude.

2.4.2 Whisper Tech (WhisperGEN)

Whisper Tech Limited a été créée en 1995 et son siège social est actuellement basé à Christchurch en Nouvelle – Zélande, intégrant notamment son pôle de recherche et développement et certaines installations de fabrication. La société commercialise en Europe son produit WhisperGen™ qui est basée sur la technologie de moteur à combustion externe de type Stirling.

Le système WhisperGen est un système chaudière de type CHP (Combined Heat and Power) avec moteur de Stirling à combustion externe à double effet qui est muni de quatre cylindres et permet de générer de la chaleur et de l'électricité. Il a été lancé commercialement en 1998 avec un produit adapté à un usage domestique ou de chauffage.

Un mécanisme breveté, le « Wobble Yoke » (étriers oscillants), transfère le mouvement vertical des pistons au mouvement de rotation de l'alternateur (cf. figure 23).

Différents modèles de brûleurs ont été développés et permettent ainsi de fonctionner avec des carburants spécifiques, y compris le diesel, le kérosène et le gaz naturel.

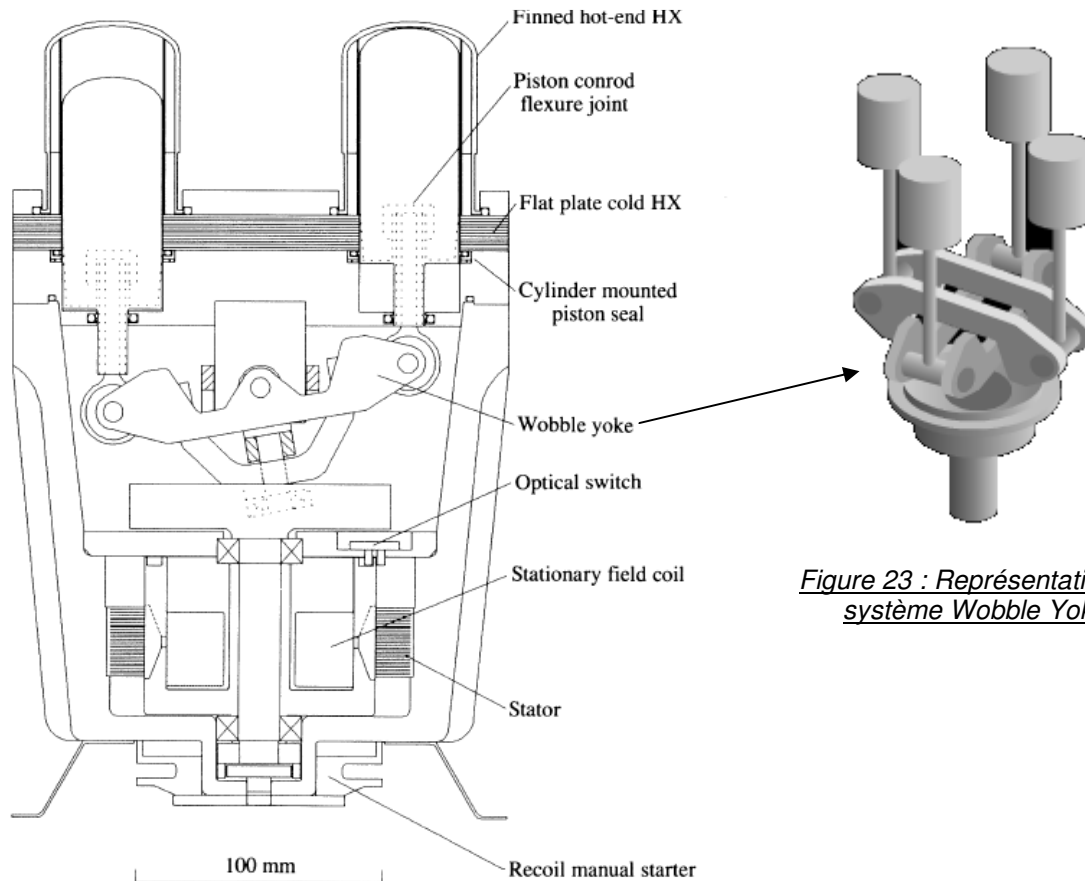


Figure 22 : Représentation schématique du moteur

Figure 23 : Représentation du système Wobble Yoke

Le WhisperGen™ est une chaudière au sol entièrement automatique qui fournit non seulement une énergie thermique de 12,0 kW pour la production d'eau chaude et le chauffage central, mais aussi de l'électricité (1,0 kW 230 V CA maximum).

Le moteur du WhisperGen™ (cycle Stirling) et le brûleur auxiliaire sont installés dans un compartiment qui fait également office de caisse étanche. L'air est aspiré dans cette enveloppe et circule à l'intérieur du compartiment avant d'être expulsé vers les deux brûleurs par le ventilateur installé à côté de l'échangeur thermique. Lorsque le système reçoit une demande de chauffe, le brûleur principal est activé et les têtes sont chauffées par les gaz de combustion. A une température déterminée, le moteur se met en marche. Il fournit l'électricité et la chaleur. Les gaz d'échappement émis par le moteur Stirling sont refroidis dans l'échangeur thermique, qui héberge également le brûleur auxiliaire. Selon la puissance calorifique (température de l'eau), le système de gestion de la chaleur peut basculer sur le brûleur auxiliaire pour fournir davantage de chaleur. Les gaz d'échappement provenant du brûleur auxiliaire sont acheminés dans l'échangeur thermique. Dans ce cas, la chaleur est transmise au système de chauffage central. A basse température, la vapeur de l'eau contenue dans les fumées se condense sur les parois de l'échangeur thermique. Elle est évacuée à travers le ventilateur vers le réservoir de condensats.

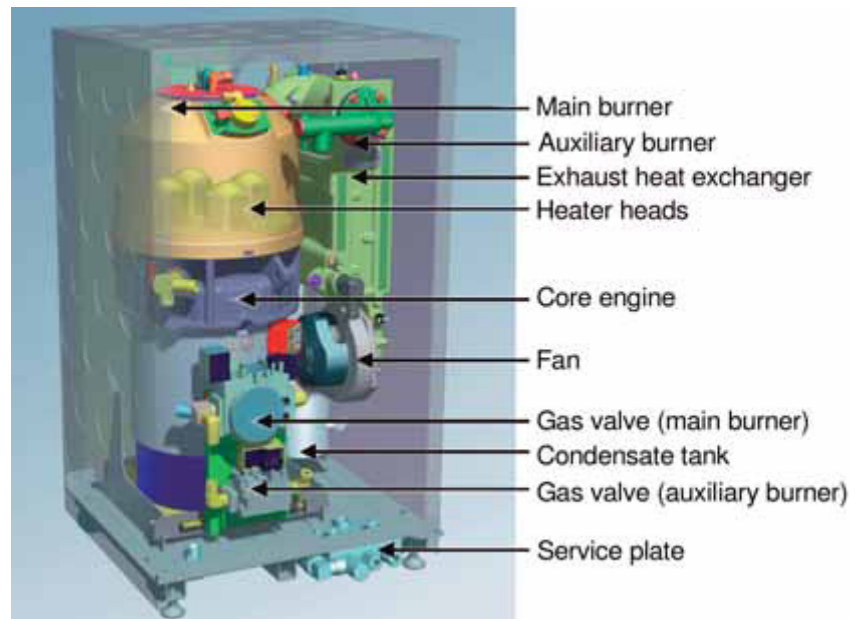


Figure 24 : Schéma du système WhisperGen

L'entreprise propose plusieurs système de type WhisperGen dit « on-grid » ou « off-grid », c'est-à-dire respectivement sur le réseau ou isolé d'un réseau d'électricité (hors réseau). Elle propose donc, comme dit précédemment, des systèmes pour un usage domestique (eau chaude, chauffage et génération d'électricité) ou pour des systèmes hors réseau comme pour la recharge de batteries sur des bateaux, des systèmes automatiques isolés...etc.

2.4.3 Stirling BioPower (PowerUnit)

Stirling BioPower est une société privée Américaine basée dans le Michigan (Ann Arbor) qui développe, test et fabrique des moteurs Stirling pour la génération d'électricité. Son produit est appelé PowerUnit™. Cette unité PowerUnit utilise un moteur Stirling accouplé à un moteur à induction à haute tension pour créer un moteur d'œuvre industriel.



Figure 25 : Unité PowerUnit de 55kW

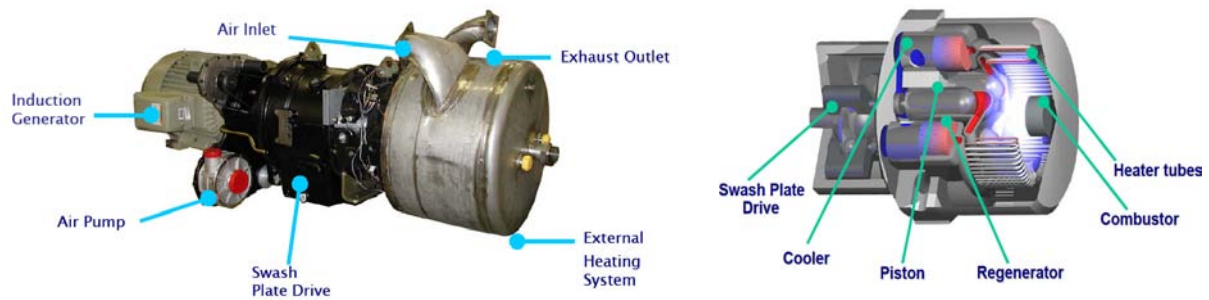


Figure 26: STM 4 Piston Double Acting Stirling Cycle Engine (Stirling BioPower)

2.4.4 Autres fabricant

L'entreprise Microgen, filiale de British Gaz (BG Group), commercialise un micro-cogénérateur gaz fonctionnant à partir d'un moteur Stirling à piston libre. Microgen a une licence exclusive de Sunpower pour les générateurs Stirling à piston libre dans des applications de micro-CHP (Sunpower est un concepteur de moteurs Stirling).



Figure 26 : module Microgen

Nous citerons aussi Stirling DK qui est une société danoise qui a développé une technologie de cogénération à haut rendement énergétique en utilisant des moteurs Stirling pour produire de la chaleur et de l'électricité neutre en carbone à partir de copeaux de bois et d'autres sources biomasse. Stirling DK est donc un développeur et fournisseur de centrales de cogénération à petite échelle alimentée par la biomasse. Leurs modules sont parfaitement dimensionnés pour les grands bâtiments, de bureau ou de petites communautés. L'entreprise possède différentes références, notamment en Allemagne et Royaume Uni. Néanmoins, il s'agit essentiellement d'applications à haute température entre 1000°C et 1300°C qui dépassent largement le domaine de l'étude, nous n'entrons donc pas en détail sur les modules de Stirling DK.

Nous avons donc vu que seulement quelques entreprises par le monde développent et fabriquent des moteurs Stirling. De plus, nombre d'entre-elles sont essentiellement concentrées sur la technologie « Dish Stirling » et la micro-cogénération. Parmi celles-ci nous pourrions tout de même citer les entreprises SCE (Southern California Edison), INFINIA et SES (Stirling Engine System) qui sont très impliquées dans le domaine d'utilisation du moteur Stirling pour des applications solaires à concentration.

On peut aussi citer l'entreprise ReGen Power Systems qui est actuellement en développement de moteurs de type Stirling fonctionnant à des températures comprises entre 250°C et 100°C pour des applications d'utilisation des rejets thermiques, de solaire et de biomasse (gaz). L'objectif de cette entreprise serait d'atteindre la fabrication de moteurs pouvant être utilisés avec des températures de 250°C, correspondant à des chaleurs massivement produites par les industries comme l'acier, l'aluminium, le verre, la céramique

et le ciment, ceux-ci aurait une puissance entre 500kW et 2MW avec des rendements de l'ordre de 25%. Mais aussi un moteurs fonctionnant à 100°C (de puissance entre 250kW et 1MW avec des rendements de l'ordre de 13%). Ce moteur serait adapté aux industries du papier, des produits chimiques et du pétrole qui produisent de grandes quantités de vapeur à basse pression. Le moteur fonctionnant à 100°C agira comme un condenseur de vapeur en extrayant la chaleur latente de condensation de la vapeur à basse pression.

Dans la suite de ce document, nous allons vous présenter un autre type de moteur à air chaud : le moteur Ericsson.

3. Le moteur Ericsson

3.1 Principe de fonctionnement

Le moteur Ericsson est un moteur à air chaud qui utilise des soupapes pour contrôler son fonctionnement. Le moteur Ericsson (du nom de son inventeur John Ericsson) est constitué d'un cylindre de compression muni de soupapes, d'un échangeur de chaleur récupérateur à contre-courant, d'un échangeur de chaleur pour la source chaude et d'un cylindre de détente lui-aussi muni de soupapes. Le cycle thermodynamique réalisé dans cette machine est équivalent à celui de la turbine à gaz à récupération. Comme le moteur Stirling, le moteur d'Ericsson est un moteur à apport de chaleur externe, ce qui est un atout déterminant dans un certain nombre d'applications pratiques comme la valorisation de l'énergie solaire ou des inévitables rejets industriels.

La figure 9' présente les différents espaces de travail et les éléments constitutifs d'un moteur Ericsson et la figure 9 la représentation du cycle dans un diagramme P-V :

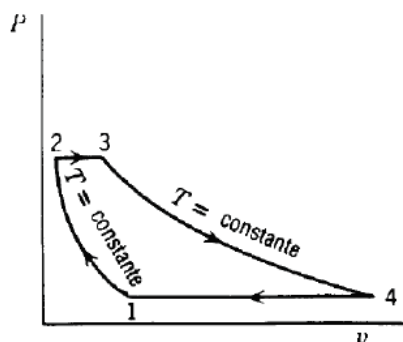


Figure 9 : Cycle d'Ericsson

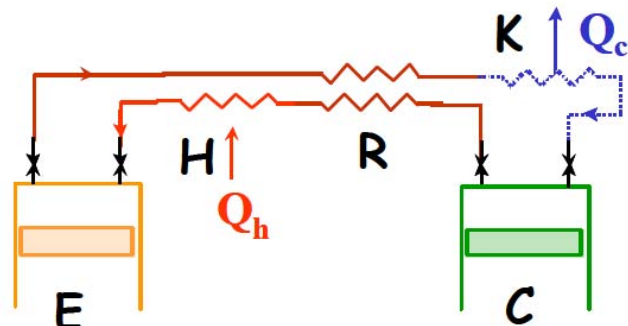


Figure 9' : Représentation d'un moteur d'Ericsson

Le moteur Ericsson fonctionne avec 2 transformations isobares et de 2 transformations isothermes au cours desquelles ont lieu les échanges de chaleur.

La principale différence entre un moteur Stirling et Ericsson est la présence de soupapes et clapets autour des cylindres de compression et de détente. La présence de celles-ci donnent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients au moteur d'Ericsson, nous reviendrons plus amplement sur ces points dans le chapitre suivant.

3.2 Avantages et Inconvénients

Comme précédemment citer, le moteur d'Ericsson possède certains avantages et inconvénients, plus ou moins commun au moteur de Stirling :

*** Avantages :**

- De même que pour le moteur Stirling, la multitude de "sources chaudes" possibles (combustion de gaz divers, de bois, sciures, déchets, énergie solaire ou géothermique, rejets thermique...)

- Du fait d'une combustion externe mieux maîtrisable, il est plus facile de réaliser dans ce type de moteur une combustion complète des carburants.

- La fiabilité et la maintenance aisée inhérente à la relative simplicité technologique du moteur Ericsson, qui permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance. De ce fait, il possède une durée de vie importante.

- Les utilisations très diverses du fait de son autonomie et son adaptabilité au besoin et à la nature de la source chaude.

- Le rendement intéressant (toujours dépendant des températures de la source chaude et froide), il paraît néanmoins judicieux de le faire fonctionner en cogénération (utilisation des puissances mécanique et thermique) en récupérant les calories rejetées à l'échappement moteur afin d'en augmenter le rendement global.

***Inconvénients :**

- Le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, pas encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés (moteur à combustion interne). Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème.

- Les problèmes d'étanchéité sont difficiles à résoudre dès qu'on souhaite avoir des pressions de fonctionnement élevées. Le choix du gaz « idéal » serait ici l'hydrogène pour sa légèreté et sa capacité à absorber les calories, mais celui-ci peut se diffuser au travers des matériaux.

- La méconnaissance de ce type de moteur par le grand public nécessite donc d'en faire la promotion afin que celui-ci connaisse un regain d'intérêt de la part des investisseurs : sa notoriété est donc à construire. De plus, on trouve d'autres moyens plus connus, moins onéreux remplissant ce genre de fonction, y compris avec un autre moteur à air chaud : le moteur Stirling qui présente des avantages sérieux par rapport au moteur Ericsson. Et ce point n'est pas nouveau, John Ericsson lui-même en a fait la dure expérience à son époque car ses brevets devaient contourner ceux déposés par Robert Stirling.

- Les échanges de chaleur avec un gaz sont délicats et nécessitent souvent des auxiliaires volumineux.

- Le manque de souplesse : les variations rapides et efficaces de puissance sont probablement difficiles à obtenir avec un moteur Ericsson. Celui-ci, comme le moteur de type Stirling, est plus apte à marcher à puissance nominale constante.

- Contrairement au moteur Stirling, le bruit important (qui peut être gênant) lié à son fonctionnement et bien sûr inhérent à la présence de clapets qui permettent le rejet à l'atmosphère de l'air chaud après détente. Néanmoins, comme nous l'avons cité précédemment, ceux-ci engendrent aussi certains avantages de contrôle sur le moteur.

3.3 Les Applications

Compte tenu des avantages et inconvénients du moteur Ericsson, on peut faire quelques suppositions quant aux utilisations possibles d'un tel moteur :

- Sa capacité à consommer de l'énergie provenant de sources diverses et de sa relative rusticité peut permettre d'envisager une utilisation pour produire de l'énergie à faible coût et de façon très indépendante et autonome.

- Si on associe la possibilité présentée ci-dessus et le fait que le moteur Ericsson rejette de l'air chaud, on peut imaginer un fonctionnement en cogénération : énergie motrice et énergie thermique afin de produire par exemple son électricité tout en se chauffant.

3.4 Comparaison entre Stirling et Ericsson

Tout d'abord, le cycle du fluide de travail du moteur Stirling (azote, hélium, air...) est formé de deux isothermes et deux isochores contrairement au moteur Ericsson qui, quant à lui, a son cycle composé de deux isothermes et de deux isobares. Le moteur Stirling est plus simple d'utilisation de part sa composition.

L'absence de soupapes pourrait a priori rendre le moteur Stirling plus attractif que le moteur Ericsson. Cependant, ce dernier possède de nombreux avantages sur le moteur Stirling. Parmi ceux-ci, l'atout essentiel est que les échangeurs de chaleur réchauffeur H (cf. figure 9'), récupérateur/régénérateur R et refroidisseur K ne sont pas des volumes morts. Leur taille ne grève donc pas les performances du moteur. Il convient aussi de noter que les performances des moteurs Ericsson sont indépendantes de la nature du mouvement des pistons. On peut donc adopter des cinématiques plus simples et plus efficaces que pour les moteurs Stirling. Entre autres avantages, on peut encore dire que les soupapes peuvent être utilisées pour contrôler le moteur.

Nous pourrions noter qu'à l'heure actuelle, très peu de travaux ont été réalisés sur le moteur Ericsson et que seulement quelques entreprises européennes (nous pourrions citer l'entreprise américaine Proe power System) émettent un intérêt à l'utilisation de ce type de moteur à air chaud, contrairement au moteur Stirling, qui lui connaît un véritable regain d'intérêt de la part de nombreuses industries, notamment, comme nous l'avons vu auparavant, pour la micro-cogénération et le solaire.

4. Recherche et développement

La recherche dans le but d'obtenir de meilleures performances et constantes de ce domaine qui est ancien par le concept mais relativement récent par les applications. Parmi les axes de recherche on notera les recherches sur l'amélioration et l'optimisation des cycles.

- MHE (Marnoch Heat Engine):

Il s'agit là d'un nouveau cycle de moteur à air chaud, il porte le nom de son inventeur Ian Marnoch. Ce cycle est similaire à un cycle de Stirling du fait d'une combustion externe, mais il ya trois différences majeures entre le MHE et un moteur Stirling :

- Les échangeurs de chaleur peuvent être situés en dehors de l'assemblage du piston.

- Deuxièmement, dans le MHE, la zone délimitée dans le diagramme PV est réduite après chaque course, par opposition aux moteurs Stirling, dans lequel la zone délimitée reste presque constante.

- Troisièmement, contrairement aux moteurs Stirling, le MHE n'a pas de régénérateur dans sa configuration mécanique.

Ces différences entraînent des avantages à l'utilisation d'un MHE par rapport à un moteur Stirling et permet d'exploiter et de produire de l'électricité à partir d'un faible différentiel de température. Les pertes du système sont sensiblement réduites par rapport aux moteurs Stirling, car chaque mouvement est un mouvement de puissance avec le moteur MHE, contrairement aux phases régénératives des moteurs Stirling.

Les différentes recherche indiquent un meilleur potentiel de récupération et permet d'atteindre de meilleur efficacité, là où d'habitude un cycle organique de Rankine serait utilisé.

Le lecteur pourra se référer au brevet et aux différentes études concernant le MHE qui sont répertorié dans le chapitre 6 « bibliographie ».

- l'amélioration des échanges thermiques :

En effet, par la présence du régénérateur ainsi que des récupérateurs dans les moteurs à cycle de Stirling, les échangeurs thermiques sont une partie essentielle de ces modules. Il convient donc que ces échangeurs soient d'une efficacité remarquable afin de limiter les pertes de ces thermo-transformations. De nos jours, les recherches pour l'échangeur thermique s'orientent notamment vers la maîtrise de l'encrassement (détection, étude des cinétiques), la haute température avec la connaissance et la maîtrise de nouveaux matériaux, l'intensification des transferts thermiques via les microstructures, les nanomatériaux et nanoparticules, l'amélioration des surfaces d'échanges pour la compacité et l'efficacité...etc. Tous sont de vastes domaines porteurs d'espoir dans l'amélioration des performances de nombreux process. Néanmoins, le développement de l'axe de recherche sur l'encrassement est une priorité, notamment dans la récupération des déchets thermiques qui représente globalement une source non négligeable d'énergie perdue. Les fluides à traiter sont dans la plupart des fluides encrassants point souvent très dommageable pour les équipements. Il faudrait de ce fait que dans la stratégie de recherche amont, mais aussi dans la R&D appliquée et impliquée dans le développement industriel en général, ce point soit traité en priorité.

Le lecteur pourra se reporter à la fiche n°1 qui offre plus de détails sur les différents systèmes étudiés pour cet axe de recherche. On pourra aussi noter quelques publications qui étudient plus précisément l'impact de performance due à l'effet de l'encrassement sur les différents échangeurs de chaleur d'un moteur de Stirling (réchauffeur, refroidisseur, régénérateur).

5. Conclusion

Sans conteste la technologie des moteurs à air chaud font parties des technologies ancienne, très étudiées, autant par le passé que de nos jours. Le moteur de type Stirling reste une de ces technologies les plus prometteuses, mais néanmoins peu impliquées dans le domaine de la valorisation des énergies à bas niveau de température à part en cogénération.

6. Bibliographies

[1] **A. Lallemand** - Convertisseurs thermomécaniques, Cycles moteurs à gaz : Stirling et Joule. - Techniques de l'Ingénieur, BE 8 051, Génie Energétique, Janvier 2007.

[2] Thèse de Sébastien BONNET- Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur STIRLING et d'un moteur ERICSSON-11/2005

[3] Pierre Gras – Le moteur Stirling et autres moteurs à air chaud – Une solution aux problèmes énergétiques et environnementaux actuels – 03/2010

[4] M. Kuosa, J. Kaikko, L. Koskelainen - The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the Stirling engine - Applied Thermal Engineering 27 (2007) 1671–1676

[5] Pooya Saneipoor- Thesis - Thermodynamic Performance Evaluation and Experimental Study of a Marnoch Heat Engine

[6] Ian A Marnoch, Thermal conversion device and process, Patent Number 4389858, Canada, Jun 5, 2008

[7] P. Saneipoor, G.F. Naterer, I. Dincer - Heat recovery from a cement plant with a Marnoch Heat Engine - Applied Thermal Engineering 31 (2011) 1734-1743

Site Web:

www.moteurairchaud.com;

www.stmpower.com;

www.marnochthermalpower.com;



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°9 : La conversion thermoélectrique

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	3
2.1 Les matériaux thermoélectrique usuelles.....	5
2.2 Les nouveaux matériaux thermoélectriques	8
3. LES APPLICATIONS /EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	9
4. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	10
5. CONCLUSIONS.....	12
6. BIBLIOGRAPHIES.....	13

1. Introduction

La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur de nos sociétés modernes après notamment la signature du protocole de Kyoto. C'est pourquoi la génération d'électricité par recyclage de la chaleur perdue (rejets thermiques industriels) aux moyens de modules thermoélectriques (effet Seebeck) apparaît à ce jour comme une des voies pour améliorer l'efficacité énergétique de nos sociétés énergivores. Outre cet aspect de production d'électricité, les matériaux thermoélectriques, sont à même de refroidir (effet Peltier), constituant un moyen d'évacuer la chaleur des composants de la microélectronique. Ainsi, la thermoélectricité, ou conversion d'énergie à partir de la chaleur, fait partie de ces nouvelles sources d'énergies renouvelables.

Un effort important pour développer techniquement la conversion énergétique utilisant des matériaux solides a été engagé à partir des années 1950. C'est au cours des années 1960 qu'ont été développés les programmes de recherche les plus importants dans ce domaine à partir des matériaux semi-conducteurs. Les propriétés désirées pour les matériaux (nous reviendront plus en détails sur ces points dans le chapitre suivant) sont déterminées par le biais du facteur de mérite Z qui dépend des propriétés de transport du matériau comme la résistivité électrique, le coefficient de Seebeck et la conductivité thermique.

La conversion d'énergie thermique en énergie électrique est l'un des piliers des temps modernes. Des millions de tonnes d'énergie fossile sont chaque jour sacrifiées pour la génération d'électricité assurant égoïstement notre confort. Pourtant, une grande partie de cette énergie est rejetée (et donc perdue) dans l'atmosphère sous forme de chaleur dans les centrales électriques, du fait qu'elle ne peut pas être efficacement exploitée compte tenu de son niveau de température.

De même, les progrès des transports ont aujourd'hui considérablement augmentés. En effet, le consommateur est aussi devenu un voyageur qui veut emporter le confort technologique avec lui, créant de nouveaux besoins en sources d'énergie électrique. Ces besoins sont actuellement satisfaits au prix de la pollution de notre environnement par les métaux lourds contenus dans les batteries. Ainsi, une fois de plus la conversion thermoélectrique apporte une nouvelle voie à la demande croissante en source d'énergie électrique.

En effet, la conversion thermoélectrique n'utilise pas de systèmes mécaniques, aussi complexes, que fragiles et coûteux en entretien. Elle est non-polluante contrairement aux batteries parce que les générateurs thermoélectriques ont une durée de vie presque illimitée. Bien que les performances des dispositifs thermoélectriques soient généralement faibles, ils sont irremplaçables pour certaines applications spatiales.

Dans la perspective d'applications à plus grande échelle, ils sont intéressants pour la climatisation ou la réfrigération. A ce titre, la thermoélectricité devrait émerger et jouer un rôle dans les années futures en valorisant l'énorme quantité d'énergie perdue (automobile, chaudières, incinérateurs...) et contribuer au développement durable ou s'intégrer à d'autres technologies émergentes telles que le photovoltaïque ou la géothermie.

Cette fiche s'intéressant à la valorisation énergétique des énergies à bas niveaux de température, nous nous intéresserons essentiellement à l'effet Seebeck, effet inverse de l'effet Peltier, mais qui tous deux sont décrits dans le chapitre suivant.

2. Principes de fonctionnement

Le physicien italien, Alessandro Volta, semble être le premier en 1794 à avoir mis en évidence un phénomène thermoélectrique. Un livre de Mario Glozzi « Storia della Fisica » de 1796, comporte une section « effets thermoélectriques », il y indique que Volta avait mis une

extrémité d'un conducteur en fer dans de l'eau bouillante et constate l'effet d'un courant électrique sur une grenouille. C'est donc un phénomène thermoélectrique.

L'effet Peltier (1831) c'est l'apparition d'un phénomène de transfert de chaleur en présence d'un courant électrique et de deux conducteurs de nature différente mis en contact. Sous l'effet du courant électrique, un des conducteurs devient plus chaud, l'autre plus froid, créant une différence de température entre eux.

L'effet inverse à l'effet Peltier, a été découvert un peu plus tôt (1821) par Mr Seebeck, physicien allemand. C'est donc l'effet Seebeck qui dit qu'en appliquant une différence de température à deux matériaux conducteurs différents mis en contact, il apparaît un courant électrique dans le circuit qui les relie. On parle du PTE d'un matériau, ou pouvoir thermoélectrique.

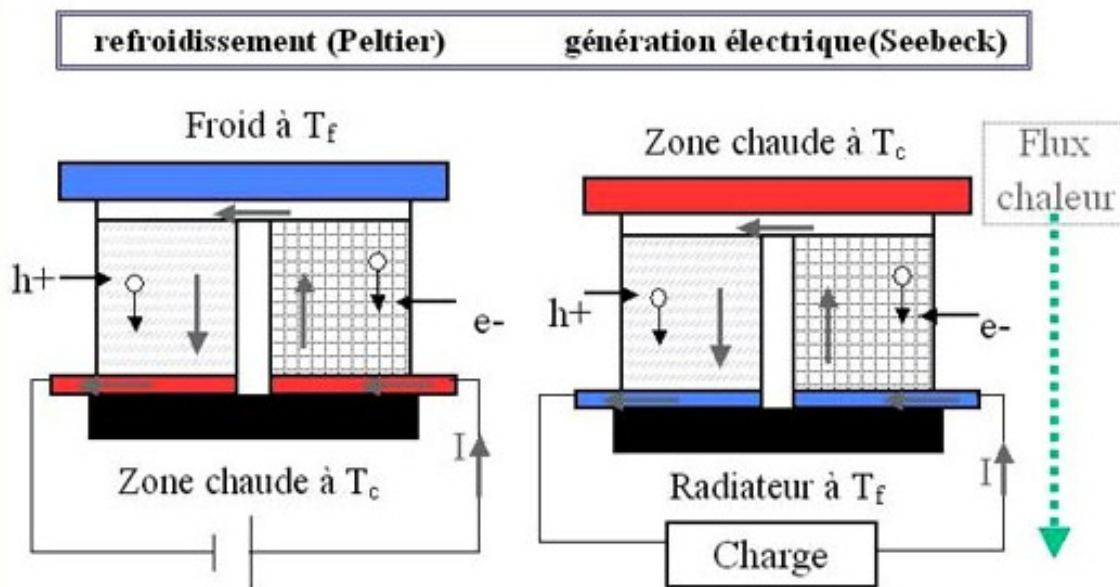


Figure 1 : Schéma de principe d'un couple thermoélectrique avec matériaux de type p (conductions par trous h^+) et n (électron e^-) ; I est le courant utilisé ou créé

La circulation d'un courant électrique apparaît via le mouvement d'électrons. Mais le courant peut être favorisé par un autre type de porteurs : les trous. Un trou est lié à une absence locale d'électron au niveau d'un atome : cela crée des zones ionisées au sein du matériau et les charges électriques voyagent de zones ionisées vers d'autres. C'est le principe des semi-conducteurs, la circulation d'un courant est favorisée à la fois par le mouvement d'électrons et de trous (qui se déplacent dans un sens opposé, un électron qui saute d'un atome, laissant derrière lui un trou).

L'effet Seebeck est directement fonction des propriétés microscopiques du matériau. Les propriétés d'un matériau semi-conducteur sont liées au nombre de porteurs électrons et de trous. Lorsqu'un matériau possède plus de trous que d'électron, on l'appelle semi-conducteur dopé P (car un trou est "Positif"). Lorsqu'un matériau possède plus d'électrons que de trous, on l'appelle semi-conducteur dopé N ("Négatif" car surcharge en électrons).

Pour une différence de température marquée, on utilise plusieurs modules P-N en cascade.

En faisant circuler un courant électrique dans un circuit avec deux semi-conducteurs (l'un N, l'autre P) mis en contact, à la jonction P-N, la conductivité est grande, les électrons circulent vite et accélèrent : l'énergie cinétique est convertie en chaleur. Au niveau de la jonction N-P, il y a décélération des électrons, impliquant une baisse de température.

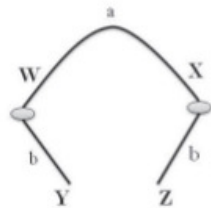
Le rendement du phénomène thermoélectrique est cependant très faible et ne permet pas de concurrencer les systèmes classiques permettant de produire de l'électricité à partir de chaleur (machines thermiques).

2.1 Les matériaux thermoélectrique usuelles

Les matériaux thermoélectriques sont caractérisés par trois paramètres:

- Le coefficient Seebeck S [V/K] (ou plus généralement en [μ V/K])
- La conductivité électrique σ [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$]
- La conductivité thermique K [W/m.K]

Un gradient de température (dT) appliqué aux extrémités d'un barreau conducteur engendre spontanément une différence de potentiel (dV) proportionnelle à la différence de température. La constante de proportionnalité S constitue le coefficient Seebeck:



$$S_{ab} = \frac{dV}{dT}$$

Comme nous l'avons déjà mentionné, il y a toujours deux matériaux, l'un de type n (excès d'électrons) l'autre de type p (déficit d'électrons).

Ces différents paramètres sont groupés en vue de former avec la température absolue T un nombre sans dimensions ZT , appelé coefficient de mérite.

$$ZT = T S^2 \frac{\sigma}{K}$$

Avec T la température absolue (en Kelvin), S le pouvoir thermoélectrique (ou coefficient de Seebeck), σ la conductivité électrique et K la conductivité thermique.

Le coefficient de mérite ZT est d'autant plus grand que le coefficient de Seebeck S est élevé. Il est proportionnel au rapport de la conductivité électrique σ à la conductivité thermique λ .

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}$$

Aujourd'hui les meilleurs matériaux ont un $ZT = 1$.

Des bons matériaux thermoélectriques ont un coefficient Seebeck et une conductivité électrique élevés et par ailleurs une conductivité thermique faible. Ils présentent l'avantage d'être peu encombrants et peu coûteux. Cependant, leur faible rendement énergétique constitue un inconvénient majeur. Les métaux simples, sont de mauvais thermoélectriques et la mise au point de matériaux thermoélectriques suffisamment performants pour envisager des applications est récente, et fait appel à des composés assez complexes. Les meilleurs comportements thermoélectriques sont obtenus avec des matériaux peu conducteurs mais non isolants électriquement, et très mauvais conducteurs de la chaleur. Nous le préciseront par la suite mais il s'agit essentiellement des matériaux semi-conducteurs.

Chaque matériau a ses propres caractéristiques : l'effet Seebeck étant lié au transport d'entropie par les porteurs de charge, les matériaux supraconducteurs ont un coefficient

Seebeck nul car les électrons ne transportent pas d'entropie dans l'état supraconducteur. Ceci a permis d'établir une échelle de coefficients absolus intrinsèques des matériaux.

Selon l'expression du facteur de mérite, l'optimisation des propriétés de transport d'un matériau est difficile. Pour un matériau donné, il est difficile de trouver simultanément une bonne conductivité électrique et une mauvaise conductivité thermique, caractéristique des isolants. Un bon matériau thermoélectrique aura un comportement de PGEC (Phonon- Glass and Electron-Crystal), soit la conductivité thermique d'un verre et la conductivité électrique d'un bon conducteur.

Dans le cas de la génération d'électricité par effet thermoélectrique, la puissance sera d'autant plus grande que le facteur de puissance $S^2\sigma$ sera grand. Malheureusement, le pouvoir thermoélectrique et la conductivité électrique varient de manière opposée avec la concentration en porteurs de charge. Ainsi, les meilleurs pouvoirs thermoélectriques seront obtenus avec des matériaux à faible concentration en porteurs alors que les meilleures conductivités électriques le seront dans des matériaux de forte concentration de porteurs. On réalise que les meilleurs matériaux thermoélectriques appartiendront donc à la classe des semi-conducteurs. La conductivité thermique est un facteur important qui contribue à l'optimisation des matériaux thermoélectriques. Une bonne conductivité thermique tendrait à s'opposer à l'établissement d'un gradient thermique, la chaleur traverserait le matériau sans rencontrer de résistance. L'optimisation des matériaux nécessitera donc de chercher à diminuer la conductivité thermique, sans dégrader la conductivité électrique. Il est important de noter que les caractéristiques telles le pouvoir thermoélectrique et la conductivité électrique, dépendent de la mobilité des porteurs et sont influencés par les impuretés et les défauts. Une augmentation de la conductivité électrique des semi-conducteurs peut être atteinte en augmentant le nombre de porteurs de charge libres par introduction d'agent dopant. La figure 2 représente l'évolution du pouvoir thermoélectrique, de la conductivité électrique et du facteur de puissance en fonction du logarithme de la concentration de porteurs de charge du système. Les meilleures valeurs du facteur de puissance sont observées dans la gamme de concentration de porteurs de charges 10^{18} cm⁻³ à 10^{21} cm⁻³.

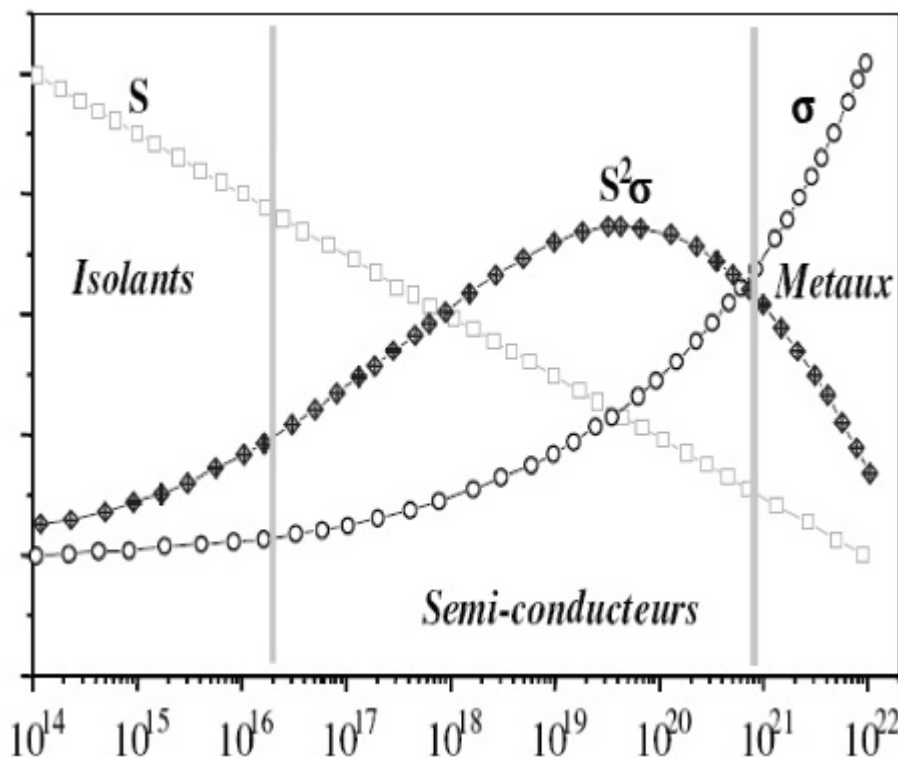


Figure 2 : Variation schématique des propriétés thermoélectriques des solides en fonction de la concentration en porteurs de charge à la température ambiante [1]

La figure 3 montre l'évolution du rendement de conversion d'un système thermoélectrique dans des conditions idéales en fonction du facteur de mérite ZT. Par exemple, si $ZT=1$ et que la différence de température est de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, le rendement de conversion sera de 8% , ce qui signifie suivant le cas (génération d'électricité ou réfrigération) que 8% de la chaleur traversant le matériau sera convertie en électricité, ou bien que la chaleur extraite par le refroidissement correspondra à 8% de la puissance électrique employée.

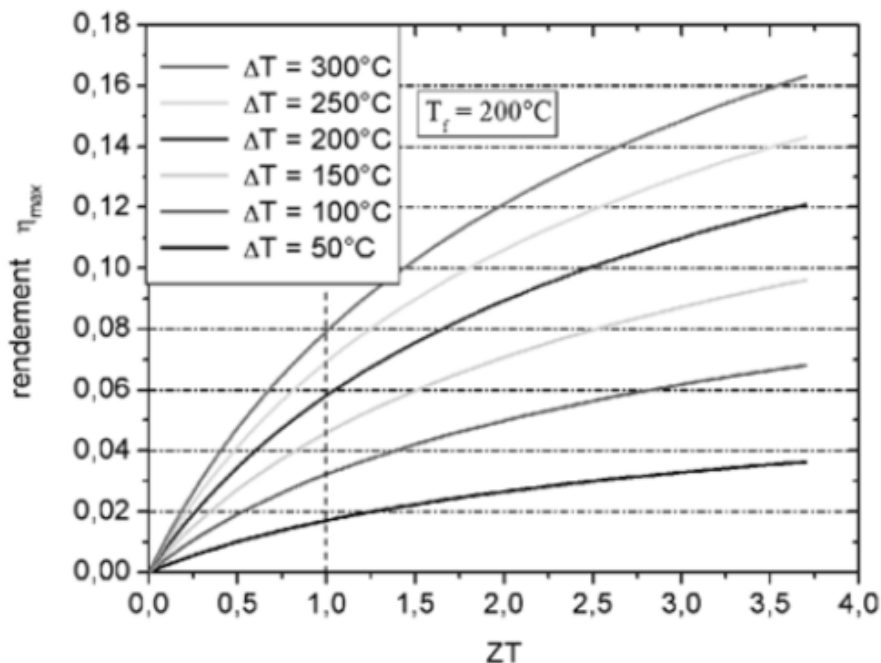


Figure 3 : Évolution du rendement de conversion en fonction du facteur de mérite

La plupart des semi-conducteurs implique plutôt des éléments de numéro atomique élevé et, pour un semi-conducteur, il est important de choisir un élément de numéro atomique supérieur et donc de masse atomique supérieure afin d'obtenir une conductivité thermique aussi faible que possible. Cela conduit sans doute à choisir un élément lourd en tant que critère de sélection, ce qui permettra d'optimiser le facteur de mérite thermoélectrique.

Ce raisonnement a contribué fortement et fructueusement entre les années 30 et 50 par l'obtention de facteur de mérite le plus élevé possible. Cette notion a aidé à recenser et à développer deux des meilleurs matériaux Bi_2Te_3 et PbTe , et a contribué à la découverte des cinq éléments lourds: Plomb, Bismuth, Antimoine, Tellure et Sélénium.

Ces éléments de faible conductivité thermique, ont contribué pour la conception de matériaux thermoélectriques semi-conducteurs. De façon générale, les semi-conducteurs sont soit modérément ou fortement dopés.

Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes propriétés thermoélectriques que sur des intervalles de température restreints. Nous présenterons donc les différents matériaux en fonction de leurs plages d'utilisation :

- Les basses températures ($100\text{K} < T < 200\text{K}$):

Le matériau le plus utilisé dans cette plage de température est l'alliage de bismuth et d'antimoine (Bi-Sb). Actuellement cet alliage n'admet pas de bon rendement pour le type p ce qui réduit énormément le rendement de conversion du convertisseur thermoélectrique. Doublé d'un aimant son facteur de mérite ZT passe de 0,6 à 1,1. On l'utilise donc en association avec un champ magnétique.

- La température ambiante ($300K < T$) :

C'est dans la plage de température $T < 300K$ que l'on retrouve le plus d'applications commerciales surtout dans la réfrigération. Le matériau convoité est le Bi_2Te_3 (alliage de bismuth et de tellure). On obtient de bonnes performances quand il est allié à du Sb_2Te_3 (alliage d'antimoine et de tellure) de même structure cristalline. Le facteur de mérite de ce couple avoisine 1. Ceci est dû à une faible conductivité thermique de l'ordre de l'unité. De même, le facteur de mérite est doublé par application d'un champ magnétique.

- Les températures moyennes ($400K < T < 750K$):

Les alliages à base de plomb, d'étain, de tellure et de sélénium sont les plus couramment utilisés bien qu'il faille prendre des précautions dans les hautes températures pour assurer leurs stabilités chimiques. On y retrouve donc le tellure de plomb ($PbTe$), l'alliage entre le tellure de plomb et l'étain ($(PbSn)Te$) ainsi que le tellure de sélénium ($TeSe$). Le facteur de mérite est de l'ordre de l'unité pour les alliages de type n mais est bien inférieur pour ceux de type p. La branche p est alors assurée par un matériau de type TAGS (Te-Ag-Ge-Sb pour tellure, argent, germanium, antimoine). Cependant ces alliages sont appelés à être remplacés par les matériaux, aux performances plus élevées, de structure skutterudites (cf. paragraphe 2.2 *les nouveaux matériaux thermoélectriques*).

Pour informations, pour les hautes températures, les alliages à base de silicium et germanium possèdent de bonnes propriétés thermoélectriques au-dessus de 1000 K et sont conçus pour des applications de génération d'électricité dans le domaine spatial. Cependant ces matériaux coûtent très cher à cause du germanium.

2.2 Les nouveaux matériaux thermoélectriques

De nombreux matériaux thermoélectriques ont été développés à partir des années 1990 pour les raisons expliquées dans les paragraphes précédents. Il convient donc de consacrer un paragraphe à leur sujet afin de dresser une liste non exhaustive de ceux-ci.

- Les Skutterudites :

Ce sont les plus étudiés depuis 10 ans. Ces composés ont une structure cubique formée d'un réseau de type MX_3 , avec M un métal de transition (cobalt (Co), rhodium (Rh) ou iridium (Ir)) et X (phosphore (P), arsenic (As) et antimoine (Sb)), avec au centre de ce réseau une grande cage dans laquelle peuvent être insérés des atomes lourds. Ces composés possèdent des coefficients Seebeck très élevés ainsi qu'une bonne conductivité électrique, mais leurs conductivités thermiques demeurent trop élevées. Les meilleurs facteurs de mérite obtenus sont voisins de 1,4 autour de 800 K.

- Les clathrates :

Ces récents matériaux présentent un fort potentiel thermoélectrique. Inorganiques, ces composés ont une structure relativement ouverte constituée, pour les composés les plus étudiés à l'heure actuelle, d'un réseau de Si (silicium), GaGe (gallium-germanium) ou GaSn (gallium-étain) formant de grandes cages dans lesquelles peuvent être insérés des atomes lourds (terres rares, alcalino-terreux). Leur conductivité thermique est similaire à celle du verre alors que les propriétés électroniques, qui sont principalement fonction du réseau, sont bonnes. Les meilleurs facteurs de mérite obtenus approchent l'unité autour de 800 K. Cependant les clathrates doivent subir des transformations avant de devenir des semi-conducteurs.

- Les oxydes :

Les recherches entreprises sur les oxydes date de 1997, année de la découverte du Na_xCoO_2 , comme matériau thermoélectrique. Ils présentent une stabilité chimique en atmosphère oxydante particulièrement intéressante. Beaucoup des oxydes ont un coefficient de Seebeck élevé ($S > 100 \mu\text{V}$) et une conductivité thermique λ faible, mais leur utilisation est limitée par une résistance électrique forte. Les oxydes de type p (à base de cobalt) présentent une performance thermoélectrique élevée et un facteur de mérite de l'ordre de l'unité.

- Les semis Heuslers :

Les composés de type semi-Heusler, de formule générale XYZ avec X et Y des métaux de transition et Z un métalloïde ou un métal, par exemple ZrNiSn (zirconium, nickel, étain). Ces composés présentent des facteurs de puissance $S^2\sigma$ très élevés, à la fois en type p et en type n. L'une de leurs caractéristiques les plus intéressantes est la possibilité de dopage sur chacun des trois sites, ce qui tend en outre à modifier les vibrations du réseau. Cependant leurs conductivités thermiques sont trop élevées, et les meilleurs ZT obtenus à l'heure actuelle sont de l'ordre de 0,7 à 700 K-800 K.

3. Les applications /exemples de réalisations

Concernant l'effet Peltier, l'application actuelle la plus importante concerne la réfrigération de glacières portatives alimentées par la prise allume cigarette d'une voiture. En effet ces frigos n'ont pas de compresseur et ne font donc aucun bruit. La société américaine Amerigon a par ailleurs développé un siège de voiture à refroidissement thermoélectrique. Dans le domaine de l'électronique, Apple utilise la thermoélectricité pour refroidir ces puces d'ordinateurs apportant une fiabilité plus importante. Les containers utilisés pour le transport d'organes à transplanter, les applications dans lesquelles les vibrations sont gênantes (les systèmes de guidage laser ou les circuits intégrés) ont eux aussi recours au refroidissement par thermoélectricité. Notons que dans certains cas les convertisseurs sont couplés à des capteurs solaires procurant une autonomie totale aux systèmes de refroidissement.

Concernant l'effet Seebeck, l'utilisation la plus connue, et sans doute utilisée par de nombreux techniciens et ingénieurs, est la mesure de la température à l'aide d'un thermocouple. En effet, la différence de potentiels mesurée entre la jonction de différents métaux (soudure froide et chaude) soumis à une différence de température permet de connaître - avec un degré plus ou moins grand de précision - la température du milieu avec lequel il est en contact.

Avec l'augmentation des rendements des thermo-générateurs, les applications sont de plus en plus nombreuses.

Pour le grand public on peut trouver des montres qui utilisent le poignet comme source chaude et l'air ambiant comme source froide. Elles évitent ainsi l'usage de piles.

La thermoélectricité est aussi utile pour les endroits non desservis par l'électricité. Ainsi Serras technologie a développé la LUFO, une lampe à pétrole couplée à une centaine de thermocouples qui délivrent une tension suffisante pour être exploitée par un petit récepteurs (radio, 2^{ème} lampe électrique...)



La thermo-génération est aussi indispensable dans certains domaines de pointe comme l'espace. En effet, pour les sondes spatiales lointaines, la production d'électricité indispensable pour alimenter ces sondes est générée par effet Seebeck en utilisant des modules thermoélectriques qui génèrent de l'électricité par différentiels de température. Ces modules sont appelés générateurs RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) fonctionnent grâce à un matériau radioactif qui constitue la source chaude et l'espace qui constitue la source froide ($T = 4K$). C'est ce genre de technologie qui équipe la sonde spatiale Voyager (et plus récemment la sonde Cassini) en électricité et qui est appelé à alimenter les futurs projets d'exploration vers Mars. Elle est aussi présente sur les sondes devant approcher le soleil car les cellules photovoltaïques ne peuvent être utilisées dans ces conditions.

Les applications possibles de la thermoélectricité sont très nombreuses. En effet, vues les recherches engagées dans ce domaine on peut imaginer la récupération de toute énergie perdue sous forme de chaleur que ce soit dans les cheminées d'incinérateurs, les circuits de refroidissement des centrales nucléaires ou dans les pots d'échappements des véhicules... Dans un moteur de voiture 40% de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les matériaux thermoélectriques offrent la possibilité de réduire la consommation d'essence en évitant l'usage de l'alternateur. Des capteurs réagissant à un échauffement pourraient aussi être créés. Le capteur à base de matériaux thermoélectriques produirait un courant qui déclencherait un système d'alerte. De plus en électronique les refroidissements à air et à eau sont devenus insuffisants et pas assez précis. Ainsi nous pourrions refroidir, comme commence à le faire Apple, les ordinateurs grâce à la thermoélectricité ce qui, par ailleurs, réduirait la nuisance sonore de ceux-ci, et permettrait d'améliorer leurs performances. Pourquoi ne pas aussi récupérer la chaleur produite par ces mêmes circuits électriques afin de recharger les batteries de nos appareils portables, permettant de la sorte d'accroître leurs autonomies.

Malgré toutes ces applications, on se rend bien compte que la génération de forte puissance par l'effet Seebeck pose problème, voyons donc maintenant les axes de recherches et développements qui pourraient amener la thermoélectricité à se développer dans cette optique.

4. Recherche et développement

Les systèmes de récupération d'énergie par voie thermoélectriques ont trouvé un regain d'intérêt depuis les années 1990 parce que les théoriciens ont démontré qu'il était possible de dépasser les performances des matériaux actuels en terme de rendement de conversion thermique/ électrique. Rappelons aussi que l'intérêt a été amplifié assez récemment du fait par le contexte sociétal de la problématique des ressources en énergie fossiles. En effet, toutes les approches consistant à économiser l'énergie fossile deviennent un enjeu important pour les décennies à venir. Ainsi, de nombreux laboratoires de recherche travaillent actuellement sur le sujet, notamment en France avec le CEA/LITEN (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives / Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux) mais aussi partout dans le monde (notamment le MIT).

La faible efficacité des systèmes thermoélectriques en a longtemps limité l'intérêt. Dans les deux cas, de nouveaux concepts, intégrant la nécessité d'avoir une bonne conduction électrique et une mauvaise conduction thermique, ont conduit depuis 1995 à des progrès assez remarquables.

La recherche s'oriente, comme expliqué dans les parties précédentes, vers la découverte de nouveaux matériaux. Ces nouveaux matériaux doivent améliorer le rendement de conversion des modules thermoélectriques mais aussi permettre une application à grande échelle de la

thermoélectricité et donc de faire baisser son prix de production. Parmi ces recherches, un domaine est en plein essor, c'est celui des matériaux à dimensions réduites : les couches minces (structure 2D), les nano fils (structure 1D) et les nano poudres (structure 0D), où l'effet des puits quantiques prédomine.

Un puits quantique désigne une hétérostructure de semi-conducteurs qui est la plus proche réalisation pratique des puits de potentiel étudiés dans les cours de mécanique quantique. Dans ce cas, le puits quantique s'obtient en réduisant la dimension du solide dans une des directions de l'espace à une valeur proche de la longueur d'onde de Broglie de la particule (typiquement quelques dizaines de nanomètres). Le mouvement des électrons et des trous est alors confiné dans une direction de l'espace et libre dans les deux autres directions (confinement 1D). Le mouvement des porteurs dans la direction du confinement est discrétisé, donnant lieu à des bandes d'énergie. Des puits quantiques peuvent parfois se former de manière « naturelle » dans certains matériaux artificiels, comme les cristaux inorganiques ou molécules organiques. Cependant, dans la très grande majorité des cas, ils sont obtenus par une structuration volontaire et très précise des matériaux utilisés à l'échelle nanométrique. Un confinement 1D peut être obtenu avec un puits quantique, 2D avec un fil quantique, 3D avec une boîte quantique. Dans les semi-conducteurs, un puits quantique peut s'obtenir par l'empilement successif de couches planes de différents matériaux, par exemple un matériau de petit gap entouré de chaque côté par un matériau de plus grand gap. Dans ce cas, les électrons voient un puits de potentiel carré avec une barrière de hauteur finie. Le développement des puits quantiques a grandement profité des progrès réalisés en croissance des matériaux et sont principalement fabriqués par épitaxie par jet moléculaire ou par dépôt chimique en phase vapeur. Dans ces techniques, un substrat cristallin plan est utilisé pour y déposer des couches de matériaux. En contrôlant les quantités relatives des espèces chimiques qui sont introduites dans le bâti de croissance, on peut former des alliages de divers matériaux.

Cette voie de développement a été lancée par un professeur du MIT (Pr Millie Dresselhaus) et selon lui, il faudra 7 à 10 ans avant que les débouchés atteignent l'industrie. Ces structures possèdent généralement des propriétés assez différentes des matériaux massifs de même composition. Des améliorations du facteur de mérite ont été prédites théoriquement pour ces matériaux puis confirmées par observation. Ces études ont montré plusieurs phénomènes : les phonons sont fortement diffusés par les joints de grains ce qui induit une baisse de la conductivité thermique, et des phénomènes de type quantique modifient les propriétés de transport électrique. En laboratoire des facteurs de mérite allant jusqu'à 2,5 ont été observés à la température ambiante.

De nos jours, la majorité des dispositifs thermoélectriques existants concernent des modules réalisés à partir de matériaux à base de Bi_2Te_3 solide et de ses dérivés mais ces matériaux ne sont à la fois ni biocompatibles (matériaux toxiques), ni intégrables à petite échelle (sous leur forme solide). Or ces deux points sont des aspects primordiaux en vue de transferts industriels.

En effet, les coûts de fabrication restent actuellement relativement élevés à cause notamment de volumes de production trop bas et de rendement limité. Ainsi, le développement de modules thermoélectriques à base de couches minces répond parfaitement à ces deux critères : en effet, l'utilisation de matériaux tels que le silicium et ses dérivés, ainsi que leur utilisation sous forme de couches minces par les techniques de la microélectronique (dépôts et caractérisations de films minces, étapes de photolithographie, traitements thermiques...) font partie intégrante du monde industriel et de la recherche.

Néanmoins, à l'heure actuelle, très peu de dispositifs thermoélectriques utilisant ces deux aspects ont été développés. Des récentes études montrent que les films minces présentent des performances thermoélectriques nettement plus importantes (jusqu'à un facteur 3) que

celles obtenues dans les matériaux massifs. Cependant, peu de travaux ont été jusqu'à présent consacrés aux matériaux en couches minces et devraient permettre d'améliorer les rendements de conversion de chaleur en électricité.

A l'échelle nanométrique, la fabrication de nanostructures permet de modifier significativement le transport de la chaleur et de l'énergie électrique par les électrons, les phonons et les photons. Ces effets trouvent un intérêt très important dans le domaine des convertisseurs thermoélectriques que ce soient en mode générateur (effet Seebeck) ou en mode refroidisseur (effet Peltier). Jusqu'à présent, la performance des matériaux thermoélectriques conventionnels ne permettait pas d'obtenir des rendements importants et limitait ces convertisseurs à des applications de "niches". Cette stagnation des performances s'explique par l'impossibilité d'obtenir simultanément des matériaux massifs avec une conductivité électrique élevée et une conductivité thermique faible.

La problématique qui paraît impossible à résoudre avec les matériaux massifs consiste à découpler les phénomènes de transport par les électrons avec les phénomènes de transfert de chaleur par les phonons. L'utilisation des nanostructures de matériaux semi-conducteurs permet de dépasser cet obstacle en modifiant les interactions entre les phonons. Déjà quelques équipes ont pu démontrer l'intérêt de ces nouvelles stratégies et ont montré expérimentalement une exaltation des performances du matériau thermoélectrique. Cette technologie relance l'intérêt des dispositifs thermoélectriques à rendement élevé qu'il s'agisse du domaine de la récupération de l'énergie ou du domaine du refroidissement des composants électroniques.

Le LITEN a acquis de fortes compétences dans le domaine des nanomatériaux pour les applications thermoélectriques que cela soit au niveau de leur "conception" au niveau théorique mais aussi au niveau de leur fabrication. Les procédés de fabrications de type couche mince par CVD (Chemical Vapor Deposition) ou des procédés de frittage de nano composite sont ainsi disponibles dans ce laboratoire afin d'obtenir les nano structure optimale pour un maximum d'efficacité des performances thermoélectriques. Des modules thermoélectriques sont ainsi réalisés en intégrant les matériaux nanostructurés. Les technologies " bas coût " tel que les techniques d'impression sont étudiés pour la réalisation de composants thermoélectrique et évalués sur des bancs de caractérisations spécifiques.

Le CEA/LITEN a validé la fabrication de nanostructure de type multi-puits quantiques Si/SiGe et de structure à base de quantum dot à partir d'un procédé de fabrication industriel. Les performances ont montré une réduction d'un facteur 2 de la conductivité thermique des matériaux et permettent d'envisager une évolution favorable du rendement de conversion.

Il reste encore de nombreux verrous technologiques à résoudre : le choix des matériaux nano structurés n'est pas encore défini, bien que certaines tendances voient le jour. Leur fabrication doit être "bas coût" et les procédés de fabrication doivent tenir compte des applications visés.

5. Conclusions

Sans conteste la thermoélectricité devrait contribuer, avec les nouvelles énergies, à faire face à la crise énergétique. Mais n'oublions pas que la principale réponse à cette crise n'est pas le développement de nouvelles énergies mais le changement de nos habitudes de vie, et la réduction de notre consommation d'énergie, et cela passe donc par la mise en place d'une politique d'efficacité énergétique, autant dans le domaine du bâtiment que de l'industrie. En effet aujourd'hui les nouvelles énergies ne servent pas à réduire la consommation d'énergies fossiles, mais à compenser l'augmentation de la demande énergétique mondiale qui est en constante augmentation, autant par le faite d'une population mondiale croissante ainsi qu'a l'émergence technologique et énergétique des pays en voies

de développement qui deviennent de plus en plus consommateurs. Les défis énergétiques sont donc grandissants et doivent impérativement s'inscrire dans une politique de gestion efficace de l'énergie et de développement durable, non plus au niveau national ou fédéral mais international.

6. Bibliographies

[1] **Djalila BOUDEMAGH** - Synthèse et Étude de Matériaux Thermoélectriques du Système $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ – Thèse de l'INPG – Mars 2010

Site Web :

<http://www-liten.cea.fr/>



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°10 : La turbine de TESLA

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	4
3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	6
3. LES APPLICATIONS/EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	6
5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	9
6. CONCLUSION	9
7. BIBLIOGRAPHIE.....	9

1. Introduction

La turbine de Tesla (du nom de son inventeur Nikola Tesla) est un type de turbine **sans pales** breveté en 1913. Elle utilise l'effet de couche limite pour subir un entraînement et non pas l'impact d'un fluide contre des pales comme c'est le cas dans une turbine conventionnelle. La turbine de Tesla est également connue sous les noms de turbine à couche limite, turbine à cohésion, et en anglais : boundary layer turbine, cohesion-type turbine, et Prandtl layer turbine (du nom de Ludwig Prandtl).

La turbine de Tesla est une machine remarquable en termes de simplicité, de robustesse, d'efficacité et d'applicabilité, mais est peu connue, surtout sur la façon dont elle fonctionne et combien elle est performante à côté de turbines conventionnelles. Jetons tout d'abord un bref regard sur les turbines en général. Nous pouvons distinguer deux grandes familles de turbines : les turbines à impulsion et celles à réaction.

Les turbines à impulsion transforment l'énergie cinétique d'un jet d'eau à très haute vitesse et la transmettent à une turbine. Dans cette famille, nous trouvons entre autres la turbine Pelton.

La seconde famille est celle des turbines à réaction, c'est-à-dire les turbines qui combinent la puissance cinétique de l'écoulement du fluide et l'apport de la pression pour les transformer en énergie mécanique et par la suite, en énergie électrique. Les turbines faisant partie de cette catégorie sont : les turbines Francis, à écoulement radial et les turbines Kaplan ou hélices, à écoulement axial.

La figure 1 montre une vue rapprochée d'une pale de turbine typique à impulsion. Le gaz à haute vitesse (vapeur ou combustion directe) passe à travers les aubes, ce qui confère un déplacement radial du rotor et de l'arbre. La vitesse du gaz diminue tandis que la pression reste constante à travers les aubes. L'égalité des pressions de gaz sur les deux bords avant et arrière des pales est caractéristique de la turbine à impulsion.



Figure 1 : Aubes de turbine à impulsions

La figure 2 montre un gros plan sur les aubes de turbine à réaction. Les pales ont une forme spéciale pour créer une chute de pression sur la surface des pales résultant en une force de réaction dans une direction radiale. Comme il y a, à la fois la diminution de la vitesse du gaz et de la pression, les turbines dites à réactions sont plus efficaces que les types impulsion dans la transmission de la puissance à l'arbre.



Figure 2 : Aubes de turbine à réaction

La différence de pression de gaz (pression plus faible sur le bord de fuite) se traduit par une charge axiale supérieure sur le rotor.

Suite à cette brève introduction sur les différentes technologies de turbines conventionnelles, nous allons maintenant décrire le fonctionnement d'une turbine moins conventionnelle : la turbine de Tesla.

2. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une turbine de type Tesla repose sur le phénomène d'adhérence due à la viscosité et donc de l'effet de couche limite. Son fonctionnement consiste en un jeu de disques lisses, entraînés par des buses appliquant un gaz sous pression sur les bords des disques. Il s'agit là d'une force exercée par frottement sur le disque et par un phénomène de viscosité et d'adhésion de la couche limite du gaz. A mesure que le gaz ralentit et cède de l'énergie au disque, il est entraîné par des mouvements en spirale vers l'échappement central.

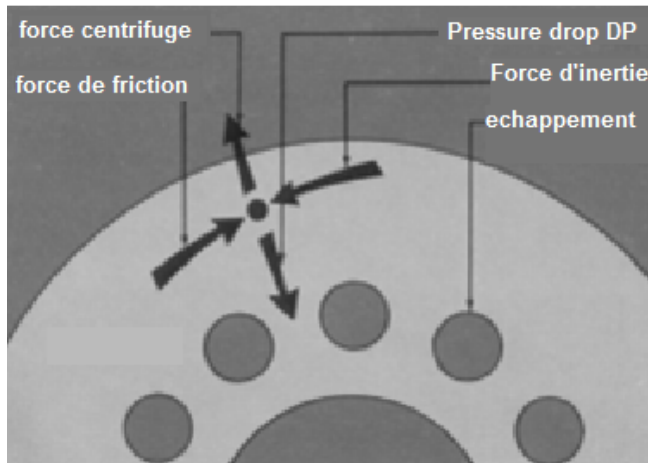


Figure 3.1 : Représentation des différentes forces agissant sur le disque d'une turbine de Tesla



Figure 3.2 : Assemblage des disques sur l'arbre d'une turbine Tesla

En prenant une série de disques et en les faisant tourner très rapidement grâce - par exemple - à un jet de vapeur, le fluide entre les disques est entraîné dans le sens de la rotation et la force centripète (*centripète : du latin « qui tend à rapprocher du centre », désigne une force permettant de maintenir un objet dans une trajectoire circulaire ou, plus généralement, elliptique. Tout objet décrivant une trajectoire elliptique possède - en coordonnées cylindriques - une accélération radiale non nulle, appelée accélération centripète, qui est dirigée vers le centre de courbure. D'un point de vue dynamique, le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) indique alors la présence d'une force radiale dirigée elle aussi vers le centre de courbure*) le fera aller vers la périphérie des disques. Ainsi, la rotation de ceux-ci sert à entraîner un alternateur pour la production d'électricité. Les brevets de Tesla n° 1061.142 pour la pompe et n° 1061.206 (cf. figure 5) pour la turbine ont été déposés le 21/10/1909, et accordés le 06/05/1913. Ils décrivent le principe de base du fonctionnement de ces machines.

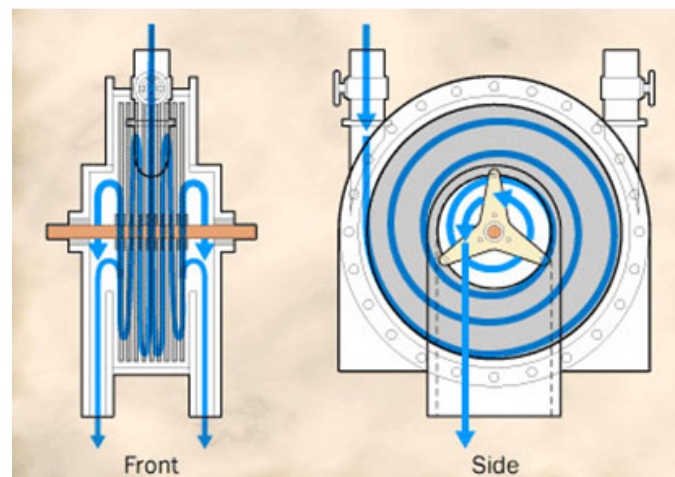
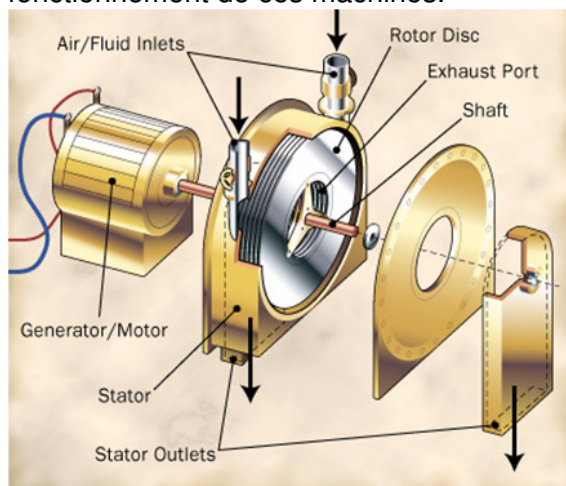


Figure 4 : Représentation du fonctionnement d'une turbine de Tesla

Attorneys:
 R. S. King & Company
 111 Wall Street
 New York, N. Y.

Nikola Tesla, Inventor
 by his Attorneys
 King, Rice, Cooper & Hayward

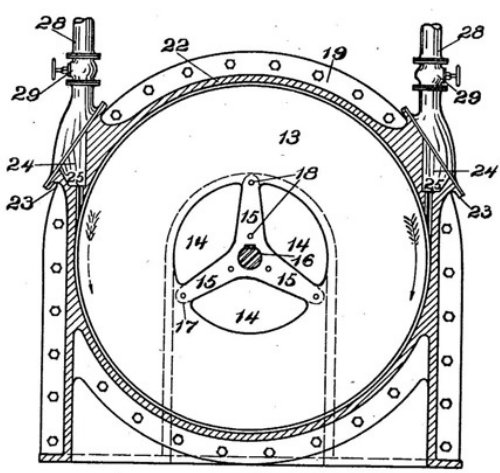


Fig. 1.

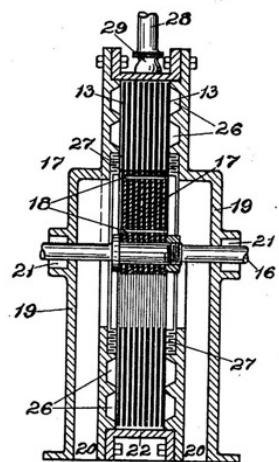


Fig. 2.

1,061,206.

APPLICATION FILED JAN. 17, 1911.

N. TESLA.

TURBINE.

Patented May 6, 1913.

Figure 5 : Patents n° 1061.206 [2]

La principale raison de la description de cette technologie dans cette étude, est due au faite qu'elle admet de nombreuses variétés de fluides de travail :

Domaine d'applications :

Fluide de travail	Turbine Tesla	Turbine conventionnelle
Vapeur sèche, propres	YES	YES
Vapeur saturée	YES	NO ¹
Fluide à basse temperature et haute pression	YES	NO
Fluide à basse temperature et basse pression, grande quantité de fluide	YES	NO
Fluide contenant de nombreuses particules	YES	YES ²
Gaz à haute pression	YES	NO
Liquide à haute pression	YES	NO
Liquide à haute pression entrainant un gaz	YES	NO

¹ besoin de séparer la buée de la vapeur avant entrée dans la turbine

² forts couts de maintenance et de réparation due à l'accélération de l'érosion des pales et d'autres composants

Tableau 1 : comparatif des domaines d'applications d'une turbine de tesla par rapport aux turbines conventionnelles [TEBA]

On peut donc voir que, contrairement à des turbines conventionnelles, la turbine de tesla permet un fonctionnement avec des fluides à basse température, haute pression ou basse pression. C'est donc pour cette raison que cette technologie de turbine pouvant générer de l'électricité via des générateur/alternateur à partir de fluides à bas niveaux de température fait partie de cette étude.

Nous allons maintenant résumer les principaux avantages et inconvénients quant à l'utilisation des turbines de Tesla.

3. Avantages et Inconvénients

La turbine de Tesla est fabriquée à partir de pièces simples à réaliser – disque plats, des tubes...etc. – cela se traduit potentiellement par de très faible coût de fabrication du moteur (en grande quantité), cela représente un net avantage. Voici ci-dessous d'autres avantages quand à l'utilisation de ce type de turbine :

- Avantages :

- Réduction des coûts de conception et de production par rapport aux turbines standards et pompes.
- Pas de pales
- Permet d'atteindre de haute vitesse (100 000 tr/min)
- Faible frottement (utilise l'effet de la couche limite, d'adhésion + viscosité)
- Peut fonctionner sous vide, réversible (fonctionnement en pompe), peut être alimenté par l'air, la vapeur d'eau, du gaz ou des liquides.
- Plus silencieux en fonctionnement que les machines conventionnelles

- Inconvénients :

Le plus gros problème pour construire des moteurs à turbines Tesla vient des plans incomplets et peu précis à ce sujet. Ces plans, parus dans « *Popular Mechanics* » et « *Live Steam* » illustrent le principe de base du fonctionnement, mais ne donnent pas les composants clés pour un fonctionnement convenable du moteur. Nous noterons aussi d'autres inconvénients :

- Faible couple de rotor
- Souvent ne conviennent pas pour un remplacement direct pour les turbines conventionnelles et des pompes.
- La preuve de l'efficacité par rapport aux turbines classiques est toujours discutable et nécessite davantage de recherche
- Des améliorations de conception sont toujours en cours

3. Les applications/exemples de réalisations

On peut noter qu'elle n'a pas été utilisée commercialement depuis son invention (bien que certaine application plus récente pour l'utilisation de la turbine Tesla en tant que pompe soit « développée » par l'entreprise Discflow), Nikola Tesla ne remporta pas de grand contrat de production notamment à cause des problèmes liées aux méconnaissances sur le comportement des matériaux à hautes températures.

Sur la figure 6, on peut voir une turbine de Tesla réalisée par TEBA (Tesla Engine Builders Assoc.). Cette turbine de Tesla possède des disques de 11 pouces (27,94 cm de diamètre) et une tuyère variable. T.E.B.A. fournit les plans et les textes comportant les erreurs qui se sont produites en 1977 lors d'essais fait par des personnes qui ont fabriqué les turbines dans le but de récupérer la chaleur géothermique et conclut qu'elles ne convenaient pas. Les schémas donnés par T.E.B.A. sont donc les plus complets et précis de nos jours. Ils ont été utilisés par de simples citoyens pour construire des moteurs très efficaces, avec des outils peu coûteux, ce qui n'est pas le cas pour des turbines à pales de mêmes performances.

T.E.B.A. fournit les détails des modèles 110 et 200 CV, sauf la conception de la tuyère. Il est préférable d'utiliser la dernière conception de tuyère de Tesla. Elle convient mieux aux faibles puissances, sans qu'il soit nécessaire de remplacer une pièce rapportée de tuyère fixée comme l'exigeait le premier prototype de Tesla.

Cette tuyère, d'abord prévue comme régulateur de moteur à essence a fait ses preuves, et elle est particulièrement intéressante pour des applications à sortie de vapeur variable comme dans les systèmes chauffés par le solaire car on peut la contrôler pour avoir une vitesse de vapeur maximum et par conséquent une efficacité maximum.



Figure 6

Toujours par TEBA, une autre turbine de TESLA pour des travaux de recherche, mais cette fois-ci des disques de 21 pouces (53,34 cm) de diamètre ont été sélectionnés comme taille standard pour une nouvelle turbine, désormais disponible auprès de TEBA. Ces trois disques, de 21 pouces de diamètre permettent une réduction de la vitesse de fonctionnement à seulement 7200 tours, tout en restant avec un faible poids : assez légère pour permettre son montage/démontage et son transport par une seule personne. En effet, le démontage de cette turbine nécessite seulement 15 minutes et peut ainsi être transportée dans tout véhicule, avec des pièces individuelles pesant moins de 50 pounds (22,68kg) chacune, cette turbine dispose également de tuyère entièrement variable.



Figure 7

Une tuyère dynamiquement réglable permet un réglage fin pour une adaptation à tout fluide à de travail et à une pression donnée (dans sa plage de fonctionnement) ce qui est essentiel pour maintenir une bonne efficacité.

Cette turbine de Tesla est utilisable notamment pour la géothermie, la biomasse et la combustion directe. Destiné pour la réalisation de test, cette machine est disponible complète et prête pour un montage facile [TEBA, été 2004].

En 2001 une turbine de Tesla avec a été testée en utilisant différents fluides, voici les principaux résultats qui ont été obtenus:

Case	Working fluid/fuel	Firing rate [Btu/hr]	T [°C]	Pressure [bar]	RPM [min ⁻¹]	Power [kW]	Isentropic Efficiency [%]
1	Compressed air	-	-	5.93	8,193	8,650	-
2	Compressed air	-	20.5	2.27	1,100	447	16%
3	Natural gas flue gas	173,000	444	2.41	6,218	3,430	12.25 %

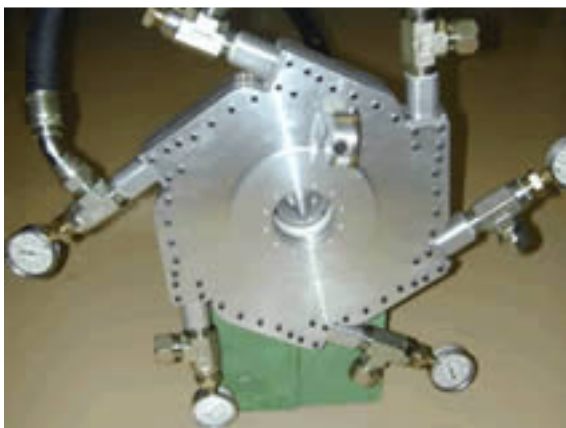
4	Biomass flue gas	192,600	392	2.76	6,284	3,206	11 %
5	Saturated Steam	-	170	6.89	6,500	9,246	13.7 %

Dans tous les cas, on voit bien que le rendement isentropique de la turbine est faible, et la puissance de sortie est similaire à des petites applications et des petites centrales électriques.

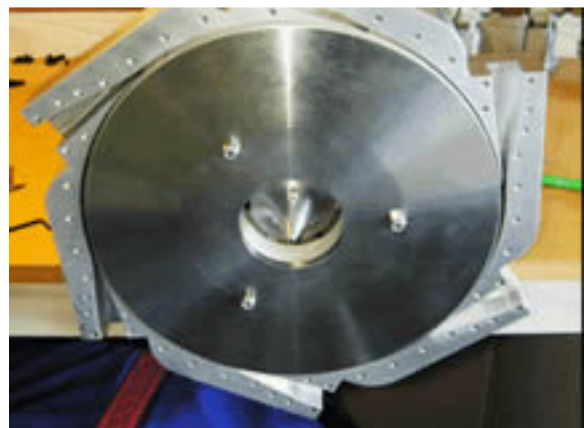
Un autre acteur dans ce domaine, « Centripetal Dynamics » a aussi émis un brevet sur l'amélioration de ces turbines [3]. Actuellement en phase de conception de prototype, les applications suivantes représentent des opportunités de vente qui peuvent être ciblées (à la suite de l'achèvement de la phase de prototype). Le prototype actuel est un démonstrateur de turbines à entraînement pneumatique, et sera utilisé pour mesurer et étudier le fonctionnement, l'efficacité et les différentes configurations du rotor. Une application spécifique proposée ci-dessous nécessite une conception et des efforts supplémentaires de développement adapté à l'application. Voici les applications possibles visées :

Application	Source d'énergie	Produit
Oil & Gas Field Energy Recovery Generators	Dual-phase geo-pressured gas & hot water	TurboFlux™ configured as wet gas model Rotary Choke Generator
Natural Gas Pipeline Energy Recovery Generators	Interstate-to-City Gate gas pressure reduction chokes	TurboFlux™ configured as dry gas model Rotary Choke Generator
Industrial Waste Heat Recovery Generators	Factory & power plants smokestack exhaust heat	Thermal Energy Converter (TEC) using TurboFlux™
Geothermal Energy Recovery	Geo-pressured steam and hot water resources	Thermal Energy Converter (TEC) and Hydro Powered Energy Well (HPEW)
LNG Power Co-Generation	Thermo-Electric conversion of temperature difference	Thermo-Electric LNG Vaporizer
Hybrid Vehicle Waste Heat Power Cycle**	Tailpipe exhaust heat hybrid conversion engine	Turboflux™ Engine with TEC
Distributed Energy Co-Gen (1/2-to-1-MW power for large buildings & supermarkets)	Gas combustion, combined heat cooling and power	Conventional reciprocating, TurboFlux™ Engine Generators with AARP or LiBr absorption cooling systems

Tableau des applications possibles de la turbine TurboFlux de centripetal dynamics



Prototype « TurboFlux » de 12 pouces



Rotor avec buses de distribution

5. Recherche et développement

A l'heure actuelle, il semble qu'un certain regain d'intérêt pour les turbines à couches limites semble gagner certains chercheurs et passionnés, néanmoins on ne notera que peu de références et publications sur le domaine, mise à part l'association « TEBA » et « Centripetal Dynamics » qui sont les structures les plus actives dans ce domaine (et l'entreprise Discflow qui conçoit et commercialise des pompes sur ce même principe). Il est donc clair que ce type de système reste dans le domaine de la recherche et du développement.

6. Conclusion

Sans conteste la technologie des turbines de type Tesla reste un objet de recherche et est loin d'avoir atteint un potentiel de réalisation industrielle à grande échelle. Elle reste néanmoins d'un principe de fonctionnement intéressant et original.

7. Bibliographie

[1] **Andrés Felipe Rey Ladino** – These - Numerical Simulation of the Flow Field in a Friction-Type Turbine (Tesla Turbine) – June 2004

[2] **US Patents n°1.061.206**

[3] **US Patents 6,973,792 B2**

Site Web:

www.teslaengine.org

www.discflo.com

www.centripetal-dynamics.com

Autres références concernant les turbines Tesla :

Jeffrey Hayes de Security, Colorado a écrit " *Tesla's engine, a new dimension for Power* " et " *Boundary Layer Breakthrough : the bladeless Tesla Turbine* " (1990) et l'article de Walter E. Burton paru dans *Popular Mechanics* de septembre 1965 : "*Make a model Tesla turbine*"



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°11 : La réfrigération magnétique

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	3
1.1 Lexique.....	3
1.2 Contexte.....	4
2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT.....	4
3. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS	7
4. LES APPLICATIONS /EXEMPLES DE RÉALISATIONS.....	8
4.1 La réfrigération magnétique active à récupération (AMRR)	8
5. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT.....	11
6. CONCLUSIONS.....	11
7. BIBLIOGRAPHIES.....	12

1. Introduction

Les besoins en réfrigération et en climatisation n'ont cessé de croître durant les dernières décennies. De plus, les exigences environnementales et les normes écologiques actuelles amènent à chercher des alternatives aux techniques thermodynamiques. La recherche actuelle sur les futures technologies de réfrigération s'oriente ainsi vers d'autres principes :

- la réfrigération thermoélectrique (cf. fiche n°11)
- la réfrigération thermoacoustique
- la réfrigération magnétocalorique

Toutes ces technologies utilisent des propriétés et phénomènes physiques propres aux matériaux. Dans cette fiche, nous nous intéresserons à la technologie de réfrigération magnétique.

1.1 Lexique

A la lecture de ce document, il sera aussi nécessaire de rappeler les différents acronymes utilisés, ainsi que les notions fondamentales qui touchent le domaine de la réfrigération magnétique. En voici les principales :

- Ferromagnétique : Le ferromagnétisme est la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (les aimants, matériaux magnétiques...) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur. Un matériau ferromagnétique plongé dans un champ magnétique génère un nouveau champ magnétique au sein de celui-ci : ce phénomène est plus communément appelé aimantation.

- Paramagnétique : Le paramagnétisme désigne le comportement d'un milieu matériel qui ne possède pas d'aimantation spontanée mais qui, sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. Un matériau paramagnétique possède donc une susceptibilité magnétique de valeur positive (contrairement aux matériaux diamagnétiques), en général assez faible. Cette aimantation disparaît lorsque le champ d'excitation est coupé, il n'y a donc pas de phénomène d'hystérésis comme pour le ferromagnétisme. Le paramagnétisme ne désigne pas une propriété intrinsèque d'un matériau mais un comportement en réponse à un champ magnétique, comportement qui peut changer selon les conditions considérées. Ainsi, un matériau ferromagnétique devient paramagnétique quand sa température dépasse sa température de Curie.

- Température de Curie : Dans un matériau ferromagnétique (ou ferrimagnétique) la température de Curie (ou point de Curie), est la température T_c à laquelle le matériau perd son aimantation spontanée. Au-dessus de cette température, le matériau est dans un état désordonné dit paramagnétique. Cette transition de phase est réversible : le matériau retrouve ses propriétés ferromagnétiques quand sa température redescend en dessous de la température de Curie. En revanche il a perdu son aimantation, même s'il peut être à nouveau magnétisé.

- Température de Néel : Température au-dessus de laquelle un matériau antiferromagnétique devient paramagnétique. Au-dessus de cette température, l'énergie thermique est suffisante pour rompre l'ordre magnétique microscopique de la matière. La température de Néel est analogue à la température de Curie, T_c , pour les matériaux ferromagnétiques.

- EMC : Effet Magnéto Calorique

- **AMRR** : Active Magnetic Regenerative Refrigeration (ou réfrigération magnétique active à récupération)

1.2 Contexte

La réfrigération magnétique (souvent appelé froid magnétique) s'appuie sur l'effet magnétocalorique (EMC) que nous décrivons dans la suite de ce document. Ses avantages économiques et environnementaux associés à son rendement énergétique en font un candidat intéressant pour de nombreuses applications industrielles de production de froid, dans la mesure où les verrous techniques associés seront progressivement traités.

En effet, autour de la température ambiante, la réfrigération magnétique laisse entrevoir de nombreuses applications industrielles : réfrigération domestique ou industrielle, climatisation de bâtiment ou de véhicule, refroidissement de systèmes portables (électronique, médical, etc.). Les avantages économiques, écologiques et environnementaux sont multiples : absence de polluant atmosphérique et de bruit et surtout un rendement énergétique nettement supérieur à celui de l'effet Peltier ou d'un cycle thermodynamique classique.

C'est un thème de recherche tout à fait nouveau qui a émergé depuis quelques années aux États-Unis, au Japon, au Canada, au Brésil, aux Pays-Bas, en Espagne, en France, et qui est encore très peu connu. Il peut être abordé à des échelles multiples, du « fondamental » à l'« appliqué », et peut faire interagir des spécialistes des matériaux, du magnétisme, de la thermique et de l'électrotechnique, c'est donc un domaine pluridisciplinaire qui fait intervenir de nombreux phénomènes.

Son principe est basé sur l'EMC qui se traduit par le refroidissement ou l'échauffement de certains matériaux sous l'action d'un champ magnétique. Pour cela on utilise les propriétés magnétiques de certains matériaux comme le gadolinium, l'arsenic, le cobalt, manganèse, silicium, germanium et certains autres alliages (ayant un EMC dit « géant ») sachant que l'EMC de ces matériaux atteint son maximum à la température de Curie (température à laquelle le matériau perd son aimantation spontanée). Actuellement, le principal obstacle à une industrialisation est le champ magnétique très élevé (de l'ordre de 5 Teslas) qu'il faut générer afin de pouvoir obtenir des rendements intéressants.

2. Principes de fonctionnement

L'effet magnétocalorique, comme nous venons de l'introduire, est une propriété intrinsèque des matériaux magnétiques qui se traduit par une variation de température réversible de la substance sous l'action d'un champ magnétique. Cet effet est maximal autour de la température ordre-désordre (température de Curie ou température de Néel). En effet, au voisinage de cette température critique, les variations de l'aimantation sont importantes et se traduisent par de fortes évolutions de l'entropie magnétique du matériau, entraînant une modification de sa température.

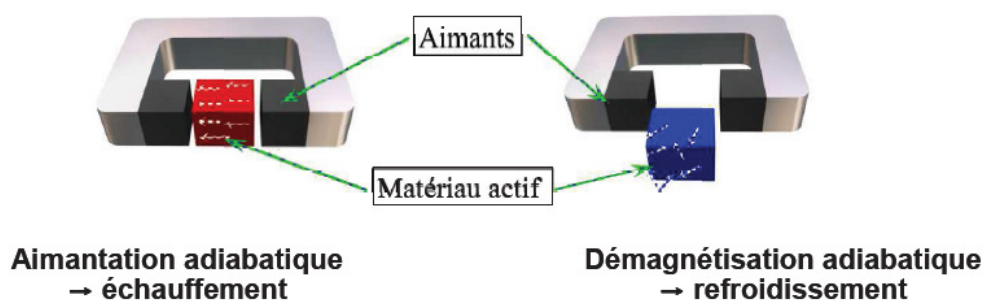


Figure 1 - Principe de l'effet magnétocalorique

Cet effet fut mis en évidence dans le fer par Warburg en 1881 et c'est seulement en 1918 que Weiss et Piccard l'ont expliqué théoriquement et lui ont donné le nom d'effet magnétocalorique.

Pour les applications de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante, le matériau doit présenter un EMC géant. Par EMC géant, nous entendons des variations de température élevées (quelques kelvins à quelques dizaines de kelvins) pour des inductions magnétiques accessibles par des aimants ou des électroaimants supraconducteurs (quelques teslas).

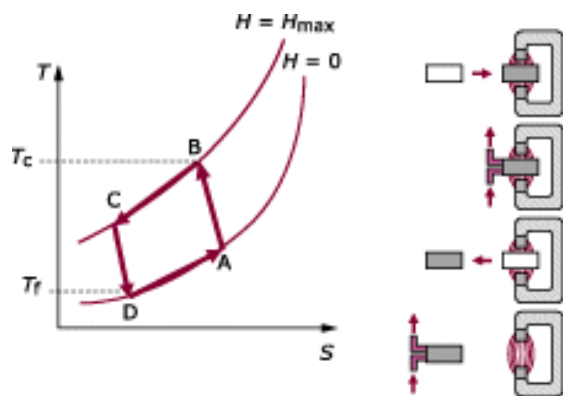
Matériaux	ΔS_m ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot T^{-1}$)	EMC_{max} (K/T)	T_C (K)	c_p ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
Gd	2,3	2,4	293	240
Gd	2,5	2,6	294	
MnFeP _{0,5} As _{0,5}	6,5	3,28	283	540
MnFeP _{0,5} As _{0,5}	7,4		282	
MnFeP _{0,63} As _{0,37}	4		219	
MnFeP _{0,45} As _{0,55}	5,5	2,92	300	565
Gd ₅ Si ₂ Ge ₂	7	3,65	278	230
La(Fe _{0,9} Si _{0,1}) ₁₃ H _{1,3}	24 ($B = 2$ T)	7 ($B = 2$ T)	291	
MnAs	31 ($B = 2$ T)	4,7 ($B = 2$ T)	318	
Fe ₄₉ Rh ₅₁	22 ($B = 2$ T)	13 ($B = 2$ T)	313	

Tableau 1 : Caractéristique de matériaux à EMC géant autour de la Temperature de curie [1]

Nous avons vu qu'une aimantation adiabatique du matériau se traduit par une augmentation de sa température. Réciproquement, une désaimantation permet de le refroidir, et cela de façon réversible. On peut ainsi réaliser magnétiquement l'équivalent d'un cycle d'une machine thermique classique. L'aimantation du matériau est alors équivalente à la compression d'un gaz et sa désaimantation à la détente. Voici sur le tableau 2 et les figures 2.a) et 2b) une analogie entre un cycle magnétique et thermodynamique :

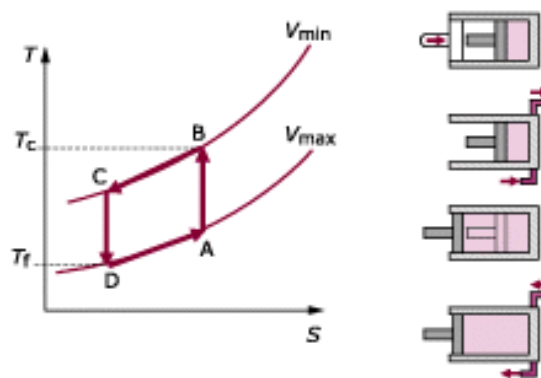
Cycle conventionnel	Cycle magnétique
Compression isotherme ($T=cte$)	Aimantation isotherme ($T=cte$)
Refroidissement isobare ($P=cte$)	Refroidissement isoaimantation ($M=cte$)
Refroidissement isochore ($V=cte$)	Refroidissement isochamp ($B=cte$)
Détente isotherme ($T=cte$)	Désaimantation isotherme ($T=cte$)
Réchauffement isobare	Réchauffement isoaimantation
Réchauffement isochore	Réchauffement isochamp
Compression adiabatique ($S=cte$)	Aimantation adiabatique ($S=cte$)
Détente adiabatique ($S=cte$)	Désaimantation adiabatique ($S=cte$)
(P, V, T)	(M, H, T)

Tableau 2 : Analogie entre cycle thermodynamique conventionnels et cycle magnétique [2]



2.a) cycle magnétique

- A->B Aimantation adiabatique (échauffement du matériau à EMC)
- B->C Refroidissement isochamp (échange de chaleur avec la source froide)
- C->D Désaimantation adiabatique (refroidissement du matériau à EMC)
- D->A Echauffement isochamp (échange de chaleur avec la source chaude)



2.b) cycle thermodynamique

- A->B Compression adiabatique (échauffement du gaz de travail)
- B->C Refroidissement isochore (échange de chaleur avec la source chaude)
- C->D Détente adiabatique (refroidissement du gaz de travail)
- D->A Echauffement isochore (échange de chaleur avec la source froide)

Afin de créer ce champ magnétique, un cylindre d'Halbach est utilisé. Cet assemblage qui se présente sous la forme d'un cylindre produit un champ homogène et intense dans le cylindre et un champ résiduel très faible à l'extérieur du cylindre.

Pour que cette technologie soit viable pour des applications domestiques, le champ magnétique doit être obtenu à partir d'aimants permanents. Les aimants permanents à base de NdFeB (néodyme-fer-bore) permettent, dans certaines configurations, d'atteindre des champs d'environ 2 à 3 Tesla. En effet à l'aide de montages basés sur la structure d'Halbach (Figure 3), des champs magnétiques uniformes allant jusqu'à 3 Tesla peuvent être atteints.

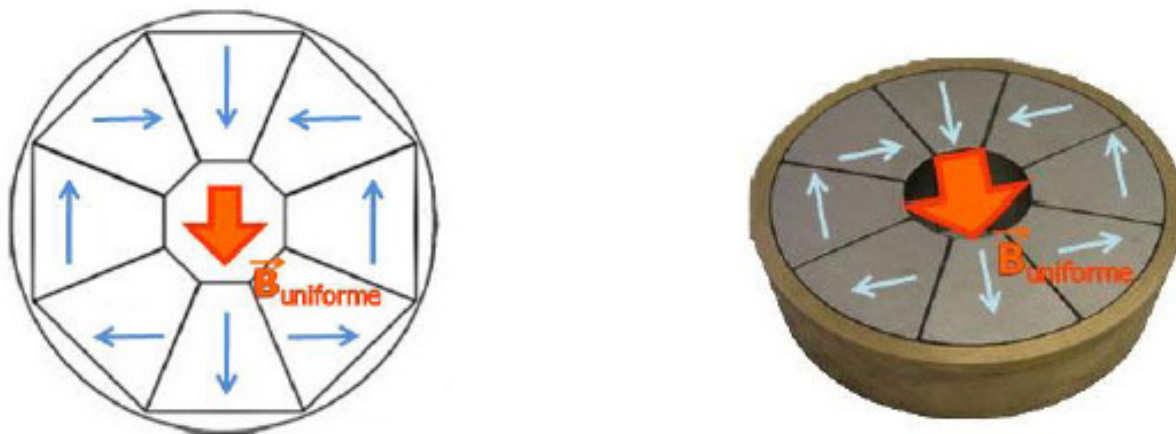


Figure 3 : Arrangement d'aimants NdFeB selon Halbach

Récemment, l'étude théorique d'un système de réfrigération magnétique rotatif a démontré la faisabilité de la réfrigération magnétique à la température ambiante utilisant des aimants permanents comme source de champ. Cette machine peut produire une puissance frigorifique de 120 W proche des réfrigérateurs classiques.

Pour les applications industrielles, d'autres sources de champ peuvent être envisagées tels que les aimants supraconducteurs. Les champs générés sont très intenses et peuvent atteindre des valeurs dépassant 8 Tesla. Leur utilisation nécessite toutefois un système de refroidissement à l'hélium liquide encombrant et coûteux, les réservant ainsi aux installations industrielles.

3. Avantages et Inconvénients

Comparée aux autres techniques de production du froid, la réfrigération magnétique présente des avantages multiples que nous allons présenter brièvement dans ce chapitre :

- Une grande efficacité thermodynamique engendrée par la quasi-réversibilité de l'effet magnéto-calorique. Avec l'EMC, les efficacités théoriques peuvent atteindre, voire dépasser, 60 % de l'efficacité limite de Carnot alors qu'elles ne dépassent pas 40 % dans les meilleurs systèmes thermodynamiques conventionnels. Cela entraîne un rendement énergétique nettement meilleur comme le montre la figure ci-dessous :

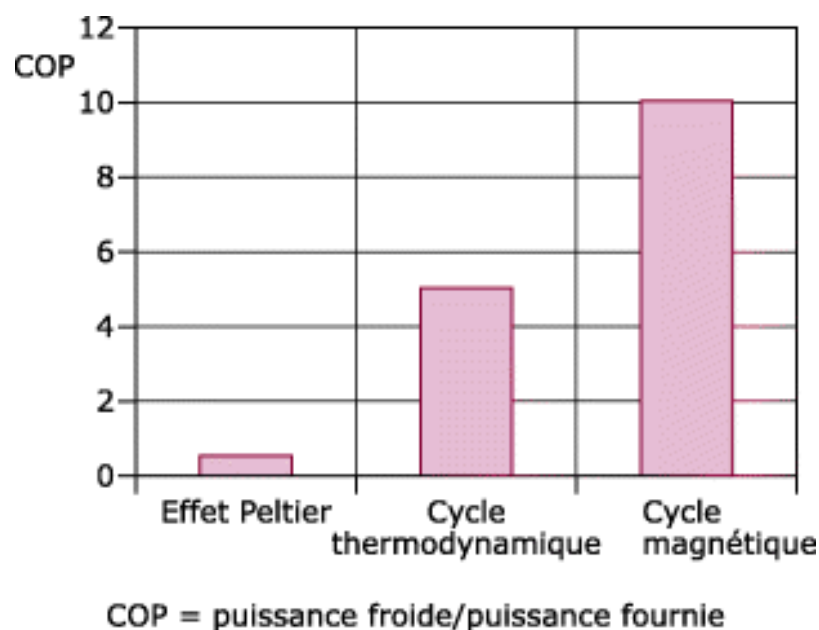


Figure 4 : Comparaison des coefficients de performance des différentes techniques de production de froid [1]

- Une absence de polluant atmosphérique comme les CFC ou ses substituts HCFC et HFC.
- Les fluides utilisés dans les démonstrateurs sont l'eau ou le glycol.
- Une absence de bruits et de vibrations grâce à l'absence de compresseur.
- Une possibilité de réaliser des systèmes compacts avec de fortes densités d'énergie, le matériau étant solide et non gazeux.

Néanmoins, comme nous l'avons déjà dit, l'inconvénient et le problème majeur réside dans la génération de fort champs magnétiques (plusieurs Tesla), qui nécessite souvent un refroidissement à l'hélium liquide.

4. Les applications /exemples de réalisations

Les avantages cités dans le chapitre précédent montre que la réfrigération magnétique a un potentiel d'applications dans de nombreux domaines, de l'industrie aux technologies de l'habitat, par exemple :

- Réfrigération domestique ou industrielle.
- Climatisation de bâtiment.
- Climatisation de véhicule.
- Refroidissement de systèmes portables : électronique, médical...etc.
- Liquéfaction de gaz.

4.1 La réfrigération magnétique active à récupération (AMRR)

L'exploitation directe de l'EMC géant autour de la température ambiante ne permet pas d'atteindre des écarts de température élevés, en particulier dans les systèmes à aimants permanents (2 K/T pour Gd). Ces écarts de température peuvent être amplifiés grâce à des cycles magnétothermiques spécifiques appelés cycles à régénération.

Le premier cycle magnétique à régénération a été décrit par Van Geuns. Il est analogue au cycle de Stirling utilisé pour les machines à gaz. Les transformations isochores sont remplacées par des transformations à aimantation constante qu'on peut appeler « iso-aimantation ». Dans le système décrit par Van Geuns, le rôle du régénérateur est assuré par le fluide qui traverse le matériau en circulant alternativement de la source chaude à la source froide. Une des limites de ce principe était que la colonne du fluide devait garder lors de son déplacement un gradient de température stable pour assurer l'effet de la régénération.

Une autre solution est de faire jouer le rôle de régénérateur au matériau réfrigérant lui-même. Barclay est le premier à avoir décrit le principe de fonctionnement d'un tel système appelé réfrigération magnétique active à régénération (AMRR). La majorité des démonstrateurs réalisés récemment pour montrer la faisabilité de la réfrigération magnétique autour de la température ambiante utilise ce principe.

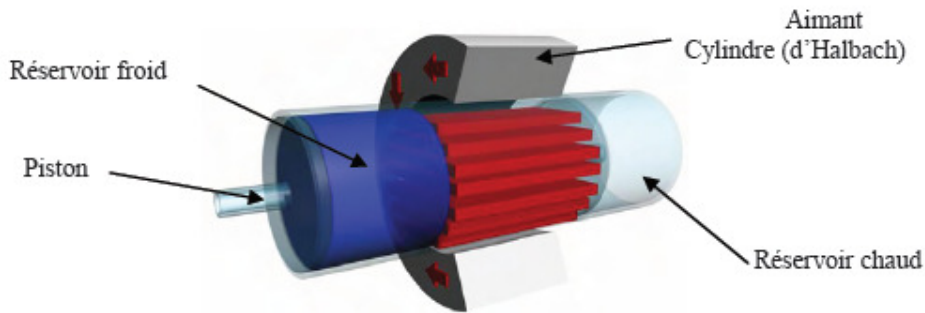
Le cycle AMRR est illustré dans la figure 5. On considère un lit régénérateur composé de plaques de matériaux magnéto-caloriques ayant initialement un profil de température quasi linéaire entre les deux réservoirs chaud et froid. L'AMRR comporte quatre étapes qui sont :

1°) Aimantation du matériau : La température augmente tout le long du lit régénérateur par effet magnéto-calorique. La température du matériau, côté chaud, devient supérieure à celle du réservoir chaud.

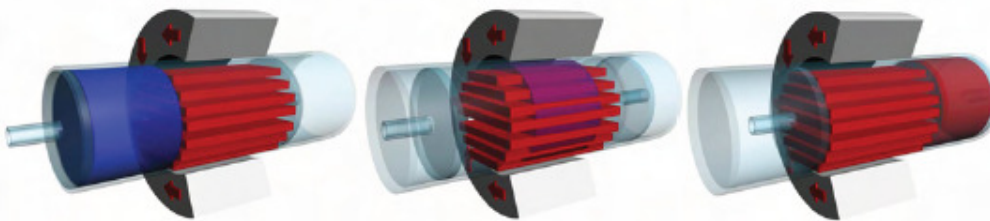
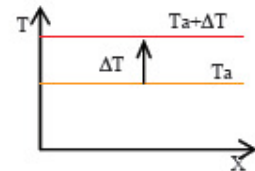
2°) Écoulement du fluide du réservoir froid vers le réservoir chaud : Ceci conduit la température du lit à baisser au contact du fluide initialement froid (venant du réservoir froid). Quant au fluide, il va voir sa température augmenter. Durant cette étape, le lit rejette sa chaleur au fluide et si cette phase est suffisamment longue, le matériau revient à sa température initiale.

3°) Désaimantation du matériau entraînant une baisse de sa température

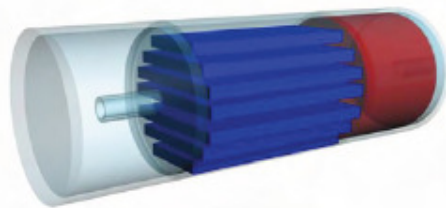
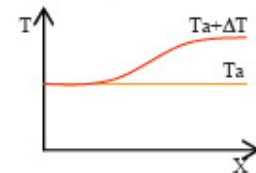
4°) Écoulement en sens inverse du fluide du réservoir chaud vers le réservoir froid : Ce fluide, initialement chaud, va échanger avec le lit, qui va lui permettre de revenir à sa température initiale.



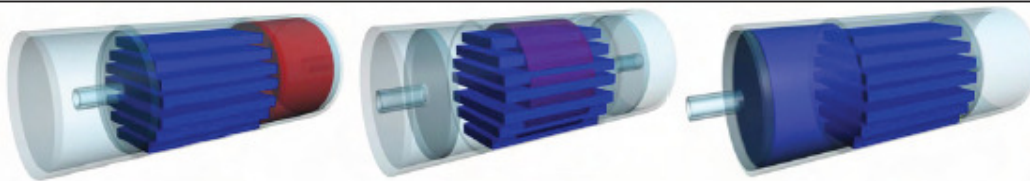
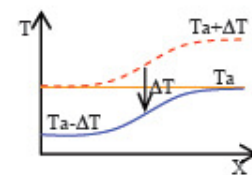
Etape 1 : Aimantation du matériau à partir d'un état initial où tout le système est à température T_a . Chaque point du matériau régénérateur voit sa température augmenter de ΔT suite à l'application du champ magnétique



Etape 2 : Ecoulement du fluide de la source froide vers la source chaude. La chaleur de l'aimantation est évacuée par le fluide circulant de la source froide T_F à la source chaude T_C : on crée ainsi un gradient thermique le long du lit.



Etape 3 : Désaimantation du matériau. Chaque point du régénérateur voit sa température baisser de ΔT suite à la désaimantation.



Etape 4 : Ecoulement du fluide de la source chaude vers la source froide. Le fluide circulant de la source chaude T_C à la source froide T_F cède sa chaleur au régénérateur. Le gradient est amplifié.

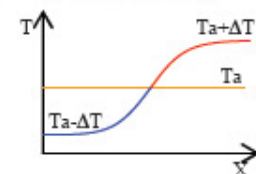


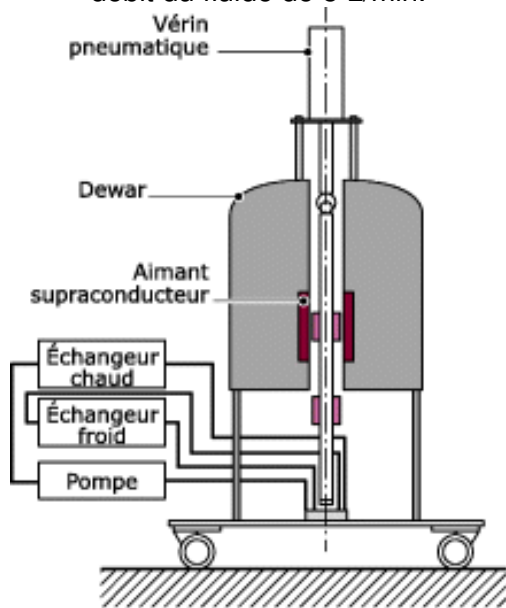
Figure 5 : Représentation des étapes d'un cycle AMRR et profil de température associé le long du matériau [3]

Le rendement et l'efficacité d'un système opérant avec un cycle AMRR dépendent du matériau, du fluide, de la source de champ et du cycle magnétothermique. Un système performant doit présenter quelques caractéristiques telles que :

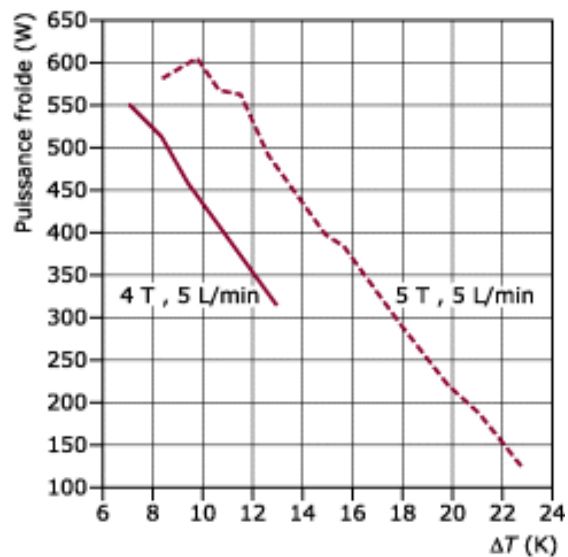
- Une forte variation d'entropie magnétique du matériau afin de disposer d'une forte puissance frigorifique.
- Un fort EMC.
- Une température de Curie proche de la source froide.
- Une forte capacité thermique massique pour réduire les oscillations en température lors des alternances des débits du fluide.
- Une conductivité thermique élevée dans le sens des échanges avec le fluide et faible dans les autres directions afin de limiter les pertes par diffusion.
- Un volume mort nul (faible porosité).
- Une faible rugosité du matériau et une faible viscosité du fluide pour réduire les pertes de charge de l'écoulement.
- Un fort coefficient d'échange thermique afin d'avoir le maximum d'échange possible entre le matériau magnétique et le fluide.

Citons en particulier le démonstrateur de Gschneidner (Ames Laboratory, Iowa) et Zimm (Astronautics Technology Center, Madison). Ce dispositif décrit les principales données utiles qui permettent d'évaluer les performances de la réfrigération magnétique. Le cœur de l'appareil (figure 6) se compose de deux paquets contenant chacun 1,5 kg de gadolinium (pur à 99,9 % en masse) sous forme de sphères de 150 à 300 μm de diamètre. Ils se déplacent alternativement dans le champ d'un aimant supraconducteur grâce à un vérin pneumatique qui peut développer une force de 2 500 N. Les paramètres du cycle AMRR mis en œuvre sont :

- fréquence du cycle égale à 0,17 Hz ;
- eau comme fluide d'échange ;
- source du champ de type aimant supraconducteur : B de 1,5 à 5 T ;
- débit du fluide de 5 L/min.



a schéma du système



b puissance froide en fonction de l'écart de température

Figure 6 : Démonstrateur de réfrigération magnétique développé aux États-Unis

5. Recherche et développement

Aujourd'hui, les recherches sur les matériaux à EMC géant autour de la température ambiante s'orientent vers des transitions de phase du premier ordre qui offrent une large variété de compositions à explorer. Il s'agit de trouver des compositions permettant de disposer d'un EMC élevé sous un champ magnétique faible tout en assurant des coûts de matière première et de mise en œuvre réduits. Actuellement, le gadolinium, seul matériau disponible sur le marché mais qui doit être utilisé à l'état très pur, est très cher (~ 3 500 €/kg). Il ne peut pas être envisagé pour des applications « grand public » et concurrencer les systèmes classiques de réfrigération.

Ainsi, les premières recherches se sont orientées aux États-Unis vers la substitution du gadolinium par les alliages $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$. Plus récemment aux Pays-Bas, des composés $MnFeP_{1-x}As_x$ ont été synthétisés et étudiés. Ces composés, appelés phospho-arséniures, sont connus depuis longtemps mais n'ont été caractérisés que du point de vue fondamental (propriétés cristallographiques et magnétiques). Ils ont un fort pouvoir magnétocalorique et peuvent être élaborés de manière relativement simple selon les procédés bien maîtrisés de la métallurgie des poudres. D'autres familles sont aujourd'hui étudiées et la liste des matériaux potentiels ne cesse de s'allonger, promettant un avenir certain aux applications.

6. Conclusions

L'effet magnétocalorique est un phénomène physique observé et connu depuis longtemps. Son potentiel d'applications dans le refroidissement a été utilisé initialement à très basse température, ce qui a motivé le développement d'outils de caractérisation et de modèles de comportement afin d'optimiser les matériaux pour l'application recherchée.

Aujourd'hui, cette motivation est encore plus forte compte tenu de l'intérêt porté à la réfrigération magnétique autour de la température ambiante. La recherche sur les matériaux est ainsi relancée afin de trouver des nouveaux matériaux à EMC géant. Outre les matériaux présentés dans ce document, plusieurs autres peuvent être envisagés.

Cependant, cette technologie émergente est dans une phase de maturation et ne peut pas être encore compétitive par rapport aux techniques conventionnelles de production du froid. De nombreux travaux sont aujourd'hui menés de part le monde sur les matériaux et les systèmes pour faire avancer la connaissance scientifique dans ce domaine et maîtriser toute la chaîne du matériau à l'application en passant par la caractérisation, l'analyse du cycle thermique, de la source de champ magnétique et l'optimisation du système. Trouver les meilleurs matériaux, les mettre en œuvre de manière simple et peu onéreuse, réaliser des prototypes de réfrigération compacts et à haut rendement énergétique, aboutir à des systèmes industriels tels sont les challenges que se sont fixés un certain nombre de groupes de recherche universitaire en partenariat fort avec des industriels.

Suivant les applications visées ou encore la source de champ choisie, on peut mettre en œuvre des cycles directs ou à régénération de type AMRR. Dans ce dernier cas, la modélisation reste un outil important d'optimisation.

Les différents démonstrateurs réalisés laissent entrevoir l'importance de ces différentes composantes. Il est encore trop tôt pour parler de performance car leur objectif n'a été souvent que la faisabilité de la réfrigération magnétique à température ambiante. Aucune optimisation n'a porté sur le matériau, les sources de champ ou encore sur les échangeurs. Ces derniers sont rarement détaillés. Ce sont généralement des systèmes classiques et pas nécessairement adaptés à l'application. La maîtrise technologique de la réfrigération magnétique fait appel à de nombreuses disciplines telles que la mécanique des fluides, la thermodynamique, la thermique, la physique des matériaux, le magnétisme et toutes sont

imbriquées, c'est donc un domaine pluridisciplinaire mais vierge qui reste ouvert à toute innovation.

7. Bibliographies

[1] **LEBOUC Afef, FOURNIER Jean-Marc, YONNET Jean-Paul, ALLAB Farid** – Réfrigération magnétique – TI Référence RE28 - 10 janv. 2005

[2] **ALLAB Farid** – Etude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique basée sur l'effet magnétocalorique géant – Thèse de l'université de INPG – Mai 2008

[3] **Houssef Rafik EI-Hana BOUCHEKARA** - Recherche sur les systèmes de réfrigération magnétique – modélisation numérique, conception et optimisation – Thèse de l'INPG – Septembre 2008



Groupement pour la recherche
sur les Echangeurs Thermiques

Procédés de récupération / Valorisation des énergies à bas niveaux de température

État des connaissances

Fiche n°12 : Les pompes à chaleur

Sommaire

1. INTRODUCTION – CONTEXTE ACTUELLE	3
2. LES POMPES À CHALEUR - GÉNÉRALITÉS	5
2.1 Principe de fonctionnement	5
2.2 Les performances énergétiques.....	7
2.3 Les fluides frigorigènes-Généralités.....	9
2.4 Les différents organes d'une PAC	11
2.4.1 Le compresseur	11
2.4.2 Les échangeurs	13
2.4.3 Le détendeur.....	13
3. PAC À MOTEUR ÉLECTRIQUE	16
3.1 Principes de fonctionnement	16
3.2 Les PAC HT.....	17
3.3 Les PAC THT	17
4. LES PAC À MOTEUR GAZ	19
4.1 Principe de fonctionnement	19
5. LES PAC À ABSORPTION	20
5.1 Introduction – Principe de fonctionnement	20
5.2 Les fluides à absorption	22
5.3 Cycle à simple effet.....	22
5.4 Cycle à double effet	23
6. LES PAC À ADSORPTION	25
7. RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT – VERROUS TECHNOLOGIQUES	26
7.1 Les fluides frigorigènes	26
7.2 L'encrassement des échangeurs	27
7.3 La pompe à chaleur Vuilleumier.....	28
7.5 Les PAC au CO ₂	29
9. CONCLUSIONS	30
10. BIBLIOGRAPHIES	30

1. Introduction – Contexte actuelle

Le secteur industriel est un grand consommateur d'énergie et 70 % de l'énergie consommée par l'industrie en France est utilisée pour des besoins de chaleur. En effet, toute activité industrielle à besoin d'énergie sous diverses formes, le plus souvent de la puissance mécanique ou de la chaleur. Elle peut être soit générée et absorbée en interne, ou alors seulement absorbée et donc générée par une centrale en externe. Dans tous les cas, l'énergie est utilisée pour le transport et la transformation des flux de matières et d'énergie, nécessaires aux procédés ou aux utilisations, intervenant dans ces activités.

Rappelons que selon le premier principe de la thermodynamique, toutes les opérations unitaires de transformation d'énergie transforment une partie de l'énergie utilisée en chaleur. Une partie importante de cette énergie est donc perdue à travers des rejets à basses températures, soit sous forme gazeuse à l'atmosphère, soit sous forme liquide qui finissent à l'égout ou aux rivières/fleuves. Cette énergie perdue constitue, rappelons le, ce qu'on appelle la chaleur fatale.

L'efficacité énergétique de ce secteur est donc une source de compétitivité et actuellement, la récupération de chaleur fatale sur des rejets et des effluents industriels à basse température représente un potentiel d'amélioration significatif de l'efficacité énergétique du parc industriel actuel. Il existe plusieurs moyens de récupérer l'énergie de ses rejets industriels, avec des degrés d'efficacité plus ou moins importants du fait de la prise en compte de l'exergie. En effet, ces rejets sont dans la plupart des cas inexploitable du fait d'un niveau de température trop bas pour une valorisation, ils sont donc la plupart du temps dévalorisés par le biais d'aéroréfrigérant par exemple. C'est donc pour pallier ce problème, qu'il est nécessaire de pouvoir rehausser les niveaux de températures de ces effluents afin qu'ils deviennent exploitables. Ainsi, les pompes à chaleur (PAC) sont de très bons moyens pour rehausser les niveaux de températures de ces effluents et rejets industriels.

En effet, les PAC qui sont maintenant largement utilisées dans le domaine de l'habitat et du tertiaire permettent de réaliser des économies d'énergie et d'éviter des rejets massifs de CO₂ dus à l'utilisation massive des sources d'énergies fossiles. Néanmoins, au-delà de leurs applications actuelles, leur véritable intérêt est la valorisation de la chaleur fatale dans les procédés industriels. En comparaison avec les PAC destinées au conditionnement d'ambiance, les PAC dans l'industrie ont l'avantage de présenter des niveaux de performance bien supérieurs et ceci est dû généralement aux écarts de températures sources/puits plus faibles et/ou aux niveaux de température élevés des sources de chaleur (effluents et rejets). De plus, les températures des sources thermiques sont souvent moins variables qu'en conditionnement d'air où les conditions intérieures et extérieures varient en fonction du jour et de la saison. En effet la variation de température des rejets thermiques est généralement faible et le besoin de chaleur est souvent constant dans l'industrie et de ce fait, les PAC industrielles réalisent des performances énergétiques annuelles intéressantes. De plus, l'intérêt économique de la PAC dans l'industrie est d'autant plus grand que celle-ci peut avoir un fonctionnement continu de l'ordre de 8 000 h/an.

Néanmoins, malgré les avantages que la PAC peut procurer à une intégration industrielle, leur nombre dans l'industrie aujourd'hui est encore faible et se situe sur des besoins à basses températures. La principale raison souvent évoquée est le temps de retour sur investissement trop long pour ce type d'équipements industriels. Cependant, en prenant en compte les coûts des énergies et les contraintes environnementales actuelles et futures, il apparaît que le temps de retour sur investissement des PAC se réduit considérablement enregistrant par exemple une diminution d'un facteur 2.5 entre 2002 et 2007, et devenant ainsi un élément de compétitivité des industriels. Les PAC méritent donc d'être analysées et développées pour relever le niveau énergétique des effluents thermiques liquides et gazeux.

Dans ce contexte, il nous paraît important de cibler les niveaux de températures de besoins et celles des rejets. Pour les données sur les rejets, différentes études ont été réalisées (notamment par l'ADEME et EDF), toutes ont mises en évidence qu'actuellement, l'offre commerciale mis en place propose des PAC fonctionnant- la plupart du temps au R134a - pouvant couvrir des besoins en chaleur jusqu'à 70°C, alors que, comme nous le montre les figures 1 et 2, il existe un besoin considérable entre 60 °C et 140 °C.

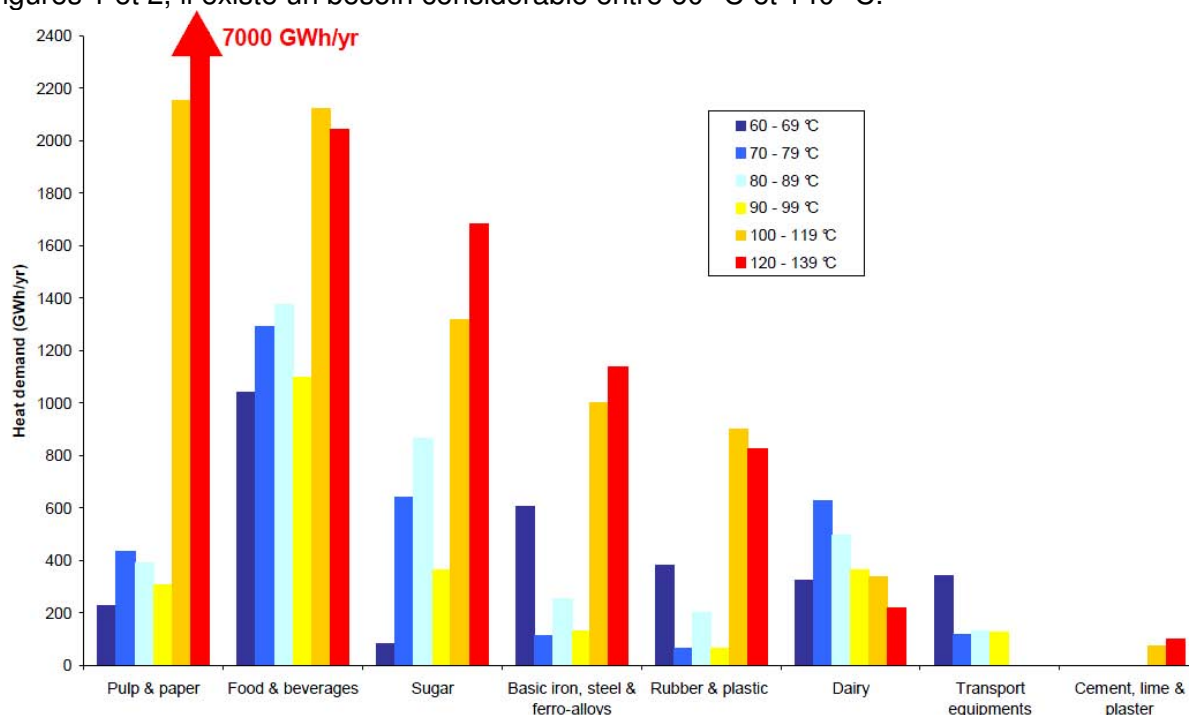


Figure 1 : Distribution du besoin de chaleur par **secteur industriel** en fonction des températures process en France [1]

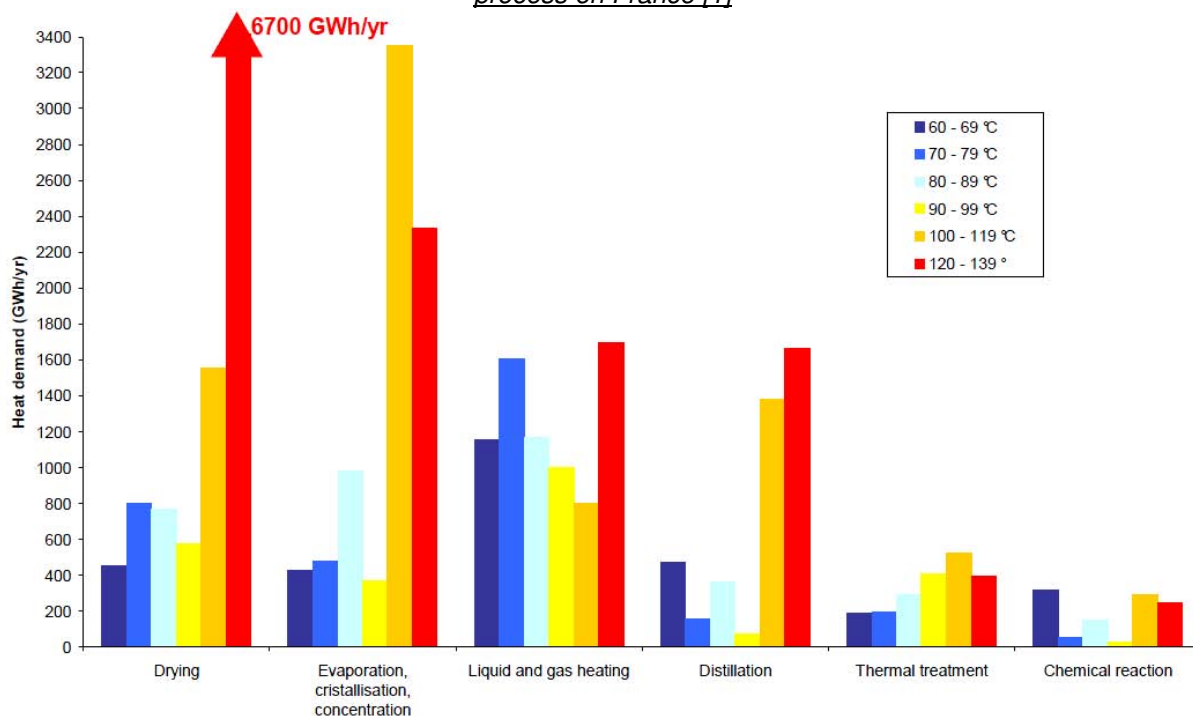


Figure 2 : Distribution du besoin de chaleur par **usage industriel** en fonction des températures process en France [1]

On résume sur la figure les différentes offres de PAC et l'état de développement actuel de chacune.

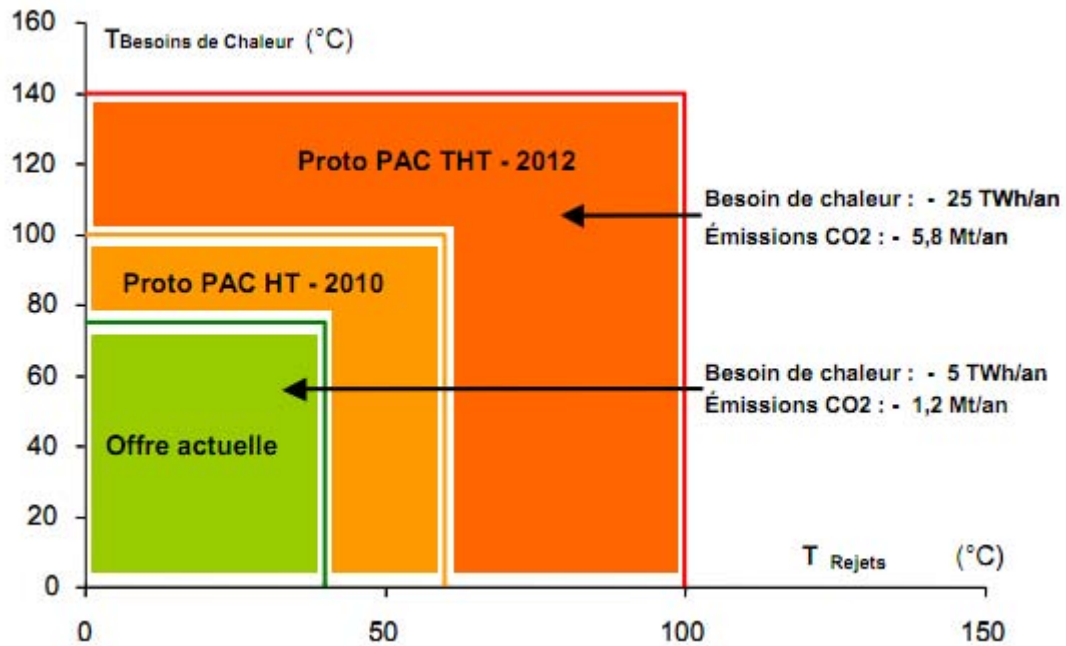


Figure 3 : besoins de chaleur dans l'industrie et niveaux de températures

Dans ce cadre là, nous allons maintenant décrire le fonctionnement et les applications actuelles et futures des différentes technologies de PAC.

2. Les pompes à chaleur - Généralités

Le moyen conventionnel pour la production de chaleur dans l'industrie est la chaudière ou la chaufferie utilisant la chaleur de combustion des énergies fossiles (gaz, fioul, etc.). Les chaudières peuvent chauffer directement des liquides à la température du besoin process ou utiliser la vapeur à différents niveaux de pression avec un réseau de distribution pour fournir le besoin de chaleur à plusieurs niveaux désirés de température et/ou à différents endroits.

Le principe de chauffage par PAC est différent de celui des chaudières. Plusieurs types de PAC existent : les PAC avec éjecteurs, les transformateurs de chaleur (ou machine à absorption) et les PAC à compression mécanique ou électrique. Leur principe de fonctionnement est le même qui est utilisé pour le conditionnement d'air ou la production du froid industriel par les systèmes frigorifiques (groupe froid) à compression de vapeur.

Avant de rentrer plus en détails, nous allons tous d'abord rappeler le principe de fonctionnement général d'une pompe à chaleur.

2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement est simple et repose sur le même principe que celui d'un groupe frigorifique à compression. Avec les groupes frigorifiques, la capacité frigorifique est valorisée à l'évaporateur (eau glacée à un niveau de température inférieur à l'ambiance) et l'énergie thermique est rejetée au condenseur (autour de la température ambiante). Dans le cas des PAC utilisées pour le chauffage industriel, la chaleur fatale des rejets thermiques à basse température est récupérée par l'évaporateur et revalorisée à haute température dans le condenseur. La figure 4 illustre ces propos :

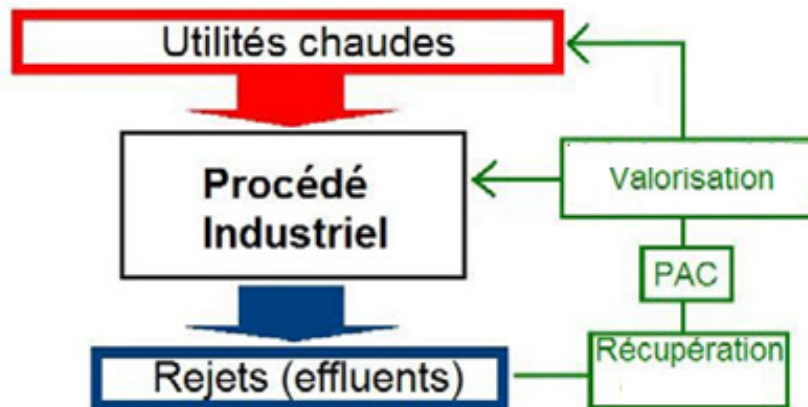


Figure 4 : Schéma de principe de valorisation de chaleur fatale par une PAC [4]

En effet, on définit deux milieux : la source froide (d'où l'on extrait la chaleur) et la source chaude (où on la réinjecte). La température réelle des sources n'intervient pas dans cette définition, bien que le dispositif soit surtout efficace dans le cas où la source chaude a une température plus élevée que la source froide.

Le cycle est constitué de différents organes (cf. figure 5) :

- 1 : le condenseur (source chaude) : le fluide frigorigène libère sa chaleur au fluide secondaire (eau, air...) en passant de l'état gazeux à l'état liquide.
- 2 : le détendeur : il réduit la pression du fluide frigorigène en phase liquide.
- 3 : l'évaporateur (source froide) : la chaleur est prélevée au fluide secondaire pour vaporiser le fluide frigorigène.
- 4 : le compresseur : actionné par un moteur électrique ou à gaz, il élève la pression et la température du fluide frigorigène gazeux en le comprimant.

Le compresseur assure la compression du fluide dans le condenseur (source chaude) afin que le changement d'état souhaité se produise à une température élevée. La pression du fluide est alors réduite au moyen d'un détendeur avant d'entrer dans l'évaporateur (source froide) pour que le changement d'état voulu se produise à basse température. Voici un schéma de principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur :

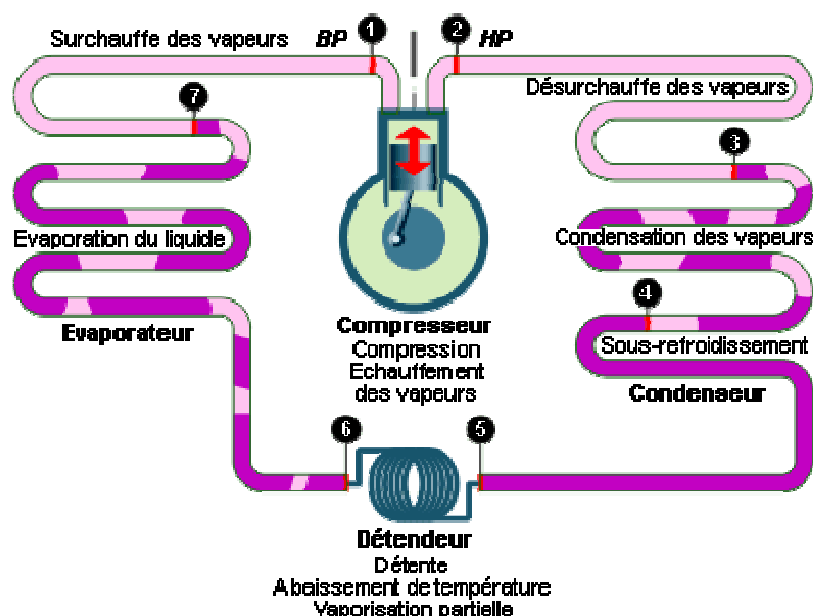


Figure 5 : Schéma de principe d'une PAC à compression

Les sources de chaleur peuvent elles aussi être différentes à savoir :

- air/air
- eau/air
- eau/eau

Et donc peuvent être issues de différents milieux tels que le sol, des nappes phréatiques, l'air ambiant et bien sûr les différents effluents et rejets thermiques industriels.

Nous noterons que les sources de chaleur de type eau/eau et eau/air sont les plus efficaces et cela ce comprend nettement en analysant la différence des capacités calorifiques des fluides considérés (eau \approx 4,18 [J/kg.K] et air \approx 1 [kJ/kg.K]).

Cependant, les critères d'évaluation des performances énergétiques et économiques des PAC industrielles sont différents de ceux des systèmes frigorifiques puisqu'il faut justifier les intérêts par rapport aux moyens conventionnels de production de chaleur (chaudières).

2.2 Les performances énergétiques

On désigne souvent les performances d'une PAC par son COP, c'est-à-dire son coefficient de performance. Ce critère est faite le ratio entre l'énergie thermique (froid ou chaud) que produit la PAC et l'énergie dépensé pour alimenter les différents organes qui la constitue (compresseur, ventilateur). Plus simplement, le coefficient de performance est le rapport de la puissance calorifique délivrée sur la puissance électrique consommée. Ce COP possède en général, et ceci en fonction des différentes sources de chaleur, une valeur assez importante qui se situe entre 3 et 5. Cela veut donc dire que lorsque l'on à consommé 100 W électrique pour alimenter la PAC, celle-ci en à délivrer entre 300W et 500 W thermique. Néanmoins, l'investissement d'une PAC est plus conséquent qu'un système de chauffage classique et le l'objectif financier est d'amortir le plus rapidement l'investissement supplémentaire grâce aux économies d'énergies réalisées part rapport à un moyen de chauffage classique.

On oublie aussi souvent que cette technologie, outre les économies d'énergies qu'elle permet d'engendrer, permet aussi de faire diminuer considérablement les émissions de CO₂. En effet, on se doute bien que la production d'énergie thermique par une source d'énergie fossile est très émettrice de gaz à effets de serre (CO₂ et NO_x), et ceci est aussi vrai pour la production d'électricité. Néanmoins, l'utilisation d'une PAC permet, et ce à hauteur de son COP de diminuer cette consommations en électricité et donc en énergie fossile.

L'intérêt du chauffage industriel par PAC par rapport à une chaudière à énergie fossile peut être évalué sur trois critères : énergétique, économique et exergétique. il est indispensable de raisonner en énergie primaire. L'énergie primaire, rappelons-le, intègre la prise en compte des rendements de conversion des productions d'énergie. Par exemple, en France la majorité du Parc de production électrique est composé des centrales nucléaires (le reste étant les centrales thermiques, l'hydraulique et une faible part d'énergies renouvelables (solaire, éolien)). Les différentes estimations des rendements de conversion de centrales est de 38% ; c'est-à-dire que lorsque vous consommez 100 W électrique avec votre PAC qui en délivre 300W ou 500W thermique grâce à son COP technique. Parc contre, , si on raisonne en terme de COP énergie primaire vous consommez réellement 263 W ce qui fait nettement baissé le COP primaire de la PAC dont la valeur réelle est comprise entre 1,4 et1,9.

On voit donc, que suivant l'origine énergétique, les performances atteignables sont tout à fait différentes. Pour généraliser ces propos, on pourra alors se référer à la figure 3 suivante qui montre les valeurs des COP primaire en fonction du rendement d'une centrale de production électrique et des deux valeurs typiques de rendement d'une chaudière industrielle

(85% et 95%). Pour économiser l'énergie primaire, il faut que l'énergie primaire consommée par la PAC soit inférieure à celle consommée par la chaudière, ce qui donne l'expression suivante du COP_{min} de la PAC :

$$COP_{\min} = \frac{\eta_{ch}}{\eta_{ce}}$$

Avec η_{ch} rendement chaudière et η_{ce} le rendement centrale électrique.

Ainsi grâce à cette expression on peut en déduire la valeur d'un COP_{min} qu'il faudrait atteindre afin qu'une PAC soit énergétiquement intéressante par rapport à une solution de type chaudière performante :

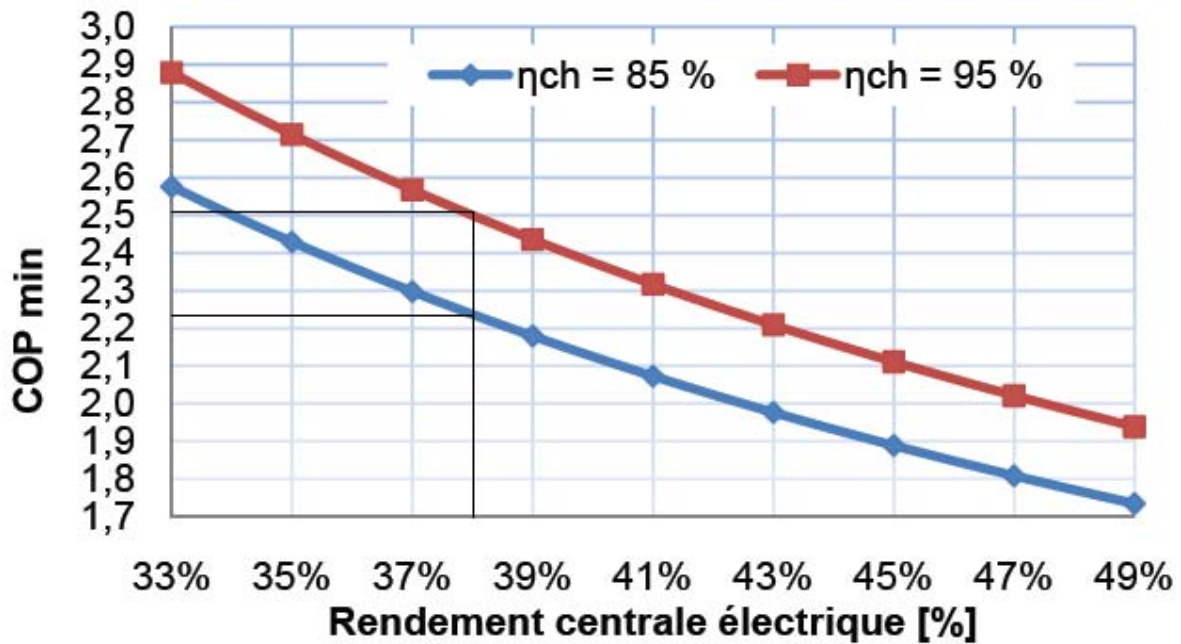


Figure 6 : COP_{min} en fonction du rendement de conversion d'une centrale de production électrique et des rendements classiques de chaudières industrielles [4]

Grâce à cette figure, on peut voir qu'en France où le rendement de conversion des centrales électriques est égale à 38 %, le COP_{min} doit être supérieur à 2,5 pour justifier un intérêt énergétique par rapport à une chaudière performante ayant un rendement de 95 %.

En ce qui concerne les performances économiques, il est aussi indispensable pour les industriels afin de justifier la rentabilité financière des coûts d'exploitation d'une PAC par rapport à une solution avec une chaudière performante. Ces coûts d'exploitations sont fonction du coût du MWh électrique consommé par la PAC, ou du prix du MWh fourni par le gaz qui est utilisé par la chaudière. D'autres paramètres économiques sont aussi à prendre en compte, notamment l'inflation et les différentes fluctuations du prix du gaz et de l'électricité, mais en réalité la formulation de l'aspect économique est plus complexe encore car le gain en exploitation doit être suffisamment important pour justifier le temps de retour sur investissement.

Enfin, le dernier critère est moins évident du point de vue de l'investisseur qui se base souvent sur le critère économique pour juger de la pertinence de l'installation d'une PAC. En effet la théorie de l'exergie a pour objet de développer une méthode d'analyse intégrée qui englobe les deux premiers principes de la thermodynamique, et permette ainsi de tenir compte à la fois des quantités d'énergie mises en jeu et de leur qualité, ce que le premier principe ne permet pas de faire. Son intérêt est qu'elle fournit un cadre tout à fait rigoureux

pour quantifier la qualité thermodynamique d'un système quelconque, ouvert ou fermé, en régime dynamique ou non. En effet, si l'énergie ne peut que se transformer sans jamais se détruire (cf. 1^{er} principe de la thermodynamique), l'exergie ne peut en revanche que diminuer dans les transformations réelles. L'exergie détruite au cours d'une réaction est appelé anergie et ce phénomène est lié à l'entropie du système et de son environnement qui, on le sait, ne peut qu'augmenter au cours d'une transformation réelle non réversible (cf. 2^{ème} principe de la thermodynamique).

2.3 Les fluides frigorigènes-Généralités

Les fluides frigorigènes ont pour rôle d'assurer le transfert d'énergie thermique de la source de chaleur à basse température vers le puits de chaleur à haute température. Ils prélèvent l'énergie à la source en s'évaporant et la cèdent au puits en se condensant. Ils circulent dans un circuit fermé qui doit être le plus étanche possible pour éviter les fuites.

Il y a longtemps le CO₂, le SO₂ et le butane étaient des gaz couramment utilisés. De nos jours, les fluides frigorigènes les plus utilisés dans l'industrie sont l'ammoniac (NH₃) et les hydrocarbures halogénés.

Les hydrocarbures sont des constituants ou dérivés du pétrole et du gaz naturel, contenant des atomes de carbone et d'hydrogène. Le méthane CH₄ et l'éthane C₂H₆ sont à la base de la fabrication de ces fluides. Dans les hydrocarbures halogénés, les atomes d'hydrogène du méthane ou de l'éthane sont remplacés, en tout ou partie, par les halogènes (principalement Cl, F, Br) à l'exception de l'iode dont la liaison avec le carbone est trop faible et induit une décomposition du fluide iodé avec la température. Donc on distingue deux familles de fluides frigorigènes :

- les composés inorganiques comme l'ammoniac (R-717), le dioxyde de carbone CO₂ (R-744) et l'eau (R-718).

- les composés organiques comme les HC (hydrocarbures), les CFC (chlorofluorocarbures), les HCFC (hydrochlorofluorocarbures) et les HFC ou (hydrofluorocarbures).

Cependant, deux enjeux environnementaux sont venus brusquement remettre en cause l'utilisation massive de la presque totalité de fluides frigorigènes : l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'augmentation de l'effet de serre. Le Protocole de Montréal a amené à fixer un calendrier d'arrêt de production et d'utilisation des fluides frigorigènes contenant des atomes de chlore. Ces fluides représentaient plus de 90 % de l'ensemble des fluides utilisés en 1998. Une révolution technologique majeure a commencé au début des années 90 et qui n'est pas encore terminée.

Désormais, pour chaque fluide, on attribue 3 indices principaux qui sont fonction de leurs impacts respectifs sur l'environnement, les voici :

- O.D.P. (Ozone Depresion Potential) :

C'est le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone. Il s'étend de 0 à 1, un gaz ayant un ODP de 1 serait très dangereux pour la couche. Exemple : ODP (R22) = 0.05 ; ODP (R404a) = 0.

- G.W.P. (Global Warming Potential) :

C'est le potentiel à provoquer directement l'effet de serre. Le GWP est gradué de 0 à l'infinie. Il représente un équivalent de CO₂. Par exemple, 1kg d'un fluide ayant un GWP de 150 aura le même effet que 150kg de CO₂.

On constate que ces indices sont très élevés. A titre de comparaison, rejeter dans l'atmosphère 1kg de R410a (certaines installations font parfois plusieurs centaines de kg...) revient à parcourir près de 13 000km à bord d'une voiture avec un véhicule émettant 150g co2/km.

- TEWI (Total Equivalent Warming Impact) :

Cette action résulte de la somme de l'impact de la molécule, considérée comme GES (gaz à effet de serre), et celui de la consommation énergétique, étendue à la durée de vie de la machine, traduite en production de tonnes de CO₂. Ce paramètre se calcule (en kg de CO₂) au moyen de l'équation qui suit et qui fait apparaître l'importance de la qualité du système en matière de confinement et d'utilisation optimale de l'énergie. Ce dernier facteur est prépondérant, il joue à la fois sur la qualité énergétique du système et sur le mode de production de l'énergie électrique (fossile, hydraulique, nucléaire ou autre) :

$$\text{TEWI} = (\text{GWP} \times m + t \times b \times E) \times n$$

Avec :

m : (kg/an) masse annuelle de fluide émis à l'atmosphère

t : (j/an) nombre de jours de fonctionnement annuel

b : émission de CO₂ par kWh électrique produit (taux français 0,10 kg de CO₂/kWh)

E : (kWh/24 h) consommation électrique journalière

n : (an) durée de vie de l'installation

Voici dans le tableau suivant quelques valeurs de l'ODP et du GWP (le TEWI étant évalué sur des critères propres au fonctionnement d'un système) :

Une solution à court terme était de travailler avec les HCFC, proches des CFC sur le plan chimique et moins nocif pour la couche d'ozone, mais tous ces fluides ayant un ODP non nul sont interdits d'utilisation dans les installations neuves en Europe depuis 2000.

Sur le plus long terme, les seuls dérivés halogénés acceptables vis-à-vis de la couche d'ozone sont les HFC (à ODP nul). Ils ont été proposés comme molécules de substitution aux CFC et HCFC. Le HFC-134a (R134a) en particulier a réussi à s'imposer en quelques années comme une bonne solution alternative pour un assez grand nombre d'installations (surtout en climatisation automobile et réfrigération domestique). Pour les pompes à chaleur à températures de condensation ne dépassant pas 80 °C, le R134a est le fluide frigorigène préféré, particulièrement pour les installations de grandes capacités.

Le principal inconvénient des HFC est que malgré leur ODP nul, leur GWP est très élevé. Depuis la mise en place du Protocole de Kyoto en 1997, les HFC sont dans la liste des gaz à effet de serre car ils participent au réchauffement climatique. Cette nouvelle contrainte entraîne non seulement la mise en place de politiques de confinement et de récupération systématique des fluides frigorigènes, mais amène aussi à choisir des fluides ayant le plus faible GWP possible. D'où les efforts considérables des chimistes durant ces dernières années pour trouver des HFC à très faible GWP comme le R-1234yf ou le R245fa.

Dans la suite de ce document nous nous intéresserons plus particulièrement aux différentes technologies ci-dessous :

- Les PAC à moteurs électrique
- Les PAC à moteurs gaz
- Les PAC à absorption

Les deux premières fonctionnent suivant le même cycle qu'une machines frigorifiques classiques, la différence étant sur la source d'alimentation (moteur électrique ou moteur thermique à gaz) de l'un des organes les plus important de la PAC (et un des plus problématique en ce qui concerne le développement futures des PAC) : le compresseur.

La principale différence du fonctionnement d'une PAC à absorption est due au remplacement du travail de compression par moteur par un système à absorption couplé à un générateur de chaleur.

2.4 Les différents organes d'une PAC

2.4.1 Le compresseur

Le compresseur représente un des organes principaux mais aussi un des plus complexes et critique d'une pompe à chaleurs. Il permet, grâce à son entrainement par moteur (électrique continu ou alternatif, ou thermique par moteur à alimentation gaz) d'élever le niveau de pression du fluide de travail (fluide frigorigène en phase gazeuse). Il existe différentes configuration:



Figure 7 : Compresseur hermétique

- les compresseurs hermétiques qui dans une même enveloppe métallique et soudée (donc indémontable) englobent le moteur et le compresseur, le fluide frigorigène circulant autour du moteur et du compresseur permet de les refroidir. Ils sont surtout utilisés pour les petites puissances (PAC domestique jusqu'à 50kW).

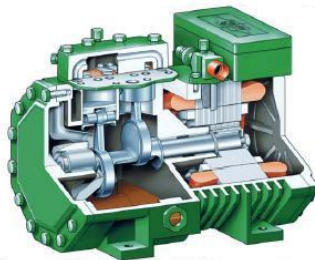


Figure 8 : Compresseur semi-hermétique à piston

- les compresseur semi hermétiques, de même principe que les compresseurs hermétiques mais qui cette fois sont démontables pour permettre une éventuelle intervention. Leur puissance peut aller jusqu'à plusieurs centaines de kW.

- les compresseurs ouverts qui, dans le domaine industriel sont souvent conçus pour être couplés à un moteur indépendant. En effet, un fonctionnement à haute température impose des compresseurs ouverts car le refroidissement du moteur ne peut plus être assuré par le fluide frigorigène (refroidissement extérieur par convection forcé). Leur puissance peut atteindre plusieurs mégawatts.

Il existe aussi une multitude de technologies de compresseurs, regroupées sous deux grandes familles : les compresseurs volumétriques (compression par réduction du volume contenant le gaz) et les turbocompresseurs. Dans la famille des compresseurs volumétriques, principalement utilisé pour les petites et moyennes puissances, on trouve principalement les technologies des compresseur à piston alternatifs (compression par un système cylindre + piston), la technologie des compresseurs de type scroll (compression par réduction de volume entre une spirale fixe et une autre mobile (spiro-orbital)) et les compresseurs à vis (mono vis ou double vis).

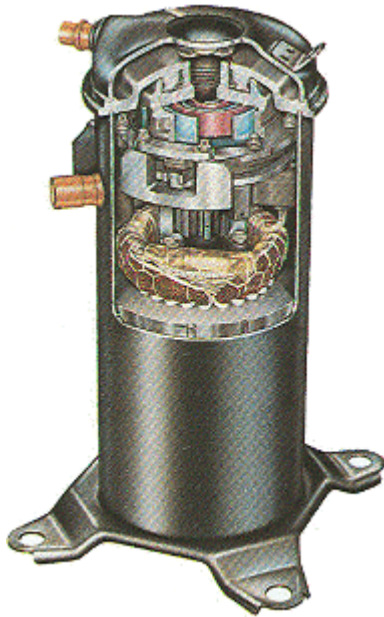


Figure 9 : Compresseur scroll (Copland)

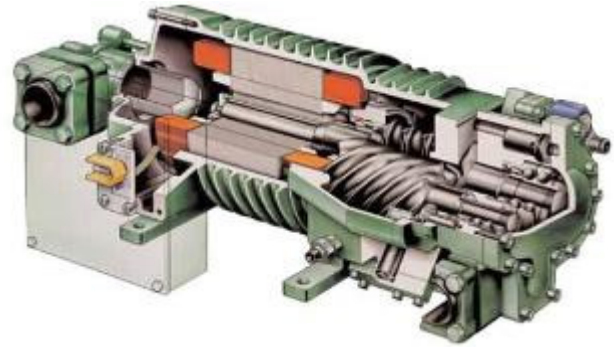


Figure 10 : Compresseur à vis (Bitzer)

Les turbocompresseurs sont eux réservés aux grosses et très grosses puissances, englobe deux types de compresseurs, axial ou centrifuge mais les compresseurs axiale sont sans doute peu employé dans le domaine des pompes à chaleur car son débit volumique à faible taux de compression ne correspond pas aux applications usuelles de pompes à chaleur. Ils sont surtout utilisés en CMV où le fluide comprimé est souvent la vapeur d'eau extraite d'un système de séchage.

Pour résumé, voici un tableau qui permet de choisir une technologie de compresseur pour une application de PAC industrielle en fonction de la gamme de puissances calorifique :

Type de compresseur		Gamme de puissance calorifique unitaire (kW)										Application		
		5	10	50	100	250	500	750	1 000	2 500	25 000			
Hermétique	rotatif	■												R
	spirale (scroll)	■										R, T, I		
	piston	■										R, T, I		
Semi-hermétique	piston	■										T, I		
	vis	■										T, I		
Ouvert	piston					■							T, I	
	vis							■				T, I		
	centrifuge									■		I		

R : résidentielle T : tertiaire I : industrielle

Figure 11 : Technologie de compresseur disponible selon la gamme de puissance calorifique [2]

Au regard de cette figure et sachant que les besoins des industriels se situe plutôt dans la tranche allant de la centaine de kW au MW, on écarte le type centrifuge conçu pour de grandes puissances de plusieurs MW chaud et n'est utilisé que dans des applications particulières. La gamme des compresseurs à vis (entre 750 kW et 2 500 kW de puissance calorifique) étant plus étendue que celle des compresseurs à pistons (entre 500 kW et 1 000 kW), le compresseur à vis sera privilégié pour des applications industrielles. De plus, récemment les constructeurs ont introduit sur le marché des compresseurs à vis pour des puissances calorifiques inférieures à 750 kW. D'autres avantages des compresseurs à vis, tels qu'un meilleur rendement volumétrique et relativement une faible température de refoulement du fait du refroidissement de l'huile dans un échangeur ad hoc ainsi que la possibilité de variation du rapport de volume interne et de la vitesse de rotation, justifient ce choix technologique.

2.4.2 Les échangeurs

Ils assurent le transfert de chaleur entre le fluide frigorigène et les sources/puits extérieurs. Ils ont des caractéristiques qui dépendent de plusieurs paramètres (nature des sources, nature de l'application, fluide frigorigène, etc.). Dans une pompe à chaleur (eau/eau) les échangeurs diphasiques sont :

Le condenseur frigorigène dans lequel l'énergie thermique accumulée par le fluide frigorigène est cédée à un circuit d'utilisation extérieur par condensation. Cette énergie constitue la chaleur utile. Les technologies les plus usuelles des condenseurs à eau regroupent les condenseurs suivants :

-les condenseurs multitubulaires, de très loin les plus courants dans les PAC moyenne, grande et très grande puissances.

-les condenseurs à plaques, dont l'usage se développe dans les PAC de moyenne puissance mais qui est encore très minoritaire.

-les condenseurs à double tube, pour les PAC de petite puissance.

L'évaporateur frigorigène qui permet de puiser de la chaleur à la source de chaleur grâce au fluide frigorigène sous forme diphasique qui doit être complètement évaporé, voire surchauffé à la sortie. Les technologies les plus usuelles des évaporateurs à eau regroupent :

-les évaporateurs refroidisseurs d'eau « sec » ou « à surchauffe » (Dry-Ex), utilisés avec les compresseurs volumétriques. Les plus courants sont du type multitubulaire, souvent à épingle (tubes en U). Cette technologie est la plus souvent employée dans la PAC de type industriel.

-les évaporateurs refroidisseurs d'eau du type «noyé», utilisés essentiellement dans les PAC à eau de forte puissance à turbocompresseur.

-les évaporateurs à film tombant en développement grâce à leur efficacité et leur charge en fluide réduite, ainsi que les évaporateurs à plaques.

2.4.3 Le détendeur

Le détendeur est l'organe du cycle qui permet d'abaisser la pression entre la sortie condenseur et l'entrée de l'évaporateur. Il est généralement précédé d'un échangeur qui permet de sous refroidir le fluide est d'obtenir de meilleur efficacité du cycle. Il produit un effet inverse de celui du compresseur, il est un élément passif du circuit frigorigène mais essentiel pour réaliser le cycle de compression/détente permettant de transférer les calories ou frigorifiques de l'évaporateur au condenseur.

La différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur nécessite d'insérer un dispositif "abaisseur de pression" dans le circuit d'une pompe à chaleur. C'est le rôle du détendeur, qui va donc abaisser la pression du fluide frigorigène sortant du condenseur à l'aide d'un dispositif d'étranglement. Le fluide frigorigène se vaporise partiellement dans le détendeur pour abaisser sa température. Le détendeur alimente ensuite l'évaporateur en fluide frigorigène en modulant son débit. La détente se produit sans échange de chaleur ou de travail avec le milieu extérieur.

Cet organe est donc très important car il permet de contrôler l'alimentation en fluide frigorigène dans l'évaporateur. En effet, un mauvais contrôle de la quantité de fluide frigorigène admise dans l'évaporateur, entraîne les conséquences suivantes :

-Trop peu de fluide frigorigène : il est immédiatement évaporé et il continue à se réchauffer. C'est l'effet de surchauffe. L'efficacité de l'évaporateur diminue.

-Trop de fluide injecté : l'excès de fluide n'est pas évaporé par manque de chaleur disponible. Une partie du fluide reste liquide et est aspirée par le compresseur. Celui-ci peut alors être sérieusement endommagé (cavitation, coup de liquide).

Le détendeur thermostatique



Figure 12 : Détendeur thermostatique

C'est le dispositif le plus fréquemment utilisé dans les pompes à chaleur. Le détendeur thermostatique, qui fonctionne de façon automatique, est un corps de vanne qui règle le débit du fluide réfrigérant de façon à maintenir constante la surchauffe des gaz qui viennent de l'évaporateur.

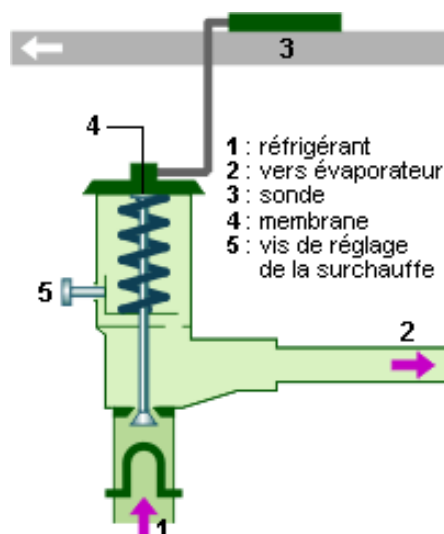


Figure 13 : Schéma détendeur thermostatique

Le corps de vanne est muni d'un orifice fixe et d'un pointeau mobile. La position du pointeau est contrôlée à partir d'un ensemble composé d'une membrane (4), d'un train thermostatique dont la pression interne est fonction de la température du bulbe (= la sonde) (3) et d'un ressort, dont la force d'appui sur la membrane est contrôlée par une vis de réglage (5). Si la charge thermique de l'évaporateur augmente, la sonde détectera une montée de température, agira sur la membrane et le pointeau s'ouvrira afin d'augmenter le débit de réfrigérant (1) jusqu'à obtention de la même surchauffe des vapeurs. D'un côté du soufflet règne la pression d'évaporation (amont ou aval de l'évaporateur suivant l'existence ou non d'une égalisation de pression) ; de l'autre côté du soufflet règne la pression de saturation correspondant à la température du bulbe.

Il existe deux classes de détendeurs thermostatiques : les détendeurs thermostatiques à égalisation interne de pression et les détendeurs thermostatiques à égalisation externe de pression.

Dans le premier cas, les forces agissant sur le pointeau de détente sont d'une part la pression du train thermostatique et, d'autre part, la pression exercée par le ressort de réglage et la pression d'évaporation à l'entrée de l'évaporateur (prise à l'intérieur du détendeur). Ce type de détendeur est bien adapté lorsque la perte de charge entre l'aval du détendeur et la sortie de l'évaporateur est faible, ce qui est le cas la plupart du temps, des pompes à chaleur de faible puissance dont l'évaporateur est équipé d'un ou de deux circuits sans distributeur de liquide.

Dans le second cas, les forces agissant sur le poiteau de détente sont d'une part la pression du train thermostatique et, d'autre part, la pression exercée par le ressort de réglage et la pression d'évaporation à la sortie de l'évaporateur. Cette pression aval est transmise dans un compartiment du détendeur par l'intermédiaire d'une tuyauterie d'égalisation de pression dont le raccordement est effectué à la sortie de l'évaporateur, et de préférence après le bulbe pour éviter d'influencer celui-ci par la turbulence locale occasionnée par le piquage. La perte de charge occasionnée par le distributeur de liquide et l'évaporateur n'intervient pas sur l'ouverture ou la fermeture du poiteau. Seule la surchauffe à la sortie de l'évaporateur agit sur le poiteau.

L'utilisation de ce type de détendeur présente l'inconvénient de ne pas avoir un temps de réponse instantané. Néanmoins il présente les avantages d'être d'une grande fiabilité, ils permettent d'adapter au mieux l'alimentation de l'évaporateur en fluide frigorigène, quelle que soit la charge thermique de celui-ci et certains détendeurs thermostatiques à égalisation de pression peuvent fonctionner dans les deux sens, évitant un second détendeur et les clapets dans les pompes à chaleur réversibles.

Les détendeurs les plus couramment utilisés sur des plages de puissance de quelques kilowatts à plusieurs centaines de kilowatts sont de type thermostatique à égalisation externe de pression.

Le détendeur capillaire



Figure 14 : Détendeur capillaire

Ce type d'organe de détente, qui est non-automatique, est utilisé dans les petits matériels de série. On se contente, comme dispositif de réglage, d'un étranglement dans la conduite du fluide frigorigène avant l'évaporateur. L'étranglement est assuré par un tube capillaire de très faible diamètre dans lequel la détente du fluide est obtenue par la perte de charge dans le tube. La longueur et le diamètre du tube capillaire sont déterminés par le constructeur.

Le capillaire de détente n'interrompt jamais la communication entre le condenseur et l'évaporateur. Pendant l'arrêt du compresseur, rien ne s'oppose donc à ce que le fluide frigorigène s'écoule du condenseur (où il est sous haute pression) vers l'évaporateur.

Le capillaire ne permet aucun réglage de la détente, ce qui peut être un inconvénient. D'un autre côté, il ne permet aucun dérèglement de la détente dans le temps, ce qui est un avantage. Le circuit doit être soigneusement déshydraté sinon le capillaire se bouche. De plus, il faut éviter l'utilisation d'une bouteille accumulatrice de liquide afin de ne pas remplir exagérément l'évaporateur durant l'arrêt du compresseur. La charge en frigorigène du circuit doit donc être relativement limitée, ce qui nécessite une recherche particulièrement soignée des fuites. En ce qui concerne les avantages de ce système, on remarque que l'équilibre de pression qui s'établit entre la haute pression et la basse pression pendant l'arrêt du compresseur permet un démarrage plus facile de celui-ci. De plus, le temps de réponse de la détente est instantané.

Le détendeur électronique

Deux techniques existent, le détendeur avec moteur à impulsion (le temps d'ouverture détermine la surchauffe) et le détendeur avec moteur pas à pas (le degré d'ouverture permet une alimentation correcte de l'évaporateur).

Le détendeur électronique fonctionne sur le même principe que le détendeur thermostatique mais il permet un réglage plus précis de l'injection à l'évaporateur. Une surchauffe plus faible

sera nécessaire et le rendement de la pompe à chaleur reste ainsi optimal à tous les régimes. La température d'évaporation remontera de 2 à 3 K, ce qui diminuera la consommation du compresseur.

Il se compose d'une sonde de température (placée à la sortie de l'évaporateur contrôlant la surchauffe des gaz), d'une sonde de pression d'évaporation et d'une carte électronique dont le rôle est d'analyser ces valeurs et d'agir en conséquence sur une vanne de détente motorisée (moteur pas à pas) ou séquentielle. Le système s'adapte à tous les fluides frigorigènes et, pour passer d'un fluide à l'autre, il suffit de modifier le paramétrage de la corrélation pression/température du fluide en ébullition. La vanne de détente peut se fermer en période d'arrêt et jouer ainsi le rôle d'une vanne magnétique de départ liquide. Les systèmes avec vanne de détente séquentielle posent quelquefois des problèmes de tenue mécanique des évaporateurs à faible inertie (coup de bélier).

Les détendeurs électroniques sont de plus en plus présents et sont installés aussi bien sur les PAC de faible puissance comme les PAC air/air que sur les machines de forte puissance. Ils sont souvent bidirectionnels mais pas systématiquement.

Ces détendeurs permettent un contrôle précis de la surchauffe sur l'ensemble du domaine de fonctionnement de la PAC. Ils sont souvent associés à des compresseurs à vitesse variable sur les PAC de faible puissance car ils ont la capacité d'adapter leur débit à celui du compresseur sur une large plage, ce qui n'est pas possible avec un détendeur thermostatique, un capillaire ou un orifice calibré. Ils peuvent également servir de vanne d'isolement entre la partie haute pression et la partie basse pression du circuit frigorifique.

L'orifice calibré

Cet organe de détente est composé d'un orifice calibré réalisé dans un corps mobile coulissant. Son fonctionnement comme détendeur s'apparente à un tube capillaire associé à un clapet de retenue autorisant le passage du liquide en sens inverse. Lorsque le fluide frigorigène circule dans un sens, il joue le rôle d'organe de détente grâce à l'orifice calibré. Dans l'autre sens, le corps mobile coulisse, dévoilant des rainures permettant de laisser passer le fluide liquide sans détente.

Maintenant que nous avons décrit le principe de fonctionnement d'une PAC et les différents rôles et technologies des composants qui constitue l'ensemble d'une PAC, nous allons donc entrer plus en détails sur les différentes technologies existantes des pompes à chaleur.

3. PAC à moteur électrique

3.1 Principes de fonctionnement

Parmi les différentes technologies de PAC électrique, il existe plusieurs catégories :

- PAC basse température (PAC BT)
- PAC Haute température (PAC HT)
- PAC très haute température (PAC THT) (bien que cette dernière est encore en phase de recherche et développement)

Les deux dernières catégories sont celle qui nous intéresse en regard du contexte de l'étude.

Les PAC HT permettent de rehausser les niveaux de température jusqu'à environ 100°C tandis que les PAC THT permettent elle de les rehausser jusqu'à environ 140°C.

3.2 Les PAC HT

Depuis 2010, certains industriels proposent cette gamme de pompe à chaleur dite à haute température. Comme nous venons de le dire, elles permettent de rehausser les niveaux de température jusqu'à environ 100°C. Elles fonctionnent sur le même principe d'une pompe à chaleur classiques (présenté dans les paragraphes précédents) mais avec des fluides frigorigènes différents dits classique comme le R134a. En effet, ces machines sont la plupart du temps des PAC classiques qui sont rétrofitée avec des nouveaux fluides frigorigènes (type R245fa) et les différents organes de la PAC doivent donc être adaptés en fonction de ces nouveaux fluides qui travail à hautes températures.

Différentes validation de performances ont été réalisées sur des bancs d'essai en amont de la commercialisation de celle-ci, notamment par les services de recherche et développement d'EDF. Les performances atteintes dans le cadre de récupération de chaleur sur des effluents à 50°C et ceci pour fournir des besoins entre 55°C et 80°C ont annoncé des COP globale (sur le système) de 6,2, incluant des COP de PAC HT seules entre 3,1 et 4,4 permettant ainsi une réduction de 96% des émissions de CO₂ et une économie d'énergie de 72% [5].



Figure 15 : banc d'essai d'une PAC HT Industrielle de 700 kW [5]

3.3 Les PAC THT

Les PAC THT sont actuellement au stade de développement. En effet, plusieurs verrous technologiques se posent afin d'atteindre des températures de condensation autour de 140°C.

Dans ce cadre là, différents projets de recherche sont en cours comme le projet ALTER ECO.

Le Projet ALTERECO démarré en octobre 2008 est un projet de Recherche et Développement innovant dans la maîtrise de l'énergie. Il a été labellisé par le Pôle de Compétitivité AXELERA de la Région Rhône-Alpes. Coordonné par la société ARKEMA, il regroupe 13 partenaires industriels (EDF, CIAT, GEA, RHODIA, Danfoss...) et scientifiques (ITERG, CETIAT, CEA/Liten, GRETh, CEREN). L'objectif du projet est de recenser toutes les techniques existantes ou émergentes et d'amorcer le développement de nouvelles technologies permettant de valoriser le contenu énergétique des rejets à bas niveaux

thermiques (RBT) qui sont produits par les activités humaines, notamment industrielles. Ce projet consiste essentiellement en 3 axes qui sont :

- réalisation d'un prototype de PAC THT fonctionnant dans des plages hautes de températures non atteintes jusque là, utilisant de nouveaux fluides frigorigènes, avec des échangeurs et des compresseurs adaptés.
- utilisation des MCP (Matériaux à changements de phase) pour le stockage d'énergie calorifique.
- les échangeurs de chaleurs en milieux encrassent avec une méthode prédictive associée à leur utilisation.

Dans ce projet, EDF pilote un sous-projet dont l'objectif est la réalisation d'un prototype de PAC THT qui devrait arriver à termes d'ici fin 2012.

Dans ce contexte, comme nous venons de le préciser il s'agit de la recherche d'un nouveau fluide frigorigène adapté (évaporation de 40 à 90 °C ; condensation de 90 à 140 °C) ; à cet égard, Arkema a développé des fluides tout à fait adaptés à ces besoins, qui à la fois respectent les contraintes thermiques et satisfont de sévères critères environnementaux.

D'autres projets sont aussi en cours, notamment sur l'axe d'utilisation de l'eau comme fluide de travail à haute température. Dans ce cadre là, le projet PACO subventionnée par l'agence nationale de la recherche (ANR) a débuté en décembre 2009 pour une durée de 4 ans et l'objectif à terme est la réalisation d'une PAC THT avec de l'eau comme fluide de travail.

En effet, l'eau peut aussi être utilisée comme fluide de travail à haute température et présente de nombreux avantages. En effet, outre le fait que ce fluide est peu cher et abondant en termes de quantité disponible, son GWP est nul et l'eau permet aussi l'obtention de COP élevées. Néanmoins, les machines de compression de vapeur d'eau sont très spécifiques et de nombreux problèmes relatifs à chaque condition d'utilisation doivent être pris en compte, notamment des problèmes d'étanchéité des garnitures sur certains types de machines, de jeux de dilatation thermique importants, des taux de compression insuffisants...etc.

L'objectif du projet est de réaliser une pompe à chaleur fonctionnant en eau à des températures entre 90 °C et 140 °C et de montrer sa faisabilité industrielle et ses performances. Le principal problème, comme nous venons de le dire, est lié à la compression de la vapeur d'eau. Deux machines de compression potentielles ont été identifiées :

- Une machine centrifuge à paliers magnétiques, développée par Johnson Controls, déjà utilisée sur d'autres fluides, répondrait aux besoins de la PAC THT avec quelques modifications ; elle répondrait alors aussi à un besoin dans le domaine de la concentration par évaporation en augmentant les facteurs de concentration accessibles par la CMV.

- Un compresseur à double vis, développé par la société suédoise SRM, adaptable à la vapeur d'eau, permettrait des taux de compression très importants (différences de température entre évaporateur et condenseurs supérieures à 40 ou 50 °C).

La mise en service de la PAC THT expérimentale est prévue pour septembre 2011.

On voit donc que de nombreux obstacles doivent être levés, notamment sur les verrous technologiques que pose le choix du fluide de travail en couplage avec la machine à compression, mais de nombreux projets de R&D voient le jour pour atteindre ces objectifs.

4. Les PAC à moteur Gaz

4.1 Principe de fonctionnement

Les PAC à compression gaz naturel (appelées également PAC moteur gaz naturel) ont un fonctionnement très similaire aux PAC à compression électrique : le cycle frigorifique est identique. Le compresseur n'est cependant pas entraîné par un moteur électrique mais par un moteur à combustion interne fonctionnant au gaz naturel (moteur dérivé de l'industrie automobile). La spécificité de ces machines tient dans la valorisation de l'énergie dégagée par le refroidissement du moteur et des gaz brûlés qui permet une optimisation de son fonctionnement par la cogénération.

D'un point de vue énergétique, leurs performances sont en moyenne supérieures de 30 % par rapport aux chaudières à condensation du marché. En effet, selon les constructeurs, les PAC moteur gaz affichent des COP sur énergie primaire de l'ordre de 1,5 (PCI) (soit un COP équivalent électrique de 3,9) et un EER de 1,4 (PCI) aux conditions nominales (EER équivalent électrique de 3,6).

Comme nous l'avons dit, la spécificité de ces machines est la récupération d'énergie provenant du refroidissement nécessaire du moteur thermique ainsi que de celui des gaz brûlés. Celle-ci a deux conséquences sur les performances et les modalités de fonctionnement. Par exemple, pour le domaine de l'habitat, en saison de chauffage, la récupération d'énergie sert au quasi-maintien de la puissance de chauffage désirée même par très basse température extérieure (sans appoint jusqu'à -20 °C). Sur certains modèles, cela permet de s'affranchir de tout cycle de dégivrage. En mode climatisation, cette énergie peut être valorisée, pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) le plus souvent. Celle-ci est alors produite sans autre consommation de gaz naturel.

Le tableau suivant donne le bilan des puissances et les performances obtenues d'une étude sur un ensemble PAC avec moteur d'automobile. Il s'agit d'un moteur classique, de cylindrée 1 673 cm³, 4 cylindres en ligne, taux de compression de 9,2 et allumage commandé. Dans le système étudié, il brûle du gaz naturel (PCI : 36,3 MJ/ m³ = 15,9 MJ/ kg) et sa vitesse est limitée à 3 000 tr/min, alors que sur automobile il fonctionne à l'essence et atteint sa puissance maximale à la vitesse de 5 750 tr/ min. Ce moteur fait tourner, par l'intermédiaire d'un réducteur, le compresseur d'une PAC. Le circuit du fluide frigorigène a pour source froide principale une boucle à caloporteur (eau glycolée) et la chaleur de l'air atmosphérique. Le réfrigérant récupère aussi les pertes du système dans l'enceinte qui enferme les machines grâce à un échangeur ventilé. Le circuit d'utilisation est une boucle de chauffage à eau qui prend son énergie au condenseur de la PAC, puis à l'eau de refroidissement du moteur. Mais celle-ci récupère et transmet aussi une partie de la chaleur des gaz d'échappement.

	Régime	
	pleine charge	demi- charge
Vitesse du moteur (tr/min)	3 000	1 500
Puissance mécanique (kW)	35	12
Rendement (%)	26.9	26.4
Puissance de l'eau de refroidissement du moteur (kW)	33.5	13
Température de sortie d'eau (°C)	86.5	85.5
Puissance des gaz d'échappement		
récupérée (kW)	32.5	8.5

Perdue (kW)	9	2
Température de sortie des gaz (°C)	730	485
Puissance de l'air de refroidissement (kW)	20	10
Puissance à la source froide (kW)	78	44
Taux d'utilisation PCI	0,93	0,96
COP de la PAC	3,80	5,33
COP de l'ensemble (PAC + moteur)	1,53	1,88

Tableau 1 : Bilan des puissances et performances obtenues du moteur thermique dans l'ensemble PAC et moteur thermique [2]

Malgré la présence d'un moteur à combustion interne, les niveaux sonores mesurés sont équivalents à ceux des PAC électriques. Les machines sont équipées d'une isolation phonique renforcée et le moteur est posé sur silentbloks. Par ailleurs, les constructeurs préconisent des raccordements flexibles et plots antivibratoires qui permettent une isolation de la machine vis-à-vis du bâtiment, minimisant ainsi la transmission de vibrations dans les dalles. L'admission d'air comburant et l'évacuation des gaz d'échappement doivent bien sûr être traitées phoniquement.

Les PAC moteur gaz, très largement utilisées au Japon (marché de 25 000 unités par an) sont disponibles sur le marché français. Les PAC commercialisées en France sont toutes réversibles (production de chaud et/ou de froid), elles produisent du chauffage, de la climatisation et l'eau chaude sanitaire par récupération d'énergie sur le moteur.

Deux constructeurs (SANYO et AISIN Toyota) distribuent des machines dont les puissances chaud/froid varient de 26 kW_c / 22 kW_f à 84 kW_c / 71 kW_f. La gamme de puissance disponible en fait des machines adaptées aux petits et moyens bâtiments tertiaires chauffés et climatisés, tant dans le neuf que dans l'existant. En additionnant plusieurs modules, la gamme peut couvrir les besoins de chauffage et de climatisation de bâtiment de surface comprise entre 500 et 5 000 m² environ.

5. Les PAC à absorption

5.1 Introduction – Principe de fonctionnement

Dans une pompe à chaleur à absorption, la compression par moteur est remplacée par un système à absorption couplé à un générateur de chaleur. Le fluide véhiculé dans le système selon le cycle thermodynamique d'une PAC à absorption est un couple frigorigène/absorbant. La technologie d'une pompe à chaleur à absorption est très similaire à celle des machines frigorifiques à absorption. La différence principale réside surtout dans le fait que l'objectif n'est plus la production frigorifique mais surtout la production calorifique de l'absorbeur et du condenseur.

Une machine à absorption comporte deux parties principales :

- Un compresseur formé de l'ensemble générateur (bouilleur) – absorbeur, dont le but est de fournir un réfrigérant à haute pression, et d'aspirer ce même réfrigérant à basse température.

- Un ensemble condenseur – vanne – évaporateur identique à celui des machines à compression. Le compresseur fonctionne en utilisant comme fluide actif un mélange d'un réfrigérant volatil et un solvant peu volatil.

Les pompes à chaleur à sorption sont généralement alimentées en gaz naturel mais peuvent aussi être alimentées avec une source chaude suffisante. Un compresseur thermique est installé en lieu et place d'un compresseur mécanique. Elles utilisent les mêmes principes de base physiques que les pompes à chaleur à compression.

En outre, un agent frigorigène déjà en ébullition à basse température, comme par exemple l'ammoniac, est utilisé. La figure 16 point (1) montre l'évaporation de l'agent à basse température et à basse pression au moment du prélèvement de la chaleur environnante.

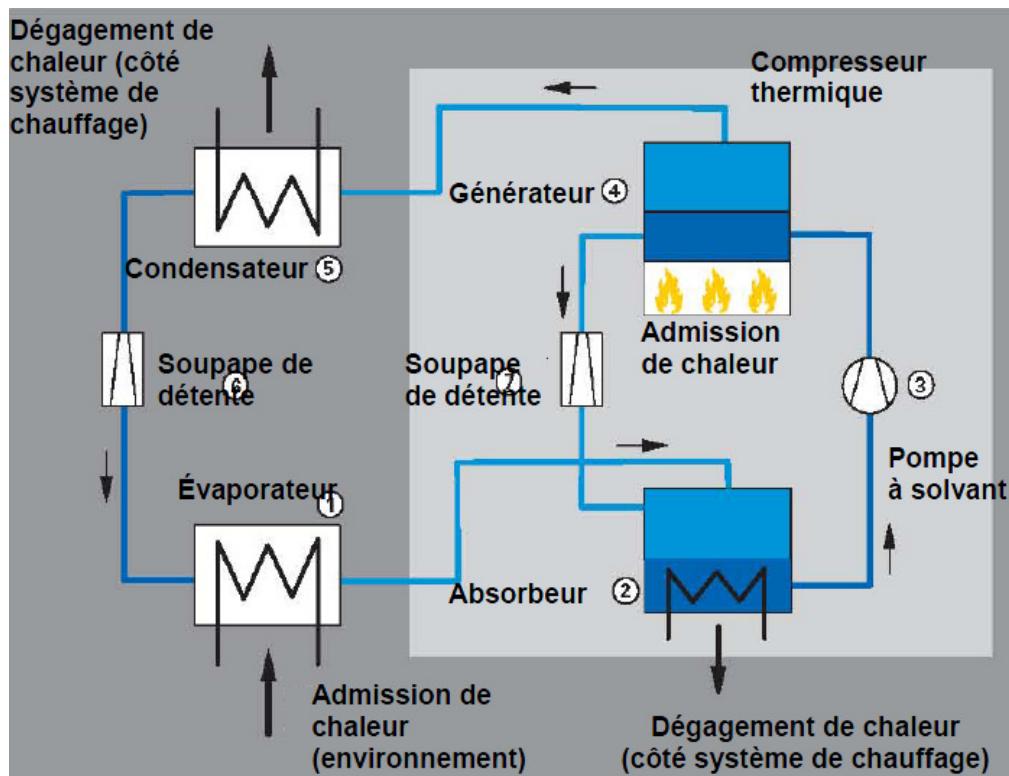


Figure 16 : Schéma de principe d'une PAC à absorption

La vapeur de l'agent frigorigène s'échappe dans l'absorbeur (2), où ce dernier est absorbé ou dissout par un solvant, par exemple de l'eau, sous l'effet du dégagement de la chaleur de dissolution.

La chaleur ainsi libérée est injectée dans le circuit de chauffage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. La solution des deux substances est alors envoyée vers le compresseur thermique (4), via la pompe à solvants (3). Les deux substances se distinguent par des températures d'ébullition différentes. Cela signifie que, l'agent frigorigène dissout s'évapore à nouveau lors de l'admission de chaleur d'un brûleur gaz, par exemple, parce que ce dernier possède la plus basse température d'ébullition entre les deux substances.

La vapeur de l'agent frigorigène à haute pression et température élevée s'échappe dans le condenseur (5) et se liquéfie sous l'effet du dégagement de la chaleur de condensation. Dès lors, la chaleur de condensation est transmise au circuit de chauffage. L'agent frigorigène liquide est détendu par la soupape de détente (6) et amenée à la pression et à la température d'origine. Le procédé sera identique dans le processus de compression avec le solvant (7).

La dépense énergétique (électricité) pour la pompe à solvants est particulièrement faible. L'énergie pour le compresseur thermique est amenée sous forme de chaleur (combustion de

gaz par exemple). En marge des brûleurs au gaz naturel, d'autres générateurs de chaleur peuvent être utilisés ainsi que des rejets thermiques suffisamment chauds.

L'avantage de la pompe à chaleur à absorption se situe dans une exploitation efficace des ressources énergétiques primaires ainsi que dans le fait que, mise à part la pompe à solvants, aucune pièce mobile n'est utilisée.

5.2 Les fluides à absorption

Conventionnellement, les mélanges binaires; Eau – Ammoniac ($\text{H}_2\text{O} - \text{NH}_3$) et Bromure de lithium – Eau ($\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$) sont les seuls couples qui soient utilisés pour les cycles à absorption. Parmi les conditions requises pour qu'un couple donné soit approprié, il faut d'une part que le solvant ait une grande affinité vis à vis du soluté (réfrigérant), et d'autre part que ce dernier soit beaucoup plus volatil que le solvant, afin que la séparation des deux constituants soit la meilleure possible.

Avec le couple LiBr- H_2O , l'eau est le réfrigérant, ce qui impose deux contraintes. D'une part les pressions de travail sont très basses compte tenu de la loi de pression saturante de l'eau, et d'autre part la température minimale du cycle doit être supérieure à 0 °C. Cependant, le couple LiBr- H_2O est utilisé pour les transformateurs de chaleur à absorption, et représente certains avantages tels qu'une enthalpie d'évaporation élevée, de bonnes propriétés thermodynamiques, non-toxique, non-explosive, ininflammable, ... etc.

Sur la base d'une étude comparative entre les couples Ammoniac – Eau et Eau – Bromure de Lithium utilisés dans un transformateur de chaleur à absorption, les différentes études réalisées ont conclu que le couple Eau - Bromure de Lithium donne une meilleure performance. Le couple $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ est surtout utilisé dans des systèmes de réfrigération à absorption, à cause de ses propriétés thermodynamique assez intéressantes. Cependant, malgré leurs avantages, ces fluides ont quelques inconvénients :

- l'ammoniac est volatil, toxique et inflammable et est corrosif envers le cuivre
- l'utilisation du couple $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ comme fluide actif dans des transformateurs de chaleur sera limitée à cause de sa haute pression de travail et le faible niveau de sécurité.

De la même façon l'utilisation de la solution $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$ à des températures ou concentrations élevées est limitée par la corrosion ou la cristallisation. Il convient donc, que l'affinité soit la plus grande possible entre le réfrigérant et la substance absorbante. Seul le réfrigérant doit parcourir la boucle frigorifique et l'absorbant doit rester confiné dans le circuit des solutions. Il importe donc qu'il y ait une grande différence entre les pressions de vapeur du frigorigène et de l'absorbant ou similairement un grand écart entre les températures d'ébullition du frigorigène et de la substance absorbante.

Ce chapitre est donc une revue sur les pompes à chaleur à absorption pour montrer que cette technologie peut être une solution pertinente pour résoudre le problème de consommation de l'énergie. En effet une pompe à chaleur à absorption peut fonctionner soit en utilisant des énergies qui sont à priori perdues comme à l'échelle industrielle ou des énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou autres. Cependant, les fluides frigorigènes utilisés pour assurer le fonctionnement de ce type de machine représentent quelques inconvénients qui ne peuvent être ignorés. Par conséquent, la communauté scientifique est motivée pour déterminer les propriétés thermo physiques et thermodynamiques de nouveaux composés qui puissent être utilisés efficacement dans les machines existantes ou à développer.

5.3 Cycle à simple effet

Le cycle à simple effet est utilisé sur les machines de petite puissance (15 à 100 kW). Il utilise généralement l'ammoniac comme fluide frigorigène et l'eau comme fluide absorbant

pour sa grande affinité avec l'ammoniac. Nous pouvons facilement mémoriser le cycle par l'astuce mnémotechnique suivante. Le fluide frigorigène traverse successivement les organes suivants :

- A : absorbeur
- B : bouilleur
- C : condenseur
- D : détenteur
- E : évaporateur

Le cycle simple effet fonctionne de la façon suivante :

La solution à haute pression ammoniac-eau est portée à ébullition dans le bouilleur (B) grâce à l'apport calorifique du gaz ou d'une autre source thermique (capteurs solaires ,fuel, rejets thermique); le fluide frigorigène (ammoniac) s'évapore, appauvrissant la solution ammoniac/eau ; les vapeurs d'ammoniac se condensent dans le condenseur (C) en cédant de la chaleur à l'eau chaude ; l'ammoniac liquide est détendu par l'organe de détente (D) ; l'ammoniac liquide à basse pression est pulvérisé dans l'évaporateur (E) où il s'évapore en puisant de la chaleur à la source froide ; la solution à haute pression ammoniac-eau pauvre en ammoniac est détendue avant d'alimenter l'absorbeur (A) où elle entre en contact avec les vapeurs d'ammoniac à basse pression ; l'ammoniac est absorbée par l'eau ; cette solution riche en ammoniac est ramenée au bouilleur et remontée en pression par une pompe de solution.

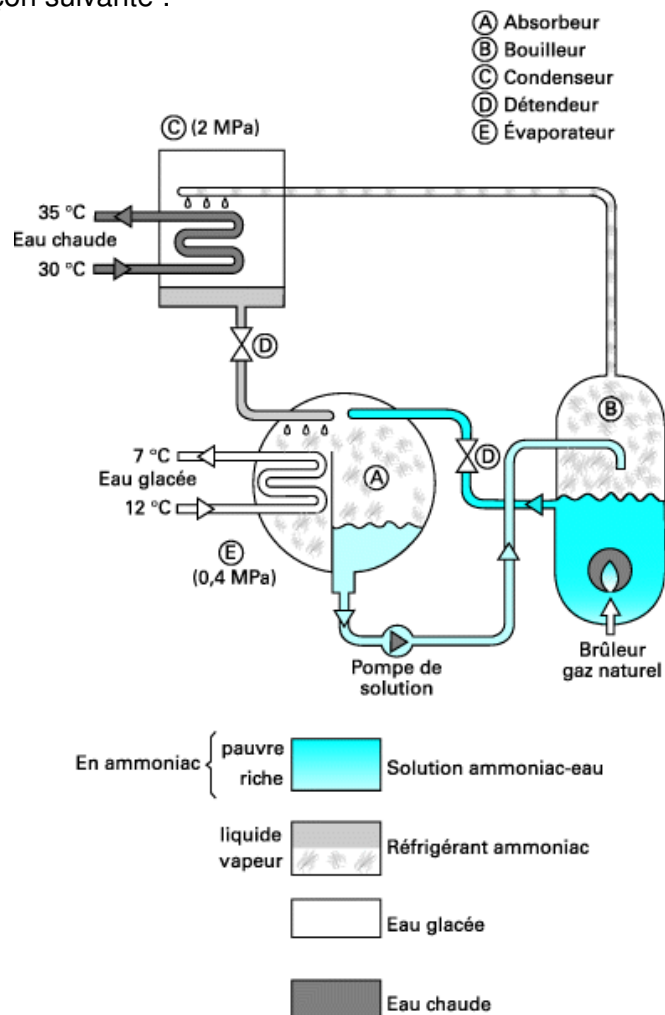


Figure 17 : Cycle à simple effet [3]

5.4 Cycle à double effet

Ce cycle à double effet est utilisé sur les machines de moyenne à grosse puissance (100 à 5 000 kW). Il utilise généralement l'eau comme fluide frigorigène et le bromure de lithium comme fluide absorbant pour sa grande affinité avec l'eau. L'eau a la propriété de s'évaporer à 3 °C sous 1 kPa de pression absolue. Nous travaillons donc en dépression par rapport à la pression atmosphérique. Pour expliquer le fonctionnement du cycle à double effet (figure 18), nous allons scinder en deux les circuits des fluides (circuit du fluide frigorigène, circuit du fluide absorbant). Le fluide frigorigène (eau) suit le circuit suivant :

L'eau à haute pression s'évapore dans le bouilleur (1), ou générateur à haute température (170 °C), en appauvrissant la solution eau-bromure de lithium ; la vapeur sert de source chaude dans le générateur à basse température (90 °C) (2) qui génère de la vapeur basse température ; la vapeur se condense dans le condenseur (3) en cédant de la chaleur à l'eau chaude ; l'eau est détendue par le détendeur (4) ; l'eau à basse pression est pulvérisée dans l'évaporateur (5), grâce à la pompe de réfrigérant où elle s'évapore en puisant de la chaleur à la source froide ; l'eau est absorbée par la solution eau-bromure de lithium dans l'absorbeur (6).

Le fluide absorbant (bromure de lithium) plus ou moins riche en eau suit le circuit suivant :

La solution de bromure de lithium riche en eau est portée à ébullition à 170 °C dans le générateur à haute température (1) grâce à l'apport calorifique du gaz, où elle s'appauvrit en eau ; la solution pauvre à haute pression et haute température se refroidit en cédant de la chaleur à la solution riche par l'échangeur haute température (9) ; cette solution est encore appauvrie dans le générateur à basse température (2) par l'apport calorifique du fluide frigorigène ; elle est détendue par le détendeur (10) ;

La solution pauvre à basse pression se refroidit en cédant de la chaleur à la solution riche par l'échangeur basse température (8) ; elle est pulvérisée dans l'absorbeur (6) où elle se refroidit en cédant de la chaleur à l'eau chaude et absorbe la vapeur d'eau ; cette solution riche en eau est ramenée au bouilleur, remontée en pression par la pompe de solution, réchauffée par les échangeurs (8) et (9).

Ces systèmes à usage industriel, dérivent des PAC en ouvrant le cycle de part et d'autre du détendeur qui est en général supprimé. En outre, évaporateur et condenseur sont regroupés dans un ensemble qui produit de la vapeur du côté de l'évaporateur grâce, en majeure partie, à la condensation de cette même vapeur qui a été comprimée. L'appareil de compression peut être un compresseur (apport d'énergie mécanique) ou un éjecteur (apport d'énergie fluide et de vapeur).

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| ① Générateur haute température | ⑥ Absorbeur |
| ② Générateur basse température | ⑦ Pompe de solution |
| ③ Condenseur | ⑧ Échangeur basse température |
| ④ Détendeur de fluide frigorigène | ⑨ Échangeur haute température |
| ⑤ Évaporateur | ⑩ Détendeur de fluide absorbant |

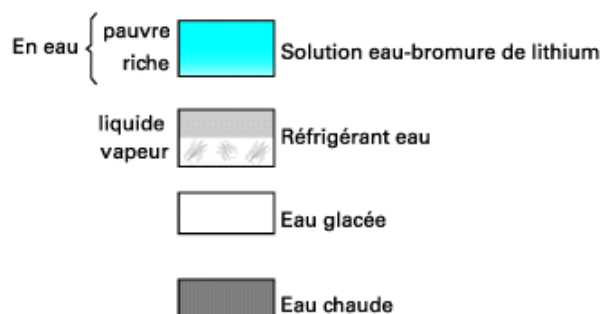
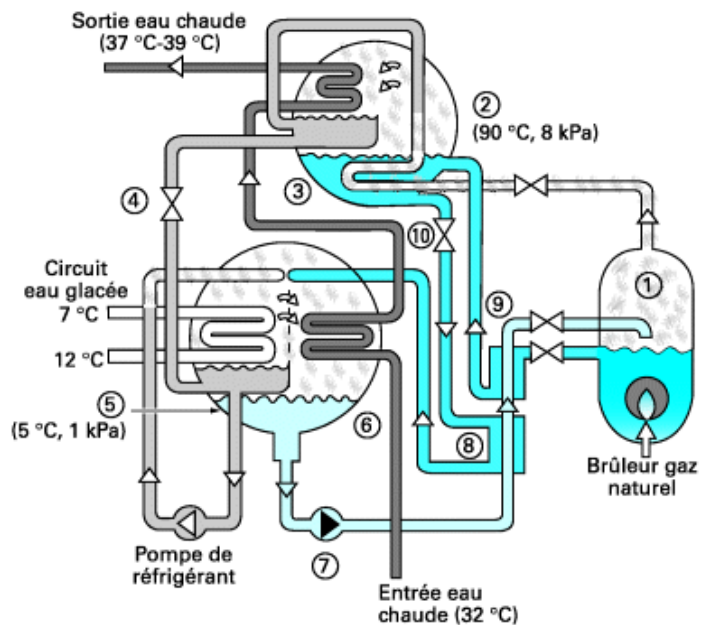


Figure 18 : Cycle à double effet [3]

6. Les PAC à adsorption

La pompe à chaleur à adsorption fonctionne avec des solides, comme par exemple le charbon actif, le gel de silice ou la zéolite. La zéolite minérale a la propriété d'absorber et de lier (adsorber) les vapeurs d'eau. Elle rend donc une plage de température de chaleur jusqu'à environ 300 °C. On parle alors d'une réaction exothermique.

Comme pour les pompes à chaleur décrites plus haut, le processus d'absorption de chaleur et de dégagement de chaleur se produit également, pour la pompe à chaleur à adsorption, en un cycle thermodynamique bien que son fonctionnement soit périodique. Une exécution possible de ce type de construction est illustrée à la figure 19. L'ajout d'un système à vide est requis pour les pompes à chaleur à adsorption de ce type.

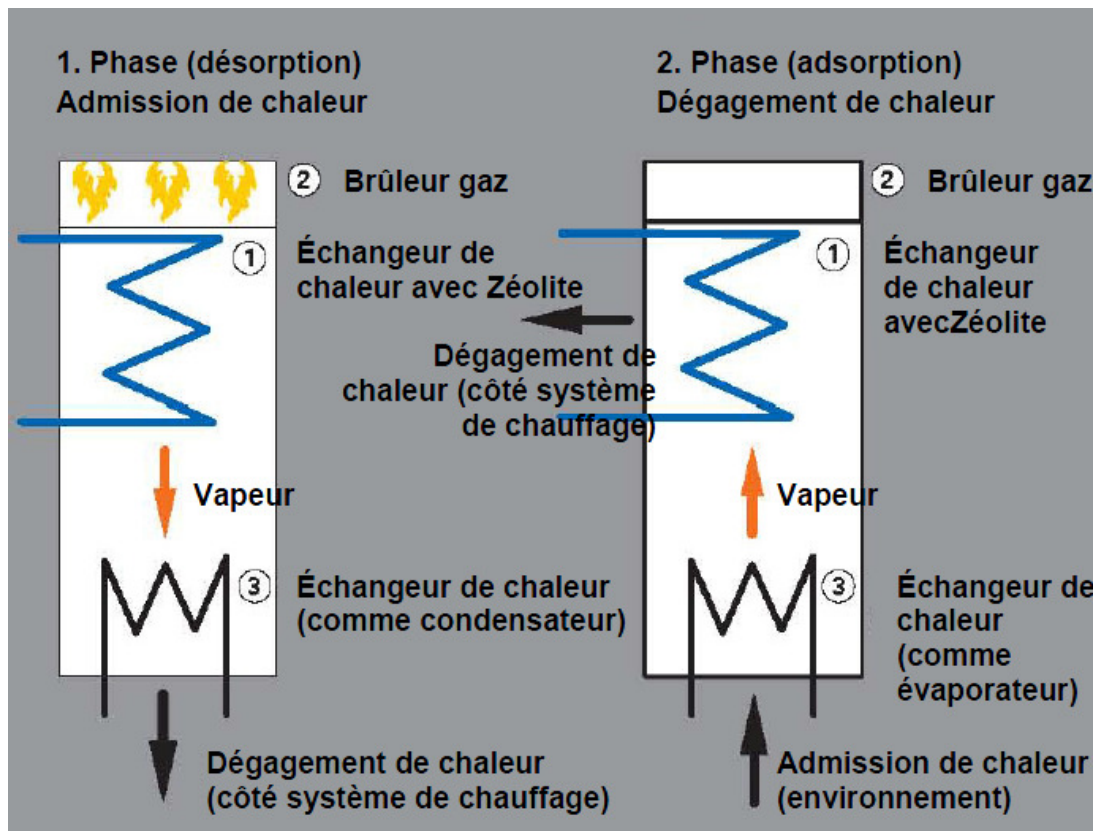


Figure 19 : Schéma de fonctionnement d'une PAC à adsorption

Dans la première phase (appelée phase de désorption), la chaleur est acheminée vers l'échangeur de chaleur recouvert de gel de silice ou de zéolite (1) avec un brûleur gaz (2) par exemple. De ce fait, l'eau reliée à ce combustible solide est libérée sous forme de vapeur et s'échappe vers le second échangeur de chaleur (3). Cet échangeur de chaleur a une double fonction : dans la première phase, il transmet la chaleur, maintenant libérée par la condensation de la vapeur, au système de chauffage. Cette première phase est terminée lorsque la zéolite ne contient plus d'eau ou lorsqu'elle a atteint le taux de dessiccation souhaité et que l'eau qui se trouve dans le second échangeur de chaleur est condensée. Le brûleur se coupe maintenant.

La seconde phase commence alors, lorsque l'échangeur de chaleur (3) agit comme évaporateur, en amenant la chaleur environnante à l'eau. Puisque dans cette phase, une pression d'environ 6 mbars domine dans le système, l'agent frigorigène, l'eau, s'évapore sous l'effet du prélèvement de la chaleur environnante.

Les vapeurs d'eau retournent vers l'échangeur de chaleur (1) et sont à nouveau recueillies (adsorbées) par le gel de silice ou la zéolite. La chaleur délivrée ainsi par le gel de silice ou la zéolite, arrive par l'échangeur de chaleur (1) dans le système de chauffage. Lorsque les vapeurs d'eau sont entièrement adsorbées, une période complète du cycle calorifique est terminée.

La pompe à chaleur à adsorption pour le chauffage des habitations unifamiliales et bifamiliales est encore, à l'heure actuelle, en développement et fabriquées en petite à moyenne en Europe. Le déploiement d'énergie est important puisque la technologie du vide doit être utilisée.

La pompe à chaleur à absorption décrite ci-avant, est utilisée depuis longtemps déjà, pour ce type de construction, en tant que machine frigorifique à haute puissance (cf. fiche n°5).

7. Recherche et développement – Verrous technologiques

De nombreux projets de recherche sont en cours concernant les PAC. En effet, il existe de nombreux verrous technologiques qu'il faut tout d'abord surpasser avant de pouvoir envisager à court termes l'intégration de nouvelles PAC THT dans le domaine industriel.

7.1 Les fluides frigorigènes

Les verrous technologiques des pompes à chaleur industrielles proviennent essentiellement des températures de fonctionnement élevées désirées. Les nouvelles conditions de fonctionnement imposées par les pompes à chaleur à HT et THT de condensation (entre 75 °C et 140 °C) ne permettent plus l'emploi des fluides utilisés classiquement dans l'industrie frigorifique. A partir des températures d'évaporation et de condensation, on peut distinguer trois zones représentées sur la Figure 20.

La première zone (jusqu'à environ 75 °C de température de condensation) correspond à des pompes à chaleur commercialisées par les constructeurs de groupes frigorifiques. Ce matériel directement dérivé des machines frigorifiques classiques ne pose pas de problèmes techniques particuliers, excepté ce qui relève du choix de nouveaux fluides frigorigènes règlementés et de l'intégration thermique dans les procédés.

La deuxième zone (température de condensation entre 75 °C et 100 °C) est celle des machines dérivées du matériel frigorifique classique mais spécialement adaptées à des températures de fonctionnement plus élevées.

Les machines développées dans ce domaine de températures sont couramment appelées «pompes à chaleur à haute température» (PAC HT).

Enfin, la troisième zone n'est pas directement accessible au matériel dérivé des techniques frigorifiques classiques (les températures de condensation de 100 °C constituent une barrière technologique). Cette zone correspond à d'autres technologies telles que la compression mécanique de vapeur d'eau (CMV) qui est appliquée surtout aux opérations de concentration et de distillation.

Selon les constructeurs, les principales difficultés des PAC HT avec des compresseurs lubrifiés sont les suivantes :

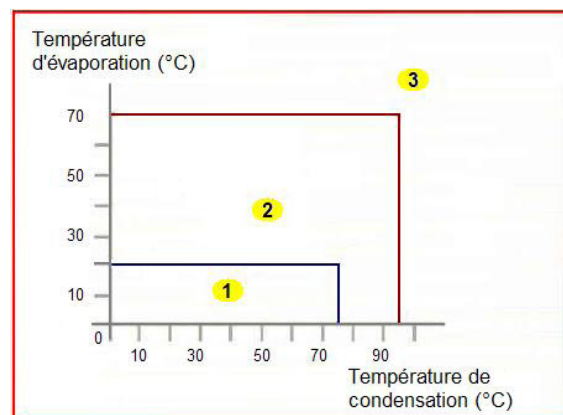


Figure 20 : délimitation des limites technologiques [4]

- réduction des jeux mécaniques, en limitant la température de refoulement, liés aux dilatations de rotor, ce qui est d'ailleurs contradictoire avec une nécessité d'une surchauffe importante au refoulement pour une bonne séparation d'huile.

- adaptation du lubrifiant (changement de l'indice de viscosité d'huile) au niveau de la température de condensation et vérifier sa compatibilité avec les joints. A noter une interaction complexe entre température, miscibilité et viscosité d'huile pour le choix des lubrifiants en températures élevées.

- validation de la fiabilité du compresseur avec les combinaisons (température / fluide / huile)

Ces difficultés nécessitent les adaptations technologiques présentées ci-après.

1- Lubrification convenable des compresseurs et contrôle de la température de refoulement :

La viscosité des lubrifiants étudiés pour les usages frigorifiques est nettement insuffisante à température élevée. De plus, le frigorigène atteint au refoulement du compresseur une température bien supérieure à la température de condensation entraînant un accroissement de la température du carter qui s'accompagne d'une chute de viscosité de l'huile. La sanction de cette trop faible viscosité est la diminution de la durée de vie de la PAC (par grippage rapide des paliers et risque de destruction des pièces rotatives du compresseur). Un refroidissement extérieur du compresseur n'est pas toujours souhaitable car, d'une part il provoque une perte thermique supplémentaire qui diminue l'efficacité de la PAC et d'autre part il entraîne le risque d'une dilution importante de frigorigène dans le lubrifiant. D'où la nécessité d'adaptation du lubrifiant au niveau des températures de fonctionnement souhaitées.

2- Étude de la stabilité chimique et de la compatibilité fluide/huile à haute température :

La recherche et l'expérimentation de fluides frigorigènes et des huiles possédant les caractéristiques physiques et chimiques convenables à ce domaine de température est une nécessité. En effet, la stabilité chimique des frigorigènes en présence d'huile, des métaux et des joints composant l'installation diminue très rapidement lorsque la température augmente. Une élévation de température d'une vingtaine de degrés multiplie environ par un facteur 10 la vitesse de décomposition des frigorigènes. Des couples frigorigènes/huiles très stables dans les conditions d'emploi de l'industrie frigorifique peuvent se dégrader très rapidement s'ils sont employés dans une pompe à chaleur à haute température. L'huile entraînée dans le circuit doit donc faire preuve d'une stabilité chimique suffisante pour ne pas se décomposer en présence des catalyseurs que représentent le frigorigène et les métaux constituant l'installation (fer, cuivre, aluminium).

En conclusion, le développement des PAC THT passe obligatoirement par la recherche de fluides frigorigènes et de lubrifiants présentant les caractéristiques thermodynamiques et chimiques requises pour des fonctionnements à haute température. On notera néanmoins une piste alternative dans le développement des compresseurs sans huile (palier magnétique).

7.2 L'encrassement des échangeurs

En général, l'encrassement des échangeurs est un problème majeur pour l'utilisation des PAC pour la récupération d'énergie sur des effluents industriels. Le phénomène d'encrassement se produit à la longue, par l'accumulation sur les surfaces d'échange des

dépôts laissés par le passage des effluents liquides formant ce qu'on appelle un biofilm. Il peut s'agir de résidus, de dépôts minéraux ou résultants de la corrosion chimique.

Les applications potentielles de la pompe à chaleur dans l'industrie sont confrontées à l'incertitude de pouvoir récupérer efficacement la chaleur au niveau de l'évaporateur. Les effluents industriels possédant des propriétés mal connues, un travail de caractérisation de ces fluides est nécessaire ainsi que la connaissance des technologies d'échangeur permettant de les traiter.

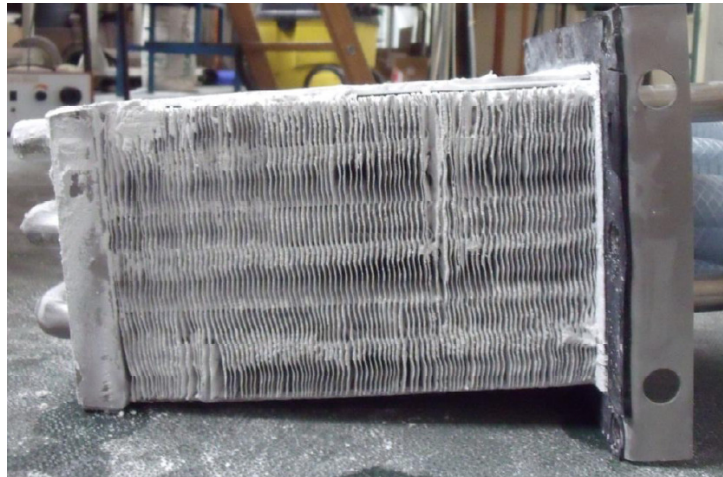


Figure 21 : Échangeur GEA pour le projet ALTER ECO suite à un fonctionnement en milieu encrassant pendant un mois

Pour résoudre ce problème, le contrôle de la croissance du biofilm dans les canaux de passage des effluents de l'évaporateur est indispensable pour la fiabilité et l'efficacité de cet échangeur ainsi que d'autres types d'encrassement, cela passe donc soit par des systèmes de détection ou alors de désencrassement efficace. Le lecteur pourra se référer à la fiche n°1 concernant les échangeurs de chaleurs qui reprend ces problèmes avec plus de détails.

7.3 La pompe à chaleur Vuilleumier

La pompe à chaleur Vuilleumier est alimentée au gaz naturel (ou alors par des rejets haute température) (figure 22). Cette pompe à chaleur fonctionne selon le principe d'un cycle calorifique thermique au gaz à régénération comme pour le cycle de Stirling. L'hélium, gaz inerte respectueux de l'environnement, est utilisé comme fluide de travail.

Le cycle de Vuilleumier se fonde sur un brevet octroyé en Amérique, en 1918, à Rudolph Vuilleumier. La particularité de ce processus est basée sur le fait qu'il est possible d'utiliser deux sources de chaleur à des températures différentes. La "mise en marche" du cycle mono-étagé s'effectue au moyen d'un brûleur gaz et un échangeur de chaleur qui, par exemple, extrait la chaleur de l'air extérieur, est utilisé comme seconde source de chaleur. Même lorsque les températures extérieures sont à -20 °C, il est possible d'obtenir des températures de départ jusqu'à 75 °C. Par conséquent, la pompe à chaleur Vuilleumier peut être installée dans un parc immobilier. Selon les exigences du système, des rendements normalisés (comparables avec le rendement normalisé des chaudières) ont été mesurés jusqu'à 162% dans des installations pilotes.

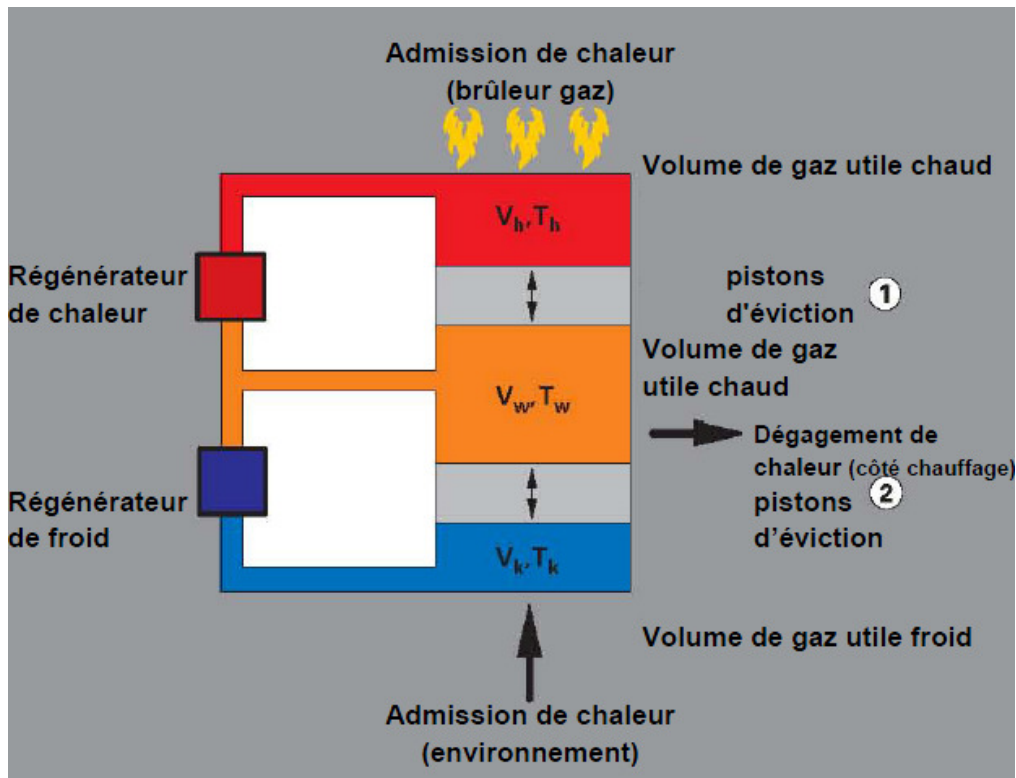


Figure 22 : Principe de fonctionnement d'une PAC Vuilleumier

Des systèmes actuellement en cours de développement, indiquent que des économies sur les ressources énergétiques primaires peuvent atteindre 44% comparée à la technique de la chaudière mixte à condensation à gaz. En principe, les pompes à chaleur Vuilleumier développent une puissance thermique comprise entre 15 et 45 kW. Des prototypes pour des essais de laboratoire ont déjà été conçus avec une puissance de 33 kW.

Si les conditions économiques de base le permettent, le perfectionnement pour la production en série pourrait être terminé d'ici quelques années. Du point de vue énergétique, la pompe à chaleur Vuilleumier comparée à la pompe à chaleur d'absorption et de compression représente une alternative avantageuse.

7.5 Les PAC au CO₂

L'évolution des normes environnementales sur les gaz à effet de serre oblige à trouver des solutions de remplacement aux fluides employés dans les installations frigorifiques et pompes à chaleur. Le CO₂ est un fluide frigorigène reconnu pour ses propriétés thermodynamiques et environnementales intéressantes. Il possède une température critique basse (31°C) qui force à opter pour un fonctionnement en cycle transcritique du cycle à compression de vapeur. La phase de condensation est alors remplacée par un refroidissement de CO₂ supercritique

Plusieurs problèmes scientifiques et techniques sont liés à l'utilisation du CO₂:

- L'adaptation des méthodes de dimensionnement des échangeurs au CO₂ demande une compréhension des spécificités des mécanismes de transfert thermique aussi bien en évaporation qu'en refroidissement supercritique.

- Les pressions de fonctionnement élevées nécessitent la conception de composants mécaniquement fiables, tout en conservant des performances élevées, comme pour les échangeurs thermiques, ce qui favorise les échangeurs de type compact.

-La régulation du cycle est spécifique, la pression de refoulement étant un paramètre d'optimisation des performances.

-Le développement de compresseurs efficaces et fiables est nécessaire pour l'optimisation du cycle de base.

-Enfin, la recherche d'un cycle optimisé, intégrant des organes dopant l'efficacité énergétique d'une machine CO₂ est primordiale (compresseur de Voorhess, éjecteur, micro-turbine et détendeurs évolués pour la récupération de travail,...).

Plusieurs laboratoires de recherche travaillent au développement de connaissances et de technologies autour du CO₂, aussi bien sur les aspects thermiques que sur l'optimisation du cycle transcritique au CO₂.

L'objectif d'un développement à moyen terme (5 à 10 ans) nécessite une recherche de compacité de tous ses composants, et en particulier le développement de compresseurs adaptés, l'étude de cycles optimisés, particulièrement efficaces du point de vue énergétique et enfin la mise en place de bancs d'essai de composants échangeurs et PAC

9. Conclusions

A l'heure actuelle, les différents constructeurs sont en mesure de pouvoir fournir des pompes à chaleur à haute températures à 100°C. Néanmoins, le gap entre PAC HT et THT est tel que les actions de recherche technologique sont nécessaires. Des projets ambitieux comme ALTER ECO et PACO sont en cours et des démonstrateurs industriels devraient voir le jour dans les mois qui arrivent. Les attentes sont réellement fortes au vue des enjeux énergétiques.

10. Bibliographies

[1] **DUPONT Maxime; SAPORA Eugenio - EDF R&D** – The heat recovery potential in the French industry: which opportunities for heat pump systems? - ECEEE 2009 SUMMER STUDY – p. 1115-1123

[2] **AUZENET Éric; CLERC-RENAUD Michel** - Pompes à chaleur - Systèmes à compression de vapeur - TI BE 9620 - 10 juil. 2005

[3] **AUZENET Éric; CLERC-RENAUD Michel** - Pompes à chaleur - Applications et systèmes particuliers - TI BE 9621 - 10 janv. 2006

[4] **ASSAF Khattar** -Intégration d'une pompe à chaleur dans un procédé agroalimentaire - Simulation, expérimentation et intégration – Thèse ENSMP – Décembre 2010

[5] **Article de Jean-Louis Peureux – EDF R&D** - Pompes à chaleurs hautes températures : enjeux et perspectives - paru dans Revue Générale du Froid & du conditionnement d'air – revue officielle de l'association française du froid n°1116 – Septembre 2011.

Site web :

www.bitzer.de

www.energieplus-lesite.be

www.viessman.com

www-liten.cea.fr

EXPERIENCES A BAS
NIVEAU DE
TEMPERATURE

ANNEXE 13

La cogénération de la Ville de Saint-Félicien au Canada



A travers l'implantation d'une unité de cogénération, la Ville de Saint-Félicien au Canada a élaboré un réseau pour favoriser l'émergence d'une démarche d'écologie industrielle.

Cette unité de cogénération de 25 MW a comme combustible les déchets des industries forestières. Elle vend son électricité à Hydro-Québec, mais également de la vapeur à Bowater pour alimenter des séchoirs à bois.

Elle fournit aussi gratuitement, dans le cadre d'un accord avec la ville de Saint-Félicien, de l'eau chaude provenant du circuit de refroidissement du condenseur au parc agro-thermique situé à proximité. Cette source d'énergie thermique est mise à disposition d'entreprises de productions agricoles pour le chauffage de serres et d'entreprises de transformation agroalimentaire et agro-industrielles utilisant des procédés faisant appel au séchage ou au chauffage (séchage de fruits, légumes, foin, tourbe et rouissage à l'eau chaude de lin et de chanvre textile).

Les entreprises clientes se connectent alors à des «bornes thermiques» par le biais d'échangeurs thermiques passifs pour s'alimenter en eau chaude. L'eau de refroidissement du condenseur est ainsi refroidie par les entreprises clientes puis retournée à la cogénération. La circulation de l'eau se fait par une station de surpression de façon à respecter les contraintes d'opération de l'unité de cogénération. L'intégration énergétique permet la valorisation d'une énergie thermique résiduelle par des entreprises. Sans ce réseau, l'unité de cogénération devrait payer pour dissiper cette énergie thermique résiduelle dans l'atmosphère au moyen d'aéro-réfrigérants à tirage forcé.

L'eau de refroidissement du condenseur une fois refroidie est renvoyée vers l'unité de cogénération.

Pour une unité de cogénération de 25 MW, le potentiel thermique qui peut être valorisé de cette façon est de 39 millions de Kcal/heure. Cette valorisation énergétique, si elle était faite avec du gaz naturel, coûterait 15 millions de \$ par année.

Pour les entreprises clientes, la mise en place du réseau d'eau chaude représenterait des économies annuelles de frais de chauffage de l'ordre de 60 à 80 %. Les immobilisations supplémentaires rendues nécessaires par l'implantation de réseaux de chauffage à basse température sont rentabilisées en 24 à 36 mois.

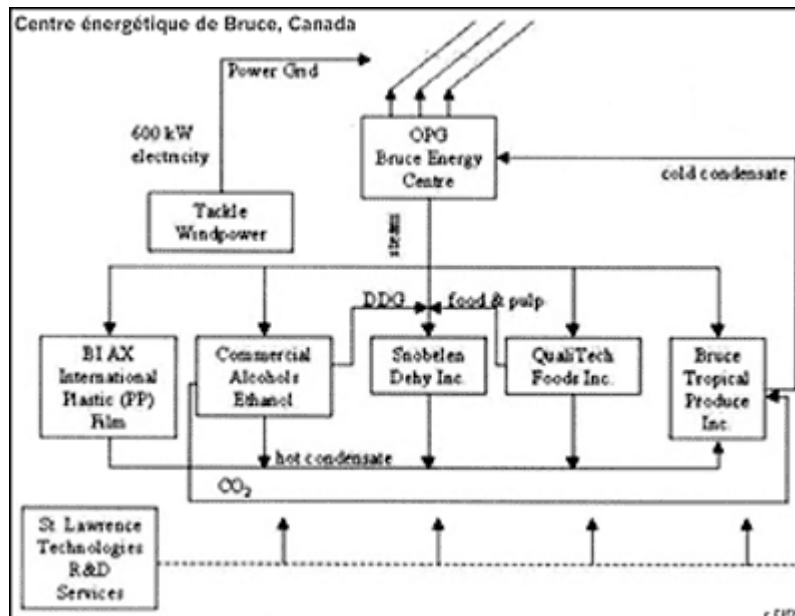
La réalisation de ce projet s'est fait dans le cadre de la démarche des Enviroclub menée par Environnement Canada.

Source : <http://www.ecoparc.com/ecologie-industrielle/cogeneration-saint-felicien>

ANNEXE 14

Le Centre énergétique de Bruce

Le Centre énergétique de Bruce à Tiverton en Ontario au Canada développe un réseau d'échange d'énergie et de résidus. Pour ce faire, la centrale nucléaire de Bruce lui fournit de l'électricité, de la vapeur, de l'eau et des solutions de traitement des rejets liquides.



Les six entreprises de ce réseau ont été sélectionnées en fonction des synergies potentielles.

- Commercial Alcohols Inc. : utilise la vapeur pour la fermentation et la distillation de produits agricoles en éthanol. Le dioxyde de carbone généré est utilisé par Bruce Tropical Produce Inc. pour la culture des tomates.
- Snobelen Dehy Inc. (fabriquant de nutriments pour chevaux) : utilise la vapeur pour la déshydratation. Certains résidus de production de Commercial Alcohols et QualiTech Foods Inc. sont intégrés dans des produits que fabrique Snobelen Dehy Inc.
- QualiTech Foods Inc. : utilise la vapeur pour concentrer de nombreux produits comme les jus de pommes et de fruits ou la sauce tomate.
- BI-AX International Inc. : utilise la vapeur pour chauffer le polypropylène qui rentre dans la production de films plastiques,
- Bruce Tropical Produce Inc. : utilise de la vapeur de moins bonne qualité pour le chauffage de ses serres. Ce qui lui permet de réutiliser la vapeur des autres entreprises du réseau. Une fois sa vapeur condensée,
- St. Lawrence Technologies Inc. (un centre de recherche) : apporte des solutions techniques nécessaires au développement de synergies au sein du réseau.

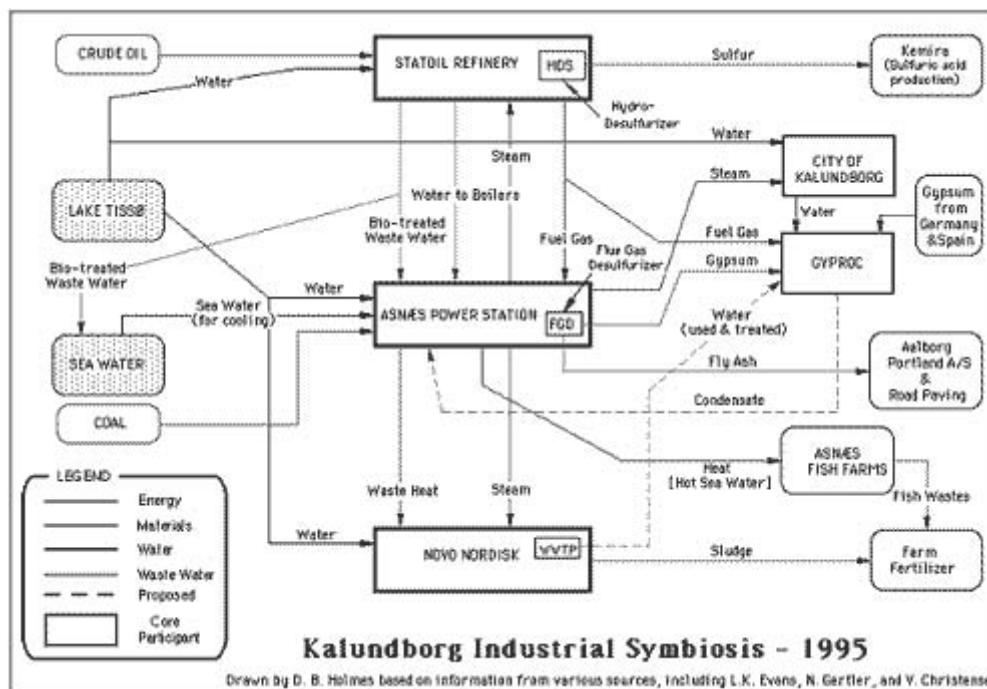
Source : <http://www.ecoparc.com/ecologie-industrielle>

ANNEXE 15

Kalundborg

Interview de Jorgen Christensen, écologie industrielle, Consultant pour l'Institut de la symbiose Kalundborg Danemark depuis 1990, réalisé par Jean-François Vallès Synopter dans le cadre du reportage *De idées pour l'entreprise de demain 2001* (www.ecolindus.net).

La symbiose industrielle est un phénomène qui s'est développé durant plusieurs décennies et qui fonctionnent encore. C'est un réseau environnemental et de ressources qui a émergé ici à Kalundborg, entre quatre entreprises et une collectivité. L'idée était d'économiser des ressources et de créer un avantage au niveau de l'environnement.



Ce n'est pas une organisation qui a été planifiée. Elle s'est formée toute seule. Le nom "symbiose industrielle" a été créé bien plus tard, lorsque nous avons réalisé que l'organisation que nous avons là n'était pas courante et que nous pouvions l'utiliser dans d'autres thématiques et d'autres lieux pour le bénéfice de tous.

La coopération n'a rien d'extraordinaire, c'est juste du bon sens. Quand deux entreprises ont commencé à penser que la réutilisation des déchets d'une entreprise serait une chose smart.

Les partenaires sont : Asnaevaerket, une usine de production d'électricité au charbon, la plus grande du Danemark, la raffinerie Statoil, la plus grande aussi du Danemark, Gyproc qui fabrique du placoplâtre et d'autres matériaux de construction, Novo Nordisk qui est une société pharmaceutique, et la ville de Kalundborg comme prestataire de services et fournisseur d'électricité et d'eau. Récemment deux entreprises ont rejoint le réseau de symbiose.

Le réseau a commencé quand la raffinerie a été localisée ici au début des années soixante. Une raffinerie a besoin de grandes quantités d'eau pour le refroidissement. L'eau ne pouvait pas être prise dans le système classique. Il y a eu un accord entre Statoil et la collectivité pour la mise en place d'un système d'acheminement de l'eau d'un lac. Ses besoins ont augmenté et ils ont cherché alors de nouvelles sources d'approvisionnement. Elle a ainsi développé des échanges avec trois autres entreprises.

Un autre projet est apparu au début des années soixante-dix, Gyproc, l'usine qui fabrique du Placoplâtre, utilisait beaucoup d'énergie pour le chauffage du gypse et du plâtre. Ils se sont demandés s'ils ne

ANNEXE 15

pouvaient pas utiliser les excès de gaz de la raffinerie comme source d'énergie pour le processus de séchage. Cela n'avait jamais été fait, mais ils ont contacté la raffinerie. La raffinerie, curieuse, les a laissés faire. Ils ont installé un pipeline et commencé à utiliser cet excès de gaz.

Petit à petit les coopérations entre les entreprises se sont développées. En 1998, il y a eu un des plus grands projets : la fourniture de vapeur entre l'usine de production électrique et la raffinerie et Novo Nordisk. Ces deux derniers avaient tous les deux des chaudières pour produire leur propre vapeur. Cela paraissait un peu étrange qu'une vapeur de bien meilleure qualité puisse être fournie par une usine de production électrique. Cette idée a été une première fois rejetée car des règles et des lois interdisaient ces échanges.

Mais après la crise énergétique du milieu des années soixante-dix, il y a eu un changement de paradigme. Les compagnies d'électricité évoluaient de fournisseur d'électricité à fournisseur d'énergie. Et le gouvernement a encouragé ce genre d'initiative et a donc délivré l'autorisation de vendre de la vapeur. Cela a donné lieu à un superbe projet qui dure maintenant depuis vingt ans. La fourniture de vapeur a toujours été de bonne qualité. Elle est transportée par des pipelines de 3 kilomètres. Les travaux ont été faits en même temps que la collectivité qui agrandissait son réseau de chauffage central. La collectivité profita donc aussi de cette fourniture de chaleur. Il y avait trois gros pipelines : deux pour l'eau de chauffage et un pour la vapeur. Actuellement, ils installent un nouveau pipeline car la capacité est dépassée.

La symbiose s'est principalement intéressée à trois domaines : optimiser l'utilisation de l'eau, économiser de l'énergie et réutiliser les déchets. Il y a environ huit projets qui existent dans le domaine de l'eau. Par exemple, quand la raffinerie utilisait de l'eau de refroidissement, de l'eau du lac, elle la rejetait après dans une rivière. L'usine de production d'électricité a émis l'idée de réutiliser cette eau de refroidissement. Même si elle était un peu chaude, ils pouvaient l'utiliser. Ils ont économisé de l'eau en mettant un pipeline entre l'usine de production d'électricité et la raffinerie. Le fait que l'eau soit un peu chaude était un avantage pour son traitement. En effet, une usine de production d'électricité doit utiliser de l'eau très propre. Ils la nettoient jusqu'à un très haut degré de pureté. Cela est facilité par la température de l'eau. Parfois, la raffinerie a besoin de traiter son eau de refroidissement. A l'usine de production d'électricité, ils se sont aperçus que dans ces cas-là, l'eau était tellement propre qu'ils pouvaient s'en servir pour des usages techniques comme le nettoyage des véhicules. Ce qui a porté cette démarche, c'est de faire les choses Smart, de faire des échanges intéressants au niveau économique. Et au même moment, nous nous sommes aperçus que nous pouvions protéger l'environnement en économisant des ressources. Vous entendez régulièrement les gens dirent que l'environnement coûte de l'argent, mais pas ici. Tous les projets ont été réalisés dans une approche gagnante-gagnante dans le sens où ils n'ont pas dépensé d'argent mais au contraire en ont gagné ou économisé. Nous avons fait des calculs, ce qui est assez complexe sur un projet comme celui-ci et une période de vingt ans. Il apparaît que toutes les entreprises ont gagné ou économisé de l'argent. Le retour sur investissement est d'environ quatre ou cinq ans pour les projets importants et sinon de deux ans. Certains échanges ont déjà été arrêtés car ils n'étaient plus rentables ou remplacés par une évolution technologique. La principale caractéristique de ce projet c'est la spontanéité. Les entreprises ont compris par elles-mêmes qu'elles avaient intérêt à coopérer. Cela requière un peu de confiance. Les personnes doivent se connaître. Ces échanges ne peuvent être organisés ou forcés par une organisation nationale. Par contre, vous pouvez influencer sur les chances d'aboutir par différents systèmes d'aide. Au début nous nous sommes beaucoup intéressés à la technique, mais nous nous apercevons que le plus important c'est que les gens restent en contact. C'est peut-être pour cela que tout a commencé à Kalundborg, une petite ville de 20 000 habitants. Si les grandes entreprises étaient implantées dans une grande ville, les dirigeants ne se seraient pas connus à l'inverse d'un petit village. Dans une grande ville, nous n'aurions pas eu l'idée de dialoguer ensemble. Quand vous avez commencé à communiquer et à réaliser un premier projet avec une entreprise. Après vous allez chercher à développer d'autres coopérations. Chaque coopération génère automatiquement d'autres idées pour des coopérations. Quand nous avons perçu le potentiel de cette organisation, nous avons commencé à échanger de manière plus structurée afin de trouver de nouveaux échanges. La moitié des projets ont été réalisés durant cette période. Beaucoup de personnes ont commencé à s'intéresser à notre démarche et ont désiré venir visiter. Afin de rationaliser cela et économiser du temps, nous avons créé un petit institut de la symbiose qui emploie une personne.

ANNEXE 15

Les gens nous demandent souvent si nous ne sommes pas enfermés dans une structure trop rigide. Théoriquement vous vous engagez dans la durée quand vous faites des investissements entre deux entreprises. Cela signifie que vous avez une certaine visibilité. Mais dans la pratique cela n'est pas un problème. Prenons l'exemple de la vapeur. Si vous achetez votre vapeur à un fournisseur unique au lieu de la produire vous-même. Bien sûr vous prenez le risque que la compagnie ferme. Mais dans la pratique il y a peu de chance qu'une grosse usine de production d'électricité, comme celle de Kalundborg, ferme avant plusieurs années. Toutes les actions sont basées sur des contrats commerciaux ordinaires. Vous avez des clauses dans le cas de la fin de coopération qui permettent d'avoir le temps de trouver un autre fournisseur. Dans beaucoup de cas, vous serez capable de refaire ce que vous faisiez avant le projet. Le degré de dépendance que nous avons introduit n'est donc pas un problème.

Quand vous faites un projet vous avez besoin de beaucoup communiquer pour trouver des solutions, pour faire l'engineering, pour commencer à le faire fonctionner. Après un certain temps, le process fonctionne par lui-même et vous communiquez moins. Nous nous sommes aperçus qu'après plusieurs années, il n'y avait plus de besoin de communiquer autant. Ce qui ne favorise pas l'apparition de nouvelles idées. Le temps introduit un autre problème : les personnes qui se sont impliqués dans ce projet commencent à vieillir. Tous les anciens patrons des entreprises dans les années quatre-vingt sont actuellement à la retraite. Nous avons eu un changement de génération. Cela signifie que la nouvelle génération de managers et d'employés doit être informée et formée. L'Institut de la symbiose organise ainsi des rencontres entre les différents acteurs.

Nous travaillons sur d'autres sujets en plus de l'environnement. Si vous coopérez pour l'environnement, vous cherchez à coopérer sur d'autres thématiques : la formation, la sécurité, les ressources humaines. Cela devient fréquent. Les entreprises, ainsi que la collectivité, ont compris qu'il y avait un potentiel à travailler ensemble.

Source : <http://www.ecoparc.com/ecologie-industrielle>

PROJET ALTERECO. VALORISATION ENERGETIQUE DES REJETS A BASSES TEMPERATURES

INTRODUCTION

Depuis octobre 2008 a démarré le Projet ALTERECO : il s'agit d'un projet de Recherches et Développement innovant dans la maîtrise de l'énergie qui a été labellisé par le Pôle de Compétitivité AXELERA de la Région Rhône-Alpes et qui est subventionné par l'Etat (FUI) et les collectivités locales de la Région (Grand Lyon, Conseil Général de l'Ain et Conseil Général du Rhône). Le budget total des dépenses prévues est voisin de 6,2 M€.

La construction de ce Projet a été animée par le CEREN, tandis que la coordination de son déroulement est supervisée par la société ARKEMA.

Il regroupe 13 partenaires industriels et scientifiques bien complémentaires :

- Des industriels : ARKEMA, CIAT, DANFOSS, EDF, EMIN-LEYDIER, GEA-ERGE-SPIRALE, RHODIA
- Des Centres Techniques : CETIAT, CTP, ITERG
- Des organismes scientifiques : CEREN, CEALITEN et GRETH

PRESENTATION DU PROJET ALTERECO

Objectifs : il s'agit essentiellement de recenser toutes les techniques existantes ou émergentes et d'amorcer le développement de nouvelles technologies permettant de valoriser le contenu énergétique des rejets à bas niveaux thermiques (RBT) qui sont produits par les activités humaines, notamment industrielles.

Contexte et débouchés du Projet ALTERECO :

On estime que plus de 40 TWh/an pourraient être récupérés par valorisation des rejets à bas niveaux thermiques produits par l'industrie française. A elle seule, une technologie de pompe à chaleur à très haute température permettrait de valoriser efficacement plus de la moitié de ce gisement, comme le montre le diagramme ci-après de la Figure 1.

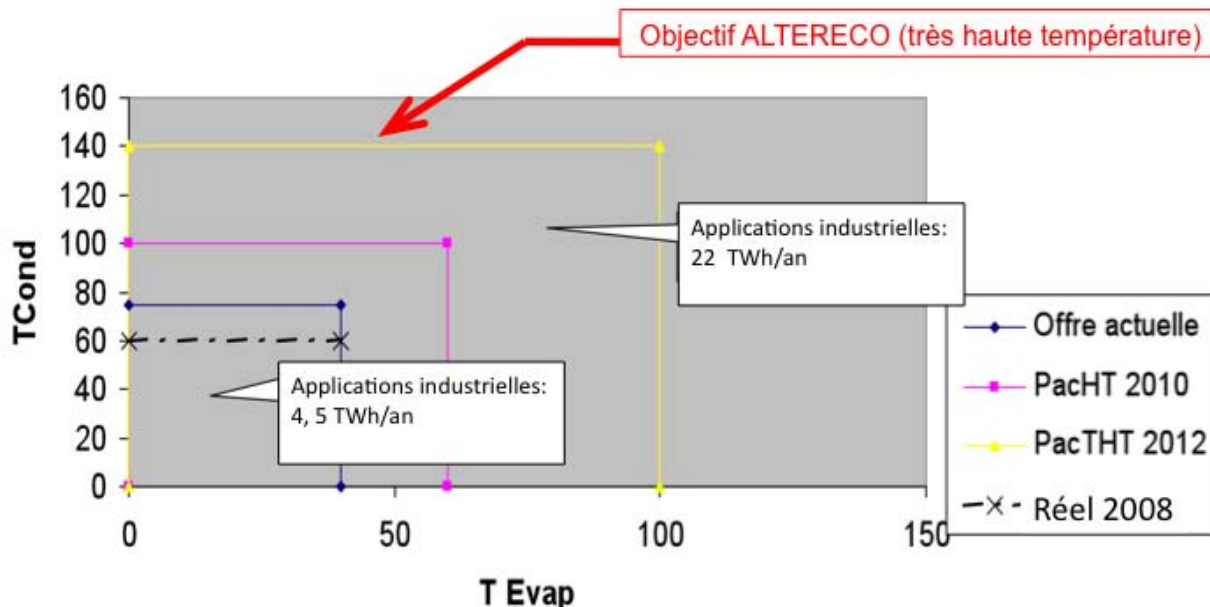


Figure 1 : Potentiels d'applications industrielles des pompes à chaleur en fonction de leurs domaines de températures à l'évaporateur et au condenseur (source EDF)

Les premiers résultats montrent d'ailleurs que certains sites industriels pourraient devenir autonomes en énergie par la simple utilisation de cette technologie¹.

Par ailleurs les problèmes d'encrassement limitent considérablement les possibilités de récupérations énergétiques, notamment dans les industries papetières et agro-alimentaires : s'attaquer à ces questions est donc une priorité ambitieuse d'un enjeu très important.

Enfin, le stockage de l'énergie est un domaine curieusement encore peu développé dans le domaine de températures visé par le Projet, en dépit de ses applications potentielles énormes : car les cas où il n'y a pas simultanéité entre la disponibilité des ressources et le besoin énergétique sont en effet légion.

Les inventaires énergétiques réalisés chez les partenaires industriels du Projet montrent une chose intéressante : avec les techniques classiques existantes, les sites sont généralement bien optimisés énergétiquement. Pour aller plus loin, il est nécessaire de développer la valorisation des RBT, objet du présent Projet.

Actions principales du Projet ALTERECO :

Elles découlent des constats précédents. Elles consistent à :

- Développer en particulier trois nouvelles technologies efficaces : pompe à chaleur à haute/très haute température, maîtrise de l'encrassement des échangeurs, utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage/transport de l'énergie.
- Faire une estimation technico-économique de la faisabilité de la récupération énergétique des RBT.
- Fournir une grille technico-économique d'aide au choix des technologies à utiliser pour chaque cas de récupération.

Dates : projet démarré en octobre 2008, se terminant en octobre 2011

Organisation : le Projet est organisé en trois parties complémentaires qui font sa cohérence et sa force.

1. **En amont** : inventaires de RBT sur les sites des partenaires industriels (chimie, papeterie, corps gras), puis études technico-économiques de valorisation de ces RBT à l'intérieur ou à l'extérieur des sites afin de justifier ces opérations. Un inventaire des freins à la valorisation externe des RBT doit également être réalisé.

2. **Recherches** : trois technologies innovantes sont développées dans le cadre du Projet

a. Développement d'une pompe à chaleur à haute/très haute température :

- recherche d'un nouveau fluide frigorigène adapté (évaporation de 40 à 90°C ; condensation de 90 à 140°C) ; à cet égard, Arkema a développé des fluides tout à fait adaptés à ces besoins, qui à la fois respectent les contraintes thermiques et satisfont de sévères critères environnementaux.

- conception et installation d'une pompe à chaleur pilote, pour tests de validation au Centre de Recherches EDF des Renardières ;

- déplacement du pilote sur sites industriels pour démonstration et validation en conditions réelles.

b. Maîtrise de l'encrassement des échangeurs

Il est très fréquent que des RBT ne soient pas valorisés du fait de leur caractère encrassant. Le but de cette étude est de rechercher le type et le design optimaux d'échangeur et de développer un moyen de contrôle en ligne de l'encrassement sur deux flux industriels encrassants, l'un en phase gazeuse, l'autre en phase liquide. Il s'agit ici d'établir des bases scientifiques solides et généralisables d'une méthodologie de gestion des problèmes d'encrassement.

La Figure 2 ci-après illustre un exemple de tests d'encrassement réalisés par le CEA/LITEN sur un cas industriel simulé sur un échangeur maquette développé par GEA-ERGE SPIRALE

¹ : cela contribuerait également à accroître le gisement initial des 40 TWh/an

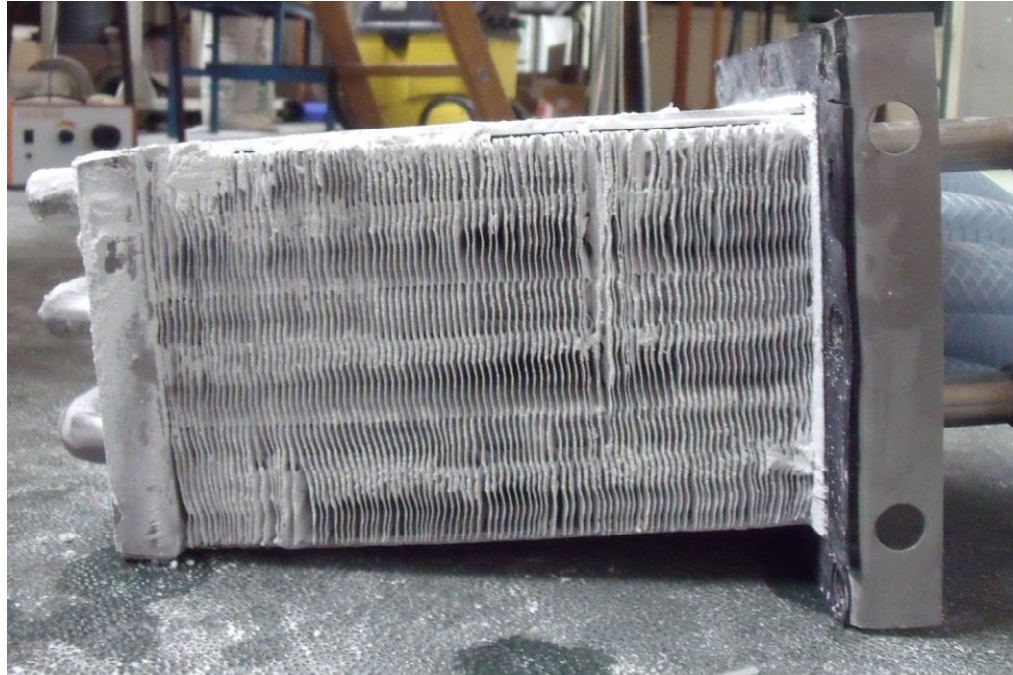


Figure 2 : Maquette GEA/ERGE-SPIRALE testée sur un cas industriel par le CEALITEN, après un mois d'encrassement

c. Stockage d'énergie par matériaux à changement de phase

Il est également très fréquent qu'il n'y ait pas adéquation entre la disponibilité de la ressource énergétique (RBT à valoriser) et le besoin local : une façon d'y parvenir est donc de stocker l'énergie. Le Projet vise à proposer des solutions de stockage utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) dont les températures de transition sont adaptées aux problématiques de valorisation des RBT, c'est à dire entre 40 et 150°C, domaine actuellement peu ou non couvert par les recherches sur les MCP, donc innovant. Cette étude utilise les compétences particulières du Laboratoire TREFLE de Bordeaux pour la caractérisation, le choix et la mise en œuvre de nouveaux MCP.

3. **En synthèse** : établissement d'une grille technico-économique d'aide au choix de la meilleure technique à utiliser pour valoriser un RBT donné. Cette grille constituera la synthèse du recensement de toutes les techniques existantes et émergentes de valorisation énergétique, des résultats des recherches mentionnées ci-dessus, et des expériences industrielles en matière de faisabilité technico-économique des RBT inventoriés.

CONCLUSION

Le Projet ALTERECO est un projet très ambitieux, qui répond à une demande encore peu explorée : comment rehausser et utiliser la valeur énergétique de rejets à basses températures aussi bien sur les sites industriels que dans le Résidentiel et le Tertiaire.

Ce Projet fait appel à un large éventail de compétences qui sont couvertes par la diversité des partenaires académiques et industriels réunis en son sein, chacun expert dans l'un des domaines requis par les objectifs visés.

Les premiers résultats obtenus démontrent que son organisation est très cohérente et que les objectifs fixés sont justifiés.

ETUDES DE CAS



**PROCÉDES DE RÉCUPÉRATION / VALORISATION DES ÉNERGIES
À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE
ÉTAT DES CONNAISSANCES**

**FICHE N°1 :
ETUDE DE CAS DE LA VALORISATION D'ENERGIE THERMIQUE
BASSE TEMPERATURE SUR LES UVE**



Sommaire

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS.....	3
2. DESCRIPTION DE L'UVE ETUDIEE	4
3. ETUDE DU CAS DE RECUPERATION DE CHALEUR DES FUMÉES EN TRAITEMENT SEC.....	5
3.1. OU EFFECTUER UNE RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE ?	5
3.2. LES LIMITES DE LA RECUPERATION DE CHALEUR SUR LES FUMÉES EN POST-TRAITEMENT.....	7
3.3. COMMENT RECUPERER CETTE ENERGIE THERMIQUE ? QUELLES TECHNOLOGIES D'ECHANGEUR SONT A FAVORISER ?	8
3.4. QUELLE QUANTITE D'ENERGIE EST-IL POSSIBLE DE VALORISER ?	20
3.4.1 Hypothèse 1: Refroidissement de 180 °C à 135 °C.....	22
3.4.2 Hypothèse 2: Refroidissement de 180 °C à 90 °C.....	23
3.5. ENCOMBREMENT ET CONTRAINTES D'EXPLOITATION.....	24
3.6. ANALYSE FINANCIERE.....	31
4. CONCLUSIONS	37
5. ANNEXE : METHODE ET EVALUATION DU PRIX D'UN ECHANGEUR TYPE BATTERIES A AILETTES	40



1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

Dans le cadre de l'étude des procédés de récupération/valorisation des énergies à bas niveau de température, la valorisation des thermies contenues dans les rejets gazeux provenant des usines de traitement thermique des déchets (UVE : Unité de Valorisation Energétique) est un vecteur possible pour maximiser leur efficacité énergétique.

Dans un premier temps, nous rappelons les différentes sources d'énergie valorisable présentes au sein des UVE. Par la suite, l'étude d'applicabilité est focalisée sur les rejets thermiques des fumées en post-traitement, ce qui correspond au plus grand gisement de chaleur récupérable en continu.

Cette étude requiert également l'analyse de l'intégration fonctionnelle des différentes technologies d'échangeurs de chaleur disponibles pour valoriser ce potentiel énergétique.

Nous présentons dans ce document l'analyse distincte des deux hypothèses suivantes :

Cas d'Etude:

Etude de la récupération de chaleur sur les fumées d'incinération avec un traitement sec

- Hypothèse 1 Valorisation thermique de la chaleur sensible (au-dessus du point de rosée acide) des fumées en prétraitement ou post-traitement suivant l'installation en place.
- Hypothèse 2 Valorisation thermique de la chaleur sensible et latente (au-dessus et en-dessous du point de rosée acide => condensation) des fumées en post-traitement. La condensation permettant une plus grande récupération d'énergie (grâce à la forte enthalpie de changement de phase) et une diminution du panache visible à la sortie cheminée en substitution de l'utilisation d'un brûleur gaz (actuellement imposée sur certaines installations en milieu urbain).

Pour chacune de ces études, nous effectuons une analyse portant sur la production d'énergie, les technologies utilisées, l'encombrement, les contraintes d'exploitation et de coût.

2. DESCRIPTION DE L'UVE ETUDIEE

Dans la suite de cette fiche, l'ensemble des calculs et analyses sont effectués pour une UVE possédant les caractéristiques suivantes :

Quantité de déchet annuelle traité :	100 000 t/an – PCI de 2300 kcal/kg
Capacité nominale des fours :	12,5 t/h
Puissance nominale des fours :	33 282 kW _{PCI}
Disponibilité :	8 000 h
Débit de fumée sur sec :	5 250 Nm ³ /tonne de déchet (11% d'O ₂)
Humidité :	18%

Egalement nous prendrons en compte d'autres données relatives au calcul de la production d'énergie thermique tels que :

- ✓ Le débit des fumées au nominal : 65 625 Nm³/h
- ✓ Capacité thermique volumétrique des fumées: 1.26 kJ/m³.K
- ✓ L'ensemble de propriétés thermo-physiques des fumées (masse volumique, conductivité thermique, viscosité...)
- ✓ La température de rosée (ou point de rosée acide) ≈ 130°C

3. ETUDE DU CAS DE RECUPERATION DE CHALEUR DES FUMÉES EN TRAITEMENT SEC

3.1. OU EFFECTUER UNE RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE ?

L'objectif de cette partie est donc de déterminer le lieu d'une implantation pertinente de l'échangeur de chaleur.

- **Etude des gisements de chaleur non exploités**

En premier lieu, nous inventorions les différents gisements de chaleur non exploités au sein d'une UVE (cf. partie 2.2 du rapport). Afin de déterminer le potentiel énergétique de ceux-ci, il est important de connaître les débits et les gammes de température mis en jeu, ainsi que, dans une moindre mesure, le temps de fonctionnement et la capacité thermique du fluide en présence.

Gisement de chaleur	Estimation du potentiel maximum en FRANCE	Gamme de températures
Gaine des fumées	1 à 2,3 TWh	150 – 300°C
Aérocondenseur	5,95 TWh	50 – 130°C
Extracteur mâchefers	47,6 GWh	90°C
Circuit de refroidissement		20 – 80°C
Réseau condensats		30 – 80°C

Ce tableau montre le potentiel réel de la récupération de chaleur au niveau des gaines de fumées. A l'évidence, la mise en place d'un échangeur thermique est à favoriser au niveau de cette source. La suite de notre étude est focalisée sur l'implantation d'un échangeur de chaleur au niveau du conduit des rejets gazeux de combustion.

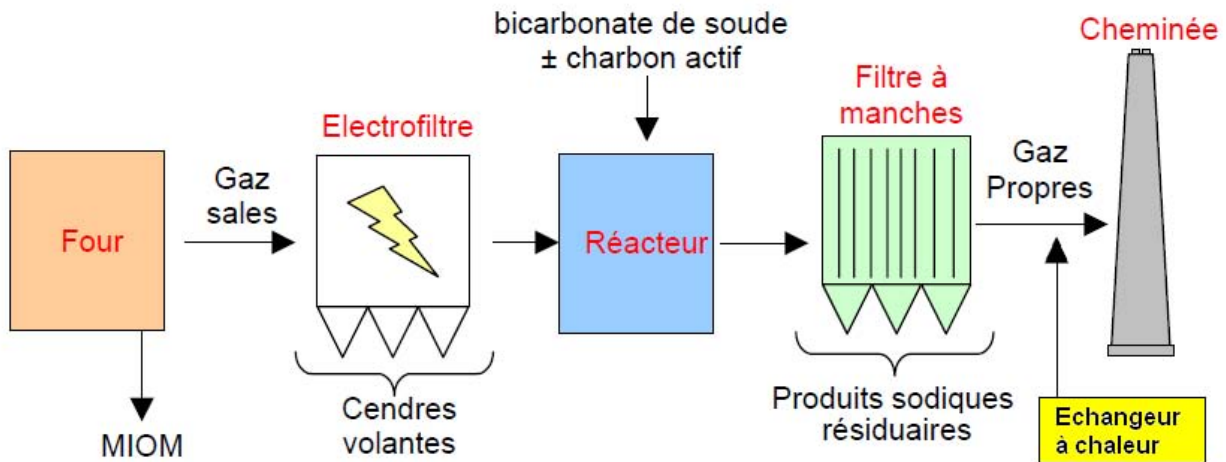
Dans cette étude de cas, nous sommes en présence d'un procédé de traitement sec pour la neutralisation des polluants en sortie de chaudière d'une UVE. Il est utile de différencier deux systèmes de traitement des fumées auquel on peut associer une position spécifique de l'échangeur à chaleur.

- **L'épuration par voie sèche avec un réactif sodique (sans refroidissement)**

Le procédé par voie sèche par réactif sodique consiste à injecter du bicarbonate de sodium (BICAR) dans les fumées.

La température optimale de fonctionnement est comprise entre 150°C et 300°C pour ce procédé (NaHCO₃).

La valeur typique de la **température des fumées en post-traitement est d'environ 180°C** et la mise en place d'une valorisation de l'énergie des fumées au niveau de cet emplacement est intéressante.



Exemple d'un procédé sec de traitement des fumées au bicarbonate (Source : Mémoire : « Les Déchets solides de l'incinération des Ordures ménagères » J. Bertholon - juin 2002)

- **L'épuration des fumées avec un réactif calcique dans un procédé sec refroidi**

Ce procédé se rapproche du traitement sec au bicarbonate. Dans la configuration étudiée ici, on procède au refroidissement des fumées dans un module situé en amont du réacteur.

Les **fumées sortant de la chaudière à 250°C** environ traversent un refroidisseur dans lequel leur température est abaissée à une valeur comprise entre 140°C et 150°C. Cet échange peut se faire de deux manières différentes :

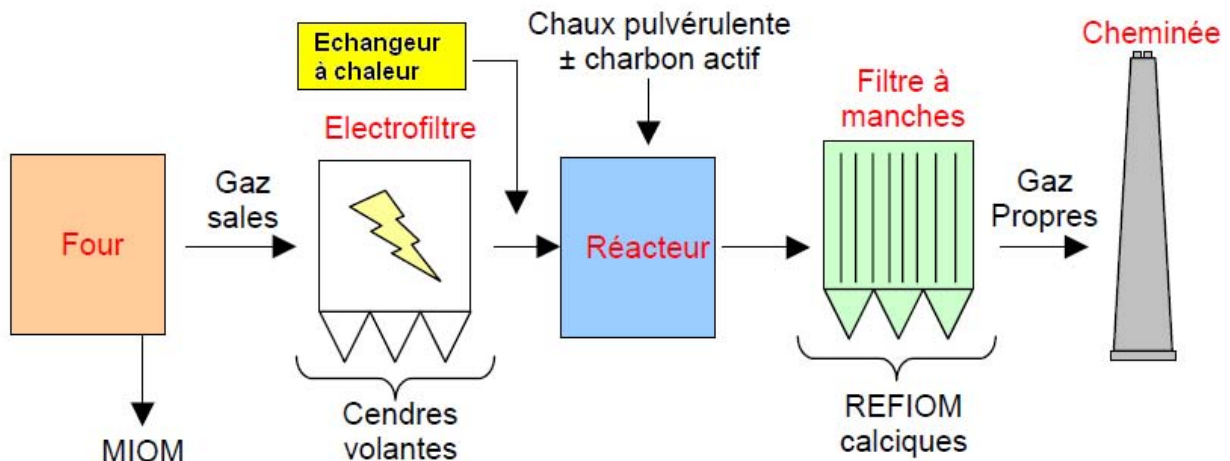
- par une pulvérisation d'eau dans une tour de refroidissement (principe quench).
- par un échangeur thermique à tubes lisses ou ailetés horizontaux à l'intérieur duquel circule un fluide de refroidissement.

C'est au niveau de cette étape qu'il est intéressant de réaliser une valorisation de la chaleur perdue par la mise en place d'un échangeur.

Pour ce type de traitement, la température des fumées post traitement s'élève à 140°C, et présente donc des conditions moins pertinentes pour une récupération d'énergie.

L'implantation d'un échangeur en amont du traitement des fumées ajoute le risque de corrosion et d'encrassement. Par conséquent, la présence d'une pré-étape de dépolluante poussée (électrofiltre) est requise. Il sera donc essentiel de prendre en compte ce facteur dans la mise en place d'un tel dispositif.

Rq : Les chaudières des UVE disposent souvent d'un économiseur qui réalise déjà une valorisation en prétraitement.



Fonctionnement du traitement sec refroidi à la chaux (Source : Mémoire : « Les Déchets solides de l'Incineration des Ordures ménagères » J. Bertholon - juin 2002)

3.2. LES LIMITES DE LA RECUPERATION DE CHALEUR SUR LES FUMÉES EN POST-TRAITEMENT

- ❖ Un des points essentiels à prendre en compte dans le cadre du refroidissement de fumées est le **point de rosée acide**. (cf. partie 2.2.1.2 du rapport)
De manière générale, la combustion des déchets d'incinération entraîne la formation d'acides, en particulier le dioxyde de soufre (SO₂). Ce dernier s'oxyde pour former du SO₃, qui se recombine avec la vapeur d'eau sous produit de la combustion pour donner de l'acide sulfurique (H₂SO₄). Le risque de condensation acide débute en dessous d'une température voisine de 130°C, appelée point de rosée acide. La condensation des fumées au niveau des parois internes des équipements, provoque alors une corrosion interne rapide et leur détérioration prématurée.
- ❖ Par ailleurs, dans le cadre des rejets gazeux en sortie de cheminée des UVE, le **panache de vapeur d'eau** émis peut être considéré comme une nuisance visuelle pour les populations environnantes. Le système anti-panache généralement utilisé consiste à la mise en place d'un brûleur à gaz afin de réchauffer les fumées avant leur éjection.



Par conséquent, nous diviserons notre étude suivant deux hypothèses distinctes :

Hypothèse N°1 : 180°C → 135°C

Refroidissement des fumées au-dessus de la température de rosée acide (130°C), ce qui limite la récupération énergétique mais ne nécessite pas l'installation d'équipement anticorrosion. Néanmoins, les températures d'entrée des fluides de refroidissement doivent être au dessus de 130 °C afin d'éviter, par la présence de point froid au niveau des parois des équipements, les risques de corrosion. Nous limitons donc le refroidissement des fumées à 135°C.

Hypothèse N°2 : 180°C → 90°C

Refroidissement des fumées en dessous de la température de condensation de la vapeur des fumées (90°C), ce qui permet une récupération de thermies plus importante et une réduction du panache blanc émanant de la cheminée, en substitution à l'utilisation d'un brûleur gaz. Cependant, ce cas demande l'utilisation d'équipements résistants à la corrosion (acier inoxydable, métaux nobles) et d'un système de récupération des condensats.

3.3. COMMENT RECUPERER CETTE ENERGIE THERMIQUE ? QUELLES TECHNOLOGIES D'ECHANGEUR SONT A FAVORISER ?

Dans cette partie, il est question, en premier abord, de la faisabilité technique du projet de récupération d'énergie à mettre en œuvre.

Cette étude est donc consacrée à la comparaison entre différents types d'échangeurs thermiques pour une valorisation de la chaleur contenue en amont de la cheminée. Nous effectuons une analyse de ceux-ci sur les aspects techniques de leur utilisation et fonctionnement, tout en prenant en considération les problématiques de compatibilité avec l'installation, de maintenance et de coût (dans la mesure du possible).

- **Type de fluides caloporteur à considérer**

Dans le cadre notre étude, nous pouvons distinguer les fluides caloporteurs suivants :

Type de fluides	Cp fluide caloporteur (en $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$)
Echangeur fumées / eau (liquide)	4,185
Echangeur fumées / huile (organique)	2
Echangeur fumées / air (sec)	1,005

Etant donnée la faible valeur du Cp de l'air, la mise en place d'un tel échangeur nécessite un débit très élevé (vitesse importante comprises entre 10 et 20m/s) ainsi qu'un échangeur de taille importante.

Comparé à un échangeur fumée/eau, l'utilisation de l'huile permet d'assurer une plus grande stabilité de fonctionnement de l'installation. Toutefois, son utilisation est à manier avec précaution. En effet, il s'agit d'un fluide visqueux, qui en cas de fuite peut provoquer des problèmes importants comparé à l'utilisation de l'eau.

Par conséquent, l'usage de l'huile n'est pas recommandé dans le cas d'un échangeur placé en gaine de prétraitement.

Caractéristiques techniques importantes à prendre en compte:

- ✓ L'encrassement : la fumée est un fluide chargée susceptible de boucher l'échangeur
- ✓ L'absence de point froid (notamment pour l'hypothèse 1)
- ✓ La résistance à la corrosion (principalement pour l'hypothèse 2)
- ✓ Le spectre des températures de fonctionnement

Nous ne traiterons pas dans cette étude des échangeurs à plaques qui ont l'inconvénient d'avoir une forte sensibilité à l'encrassement. Toutefois, il est important de souligner que des récentes avancées sur ces échangeurs, notamment en ce qui concerne les profils des canaux et l'espace interplaques, permettent de limiter les effets d'encrassement (espacement inter plaque plus grand et profils de canaux de corrugation limitant les zones de recirculation, de zone morte (vitesse quasiment nulle) et donc les zones qui pourraient avantager la sédimentation des éléments lourds qui favorisent l'encrassement).

- **Les échangeurs liquide/gaz à tubes ailetés (ou Batterie à ailettes)**

Les échangeurs tubulaires font partie des échangeurs les plus employés dans le domaine industriel. Nous pouvons distinguer les échangeurs coaxiaux et les échangeurs à tubes et calandre.

Mais pour la récupération de chaleur sur des gaz nous nous concentrons sur les technologies des tubes ailetés. Elles sont constituées d'un faisceau de tubes, les tubes sont reliés entre eux par des coudes afin de définir le circuitage de la batterie. Ces tubes sont répartis en nappes (ou rangs). La batterie est alimentée par un fluide via le collecteur d'entrée qui est ensuite récupéré par un collecteur de sortie. La présence d'ailettes permet une augmentation significative de la surface d'échange extérieure avec le fluide chaud (fumées) et permet ainsi d'augmenter le coefficient d'échange thermique et donc la quantité d'énergie échangée entre le fluide caloporteur et les fumées.

Cependant, il est important de souligner que la présence d'ailettes augmente la capacité d'encrassement de l'échangeur et peut provoquer son entrave au bout d'un certain temps de fonctionnement. Etant donné que nous sommes en présence d'un fluide chargé (fumées) et afin d'éviter l'obstruction trop rapide de la section de passage, il est intéressant d'espacer les ailettes avec un pas assez important afin d'éviter l'accumulation des poussières et des suies entre ces ailettes. On peut aussi traiter la surface avec une substance hydrophile qui favorise la formation d'un film et le drainage continu du condensat.

Usuellement dans le domaine de la récupération sur des gaz (généralement de l'air), les tubes sont en cuivre et les ailettes en aluminium. Cependant, dans le cadre d'une valorisation énergétique à basse température il est important de prendre en compte le phénomène de condensation des composés acides contenus dans les fumées qui pourrait engendrer une détérioration prématurée de l'échangeur, et qui pourrait induire une baisse importante de la performance thermique de récupération. Ce problème se répercute par une usure prématurée et facilite la fixation d'un dépôt de suie de plus en plus épais engendrant ainsi une baisse importante de la performance.



L'identification du point de rosée acide et la mise en place d'une marge de sécurité basée sur la valeur de ces paramètres afin d'éviter la condensation des composés acides présents dans l'effluent est indispensable pour palier ce problème.

Ces attaques chimiques doivent nécessiter l'utilisation de métaux et d'alliages nobles tels que l'inox ou le titane ce qui augmente inévitablement le coût matière de l'échangeur. Les métaux généralement retenus pour les environnements agressifs sont les aciers inoxydables (recommandés en environnement oxydant et pour certains alliages en environnement acide réducteur), les alliages à base de nickel recommandés en environnement agressif à haute température et fortes contraintes mécaniques, les métaux nobles.

Les tableaux 1, 2, 3 identifient ces différents matériaux avec :

- les éléments de composition
- les usages recommandés
- les usages interdits

Type d'acier inoxydable	Éléments de composition	Usages recommandés	Usages interdits	Remarques
Austénitique 18-8 Ex : SS 304	18% de chrome 8% nickel	Environnement oxydant	Environnement riche en chlorure	
Super Austénitique Ex : SS 316	>18% de chrome >8% nickel Molybdène 2-4% cuivre	Environnement oxydant, acides diluées réductrices Acide sulfurique		
Super Austénitique SS 654 / C-276	Haute teneur en Molybdène (7%)	Environnement riche en chlorure (corrosion par piqure)		Peut convenir pour les échangeurs à plaques sur des fluides à forte teneur en chlorure
Super Ferritique SS446/ SS 447	>26% chrome	Acide organique, acide diluée réductrice, mélanges d'acides réductrices et oxydantes	Température supérieure à 425°C	
Duplex : mélange ferritique et austénitique SS 318/ SS 327		Présence de sulfure d'hydrogène et de chlorure		Applications aux échangeurs dans les raffineries pétrolières

Tableau 1 : Aciers Inoxydables en environnement corrosif (Source GRETh)

Type d'acier inoxydable	Éléments de composition	Usages recommandés	Usages interdits	Remarques
Nickel-Cuivre Monel 400		Environnement réducteur : eau de mer, acide fluorhydrique, fluide avec présence de chlorure		
Nickel-Chrome Inconel 600	>60% nickel >13% chrome	Environnement basique : Ammoniac, hydroxyde d'ammonium, sulfure de sodium, chlorure de magnésium, Gaz contenant des chlorures, fluorure à haute température Vapeur d'eau <430°C		
Nickel-Molybdène Hastelloy B2		Acides sulfurique et phosphorique Gaz : chlore >540°C, chlorure d'hydrogène <450°C		
Nickel-Chrome-Molybdène Inconel 625		Acides nitrique, phosphorique, sels à base chlorure Gaz : chlore en environnement humide <40°C, dioxyde de chlore		
Nickel-Chrome-Cuivre-Molybdène Incoloy 825/Hastelloy G		Acides sulfuriques <70°C et nitriques		

Tableau 2 : Alliages de Nickel (Source GRETh)

Type d'acier inoxydable	Éléments de composition	Usages recommandés	Usages interdits	Remarques
Titane		Environnement oxydant : acide nitrique et chromique Eau de mer, solutions de chlorure Gaz : chlore en environnement humide	Acides réductrices : sulfurique, phosphorique et hydrochlorique Gaz : chlore en environnement sec	
Zirconium		Solutions basiques, acides organiques, eau de mer,	Peu résistant en présence de contaminants oxydants : ions ferrique ou cuivreux	
Niobium		Solutions salines et acides minérales à la température ambiante	Solutions basiques diluées	
Tantale		Tous composés organiques et inorganiques <150°C	Solutions basiques concentrées, solutions avec fluorure	

Tableau 3 : Métaux nobles (Source GRETh)

Note sur les coûts des différents types d'acier :

Type d'acier	Coût en \$/tonne
Acier inoxydable type 304	3500-4000 \$/t
Acier inoxydable type 316	5000-6000 \$/t
Acier Standard	700-1000 \$/t

**Source: MEPS (Management Engineering & Production Services) International
– World Steel Prices**

Nous voyons qu'il y a une différence de l'ordre d'un facteur de 4 à 5 entre le prix de l'acier standard et le prix de l'acier inoxydable. Par conséquent, les coûts de l'échangeur et du remplacement éventuel des équipements en place sont à regarder avec beaucoup d'acuité.

Les techniques de dépôts sont soit de type émaillage par l'application sur une paroi métallique d'une couche d'un matériau amorphe et non cristallin (verre, ...) soit de type traitement thermique/ projection d'une couche suffisamment épaisse et sans défaut pour éviter tout contact entre le fluide corrosif et la paroi support de cette couche protectrice.

L'émaillage est connu pour sa dureté ainsi que sa bonne conductivité et son caractère de dépôt très lisse. Les compositions des dépôts émaillés sont SiO_3 , B_2O_3 , Na_2O , K_2O . La tenue des dépôts est adaptée à tous les acides jusqu'à 130°C , et bases jusqu'à 60°C , les solutions salines jusqu'à 175°C . Cette technique est particulièrement adaptée aux chaudières charbon ou fuel....

Les dépôts de couches protectrices peuvent être de nature très diverses : oxydes, métaux, carbures, nitrures, plastiques... Les dépôts les plus courants sont à base de Al_2O_3 et de Cr_2O_3 qui ne doivent pas être utilisés au dessus de 500°C .

L'encrassement et la corrosion sont des points délicats pour la performance énergétique notamment lorsqu'on compte sur elle pour la récupération d'énergie, objectif très pertinent dans les rejets industriels qui sont souvent des liquides ou des gaz chargés.

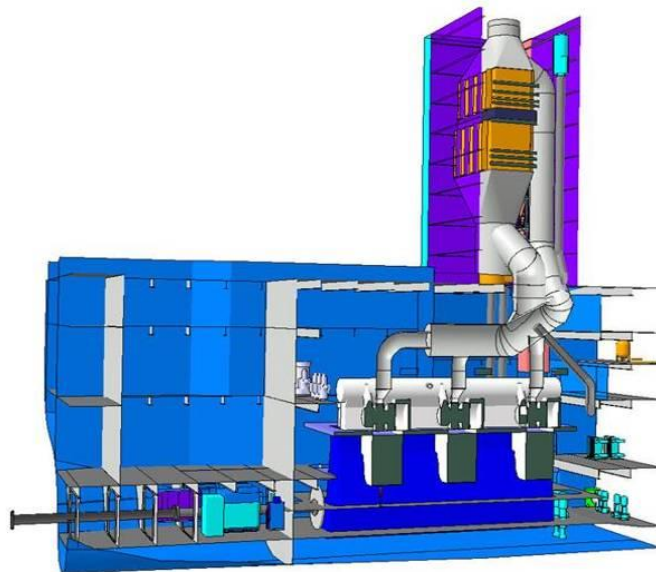
Dans l'industrie, comme nous venons de le dire, ces échangeurs de chaleur sont beaucoup utilisés dans la récupération de chaleur sur des fumées en sortie de combustion qui sont donc des effluents encrassants avec des particules poussiéreuses. Ces échangeurs subissent donc un encrassement particulièrement important sur le coté aileté. Cet encrassement est problématique et il convient d'adapter l'ailette au mieux afin de le limiter, puisque le supprimer est impossible.

L'échangeur de conception générique à tubes et ailettes autorisent l'utilisation d'effluents gazeux encrassants et des fluides sous phase liquide propre. Leur intégration est relativement aisée dans les veines dans lesquelles circulent les effluents gazeux.

La technologie d'ailettes lisses ou segmentées autorise une large gamme dimensionnelle tant sur le diamètre de tubes que sur les géométries d'ailettes (pas, hauteur, épaisseur,...)

La conception des tubes à ailettes avec des ailettes serties sur les tubes ou soudés sur ces tubes autorise des fonctionnements à températures élevées sur les gaz chargés.

Ils sont la solution idéale pour les applications de chauffage ou refroidissement de gaz à pression proche de la pression atmosphérique caractérisées par des débits volumiques élevés.



Intégration d'un récupérateur à tubes et ailettes sur les conduits recevant les gaz de combustion d'un moteur à combustion interne (Source GRETh)



Vue d'un échangeur récupérateur à ailettes (Source CIAT)

Les résultats des travaux réalisés par Silvestrini (1979) montrent que :

- le type d'ailettes (droites ou gaufrés) n'affecte pas le taux d'encrassement, par contre la densité d'ailettes (nombre d'ailettes par mètre) est un paramètre important.
- le nettoyage de surface ailetée par soufflage d'air comprimé n'est pas toujours efficace et il convient dans certains cas d'utiliser des techniques de nettoyage plus performantes.

Néanmoins l'adaptation du pas d'ailette est une solution simple de mise en œuvre mais qui impacte aussi une baisse significative des performances par la diminution de la surface d'échange mais aussi de la diminution de la vitesse dans l'espace inter-ailettes qui fait aussi baisser les coefficients de transfert convectif. Ainsi, un surdimensionnement est souvent le résultat de l'abaissement de ce pas d'ailette.

Pour résumer, le choix d'une technologie à base de surfaces améliorées peut parfois être intéressant en application encrassante. Toutefois, afin de choisir un type de surface, il convient de faire la balance entre le gain potentiel au niveau thermique et les pertes dues à l'encrassement.

Une géométrie avec des surfaces secondaires modérées comme des rainures spiralées semble être un bon compromis.

La technologie à base d'inserts hélicoïdaux internes semble possible s'il n'y a pas d'agglomération de particules ou formation d'un brouillard colmatant par condensation.

Les efficacités d'échangeurs de type batterie ailetée se trouvent généralement entre 45% et 75% suivant les profils d'ailette, les matériaux utilisés et leur agencement.

- **Les échangeurs à tubes en matière plastique**

Dans le cadre de la limitation de la corrosion des équipements, les échangeurs de tubes en matière plastique constituent une bonne alternative aux matériaux nobles comme le titane et l'inox qui ont un coût plus élevé.

Cependant, leur utilisation comporte plusieurs limites dont on doit tenir compte. En effet, le plastique a une très faible conductivité thermique, ce qui impose une surface d'échange beaucoup plus importante, rendant finalement le matériel aussi, sinon plus cher que l'échangeur métallique classique.

Concernant la température de travail pour la récupération de chaleur sur les fumées de combustion, celle-ci ne doit pas dépasser 200 °C (Polyamide réticulée). Dans notre cas, ce point n'est pas un problème puisque nous sommes à une température de fumées de 180 °C maximum en post-traitement, mais cela nécessite tout de même un contrôle rigoureux de cette température de rejets et un by-pass de

sécurité. En effet, si cette dernière n'est pas maîtrisée, le matériau peut être soumis à d'important efforts mécaniques dues au fluage de la matière plastique et peut ainsi engendrer une fatigue et une usure prématurée de l'échangeur.

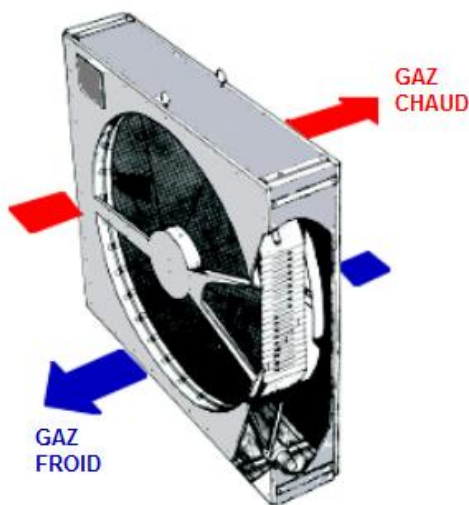
La technologie d'échangeur de chaleur en matière plastique est encore une technologie marginale mais qui connaît un fort développement, notamment dans le domaine du dessalement. A notre connaissance peu de fabricants proposent des tubes ailetés entièrement en plastique (ou alors avec un revêtement plastique de type Kevlar) pour la gamme de puissance qui nous intéresse. Cette technologie est donc écartée de cette étude de cas.



Echangeur à plaque en plastique (Source TMW-TET)

- **Les échangeurs / régénérateurs rotatifs**

Dans le cadre d'une valorisation de rejets thermiques sur effluents gazeux, nous l'avons vu précédemment dans les cahiers descriptifs des technologies d'échangeurs thermiques, les échangeurs rotatifs sont bien adaptés à la récupération de l'énergie thermique issue d'un gaz. Néanmoins avec cette technologie, l'énergie récupérée sert seulement pour réchauffer un autre effluent gazeux. C'est donc un point faible en termes d'intégration sur une installation existante. En effet, le réchauffage d'un effluent gazeux dans ce type d'application (récupération de l'énergie thermique issue des fumées en amont du rejet par cheminée) pourrait permettre de réchauffer de l'air en amont de la combustion afin d'élever son niveau de température et ainsi d'augmenter le rendement de combustion. De même, cet effluent gazeux peut être valorisé pour le séchage des boues, digestats ou biomasse. Néanmoins, à la vue de l'architecture de ce type d'échangeurs (cf. figures ci-dessous) le point critique pour réaliser une telle opération serait d'intégrer l'échangeur en amont de la cheminée afin de récupérer les thermies issues des fumées et faire arriver de l'air ambiant à côté afin de réchauffer l'air nécessaire à la combustion.

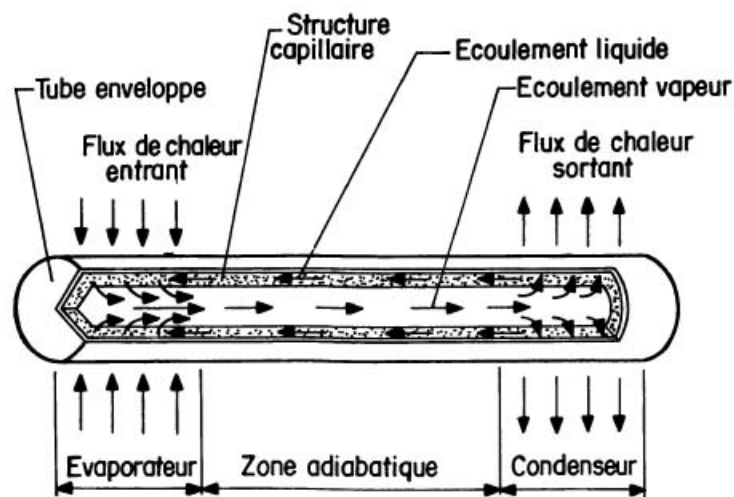


(Source GRETh-HOVAL)

On en conclut que ce type d'installations doit être prévu en amont de la construction de l'UIOM et qu'une telle installation sur une UVE existante nécessiterait des travaux d'intégration difficilement réalisables et probablement très coûteux. Donc nous n'envisageons pas d'étude de cas avec ce type d'échangeur.

- **Les échangeurs à caloducs**

Les caloducs (ou thermosiphon) sont des dispositifs capables de transmettre des flux de chaleur importants avec de faibles écarts de températures. Un caloduc se présente sous la forme d'un tube revêtu intérieurement d'un matériau poreux, fermé hermétiquement et contenant un fluide en équilibre liquide-vapeur (Fig. 5). Le mécanisme évaporation-transfert de vapeur-condensation- retour du condensat à l'évaporateur produit de forts coefficients d'échanges thermiques et permet d'atteindre des densités de flux axial transféré entre les extrémités du tube de plusieurs dizaines à plusieurs milliers de watts par cm² de section. Le matériau poreux assure le retour du condensat, même en l'absence de gravité, il n'est donc pas nécessaire d'utiliser un organe auxiliaire de pompage qui augmenterait l'énergie consommée pour faire fonctionner l'échangeur. Ce dernier point le rend aussi très avantageux par rapport à la mise en place d'une boucle thermique car il permet de diminuer le coût en matériaux des éventuelles tuyauteries nécessaires à la réalisation de la boucle.

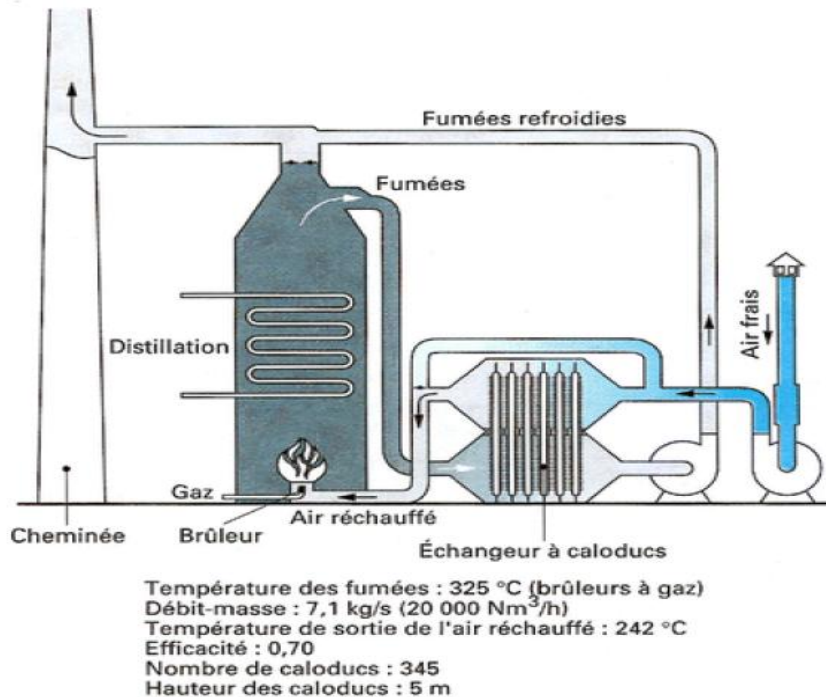


Principe de fonctionnement d'un caloduc (Source : « Les échangeurs à caloducs pour la récupération de chaleur dans les processus industriels » S. Chaudourne - Revue Phys. Appl. 17 (1982) pp. 625-632, sept 1982)

Pour une utilisation lors d'un échange avec un gaz (fumées), les tubes caloducs doivent être ailetés afin d'augmenter le transfert de chaleur entre le gaz et le caloduc et drainer un flux thermique suffisant, car les coefficients d'échanges thermiques en phase gazeuse sont médiocres (entre 30 et 100 W/m².K) et limite notablement le transfert de chaleur. Dans notre cas, il est préférable, pour éviter la mise en place d'un réseau capillaire coûteux, de fonctionner par l'action naturelle de la gravité : c'est-à-dire en mode thermosiphon.

Ainsi, la partie évaporateur du caloduc se trouve en bas et la vapeur est entraînée vers la partie haute du caloduc (condenseur). La partie haute du caloduc étant en contact direct avec le flux gazeux froid, le phénomène de condensation intervient et la phase vapeur redevient liquide. Ce dernier changement de phase augmente d'un facteur prépondérant la masse volumique, et par gravité, le fluide peut donc s'écouler en partie basse du caloduc et recommencer ainsi le même cycle. On pourrait assimiler le caloduc une machine thermodynamique autonome.

Un autre avantage évident de l'utilisation d'échangeur à caloducs dans notre étude, est son efficacité thermique et son absence de point froid, empêchant une éventuelle condensation des fumées qui entrainerait une potentielle détérioration de l'échangeur.



Exemple d'installation pour un échangeur caloduc air/fumée (Source : CHAUDOURNE, BRICARD – Caloducs, Technique de l'ingénieur, B9545, 1997)

- **Echangeurs à lit fluidisé**

Les échangeurs de chaleur à contact direct (ECD) sont caractérisés par l'absence de paroi matérielle entre les fluides. Ils sont encore assez peu utilisés, quoique le principe du contact direct soit largement répandu dans les industries chimique, pétrochimique, métallurgique, ... :

- Transport pneumatique ou convoyage de particules par un fluide.
- Réaction de nature chimique par l'intermédiaire de lits fluidisés ou de systèmes dispersés en écoulement.
- Transfert de masse combiné à un transfert de chaleur (extraction liquide-liquide, distillation).

L'avantage principal de transfert de chaleur par contact direct est évidemment la disparition des risques d'entartrage et de corrosion auquel s'ajoutent une perte de pression faible, une aire interfaciale d'échange modulable et un bon coefficient d'échange thermique. En contre partie se posent divers problèmes comme la compatibilité physico-chimique des fluides (immiscibilité, inertie chimie) et leur séparation après l'échange.



Nous pouvons également noter l'intégration aisée de ce type d'échangeurs sur une installation existante.

Néanmoins, le désavantage prédominant de cet échangeur réside dans le fait qu'il ne soit pas produit en série à l'échelle industrielle. Il est possible de fabriquer ce type de système sur mesure via des bureaux d'ingénierie spécialisés, ce qui implique un coût de construction important.

- **Echangeurs à lit tubes et calandres**

Ce type d'échangeur est d'un fonctionnement très basique. Les échangeurs à tubes et calandres sont les échangeurs les plus utilisés dans l'industrie. Ils représentent environ 50 % du marché des échangeurs thermiques.

Les éléments constitutifs sont :

- La calandre
- Les tubes
- Les plaques tubulaires
- Les chicanes
- Les boîtes de distribution des fluides et les fonds de calandre.

La calandre constitue l'enceinte dans laquelle circule le fluide extérieur au faisceau tubulaire. Elle doit être d'épaisseur suffisante pour résister aux contraintes de pression. Son matériau doit être compatible avec le fluide utilisé. En général, sa forme est cylindrique, mais dans certaines applications elle peut être autre. Elle peut être munie de soufflets de dilatation.

Les matériaux des tubes utilisés dépendent des fluides choisis et des conditions de fonctionnement (température, pression, vitesse de circulation des fluides). Les plus courants sont :

- Aciers ordinaires
- Aciers inoxydables
- Cuivre, laiton et cupronickel
- Graphite
- Verre
- Matières plastiques

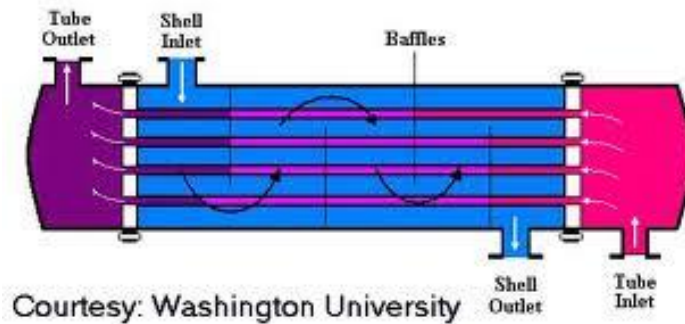
Ces tubes peuvent être de section circulaire ou autre (ellipse par exemple) et comporter éventuellement des ailettes sur leur surface externe ou des promoteurs de turbulence à l'intérieur.

Les différents types d'échangeurs à tubes et calandres sont définis par des normes de construction. Le code TEMA édité par l'association des fabricants américains est sans doute le plus utilisé.

Les critères qui peuvent orienter le choix vers l'utilisation d'un échangeur à tubes et calandre sont :

- L'utilisation d'un fluide sous forte pression, qui devra si possible circuler à l'intérieur des tubes.
- Circulation d'un fluide encrassant qui nécessitera un nettoyage facile avec ou sans démontage du faisceau.
- Ecart de température important entre les deux fluides.
- Nécessité d'une grande étanchéité entre les deux fluides (on pourra même dans certaines applications choisir des tubes à double enveloppe).

Les échangeurs à tubes et calandre sont généralement peu compacts par rapport à d'autres types (échangeurs à plaques et joints par exemple) et le Nombre d'Unités de Transfert (N.U.T.) qu'ils autorisent est peu élevé. Son utilisation est donc sur le déclin, à cause d'une efficacité relativement faible comparé à d'autres technologies plus performante et plus compacte. De plus, l'important encombrement de cet échangeur constitue un point défavorable à sa mise en place et à son entretien.



• **Résumé sur les échangeurs d'intérêts**

	Point Fort	Point Faible
Echangeur à tubes ailetés classique	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité de conception standard - Bon marché - Surface d'échange importante : bonne efficacité 	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage difficile - Démontage difficile - Fort encombrement - Encrassement rapide des ailettes dans le cas d'un pas trop faible
Echangeur à caloducs	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne étanchéité entre les deux fluides - Grande fiabilité de l'échangeur - Souplesse de conception - Légèreté / compacité - Efficacité élevée - Isothermie des caloducs : prévention des risques de corrosion - Entretien réduit - Régulation possible du flux échangé 	<ul style="list-style-type: none"> - Encrassement sur les surfaces ailetées des caloducs : Baisse de performance
Echangeur à tubes et calandres	<ul style="list-style-type: none"> - Fiabilité de fonctionnement - Utilisation à fortes pressions et hautes températures 	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage difficile côté calandre - Encombrement important - Performance limitée



Echangeur à lit fluidisé	<ul style="list-style-type: none"> - auto-nettoyant - amélioration du coefficient de transfert de chaleur - intégrable sur des systèmes existant 	<ul style="list-style-type: none"> - Absence de production en série à l'échelle industrielle.
---------------------------------	---	--

3.4. QUELLE QUANTITE D'ENERGIE EST-IL POSSIBLE DE VALORISER ?

La température des fumées en sortie de chaudière est d'environ 250°C. Nous avons estimé la température de sortie des fumées en post traitement à 180°C. Afin d'assurer une efficacité énergétique optimale de l'installation, il est essentiel d'être en mesure de récupérer cette énergie à bas niveau de température.

Dans la suite de notre étude, nous traitons de la mise en place d'un échangeur fumée/eau en sortie de filtre à manches. L'analyse d'autres projets similaires sera effectuer par adéquation avec le Delta-Température en présence.

Méthodologie générale de calcul

Puissance récupérable (en Watt):

$$\text{Débit du fluide} \times C_p \times (T_{\text{entrée}} - T_{\text{sortie}}) \times \eta \text{ échangeur}$$

Energie valorisable (en Wh) :

$$\text{Puissance (W)} \times \text{Temps de fonctionnement (en heure)}$$

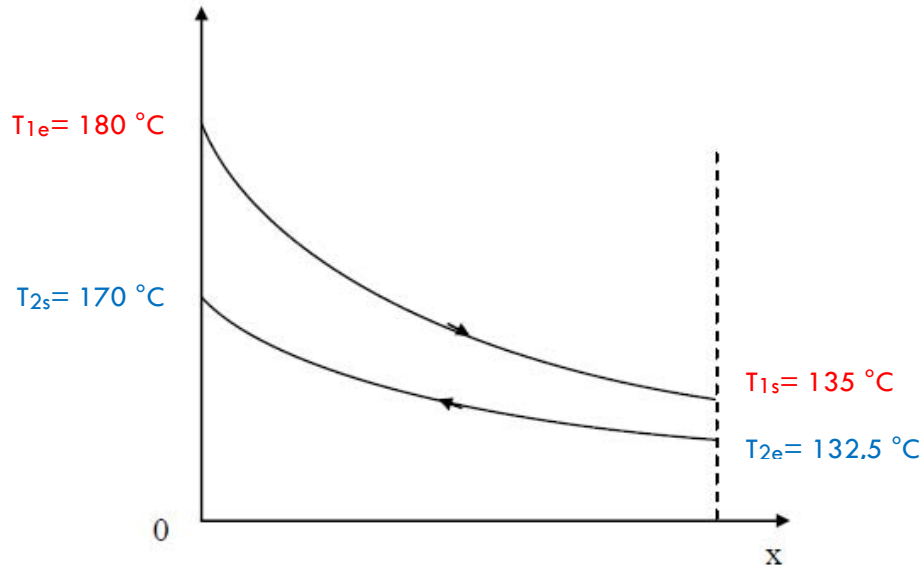
« η échangeur » signifie le rendement de l'échangeur (environ 95%).

« C_p » représente la capacité thermique ou capacité calorifique.

Fluide d'étude	C_p en kJ/kg.K
Fumées	1,200
Eau liquide	4,185
Huile	1,840

Dans le cas d'un refroidissement sous le point de rosée acide, il est nécessaire de prendre en considération l'énergie de condensation ou chaleur latente des fumées. Cette dernière est généralement comprise entre 2000 et 2500 kJ/kg_eau (suivant la pression et la température).

Allures des distributions des températures pour un échangeur à contre-courant (cas de l'hypothèse 1), sans prise en compte de l'échelle:



Méthodologie plus fine de calcul

(cf Annexe n°1 – partie 2)

La puissance échangée (en Watt) est égal à : $P = U \times S \times F \times \Delta T_{ml}$

F = facteur correctif du ΔT_{ml} pour la prise en compte des écoulements à courant-croisé

U = coefficient d'échange thermique global (W/m².K)

S = surface d'échange (m²)

ΔT_{ml} = écart de température moyen logarithmique en K pour un échangeur en configuration des écoulements à contre-courant :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_s - \Delta T_e}{\ln\left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e}\right)}$$

Avec dans le cas d'un échangeur contre-courant :

$$\Delta T_s = T_{1s} - T_{2e}$$

$$\Delta T_e = T_{1e} - T_{2s}$$

Le détail des différentes valeurs est plus particulièrement développé dans la partie 3.5 du rapport avec un calcul visant à déterminer la surface d'échange thermique nécessaire.

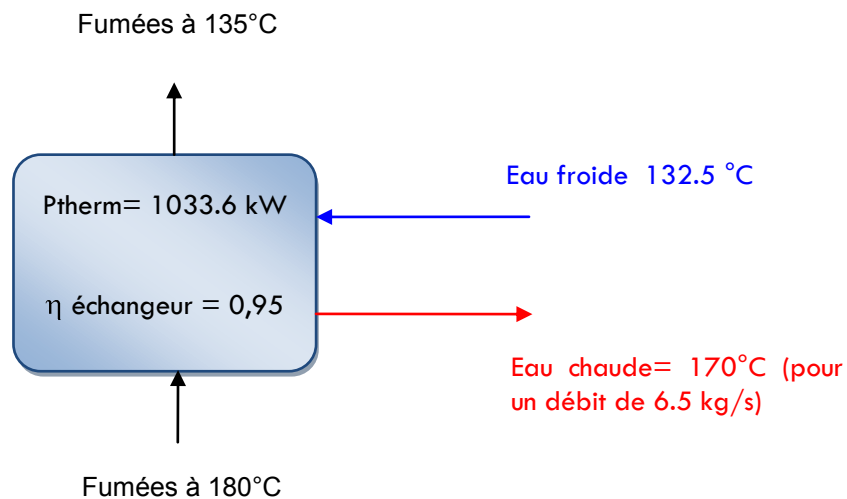
- **Quantité d'énergie valorisée en post-traitement**

3.4.1 Hypothèse 1: Refroidissement de 180 °C à 135 °C

Il est possible de récupérer une puissance théorique en post traitement évaluée à **1033.6 kW**, soit ~3 % de la Puissance totale PCI.

Cette valorisation permettrait une production d'énergie thermique avec une disponibilité de 8000h atteignant **8268.75 MWh**

Les gammes de températures mises en jeu pour ce type d'installation sont les suivantes:



Le calcul nous donne un débit de 6.5 kg/s d'eau évoluant entre 132.5 °C (marge de sécurité par rapport au point de rosée acide) et 170°C.

Notes de calcul :

Dans ce cas précis, on sait que la quantité de chaleur échangée est directement proportionnelle au différentiel de température et aux propriétés thermo-physiques du caloporteur.

- ✓ $P = \text{énergie sensible de refroidissement} / \text{temps}$

$$P = V_{\text{fumée}} \cdot C_{p_{\text{fumée}}} \cdot \Delta T_{\text{fumée}}$$

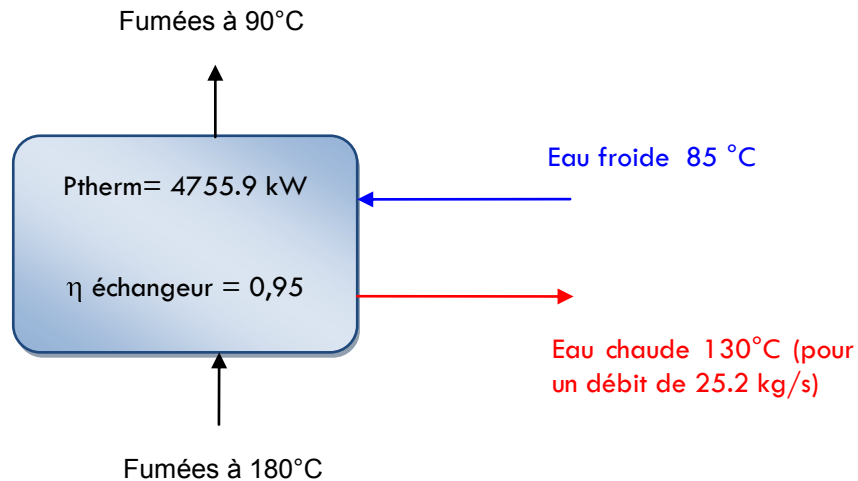
$$(65\,625 \text{ Nm}^3/\text{h} / 3\,600) \times 1.26 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1} \times (180 \text{ °C} - 135 \text{ °C}) = 1033.6 \text{ kW}$$

- ✓ $\text{Energie} = 1033.6 \text{ kW} \times 8000\text{h} = 8268.75 \text{ MWh}$

3.4.2 Hypothèse 2: Refroidissement de 180 °C à 90 °C

Cette valorisation permettrait la récupération d'une puissance de **4755.9 kW**, soit environ 14% de la puissance PCI (déchets entrants), correspondant à une production d'énergie thermique avec une disponibilité de 8000h atteignant **38 047 MWh**.

Les gammes de températures mises en jeu pour ce type d'installation sont les suivantes:



Les calculs sont réalisés de manière à ce que la condensation s'effectue sur l'ensemble de la surface de l'échangeur, il faut donc que la température en sortie de l'échangeur ne dépasse pas la température de rosée. Par conséquent, cela nous conduit à maintenir un débit de 25.2 kg/s d'eau évoluant entre 85°C et 130°C (cas d'usage d'un réseau de chauffage urbain).

Notes de calcul :

Si l'on récupère 100% de la vapeur à condenser, il est possible de récupérer en théorie une puissance en post traitement s'élevant à 7445 kW (soit 22 % de la Puissance total PCI). Mais nous allons le voir, cette valeur est à réajuster car le taux de condensation de la vapeur d'eau avoisinerait que 50%.

$P = (\text{Energie sensible de refroidissement} + \text{Energie latente de condensation}) / \text{temps}$

$P = (V_{\text{fumée}}/3600) * C_{p_fumée} * \Delta T_{\text{fumée}} + (m_{\text{H}_2\text{O}}/3600) * \rho_{\text{H}_2\text{O}} * \Delta h_{\text{lv}}$

$P = (65\ 625 / 3\ 600) [\text{Nm}^3] \times 1.26 [\text{kJ/m}^3 \cdot \text{K}] \times (180\ ^\circ\text{C} - 90\ ^\circ\text{C}) + (0.18 * 65625 / 3600) [\text{Nm}^3] * 0.7539 [\text{kg/m}^3] * 2174 [\text{kJ/kg_eau}]$

$P = 2067.1 + 5377.8 = 7445\ \text{kW}$

On notera que cette puissance est valable que pour la totalité de la vapeur d'eau contenue dans les fumées, soit 18% d'humidité du volume de fumées de 65625 Nm³/h soit 2.47 kg/s de condensat, qui représente une grande quantité à traiter. Il n'est pas possible d'abaisser l'humidité à 0%, une humidité résiduelle de 9% est plus réaliste alors dans ce cas la puissance récupérée est la suivante :

$P = 2067.1 + 2688.9 = 4755.9\ \text{kW}$

Energie = 4755.9 kW x 8000h = 38 047 MWh.



3.5. ENCOMBREMENT ET CONTRAINTES D'EXPLOITATION

- **Encombrement de l'échangeur (type à tubes ailettes)**

En ce qui concerne l'encombrement de l'échangeur, il s'agit de réaliser un pré-dimensionnement afin de connaître la surface d'échange (et déduire le volume de l'échangeur) à mettre en jeu pour récupérer les calories des fumées. Un dimensionnement d'échangeur reste une opération complexe nécessitant un processus itératif ainsi que de nombreux paramètres tels que :

- La nature et les propriétés thermo-physiques du fluide interne et externe ainsi que des matériaux mis en jeu (voir plus avant dans le document)
- Leur vitesse (pour les fumées nous retiendront une valeur de 12 m/s qui est la vitesse minimale fixée par la réglementation en incinération; pour les liquides, les valeurs usuelles sont comprises entre 1 et 2 m/s)
- Les contraintes d'intégration qui définiront les premiers paramètres géométriques de l'échangeur (longueurs maximale et/ou largeur maximale qui définiront par la suite le nombre de nappes de l'échangeur)
- Les caractéristiques géométriques des tubes et des ailettes (hauteur d'ailette, pas d'ailette, diamètres de tube).

Nous noterons aussi qu'un dimensionnement d'échangeur est également contraint par un compromis entre performance thermique et pertes de charge acceptable.

Dans un premier temps, il faut réaliser un calcul de coefficient d'échange local qui nous permet par la suite de définir les différentes résistances de transfert (convectif interne et externe, conduction et encrassement) et de calculer le coefficient d'échange global. Le lecteur trouvera d'autres informations dans la fiche n°1 : les échangeurs de chaleurs, ainsi que dans les références qui ont servi à la rédaction de ce dernier. Ces calculs se réalisent à partir de corrélations empiriques basées sur des paramètres adimensionnels tel que :

- Le nombre de Reynolds qui définit le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent). Dans notre cas, nous feront en sorte d'être dans des configurations géométriques qui induisent des écoulements turbulents qui favorisent l'échange thermique.
- Le nombre de Prandtl, rapport du produit de la viscosité dynamique et de la chaleur spécifique sur la conductivité thermique.
- Le nombre de Nusselt qui définit le rapport entre le transfert thermique total et le transfert par conduction. C'est ce paramètre qui est calculé à partir des corrélations et qui permet le calcul du coefficient d'échange.

Pour des raisons d'adaptabilité des études de cas, nous retiendront les coefficients d'échange suivants :

	Hypothèse 1 : récupération Sensible uniquement
Coefficient d'échange interne	2500 W/m ² .K
Coefficient d'échange externe	60 W/m ² .K
Coefficient d'échange global	50 W/m ² .K



Sachant que nous connaissons le différentiel de température et la puissance, nous pouvons alors calculer la surface d'échange nécessaire par la relation suivante :

$$P = U \cdot S \cdot F \cdot \Delta T_{ml} \quad (F \text{ étant un facteur correctif pour les écoulements à courant croisé}).$$

On obtient donc les valeurs suivantes :

Hypothèse 1 : récupération Sensible uniquement
P = 1033.6 kW
$\Delta T_{ml} = 5.41K$ avec F=0.9
S = 4245 m ²

A titre d'indications nous donnons les données suivantes pour le dimensionnement de l'échangeur :

Valeurs conseillées pour le dimensionnement des échangeurs sur fumées industrielles (Warner-Webb)			
Nature de l'effluent	Résistance d'encrassement (m ² · K/W)	Espace entre ailettes (mm)	Vitesse des gaz (m/s)
Gaz propre (nettoyage inutile)			
Gaz naturel	0,000 088 à 0,000 53	1,3 à 3	30 à 36
Propane.....	0,000 17 à 0,000 53	1,8	
Butane.....	0,000 17 à 0,000 53	1,8	
Turbine à gaz.....	0,000 17		
Gaz moyennement encrassant (nettoyage éventuel)			
Fuel n° 2 (US) (% soufre ≤ 1 %)	0,000 35 à 0,000 70	3 à 3,8	25 à 30
Turbine à gaz.....	0,00026		
Moteur Diesel.....	0,00053		
Gaz fortement encrassant (nettoyage obligatoire)			
Fuel n° 6 (US) (% soufre ≤ 4 %)	0,000 53 à 0,001 23	4,6 à 5,8	18 à 24
Pétrole brut.....	0,000 70 à 0,002 64	5	
Pétrole résiduel.....	0,000 88 à 0,003 52	5	15 à 21
Charbon.....	0,000 88 à 0,008 80	5,9 à 8,6	

Source: MARNER (J.) et WEBB (R.L.) – Workshop on an assessment of gas-side fouling in fossing fuel exhaust environment. DOE/ID/12138-1, juil 1982

En prenant par exemple les données géométriques suivantes pour les tubes ailetés (dimensions standard) :

STANDARD FIN TUBE CHARACTERISTICS ON STAINLESS STEEL						
Tube OD (inch)	Tube OD (mm)	Fin Height (inch)	Fin Height (mm)	Fin thickness (inch)	Fin thickness (mm)	FPI (Fin Per Inch)
0.2500	6.3500	0.1875	4.7625	0.0150	0.3810	4,5,6,7,8,9,10
0.3750	9.5250	0.1875	4.7625	0.0150	0.3810	4,5,6,7,8,9,10
		0.2500	6.3500	0.0150	0.3810	4,5,6,7,8,9,10
0.5000	12.7000	0.1875	4.7625	0.0150	0.3810	4,5,6,7,8,9,10
		0.2500	6.3500	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.3750	9.5250	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
0.6250	15.8750	0.1875	4.7625	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.2500	6.3500	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.3750	9.5250	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
0.7500	19.0500	0.1875	4.7625	0.0150	0.3810	4,5,6,7,8,9,10
		0.2500	6.3500	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.3750	9.5250	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.5000	12.7000	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
1.0000	25.4000	0.1875	4.7625	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.2500	6.3500	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.3750	9.5250	0.0200	0.5080	2,4,5,6,7,8
		0.5000	12.7000	0.0300	0.7620	2,3,4,5,6
1.2500	31.7500	0.3750	9.5250	0.0200	0.5080	4,5,6,7,8,9,10
		0.5000	12.7000	0.0200	0.5080	2,4,5,6,7,8
		0.6250	15.8750	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
1.5000	38.1000	0.5000	12.7000	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
		0.6250	15.8750	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
		0.7500	19.0500	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
1.7500	44.4500	0.6250	15.8750	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
		0.7500	19.0500	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6
2.0000	50.8000	0.7500	19.0500	0.0200	0.5080	2,3,4,5,6

Source : Marvillet C ; Bontemps A ; Goubier C ; Mercier P ; Garrigue A ; Huetz J ; Vidil R. - TI B 2 344-1-Echangeurs de chaleur / Problème de fonctionnement

En choisissant le tube de la ligne surlignée en jaune, avec une longueur de tube de 2m et un FPI de 4 (soit un pas d'ailette de 6.35 mm) on obtient un nombre de tubes suivant (calculé par les relations qui suivent):

- Calcul de la surface d'échange par tube :

$$S_{\text{ailette}} = n_{\text{ailette}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{D_{\text{ailette}}^2 - D_{\text{tube}}^2}{4} \right] + n_{\text{ailette}} \cdot e_{\text{ailette}} \cdot \pi \cdot D_{\text{ailette}}$$

$$S_{\text{eff};\text{tube}} = \pi \cdot D_{\text{tube}} \cdot (L_{\text{tube}} - n_{\text{ailette}} \cdot e_{\text{ailette}})$$

$$S_{\text{ech};1;\text{tube}} = S_{\text{ailette}} + S_{\text{eff};\text{tube}}$$

La surface d'échange d'un tube est de 1.136 m² et il faudrait donc 3737 tubes pour pouvoir réaliser la surface d'échange nécessaire. En réalisant un arrangement des tubes en pas carré avec un espacement de 10 mm entre chaque tube, nous évaluons le volume de l'échangeur nécessaire à 27 m³. Ce volume ne prend pas en compte les volumes des collecteurs d'entrée et de sortie, ni de l'armature. Il conviendra donc de rajouter ces volumes additionnels, qui peuvent être importants...

Par ailleurs, cet échangeur est celui de récupération de la boucle thermique, il faut maintenant prévoir un autre pour pouvoir restituer cette chaleur récupérée.

Si on considère que l'on se sert de cette chaleur pour réchauffer un air process (par exemple l'air de combustion ce qui permettrait d'améliorer le rendement de combustion), on peut alors faire l'hypothèse qu'un échangeur de taille similaire conviendra (hypothèse justifiée par le fait que les propriétés thermo-physiques des fumées sont très proches de celle de l'air).

Toujours sans compter les différents collecteurs d'entrées et de sorties, ni les armatures et surtout sans compter les différentes longueurs de tuyauteries nécessaires au raccord entre échangeurs de récupération et de restitution, le volume total des échangeurs atteint environ 54m³. Il s'agit là d'un dimensionnement rapide mais qui permet d'apprécier la taille d'échangeur nécessaire pour réaliser une telle boucle de récupération.

	Boucle à eau glycolée	Echangeur à plaques	Caloduc	Echangeur rotatif
Encombrement de chaleur spécifique en m ³ pour 1000 m ³ /h (débit d'air)	0.8 - 1.4	2 - 3	0.8 - 1.4	1.0 - 1.8

Encombrement par type d'échangeurs (Source : Jean-Claude MARBAIS « Les récupérateurs de chaleur » 1997)

La mise en place d'une boucle thermique de récupération nécessite tout de même un volume disponible assez important, que l'on peut estimer, par applications d'une marge, aux alentours de 50 m³ pour notre cas d'étude.

- **Temps et points de maintenance**

En ce qui concerne la maintenance des échangeurs, nous pouvons prévoir des temps de maintenance classiques pour un échangeur fonctionnant en milieu encrassant. Les fréquences de nettoyages peuvent être ajuster soit en fonction du temps de fonctionnement moyen avant dégradation de performances (suivant un seuil fixé à X % de perte de performances suivant les exigences de l'exploitant), soit par inspection visuelle et qualitative de l'épaisseur de dépôt encrassant. Ci-dessous un tableau résume les différents points de contrôle et de maintenance classiques à vérifier sur les différentes typologies d'échangeurs :

	Recyclage								
	Echangeur à boucle d'eau								
	Echangeur à plaques								
	Caloducs								
	Echangeur rotatifs								
1	Etat des surfaces d'échange (nettoyage régulier)	X	X	X	X	X	X	X	X
2	Contrôle des éventuelles fuites d'air								
	fuites externes	X	X	X	X	X	X	X	X
	fuites internes				X	X	X	X	X
	fuites par turbulences								X
	fuites au niveau du clapet de by-pass	X			X	X	X	X	X
3	Contrôle de la régulation								
	régulation à bascule							X	
	régulation de la vitesse de rotation								X
	régulation sur le circuit caloporteur				X				
	régulation du/des clapets de by-pass	X			X	X	X	X	X
	régulation antigel	X	X	X	X	X	X	X	X
4	Contrôle du fluide caloporteur								
	contrôle de la teneur en antigel (glycol)				X				
	contrôle du remplissage du circuit				X		X		
	contrôle du débit				X				

Points de maintenance à contrôler pour différents types d'échangeurs (Source : Jean-Claude MARBAIS « Les récupérateurs de chaleur » 1997)

- **Installation d'une unité de récupération des condensats (cas d'un refroidissement à 90°C)**

Dans le cas d'un refroidissement en dessous du point de rosée acide, il est indispensable de mettre en place un dispositif de récupération des condensats issus de la condensation des fumées. En effet, dans le cas contraire, une importante corrosion pourrait avoir lieu au niveau des parois et des installations placées en amont ou en aval de l'échangeur. De plus, il est nécessaire de récolter ces composés liquides pollués et nocifs pour l'environnement afin qu'ils puissent être ensuite convenablement traités.

Bien entendu, cette unité de récupération des condensats se devra d'être constituée de matériaux nobles résistant à la corrosion (de composition similaire de celle des échangeurs mis en place) afin d'assurer sa pérennité. Pour une récupération du condensat, un bac de récupération avec une pente de 1% vers un collecteur de sortie permet son écoulement sans zone de stagnation.

Sur les photos qui suivent, on peut voir l'installation d'une unité de récupération de chaleur sur des gaz issus de 2 turbines à gaz de cogénération de puissance électriques de 40 MW. La puissance totale récupérée est d'environ 7.7 MW (par production d'eau chaude à 90°C). Les gaz ont une température de 105°C en entrée d'échangeur et sortent à environ 50°C (condensation acide). Avec un temps de fonctionnement 8520h, le temps de retour sur investissement est tout de même inférieur à 3 ans (sans compter les CEE). Les échangeurs sont des batteries à ailettes du constructeur GEA qui ont subi un traitement de surface spécial anti corrosion.



Echangeur avec traitement spécial anti -corrosion



Détail de fabrication-vue sur collecteur



Cheminée avant montage



Montage sur site des batteries



Mise en place dans cheminée



Vue intérieur cheminée



Vue sur batterie (6 mois de fonctionnement)



Traces dues à la condensation acide

On voit que la mise en place de tels équipements est une opération qui nécessite une étude d'intégration au cas par cas (par contraintes de places le plus souvent). On constate également que les dégâts engendrés sur les échangeurs à cause de la condensation des composées acides sont tout de même préjudiciables d'un point de vue longévité des échangeurs mais aussi sur les performances par la présence de dépôt. Les photos ci-dessus montrent des échangeurs munis de revêtements spéciaux anti-corrosion.

La mise en œuvre d'un tel système avec une condensation des fumées nécessite non seulement l'installation d'un échangeur en matière inoxydable mais également le changement de tous les équipements en aval de l'échangeur, c'est-à-dire des gaines, des ventilateurs et du conduit de cheminée. Ces modifications impliquent des coûts très importants, qu'il est indispensable d'évaluer dans le cadre d'un tel projet.

- **Délai de fabrication et de mise en place**

Dans le cas d'échangeurs de conception standard, le délai de fabrication dépend de la capacité de réaction du fabricant (suivant la disponibilité en stock). Pour des batteries spécifiques, le temps de fabrication peut être plus long et il conviendra de prévoir un délai plus important que pour des batteries standards.

En ce qui concerne le temps de mise en place *in situ* (intégration sur site), comme mentionné plus avant dans ce document, celui-ci doit être évalué au cas par cas avec l'intégrateur. L'intégration est une partie non négligeable aussi bien au niveau de l'étude que de la mise en place. Elle est sujette à de nombreuses contraintes qui rendent parfois un projet difficilement réalisable.

SYNTHESE DE L'ETUDE DE FAISABILITE TECHNIQUE RELATIVE AU CHOIX DE L'ECHANGEUR

Contexte :

- ✓ UVE des déchets avec un traitement des fumées sec à la chaux ou au BICAR
- ✓ Récupération de la chaleur issue des fumées présentes en gaine de traitement et/ou en cheminée.
- ✓ Valorisation de cette énergie en eau surchauffée (dans un 1^{er} temps)

Type de fluide à privilégier :

- En post-traitement : eau/fumées ou huile/fumées
- En prétraitement : eau/fumées

Type d'échangeur à privilégier :

Nous avons analysé dans cette étude plusieurs types d'échangeur. Bien que certaines technologies présentent des résultats et atouts très satisfaisants, nous avons choisi de privilégier des procédés matures et maîtrisés industriellement pour le choix final de l'échangeur à mettre en place. Ce choix est bien sur non limitant et exclut nullement les autres possibilités.

Types d'échangeur	Coefficient d'échange thermique	Coût	Utilisation de prédilection
Echangeur à tubes ailetés standard	50 W/m ² .K	-	Hypothèse 1
Echangeur à Caloducs	50 W/m ² .K	+	Hypothèse 1
Echangeur en matière inoxydable	45 W/m ² .K	++	Hypothèse 2

Remarque :

La récupération de chaleur avec un refroidissement sous le point de rosée acide (hypothèse 2) paraît très contraignante avec des coûts engendrés par le remplacement de matériels (inox) pouvant atteindre des montants très importants.

Par conséquent, ce cas de figure sera d'avantage à prendre en considération en post-traitement en aval du ventilateur de tirage. Néanmoins, il sera tout de même nécessaire d'effectuer un remplacement de la cheminée avec la mise en place de matériaux inoxydables.



3.6. ANALYSE FINANCIERE

La finalité de cette partie sera de déterminer la viabilité économique d'un projet de valorisation énergétique d'une source d'énergie basse température. Nous détaillerons plus particulièrement notre étude sur la rentabilité d'une récupération de chaleur sur les fumées en postcombustion.

Dans un premier temps, il est primordial de répertorier les différents postes d'utilisation de cette énergie fatale.

- **Les vecteurs d'utilisation de l'énergie thermique produite**

Dans cette étude, étant donné la valeur des températures mises en jeu, l'énergie thermique valorisée est dédiée à plusieurs fonctions:

En interne:

- Réchauffage air primaire
- Réchauffage condensats avant l'entrée dans la chaudière
- Conversion en électricité pour une autoconsommation par un système type ORC : cf. Fiche n°3

En externe:

- Production d'eau chaude pour alimenter un réseau de chaleur eau chaude (régime 105°C/90°C)
- Séchage de bois et de boues d'épuration (Annexe 1)
- Production de froid : cf. Fiche n°4
- Conversion en Electricité pour une revente sur le réseau (obligation d'achat par EDF) : cf. Fiche n°3

La problématique majeure posée par la valorisation d'énergie sous forme thermique sans conversion en électricité, réside dans le fait qu'il est parfois délicat de trouver un client extérieur pour l'achat de chaleur qui soit proche de l'UVE.

De même, pour l'alimentation sur un réseau de chaleur urbain qui nécessite que l'UVE soit implantée à proximité de zone habitée.

- **Estimation des recettes pour la revente de chaleur**

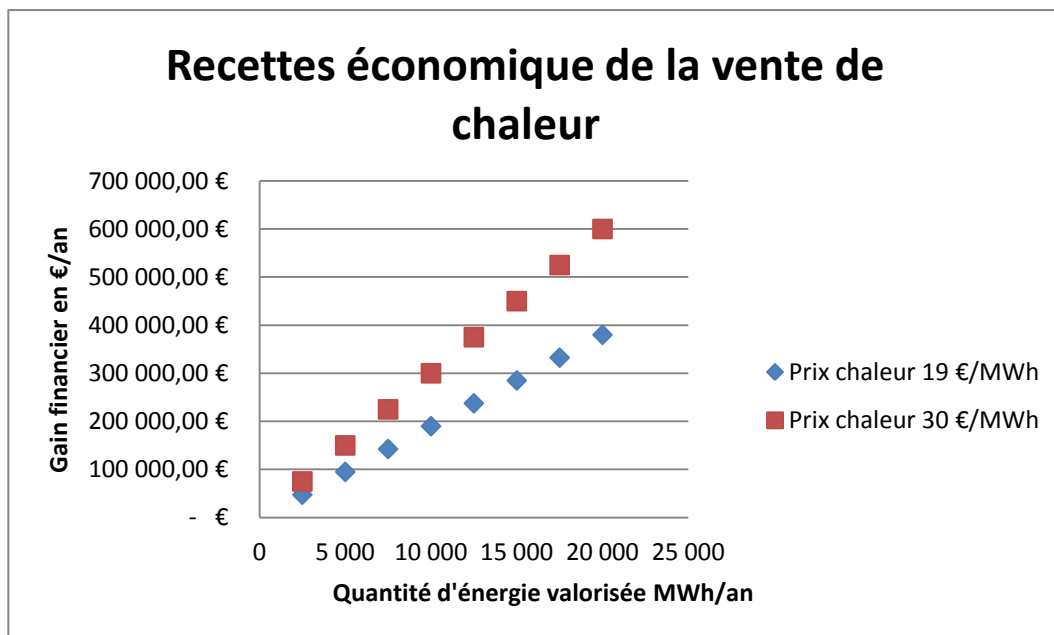
Cette partie a pour objectif d'estimer le gain financier de la revente d'énergie thermique vers l'extérieur ou bien dans le cas d'une utilisation interne, l'économie réalisée.

Afin de faire suite à l'estimation de l'énergie récupérée (cf. 3.4), le graphique suivant établit le retour économique annuel en fonction de la quantité de chaleur valorisée. Le calcul sera effectué pour deux valeurs du prix de vente de chaleur :

Prix d'achat / vente de la chaleur : (Source : CADET International)

- ✓ pour les UVE : 15 à 25 € / MWh thermique
- ✓ pour une installation au gaz : 28 à 32 € / MWh thermique

Nous pouvons estimer le gain économique en fonction du coût de chaleur de la manière suivante:



- **Quelles sont les aides et subventions financières perceptibles ?**

- **Les subventions de l'ADEME : POSSIBLE**

Les subventions de l'ADEME sont à étudier au cas par cas dans le cadre du Fonds Chaleur Renouvelable qui soutient des projets de réseaux de chaleur visant à distribuer l'énergie produite à partir d'énergie de récupération issue des UVE. Le niveau de l'aide s'élève à un taux maximum de 60% de l'investissement réseau de chaleur.



De manière général, lorsque le temps de retour sur investissement d'un projet est court, il n'est pas possible d'envisager une aide de l'ADEME, qui souhaite en premier lieu soutenir les projets difficiles à mettre en œuvre par les entreprises.

➤ **Les Certificats d'économie d'énergie (CEE) : POSSIBLE suivant l'utilisation**

Il est possible de percevoir des CEE seulement dans le cas de valorisation de chaleur sans gain économique, c'est-à-dire pour une amélioration interne de l'efficacité de l'installation (exemple : réchauffage de l'air de combustion).

Par contre, la mise en place d'un ORC générant un revenu direct ne peut vraisemblablement pas être pris en compte.

Rappel sur les CEE :

Les Certificats d'économie d'énergie (CEE) sont destinés à générer des économies d'énergie chez les consommateurs diffus. L'État impose aux fournisseurs d'énergie, par le biais d'un système d'obligations, de réaliser ou de faire réaliser des économies d'énergie chez les consommateurs.

À ce jour, ce sont les fournisseurs d'électricité qui sont principalement visés par cette obligation. En cas de non respect de ces obligations d'économies d'énergie, le coût de pénalité est fixé à 2 c€/kWh.

Soit pour une puissance de 100 kW et une disponibilité de 8000 heures, cela représente une économie possible de 16 000 euros.

➤ **La réduction de la TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes) : POSSIBLE**

Les usines d'incinération étaient jusqu'à présent soumises à l'Arrêté du 20/09/02 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux.

L'arrêté du 3 Août 2010 publié au JORF n°0193 du 21 août 2010 modifie l'arrêté du 20 septembre 2002 concernant notamment le contrôle semi-continu des dioxines et la performance énergétique.

Le caractère de valorisation énergétique ouvrant droit à l'abattement de TGAP est de 60% de taux d'efficacité minimum pour les usines existantes et de 65% pour les usines neuves.

Le calcul du rendement énergétique de l'UVE suivant les nouvelles dispositions de l'article 17 « Annexe VI performance énergétique d'une installation d'incinération » est défini par la formule suivante :

$$Pe = (Ep - (Ef + Ei)) / 0,97 (Ew + Ef)$$

Où :

- Pe représente la performance énergétique de l'installation ;
- Ep représente la production annuelle d'énergie sous forme de chaleur ou d'électricité. Elle est calculée en multipliant par 2,6 l'énergie produite sous forme d'électricité et par 1,1 l'énergie produite sous forme de chaleur pour une exploitation commerciale (GJ/an) ;
- Ef représente l'apport énergétique annuel du système en combustibles servant à la production de vapeur (GJ/an) ;
- Ew représente la quantité annuelle d'énergie contenue dans les déchets traités, calculée sur la base du pouvoir calorifique inférieur des déchets (GJ/an) ;
- Ei représente la quantité annuelle d'énergie importée, hors Ew et Ef (GJ/an) ;



- 0,97 est un coefficient prenant en compte les déperditions d'énergie dues aux mâchefers d'incinération et au rayonnement.

Pour l'application de la formule de calcul de la performance énergétique, on considère que :

$$E_p - (E_f + E_i) / 0,97 (E_w + E_f) = [(2,6 E_{e.p} + 1,1 E_{th.p}) - (2,6 E_{e.a} + 1,1 E_{th.a} + E_{c.a})] / 2,3 T$$

Où :

- E_{e.p} représente l'électricité produite par l'installation (MWh/an) ;
- E_{th.p} représente la chaleur produite par l'installation (MWh/an) ;
- E_{e.a} représente l'énergie électrique externe achetée par l'installation (MWh/an) ;
- E_{th.a} représente l'énergie thermique externe apportée pour assurer le fonctionnement de l'installation (MWh/an) ;
- E_{c.a} représente l'énergie externe apportée pour assurer le fonctionnement de l'installation (MWh/an) ;
- 2,3 étant un facteur multiplicatif intégrant un PCI générique des déchets de 2 044 th/t ;
- T représentant le tonnage de déchets réceptionnés dans l'année.

La circulaire du 30 Mars 2011 sur la TGAP, paragraphe [57], spécifie les procédés pouvant être pris en compte dans le calcul de l'efficacité énergétique :

L'énergie produite par l'installation d'incinération est considérée comme valorisée si elle est utilisée pour les procédés suivants :

- **Préchauffage de l'air de combustion**
- *Chauffage du cycle eau-vapeur (dégazage)*
- **Réchauffage de l'eau alimentaire**
- **Réchauffage des fumées**
- *Le séchage des boues, uniquement si l'opération de séchage a vocation à destiner les boues à une valorisation organique;*
- **La mise hors gel des aérocondenseurs;**
- *Chaleur pour l'évaporation des effluents;*
- **Chauffage des bâtiments, bureaux, locaux sociaux, silos, traçage;**
- *Vapeur pour turbo pompes ou turbo compresseurs.*

Pour être considérées comme valorisées, les énergies consommées doivent être mesurées au moyen de compteur ayant a minima été étalonné chez le fabricant et faisant l'objet d'un programme de maintenance et d'un contrôle annuel.

- A partir de l'année 2013, les retours économiques annuels par une diminution de la TGAP peuvent ici atteindre les 400 000€ :

Tonnage (en tonne/an)	Année	Tarif A (en €/tonne)	Coût Annuel de la TGAP	Tarif D (en €/tonne)	Coût Annuel de la TGAP
100 000	2012	6,40 €	640 000 €	3,20 €	320 000 €
	2013	8,00 €	800 000 €	4,00 €	400 000 €
	2014	8,00 €	800 000 €	4,00 €	400 000 €
	2015	8,00 €	800 000 €	4,00 €	400 000 €
	2016	8,00 €	800 000 €	4,00 €	400 000 €



Comme nous pouvons le constater à partir des formules de performances énergétiques, il est plus avantageux de produire de l'énergie et de l'utiliser pour un usage interne puisque cela permet d'augmenter l'énergie produite tout en diminuant la quantité d'énergie externe achetée.

- **Investissement**

L'évaluation du prix de l'échangeur dépend de plusieurs facteurs correctifs. L'ensemble de ces facteurs et le calcul détaillé du coût de l'échangeur sont présents en annexe de cette fiche.

Le cout de mise en place d'un échangeur est très variable car il dépend directement de la facilité/difficulté d'intégration sur site et du temps à prévoir pour sa mise en place (problème de place pour les intégrateurs, rajout de conduits, rajout de fixation). Nous ne prendrons donc pas part à cette évaluation de cout de mise en place qui est totalement spécifique à chaque UVE.

L'investissement lié à un tel projet peut se décomposer en plusieurs éléments :

- Le coût de l'échangeur seul :

	Type de matériaux utilisé	Prix échangeur
Hypothèse 1	Acier ordinaire	20 492,3 €HT
	Acier Inox 304	32 787,7 €HT
Hypothèse 2	Acier Inox 304	52 725,6 €HT
	Acier Inox 316	57 668,6 €HT
	Monel	65 907 €HT

- Le coût de mise en place de l'échangeur (très variable en fonction de l'installation en présence)
- Le cout liée à l'investissement et au fonctionnement des pompes servant à véhiculé le fluide au travers de l'échangeur
- Le coût de construction du réseau de chaleur
- Les coûts annexes des infrastructures d'utilisation de la chaleur

- Bilan économique**

	Cas d'une UVE (100 000 t/an)	
	Hypothèse 1	Hypothèse 2
Puissance thermique récupérable (en kW)	1033,6	4755,9
Rendement échangeur	0,95	0,95
Puissance thermique produite(en kW)	981,9	4518,105
Energie thermique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	7855,2	36144,8
RECETTE		
Prix Vente / Autoconsommation de chaleur (€/MWh)	19,00 €	19,00 €
Montant des recettes par an	149 249 €	686 751 €
INVESTISSEMENT		
Coût de l'échangeur (en €HT)	32 787,7 €	65 907 €
Coût de mise en place	ND	ND
Coût annuel d'exploitation	ND	ND

ND : non déterminé – fonction de l'intégration du système

4. CONCLUSIONS

FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ETUDE DE CAS N°1 :

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

➤ Lieu d'implantation pertinent de l'échangeur à chaleur : Gains de fumées

Réactifs en traitement sec des fumées	Implantation de l'échangeur à favoriser	Type de fluides à prendre en considération
BICAR	Post-traitement : Température des fumées de 180°C	Echangeur fumées / eau ou fumées / huile
Chaux	Aval électrofiltre / Amont réacteur : Refroidissement des fumées 250°C → 140°C	Echangeur fumées / eau

Les limites de la récupération d'énergie sur les fumées en post-traitement :

- Point de rosée acide (T= 130 C)
- Panache de vapeur d'eau en sortie cheminée (dans une moindre mesure)

HYPOTHESE 1: 180 C → 135 C

Valorisation thermique de la chaleur sensible (au-dessus du point de rosée acide) des fumées

HYPOTHESE 2: 180 C → 90 C

Valorisation thermique de la chaleur sensible et latente (en-dessus et en-dessous du point de rosée acide => condensation)

➤ Type d'échangeur à favoriser : Encombrement à prévoir pour un échangeur de 1000 kWth ≈ 50 m³ (avec marges)

	Types d'échangeur	Points forts	Inconvénients	Coût
Hypothèse 1	Echangeur à tubes ailetés classique	- Simplicité de conception - Surface d'échange importante	- Nettoyage / Démontage difficile - Fort encombrement - les ailettes favorisent le dépôt de particules encrassantes	-
	Echangeur à Caloducs	- Efficacité élevée - Limite la présence de point froid - Légèreté / Compacité	- Encrassement - Technologie mature mais peu de retour sur expérience en France	+
Hypothèse 2	Echangeur en matière inoxydable	Idem que pour échangeur à tubes standard	Idem que pour échangeur à tubes standard	++

Suite FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°1 :

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

- **Le potentiel de récupération d'énergie sur les fumées d'incinération par échangeur en post-traitement est dans notre cas d'étude le suivant :**

Hypothèse 1 (180°C→135°C) : Eth = 8 269 MWh (soit 3% de E_{PCI} totale)
Hypothèse 2 (180°C→90°C) : Eth = 38 047 MWh (soit 14% de E_{PCI} totale)

On notera que l'énergie issue du changement de phase en condensation (hypothèse 2) apporte une énergie phénoménale et qu'il est donc très intéressant de la récupérer.

Néanmoins, cette récupération demande l'emploi de matériaux nobles qui vont augmenter le cout d'investissement, ainsi que la mise en place d'une récupération du condensat par l'installation d'un système qui permet son drainage et aussi le traitement de ce condensat en amont de son rejet. L'installation d'un tel dispositif représente une masse considérable à prendre en compte dans le bilan. L'hypothèse n°1 est donc bien plus facile en termes de mise en œuvre et d'exploitation sur site.

En effet, les problématiques liées à une condensation des fumées (hypothèse 2), en termes de maintenance, de performance et de coût, restent tout de même des freins considérables à la mise en œuvre d'un tel projet.

- **Analyse économique de l'étude :**

Afin de percevoir un gain financier plus intéressant et d'augmenter l'efficacité énergétique de l'installation, il est plus anantageux de privilégier une utilisation interne de la chaleur ou de l'électricité (cf fiche n°3) valorisée.

Il convient tout de même de souligner que dans le cas d'une vente de chaleur à un client extérieur (≈19 €/MWh), les recettes engendrées sont très intéressantes, rendant de tels projets économiquement viables avec des temps de retour sur investissement satisfaisants.

	Cas d'une UVE (100 000 t/an)	
	Hypothèse 1	Hypothèse 2
Puissance thermique récupérable (en kW)	1033,6	4755,9
RECETTE		
Montant des recettes par an	149 249 €	686 751 €
INVESTISSEMENT		
Coût de l'échangeur (en €HT)	32 787,7 €	65 907 €
Coût de mise en place et d'exploitation	ND	ND

ND : non déterminé – fonction de l'intégration du système



A la vue du déclin actuel de la conjoncture énergétique et économique, la démarche entreprise par les exploitants des UVE montre une constance dans la démarche de recherche de performance dans le domaine de la thermique et de l'énergétique qui, nous le savons, doit progresser sans cesse pour trouver des solutions nouvelles pour améliorer les processus qui permettront d'atteindre une meilleure efficacité énergétique. La mise en place d'une boucle thermique de récupération via des échangeurs thermiques est sans nul doute une bonne solution pour arriver à ces performances.

A l'heure actuelle où les économies d'énergie (et donc de dépenses) et la protection de l'environnement sont au cœur des préoccupations mondiales, l'air chaud qui s'échappe d'une conduite d'extraction et qui se diffuse dans l'atmosphère est un processus non satisfaisant.

Même si un récupérateur n'est pas toujours rentable dans le sens souhaité par les financiers qui exigent des temps de retour sur investissement toujours plus courts, en aucun cas un récupérateur ne représente une dépense, puisque son investissement se récupère toujours sur sa durée de vie par les économies d'énergie qu'il génère.

Pour conclure, nous savons pertinemment que la globalité d'un projet tient sur 4 points, à savoir une bonne conception des échangeurs, une bonne réalisation des études thermiques et énergétiques en amont, un montage sur site dans les règles de l'art ainsi qu'un suivi de l'installation 'en charge' (pour maîtriser les problèmes de fuite, d'usure et d'encrassement), c'est indispensable pour obtenir les performances souhaitées d'une installation.

Par le fait que nous sommes au commencement d'une révolution énergétique, et ceux suite aux différents problèmes liés à l'exploitation du nucléaire (cf. Fukushima) et à la demande toujours plus grande en énergie, mais aussi par la course à l'autarcie énergétique, aucun financier ne s'engagerait à prédire l'évolution des prix de l'énergie dans 20 ans.

Pour une nouvelle installation, le placement d'une boucle thermique de récupération représente donc, dans la plupart des cas, un investissement sûr en rentabilité.

Il faut donc investir dans la technologie dès aujourd'hui pour assurer une activité pérenne pour demain.

5. ANNEXE : METHODE ET EVALUATION DU PRIX D'UN ECHANGEUR TYPE BATTERIES A AILETTES

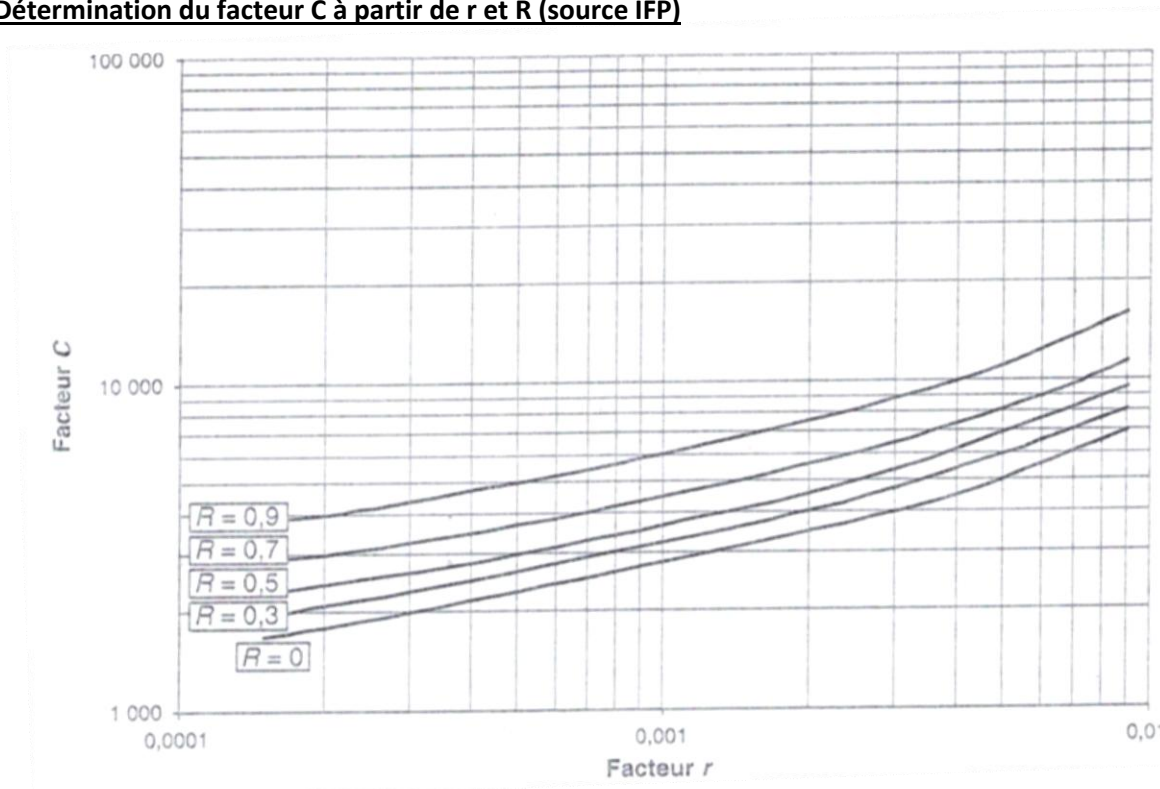
Méthode de calcul:

Le prix de base d'un échangeur de type aëroréfrigérant (batterie à ailette) se calcul à partir de l'équation suivante (qui donne le prix de base en Euro pour l'année 2000) :

$$\text{Prix de base} = 0.35 * C * S$$

C étant le coefficient de cout et S la charge calorifique réduite. Le coefficient C est calculé à partir de l'abaque ci-dessous est dépend des valeurs de R et r qui sont respectivement le rapport thermique (rapport de la différence de température subit par le fluide et de la différence de température entre l'entrée fluide et l'entrée des fumées) et la résistance globale (résistance de film et d'encrassement).

Détermination du facteur C à partir de r et R (source IFP)



La résistance globale est donnée dans le tableau suivant :

	Coefficient de film r_f	Coefficient d'encrassement r_d	r ($h \cdot m^2 \cdot ^\circ C / kcal$)
Réfrigération :			
eau	0,00016	0,0002	0,00036
solutions aqueuses	0,0002	0,0004	0,0006
GPL	0,0004	0,0002	0,0006
hydrocarbures légers	0,0005	0,0003	0,0008
hydrocarbures moyen :			
viscosité moyenne 1 cPo	0,0010	0,0004	0,0014
viscosité moyenne 5 cPo	0,0032	0,0006	0,0038
viscosité moyenne 10 cPo	0,0050	0,0008	0,0058
Condensation :			
vapeur	0,0002	0,0001	0,0003
ammoniac	0,00028	0,0002	0,00048
GPL	0,0006	0,0002	0,0008
hydrocarbures légers	0,0008	0,0003	0,0011
naphta léger	0,0010	0,0004	0,0014
naphta lourd	0,0014	0,0004	0,0018
essence	0,0008	0,0002	0,0010
gas oil	0,0014	0,0004	0,0018

(Source : IFP)

Valeurs usuelles de r_i et r_d (et r) (Source IFP)

FACTEUR CORRECTIFS DE PRIX DES BATTERIES A AILETTES (Source: IFP)

Influence de l'épaisseur des tubes		
épaisseur des tubes (mm)	BWG (Birmingham Wire Gauge)	Fe
2,77	12	1
2,11	14	0,9
1,65	16	0,8
1,24	18	0,7

Influence de la pression	
Pression (bar)	Fp
<10	1
10 à 20	1,03
20 à 30	1,06
30 à 50	1,1
50 à 75	1,13
75 à 100	1,15
100 à 150	1,2

Influence de la longueur des tubes	
Longueur des tubes (m)	Fl
12	0,9
10	1
8	1,05
6	1,12
5	1,15

Influence du matériau des tubes	
Matériaux des tubes (ailettes en aluminium)	Fm
Acier ordinaire	1
Aluminium 3 S	1,2
Laiton d'aluminium	1,15
Inox 304	1,6
Inox 321	1,65
Inox 316	1,75
Monel	2

Influence du nombre de rang	
Nombre de rangée	Fn
3	1,25
4	1,15
5	1,05
6	1
8	0,9
10	0,85

Il faut alors, pour calculer le prix définitif de l'échangeur, multiplier le prix de base de l'échangeur (calculé plus avant) par le produit de chaque facteur correctif :

$$\text{Prix de l'échangeur} = \text{Prix de base} \cdot F_e \cdot F_p \cdot F_l \cdot F_n \cdot F_m$$

Maintenant que la méthode de calcul du prix de l'échangeur a été décrite, nous allons l'utiliser pour les 2 cas d'étude retenue. Ce calcul donnera **un ordre d'idée de prix de l'échangeur** à prévoir plutôt qu'un cout d'investissement précis.

De plus, Le **cout de mise en place d'un échangeur** est très variable car il dépend directement de la facilité/difficulté d'intégration sur site et du temps à prévoir pour sa mise en place. Par expérience on sait que jamais rien ne se passe comme prévu lors d'une intégration (problème de place pour les intégrateurs, rajout de conduits, rajout de fixation), nous ne prendrons donc pas part à cette évaluation de cout de mise en place qui est totalement spécifique à chaque UIOM et doit être évaluée au cas par cas avec de nombreuses données et visites *in situ*.

Calcul :

HYPOTHESE 1 - RECUPERATION SENSIBLE

- Calcul du rapport thermique (R) :

$$R = \frac{(T_{e_eau} - T_{s_eau})}{(T_{e_eau} - T_{e_fumée})} = \frac{132,5 - 170}{132,5 - 180} \approx 0,789$$

- Calcul de la résistance global (r) :

$$r = r_i + r_d = 0,00016 + 0,0002 = 0,00036$$

- Evaluation du coefficient de cout (C) :

Ayant les valeurs de R et r on obtient alors par lecture sur l'abaque : $C \approx 4000$.

- Calcul de la charge calorifique réduite (S) :

$$S = \frac{Q \text{ [Mcal/h]}}{|(T_{e_eau} - T_{e_fumée})|} = \frac{1,0336}{|(132,5 - 180)|} \approx 18,72$$

- Calcul du prix de base :

$$\text{Prix de base} = 0,35 * C * S = 0,35 * 18,72 * 4000 \approx \mathbf{26\ 205\ €}$$
 (basée sur l'année 2000)

- Calcul du prix de l'échangeur :

$$\text{Prix de l'échangeur} = \text{Prix de base} * F_e * F_p * F_l * F_n * F_m$$

On suppose une valeur de 1,65 mm d'épaisseur de tube => $F_e = 0,8$

On suppose que la pression est inférieure à 10 bar => $F_p = 1$

On suppose une longueur des tubes égal ou inférieur à 5m => $F_l = 1,15$

On suppose un nombre de rangée supérieur à 10 => $F_n = 0,85$

Pour les matériaux nous retiendrons 2 cas:

1- Acier ordinaire => $F_m = 1$

2- Acier Inox 304 => $F_m = 1,6$

Ces deux derniers cas donnent deux sommes de facteurs correctifs de prix qui sont:



$$1- F = 0,8 * 1 * 1,15 * 0,85 * 1 = 0,782$$
$$2- F = 0,8 * 1 * 1,15 * 0,85 * 1,6 = 1,2512$$

C'est à dire un prix final de l'échangeur estimé à :

Pour le cas 1 => Prix échangeur = $0,782 * 26205 \approx 20\,492,3 \text{ €}$
Pour le cas 2 => Prix échangeur = $1,2512 * 26205 \approx 32\,787,7 \text{ €}$

HYPOTHESE 2 - RECUPERATION SENSIBLE ET LATENTE (CONDENSATION)

- Calcul du rapport thermique (R) :

$$R = \frac{(T_e \text{ eau} - T_s \text{ eau})}{(T_e \text{ eau} - T_e \text{ fumée})} = \frac{85 - 130}{85 - 180} \approx 0,47$$

- Calcul de la résistance global (r) :

$$r = r_i + r_d = 0,00016 + 0,0002 = 0,00036$$

- Evaluation du coefficient de cout (C) :

Ayant les valeurs de R et r on obtient alors par lecture sur l'abaque : $C \approx 2800$

- Calcul de la charge calorifique réduite (S) :

$$S = \frac{Q \text{ [Mcal/h]}}{|(T_e \text{ eau} - T_e \text{ fumée})|} = \frac{4,7559}{|(85 - 180)|} \approx 43$$

- Calcul du prix de base :

$$\text{Prix de base} = 0,35 * C * S = 0,35 * 43 * 2800 \approx 42\,140 \text{ € (basée sur l'année 2000)}$$

- Calcul du prix de l'échangeur :

$$\text{Prix de l'échangeur} = \text{Prix de base} * F_e * F_p * F_l * F_n * F_m$$

On suppose une valeur de 1,65mm d'épaisseur de tube => $F_e = 0,8$

On suppose que la pression est inférieure à 10 bar => $F_p = 1$

On suppose une longueur des tubes égal ou inférieur à 5m => $F_l = 1,15$

On suppose un nombre de rangée supérieur à 10 => $F_n = 0,85$



Pour les matériaux nous retiendrons 3 cas:

- 1- Acier Inox 304=> $F_m=1,6$
- 2- Acier Inox 316 => $F_m=1,75$
- 3- Monel => $F_m=2$

Ces trois derniers cas donnent trois sommes de facteurs correctifs de prix qui sont:

- 1- $F = 0,8*1*1,15*0,85*1,6 = 1,2512$
- 2- $F = 0,8*1*1,15*0,85*1,75 = 1,3685$
- 3- $F = 0,8*1*1,15*0,85*2 = 1,564$

C'est à dire un prix final de l'échangeur estimé à :

- Pour le cas 1 => Prix échangeur = $1,2512*42\ 140 \approx 52\ 725,6\text{€}$
- Pour le cas 2 => Prix échangeur = $1,3685*42\ 140 \approx 57\ 668,6\text{€}$
- Pour le cas 3 => Prix échangeur = $1,564*42\ 140 \approx 65\ 907\text{€}$



**PROCÉDES DE RÉCUPÉRATION / VALORISATION DES ÉNERGIES
À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE
ÉTAT DES CONNAISSANCES**

**FICHE N°2 :
ETUDE DE CAS DE LA VALORISATION D'ENERGIE THERMIQUE
BASSE TEMPERATURE SUR LES MOTEURS BIOGAZ**



Sommaire

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS.....	3
2. DESCRIPTION DU MOTEUR BIOGAZ TYPE.....	4
3. ETUDE DE CAS SUR LA VALORISATION DES REJETS THERMIQUE D'UN MOTEUR BIOGAZ	5
3.1. PRINCIPES GENERAUX DE L'ETUDE.....	5
3.2. QUANTITE D'ENERGIE DISPONIBLE ET NIVEAUX DE TEMPERATURE.....	6
3.3. QUELLES TYPES DE TECHNOLOGIES D'ECHANGEUR SONT A FAVORISER ?	8
4. LES DIFFERENTS EXEMPLES D'UTILISATION	9
4.1. LA VALORISATION THERMIQUE DU BIOGAZ EN STEP.....	9
4.2. LE TRAITEMENT THERMIQUE IN SITU DES LIXIVIATS	12
4.3. LA PRODUCTION D'ELECTRICITE	18
5. CONCLUSIONS	21



1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

Dans le cadre de la récupération et valorisation des énergies à bas niveau de température, le pouvoir énergétique contenu dans les rejets gazeux (gaz d'échappement) issus d'un moteur ou turbine, ainsi que l'énergie récupérée sur le refroidissement de la machine électrogène, constituent un gisement important d'énergie. La récupération de cette chaleur thermique non utilisée est un vecteur possible dans l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce type d'installation.

Cette fiche s'adresse aux entreprises souhaitant disposer ou disposant d'un système électrogène et désireuses de récupérer l'énergie fatale perdue. Notre étude d'applicabilité se focalisera tout particulièrement sur la valorisation de l'énergie thermique provenant d'un moteur fonctionnant au biogaz issue d'une installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND) ou d'une étape de méthanisation (déchets fermentescibles). En effet, cette technologie en pleine expansion constitue un enjeu majeur dans la promotion des énergies renouvelables. Par ailleurs, cette analyse sera intimement liée à l'analyse de cas pratiques des différentes technologies d'échangeurs de chaleur disponibles pour transférer ce potentiel énergétique.

D'autre part, nous porterons aussi attention aux différentes manières d'utiliser cette source d'énergie thermique. Pour ce faire, nous distinguerons deux principaux cas d'utilisation :

- ✓ Récupération d'énergie thermique pour une utilisation in situ : en ISDND (traitement des lixiviats) et en STEP (STation d'ÉPuration des eaux usées)
- ✓ Valorisation de la chaleur en énergie électrique (machine ORC ou Stirling).

La présente fiche est organisée comme l'indique le plan suivant :

Dans un premier lieu, nous présentons les caractéristiques du moteur biogaz type sur lequel nous basons notre analyse. Par la suite, nous évaluons les quantités de chaleur et les gammes de températures mises en jeu. Par ailleurs, nous présentons les différentes technologies d'échangeur à mettre en valeur dans ce type d'installation. Enfin, nous effectuons une analyse financière du système de valorisation énergétique associé à l'utilisation qui en résulte.

2. DESCRIPTION DU MOTEUR BIOGAZ TYPE

Divers équipements permettent de valoriser le biogaz. Les trois principales technologies sont les suivantes :

- Les moteurs électrogènes ;
- Les microturbines électrogènes ;
- Les turbines électrogènes (installation >4MW).

De manière générale, les moteurs disposent d'un meilleur rendement tandis que les turbines permettent une meilleure flexibilité de l'installation (un taux de CH₄ minimum de fonctionnement plus faible et une plus grande disponibilité).

Dans le cadre de la présente étude, nous prendrons en compte les caractéristiques qui suivent pour le moteur au biogaz étudié : (Source : GE Jenbacher JGC 316 GS)

Caractéristiques du biogaz utilisé :

- PCI estimé du biogaz : 4 kWh/m³
- Débit de biogaz : 524 Nm³/h

Caractéristiques du moteur à pleine charge:

- Puissance PCI amenée : 2 096 kW
- Puissance mécanique : 861 kW
- Puissance électrique produite : 834 kWé
- Nombre de cylindres : 16
- Cylindrée du moteur : 39,93 L
- Rapport de compression : 11,8
- Vitesse de Rotation nominale : 1500 tr/min
- Rendement électrique : 39,8 %
- Disponibilité : 8 060 h

Caractéristiques des gaz d'échappement :

- Débit volumique des fumées humides: 3 468 Nm³/h
- Température à pleine charge : 508 °C
- Teneur en CO : 1 200 mg/Nm³
- Teneur en NOx : 525 mg/Nm³
- Le Cp (capacité calorifique) des fumées : 1,26 kJ.m⁻³.°C



Caractéristiques de production de biogaz : (Cas d'une ISDND traitant 40 000 à 50 000 t/an)

- Production de biogaz : 500 Nm³/h
- Production moyenne de lixiviats : 3 000 m³/an (0,34 m³/h)

3. ETUDE DE CAS SUR LA VALORISATION DES REJETS THERMIQUE D'UN MOTEUR BIOGAZ

3.1. PRINCIPES GENERAUX DE L'ETUDE

Dans le cadre de notre analyse, nous sommes en présence d'une installation de valorisation électrique du biogaz avec un moteur couplé avec un alternateur. Dans l'objectif d'une amélioration de l'efficacité énergétique du système, la mise en place d'une cogénération pour récupérer la chaleur dégagée par le moteur est possible.

- **Fonctionnement d'une unité de valorisation du biogaz au sein d'une ISDND**

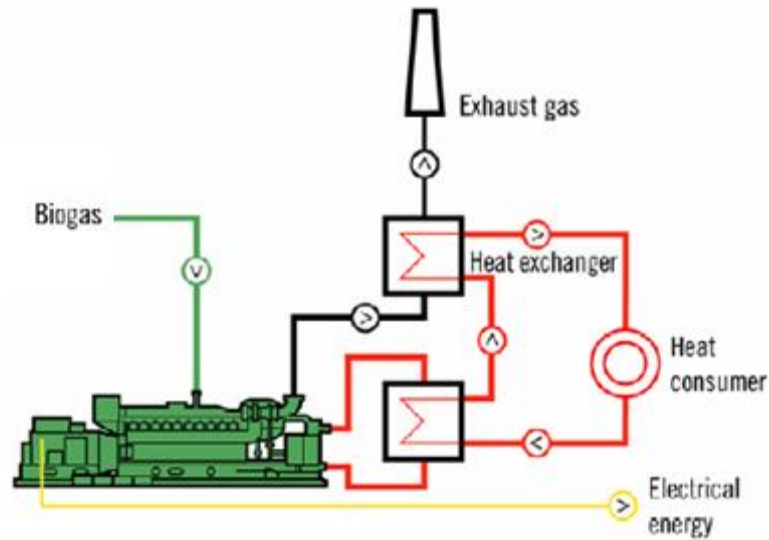
Le biogaz est issu de la fermentation de matière organique en l'absence d'oxygène. Le gaz émis lors de cette fermentation possède un taux élevé de méthane et constitue donc une énergie renouvelable intéressante à utiliser comme alternative au gaz naturel, qui est une énergie fossile. Dans la plupart des cas, le biogaz récupéré doit subir un traitement afin d'augmenter sa teneur en CH₄ et d'éliminer des composants nocifs au fonctionnement du moteur. Une fois ce traitement effectué, le biogaz peut être utilisé pour alimenter un moteur ou également une turbine.

Dans notre étude, nous avons choisi de prendre en compte un gaz à faible teneur en CH₄ (≈40%), ce qui influe sur la puissance PCI développée par le moteur. Cette valeur de 40% correspond généralement à la teneur basse garantie en méthane du biogaz admissible par le moteur (les machines électrogènes peuvent accepter cependant des biogaz à partir d'une teneur minimale en CH₄ de 30 à 35%). Par conséquent, nous nous plaçons dans une position relativement défavorable avec un biogaz de « faible » qualité.

De manière générale, il est nécessaire de mettre en place un système pour refroidir le moteur afin de prévenir une surchauffe et une détérioration de celui-ci. Ce refroidissement peut s'effectuer soit par l'intermédiaire de cellule aérorefrigérante (ou dispositif similaire) soit par la mise en place d'échangeurs à chaleur dans le but de valoriser cette énergie. Bien entendu, la deuxième solution est à préconiser compte tenu des coûts actuels de l'énergie.

Au niveau de notre étude de cas, nous pouvons identifier plusieurs sources d'énergie thermique fatale pour l'implantation d'un échangeur à chaleur (voir schéma ci-dessous):

- Les gaz d'échappement
- Intercooler
- Eau de refroidissement du bloc moteur
- Circuit lubrifiant (huile)



Fonctionnement d'une unité de cogénération au biogaz (source GE Energy)

3.2. QUANTITE D'ENERGIE DISPONIBLE ET NIVEAUX DE TEMPERATURE

Remarque : Les calculs suivants s'appliquent au moteur biogaz type.

En moyenne, 50 % de l'énergie thermique est récupérée sur les gaz d'échappement et 25 % sur le circuit d'eau de refroidissement, le restant l'étant sur le circuit d'huile et l'intercooler.

Nous pouvons distinguer différentes **gammes de température**, correspondant à des calories valorisables par cogénération sur un moteur biogaz. (Source : Fiche technique PRISME n°4 : Cogénération-Trigénération, IEFP)

- 400 - 500 °C : gaz d'échappement
- 30 - 80 °C : intercooler (Refroidissement air entrée chambre de combustion)
- 75 - 120 °C : Eau de refroidissement bloc moteur
- 75 - 95 °C : Circuit des lubrifiants.



• **Exemple de calcul sur gaz d'échappement**

La récupération de l'énergie des fumées s'effectue par un refroidissement de celles-ci partant d'une température de 508°C jusqu'à une température d'exhaure de 180°C afin d'éviter tout risque de corrosion provoqué par la condensation des fumées.

Il est donc possible de récupérer une puissance théorique d'une valeur de **398 kW** (soit ~19 % de la Puissance total PCI).

$$(3\ 468\ \text{Nm}^3/\text{h} / 3\ 600) \times 1,26\ \text{kJ.m}^{-3}.\text{°C}^{-1} \times (508\text{°C} - 180\text{°C}) = 398\ \text{kW}$$

Cette valorisation permettrait une production d'énergie thermique avec une disponibilité de 8000h atteignant **3 184 MWh**.

$$398\ \text{kW} \times 8000\text{h} = 3\ 184\ \text{MWh}$$

Nota : Nous obtenons dans notre calcul une valeur inférieure à celle garantie par le constructeur. Nous prendrons en compte dans la suite de notre étude les valeurs constructeurs présentes dans le tableau ci-dessous.

• **Exemple de calcul sur boucle refroidissement moteur**

En ce qui concerne la valorisation d'énergie thermique au niveau du circuit de refroidissement du moteur (moteur + huile + intercooler HT) nous pouvons effectuer le calcul suivant :

Débit d'eau x Cp eau glycolée x ΔT

$$\text{Soit } (22,1\ \text{m}^3/\text{h} / 3\ 600) \times 3\ 684\ \text{kJ.m}^{-3}.\text{°C}^{-1} \times (90\text{°C} - 70\text{°C}) = \mathbf{452\ \text{kW}}$$

Une puissance de **452 kW** est disponible soit une énergie récupérable de **3 616 MWh** (soit ~22 % de la Puissance total PCI)

Tableau récapitulatif des puissances récupérables : (Source GE Energy: Jenbacher JGC 316 GS)

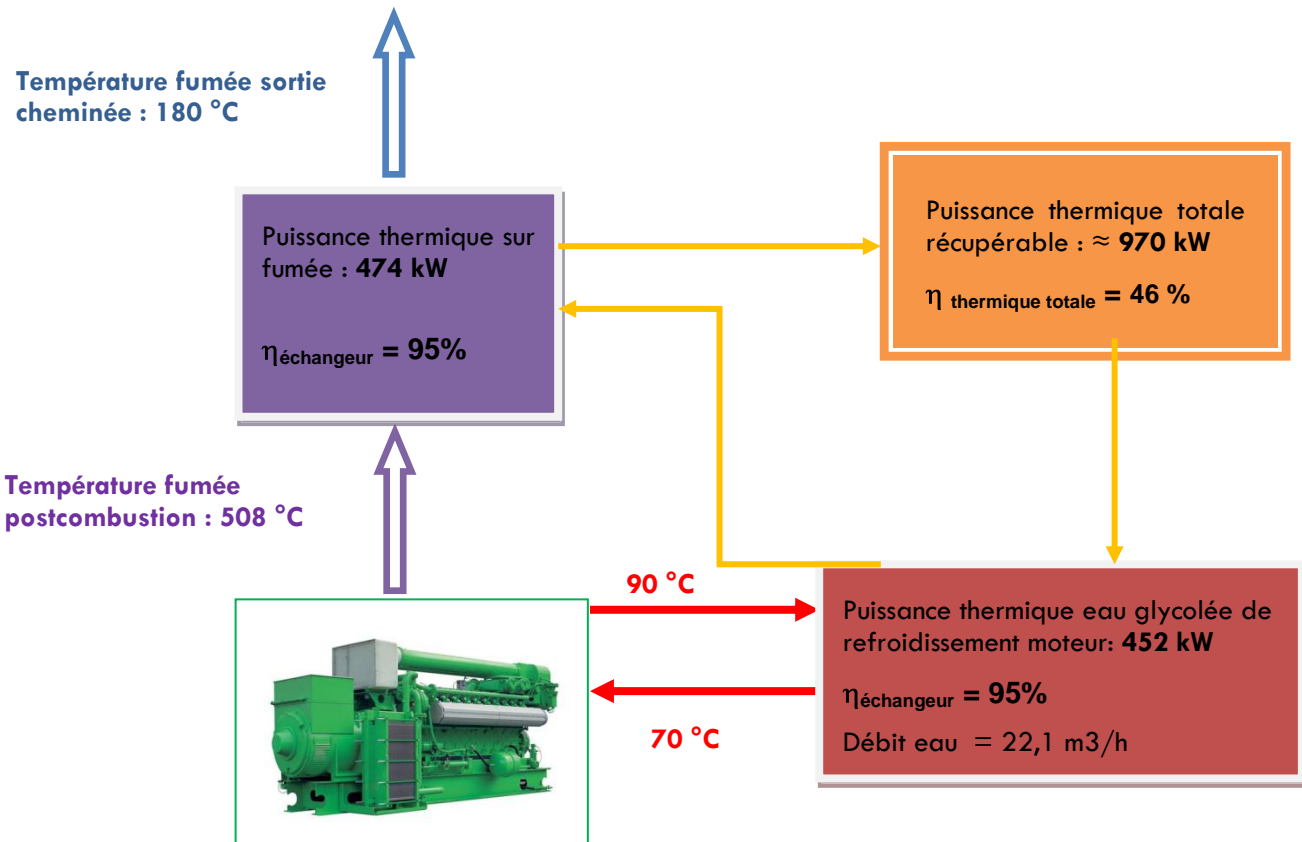
Implantation de l'échangeur	Puissance Thermique	% Puissance PCI Totale	Energie Thermique
Mélange (Intercooler HT+BT)	≈ 160 kW	7,6 %	1 280 MWh
Huile	≈ 90 kW	4,3 %	720 MWh
Eau refroidissement moteur	244 kW	11,6 %	1 952 MWh
Gaz échappement	474 kW	22,7 %	3 792 MWh
TOTAL	≈ 970 kW	≈ 46 %	≈ 7 750 MWh

Ramené en m³ de biogaz, le potentiel total d'énergie récupérable est de :

$$\mathbf{1,94\ \text{kWh/m}^3\ \text{de biogaz (40\% CH}_4\text{)}}.$$

Notes de calcul :
$$\frac{7\ 750\ 000\ \text{kWh}}{500\ \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 8000\ \text{h}} = 1,94\ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3\ \text{de biogaz}}$$

- **Schéma de synthèse :**



3.3. QUELLES TYPES DE TECHNOLOGIES D'ÉCHANGEUR SONT À FAVORISER ?

Les différents types de technologies d'échangeur pour la récupération d'énergie sur les fumées sont décrits dans la fiche n°1.

4. LES DIFFERENTS EXEMPLES D'UTILISATION

Dans ce chapitre, nous étudions les différentes possibilités d'utiliser l'énergie thermique issue de la récupération de chaleur sur un système électrogène fonctionnant au biogaz. Nous focalisons notamment sur trois cas :

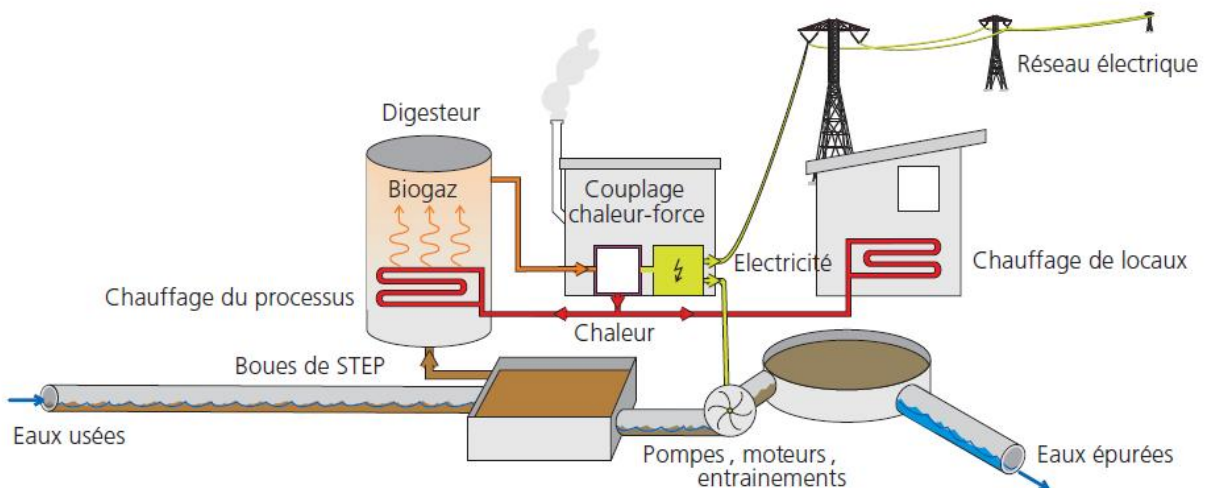
- ✓ Utilisation in situ de l'énergie thermique pour l'alimentation d'un digesteur (STEP)
- ✓ Utilisation in situ de l'énergie thermique pour le séchage des lixiviats (ISDND)
- ✓ Conversion de l'énergie thermique en énergie électrique.

4.1. LA VALORISATION THERMIQUE DU BIOGAZ EN STEP

3.1.1 Description du cycle de valorisation énergétique en STEP

Les eaux usées sont riches en matières organiques. Lors des processus d'épuration des eaux, cette matière organique est récupérée et stockée dans des digesteurs. Du processus de digestion résultent d'une part du biogaz et d'une autre part des boues digérées. Ces dernières sont déshydratées, puis séchées avant d'être utilisées par exemple comme combustible.

Les STEP avec étape de digestion ont une consommation de chaleur importante. La chaleur valorisée par cogénération sur le moteur biogaz permet ici de subvenir aux besoins du digesteur et, dans une moindre mesure, d'assurer le chauffage des locaux.



Valorisation du biogaz en STEP (Source : « le biogaz de STEP » SuisseEnergie)

3.1.2 Utilisation de la vapeur pour le séchage des digestats

Au niveau des STEP ou des bassins de production animale par exemple, les procédures de méthanisation et gazéification s'orientent de plus en plus vers de la cogénération. L'utilisation de la chaleur récupérée à des fins de déshydratation du digestat constitue une solution de traitement durable des excédents. Ce procédé présente plusieurs avantages qui devraient favoriser son essor : conservation de l'azote, gestion de l'intégralité des éléments fertilisants, respect des normes réglementaires d'exportation de la fraction solide (innocuité et stabilisation du produit organique).

De manière générale, l'énergie thermique issue d'un moteur biogaz peut être valorisée sous forme d'eau chaude à 90-80°C.



Boues de STEP Séchées

(Source : « le biogaz de STEP » SuisseEnergie)

La déshydratation d'un digestat doit être divisée en deux étapes afin de limiter les besoins énergétiques et d'être en mesure de déshydrater une quantité significative de digestat :

- Une étape de pré-concentration mécanique et/ou thermique ;
- Une phase de séchage thermique.

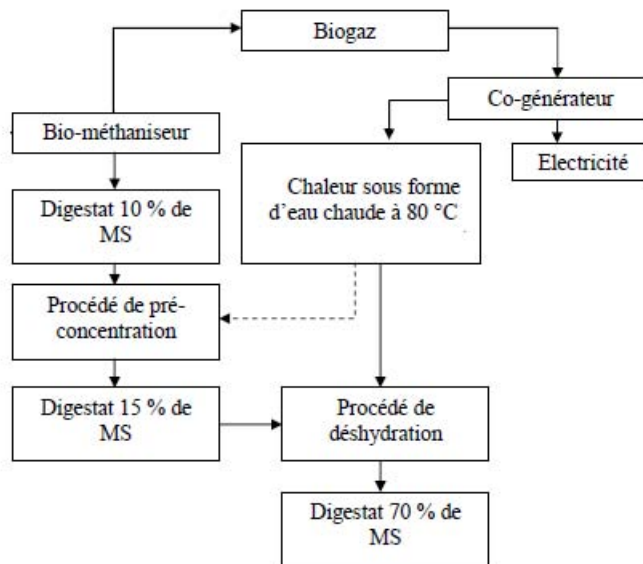


Schéma de fonctionnement d'une unité de déshydratation sur une installation de méthanisation (MS : Matière Solide)

L'intérêt d'une étape de pré-concentration réside dans la réduction des volumes à traiter. De plus, dans le cadre d'un système à séchage direct, la présence d'un produit composé d'au moins 15% de matière solide (MS) est à préconiser. L'inconvénient majeur de ce procédé réside toutefois dans la volatilisation de l'ammoniac qui nécessite dans certaines circonstances un lavage de l'air en aval du procédé.



Ce traitement permet de réduire notablement les coûts de transport. En effet, le digestat liquide est transformé sous la forme d'un résidu sec ne représentant plus que 5 à 10 % du tonnage initial (selon le taux de dégradation des intrants).

En ce qui concerne le séchage des digestats, les différentes techniques disponibles sont étudiées dans la partie 3.2 de l'annexe 1. De manière générale, nous pouvons distinguer trois types de technologies : le séchage par conduction, le séchage par convection et le séchage par rayonnement.

Les consommations énergétiques peuvent être évaluées à environ 1 kWh par kg d'eau évaporée.

Nous pouvons distinguer les données suivantes pour l'analyse technico-économique d'un tel projet en fonction des différentes technologies de déshydratation (Source : ADEME - Méthanisation dans la filière porcine « Séparation de phases, séchage et normalisation d'un digestat » 2010) :

Quantité de digestat à déshydrater (m ³ /an)	3 000			
Procédé de déshydratation	Tapis de séchage	Evapo-concentrateur par CMV	Evapo-concentrateur double effets	Sécheur à palettes
Dispositifs de déshydratation : coûts d'investissement (en k€)				
Décanteuse-centrif.	-	68	68	-
Acidification	-	-	-	15
Pré-concentrateur	50	-	-	50
Tapis de séchage	250	-	-	-
Evaporateur + stripping	-	450	470	-
Sécheur à palette	-	-	-	300
Chaudière à propane	-	-	-	70
Laveur d'air	90	-	-	-
TOTAL déshydratation	390	518	538	435
Coût d'exploitation de ces équipements (en k€)				
	40	52	54	106

La solution du tapis de séchage présente l'investissement le moins couteux. Néanmoins, à partir d'une certaine quantité de digestats supplémentaires à traiter, les disponibilités thermiques peuvent manquer. Dans ce cas, le choix d'un procédé d'évapo-concentration à double effet est à privilégier.

Ces deux procédés ont des performances satisfaisantes qui permettent une utilisation in-situ de l'ensemble de la chaleur valorisée. Par conséquent, la mise en place d'un tel dispositif est à considérer comme un vecteur majeur d'amélioration de l'efficacité énergétique de l'installation, induisant ainsi le droit à l'obtention de la prime à l'efficacité énergétique sur la vente d'électricité (se reporter à la partie 4.3).

4.2. LE TRAITEMENT THERMIQUE IN SITU DES LIXIVIATS

L'utilisation de la chaleur récupérée par cogénération pour traiter les lixiviats produits par le site (ISDND), constitue une solution satisfaisante d'un point de vue technique et économique.

Dans un premier temps, nous pouvons différencier plusieurs types de traitement in-situ des lixiviats :

- Installation d'une station d'épuration interne
- Procédé d'osmose inverse (filtration des molécules d'eau)
- Evapo-concentration (évaporation naturelle accélérée par apport de chaleur) qui sera traitée dans la suite de l'étude.

L'intérêt de ce dernier traitement in-situ réside dans l'utilisation de la chaleur pour évaporer l'eau et gérer séparément la fraction polluante.

- **Description du système technique** (Source : module DCH08 – Nucleos)

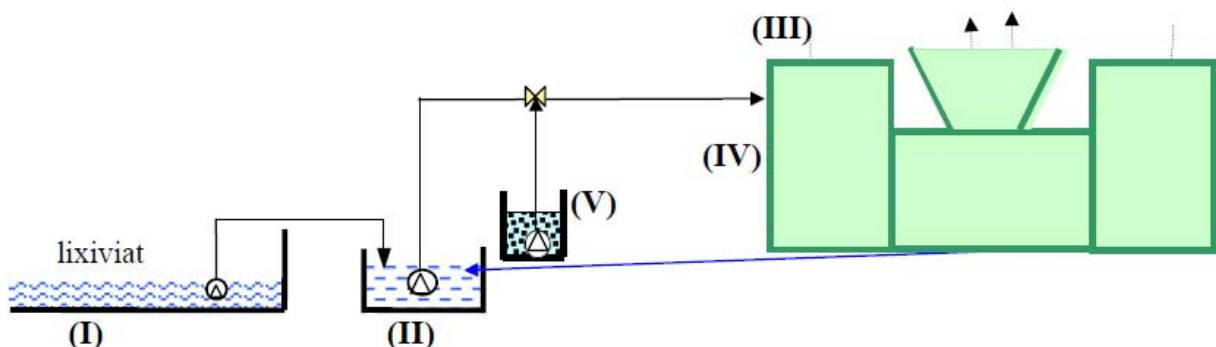
Le système le plus abordable techniquement est le traitement des lixiviats par évapo-concentration en utilisant la chaleur dégagée par le fonctionnement du moteur.

(Pour information, une évapo-concentration utilisant le biogaz directement comme combustible d'un brûleur est également possible.)

L'objectif de ce procédé est de se baser sur le principe d'une ventilation naturelle du plan d'eau et d'accélérer le processus d'évaporation.

Les lixiviats sont projetés dans un module contenant un évaporateur et un dévésiculateur, qui permet de retenir les gouttelettes d'eau susceptibles d'être entraînées dans l'atmosphère.

Le cœur du procédé consiste à réchauffer de l'air et à augmenter les surfaces d'échange pour accélérer l'évaporation « naturelle ». Les lixiviats ne sont pas chauffés afin de réduire les émissions et conserver le principe de l'évaporation similaire à l'évaporation d'un lagunage des lixiviats.



Nous pouvons ainsi décomposer la procédure de traitement comme le présente le schéma précédent :

Les effluents bruts sont stockés dans un bassin (I), équipé d'une pompe.

Les lixiviats sont alors envoyés dans un réservoir « à lots » étanche (II) dont la capacité varie avec le volume d'effluents à traiter et la météorologie locale.

L'effluent est alors projeté dans la partie supérieure du module d'évaporation (III), sur la maille en polyéthylène haute densité (IV) où il s'évapore en partie.

L'excédent, non évaporé, retourne au réservoir à lots (II). Le lixiviat est à nouveau projeté sur la surface d'échange jusqu'à évaporation totale.

Un réservoir de 2 m³ (V), contenant un bactéricide, et muni d'une pompe, est utilisé pour le nettoyage automatisé de la maille du module.



Source: Aeroe - module DCH08 (procédé Nucleos)

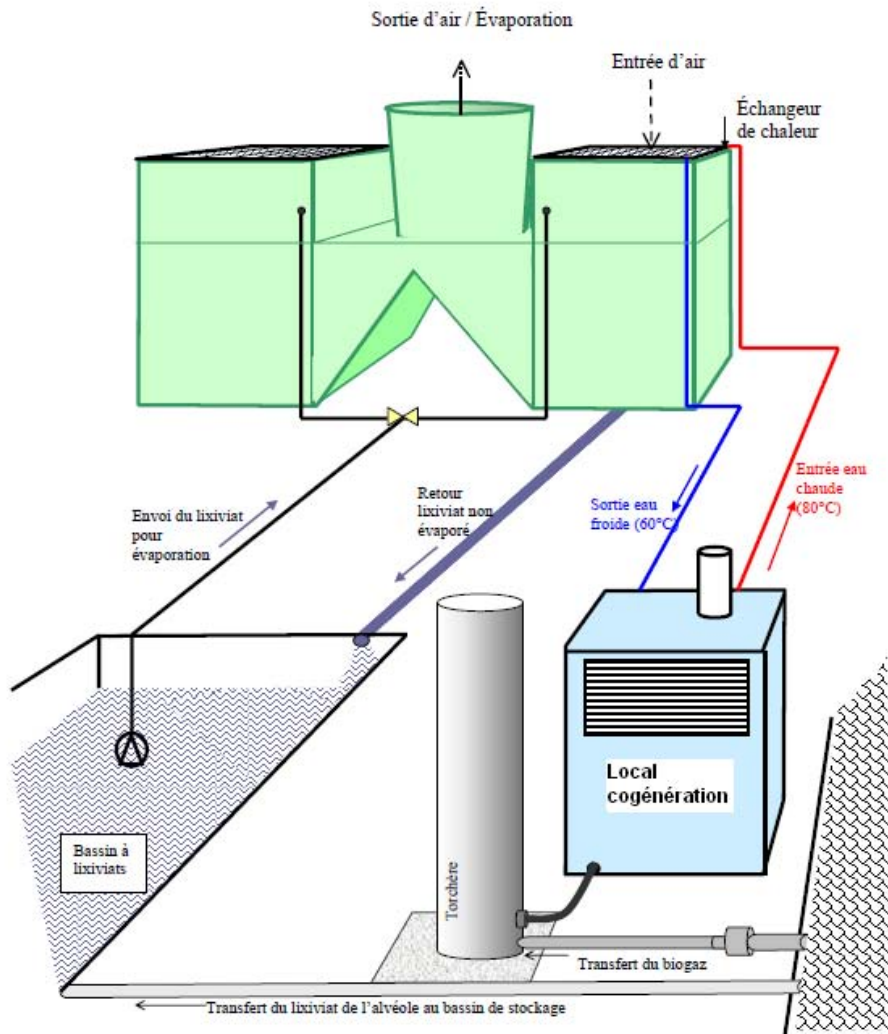


Figure 1 : Schéma de traitement des lixiviats par évapo-condensation (Source: Aeroe - procédé Nucleos)

Dans notre étude, nous prenons en compte un module type : Module DCH08, procédé Nucléos développé par société Aeroe (breveté avec l'IFP). Pour information, il existe d'autres entreprises qui développent ce type de système, tel que la société BIOME France ou RGA Environnement par exemple.

Caractéristiques du module :

- Quantité de lixiviats évaporés par ventilation : 400 m³/an
- Quantité de lixiviats évaporés par ventilation et apport de chaleur (eau chaude) : 600 à 800 m³/an
- Consommation énergie thermique : 300 kWth
- Vitesse ventilateur : 4 m/s
- Régime température eau chaude entrée/sortie module : 90°C/70°C (possibilité de descendre à des températures plus faibles mais au détriment des performances)
- Coût du système de traitement : 122 500 €/module

Il est préférable que la source de chaleur (ici le moteur) soit relativement proche du module d'évaporation afin de limiter les pertes thermiques lors du transport de l'eau chaude.

Références en France du module Nucleos (société Aeroe) : Source PRODEVAL

Société	Ville	Nombre de modules	Type d'effluent
Cave jeanjean	St felix de lodeze	36	Vinicole
Cave calvisson	Calvisson	10	Vinicole
SLMC	Narbonne	30	Chimie
Elevage Allué	Murviel	6	Lisier
SYDOM	Lons le Saunier	2	CET
GURDEBEKE	Lihons	1	CET
VALNORMANDIE	Billy (14)	4	CET
SPEN	Eroudeville	4	CET
SEM GERS	Moncorneil	4	CET
SETOM	La Chapelle Réanville	9	CET
Syndicat Mixte	La Puisaye	8	CET

CET : Centre d'enfouissement technique

- **Remarques sur les conditions et réglementations pour le traitement des lixiviats en ISDND**

Actuellement les lixiviats d'ISDND sont acheminés par camion jusqu'à une station d'épuration, lorsque la station est éloignée et le site non raccordable. La facturation en STEP (station d'épuration des eaux usées) s'effectue généralement par m³ de lixiviats traités.

Toutefois, la volonté de durcissement des contraintes de traitement des lixiviats en ISDND est fortement susceptible d'aboutir à l'élaboration d'un arrêté dans les années futures imposant un traitement in-situ des lixiviats.

- **Estimation des recettes**

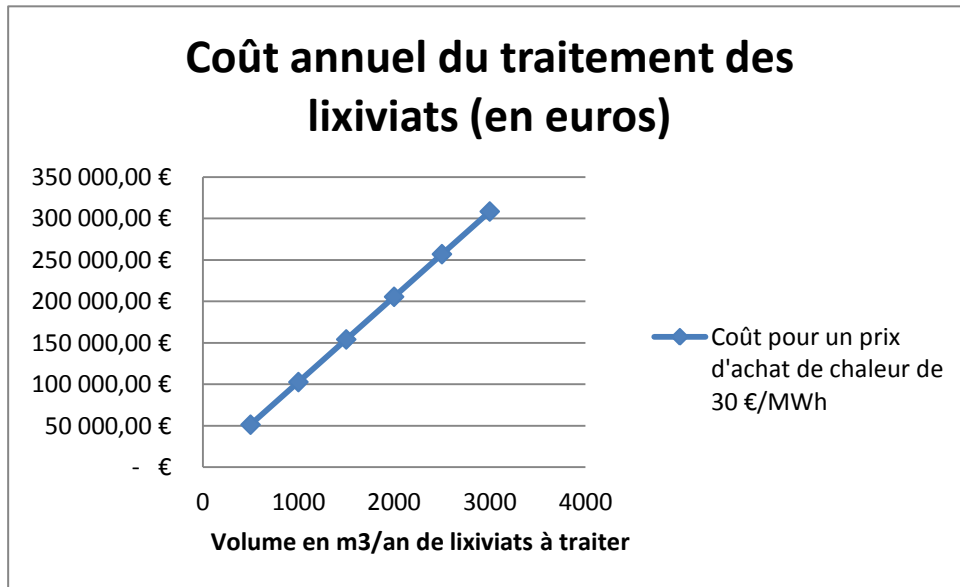
La quantité de lixiviats produite dans les installations de stockage est très variable. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres tels que la température extérieure ainsi que la quantité de pluie annuelle.

De manière générale, le traitement des lixiviats est une nécessité. En effet, ces derniers ont des propriétés très polluantes et sont composés de plusieurs espèces chimiques nocives et acides ainsi que de métaux lourds.

Il est donc important de réduire le volume de ces rejets liquides pour faciliter leur traitement et leur stockage.



Nous pouvons calculer le coût énergétique nécessaire pour assurer ce traitement à partir d'un apport de chaleur issu d'une production d'énergie thermique au gaz naturel, avec un prix d'achat évalué à 30 €/MWh et pour un fonctionnement en continu de 8000h/an. Le graphique ci-dessous indique le montant des économies réalisées lors d'une récupération de chaleur sur le système électrogène :



Dans le cas d'un traitement externe, les lixiviats produits sont acheminés jusqu'à une station d'épuration des eaux usées (STEP). Par conséquent, cela induit d'important frais de transport (représentant 2/3 à 3/4 du coût total) et de traitement. (Source : Fairtec – Suez Environnement)

- **La prime à l'efficacité énergétique**

L'utilisation de cette chaleur perdue pour le traitement des lixiviats peut permettre également de bénéficier d'une prime à l'efficacité énergétique qui induit une augmentation du coût de rachat de l'énergie électrique allant jusqu'à 40 €/MWh. (cf partie 4.3).

- **Investissement**

Dans notre cas d'étude, pour l'installation de deux modules (type Nucleos), il convient de prévoir la décomposition de prix suivante : (*Valeurs observées en 2010*)

Installation de traitement des lixiviats :	
Module Nucleos	245 000 €
Valorisation thermique	100 000 €
VRD et génie civil :	80 000 €
TOTAL (pour les 2 modules) :	425 000 €

• **Retour sur Investissement (Cas d'un moteur biogaz d'une puissance net de 800 kWélec)**

	Biogaz d'ISDND : Quantité de lixiviats à traitement 3000 m3/an	
	Cas SANS prise en compte de la prime à l'efficacité énergétique sur la vente d'électricité	Cas AVEC prise en compte de la prime à l'efficacité énergétique sur la vente d'électricité
Puissance thermique récupérable sur moteur biogaz (en kW)	900	900
Rendement échangeur	0,95	0,95
Puissance thermique produite(en kW)	855	855
Energie thermique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	6840	6840
RECETTE		
Prix traitement des lixiviats en STEP + transport (€/m3)	30,00 €	30,00 €
Montant des économies de traitement des lixiviats par an	90 000,00 €	90 000,00 €
Recettes supplémentaires de la vente d'électricité (+ 40 €/MWh)	- €	256 000,00 €
INVESTISSEMENT		
Nombre de module à mettre en place (800 m3 de lixiviats/module)	4	4
Coût d'un module	122 500,00 €	122 500,00 €
Prix VRD/génie civil, valorisation thermique	200 000,00 €	200 000,00 €
Montant total	690 000,00 €	690 000,00 €
Montant total des intérêts avec un amortissement à 5%	sur 15 ans: 292 165,68 €	sur 5 ans: 91 269,07 €
Coût d'exploitation /an/module (Réactif, pompes de transfert, électricité, ...)	5 000,00 €	5 000,00 €
Totale des dépenses annuelles	85 477,71 €	176 253,81 €
BILAN		
Temps de rentabilité (en années)	14,2	2,5

Dans ce type de projet, il est alors possible d'atteindre un temps de retour sur investissement au alentour de 14 ans ans.

Dans l'hypothèse d'une prise en considération de la prime à l'efficacité énergétique, induisant une augmentation du tarif d'obligation d'achat de l'électricité de 4 c€/kWh, nous pouvons prévoir une augmentation des recettes annuelles de 273 600 €. Par conséquent, nous pouvons évaluer dans ce scénario un temps de retour sur investissement d'environ 3 ans.



4.3. LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Dans le cas où l'utilisation directe de la chaleur ne serait pas possible, la production complémentaire d'électricité est une solution intéressante à étudier. En effet, il existe des tarifs avantageux sur les reventes d'électricité issue d'une source biogaz, qui rendent la production d'électricité financièrement viable.

Aujourd'hui, plusieurs systèmes permettent la conversion d'énergie thermique en énergie électrique.

- **Etude des technologies existantes**

Le détail sur l'étude de la production d'électricité à partir des thermies récupérées est présent dans la fiche n°3.

- **Quantité d'énergie mise en jeu**

L'utilisation de la technologie ORC est à privilégier du fait de retours sur expérience favorables et de performances affichées relativement satisfaisantes. De plus, l'offre sur le marché est plus large pour ces petites puissances.

En considération de la température des gaz d'échappement, il est à favoriser la mise en place de modules fonctionnant à haute température (proposés par la marque Tri-O-Gen ou Enertime par exemple) qui permettent d'atteindre un rendement de conversion énergétique de l'ordre de 20 %. Si l'on prend en compte la récupération sur le circuit de refroidissement du moteur, il faudra alors se diriger vers des modules à basses températures (rendement de l'ordre de 10%).

Dans le cas d'une récupération énergétique s'élevant à une puissance thermique de 800 kW sur le moteur, il est possible d'estimer une puissance électrique résultante d'environ 140 kW à pleine charge. L'installation de ce système nécessite la mise en place d'une boucle de refroidissement avec un régime de fonctionnement de 50 °C en entrée et 35 °C en sortie (utilisation d'une tour de refroidissement).

- **Analyse financière**

Evaluation des recettes de la vente d'électricité :

Dans le cadre de notre étude, nous retiendrons l'utilisation de la technologie ORC, qui est mature et présente les meilleures performances en termes de rendement et de fiabilité.

En ce qui concerne la question du choix entre la vente d'électricité ou l'utilisation en autoconsommation, il est très nettement favorable de vendre l'énergie produite à EDF. En effet, le tarif de rachat est similaire à celui de l'électricité issue des moteurs biogaz, c'est-à-dire compris entre 8,12 et 13,37 c€/kWh selon la nature du biogaz et la puissance de l'installation auquel s'ajoutent une prime à l'efficacité énergétique comprise entre 0 et 4 c€/kWh.

Bien que ce tarif soit avantageux, les rendements du cycle ORC (entre 10 et 20 %) sont trop faibles vis-à-vis de la différence de prix avec une utilisation in situ de la chaleur.

Par conséquent, la conversion en énergie électrique sera à favoriser dans le cas où une utilisation de la chaleur valorisée n'est pas envisageable.



La présence d'une prime à l'efficacité énergétique peut constituer un réel avantage financier à la mise en place d'une valorisation de l'énergie thermique perdue.

Calcul du montant de la prime à l'efficacité énergétique : (Source : Arrêté du 19 mai 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations qui valorisent le biogaz et le rectificateur)

Cette prime à l'efficacité énergétique se base sur la formule du coefficient « V », qui est égal à la somme des énergies thermique et électrique valorisées divisée par 97 % de l'énergie totale produite.

$$V = (E_{th} + E_{élec}) / (0,97 \times E_p)$$

Si l'efficacité énergétique V est inférieure ou égale à 35 %, la prime d'efficacité énergétique est nulle. A partir de 70 %, elle culmine à 0,04 €/kWh. Avec un V compris entre 35 et 70 %, la valeur de la prime est déterminée par interpolation linéaire.

Pour rappel, l'arrêté définit E_{th}, E_{élec} et E_p comme suit :

- E_{th} est l'énergie thermique valorisée autrement que par la production d'électricité, l'autoconsommation ou la transformation des intrants. Pour le calcul de V, seule est comptabilisée l'énergie thermique qui alimente une activité consommatrice en chaleur créée en même temps que l'installation ou vient en substitution d'un moyen de production d'énergie thermique fossile (charbon, gaz, pétrole et leurs dérivés) ;
- E_{élec} est l'énergie électrique produite nette, c'est-à-dire la production électrique totale produite de laquelle on retire la consommation électrique des auxiliaires ;
- E_p est l'énergie primaire en PCI du biogaz en entrée de centrale.

	Cas d'un moteur 800 kWé seul	Cas d'un moteur 800 kWé + ORC 140 kWé
Valeur de l'efficacité énergétique	39 %	46 %
Augmentation du tarif d'obligation d'achat de l'électricité	+ 4,5 €/MWh	+ 12,5 €/MWh

Investissement à prévoir : (valeurs en k€)

Source: "Waste heat recovery projects using Organic Rankine Cycle technology – Examples of biogas engines and steel mills applications" G. David, F. Michel, L. Sanchez (Sept 2011) – ENERTIME FRANCE

	Coût Equipement	Transport	Mise en place	TOTAL
Echangeur de récupération de chaleur	50	5	5	60
Système ORC (160 kWé brut)	350	5	10	365
Tour de refroidissement	25	5	5	35
Equipements mécaniques auxiliaires	10	5	5	20
Génie civil	0	0	20	20
Coût Gestion de projet	0	0	0	30
TOTAL	435	20	45	530 k€

Retour sur investissement

	Cas d'un moteur biogaz
Puissance thermique récupérable (en kW)	900
Rendement brut machine ORC	0,17
Puissance électrique produite brute (en kW)	153
Energie électrique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	1224
RECETTE	
Prix Vente / Autoconsommation d'électricité (€/MWh)	90,00 €
Montant des recettes par an	110 160,00 €
INVESTISSEMENT	
Coût investissement (voir détails ci-dessus)	530 000,00 €
Montant total des intérêts avec un amortissement sur 10 ans à 5%	144 576,68 €
Coût annuel d'exploitation (50 000 €/Mwé/an)	7 650,00 €
Total des dépenses annuelles	75 107,67 €
BILAN	
Temps de rentabilité (en année)	6,8

De manière générale, les temps de retour sur investissement pour la mise en place d'un tel système sont en compris entre 6 et 8 ans. Mais bien sûr, ce montant est très sensiblement lié au prix de rachat de l'énergie électrique et le type de dispositif mis en place.

5. CONCLUSIONS

FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°2

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

- **Sur quels installations récupérées de l'énergie fatale ?**
 - Les moteurs électrogènes ;
 - Les microturbines électrogènes ;
 - Les turbines électrogènes (installation >4MW).

Gammes de température mises en jeu pour le cas d'un moteur biogaz.

- 400 - 500 °C : gaz d'échappement
- 30 - 80 °C : intercooler (Refroidissement air entrée chambre de combustion)
- 75 – 120 °C : Eau de refroidissement bloc moteur
- 75 – 95 °C : Circuit des lubrifiants.

- **Quelle quantité d'énergie thermique valorisable (cas d'un moteur biogaz de 861 kWé) ?**

Puissance Thermique	% Puissance PCI Totale	Energie Thermique
≈ 970 kW (dont 50% sur les gaz d'échappements)	≈ 46 %	≈ 7 750 MWh
Soit 1,94 kWh/m³ de biogaz (40% CH4)		

- **Quelles utilisations de la chaleur valorisée ?**

In-situ : STEP

Utilisation de la chaleur pour alimenter :

- ✓ le digesteur des boues d'épuration et le chauffage des locaux
- ✓ Le séchage des digestats
- ✓

In-situ : ISDND

Traitement des lixiviats par procédé d'évapo-concentration : module type Nucleos ou équivalent.

Caractéristiques du module :

- Quantité de lixiviats évaporés par ventilation et apport de chaleur : 600 à 800 m³/an
- Consommation énergie thermique : 300 kWth
- Régime température eau chaude entrée/sortie module : 90°C/70°C
- Coût du système de traitement : 122 500 €/module

suite FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°2

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

	Biogaz d'ISDND : Quantité de lixiviats à traitement 3000 m3/an	
	Cas SANS prise en compte de la prime à l'efficacité énergétique sur la vente d'électricité	Cas AVEC prise en compte de la prime à l'efficacité énergétique sur la vente d'électricité
Puissance thermique récupérable sur moteur biogaz (en kW)	900	900
RECETTE		
Montant des économies de traitement des lixiviats par an	90 000,00 €	90 000,00 €
Recettes supplémentaires de la vente d'électricité (+ 40 €/MWh)	- €	256 000,00 €
INVESTISSEMENT		
Montant total	690 000,00 €	690 000,00 €
Coût d'exploitation /an/module	5 000,00 €	5 000,00 €
BILAN		
Temps de rentabilité (en années)	14,2	2,5

La production d'électricité

Une récupération de chaleur à de hautes températures (notamment sur les gaz d'échappement) demande l'utilisation d'un dispositif ORC pouvant fonctionner à niveaux de température comparable (marque Tri-O-Gen ou Enertime par exemple).

Tarif de rachat EDF : entre 8,121 et 13,37 c€/kWh + 0 et 4 c€/kWh de prime d'efficacité énergétique.

	Cas d'un moteur biogaz
Rendement brut machine ORC	0,17
Energie électrique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	1224
RECETTE	
Montant des recettes par an	110 160,00 €
INVESTISSEMENT	
Coût investissement (voir détails ci-dessus)	530 000,00 €
Coût annuel d'exploitation (50 000 €/Mwé/an)	7 650,00 €
BILAN	
Temps de rentabilité (en année)	6,8



**PROCÉDES DE RÉCUPÉRATION / VALORISATION DES ÉNERGIES
À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE
ÉTAT DES CONNAISSANCES**

**FICHE N°3 :
TECHNOLOGIES DISPONIBLES POUR
LA VALORISATION ELECTRIQUE DE L'EAU CHAUDE
OU SURCHAUFFEE**



Sommaire

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS.....	3
2. TYPE DE TECHNOLOGIE ETUDIEE ET RENDEMENT	4
3. QUELLE QUANTITE D'ENERGIE EST DISPONIBLE ? QUELLE GAMME DE TEMPERATURE ?	5
4. MAINTENANCE, ENCOMBREMENT ET IMPACT SUR LE PROCESS INDUSTRIEL	10
5. ANALYSE ECONOMIQUE	13
5.1. QUEL EST LE GAIN FINANCER ISSU DE LA PRODUCTION ELECTRIQUE ?	13
5.2. QUELLES SONT LES AIDES OU SUBVENTIONS FINANCIERES PERCEPTIBLES ?	14
5.3. QUEL EST LE MONTANT DES INVESTISSEMENTS A PREVOIR ?	15
5.4. RETOUR SUR INVESTISSEMENT	16
6. CONCLUSIONS	18



1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

Dans le domaine du traitement des déchets et de l'industrie, une proportion d'énergie basse température sous forme d'eau chaude n'est pas valorisée. Dans un contexte d'amélioration permanente de l'efficacité énergétique de ces installations, il paraît nécessaire d'évaluer la faisabilité à récupérer ces énergies à bas niveau de température sous la forme d'une production électrique.

Dans le cadre des contrats de rachat d'énergie électrique par EDF (contrats dit «d'obligation d'achat») ou par d'autres énergéticiens dans le contexte du marché libre, la conversion de cette énergie thermique en énergie électrique est à considérer attentivement pour dégager des recettes et diminuer la facture énergétique. De plus, l'existence de technologies émergentes en France avec un retour sur expérience intéressant hors de nos frontières, permettent de prendre concrètement en considération ces sources d'énergie électrique alternatives.

Nous pouvons clairement distinguer deux sources d'eau chaude intéressantes à étudier :

- l'eau chaude provenant de la récupération thermique réalisée lors des études précédentes (Fiche n°1 et n°2)
- l'eau chaude directement valorisable (réseau de condensats, circuit de refroidissement de process)

Le fil rouge de cette étude d'applicabilité se basera donc sur l'analyse des différentes technologies de production d'électricité en termes de technicité, de rendement, de maintenance et de coûts. Cette comparaison nous permettra de conclure sur le type d'équipement le mieux adaptée à cette utilisation à basse température.

Il conviendra également de définir les aspects financiers d'une utilisation de l'énergie électrique en interne (auto-consommation) et à l'inverse d'une vente sur le réseau.



2. TYPE DE TECHNOLOGIE ETUDIEE ET RENDEMENT

Dans un premier temps, il est utile de faire un inventaire spécifique des différentes unités de production d'énergie électrique à partir d'une source thermique. Nous porterons également une attention particulière aux retours sur expérience disponibles.

Nous pouvons distinguer 3 technologies distinctes à prendre en considération dont le fonctionnement et les particularités techniques ont été développés dans les annexes du rapport:

- ✓ Le turbogénérateur ORC (Annexe 4)
- ✓ Le moteur Stirling (Annexe 8)
- ✓ La conversion thermoélectrique (Annexe 9)

Synthèse :

	Points Forts	Points Faibles
Turbogénérateur ORC	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de problème de cavitation en détente - Bon fonctionnement à basse température - Bonne compacité - Maintenance non exigeante - Bonne durée de vie - Faible vitesse de turbine : couplage direct sur alternateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement électrique modeste (variable entre 9 et 20% selon les fournisseurs et technologies) - Encombrement des aéroréfrigérants
Moteur Stirling	<ul style="list-style-type: none"> - Faible émission de substances polluantes - Performance énergétique similaire à un moteur Diesel - Bonne fiabilité et haute durée de vie - Maintenance réduite - Silencieux 	<ul style="list-style-type: none"> - Taille importante par rapport à la puissance générée - Prix élevé en l'absence d'effet de production en série - Etanchéité difficile du moteur en cas d'utilisation d'hydrogène comme fluide de travail - Inertie au démarrage et à l'arrêt

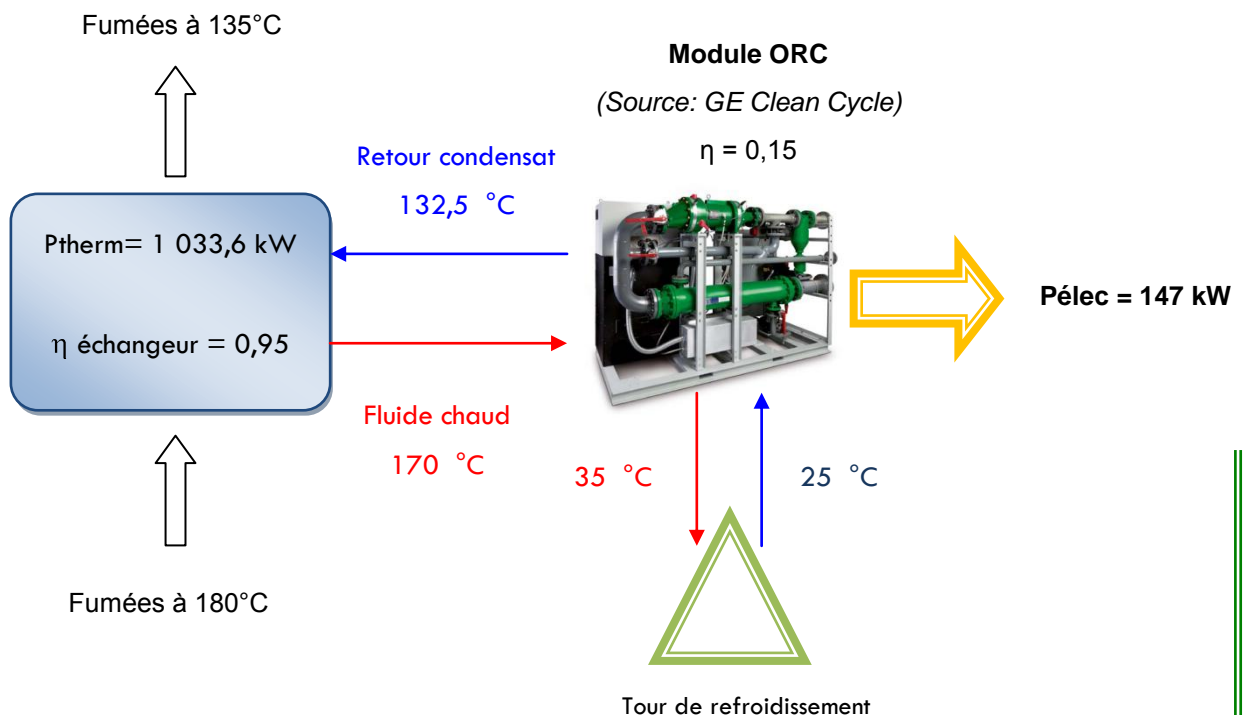
Au regard des retours sur expériences présents et de l'état des connaissances actuelles des différentes technologies, la suite de cette étude de faisabilité se focalisera sur l'utilisation d'un **turbogénérateur ORC**.

3. QUELLE QUANTITE D'ENERGIE EST DISPONIBLE ? QUELLE GAMME DE TEMPERATURE ?

Etant donné que la production d'énergie électrique se fait à hauteur de 10% à 20 % de rendement pour les technologies ORC, la quantité d'énergie électrique valorisable dépend avant tout de la quantité d'énergie thermique captée en amont du procédé.

En ce qui concern, l'évaluation des quantités de chaleur récupérables, les calculs sont développés au niveau des fiches n°1 et n°2.

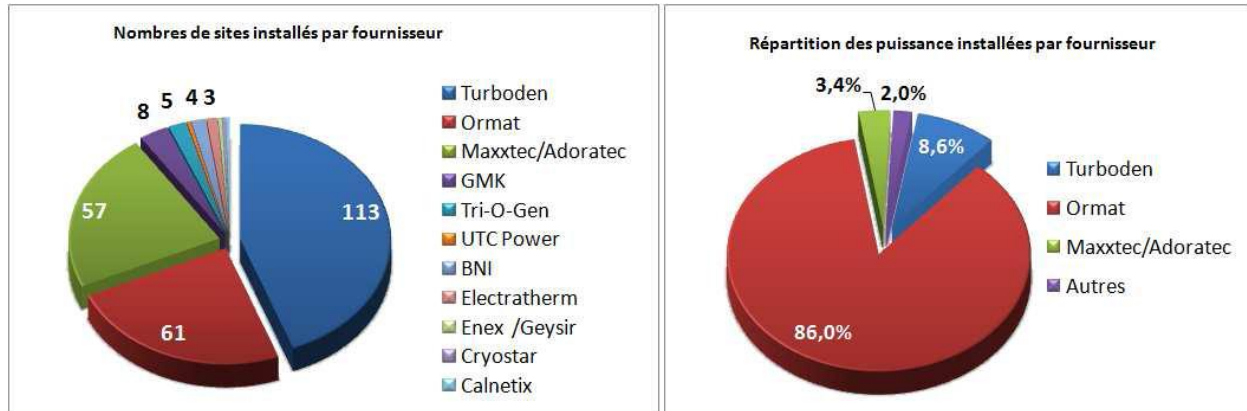
Dans le cadre de cette étude, nous prendrons le cas type de la récupération de chaleur issue de fumée en post traitement d'une UVE, traité au niveau de l'hypothèse 1 de la fiche n°1.



Soit dans le cas ci-dessus, avec une disponibilité annuelle de 8000 heures, une énergie produite de : **1178 MWh/an.**

L'évaluation des gammes de puissances et de températures est intimement lié aux différents systèmes mis au point par les fournisseurs.

En effet, à chaque fournisseur présent sur le marché correspond une gamme de puissance, des températures de fonctionnement et des performances particulières :



Source : Enertime, 2009

Comme le montre ces graphiques, les principaux fournisseurs sont les suivants (liste non exhaustive) :

Manufacturer	Applications	Power range	Heat source temperature	Technology
ORMAT, US	Geothermal, WHR, solar	200 KWe – 72 MWe	150° - 300°C	Fluid : n-pentane
Turboden, Italy	CHP, geothermal	200 KWe – 2 MWe	100 - 300°C	Fluids : OMTS, Solkatherm Axial turbines
Adoratec, Germany	CHP	315 – 1600 KWe	300°C	Fluid: OMTS
GMK, Germany	WHR, Geothermal, CHP	50 KWe – 2 MWe	120° - 350°C	3000 rpm Multi-stage axial turbines (KKK) Fluid: GL160 (GMK patented)
Koehler-Ziegler, Germany	CHP	70 – 200 KWe	150 – 270°C	Fluid: Hydrocarbons Screw expander
UTC, US	WHR, geothermal	280 KWe	>93°C	
Cryostar	WHR, Geothermal	n/a	100 – 400 °C	Radial inflow turbine Fluids: R245fa, R134a
Freepower, UK	WHR	6 KWe - 120 KW	180 - 225 °C	
Tri-o-gen, Netherlands	WHR	160 kWe	>350°C	Turbo-expander
Electratherm, US	WHR	50 KWe	>93°C	Twin screw expander
Infinity Turbine	WHR	250 KWe	>80°C	Fluid: R134a Radial Turboexpander

Sources: Manufacturers websites; Citrin, 2005; Gaia, 2006; Lorenz, 2006; Holdmann, 2007; Schuster, 2009

WHR: Waste Heat Recovery; CHP: Combined heat and power (Cogénération)

La technologie ORC est utilisée de manière fréquente à l'étranger au niveau de la production d'énergie issue de biomasse ou d'installation géothermique.

Au regard des gammes de puissance disponibles, nous pouvons noter que l'utilisation d'un turbogénérateur ORC est destinée aux installations en mesure de dégager une énergie thermique faible à moyenne (unités de 6 kW à 2 MW).

Bien que les gammes de température de fonctionnement d'un cycle ORC soient assez larges, celles-ci se doivent d'être convenablement maîtrisées et contrôlées. En effet, au-delà d'un certain seuil de température, les fluides utilisés peuvent avoir un comportement instable.

De manière générale, chacun des fournisseurs possèdent des systèmes pouvant couvrir un large spectre de puissance et de température.

Néanmoins, il est possible de dégager le fait que ces fournisseurs présentent des performances plus ou moins avantageuses suivant les gammes de puissance et de températures concernées.

Par conséquent, il est intéressant d'étudier en fonction de la puissance thermique disponible la technologie présentant le meilleur rendement ORC.

Par ailleurs, nous pouvons souligner le fait qu'il est plus intéressant en terme de performance de l'installation, d'avoir une température d'entrée de source chaude la plus haute possible.

Nous pouvons prendre pour exemple les performances du système développé par un constructeur français. Pour une même puissance thermique d'entrée comprise entre 5 et 6 MW, il est obtenu les performances suivantes :

Température entrée source chaude	Puissance électrique produite brute	Puissance électrique produite nette
160 °C	700 kW	≈630 kW
180 °C	960 kW	870 kW

A titre d'information, ce module proposé avec son système à refroidissement à air direct (image ci-dessous) est commercialisé à une valeur de 1 650 000 €HT (soit un montant compris entre 1650 et 2300 €HT/kWe brute).



Source : Enertime - Module ORCHID

Dans le cas d'une variation de puissance au niveau de la boucle primaire de l'échangeur (sur gaine des fumées), le débit et la pression du fluide de la boucle secondaire (ORC) s'adapte alors. Il convient tout de même de retenir qu'il est plus intéressant, en termes de souplesse de fonctionnement et de performances, de mettre en place deux petits modules ORC, dont l'un fonctionne à bas régime et l'autre à pleine charge, plutôt qu'un gros système fonctionnant à 50% de charge.

Exemples de régimes de fonctionnement d'une installation ORC (Source : SETEC Novae)

Données de Performances / Régimes	1		2		3	
SOURCE CHAUDE (Evaporateur)						
Température de l'eau en entrée (°C)	138	138	116	116	93	93
Température de l'eau en sortie (+/-5°C)	77	85	78	90	78	78
Débit (L/s) (+/- 10%)	11	14	21	31	66	66
EAU DE REFROIDISSEMENT						
Température de l'eau en entrée (°C)	16	27	16	27	16	27
Température de l'eau en sortie (°C)	26	37	26	37	26	37
Débit (L/s)	56	63	69	70	88	90
PRODUCTION ELECTRIQUE						
Production Electrique Brute (kW) (+/- 10 %)	272	272	272	272	272	200
Production Electrique Nette (kW) (+/- 10 %)	252	252	257	257	257	186

Comparaison entre de deux systèmes ORC fonctionnant à des gammes de température différentes à partir d'une même puissance thermique en entrée.

Nous pouvons également souligner le fait que le rendement du turbogénérateur ORC dépend des températures du fluide de refroidissement.

Caractéristiques techniques de deux systèmes ORC (Source : SETEC Novae)

	Unité de mesure	Système n°1	Système n°2
INPUT - HUILE THERMIQUE		Huile thermique	Huile thermique
Température nominale circuit haute température (entrée/sortie)	°C	234 / 148	130 / 74,5
Puissance thermique totale	kW	2 273	2 272
OUTPUT - EAU DE REFROIDISSEMENT		Eau chaude	Eau chaude
Température eau (entrée/sortie)	°C	24 / 31	24 / 31
Puissance thermique de l'eau	kW	1 789	2 035
PERFORMANCES			
Puissance électrique active brute	kW	460	195
Puissance électrique active nette	kW	443	180
Puissance électrique utile	kW	18	15
Rendement Electrique brut	%	20,3	8,6
PRIX (Montage Exclus)	€HT	1 025 000,00 €	425 000,00 €
	€HT/KWé nette	2 313 €/kWé	2361 €/kWé



Nous pouvons bien voir ici que pour une puissance thermique d'entrée similaire, les deux modules ci-dessus présentent des performances et des niveaux de prix très variables.

		Système n°1	Système n°2
	Production d'électricité annuelle pour 8000 h/an (en MWh)	3544	1440
	Investissement total en €HT	1 025 000,00 €	425 000,00 €
	Exploitation (2% /an)	20 500,00 €	8 500,00 €
	Coût annuel d'amortissement sur 15 ans à 5%	98 750,85 €	40 945,47 €
Cas d'une vente d'électricité	Recettes annuelles de la vente d'électricité (50€/MWh)	177 200,00 €	72 000,00 €
	TRI	10,09	10,30
Cas d'une autoconsommation d'électricité	Economies annuelles sur l'achat évité d'électricité (72€/MWh)	255 168,00 €	103 680,00 €
	TRI	7,01	7,15

Source : SETEC Novae

Si l'on observe le tableau précédent, nous pouvons remarquer que les taux de retour sur investissement sont quasi similaires pour les deux systèmes étudiés.

Par conséquent, il convient de discerner deux approches :

- ✚ Celle du rendement maximum (2,4 fois plus) mais pour un investissement deux fois plus important : système n°1
- ✚ Celle d'une production complémentaire d'électricité à coût réduit : système n°2.

De plus, le tableau précédent identifie un des facteurs qui a limité le développement de ce type de machine. En effet, le tarif d'obligation d'achat « incinération » n'est pas attractif. C'est la volonté de baisser la facture énergétique et l'incitation d'abattement de la TGAP qui permet aujourd'hui d'envisager le développement de ces technologies.

• **Courbe de charge**

L'élaboration d'un tel projet demande bien sur la prise en compte de la variation de l'apport énergétique au système. Par conséquent, il est nécessaire de connaître la courbe de charge du système en question afin d'avoir un bon aperçu de l'évolution du rendement en fonction de la charge apportée ainsi que la charge minimale acceptable par le dispositif. De manière générale, un dispositif ORC peut atteindre une charge minimale de fonctionnement de l'ordre de 10 à 20 % du débit nominal sans se mettre à l'arrêt, ce qui est impensable avec un groupe turboalternateur par exemple.

L'avantage réside aussi sur le fait que le rendement reste constant de 100% à 50% de charge et ne se dégrade qu'à partir de 50% de la charge nominale.

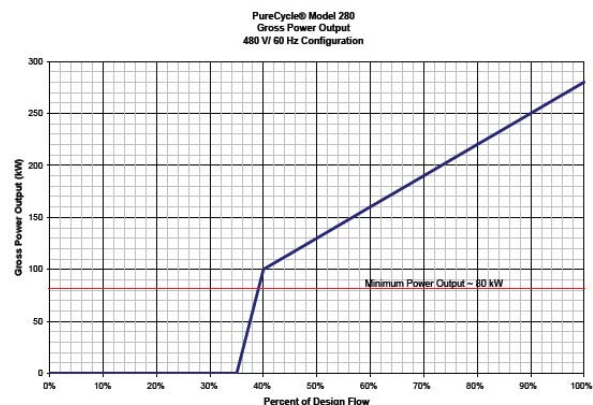


Figure 8 – PureCycle Model 280 Gross Power Output as a Function of Design Flow Rate

Source : SETEC Novae



4. MAINTENANCE, ENCOMBREMENT ET IMPACT SUR LE PROCESS INDUSTRIEL

- Insertion du dispositif au sein du système actuel**

Dans le cadre de projet à basse température, l'usage des fluides de fonctionnement est sans risque et non inflammable (eau pour échangeur de récupération et liquide frigorigène pour le système ORC), ce qui facilite son intégration au process industriel en place.

Les seuls équipements qui nécessitent une déclaration administrative et un contrôle réglementé sont les tours de refroidissement, et plus particulièrement les aéro ou hydro réfrigérants, afin de prévenir tout risque sanitaire (légionellose).

La turbine tourne en générale à 3 000 tours par minute et est couplée directement au générateur (pas de réducteur) permettant un gain dans le rendement. Elle peut redémarrer dès que la puissance thermique disponible est égale à la puissance thermique nominale minimum (10%).

En ce qui concerne l'encombrement d'une telle installation de valorisation énergétique, nous pouvons de manière non spécifique prévoir une surface au sol d'environ **60 m²/MWé**, ce qui n'est pas négligeable et nécessite une prise en considération particulière de l'emplacement du dispositif. L'intégration spatiale des aéro-réfrigérants est une donnée à étudier précautionneusement. En effet, dans certains cas, il est nécessaire de disposer d'une surface libre conséquente.

Exemple de surface à prévoir (Source : SETEC Novae)

Fournisseurs	Puissance électrique installée	Surface à prévoir
Fournisseur 1	2 MWé	Bâtiment : 130 m ² (sans les aéro-réfrigérants)
Fournisseur 2	1 MWé	60 m ² (Lxlxh : 12x5x7) avec aéro-réfrigération intégrée

- Maintenance**

La maintenance et l'exploitation d'un turbogénérateur ORC reste simple :

- les procédures de marche/arrêt simplifiées
- un faible niveau sonore du système en fonctionnement
- un faible besoin de maintenance (le temps nécessaire pour faire fonctionner les modules est compris entre 3 et 5 heures par semaine)



Le tableau suivant présente les différentes opérations de maintenance à réaliser et leurs fréquences :

Opérations de maintenance sur un dispositif (Source : Turboden pour Pratt&Whitney)

Maintenance Task	Every 3 Months	Every 6 Months	1 st Year	Annual	Every 3 Years	Every 5 Years
Turbine Oil Analysis	X					
Turbine Oil and Filter — Inspect/Change as Required		X				
Working Fluid Filter/Drier — Inspect/Change as Required				X		
Oil Recovery System Filters — Change as Required After First Year			X			X
Working Fluid Pump Seal — Inspect/Change as Required						X
Evaporator Internal — Inspect/Clean as Required				X		
Condenser Internal — Inspect/Clean as Required				X		
Powerplant Overhaul						X
Electrical Maintenance				X		
Pressure Relief Valves — Inspect/Change as Required				X		

L'exploitation de cet appareil ne présente pas de besoin spécifique en personne habilitée. La majorité des constructeurs propose une télégestion de l'appareil à distance ce qui permet de pouvoir relancer l'appareil ou obtenir un diagnostic sans une intervention du personnel du site.

- Contraintes de l'aéro-réfrigération :**

L'aéro-réfrigération présente de plus faibles contraintes d'exploitation contrairement à l'utilisation d'un hydro-réfrigérant, qui serait plus complexe (distance, autorisation administrative, débit d'eau suffisant, ...).

Néanmoins cette technologie présente lors de période estivale une contrainte puisque la température de refroidissement dépend directement de la température extérieure. Or, nous savons que l'eau de refroidissement du module ORC doit être la plus faible possible pour garder le rendement optimum.

- Les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE)**

Nous pouvons distinguer différentes nomenclatures pouvant être prises en compte sur l'élaboration d'un projet d'installation d'un système ORC. Les installations ORC répondent à la rubrique suivante :

2920	Installation de compression fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10⁵ Pa et comprimant ou utilisant des fluides inflammables ou toxiques : la puissance absorbée étant supérieure à 10 MW	(A-1)
------	--	-------

Source : (Rubrique modifiée par le décret n° 2006-678 du 8 juin 2006 et par le Décret n° 2010-1700 du 30 décembre 2010)



Autres rubriques susceptibles de rentrer en compte :

1185	<p>Chlorofluorocarbures, halons et autres carbures et hydrocarbures halogénés</p> <p>1. Conditionnement de fluides et mise en oeuvre telle que fabrication de mousses, etc. à l'exclusion du nettoyage à sec de produits textiles visé par la rubrique 2345 et du nettoyage, dégraissage, décapage de surfaces visés par la rubrique 2564 La quantité de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant :</p> <p>a) supérieure à 800 l A b) supérieure à 80 l, mais inférieure ou égale à 800 l D</p> <p>2. Composants et appareils clos en exploitation, dépôts de produits neufs ou régénérés, à l'exception des appareils de compression et de réfrigération visés par la rubrique 2920 La quantité de fluide susceptible d'être présente dans l'installation étant :</p> <p>a) supérieure à 800 l de capacité unitaire sauf installations d'extinction D b) supérieure à 200 kg dans les installations d'extinction D</p> <p>3. Régénération des fluides et recyclage des halons, sur site de traitement A</p>	A D D D A
2921	<p>Refroidissement par dispersion d'eau dans un flux d'air (installations de)</p> <p>1. Lorsque l'installation n'est pas du type « circuit primaire fermé » :</p> <p>a) la puissance thermique évacuée maximale étant supérieure ou égale à 2 000 kW A b) la puissance thermique évacuée maximale étant inférieure à 2 000 kW D</p> <p>2. Lorsque l'installation est du type « circuit primaire fermé » D</p> <p><i>Nota : Une installation est de type « circuit primaire fermé » lorsque l'eau dispersée dans l'air refroidit un fluide au travers d'un ou plusieurs échangeurs thermiques étanches situés à l'intérieur de la tour de refroidissement ou accolés à celle-ci ; tout contact direct est rendu impossible entre l'eau dispersée dans la tour et le fluide traversant le ou les échangeurs thermiques.</i></p>	A D D

(Source : NOMENCLATURE DES INSTALLATIONS CLASSÉES – Direction générale de la prévention des risques, Avril 2010)

Dans la majorité des cas, le fonctionnement d'une turbine ORC ne présente pas l'utilisation d'un fluide toxique ou inflammable. En effet, le fluide est souvent un fluide réfrigérant (R245fa ou R134a par exemple) ne présentant pas d'effet néfaste pour l'environnement (indice ODP=0, Ozone Depletion Potential) et n'est pas inflammable. Aucune mesure particulière ne doit être prise pour l'exploitation et la manipulation de ce fluide.

Cependant, il convient de préciser que certains fournisseurs utilisent des fluides comportant un risque d'inflammabilité. C'est le cas par exemple du module développé par Turboden qui prévoit l'utilisation du fluide Solkatherm@SES36, dont les vapeurs ont un comportement inflammable avec un MIE (Minimum Ignition Energy) évalué à 130 mJ. C'est pourquoi, il est prévu sur ce type d'installation un système d'aspiration sur les brides, certifié CE-ATEX, qui collecte les éventuelles fuites de fluide sur le module et les dirige vers l'extérieur.

Par conséquent, au vue des nomenclatures en vigueur, la mise en œuvre d'un tel projet n'est ni soumise à déclaration et ni à autorisation. Ce qui implique la réalisation d'un dossier beaucoup moins lourd et complexe.

La réalisation d'une notice d'impact et de danger semble suffisante pour l'administration (cas constaté sur un projet de 3 MWé).

5. ANALYSE ECONOMIQUE

Il convient d'étudier les perspectives économiques que présentent ces différents systèmes technologiques en précisant les différents coûts et les recettes qui en découlent.

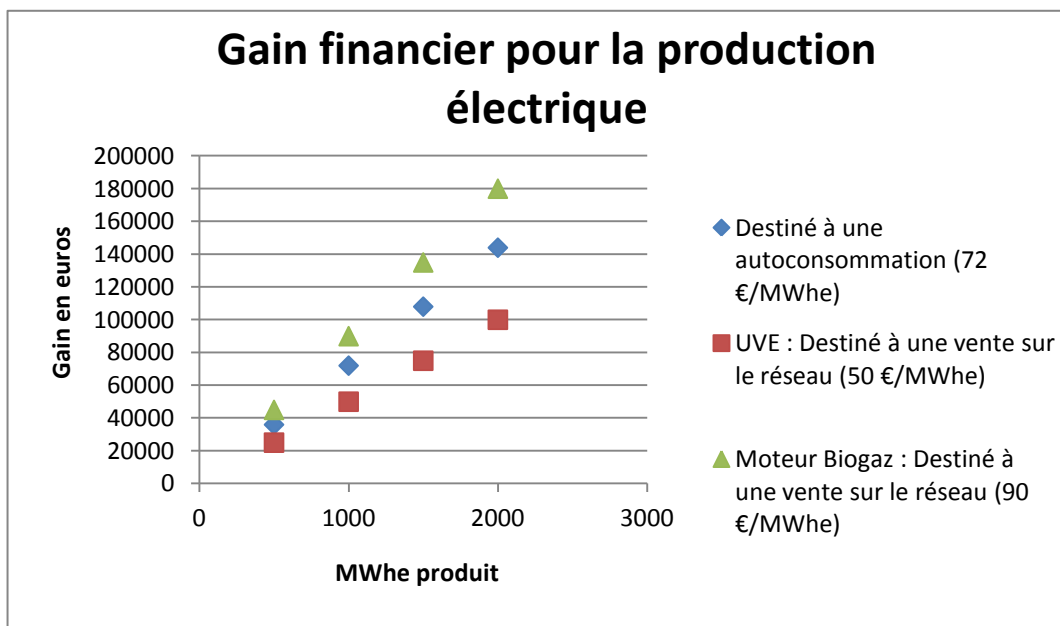
Par ailleurs, il sera ici indispensable de prendre en considération les différentes aides financières extérieures pouvant être apportées par des subventions de l'ADEME, les certificats d'économie d'énergie (CEE) et la TGAP.

5.1. QUEL EST LE GAIN FINANCIER ISSU DE LA PRODUCTION ELECTRIQUE ?

- **Recettes annuelles en électricité**

Dans cette partie, nous distinguerons bien deux solutions possibles. D'un part, la récupération de cette énergie électrique dans le cas d'une auto-consommation. D'autre part, l'utilisation de cette électricité pour une revente sur le réseau EDF.

Le choix entre ces deux solutions est bien sûr lié au prix d'obligation d'achat fixé par EDF suivant l'installation en question. Dans le cas d'une UVE, l'autoconsommation est la solution à privilégier. (cf page 9)





(Pour information : le tarif vert EDF 2012 est de 85 €/MWé, ce qui renforcera l'intérêt en usage d'autoconsommation. Nous prendrons ici la valeur de 72 €/MWé qui reste en vigueur dans la plupart des cas)

5.2. QUELLES SONT LES AIDES OU SUBVENTIONS FINANCIERES PERCEPTIBLES ?

- **Les CEE : COMPLIQUE**

Dans le cas d'un investissement se caractérisant par un revenu direct (vente d'électricité), la demande de CEE n'est vraisemblablement pas prise en compte auprès de l'administration.

- **La TGAP : POSSIBLE pour les UVE**

Un critère financier important à prendre en considération réside dans l'efficacité énergétique des UVE, associée à la réduction de la TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes). Dans le cas où le rendement de 60% d'efficacité énergétique est atteint pour les installations existantes, le gain économique est alors très intéressant. Nous noterons le fait qu'il est plus facile d'atteindre ces 60% d'efficacité énergétique dans le cas d'une production d'électricité utilisée pour une autoconsommation.

Des informations plus détaillées sur la TGAP sont présentes au niveau de la fiche N°1.

Valeur de la TGAP

Année	Tarif A (en €/tonne)	Tarif D (en €/tonne)
2012	6,40 €	3,20 €
2013	8,00 €	4,00 €
2014	8,00 €	4,00 €
2015	8,00 €	4,00 €
2016	8,00 €	4,00 €

Nous pouvons noter, à partir du tableau, que la réduction de la TGAP peut permettre une économie financière très intéressante de 4 euros par tonne de déchets traités.

- **La Prime à l'efficacité énergétique : POSSIBLE pour les moteurs biogaz**

Voir Fiche n°2.

5.3. QUEL EST LE MONTANT DES INVESTISSEMENTS A PREVOIR ?

Il est aujourd'hui difficile de prévoir l'investissement nécessaire pour un système équipé d'un moteur Stirling puisque cette technologie est encore en phase de R&D.

Par contre, nous pouvons avoir une idée plus précise des coûts qu'implique la mise en place d'une unité de récupération de chaleur couplée à un cycle organique de Rankine.

L'ordre de grandeur de l'investissement pour une installations de type ORC est très variable avec des montant pouvant varier de 1500 à 2500 €/kWé. De plus, nous pouvons également évaluer les frais de d'entretien à 50 000 €/MWé/an (télégestion, maintenance...).

La durée de vie d'un tel système est estimée supérieure à 15 ans.

Valeur en k€	Coût Equipement	Transport	Mise en place	TOTAL
Echangeur de récupération de chaleur	50	5	5	60
Système ORC (160 kWé brut)	350	5	10	365
Tour de refroidissement	25	5	5	35
Equipements mécaniques auxiliaires	10	5	5	20
Génie civil	0	0	20	20
Coût Gestion de projet	0	0	0	30
TOTAL	435	20	45	530 k€

Source: "Waste heat recovery projects using Organic Rankine Cycle technology – Examples of biogas engines and steel mills applications" G. David, F. Michel, L. Sanchez (Sept 2011) – ENERTIME FRANCE

La réalisation d'un projet de turbogénérateur ORC doit prendre attentivement en compte le poids de la mise en place des aeroréfrigérants sur l'investissement total. Dans certains cas, cet aspect peut représenter jusqu'à 20% de l'investissement total.

5.4. RETOUR SUR INVESTISSEMENT

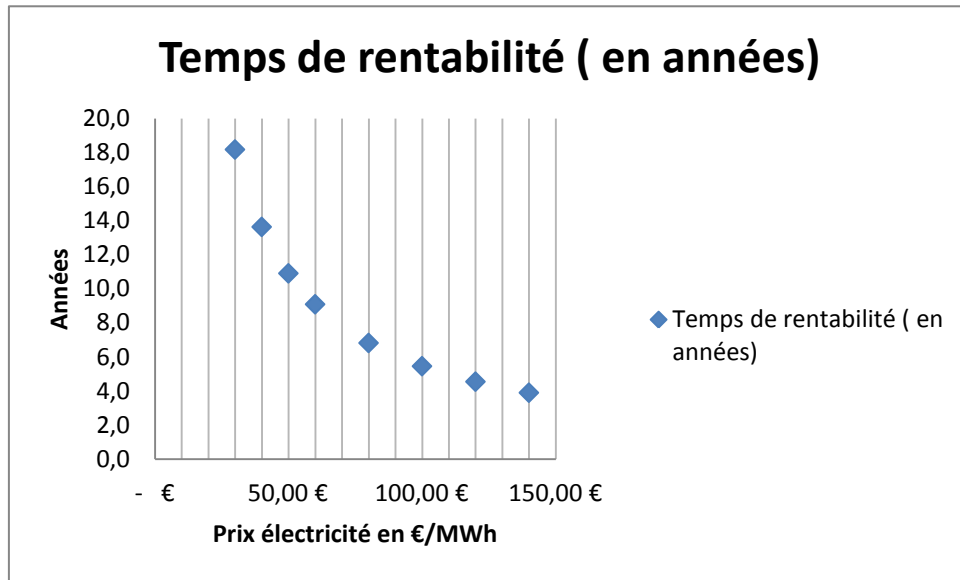
Nous avons traité dans les fiches précédentes de la récupération d'énergie thermique au niveau de deux installations différentes : d'une part dans le cas d'une UVE avec une valorisation énergétique sur les fumées et d'autre part dans le cas d'un système électrogène avec une valorisation des thermies contenues dans les gaz d'échappement et le circuit de refroidissement.

	FICHE N°1 : Cas d'une UVE → Gaine des fumées		FICHE N°2 : Cas d'un moteur biogaz → Gaz d'échappement + circuit de refroidissement	
Puissance thermique récupérable (en kW)	1000	2000	500	1000
Rendement machine ORC	0,15	0,17	0,15	0,15
Puissance électrique produite(en kW)	150	340	75	150
Energie électrique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	1200	2720	600	1200
RECETTE				
Prix Vente / Autoconsommation d'électricité (€/MWh)	72,00 €	72,00 €	90,00 €	90,00 €
Montant des recettes par an	86 400,00 €	195 840,00 €	54 000,00 €	108 000,00 €
INVESTISSEMENT				
Coût installation (2500 €/kWé)	375 000,00 €	850 000,00 €	187 500,00 €	375 000,00 €
Montant total des intérêts avec un amortissement sur 10 ans à 5%	102 294,82 €	231 868,26 €	51 147,41 €	102 294,82 €
Maintenance (50 000 €/Mwé/an)	7 500,00 €	17 000,00 €	3 750,00 €	7 500,00 €
Total des dépenses annuelles	55 229,48 €	125 186,83 €	27 614,74 €	55 229,48 €
BILAN				
Temps de rentabilité (en années)	6,4	6,4	5,1	5,1



De manière générale, la mise en place d'une installation de récupération de chaleur couplée à un turbogénérateur ORC est rentable au bout d'une durée comprise entre 5 et 7 ans.

La rentabilité et le temps de retour d'un tel projet sont sensiblement liés au prix de l'électricité en vigueur. Si nous prenons en compte les hypothèses du tableau ci-dessus, nous pouvons estimer la courbe de retour sur investissement suivante (avec un amortissement à 5% sur 15 ans) :



Source : SETEC Novae

Le coût d'achat de l'électricité devrait augmenter progressivement ce qui permettra un développement important de ces solutions de valorisation

6. CONCLUSIONS

FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°3

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

➤ **Technologies intervenants dans la valorisation électrique de l'eau chaude :**

- ✓ **Le turbogénérateur ORC**
- ✓ Le moteur Stirling
- ✓ La conversion thermoélectrique

➤ **Quantité d'énergie électrique produite**

Les performances du système ORC peuvent être vraiment distinctes entre les fournisseurs. Elles sont en général liées à deux paramètres :

- ✚ La température d'entrée de la source chaude, qu'il est intéressant d'avoir la plus élevée possible
- ✚ La puissance thermique valorisée par la source chaude

L'offre sur le marché permet d'envisager des machines jusqu'à 2 MWé.

Les rendements d'un cycle sont compris entre 10 et 18%. Il est également important de prendre en compte **la courbe de charge** du système. Une installation ORC est capable de fonctionner jusqu'à une charge de **10 à 15% du débit nominal**.

➤ **Mise en place d'un système ORC :**

- ❖ Encombrement du module ORC : 60 m²/MWé. Attention à la surface nécessaire pour l'aéro-réfrigération (prévoir en toiture terrasse ou au sol).
- ❖ Maintenance simplifiée : 3 à 5 heures par semaine (+50 000 €/MWé/an)
- ❖ Contraintes de l'aéro-réfrigération (régime 35/25°C) qui peut impacter sur les performances du turbogénérateur ORC avec des températures extérieures élevées
- ❖ Autorisation d'exploiter : la réalisation d'une notice d'impact et de danger semble suffisante pour l'administration

Suite FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°3

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

➤ **Analyse financière :**

✚ Coût de l'investissement : 1 500 à 2 500 €/MWé

	FICHE N°1 : Cas d'une UVE → Gaine des fumées		FICHE N°2 : Cas d'un moteur biogaz → Gaz d'échappement + circuit de refroidissement	
Rendement machine ORC	0,15	0,17	0,15	0,15
Puissance électrique produite(en kW)	150	340	75	150
RECETTE				
Prix Vente / Autoconsommation d'électricité (€/MWh)	72,00 €	72,00 €	90,00 €	90,00 €
Montant des recettes par an	86 400,00 €	195 840,00 €	54 000,00 €	108 000,00 €
INVESTISSEMENT				
Coût dispositif ORC (2500€/kWé)	375 000 €	850 000 €	187 500 €	375 000 €
Total des dépenses annuelles	55 229,48 €	125 186,83 €	27 614,74 €	55 229,48 €
BILAN				
Temps de rentabilité (en années)	6,4	6,4	5,1	5,1

**PROCÉDES DE RÉCUPÉRATION / VALORISATION DES ÉNERGIES
À BAS NIVEAU DE TEMPÉRATURE
ÉTAT DES CONNAISSANCES**

**FICHE N°4 :
ETUDE DE CAS DE LA PRODUCTION DE FROID
A PARTIR DE L'EAU CHAUDE OU SURCHAUFFEE**

Sommaire

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS.....	3
2. PRINCIPES GENERAUX DE L'ETUDE	4
3. TYPE DE TECHNOLOGIE ETUDIEE ET RENDEMENT	5
3.1. LES MACHINES A ABSORPTION	5
3.2. MACHINES A ADSORPTION	6
4. QUELLES QUANTITES D'ENERGIE SONT MISES EN JEU ? QUELLES SONT LES GAMMES DE TEMPERATURES EN PRESENCE ?	8
5. ANALYSE FINANCIERE	9
5.1. EVALUATION DES RECETTES	9
5.2. DETERMINATION DE L'INVESTISSEMENT.....	10
5.3. RETOUR SUR INVESTISSEMENT.....	12
6. CONCLUSIONS	13

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

Dans le cadre des différents moyens d'utilisation de la chaleur fatale issue de la récupération d'énergie à basse température, la production de froid constitue une solution intéressante à prendre en considération.

En été, les besoins en chaleur étant réduit, une grande partie de la chaleur produite n'est pas valorisée. Il existe cependant plusieurs systèmes permettant d'utiliser cette énergie thermique sous forme de chaleur pour la production de froid. En effet, les demandes plus importantes de confort ont entraîné une augmentation de la surface utile rafraîchie ou climatisée.

Au niveau de cette fiche, nous nous focalisons plus particulièrement sur l'étude suivante :

Cas d'étude:

Production de froid par récupération de chaleur fatale sur les fumées d'une UVE

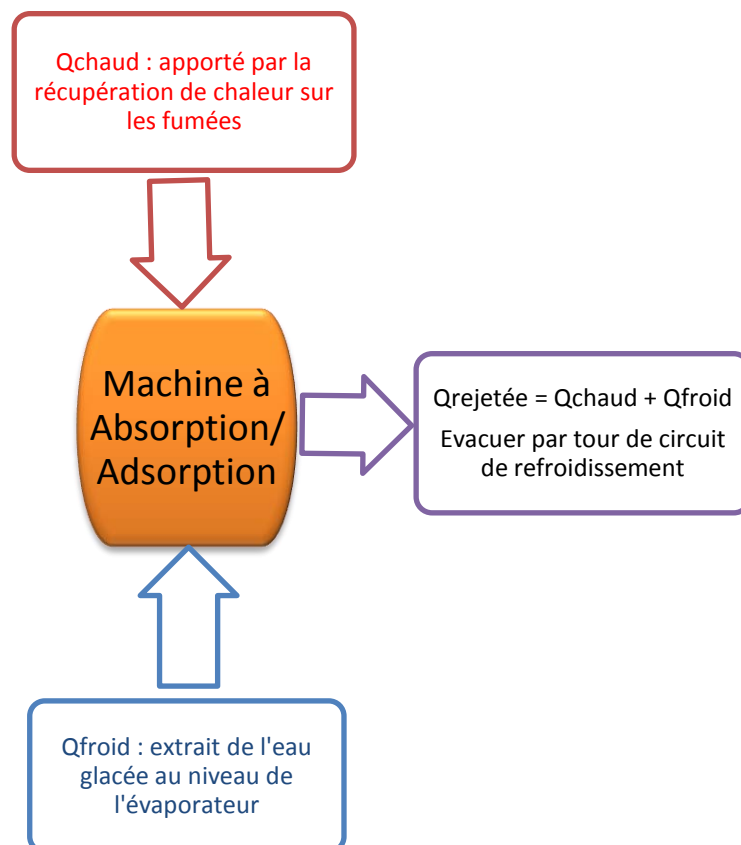
Cette étude est faite plus particulièrement dans le prolongement de la fiche n°1 pour un traitement sec des gaz de combustion avec un échangeur installé au niveau de la gaine de fumée. Nous distinguons bien les deux systèmes suivants :

- Machine à Absorption
- Machine à Adsorption

2. PRINCIPES GENERAUX DE L'ETUDE

Dans un premier temps, l'objectif de cette étude de cas est d'appréhender la faisabilité technique de la conversion de la chaleur, issue du refroidissement des fumées, en énergie frigorifique.

En ce qui concerne la mise en place de ce système, il paraît judicieux d'avoir un circuit primaire avec un échangeur eau/fumées ou huile/fumées qui sera relié à un circuit secondaire contenant le liquide frigorigène. En effet, l'installation d'un échangeur liquide frigorigène/fumées n'est pas adaptée en termes de maintenance et de sécurité. La corrosion causée par le caractère acide des fumées pourrait engendrer une fuite de liquide frigorigène avec les conséquences environnementales et financières qui en découlent. De plus, la maintenance sera bien plus aisée sur une boucle thermique que sur le groupe à sorption lui-même.



3. TYPE DE TECHNOLOGIE ETUDIEE ET RENDEMENT

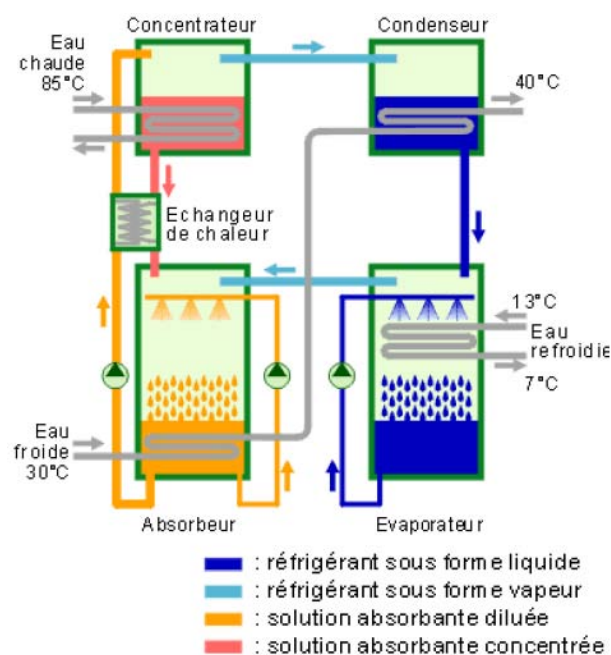
Les différentes technologies d'échangeur ont déjà été développées au niveau du cas N°1. Il convient également d'ajouter qu'il sera nécessaire d'utiliser des matériaux non sujets à la corrosion.

3.1. LES MACHINES A ABSORPTION

Ce sont les machines les plus répandues pour produire du froid avec du chaud. La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique, dans notre cas il s'agira de la récupération des calories sur les fumées.

Pour la production d'eau glacée au dessus de 0°C, comme c'est le cas en climatisation, c'est le couple eau/bromure de lithium (H₂O/LiBr) qui est utilisé, l'eau étant le réfrigérant. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité, afin d'assurer la circulation. Dans un système H₂O/LiBr, la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle interne de la température du circuit de refroidissement.

La production de froid est basée sur l'évaporation du réfrigérant (l'eau) dans l'évaporateur à très basse pression. La vapeur d'eau est alors aspirée dans l'absorbeur, contribuant à la dilution de la solution H₂O/LiBr. L'efficacité du processus d'absorption nécessite un refroidissement de la solution. Cette dernière est pompée en continu dans le générateur où elle est chauffée (chaleur motrice). La vapeur d'eau ainsi générée est envoyée dans le condenseur, où elle se condense. L'eau liquide, après passage dans une vanne de détente, retourne ensuite à l'évaporateur.



Fonctionnement d'une machine à absorption (Source : « Plaquette SumerHeat – Solution Techniques » Rhône Alpes Energie)



Les puissances frigorifiques des machines à absorption sont généralement de l'ordre de plusieurs centaines de kW froid. La température de la source chaude est généralement au dessus de 80 °C pour des machines à simple effet, avec un COP entre 0,6 et 0,8 (moyenne à 0,7). Les machines double effet, utilisant la chaleur motrice sur 2 niveaux, nécessitent des températures supérieures à 140 °C, pour des COP pouvant atteindre 1,2.

	Absorption simple effet	Absorption double effet
Source chaude	Eau chaude 70/80°C 90°C	Eau surchauffée 150°C
COP	0,6 – 0,7	1,1-1,2
Gamme de puissance (MW)	0,1 – 5,8	0,1 – 5,3
Surface m ² /kW	0,01 – 0,03	0,01 – 0,03
Poids kg/kW	8,5 – 22	8,5 – 22

Performances et besoins des groupes à absorption à simples et doubles effet (Source : Reinhard SIX ; Jean-Éric MESMAIN - Rhônealpénergie-Environnement - Faire du froid avec la chaleur d'été des réseaux de chaleur – Guide et Rapport technique SUMMERHEAT décembre 2008)

3.2. MACHINES A ADSORPTION

Ici, au lieu d'une solution liquide pour les machines à absorption, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le Silicagel comme adsorbant. La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2 de la figure 3), un évaporateur et un condenseur.

L'adsorbant du premier compartiment (1) est régénéré par chauffage (source chaude), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore (phase de production de froid).

L'adsorbant du compartiment (2) maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entretenir le processus d'adsorption. Lorsque la «production de froid» diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets. Actuellement, seuls quelques fabricants asiatiques proposent ce type de machines à adsorption.

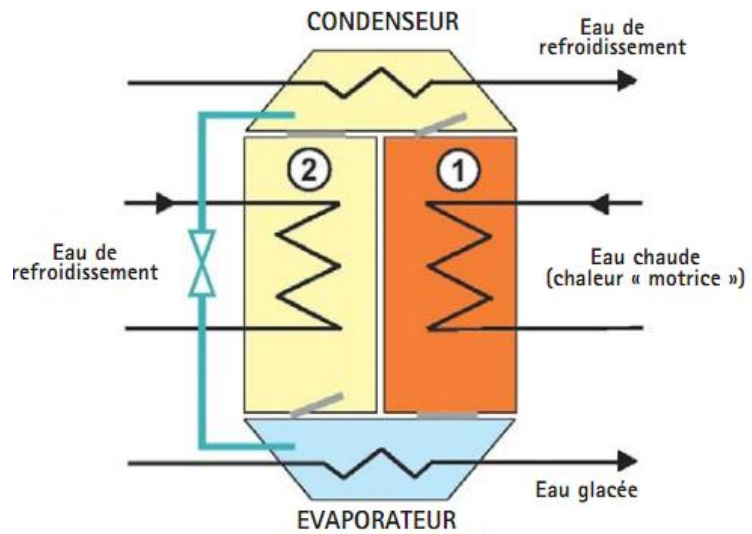


Schéma de principe d'un groupe à adsorption

Avec une température de source chaude d'environ 80 °C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 50 °C. La capacité des machines va généralement de 50 à 500 kW froid.

	Adsorption
Source chaude	Eau chaude 55-70°C
COP	0.55 – 0,65
Gamme de puissance	50-430 kW
Surface m ² /kW	Taille élevée
Poids kg/kW	Poids élevé

Caractéristiques des machines à adsorption

(Source : Reinhard SIX ; Jean-Éric MESMAIN - Rhônealpennergie-Environnement - Faire du froid avec la chaleur d'été des réseaux de chaleur – Guide et Rapport technique SUMMERHEAT décembre 2008)

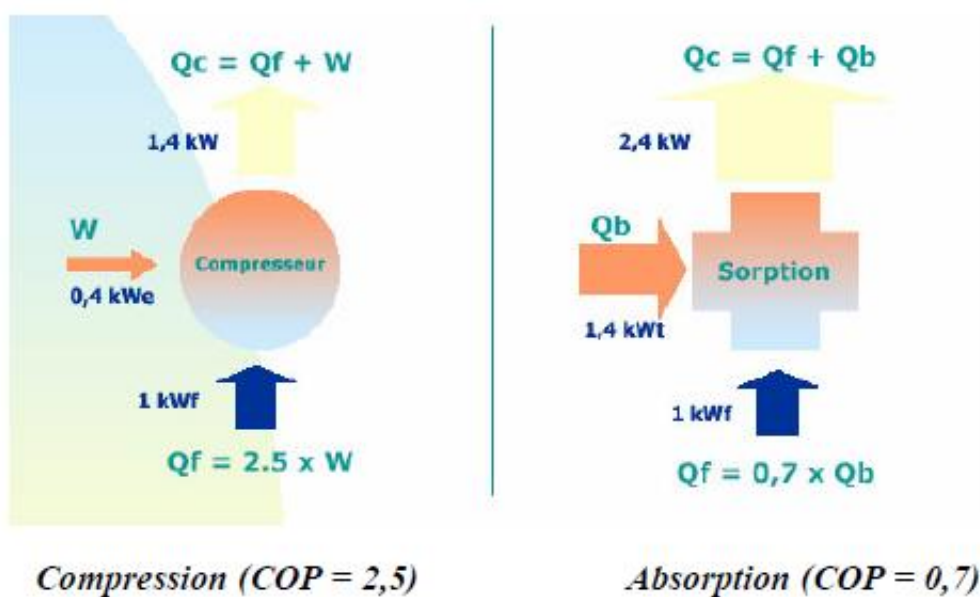
En observant ce tableau, on constate bien que le domaine de températures visé par cette récupération est en dessous des niveaux atteints par la récupération sur les fumées. De plus, les COP étant faibles par rapport à un système à absorption et étant donné le faible nombre de machines produites, le coût des machines à adsorption est actuellement élevé. Deux constructeurs sont connus : Mycom et Nishiyodo, mais il existe que peu de références en France. Nous allons donc nous concentrer sur la technologie des groupes à absorption.

4. QUELLES QUANTITES D'ENERGIE SONT MISES EN JEU ? QUELLES SONT LES GAMMES DE TEMPERATURES EN PRESENCE ?

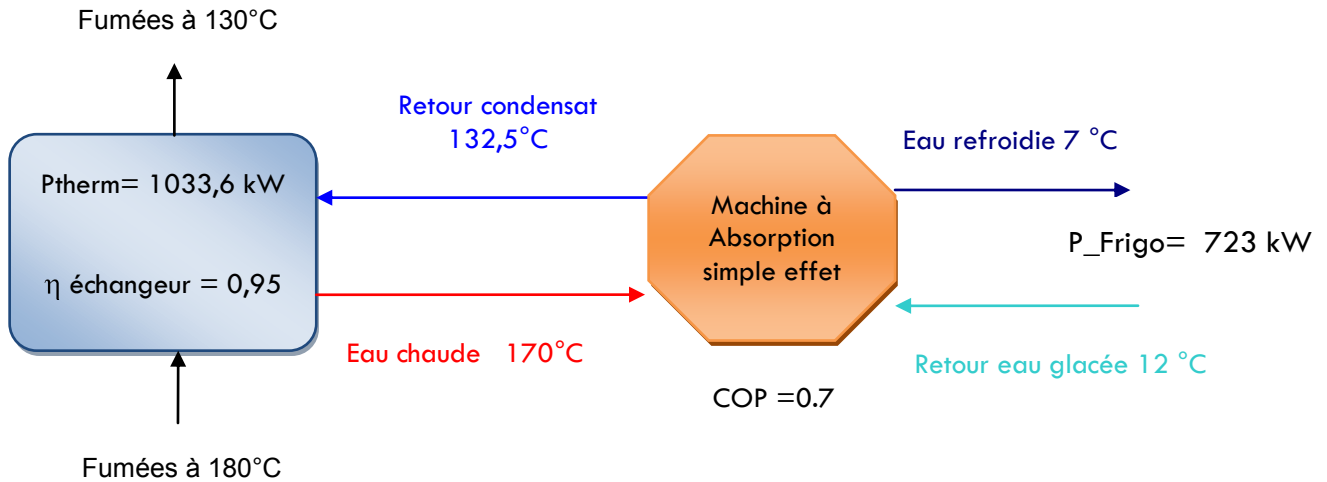
La production de froid découle directement de la quantité de chaleur récupérée par l'échangeur et du coefficient de performance de la machine en question.

Type de machine frigorifique à absorption	Température de fonctionnement	COP
Simple effet	100°C	0,7
Double effet	150°C	1,1
Triple effet	180°C	1,5

La figure ci-contre montre une comparaison entre un cycle à compression et un cycle à absorption simple effet. Le COP d'une machine à absorption simple effet est beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,5 à 0,8. Avec les machines à double effet on parvient à des COP de 1,2. Mais si on raisonne en énergie primaire (thermique) les COP des cycles à compression et des cycles à absorption double effet sont alors comparables.



Les gammes de températures et de puissances mises en jeu pour notre cas d'étude sont les suivantes :



5. ANALYSE FINANCIERE

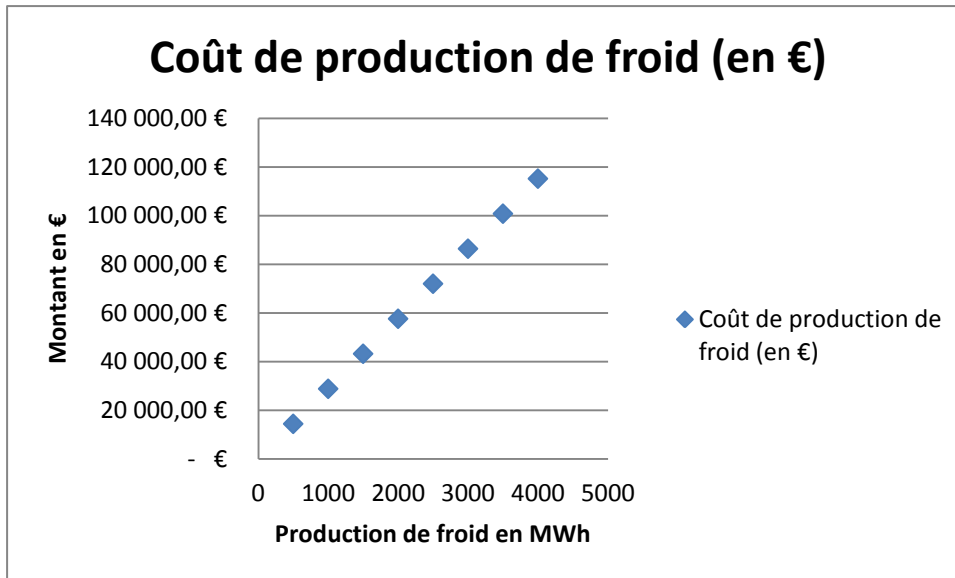
Cette valorisation d'énergie perdue sous forme d'eau glacée est aujourd'hui associée à une demande de confort de plus en plus importante de la part des particuliers et des industriels. Cette production peut être utilisée pour alimenter un réseau d'eau glacée alimentant des zones de bureaux, des bâtiments de service ou industriel (logistique...).

Toutefois, il est important de remarquer que les UVE ou les unités de valorisation énergétique du biogaz sont souvent isolés géographiquement, ce qui impliquerait un important investissement pour la création d'un tel réseau. De plus, la demande de froid n'est en générale pas constante dans l'année, avec une utilisation quasi inexistante en hiver.

5.1. EVALUATION DES RECETTES

Afin d'évaluer le gain économique possible d'une production de froid, nous pouvons nous baser sur le coût de consommation électrique (sur le compresseur) pour produire de l'eau glacée à partir d'un groupe froid à compression. Dans le cas d'une telle installation, le COP (= Energie froid / Energie électrique) est d'environ 2,5.

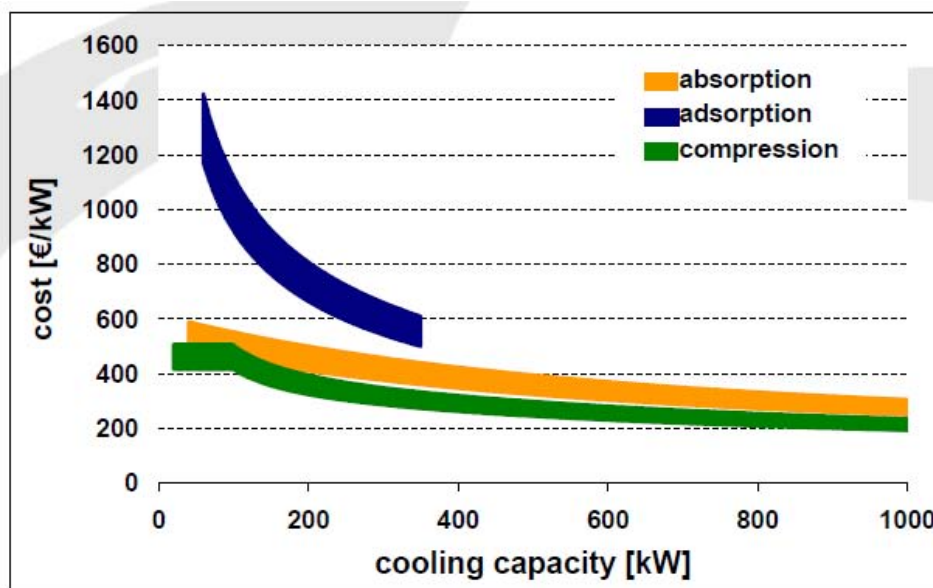
En considérant un coût d'achat d'électricité de 72 €/MWh, nous pouvons estimer un montant des recettes ou économies évoluant comme le montre la courbe suivante :



5.2. DETERMINATION DE L'INVESTISSEMENT

Nous pouvons réaliser une comparaison des coûts d'investissement pour les différents types d'unité de production de froid en €/kW en fonction de la capacité souhaitée de production de froid.

Dans le cas d'une machine à absorption, il convient de prévoir un montant compris entre 350 et 500 €/kW.



Source : Rhône Alpes Energie Environnement : Climatisation solaire

Les différents fabricants des machines à absorption se sont globalement repartie le marché suivant les gammes de puissances mises en jeu. Nous pouvons constater sur le tableau suivant que les distributeurs les mieux adaptés à notre cas d'étude sont Trane, York et Carrier (liste non exhaustive).

Marque	TRANE	YORK	CARRIER	YAZAKI	MCQUAY	ROBUR	BROAD
Gamme en kW	352 à 6000	350 à 5300	17 à 5300	105 à 350	350 à 5300	10 à 105	116 à 46520

Gamme de puissance des principaux fabricants

(Source : FICHE OX « CLIMATISATION A ABSORPTION » - ADEME -25/02/2002)

Il est intéressant de comparer le coût d'investissement lié à une production de froid à absorption et d'une production de froid par compression. Nous pouvons voir que le coût d'une machine à absorption est plus élevée (+ 35% dans le cas ci-dessous).

				Froid par Compression centralisée	Froid par Absorption centralisée
Descriptif	U	Q	PU	Montant € HT TOTAL	Montant € HT TOTAL
Puissance frigorifique				300 kW	300 kW
I1 - Bâtiment process et aménagements extérieurs					
Foncier	ens	1		pm	pm
Bâtiment	m2		1000	00 €	
Bâtiment	m2	20	1000		20 000 €
Sous total bâtiment et VRD :				00 €	20 000 €
I2 - Process industriel froid					
Groupe compression cond air	u	1	55000	55 000 €	
Groupe absorption	u	1	70000		70 000
Tour aérorefrigerante humide	u	1	22000		22 000
Sous total process :				55 000 €	92 000 €
I3 - Equipements connexes					
Aménagement hydraulique, comptage calorifique, collecteurs et pompes	ens	1		10 000 €	13 000 €
Electricité - régulation	ens	1		18 000 €	3 000 €
Sous total équipements connexes				28 000 €	16 000 €
TOTAL TRAVAUX I1 + I2 + I3				83 000 €	128 000 €
Divers, imprévus et révisions de prix	%	5%		4 150 €	6 400 €
Ingenierie, assurance, ...	%	10%		8 300 €	12 800 €
TOTAL TRAVAUX FROID				95 450 €	147 200 €
Ratio installation / kW nécessaire				318 € HT/kW	491 € HT/kW

Investissement pour la création d'une production de froid de 300kW

Source : ETUDE TECHNICO-ECONOMIQUE DE DIFFERENTS SYSTEMES DE PRODUCTION DE FROID – Rhone Alpes Environnement : Summerheat

Dans le cas d'une machine à absorption d'une puissance frigorifique de 300kW, le coût de maintenance P2/P3/GER est d'environ 6000€HT/an

5.3. RETOUR SUR INVESTISSEMENT

	FICHE N°1 : Cas d'une UVE → Gaine des fumées
Puissance thermique récupérable (en kW)	1033,6
COP machine frigorifique à absorption simple effet	0.7
Puissance frigorifique produite(en kW)	723.52
Energie frigorifique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	5788.16
RECETTE	
Coût production froid à l'échelle d'une machine à compression (€/MWh)	28,80 €
Montant des recettes ou économies par an	166 699 €
INVESTISSEMENT	
Coût investissement (450€/kW)	325 584 €
Montant total des intérêts avec un amortissement sur 5 ans à 5%	43066,3 €
Total Investissement avec amortissement sur 5 ans	368 650,3 €
Coût d'exploitation (€/an)	6 000,00 €
Montant des dépenses annuelles (€/an)	74 930,06 €
BILAN	
Temps de rentabilité du projet (en années)	2.2

Cette évaluation du temps de retour sur investissement, nous montre un temps de rentabilité satisfaisant d'environ 3 ans. Néanmoins, cette estimation s'applique dans le cas d'une production et donc d'une demande de froid en continue durant toute l'année, ce qui paraît être un cas relativement peu courant hormis dans le cadre de l'alimentation d'une industrie (hangar logistique froid par exemple)

6. CONCLUSIONS

FICHE DE SYNTHESE DE L'ETUDE DE CAS N°4

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

➤ **Technologies de production de froid par récupération de chaleur fatale :**

- ✚ **Machine à Absorption : la mieux adaptée pour une valorisation sur les fumées**
- ✚ Machine à Adsorption : Gamme de températures non adaptée (55-70°C), COP faible, coût élevé.

➤ **Quantité d'énergie valorisable :**

Type de machine frigorifique à absorption	Température de fonctionnement	COP_froid
Simple effet	100°C	0,7
Double effet	150°C	1,1
Triple effet	180°C	1,5

Soit pour une puissance thermique valorisée de 1033,6 kW (cas d'une récupération sur les fumées d'une UVE type), nous pouvons prévoir une **puissance frigorifique de 723 kW**.

Suite FICHE DE SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS N°4

Rq : Ces études de cas ne sont pas autoportantes et sont à rapprocher du rapport dans sa globalité

➤ Analyse financière :

- ✚ Investissement : pour une machine à absorption, il convient de prévoir un montant compris entre **350 et 500 €/kW**.
- ✚ Recettes/Economies : par analogie avec une machine frigorifique à compression, un montant de **28,80 €/MWh frigorifique**.
- ✚ Exploitation : le coût de maintenance d'une machine à absorption de 300kW peut être estimé à **6000€HT/an**

Retour sur investissement pour une demande de froid en continue sur l'année

	FICHE N°1 : Cas d'une UVE → Gaine des fumées
Puissance thermique récupérable (en kW)	1033,6
COP_froid machine frigorifique à absorption double effet	0.7
Energie frigorifique produite pour une disponibilité de 8000 h (en MWh)	5788,28
RECETTE	
Coût production froid à l'échelle d'une machine à compression (€/MWh)	28,80 €
Montant des recettes ou économies par an	166 699 €
INVESTISSEMENT	
Coût investissement (450€/kW)	325 584 €
Total Investissement avec amortissement sur 5 ans	368 650,3 €
Coût d'exploitation (€/an)	6 000,00 €
Montant des dépenses annuelles (€/an)	74 930,06 €
BILAN	
Temps de rentabilité du projet (en années)	2,2