

Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets

Etat de l'art



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

**TRANSPORT LONGUE DISTANCE ET STOCKAGE
D'ENERGIE CALORIFIQUE, EN COUPLAGE AVEC DES
PROCEDES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS**

ETAT DE L'ART

RAPPORT FINAL

décembre 2011

O. MEGRET, L. BEQUET - CADET International
A. MANIFICAT, C. WEBER - GRETh



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, Transport longue distance et stockage d'énergie calorifique, en couplage avec des procédés de valorisation énergétique des déchets. Etat de l'art, 2011, 437 p, n°09-0233/1A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2011

RESUME

L'objet de cette étude est de réaliser un état de l'art sur le transport longue distance et le stockage d'énergie calorifique et d'en étudier le couplage avec les procédés de valorisation énergétique des déchets.

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 un chapitre sur les éléments introductifs en matière de stockage et de transport d'énergie calorifique.

Le second chapitre concerne la description des matériaux, des équipements et des systèmes permettant le stockage d'énergie calorifique.

Le troisième chapitre détaille les systèmes de transport d'énergie calorifique sur longue distance.

Le quatrième chapitre présente les procédés de valorisation énergétique des déchets ainsi que des utilisateurs potentiels d'énergie calorifique.

Le cinquième chapitre résume les différentes techniques de stockage et de transport d'énergie calorifique applicables au domaine des déchets par secteur.

Enfin, le sixième chapitre présente 3 études de cas dans 3 secteurs identifiés : habitat/tertiaire, blanchisserie et industrie haute température (sidérurgie). Le but étant de statuer sur la faisabilité de mise en œuvre des différentes techniques de stockage et de transport d'énergie calorifique dans le domaine des déchets.

MOTS CLES

Valorisation énergétique des déchets, stockage d'énergie calorifique, transport longue distance

SUMMARY

This study aims, on one hand, to realize a state of art about over long distance transport and heat energy storage and, on the other hand, to examine their coupling with waste valuation systems.

After reminding the adequate context of development with those solutions and too showing the importance of the stake linked to the current work, we first expose the introductive elements in terms of storage and heat energy transport.

The second chapter deals with the description of some materials, equipments and systems concerning heat storage energy.

Afterward, the over long distance heat transport systems are detailed in the third chapter.

In the fourth chapter, it is about waste valuation techniques and heat energy potentials users.

The fifth chapter sums up the different techniques of storage and heat transport that are applicable to waste field according to the appropriate sector.

Finally, the sixth chapter goes about 3 caseworks in 3 fields: housing/commercial, industrial laundry and high temperature industry (steel industry). The purpose is to determine the implementation feasibility of the different techniques of storage and waste heat transport.

KEY WORDS

Waste energy development, thermal energy storage, over long distance transport

Sommaire

1. ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS – CHAPITRE 1	8
1.1. CONTEXTE GENERAL	8
1.2. DEFINITION DE LA PORTEE DE L'ETUDE	9
1.3. ELEMENTS INTRODUCTIFS : STOCKAGE ET TRANSPORT DE CHALEUR (ET DE FROID) DANS LES SYSTEMES THERMIQUES ET ENERGETIQUES	10
3.1.1 <i>Stockage de chaleur et/ou de froid</i>	10
3.1.2 <i>Transport de chaleur et/ou froid</i>	13
3.1.3 <i>Questions techniques sur l'état de l'art des technologies de stockage et de transport de l'énergie thermique</i>	14
1.4. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 1	15
2. LES MATÉRIAUX, ÉQUIPEMENTS ET SYSTEMES POUR LE STOCKAGE THERMIQUE – CHAPITRE 2	16
2.1. STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE	16
2.2. STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE.....	18
2.3. STOCKAGE THERMOCHIMIQUE.....	20
2.4. LES CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DES DISPOSITIFS DE STOCKAGE.....	22
2.5. CONCLUSION PARTIELLE : VALORISATION DES DONNEES RECUEILLIES POUR L'ETUDE DE CAS CONCRETS D'APPLICATION.....	25
2.6. SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES MODES DE STOCKAGE THERMIQUE.....	26
2.7. STOCKAGE FROID : TECHNOLOGIE CRISTOPIA (CIAT GROUP)	30
2.8. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 2	32
3. TRANSPORT DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE - CHAPITRE 3	33
3.1. TRANSPORT D'ENERGIE A HAUTE TEMPERATURE	34
3.1.1 <i>Reformage du méthane avec du dioxyde de carbone ou de vapeur</i>	34
3.1.2 <i>Dissociation d'ammoniac et sa synthèse</i>	37
3.1.3 <i>Caractéristiques des éléments catalyseurs dans les réactions réversibles pour le transport de chaleur à haute température</i>	38
3.2. TRANSPORT D'ENERGIE A BASSE TEMPERATURE	39
3.2.1 <i>Les réactions chimiques : Décomposition et synthèse du méthanol</i>	39
3.2.2 <i>Le changement de phase</i>	41
3.2.3 <i>Chemical Heat Pump Container (CHCP)</i>	43
3.2.4 <i>Alliages absorbant d'hydrogène</i>	44
3.2.5 <i>Adsorption solide-gaz</i>	47
3.2.6 <i>Absorption liquide-gaz</i>	50
3.3. TRANSPORT D'ENERGIE CLASSIQUE.....	53
3.3.1 <i>Transport de chaud</i>	53
3.3.2 <i>Transport de froid</i>	54

3.4.	SYNTHESE ET COMPARAISON DES MODES DE TRANSPORT D'ENERGIE CALORIFIQUE INNOVANTS	55
3.5.	LES REACTIONS CATALYTIQUES REVERSIBLES	56
3.5.1.	<i>Les systèmes à sorption</i>	57
3.5.2.	<i>Les systèmes conteneurs : transport « batch »</i>	58
3.5.3.	<i>Les modes de transport classiques</i>	59
3.6.	COMPARAISON DES MODES DE TRANSPORT INNOVANTS AVEC LES MODES D'ENERGIE PRIMAIRE.....	60
3.6.1.	<i>Comparaison des performances technologies de transports innovants</i>	60
3.6.2.	<i>Comparaison en termes de coût</i>	61
3.7.	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 3	63
4.	CARACTÉRISATION DES PRODUCTIONS / UTILISATEURS D'ÉNERGIE CALORIFIQUE DES DÉCHETS - CHAPITRE 4	64
4.1.	IDENTIFICATION DES PROCEDES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS INTERESSES	64
4.1.1.	<i>Unités de valorisation énergétique UVE (Usine d'incinération des ordures ménagères)</i>	64
4.1.2.	<i>Méthanisation et valorisation du biogaz d'ISDND</i>	73
4.2.	IDENTIFICATION DES UTILISATEURS D'ENERGIE CALORIFIQUE	80
4.2.1.	<i>Les réseaux de chaleur</i>	80
4.2.2.	<i>Les utilisateurs</i>	83
4.3.	LES AUTRES VOIES D'ETUDE ENVISAGEABLE	86
4.3.1.	<i>Cogénération</i>	86
4.3.2.	<i>Trigénération</i>	87
4.3.3.	<i>Différentes unités de cogénération-trigénération</i>	88
4.3.4.	<i>Systèmes hybrides</i>	90
4.3.5.	<i>Récupération d'énergie sur les réseaux d'eaux usées</i>	91
4.4.	INTERETS DU STOCKAGE.....	93
4.5.	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 4	95
5.	CONFRONTATION/APPLICABILITÉ DES SOLUTIONS DE STOCKAGE/TRANSPORT SELON LES PRINCIPES NON CONVENTIONNELS AU DOMAINE DU DÉCHET - CHAPITRE 5	96
5.1.	TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR HABITAT/ TERTIAIRE	97
5.1.1.	<i>Technologies de stockage applicables au secteur habitat/tertiaire</i>	97
5.1.2.	<i>Technologies de transport applicables au secteur habitat/tertiaire</i>	99
5.2.	TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR INDUSTRIE BASSE TEMPERATURE : BLANCHISSERIE	100
5.2.1.	<i>Technologies de stockage applicables au secteur blanchisserie</i>	100
5.2.2.	<i>Technologies de transport applicables au secteur blanchisserie</i>	102
5.3.	TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR INDUSTRIE HAUTE TEMPERATURE : SIDERURGIE	103
5.3.1.	<i>Technologies de stockage applicables à la sidérurgie</i>	103
5.3.2.	<i>Technologies de transport applicables à la sidérurgie</i>	104

6.	ÉTUDES DE CAS - CHAPITRE 6	105
6.1.	SYNTHESE SUR LES UTILISATEURS D'ENERGIE CALORIFIQUE	105
6.2.	METHODOLOGIE DES ETUDES DE CAS	106
6.2.1.	<i>Phase 1 : préliminaires et étude de faisabilité technique</i>	106
6.2.2.	<i>Phase 2 : phase finale</i>	107
6.3.	CAS 0 : STOCKAGE SAISONNIER	108
6.4.	CAS 1 : SECTEUR HABITAT	113
6.4.1.	<i>Éléments de contexte</i>	113
6.4.2.	<i>Architecture système</i>	113
6.4.3.	<i>Besoins de l'utilisateur</i>	114
6.4.4.	<i>Stockage/Transport d'énergie thermique</i>	117
6.4.5.	<i>Caractéristiques de la source</i>	119
6.4.6.	<i>Fiche de synthèse</i>	121
6.5.	CAS 2 : BLANCHISSERIE	124
6.5.1.	<i>Éléments de contexte</i>	124
6.5.2.	<i>Architecture système</i>	124
6.5.3.	<i>Besoins de l'utilisateur</i>	125
6.5.4.	<i>Stockage/Transport d'énergie calorifique</i>	125
6.5.5.	<i>Caractéristiques de la source</i>	126
6.5.6.	<i>Fiche de synthèse</i>	128
6.6.	CAS 3 : SIDERURGIE	130
6.6.1.	<i>Éléments de contexte</i>	130
6.6.2.	<i>Architecture système</i>	130
6.6.3.	<i>Besoins de l'utilisateur</i>	131
6.6.4.	<i>Stockage/Transport d'énergie calorifique</i>	131
6.6.5.	<i>Caractéristiques de la source</i>	132
6.6.6.	<i>Fiche de synthèse</i>	133
6.7.	INFO PRIX	135
6.7.1.	<i>Estimation du prix d'une installation de stockage de chaleur</i>	135
6.7.2.	<i>Prix et caractéristiques des matériaux de stockage</i>	135
7.	CONCLUSIONS	136

8. ANNEXES..... 139

ANNEXE 1 : CAHIER N°1, LES DISPOSITIFS TECHNIQUES DE STOCKAGE GEOLOGIQUE OU EN GRAND RESERVOIR D'EAU DE LONGUE DUREE (INTER-SAISONNIER) ET BASSE TEMPERATURE

ANNEXE 2 : CAHIER N°2, LES DISPOSITIFS TECHNIQUES DE STOCKAGE SOUS PHASE LIQUIDE A HAUTE TEMPERATURE 139

ANNEXE 3 : CAHIER N°3, LES DISPOSITIFS TECHNIQUES DE STOCKAGE SOUS PHASE SOLIDE A HAUTE TEMPERATURE 139

ANNEXE 4° : CAHIER N°4, LES MATERIAUX DE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE ET LEUR MISE EN ŒUVRE POUR LES APPLICATIONS A BASSE ET MOYENNE TEMPERATURE

ANNEXE 5 : CAHIER N°5, LES MATERIAUX DE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE ET LEUR MISE EN ŒUVRE POUR LES APPLICATIONS A HAUTE TEMPERATURE

ANNEXE 6 : CAHIER N°6, LES MILIEUX DIPHASIQUES SOLIDE-LIQUIDE POUR LE STOCKAGE DE CHALEUR

ANNEXE 7 : CAHIER N°7, LES MATERIAUX DE STOCKAGE PAR PROCÉDES THERMOCHIMIQUE ET THERMOPHYSIQUE ET LEUR MISE EN ŒUVRE

ANNEXE 8 : STOCKAGE DE FROID : TECHNOLOGIE CRISTOPIA

ANNEXE 9 : UNITES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS : CARACTERISTIQUES DES FOURS ET DES CHAUDIERES

ANNEXE 10 : UNITES DE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS : VENTE D'ELECTRICITE ET DE CHALEUR

ANNEXE 11 : FICHE DEGRES BLEUS

ANNEXE 12: FICHE STEP STREAM

ANNEXE 13 : FICHE BIOFLUIDES ENVIRONNEMENT

ANNEXE 14 : FICHE : LA GEOTHERMIE A PARTIR DES EAUX USEES

ANNEXE 15 : FICHE PREMIO : STOCKAGE BIOGAZ

ANNEXE 16 : FICHE PREMIO : CRISTOPIA : STOCKAGE DE FROID POUR LA CLIMATISATION TERTIAIRE

ANNEXE 17 : FICHE PREMIO : EDF : STOCKAGE PAC

ANNEXE 18 : FICHE PREMIO : SAED

ANNEXE 19 : USINE IBM BROMONT AU CANADA :

STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE A CHANGEMENT DE PHASE

ANNEXE 20 : METHODE DE CALCUL : ETUDE DE CAS HABITAT

ANNEXE 21 : TABLEAUX DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE DE CHALEUR PAR TYPE (SENSIBLE, LATENT, THERMOCHIMIQUE/THERMOPHYSIQUE) ET PAR SECTEUR (HABITAT/TERTIAIRE, BLANCHISSERIE, SIDERURGIE)

ANNEXE 22 : TABLEAUX DE PROPRIETES PHYSIQUES DES HUILES ET MATERIAUX SOLIDES POUR LE STOCKAGE DE CHALEUR

1. ÉLÉMENTS INTRODUCTIFS – CHAPITRE 1

1.1. CONTEXTE GENERAL

La consommation d'énergie n'a de cesse d'augmenter et les ressources primaires actuelles ne satisferont pas la demande des prochaines générations. Le recours aux énergies renouvelables et leur déploiement en substitution de cet appauvrissement de ressource doivent répondre à notre demande énergétique.

La valorisation énergétique à partir des déchets et de la biomasse fait partie des voies en matières d'énergies alternatives. Que ce soit par décomposition biochimique ou par destruction thermique, l'énergie brute libérée est disponible sous plusieurs formes (gazeuse ou liquide) et doit suivant les modes de consommation être transformée sous forme chaleur ou électricité.

De plus, les consommateurs de ces énergies ne sont pas nécessairement à proximité des lieux de leur production. Il est ainsi nécessaire de transporter l'énergie sur des distances pouvant être relativement longues. Selon la forme de l'énergie, les conditions techniques et économiques de son stockage et de son transport influenceront la faisabilité et la rentabilité.

Ajoutons à cela que la demande énergétique est fluctuante, saisonnière, non constante avec des « pics » et des « creux » de consommation. Il est alors intéressant de stocker l'énergie pour une utilisation différée, voire pour profiter d'une meilleure tarification de rachat de l'énergie, véritable outil de gestion énergétique. Indiquons que le stockage peut avoir lieu sur le site de production ou sur le site d'utilisation et ce avec diverses implications techniques.

Le stockage d'énergie et le transport longue distance sont donc deux domaines tout à fait inséparables pour le développement des procédés de valorisation énergétique des déchets.

Le stockage d'énergie est primordial dans l'utilisation des sources d'énergies intermittentes (solaire, éolien) et l'énergie thermique n'échappe pas à cette nécessité. Il est maintenant admis que le stockage doit avoir un impact important dans l'optimisation du couplage entre la production d'énergie et son utilisation, notamment par la minimisation de la taille des systèmes de conversion et leur fonctionnement au régime nominal, donc au meilleur rendement.

Dans le domaine de la valorisation énergétique des déchets, le transport sur de longues distances doit s'imposer comme la solution pour connecter les unités de valorisation énergétiques (UVE) à des utilisations dans des réseaux de chauffage urbain. Compte tenu des énergies mises en jeu, ce point est de la plus haute importance dans le cas des centrales UVE mais aussi des centrales électrogènes. Or, la chaleur, mais également le froid, sont des vecteurs énergétiques qui ne se transportent pas actuellement avec une efficacité suffisante sur des distances supérieures à quelques dizaines de kilomètres. Plusieurs techniques sont connues ou mises en pratiques avec des degrés divers de performances comme le transport par réseau de vapeur ou d'eau chaude surchauffée. Mais il est clair que des progrès peuvent être réalisés.

1.2. DEFINITION DE LA PORTEE DE L'ETUDE

L'association RECORD a mandaté le groupement Cadet International/GRETh pour réaliser un état de l'art des procédés et technologies disponibles ou en développement en matière de stockage et de transport d'énergie calorifique (chaud/froid).

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

Les travaux industriels ou de recherche et développement réalisés en France, en Europe et plus largement dans les pays de l'OCDE sur les procédés de stockage thermique ont visé des procédés divers :

- la production électrique à partir de centrale à concentration solaire : pour ces procédés, les températures de stockage s'échelonnent entre 200 et 500°C
- le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : les températures de stockage se situent dans un spectre très étroit soit entre 0°C pour les besoins de climatisation et 60°C pour l'eau chaude sanitaire.
- la chaîne du froid et la conservation des produits agroalimentaires et des aliments avec des températures comprises entre -40°C et 0°C
- la production de chaleur à bas niveau par des capteurs solaires thermiques pour une gamme de température comprise entre 40 et 130°C

Comme on peut le constater, la valorisation énergétique des déchets et de la biomasse n'est pas citée dans cette courte liste d'applications.

Pour construire une étude cohérente par rapport à la demande de RECORD nous structurons donc le projet de la façon suivante :

A/ 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/ **identifier les propriétés intrinsèques** des matériaux de stockage et de transport thermique commercialisés ou non pour les processus suivants :

- stockage par chaleur sensible sur une phase liquide ou solide
- stockage par chaleur latente (essentiellement solide-liquide)
- stockage thermochimique (par réaction chimique réversible ou par sorption)

2/ **décrire les différentes méthodes de mise en œuvre** (encapsulation, mode de transfert entre les fluides et les matériaux de stockage) de ces matériaux dans les dispositifs techniques de stockage et de transport,

3/ **synthétiser les propriétés de performances des différents systèmes** associant matériau de stockage/équipements développés à un niveau industriel, démonstratif ou simplement au stade du laboratoire.

B/ l'identification du besoin et des contraintes techniques associés aux procédés de valorisation énergétique des déchets et de la biomasse. Ce travail est porté par Cadet International :

1/ **identifier les contraintes techniques** associées aux procédés de valorisation énergétique des déchets et de la biomasse,

2/ **caractériser les solutions de stockage et de transport** de l'énergie calorifique à partir des déchets - Étude de cas,

- Fiches documentées sur des cas d'études représentatifs,
- Analyses des critères : environnementaux, réglementaires, économiques, de performances (énergétiques), etc.,

C/ la confrontation des deux approches sur des cas d'étude identifiés par Cadet International et le GRETh

1.3. ELEMENTS INTRODUCTIFS : STOCKAGE ET TRANSPORT DE CHALEUR (ET DE FROID) DANS LES SYSTEMES THERMIQUES ET ENERGETIQUES

3.1.1 Stockage de chaleur et/ou de froid

Les dispositifs de stockage de chaleur ou de froid sont des éléments essentiels de tous dispositifs de gestion optimisée de l'énergie thermique. En effet, ils ont le potentiel de mettre en cohérence des demandes et des usages énergétiques intermittents, discontinus ou non synchronisés. On sait en effet que le potentiel de récupération énergétique basé sur une production et un usage simultanés et localisés sur un même lieu est extrêmement réduit. La non simultanété et une distance significative entre production et usage est la règle générale.

Ce constat nous amène à envisager l'étude des moyens nécessaires au traitement des cas les plus courants que nous avons identifiés comme production et usage non synchronisé et non localisé en un même lieu :

- le stockage thermique associé au site de production ou au site d'usage doit permettre la synchronisation de la ressource énergétique et du besoin
- le transport de chaleur (ou de froid) doit permettre le déplacement de la source thermique au stockage ou du stockage à l'usage dans des conditions où les coûts énergétiques sont minimisés : énergie des pompes de circulation, perte/entrée thermique sur les canalisations ou les dispositifs de transport.

Pour ce qui concerne le stockage thermique, de nombreuses technologies ont été étudiées et certaines développées à un stade industriel : la diversité des solutions tient tout autant aux principes de stockage, aux matériaux retenus avec capacités thermiques exigées, aux profils de charge et d'usage qu'aux coûts acceptables. Les principes de stockage de l'énergie thermique sont au nombre de trois. Il s'agit du stockage par chaleur sensible, du stockage par chaleur latente et du stockage thermochimique. Ce sont des principes qui impliquent des puissances spécifiques ainsi que des températures de stockage variées.

Ainsi, les capacités spécifiques – rapport de l'énergie stockée au volume de matériaux actifs mis en jeu dans ces différents procédés de stockage sont indiquées ci-dessous et montrent une réelle différenciation entre ces solutions:

- Chaleur sensible (solide ou liquide) : ~ 50 kWh/m³
- Chaleur latente (changement de phase) ~ 100-150 kWh/m³
- Stockage par thermochimie > 300-500 kWh/m³

Pour bien comprendre l'enjeu et la complexité de la problématique d'une gestion optimale d'une ressource énergétique sous forme de chaleur – par exemple, les rejets thermiques des usines d'incinération – il est intéressant d'imaginer la structure d'un réseau énergétique partant de la source thermique (en l'occurrence les rejets thermiques non valorisés directement de l'usine) à l'usage dont nous savons qu'il peut être extrêmement varié.

La chaîne thermique de la source à l'usage est une succession de phase de transferts thermiques, de transport, et de conversion d'énergie c'est à dire de transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique, électrique voire thermique à tout autre niveau de température. Nous résumons dans la figure 1 les technologies de conversion et de transfert d'énergie qu'il est raisonnable d'envisager lorsque la source thermique se situe en dessous de 250°C. Nous y avons adjoint les demandes thermiques (pour les seuls procédés industriels en France) ainsi que le potentiel de récupération thermique envisageable.

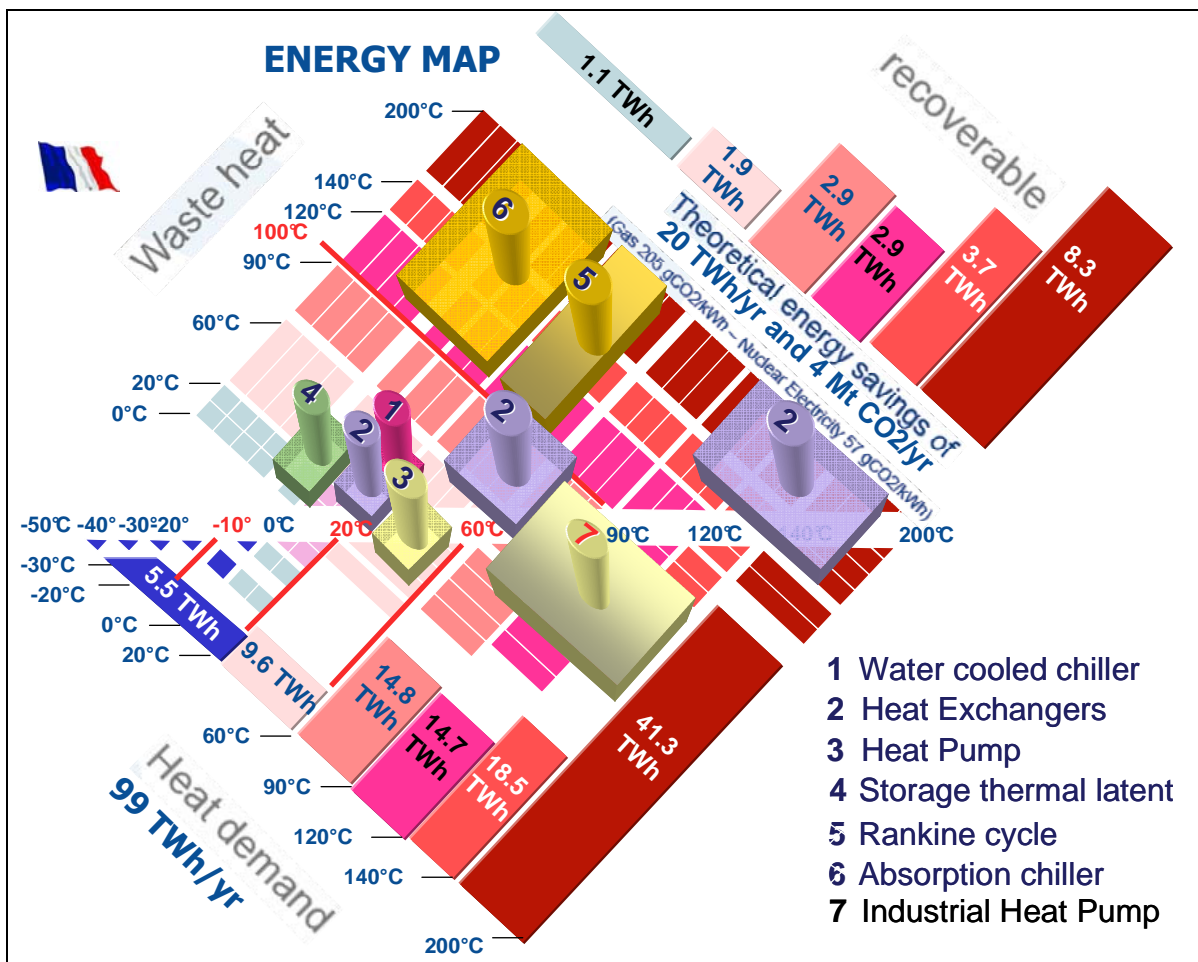


Figure 1 : Technologies de conversion et de transfert de l'énergie

On notera ainsi sur la figure 1, les technologies de transfert et de conversion suivante :

- **les échangeurs de chaleur** (2) se positionnent dans tout le spectre de température et peuvent permettre une valorisation des rejets thermiques par l'usage de récupérateurs statiques ou de régénérateurs,
- **les pompes à chaleur** (3 et 7) permettent une valorisation de rejets thermiques compris entre 10 et 70°C (en y incluant les pompes à chaleur à haute température) pour assurer une production de chaleur à plus haute température (<120°C avec les technologies actuelles)
- **les machines de froid à sorption** (6) peuvent permettre de valoriser les rejets thermiques de 80 à 140°C pour la production de froid (-40 à 0°C) pour les usages industriels (agroalimentaire, chimie, plasturgie, ...) ou de 0°C à 15°C pour les usages du bâtiment (rafraîchissement et climatisation)
- **les machines à cycles de Rankine (à fluide organiques) ou Stirling** (5) sont susceptibles de valoriser des rejets thermiques (>140°C) sous forme d'énergie mécanique et électrique

Comme nous l'avons signalé, la localisation du stockage thermique peut être :

- **Proche de la source thermique et dans ce cas il présentera une température de stockage élevée avec des périodes de stockage relativement courtes (horaire à journalier) pour limiter des pertes thermiques importantes (dans le cas d'un stockage sous forme de chaleur sensible ou latente) qui obéiraient l'intérêt du dispositif. La solution « thermochimique » pourrait en revanche éviter cet inconvénient.**
- **Proche de l'usage (après transfert ou conversion de l'énergie thermique provenant de la source) et dans ces conditions, les températures et besoins thermiques des usages imposeront les caractéristiques du stockage :**
 - **Dans le cas d'usages associés** à un processus industriel, une grande diversité de situations peut évidemment être envisagée : utilisation directe au niveau de température stockage, valorisation via une pompe à chaleur haute température ou une machine à sorption
 - **Dans le cas d'usages pour le bâtiment**, il est clair que les températures seront dans un spectre étroit et les capacités thermiques/périodes de stockage pourront s'échelonner d'un stockage journalier à un stockage inter-saisonnier. La valorisation de l'énergie thermique stockée se fera par pompes à chaleur ou usages directs via des échangeurs de chaleur (sous-station de chauffage et ECS).

Dans tous les cas, le transport d'énergie se pose et implique une réflexion sur le choix des média de transfert et cela pour des niveaux de température qui s'échelonne entre la température de la source et celle de l'usage.

Cette courte introduction nous permet de comprendre que la valorisation thermique qui est envisagée dans ce projet doit intégrer des possibilités de stockage thermique autorisant des performances très diverses suivant l'usage envisagé :

- à basse température (30/70°C) et grande capacité (hebdomadaire à inter-saisonnier) pour les usages associés au bâtiment,
- à haute température (100/250°C) pour des usages thermiques industriels.
- à très haute température (>250°C) pour la production électrique via un cycle moteur de type Rankine ou Stirling.

Et suivant les spécificités du dispositif de production et des caractéristiques des rejets thermiques :

- à haute voire très haute température pour le stockage de proximité de l'usine de production.

3.1.2 Transport de chaleur et/ou froid

Le transport de chaleur et/ou de froid intervient entre un site source et des utilisateurs distants. Cependant, transporter efficacement l'énergie thermique sur de longues distances est un vrai défi. Depuis la crise énergétique mondiale des années 1970, les questions environnementales mondiales et énergétiques ont attirées l'attention des chercheurs, des scientifiques, des politiques, des gouvernements, des opérateurs et d'autres au cours des dernières décennies.

Le transport peut être envisagé à haute et basse température. Le transport à basse température étant essentiellement destiné aux réseaux de chauffage urbain et/ou d'eau chaude sanitaire tandis que le transport à haute température vise les applications industrielles.

La forme énergétique transportée ou vecteur énergétique dépend de plusieurs paramètres. On peut en effet avoir du transport par chaleur latente (vapeur, coulis de glace,...), par chaleur sensible (fluide caloporteur/frigoporteur) ou de la chaleur de réaction (gaz ou liquide réactif). Tous ces vecteurs étant liés à une forme de stockage bien précise à savoir respectivement stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et thermochimique/sorption.

Les méthodes traditionnelles de transport de l'énergie thermique, qui sont habituellement basées sur la chaleur sur sa forme sensible ou la chaleur latente de l'eau sont limitées sur une petite plage de température (moins de 300 °C) et la distance (moins de 10 km).

Pour l'énergie thermique à basse température qui existe essentiellement sous forme de chaleur résiduelle des déchets, de nouvelles technologies ont été développées et de nombreuses recherches se concentrent sur le transport à grande distance de l'énergie calorifique résiduelle pour une utilisation dans les chauffages domestiques ou le refroidissement/climatisation et portent à l'heure actuelle sur cinq aspects principaux.

Ces technologies comprennent les réactions chimiques réversibles, le stockage d'énergie par changement de phase et le transport par véhicules ou pipelines, les alliages absorbants d'hydrogènes, l'adsorption chimique solide-gaz, l'absorption liquide-gaz,...

Habituellement, la méthode de réaction chimique réversible est adaptée pour le transport de l'énergie thermique à haute température (>200°C), tandis que le changement de phase, les alliages absorbants d'hydrogène, l'adsorption solide-gaz et de l'absorption liquide-gaz sont des méthodes appropriées pour le transport de l'énergie thermique à relativement basse température (100-200°C).

Néanmoins, pour le transport de l'énergie thermique à haute température, les réactions chimiques catalytiques réversibles sont presque les seuls moyens possibles.

3.1.3 Questions techniques sur l'état de l'art des technologies de stockage et de transport de l'énergie thermique

Compte tenu du nombre de systèmes de stockage/transport de l'énergie calorifique, plusieurs paramètres concernant ces systèmes nous ont intéressés dans le but d'avoir non seulement une vue globale mais aussi de pouvoir apporter une aide quant à la décision sur le choix du ou des systèmes retenus. Le stockage et le transport peuvent être effectués séparément mais aussi en couplage ; on parlera alors de système dynamique de stockage.

Processus	Termes	Unités
Source de chaleur	Température de la source	[°C]
	Puissance de sortie de la source	[kW]
	Energie de la source	[GJ]
	Fréquence de sortie de la source	[GJ/jour], [MJ/h/jour]
Performance du stockage de chaleur	Méthode de stockage de chaleur	
	Matériaux de stockage de chaleur	
	Température de changement de phase ou de réactions chimiques	[°C]
	Méthode d'échange de chaleur	
	Capacité thermique massique du stockage de chaleur	[J/kg], [kWh/kg]
	Capacité thermique volumétrique du stockage de chaleur	[J/m ³], [kWh/m ³]
	Quantité d'énergie du stockage de chaleur	[GJ]
	Temps de fonctionnement de stockage de chaleur	[h], [jour]
	Masse du système de stockage de chaleur	[kg]
	Niveau de développement des technologies	
Performance de production de chaleur	Température de sortie de la chaleur	
	Méthode d'échange de chaleur	
	Puissance de production de chaleur par unité de masse	[kW / kg]
	Puissance de production de chaleur par unité de volume	[kW / m ³]
	Pression de fonctionnement	[Pa]
Transport	Moyen de transport	
	Distance de transport	[km]
	Quantité d'énergie de la chaleur de transport par lot transporté	[GJ / lot]
	Utilisateurs de chaleur	
Utilisation de la chaleur	Température d'utilisation de la chaleur	[°C]
	Méthode d'échange de la chaleur	
	Taux d'utilisation de la chaleur	[kW]
	Quantité de chaleur utilisée	[GJ]

Etat de l'art en matière de stockage/transport de l'énergie calorifique : Source EIA

(Source: IEA-ECES Annex 18 "Transportation of Energy Utilizing Thermal Energy Storage Technology. 2n2 Workshop, 28-30 March 2007, Bordeaux, France)

Fréquence d'utilisation	Nombre de fois par jour et par lot transporté	Temps/jour
	Nombre de fois par année et par lot transporté	Temps/an
	Durée de vie du système	Années
Effet de réduction du CO2	Effet de réduction du CO2 par stockage thermique	[kg-CO2/kg-SET matériel]
	CO2 émis par les processus de transport de chaleur	[kg-CO2/kg-SET matériel]
	Total de réduction des émissions de CO2	[kg-CO2/kg-SET matériel]
Coût actuel	Prix de vente de la chaleur	
	Coût du transport par lot transporté	
	Coût des moyens de transport	
Coût idéal	Prix de vente de la chaleur	
	Coût du transport par lot transporté	

Impacts environnementaux, coût de mise en œuvre du système de transport : Source EIA

(Source: IEA-ECES Annex 18 "Transportation of Energy Utilizing Thermal Energy Storage Technology. 2n2 Workshop, 28-30 March 2007, Bordeaux, France)

1.4. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 1

CETE de l'ouest - Centre d'études techniques de l'équipement - consulté le 2/09/2010 - <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/>

Yukitaka Kato - « Update on the Questionnaire Survey for Thermal Energy Transportation, the Second report » <http://www.iea-ec.es.org/>

2. LES MATÉRIAUX, ÉQUIPEMENTS ET SYSTEMES POUR LE STOCKAGE THERMIQUE – CHAPITRE 2

2.1. STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR SENSIBLE

Le **stockage par chaleur sensible** consiste à mettre en contact un fluide primaire avec le milieu de stockage, fluide ou solide, qui se trouve à température distincte du fluide primaire, le résultat de cette opération est alors l'augmentation de la température moyenne du milieu stockant alors que l'état physique de ce milieu n'est pas modifié par ce changement de température :

- les fluides : eau, fluides organiques et huiles synthétiques sont des fluides potentiellement utilisables
- les solides : béton, céramiques et carbone sont également utilisés dans ces procédés.

Les principales propriétés thermophysiques à prendre en compte pour caractériser ces milieux ainsi que les paramètres de performances qui s'en déduisent sont résumées dans le tableau 1 :

Propriétés thermophysiques	Caractéristiques de performances du matériau	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Liquide : température de congélation et de vaporisation (à la pression atmosphérique) Solide : température de liquéfaction	Température minimale et maximale de stockage	
Capacité thermique spécifique (J/kg/K)	Capacité thermique massique de stockage (kWh/kg ou J/kg)	Volume et masse du dispositif de stockage
Masse Volumique (kg/m ³)	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ ou J/m ³)	
Solide : Conductivité thermique, masse volumique, chaleur spécifique	Temps de charge et de décharge de la chaleur	Dimensions des briques élémentaires de stockage et de la surface d'échange fluide/matériau pour répondre à la dynamique de la production ou de l'usage
Liquide : Conductivité thermique, Viscosité cinématique, coefficient volumétrique de dilatation	Temps de charge et de décharge (coefficient de transfert entre fluide de stockage et paroi de transfert)	Dimensions et conception du dispositif de stockage (ballons ou réservoirs, échangeurs) pour répondre à la dynamique de la production ou de l'usage

Tableau 1 : les propriétés thermo-physiques des matériaux pour le stockage en chaleur sensible

En ce qui concerne les liquides :

L'eau est évidemment le matériau de base le plus économique pour les applications « basse température » (10-90°C) Sa mise en œuvre est variée :

- Pour des périodes de stockage de courte durée (horaire à journalier), **les réservoirs isolés** thermiquement de volumes compris entre quelques dizaines de litres à plusieurs dizaines de m³ sont des technologies éprouvées et largement utilisées pour les applications courantes liées au chauffage, climatisation et eau chaude pour le bâtiment. La mise en œuvre de cette solution d'une grande simplicité de principe doit toutefois prendre en compte certains points critiques pour l'obtention de performances satisfaisantes :
 - o Une qualité élevée d'isolation thermique pour limiter les pertes (pour mémoire, on constate une perte proche de 30% sur une période d'une journée de nombre de ballons de stockage)
 - o La nécessité de maîtriser les phénomènes de stratification dans le fluide contenu dans le ballon et les transferts de chaleur sur les échangeurs immergés dans ce même fluide
- **Le stockage géologique dans les aquifères souterrains ou dans des réservoirs de grande dimension** peut permettre un stockage de grande capacité thermique sur des périodes de plusieurs mois et avec des spectres de température relativement étroit (20°C/70°C). Ces solutions ont connu et connaissent encore des réalisations remarquables en Allemagne pour valoriser la chaleur renouvelable issue de capteurs solaires : cette technologie de stockage a permis d'atteindre des taux de couverture du besoin thermique des logements de 25% (sans stockage inter-saisonnier) à plus de 50% (avec stockage inter-saisonnier).

Les huiles synthétiques ou les sels fondus sont des solutions pertinentes pour les hautes températures (>200°C) pour des périodes de stockage courtes (horaire à journalière). Les sels fondus représentent une solution évidemment plus complexe mise en œuvre pour de très hautes températures (>400°C) dans le cas de centrales solaires à concentration pour la production d'électricité.

En ce qui concerne les solides :

Le sol est un élément largement valorisé pour le stockage de longue durée (mensuel à journalier) bien que limité en gamme de température (20/40°C). Tout comme les aquifères ou le stockage d'eau de grand volume, l'Allemagne a développé un savoir-faire remarquable pour la valorisation de l'énergie solaire thermique à bas niveau de température.

Pour les hautes températures, céramiques, bétons et sables ont été étudiés et mise en œuvre dans quelques démonstrateurs et font l'objet de recherche particulièrement active en Europe du Nord.

Sans conteste les technologies mises en œuvre et développées sur ce principe présentent pour certaines un niveau de maturité qui autorise la réalisation de démonstrateurs dans des délais courts.

Pour permettre une description et évaluation des différentes technologies de stockage thermique en chaleur sensible qui ont un intérêt potentiel pour la cible visée par la présente l'étude nous avons donc choisi de rédiger trois cahiers spécifiques disponibles en annexe de ce présent rapport :

- ***Cahier 1 : les dispositifs techniques de stockage géologique ou en grand réservoir d'eau de longue durée (inter-saisonnier) et basse température***
- ***Cahier 2 : les dispositifs techniques de stockage sous phase liquide à haute température***
- ***Cahier 3 : les dispositifs techniques de stockage sous phase solide à haute température***

On renvoie le lecteur à ces cahiers notamment pour le chapitre final résumant les recommandations d'usage de chacune de ces technologies.

2.2. STOCKAGE THERMIQUE PAR CHALEUR LATENTE

Le **stockage par chaleur latente** est lié au changement d'état des corps : solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz ou encore solide-solide. Ces transformations se produisent généralement à température et pression constantes (pour les corps purs) et mettent en jeu des chaleurs latentes intéressantes ($> 150 \text{ kJ.kg}^{-1}$). 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.

Ce mode de stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lors d'une transition de phase de la matière (par exemple solide - liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie emmagasinée sous forme de chaleur ou de froid.

Les matériaux (organiques ou inorganiques) 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 souvent mal documentés et restent encore à évaluer.

Par ailleurs, pour le transport de chaleur et surtout de froid, l'utilisation de fluides chargés en particules ou frigoporteurs diphasiques pourrait constituer, dans un futur relativement lointain, une alternative aux fluides frigoporteurs ou caloporteurs, une réponse technique pour une réduction des diamètres de canalisation des réseaux de transport d'énergie et enfin une solution associant les fonctions stockage/transport avec un même fluide.

En ce qui concerne les fluides dits diphasiques qui peuvent assurer la fonction de stockage et de transport de chaleur et de froid, divers développements technologiques ont été entrepris depuis une quinzaine d'année et ont abouti au mieux à des démonstrateurs ou des premiers pilotes industriels

Les fluides frigoporteurs diphasiques sont formés d'une phase liquide comportant des parties solides en suspension qui peuvent changer de phase par transfert de chaleur. Plusieurs types sont à l'étude à ce jour:

- ✓ les coulis de glace ;
- ✓ les micro-émulsions ;
- ✓ les micro-encapsulations ;
- ✓ les clathrates ;
- ✓ les billes de gel.

- Les **coulis de glace** sont constitués d'eau ou de solutions aqueuses contenant des particules de glace.
- Les **micro-émulsions** sont constituées de très fines particules (quelques micromètres de diamètre, voire moins) de MCP obtenues par dispersion et stabilisées par des molécules **tensioactives**. Il s'agit généralement de microémulsions de paraffines dispersées dans de l'eau et stabilisées par des surfactants anioniques ou non ioniques. Il est possible d'inclure jusqu'à 50 % de MCP, mais les viscosités importantes entraînent alors de fortes pertes de charge. La stabilité des microémulsions à long terme dans les circuits pose problème. Enfin signalons que les particules de MCP sont en général assez petites pour entraîner une surfusion gênante.
- Les **micro-encapsulations** sont constituées de MCP dispersés dans un liquide inerte, chaque goutte étant individualisée cette fois-ci par un enrobage plastique rigide. Les techniques actuelles permettent d'obtenir des capsules de 1 à 5 μm de diamètre. Les enveloppes, ayant des épaisseurs de 2 à 10 nm, ne présentent pas de résistance thermique importante. Le MCP est souvent constitué de paraffines ayant des températures de fusion autour de la température ambiante. L'utilisation simultanée de capsules contenant des MCP différents et donc de

températures de fusion différentes est possible. Un des avantages par rapport aux microémulsions est que les pertes de charge restent comparables à celle de l'eau jusqu'à des teneurs en capsules dans le liquide inerte de 30 %.

- Les **clathrates** (hydrates) de gaz sont des solides constitués de molécules de gaz (CFC, HCFC, butane, propane...) emprisonnées dans une « cage » de molécules d'eau (molécule hôte). L'eau et le gaz peuvent être séparés par réchauffement au-delà d'une certaine température, la chaleur de réaction étant bien plus grande que celle de la fusion de la glace. Le mélange de ces particules solides et d'eau liquide donne un fluide qui peut parfaitement être transporté dans une canalisation.
- Les **billes de gel** d'un diamètre de l'ordre de 1 mm, sont constituées d'une matrice polymère contenant 90 % d'eau. Elles sont dispersées dans un liquide organique de manière à former une suspension qui peut circuler si la fraction massique de billes ne dépasse pas 36 % environ.

En ce qui concerne le stockage ou l'encapsulation dans des volumes « importants » (de dizaine de litre à plusieurs litres)- à la différence du cas précédent des micro-encapsulations ou gel pour fluide diphasique - des matériaux à changement de phase, diverses technologies ont été mises en œuvre :

- **Bac à glace** : Il s'agit simplement d'une cuve contenant de l'eau en contact direct avec une batterie où circule un liquide froid qui peut être de l'eau glycolée ou le fluide frigorigène lui-même. Autour de ce circuit va se former de la glace emplissant complètement ou partiellement la cuve. Le déstockage s'effectue soit par pompage de l'eau à 0 °C mélangée à la glace (fusion externe) soit par circulation d'un liquide chaud (fusion interne).
- **Nodules encapsulés** Le principe de ce stockage est d'utiliser un MCP confiné dans des récipients étanches de petites dimensions (quelques cm³ à quelques L). Il suffit de les refroidir pour solidifier leur contenu et de les mettre en contact avec la charge chaude pour le déstockage. Il existe ainsi, sur le marché, un certain nombre de produits. Ils sont constitués de briques, de poches, de plaques qui sont amovibles. Notons principalement l'utilisation de nodules sphériques. De tels nodules remplissent une cuve qui peut être traversée par un fluide frigoporteur tel que de l'eau glycolée.
- **Echangeurs** le principe d'encapsulation repose sur l'utilisation d'échangeurs traditionnels dont une partie des circuits tubulaires voire à plaques est remplies d'un MCP alors que l'autre partie des circuits est utilisée pour la circulation des fluides primaires ou secondaires.

Les principales propriétés thermo-physiques à prendre en compte pour caractériser les **Matériaux à Changement de Phase (MCP)** ainsi que les paramètres de performances qui s'en déduisent sont résumées dans le tableau 2 :

Propriétés thermophysiques	Paramètres de performances du matériau	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Température de congélation et de vaporisation (à la pression atmosphérique), température de liquéfaction	Température de stockage	
Chaleur latente de changement de phase (J/kg)	Capacité thermique massique de stockage (kWh/kg ou J/kg)	Volume et masse du dispositif de stockage
Masse Volumique (kg/m ³) solide et liquide	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ ou J/m ³)	Prise en compte des changements de volume lors du passage solide-liquide pour la définition des cellules d'encapsulation

Solide : Conductivité thermique	Temps de décharge de la chaleur	Conception/Dimensions des briques élémentaires de stockage pour répondre à la dynamique de l'usage
Liquide : Conductivité thermique, Viscosité cinématique,	Temps de charge (coefficient de transfert entre fluide de stockage et paroi de transfert)	Conception/Dimensions des briques élémentaires de stockage pour répondre à la dynamique de la source

Tableau 2 : les propriétés thermo-physiques des matériaux pour le stockage en chaleur latente

Sans conteste les technologies associées au MCP sont complexes à mettre en œuvre et seules les technologies développées pour les basses températures (-40°C/0°C) sont réellement matures et ceci pour des applications très ciblées (transport isotherme et frigorifique, climatisation de grands bâtiments).

Les solutions innovantes développées depuis plusieurs années sont prometteuses mais restent encore au stade préindustriel et ne peuvent pas aisément être intégrées dans un démonstrateur à court terme.

Toutefois pour permettre une description et évaluation des différentes technologies de stockage thermique en chaleur latente – qui ont un intérêt potentiel pour la cible visée par la présente l'étude - nous avons choisi de rédiger trois cahiers spécifiques disponibles en annexe de ce présent rapport :

- Cahier 4 : les matériaux de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à basse et moyenne température
- Cahier 5 : les matériaux de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à haute température
- Cahier 6 : les milieux diphasiques solide-liquide pour le stockage et le transport de chaleur

On renvoie le lecteur à ces cahiers notamment pour le chapitre final résumant les recommandations d'usage de chacune de ces technologies.

2.3. STOCKAGE THERMOCHIMIQUE

Le stockage thermochimique est défini comme un processus associant deux réactifs A et B dans une transformation réversible dont l'une des réactions est exothermique et la réaction inverse est endothermique.

Pour un usage de chaleur, il est pertinent que la réaction A+B soit exothermique alors que la dissociation de AB est endothermique et valorise le rejet thermique initial. La mise en œuvre de la réaction A+B est alors réalisée dans la zone d'usage après transport dans des conduites ou réservoirs distincts des deux espèces A et B. Les réactions chimiques généralement retenues sont des processus d'hydratation de sels minéraux et permettent d'atteindre des chaleurs de réaction de plusieurs centaines voire milliers de kJ/kg.

Un processus très proche –bien qu'abusivement positionné dans le stockage thermochimique car de nature physique – est celui de l'adsorption de vapeur d'eau sur des zéolites ou des sels qui présente des enthalpies d'adsorption (processus exothermique) également importantes (plusieurs centaines de kJ/kg d'adsorbant) et demande pour le processus inverse de désorption (processus endothermique) des enthalpies sensiblement comparables.

L'intérêt de tels processus sont évidents : il présente une capacité volumique et massique de stockage (rapportée au masse ou volume de réactifs ou d'adsorbant) beaucoup plus élevées que celle des processus précédemment décrits. Compte tenu de l'infrastructure plus complexe nécessaire à ce processus thermo chimique et thermo physique, les ratios d'enthalpie sur la masse totale du stockage (y compris les éléments d'infrastructure) sont moins différenciés que les ratios qui ne prennent en compte que les réactifs ou matériaux adsorbant. Cette solution présente de plus l'avantage de réduire notablement les risques de dégradations du stockage avec le temps puisque le stockage est un stockage d'espèces ou de supports solides (adsorbant) à la température ambiante. Seules des fuites ou dégradations des réactifs voire des entrées d'air dans les réacteurs contenant les adsorbants peuvent réduire les performances de ces dispositifs.

Ces processus sont par contre réservés au stockage de chaleur exclusivement. Le stockage de froid – qui pourrait également être envisagé – nécessite un dispositif plus complexe de type « Machine à sorption » - pour convertir ce stockage d'espèces en production de froid. Nous ne le retiendrons pas dans cette étude.

Sans conteste les technologies de stockage thermo-chimique reste un « objet » de laboratoire et les quelques valorisations engagées au cours de 30 dernières années sont restées complexes à mettre en œuvre et n'ont pas aboutit à des réalisations réellement industrielles.

Toutefois pour permettre une description et évaluation des différentes solutions étudiées - qui ne peuvent avoir un intérêt potentiel que de long terme pour la cible visée par la présente l'étude - nous avons choisi de rédiger un cahier spécifique disponible en annexe de ce présent rapport :

- ***Cahier 7 : les matériaux de stockage par procédés thermo-chimique et thermo-physiques et leur mise en œuvre***

On renvoie le lecteur à ces cahiers notamment pour le chapitre final résumant les recommandations d'usage de chacune de ces technologies.

2.4. LES CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCES DES DISPOSITIFS DE STOCKAGE

Evaluer les performances potentielles des solutions techniques précédemment décrites suppose la définition de critère de performance des dispositifs intégrant matériau/mise en œuvre/intégration dans le volume de stockage et mode de transfert avec le fluide porteur.

Les critères peuvent tout d'abord être associés à des contraintes environnementales et de sécurité notamment du matériau ou des réactifs au cœur du processus de stockage :

- Toxicité
- Inflammabilité et explosivité
- Impact environnemental (eutrophisation, ozone, effet de serre...)
- Recyclabilité

En lien avec les critères précédents, des critères d'ordre réglementaire peuvent également être prise en compte :

- Réglementation « Gaz à effet de serre », « Couche d'ozone »
- ICPE pour les installations à risque
- DESP pour les contraintes associées aux réservoirs ou échangeur sous pression et en température
- Directive REACH dans le cas de réactifs chimiques voire de MCP

Des critères plus économiques (conditionnés notamment par paramètres précédents) doivent évidemment être intégrés :

- Coût des matériaux et des mises en œuvre
- Disponibilité des matériaux

Ces derniers critères économiques peuvent se traduire par des représentations telles que figurées ci-dessous en figure 2 (par analogie avec le stockage électro chimique).

La représentation « Coût d'investissement par unité de puissance » (Capital cost per Power unit - \$/kW-) et « Coût d'investissement par unité d'énergie » (Capital cost per Energy Unit - \$/kWh) permet de dissocier avec des critères économiques, par exemple, des solutions techniques adaptées à des fortes capacités de stockage pour de faible puissance (cas du stockage inter-saisonnier pour les applications du bâtiment) à des solutions techniques –totalement opposées– de très forte puissance requise pour de faibles énergies stockées (cas de processus industriels spécifiques).

Les critères énergétiques peuvent se résumer aux quatre catégories suivantes :

- Critères associés à la dynamique de charge ou décharge du stock thermique

Il est effet essentiel de prendre en compte, dans le choix d'une solution, les spécificités du producteur ou de l'usager thermique : cette spécificité se traduit par un profil de puissance thermique (en fonction du temps) fournie ou requise et ceci sur une période identifiée *Par exemple, un ensemble de bâtiment – de par l'usage variable des dispositifs de chauffage, climatisation ou ECS et l'inertie thermique de ces bâtiments – peut réclamer des puissances thermiques variant d'un facteur de 1 à 10 suivant le moment de la journée : pour les fortes charges la période d'usage est de 1 à 2 h, pour les faibles charges la période d'usage est proche de 10h. De même, pour la production de chaleur, le processus peut être continu, il peut être au contraire stochastique comme cela peut être le cas d'une centrale solaire.* Dans ces deux situations, le dispositif de stockage doit pouvoir absorber ou céder l'énergie thermique en réduisant voire en éliminant tout risque de « pénurie » pour l'usager (en période de décharge) ou de « saturation » pour le producteur (en période de charge).

On pourra donc positionner les différents systèmes de stockage dans les repères suivants :

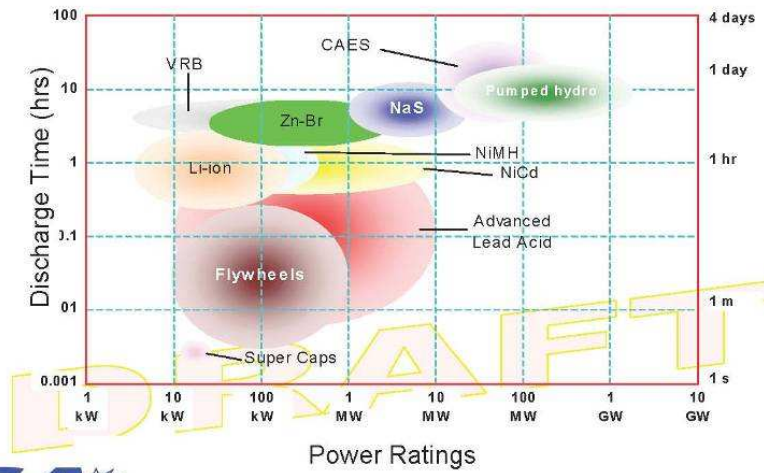
- La période de charge pour une puissance thermique fournie (producteur de chaleur) sans risque de saturation du dispositif
- Le période de décharge pour une puissance thermique requise (usage thermique) sans risque de pénurie pour l'usager

On peut évidemment s'attendre à ce que des puissances thermiques (en période de charge ou décharge) produites ou requises réclament non seulement des capacités de stockage élevées et ceci d'autant plus que la période de processus est longue mais également des ratio « Surface d'échange fluide primaire ou secondaire-matériau de stockage/Volume de matériau de stockage » élevés pour assurer une adéquation correcte entre le profil de production ou d'usage et les potentiels du dispositifs de stockage en charge et décharge.

- **Les critères associés aux capacités thermiques de stockage volumique et massique c'est à dire le rapport entre l'énergie thermique maximale stockée et le volume ou la masse du dispositif de stockage** : ces capacités sont évidemment très largement conditionnées par les choix technologiques du dispositif mais également des périodes d'alternance charge-décharge du stock thermique imposé par le système énergétique. **Par ailleurs, la capacité volumique est un critère important pour l'encombrement du dispositif stockage stricto sensu ou les paramètres du dispositif de transport en conduite, la capacité massique par contre aura toute son importance dans le cas de transport en conteneur.**
- **Un critère associée aux pertes thermiques qui peut s'exprimer par un rendement de stockage- rapport de l'énergie fournie par la source thermique lors de la charge à l'énergie cédée à l'usage lors de la décharge pour une période donnée – pour une période donnée de stockage.** Cet indicateur peut permettre d'identifier les périodes de stockage adaptées à chaque dispositif.
- **Un critère associé au vieillissement ou à la dégradation des matériaux pour des nombres de cycle charge/décharge donnés.** Ce critère peut être défini à partir d'une efficacité du dispositif de stockage définissable comme le rapport entre la valeur maximale de la capacité thermique après un cyclage et la valeur maximale relevée lors des tous premiers cycles.

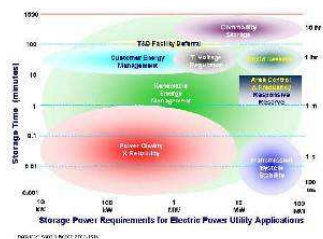
Discharge Time vs. Power Rating

T&D Facility Deferral - Transmission System Stability
- Commodity Storage



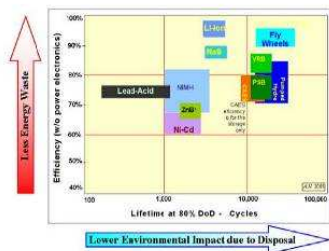
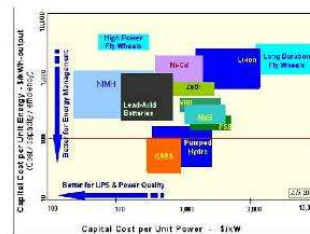
5

Current ESA Charts

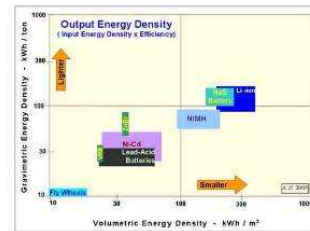


Comparisons of:

- Applications
- Power
- Efficiency
- Cycle Life
- Cost



- Energy Density
- Specific Energy
- Discharge time etc.



Simplicity has priority over Accuracy

2

Figure 2 : Critères performantiels de technologies de stockage applicables au stockage thermique par analogie au stockage électrochimique

2.5. CONCLUSION PARTIELLE : VALORISATION DES DONNEES RECUEILLIES POUR L'ETUDE DE CAS CONCRETS D'APPLICATION

A partir des cas concrets d'application identifiés par Cadet International, la démarche d'analyse de ces cas pourra être engagée de la façon suivante :

1/ **Phase initiale** : documenter les caractéristiques du système énergétique retenu (identification du producteur et des usagers, périodicité des charges/décharges, puissances installées des sources et des usages, niveaux de température des sources et usages, ...) et positionner le stockage dans ce système (proche de l'usage ou de la production)

2/ **identification des matériaux de stockage** adaptés à l'application : température, contraintes réglementaires, contraintes environnementales,

3/ à partir de l'analyse de la ressource et du besoin, évaluer la capacité thermique de stockage nécessaire : **comparaison des volumes, masses et coûts des matériaux initialement identifiés >> choix de plusieurs solutions**

4/ à partir des données de l'usage ou de la production, **identifier les solutions d'encapsulation ou de mise en œuvre** pour chacune de ces solutions susceptibles de répondre aux dynamiques de charge ou décharge du système

5/ **Proposer diverses solutions techniques de stockage et de transport:**

Dans la phase de structuration des solutions répondant – d'un point de vue technique – aux contraintes et exigences énergétiques du système énergétique (du producteur à l'usager), il nous semble judicieux d'évaluer 3 possibilités :

- la première (ou les premières, si plusieurs scénarii sont possibles) caractérisée en cela que les technologies retenues sont parfaitement éprouvées et qu'une évaluation économique est réalisable,
- une seconde (ou les secondes, si plusieurs scénarii s'avèrent possibles) plus innovante en ce sens qu'un élément technique caractéristique d'une vraie rupture technologique (le dispositif de stockage ou un dispositif d'échange ou de conversion) est intégrée,
- une troisième en rupture sur plusieurs éléments essentiels du dispositif dont le stockage thermique : cette dernière possibilité peut devenir alors devenir le noyau d'un projet de R&D à défendre auprès de financeurs publics.

2.6. SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES MODES DE STOCKAGE THERMIQUE

Nous avons vu qu'il existe actuellement trois principaux modes de stockage de chaleur : stockage par chaleur sensible, stockage par chaleur latente, stockage thermochimique/sorption.

Le tableau qui suit présente les caractéristiques principales des différents modes de stockage et les modes de transport associé.

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	Niveau de développement	Modes de transport associé	Secteur d'applicabilité possible
Stockage par chaleur sensible	Réservoir d'huiles thermiques	50°C < T < 400°C	0,55	mure mais peu utilisé	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat, IAA, Sidérurgie
	lit à garnissage solide (fluide de transfert eau ou huile)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de garnissage)	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat, IAA, Sidérurgie
	Réservoir d'eau (WTES)	T < 100°C	1,16	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat
	Réservoir d'eau sous pression	T = 200°C et 15 bar	1,16	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat, IAA
	Aquifer TES (fluide de stockage = eau)	T < 100°C	1,16	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat
	Cavern TES (fluide de stockage = eau)	T < 100°C	1,16	mure mais peu utilisé	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat
	Borehole TES (fluide de transfert eau)	T < 100°C	De 0,3 à 1 (suivant le type sol voir tableau matériau solide)	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat

	Stockage en Béton Haute température	$100^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$	0,7	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	IAA, sidérurgie
	Stockage en céramique	$100^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$	0,84	Prototype (DLR)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	IAA, sidérurgie
Stockage par chaleur latente	Stockage avec MCP à transition solide/solide	$40^{\circ}\text{C} < T < 180^{\circ}\text{C}$	De 37 à 107 (DT de changement d'état)	Prototype-matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, système à sorption, containers MCP, réaction chimique, réaction catalytique réversible	habitat, IAA
	lit à garnissage avec autres MCP (hydrates de sels, eutectiques)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de MCP)	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, système à sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	habitat, IAA, Sidérurgie
	lit à garnissage avec MCP paraffine	$T < 100^{\circ}\text{C}$	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat
	Stockage avec Matrice graphite/paraffine	$T < 100^{\circ}\text{C}$	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	Prototype (DLR)-matériaux commercialisés	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique	Habitat
	Stockage avec matrice graphite/sels	$110^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	Prototype Industriel (DLR)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie
	Reflux Heat Transfert Storage (avec alliage Zn70Sn30 (MCP))	$270^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$	176 (DT de changement d'état)	Prototype de recherche	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie

	Cascad LHTS	300°C<T<400° C	-	Prototype de recherche	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Sidérurgie
Stockage thermochimique et thermophysique	réaction chimique endo/exo thermique	35°C>T>1000° C suivant la réaction (CaCl ₂ +H ₂ O pour 60°C/80°C; CaSO ₄ +H ₂ O pour 100°C; MgO+H ₂ O pour T>200°C)	jusqu' plusieurs milliers kWh/m ³ suivant les réactions	prototype de recherche seulement	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie
	Zéolite/H ₂ O Zéolite silicate d'alumine (physisorption)	<100°C	De 124 kWh/m ³ en mode chauffage à 100 kWh/m ³ en mode rafraichissement relevés avec une zéolite 13X (température de stockage<100° C)	prototype de recherche seulement (Nombreuses études réalisées avec différents structures de zéolites)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Habitat
	Silicagel/H ₂ O (physisorption)	-	Une valeur de 50 kWh/m ³ a été atteinte avec ce couple	Etude réalisée par AAE Intec (Autriche)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	-
	Na ₂ S/H ₂ O (chimisorption)	-	780 kWh/m ³ pour le chauffage et 580 kWh/m ³ pour le rafraichissement	prototype de recherche seulement (ECN-programme SWEAT)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	-
	MgSO ₄ 7H ₂ O (chimisorption)	122°C	780 kWh/m ³	prototype de recherche seulement (EDF France)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	-

	adsorption avec des zéolites (prototype du ZAE Bayern)	150°C à 180°C (prototype du ZAE Bayern)	-	prototype de recherche seulement	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie
	absorption	<35°C	253 kWh/m ³ LiCl à basse température (<35°C)	prototype de recherche seulement (Climatewell Suède)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie
	absorption	basse température	180 à 310 kWh/m ³ à basse température	prototype de recherche seulement (LOCIE)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie
	absorption	-	-	prototype de recherche seulement (LOCIE)	réaction catalytique réversible (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie

(Source : GRETh/Cadet International)

Des informations complémentaires notamment sur les avantages et les inconvénients technologiques, environnementaux et de sécurité ainsi que le coût et la durée de vie des technologies sont données en **annexe 21**.

2.7. STOCKAGE FROID : TECHNOLOGIE CRISTOPIA (CIAT GROUP)

Dans ce sous-chapitre, nous nous intéressons à la technologie de stockage de froid développée par l'entreprise CRISTOPIA (CIAT GROUP).

Le STL

Le STL est composé d'une cuve remplie de nodules et d'un fluide caloporteur. Approximativement 60 % du volume de la cuve est occupé par les nodules et les 40 % restants par le fluide caloporteur (mono-éthylène glycol ou mono-propylène glycol ou chlorure de calcium, ...). Le nombre de nodules dans un système détermine à la fois l'énergie totale stockée dans le STL mais aussi les puissances d'échanges entre les nodules et le fluide caloporteur en mode de charge et de décharge.



Figure 1 : Un STL de CRISTOPIA

- Les nodules de CRISTOPIA

Les nodules sont des sphères fabriquées avec un mélange de polyoléfines obtenues par extrusion soufflage. Ils sont remplis avec des matériaux à changement de phase (PCM à transition solide-liquide). Les produits CRISTOPIA recouvrent une gamme dont les températures de fusion vont de -33°C à +27°C (voir le tableau 1).

Ils sont fabriqués en 2 diamètres : 77 mm (nodules SN) pour des applications industrielles à très basses températures (-18 à -33°C) ; et 98 mm (nodules AC et AN) pour des applications à basses températures (-3 à -15°C) et pour les systèmes de climatisation tertiaire à 0°C et +27°C.

Les caractéristiques mécaniques et chimiques de l'enveloppe du nodule sont parfaitement adaptées aux conditions de vie du nodule. La durée de vie du nodule est supérieure à "l'équivalent de 20 ans d'utilisation normale". Effectivement, les nodules résistent à 10 000 cycles sans rupture mécanique.

De plus, le matériau utilisé est complètement neutre vis-à-vis des matériaux à changement de phase (sels eutectiques) et des fluides caloporteurs les plus courants. Une fois rempli de PCM, un bouchon est soudé par une machine à ultrasons afin garantir une étanchéité parfaite.

Le nodule est le résultat d'un long travail de recherche et développement et beaucoup de tests ont été effectués afin de déterminer les caractéristiques du nodule (diamètre, épaisseur de l'enveloppe, régularité de l'épaisseur de l'enveloppe, matériaux de l'enveloppe, etc...) :

- Essais de traction
- Essais de cyclage
- Mesure de la pression d'éclatement
- Détermination du comportement visco-élastique (test de fluage et test de relaxation)
- Vieillessement chimique dans des glycols commerciaux et les PCM
- Mesure de la pression interne durant la cristallisation
- Microscopie optique en lumière polarisée
- Tenue au choc

Le résultat est une durée de vie supérieure à 10 000 cycles (l'équivalent de plus de 27 ans d'utilisation normale).

Caractéristiques du Nodule

Matière : mélange de polyoléfines

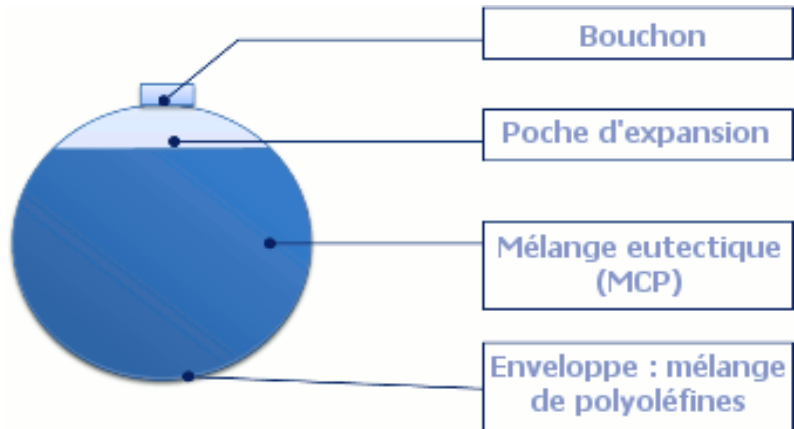
Neutralité chimique vis-à-vis des eutectiques et des fluides caloporteurs

Epaisseur 10/10 : pas de migration du caloporteur

Sphère obtenue par soufflage : pas de fuite

Soudure du bouchon par ultrasons

Réserve d'expansion : diminution des contraintes de l'enveloppe



Type de nodule	Température de changement d'état °C	Chaleur latente kWh	Capacité thermique spécifique		Conductivité thermique		Poids des nodules kg	Température limite d'emploi °C
			Solide kWh/K	Liquide kWh/K	Solidification kW/K	Fusion kW/K		
SN.33	-33	44,6	0,7	1,08	1,6	2,2	724	-40 à +60
SN.29	-28,9	39,3	0,8	1,15	1,6	2,2	681	
SN.26	-26,2	47,6	0,85	1,2	1,6	2,2	704	
SN.21	-21,3	39,4	0,7	1,09	1,6	2,2	653	
SN.18	-18,3	47,5	0,9	1,24	1,6	2,2	706	
AN.15	-15,4	46,4	0,7	1,12	1,15	1,85	602	-25 à +60
AN.12	-11,7	47,7	0,75	1,09	1,15	1,85	620	
AN.10	-10,4	49,9	0,7	1,07	1,15	1,85	617	
AN.06	-5,5	44,6	0,75	1,1	1,15	1,85	625	
AN.03	-2,6	48,3	0,8	1,2	1,15	1,85	592	
AC.00	0	48,4	0,7	1,1	1,15	1,85	560	
AC.27	+27	44,5	0,86	1,04	1,15	1,85	867	

Tableau 1 : Données pour un STL de 1 m³ de cuve

- Les cuves

L'échange thermique entre les nodules et le système se fait par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur circulant dans la cuve.

La cuve peut être cylindrique (en acier noir) pour des pressions de service jusqu'à 10 bars, ou parallélépipédique (en béton ou en acier) pour une pression de service atmosphérique. Les cuves cylindriques peuvent être horizontales, verticales, installées à l'intérieur, à l'extérieur, ou enterrées.

Les cuves sont équipées de trous d'hommes supérieurs pour le remplissage en nodules et d'un trou d'homme inférieur pour une vidange éventuelle. Deux diffuseurs inférieurs et supérieurs répartissent le fluide caloporteur dans la cuve pour un rendement optimum. Les dimensions de la cuve sont calculées en fonction du site et de la capacité du STL. Voici dans le tableau 2 suivant les principales caractéristiques d'une cuve STL :

Volume m ³	Diamètre extérieur mm	Longueur totale mm	Surface extérieure à isoler m ²	Brides entrée/sortie mm	Nombre de berceaux	Poids à vide kg	Volume du caloporteur m ³
2	950	2980	10	40	2	850	0,77
5	1250	4280	18	50	2	1250	1,94
10	1600	5240	29	80	2	1990	3,88
15	1900	5610	37	100	2	2900	5,82
20	1900	7400	47	125	3	3700	7,77
30	2200	8285	61	150	3	4700	11,64
50	2500	10640	89	175	4	6900	19,40
70	3000	10425	106	200	4	7300	27,16
100	3000	14770	147	250	6	12700	38,80

Tableau 2 : Exemples de caractéristiques des cuves

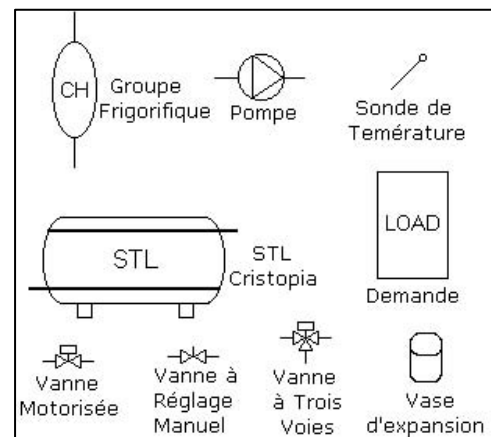
Prévoir un volume d'expansion utile de 1 % à 5 % en tenant compte de la pression (c.à.d. 10 à 50 L pour un réservoir d' 1m³).

Les schémas possibles

Il y a 4 différents types de systèmes à savoir :

- Schéma série amont
- Schéma série aval
- Schéma parallèle avec 1 point de consigne
- Schéma parallèle avec 2 points de consigne

La légende employée dans les schémas est représentée sur la figure de droite.



Pour plus d'informations, se référer à l'annexe 8 : Technologie de stockage froid CRISTOPIA.

2.8. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 2

- Pierre Odrú - « Le stockage de l'énergie » - Mars 2010
- Andrey Soukhojak, David Bank, Jay Tudor, «Thermal Energy Storage System Based on Novel Phase Change Material » - Octobre 2010 - <http://www.sciencedirect.com>
- Katja Alexanderson - « LATENT HEAT STORAGE AND TRANSPORTATION SYSTEM "TRANSHEAT CONTENEUR » - Février 2007 - <http://www.sciencedirect.com>

3. TRANSPORT DE L'ÉNERGIE CALORIFIQUE - CHAPITRE 3

Parmi les formes d'énergie les plus utilisées par l'homme on note l'énergie électrique, l'énergie mécanique et l'énergie thermique. S'agissant du transport, l'énergie électrique est transportable par des lignes à haute tension, l'énergie mécanique n'a pas besoin d'être transportée.

L'énergie thermique quant à elle a besoin d'être transportée du fait de la localisation des producteurs de chaleur et de ses utilisateurs. Le transport de l'énergie sur de longues distances demeure toutefois un vrai défi.

Les modes traditionnels de transport de l'énergie thermique, qui se font habituellement sous forme de chaleur sensible ou latente de l'eau sont limités par la plage de température (moins de 300°C) et la distance (moins de 10 km).

Depuis les années 2000, des technologies ont été développées et sont en cours de développement pour le transport longue distance. Elles ont été introduites spécifiquement pour gérer l'énergie de la chaleur résiduelle/rejets thermiques pour le chauffage domestique ou la climatisation.

Ces technologies comprennent :

- les réactions chimiques réversibles,
- le stockage par chaleur latente basé sur le changement de phase,
- le transport par des véhicules ou pipelines,
- l'utilisation d'alliage absorbant l'hydrogène,
- l'adsorption chimique solide-gaz,
- l'absorption liquide-gaz,
- etc....

Les réactions chimiques réversibles sont généralement adaptées pour le transport de l'énergie thermique à haute température tandis que le stockage par chaleur sensible basé sur le changement de phase, l'utilisation d'alliages absorbant l'hydrogène, l'adsorption solide-gaz et l'absorption liquide-gaz sont des méthodes plus appropriées pour le transport basse température.

De nombreux articles écrits par des chercheurs sur le transport d'énergie longue distance ont déjà été publiés. Le bilan est tel que Japonais, Suédois ou encore Allemands sont très avancés sur le sujet.

3.1. TRANSPORT D'ENERGIE A HAUTE TEMPERATURE

De manière générale, le stockage et le transport de l'énergie thermique à haute température ne peuvent avoir lieu que par réaction chimique catalytique réversible. Le reformage du méthane en utilisant la vapeur d'eau ou le dioxyde de carbone ainsi que la dissociation et la synthèse de l'ammoniac sont les réactions catalytiques les plus étudiées.

3.1.1. Reformage du méthane avec du dioxyde de carbone ou de vapeur

● Reformage du méthane par la vapeur ($\text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$)

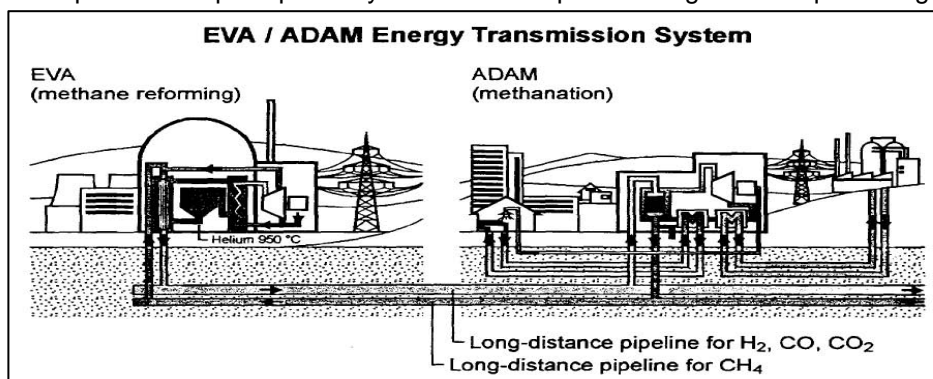
Un peu d'histoire

Les systèmes de transport d'énergie en utilisant le reformage du gaz naturel en utilisant la vapeur ont été démontrés théoriquement et expérimentalement au Centre National de Recherche de Julich en Allemagne dans le cadre du projet « Nukleare Fernenergie » (NFE=Nuclear Long-Distance Energy). Ce projet avait pour but de démontrer d'une part le fonctionnement de l'hélium chauffé pour reformer le méthane en utilisant la vapeur sur une échelle assez représentative et d'autre part de démontrer la performance technique et l'efficacité d'un système utilisant des pipelines thermochimiques comme moyen de transport.

Le système expérimental EVA/ADAM a connu deux phases de développement :

- La première installation expérimentale dite EVA ("Einzelspaltrohr-Versuchs-Anlage"="Single Tube Test Facility") a été réalisée en 1972. Elle consistait à tenir compte des réactions endothermiques du reformage.
- Le processus inverse appelé ADAM ("Anlage mit drei adiabaten Methanisierungsreaktoren"="Facility with three adiabatic methanation reactors") a quant à lui été réalisé en 1979.

Le schéma qui suit représente le principe du système de transport d'énergie calorifique à longue distance EVA/ADAM.



(Source IAE/ECES: Appendix B « Chemical Energy Transmission Systems »)

Exemple : transport d'énergie du nucléaire

Des chercheurs ont utilisés le reformage du méthane avec la vapeur pour stocker et transporter l'énergie thermique nucléaire selon quatre critères que sont la réversibilité chimique, une enthalpie de réaction suffisamment grande, une plage de température favorable pour des réactions réversibles et la disponibilité technologique.

Le procédé du reformage du méthane avec la vapeur ; en anglais Steam Methane Reforming « SMR » se déroule en deux étapes :

- Reformage du gaz naturel : la première étape du SMR consiste à faire réagir le méthane avec la vapeur à 750-800°C pour produire un gaz de synthèse ; un mélange essentiellement composé d'hydrogène H₂ et de monoxyde de carbone CO à 650°C.

L'équation chimique s'écrit :



- Dans la deuxième étape connue sous le nom de réaction de changement du gaz à l'eau (Water Gas Shift « WGS »), le monoxyde de carbone produit lors de la première réaction réagit avec la vapeur sur un catalyseur nickel pour former l'hydrogène et le dioxyde de carbone CO₂.

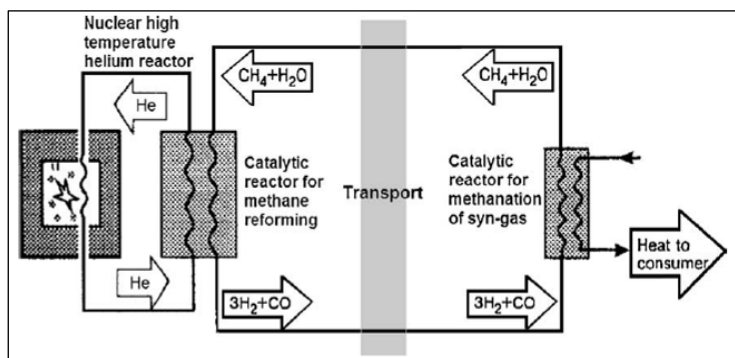
L'équation chimique s'écrit :



La figure ci-après montre le processus de conversion et de transport de la chaleur du nucléaire :

Le procédé utilise l'hélium comme intermédiaire pour fournir la source de chaleur nécessaire au reformage du méthane, puis le mélange gazeux y compris l'hydrogène et le monoxyde de carbone / dioxyde de carbone est transporté par pipeline vers le site de l'utilisateur.

Sur le site de l'utilisateur, la méthanation du gaz de synthèse libère une certaine quantité de chaleur.



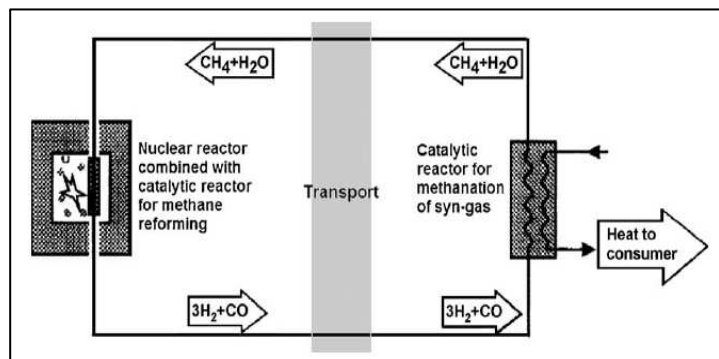
(Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

Afin que le cycle soit fermé et répété sans cesse, les produits de méthanation y compris le méthane et la vapeur sont réacheminés vers un autre pipeline. Cela permet de stocker l'énergie thermique nucléaire pendant la réaction de reformage du méthane et ainsi la transporter à température ambiante.

Les catalyseurs les plus souvent utilisés dans la réaction de reformage du méthane avec de la vapeur d'eau sont les catalyseurs à base de nickel, à base d'uranium,... Il s'agit habituellement des oxydes de métaux alcalins tels que l'Al₂O₃, le MgO, le MnOx,...

La température du réacteur d'hélium est d'environ 950°C, et sur le site de l'utilisateur on peut avoir de la vapeur à environ 530°C.

Des chercheurs ont développé un procédé amélioré appelé ICAR (Immédiate Accumulation Catalytique de l'énergie de rayonnement ionisant) pour la conversion et le transport direct de l'énergie nucléaire en énergie chimique. Le nouveau processus représenté sur la figure de droite combine les réacteurs nucléaires et catalytiques dans le même volume technologique et les charges du catalyseur dans la zone de libération d'énergie du réacteur nucléaire. Il est donc beaucoup plus efficace qu'EVA/ADAM ;



(Source : Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

● Reformage du méthane par le dioxyde de carbone

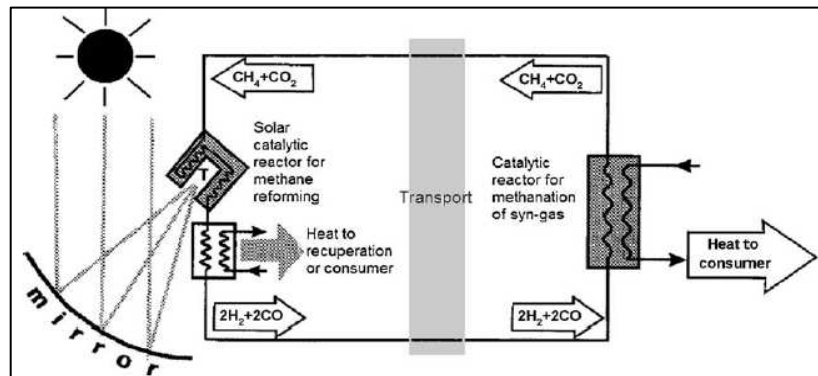
Le procédé de reformage du méthane avec le dioxyde de carbone a été étudié depuis les années 1980 en tant que système de transport chimique de chaleur comme une alternative en vue de surmonter certaines des difficultés potentielles.

Principalement développé par le Centre Allemand de Recherche Aéronautique (DLR), les Laboratoires Nationaux Sandia (SNL) aux Etats-Unis et l'Institut Weizmann en Israël (WIS), le cycle du reformage du méthane avec du CO₂ a été adapté et modifié en utilisant l'énergie solaire comme apport de chaleur primaire.

Généralement utilisé pour la conversion et le transport de l'énergie solaire concentrée, le principe du reformage du méthane avec du dioxyde de carbone est basé sur l'idée du cycle d'EVA-ADAM. Son schéma de principe est représenté sur la figure qui suit.

L'énergie provenant de la chaleur de l'hélium à haute température est utilisée pour refroidir le réacteur nucléaire et convertir par une réaction endothermique le méthane et la vapeur en oxydes de carbone et en d'hydrogène.

Le gaz résultant peut être pompé à travers des tuyaux sur de longues distances et être reconverti par réaction exothermique au point de besoin en énergie. C'est le processus ADAM.



(Source : Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

La réaction chimique principale est :



Et la réaction secondaire est :



En utilisant le transport de chaleur « chimique » il est possible de transporter l'énergie solaire sur plusieurs centaines de kilomètres. La chaleur ainsi transportée peut être utilisée dans des procédés industriels ou pour produire de l'électricité.

Comparaison entre le reformage du méthane avec le méthane et le reformage du méthane avec le dioxyde de carbone

Le transport de chaleur « chimique » en utilisant le reformage du méthane avec le dioxyde de carbone a été plus développé que celui avec la vapeur. Du fait de l'évaporation de la vapeur dans le cas d'applications utilisant l'énergie solaire par exemple. Aussi l'utilisation du CO₂ facilite les cycles d'arrêt et de démarrage.

Expériences/pilote

Un pilote d'exploitation usine de 480 kW d'apport de chaleur pour la réaction de reformage et 250 kW de puissance de chauffage dans l'étape de méthanation est testé depuis 1994. Ce procédé utilise l'énergie solaire à 700-1000°C pour une utilisation de la chaleur à 500°C. Les catalyseurs utilisés furent le rhodium et le ruthénium comme catalyseurs. L'application visée étant l'utilisation de vapeur industrielle. Le taux de conversion du méthane fut de 70% et l'énergie solaire absorbée de 97 kW.

Des pilotes de 300 kW à 6 MW ont été testés de 1972 à 1984 en utilisant l'énergie nucléaire à 900°C pour une utilisation de la chaleur à 600°C visant comme application la production d'électricité et la vapeur industrielle. Ces expériences ont été menées sur des distances d'environ 30 km.

3.1.2. Dissociation d'ammoniac et sa synthèse

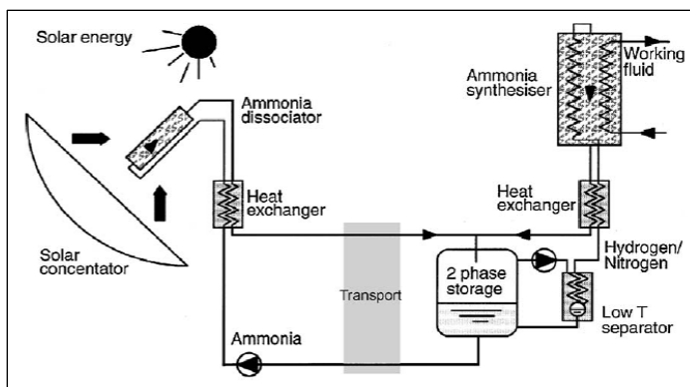
Un peu d'histoire

La réaction de dissociation d'ammoniac liquide comme un système en circuit fermé hybride de stockage d'énergie a été pendant plus de 30 ans étudiée par des chercheurs Australiens de l'Université Nationale d'Australie (ANU). De nombreuses études théoriques et expérimentales ont ainsi été établies.

Procédé

La réaction de synthèse de l'ammoniac qui est représentée sur la figure 4 est habituellement utilisée pour le stockage et le transport de l'énergie solaire à concentration.

La réaction chimique est : $2\text{NH}_3 \rightleftharpoons \text{N}_2 + 3\text{H}_2$ $\Delta H_{298} = 66.5 \text{ kJ/mol} (\text{NH}_3)$



(Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

La réaction endothermique de dissociation et synthèse de l'ammoniac fonctionne à des températures très appropriées aux récepteurs solaires ; la température de dissociation étant comprise entre 350°C et 500°C et la pression entre 10 à 20 MPa en présence de Ru ou Rh.

La fraction d'ammoniac étant à l'état liquide elle peut être automatiquement séparée dans un volume de stockage commun du mélange d'hydrogène/nitrogène.

L'industrie de l'ammoniac est bien développée car la production d'ammoniac est l'un des procédés chimiques les plus importants dans le monde. La réaction exothermique de la production d'ammoniac est couramment utilisée pour surchauffer de la vapeur d'eau pour la production d'électricité.

Comparaison de la dissociation/synthèse de l'ammoniac avec le reformage du méthane

La dissociation et la synthèse de l'ammoniac se distingue du reformage du méthane par l'absence de réactions secondaires qui permet une construction plus simple et un contrôle du réacteur. Néanmoins l'enthalpie de réaction du reformage du méthane est plus élevée. 247 kJ/mol pour le reformage du méthane avec le dioxyde de carbone par exemple contre 66,6 kJ/mol pour l'ammoniac.

Cet inconvénient pour autant qu'il soit majeur est à relativiser car la faible enthalpie de réaction exothermique de l'ammoniac peut être améliorée si des pressions plus élevées sont appliquées.

Expériences/pilote

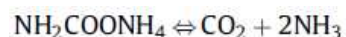
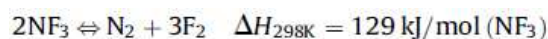
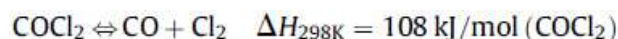
De 1977 à 1981, des pilotes de laboratoires ont été testés en utilisant comme source de chaleur l'énergie nucléaire et solaire à 800°C. Avec une source de chaleur à 800°C, il eut une production de vapeur à 500°C pouvant trouver des applications dans le domaine industriel.

Une expérience avec une exploitation d'usine à des pressions et des températures allant respectivement jusqu'à 16 MPa et 720°C a montré qu'un système ayant une puissance d'1 kW pouvait être réalisé.

De 1996 à 2004, des pilotes de 15 kW ont été testés en utilisant comme source de chaleur l'énergie des déchets à 600°C. Après cette expérience l'application visée fut le stockage d'électricité.

3.1.3. Caractéristiques des éléments catalyseurs dans les réactions réversibles pour le transport de chaleur à haute température

Plusieurs autres réactions ont été étudiées pour l'application du transport de chaleur tels que :



Cependant, ces réactions optionnelles n'ont pas été bien développées et/ou n'ont pas fait l'objet de publications.

Bien qu'étant le seul moyen de transporter l'énergie thermique à haute température, des procédés autre que la conversion thermochimique ont été développés depuis plusieurs décennies mais des pilotes à grande échelle pour une application usine n'ont pas été réalisés. Les principaux inconvénients étant la durée de vie des catalyseurs et la limite du coût pour une utilisation à grande échelle.

Le catalyseur est un élément essentiel pour les réactions chimiques réversibles. Dans la littérature, on retrouve de nombreuses études portant sur la cinétique des réactions et des catalyseurs.

Les catalyseurs à base de métaux non-nobles tels que le Fe, Co ou Ni, sont très actifs mais ils se désintègrent rapidement et disparaissent complètement au bout de quelques heures en raison de la formation de carbone sur la surface.

Parmi les métaux nobles, les plus étudiés sont Ru et Rh. Le coût des réacteurs catalytiques est généralement assez élevé et la durée de vie des catalyseurs est littéralement affectée par le processus de vieillissement des catalyseurs au cours des maintenances successives et de remplacement des réacteurs.

Le développement de nouveaux catalyseurs bon marché et efficaces est ainsi l'une des questions clés pour les systèmes chimiques réversibles dédiés au transport de chaleur à longue distance.

Expériences/pilote

Un pilote de laboratoire a été testé de 1975 à 1992 en utilisant l'énergie solaire à 900°C et en se basant sur la réaction SO₃/SO₂. Les résultats furent que de la chaleur à 500°C fut produite. L'une des applications visées fut le stockage.

Un réacteur de laboratoire fut aussi testé en utilisant la chaleur des déchets à 150-200°C pour des applications de chauffage résidentiel et commercial. La chaleur fut transportée sur une distance d'environ 30 km en se basant sur la réaction de synthèse et de décomposition du méthanol.

Pour les mêmes applications un pilote de 100 MW fut testé en se basant sur la réaction de synthèse et de décomposition du méthanol en utilisant comme source l'isopropanol. La chaleur fut transportée sur une distance de 50 km.

3.2. TRANSPORT D'ÉNERGIE A BASSE TEMPERATURE

Issue de l'incinération des déchets par exemple, la chaleur résiduelle à bas niveau de température (100 et 200°C) peut être valorisée via un réseau de chaleur ou de froid trouvant ainsi une application en chauffage et climatisation/rafraîchissement dans le secteur habitat/tertiaire. Dans une politique d'économie d'énergie et de préservation de l'environnement global, il est judicieux de transférer la chaleur provenant de la valorisation des déchets pour diverses applications dans des secteurs distincts. Les processus/technologies de transport d'énergie sont nombreux mais les plus cités sont la décomposition et la synthèse du méthanol ; l'utilisation des matériaux à changement de phase ; l'utilisation des alliages absorbants ainsi que l'utilisation des systèmes à absorption et adsorption d'hydrogène et les réseaux de transport de chaud et froid classiques.

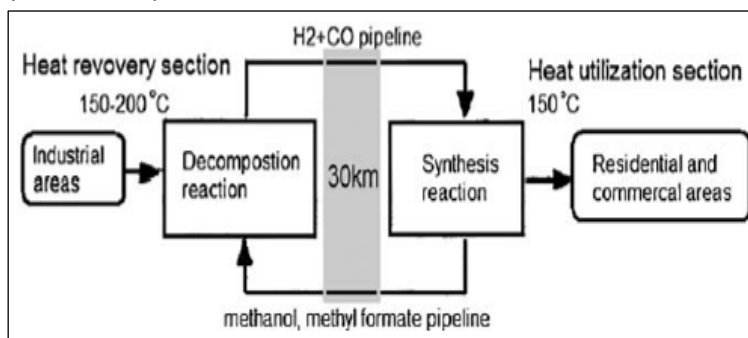
3.2.1. Les réactions chimiques : Décomposition et synthèse du méthanol

La synthèse et la décomposition du méthanol est l'une des réactions chimiques réversibles pouvant être utilisée pour transporter la chaleur issue des déchets. Le méthanol est en effet considéré comme le candidat le plus approprié en tant que moyen de transport à cause de ses bonnes propriétés dont les principales sont sa température de décomposition, sa pureté et son coût bon marché.

La réaction chimique s'écrit :



La figure ci contre montre le principe de décomposition du méthanol et sa synthèse pour le transport de la chaleur à bas niveau de température.



(Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

La chaleur dégagée pendant la synthèse du méthanol ne correspond qu'à 15% de l'énergie stockée dans l'hydrogène.

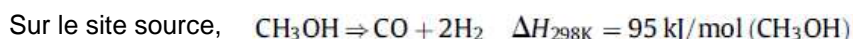
Si cependant cette énergie peut être introduite dans le processus de reformage, on pourrait obtenir une très haute efficacité de stockage. Avec ce système, il n'y a pas d'émissions de CO₂ supplémentaire car on utilise le CO₂ atmosphérique comme source de carbone.

Pour atteindre une meilleure efficacité, on procède à une synthèse du méthanol en phase liquide en deux étapes.

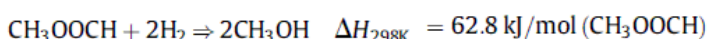
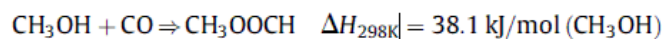
Un exemple de synthèse du méthanol en deux étapes est défini comme suit :

- La première étape est la carbonylation du méthanol pour former du méthyle formate
- La seconde est hydrogénolyse du formate.

Les réactions chimiques impliquées sont définies comme suit :



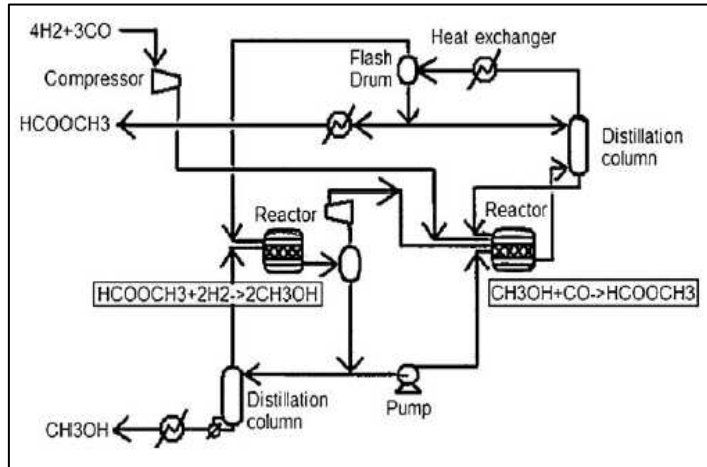
Sur le site de l'utilisateur,



Les deux étapes de synthèse du méthanol sur le site utilisateur sont représentées sur la figure ci-après :

Deux sortes de réacteur impliquant à la fois une distillation et une réaction catalytique ont été développées, à savoir la résine échangeuse d'ions et l'alliage cuivre-aluminium.

Le résultat d'une simulation montre que l'efficacité du transport est de 75% pour un taux de conversion de réaction de 90% sur le site source et le site de l'utilisateur.



(Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

Comparaison de la décomposition du méthanol avec le reformage du méthane avec la vapeur

Comparé au système EVA-ADAM (reformage du méthane avec la vapeur), la plage de température de la réaction du méthanol est de 150 à 200°C avec des catalyseurs tels que l'alliage de cuivre-aluminium de composition proche de 50/50 (pourcentage massique) contre plus de 700°C pour EVA-ADAM.

Aussi, en comparant les efficacités du transport de chaleur sur une même distance de 30 km pour le reformage du méthane avec la vapeur et la décomposition/synthèse du méthanol, il en ressort que l'efficacité du transport avec le méthanol est plus élevée qu'avec la vapeur d'eau soit respectivement 53% et 32%.

Expériences/pilote

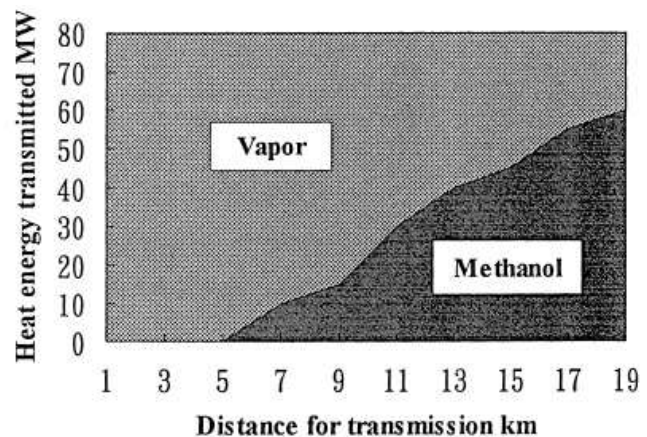
Un réacteur de laboratoire fut aussi testé en utilisant la chaleur des déchets à 150-200°C pour des applications de chauffage résidentiel et commercial. La chaleur fut transportée sur une distance d'environ 30 km en se basant sur la réaction de synthèse et de décomposition du méthanol.

Pour les mêmes applications un pilote de 100 MW fut testé en se basant sur la réaction de synthèse et de décomposition du méthanol en utilisant comme source l'isopropanol. La chaleur fut transportée sur une distance de 50 km.

Champ d'application de chaque système :

Le procédé au méthanol est compétitif économiquement au delà de 30 MW et 10-25 km par rapport au réseau de chaleur classique (vapeur).

(Source : HASEGAWA et al. / Applied Energy 61 (1998) 1-12)



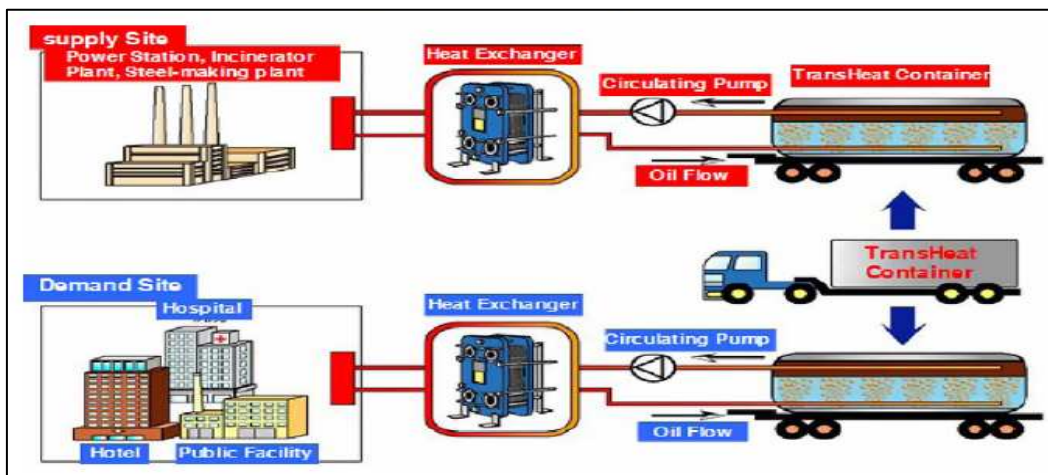
3.2.2. Le changement de phase

Généralités

Un système de stockage et de transport d'énergie thermique par changement de phase est capable de collecter et d'accumuler de la chaleur des déchets industriels et résiduels à basse température (<200°C).

Des chercheurs ont proposés un système de récupération de la chaleur à bas niveau de température en utilisant les MCP. Ce système implique l'utilisation de MCP ayant des faibles points de fusion (Melting Point : MP) et une très grande chaleur latente (Latent Heat : LH). C'est le cas par exemple de l'érythritol (MP: 118 °C, LH: 340 kJ / kg) et du sodium trihydrate d'acétate de (MP: 58 °C, LH: 264 kJ / kg).

La figure qui suit représente le système de fonctionnement.



(Source IAE/ECES: latent heat storage and transportation system "TransHeat container")

Un accumulateur mobile de chaleur latente récupère la chaleur des déchets industriels et la distribue sur de vastes zones pour un usage municipal au lieu d'industriel.

Stockée sous forme de chaleur latente par la fonte des MCP, la chaleur résiduelle est transportée dans des cuves conteneurs. Par solidification du MCP, la chaleur stockée peut être utilisée pour chauffer l'eau. Cette eau chauffée peut être ensuite fournie pour un usage résidentiel.

Dans le conteneur, la masse à transporter peut être minimisée car le système implique un échange de chaleur directe entre le MCP et l'huile utilisée comme moyen de transfert de chaleur.

D'une manière générale, le MCP peut être chargé dans des conteneurs avec la chaleur résiduelle des déchets qu'il a emmagasiné puis transporté par des camions, des trains ou des navires.

Sur le site d'utilisation, le MCP est déchargé pour une utilisation de son énergie stockée comme indiqué sur la figure ci-dessus.

Avantages du système

Les avantages du système sont la flexibilité, la haute efficacité et la stabilité de la provision de chaleur.

Aussi, l'utilisation de la chaleur latente des MCP pour transporter la chaleur des déchets permet de conserver les combustibles fossiles et de réduire les émissions de CO₂ de l'industrie.

Ce système ne nécessite pas l'utilisation de combustibles fossiles mais permet une récupération et une distribution efficace de la chaleur des déchets.

Le transport par camions ou autres n'a pas de limitation spéciale comparé aux pipelines. Le conteneur est spécialement conçu pour améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur. Le MCP peut réduire l'influence des fluctuations de température sur le site source comme un réservoir tampon pour divers types de chaleur résiduelle.

Exemples de réalisation

En fonction de la température du site source, des chercheurs Japonais ont mis au point deux sortes de conteneurs « TransHeat MPC » pour des utilisations à différentes températures.

Les matériaux à changement de phase retenus sont l'acétate de sodium trihydrate (point de fusion: 58°C , chaleur de fusion: 264 kJ / kg, température d'approvisionnement sur le site de l'utilisateur : 50°C) et l'érythritol (point de fusion:118°C, chaleur latente de fusion: 340 kJ / kg, température d'approvisionnement sur le site de l'utilisateur : 110°C).

Approvisionnement en chaleur pour des besoins d'eau chaude.

À l'usine de Kagaya KURIMOTO, LTD dans la ville d'Osaka, les gaz de combustion de four sont stockés dans l'érythritol.

Le conteneur est transporté à Sumiyoshi à 3 kilomètres de l'usine de Kagaya.

Dans l'usine Sumiyoshi, l'eau chaude à 60 °C est réchauffée à 80 °C en utilisant le MCP. Cette eau chaude alimente la salle de bain des employés. Sur la figure de droite on peut voir un des conteneurs en fonctionnement.

C'est un conteneur de 5m³ dont la capacité de stockage est d'environ 415 kWh soit 1490 MJ.

Ne disposant pas de source de chaleur, en utilisant la chaleur des déchets de l'usine de Kagaya, l'usine de Sumiyoshi participe à la réduction des émissions de CO₂.



(Source IAE/ECES: latent heat storage and transportation system "TransHeat container")

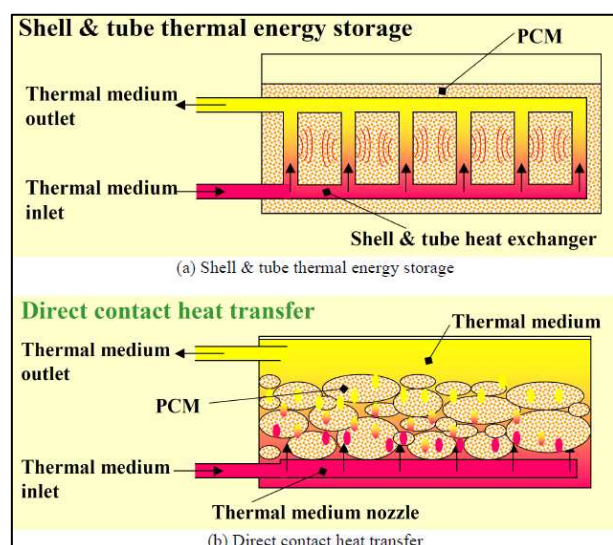
Transfert par contact direct

Un échangeur à calandre classique ; figure (a) est comparé avec un système de transport de chaleur par contact direct ; figure (b).

Dans une étude préliminaire, 15 kg d'érythritol ont été utilisés pour le stockage de la chaleur et chargés dans un réservoir de stockage de chaleur, ainsi que 8,7 kg d'huile minérale dispersés pendant le changement de phase du MCP pour l'échange thermique.

Le procédé de dispersion d'huile a été optimisé dans le but d'atteindre une meilleure dispersion et un contrôle de la dimension des particules de MCP coagulées.

Les résultats sont tels que l'optimisation de la taille des particules a permis d'améliorer le transfert de chaleur pendant la charge et la décharge.



(Source IAE/ECES The development of Transport System of Thermal Energy)

La chaleur stockée par le MCP peut être utilisée comme source de chaleur pour une pompe à chaleur simple effet pour la production de froid et de chaud.

Pour pouvoir récupérer plus de 85% de l'énergie stockée, il a été démontré que pour utiliser une pompe à chaleur à la sortie du conteneur MCP il faut une production de chaleur de plus de 90°C.

Une expérience a été faite en utilisant un support de stockage de chaleur pouvant transporter 300 kg de MCP. De la vapeur à 160°C fut produite à partir d'une chaudière comme source de chaleur. La production de chaleur fut de 180 MJ et 15,8 kW.

Une expérience avec un camion d'une capacité de charge de 2 tonnes chargé de 400 kg d'érythritol a été utilisée pour transporter de la chaleur sur une distance de 5 km. Une pompe à chaleur à absorption de 25 kW a été utilisée et une production de froid de 7 à 10°C a été observée.

La figure de droite montre un transport de chaleur avec un support de stockage d'une capacité de 900 MJ et 4 t



(Source IAE/ECES The development of Transport System of Thermal Energy)

3.2.3. Chemical Heat Pump Container (CHCP)

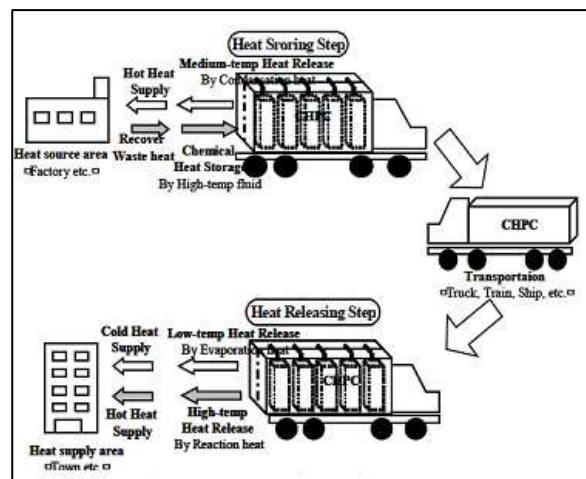
Un système d'utilisation efficace d'énergie utilisant les CHCP est proposé sur la figure ci-après.

Dans ce système, la chaleur des déchets des usines est stockée comme une énergie chimique dans le CHCP puis transportée sans perte de chaleur en utilisant des camions, des trains, des bateaux,...

Stockée entre 0 et 60°C et transportée de 0 à 12 GJ pendant près de 30 jours, on augmente la température de l'énergie stockée sur le site d'approvisionnement pour un usage en chauffage et/ ou on abaisse la température de l'énergie stockée pour un usage de froid/réfrigération sans apport d'énergie chimique supplémentaire. On parle de système thermopompe.

L'utilisation des pompes à chaleur chimiques (Chemical Heat Pump = CHP) peut être une technique clé pour avoir des systèmes efficaces utilisant l'énergie perdue car il combine deux fonctions importantes que sont : le stockage de chaleur et l'utilisation de pompe à chaleur.

(Source: IEA, ECES IA Annex 17, 3rd Workshop, 1-2 October



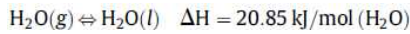
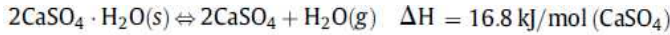
2002, Tokyo, Japan)

Le CHP peut stocker l'énergie thermique comme la chaleur des déchets provenant d'échappement d'air, d'énergie solaire, d'énergie géothermique ou autre et libérer à des températures diverses.

En fonction du niveau de températures ciblé, le système CHCP utilise différents couples solide-gaz. Il s'agit notamment de :

- (1) CaCl₂/H₂O, à 60-80°C (2) CaSO₄/H₂O, pour 100-200°C (3) MgO/H₂O, pour plus de 200°C

Une réaction chimique typique est,



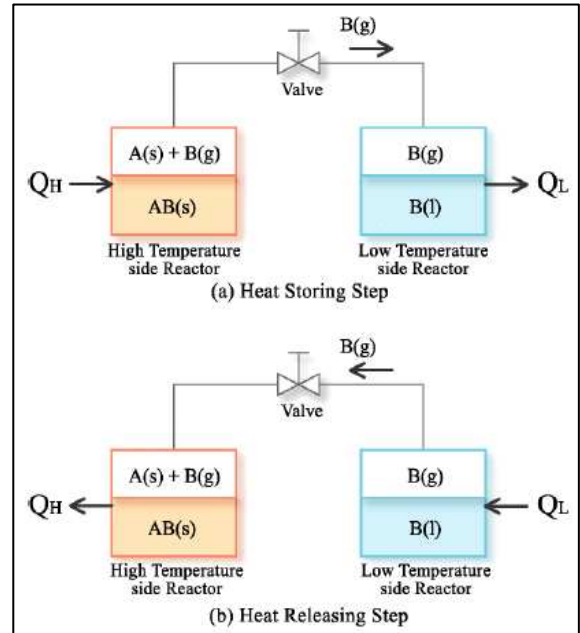
Sur la figure ci contre on peut voir une configuration typique **gaz-solide**.

Les réactions chimiques ainsi que le stockage de chaleur surviennent à différents niveaux de pression.

Le CHP fonctionne comme un système batch mais avec une étape de stockage de chaleur et une étape libérant la chaleur.

Comparaison du système CHPC avec le système MCP conteneurs

Le système CHPC permet d'obtenir facilement différents niveaux de température en ajustant essentiellement les niveaux de pression sur le site de l'utilisateur. Il est de ce fait considéré plus souple que le système d'MCP avec conteneurs.



(Source: IEA, ECES IA Annex 17, 3rd Workshop, 1-2 October 2002, Tokyo, Japan)

3.2.4. Alliages absorbant d'hydrogène

Les alliages absorbant d'hydrogène permettent de transporter la chaleur sur de longue distance en utilisant l'hydrogène comme moyen de transport avec très peu de pertes de chaleur.

Généralités

Étudié au Japon pour le transport des rejets thermiques, les alliages absorbants d'hydrogène peuvent réagir de manière réversible avec l'hydrogène. En effet, lorsque l'hydrogène est absorbé, de la chaleur est libérée. Inversement lorsque le métal est chauffé, l'hydrogène est libéré.

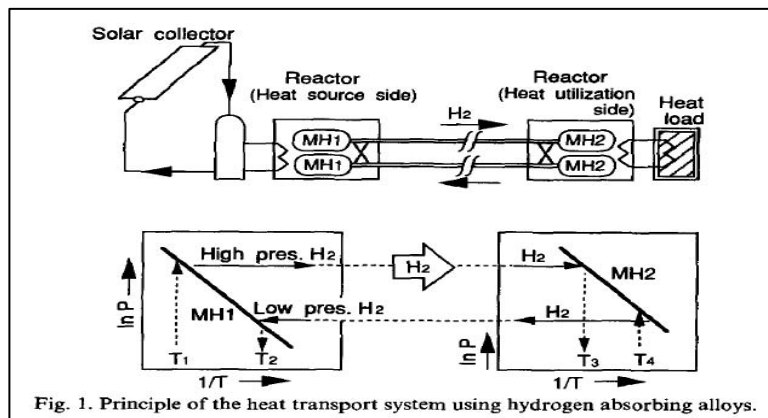


Fig. 1. Principle of the heat transport system using hydrogen absorbing alloys.

(Source : ht. J. Hydrogen Energy, Vol. 23, No. 9, pp. 815-824, 1998)

Le système de transport de chaleur comprend des alliages absorbants d'hydrogène ayant des caractéristiques différentes sur le site source et sur le site utilisateur. Situé à une certaine distance l'un de l'autre, les deux sites sont reliés par l'hydrogène. Les alliages absorbants d'hydrogène sont habituellement différents sur les deux sites pour pouvoir satisfaire à la condition de température. La figure de droite montre le principe du transport de la chaleur en utilisant les alliages absorbants d'hydrogène.

Sur le site source, l'alliage absorbant d'hydrogène MH1 absorbe de l'hydrogène à basse pression préalablement refroidi par une source de chaleur à basse température T2 ainsi que les rejets d'hydrogène à haute pression chauffés au préalable par une source de chaleur à haute température T1.

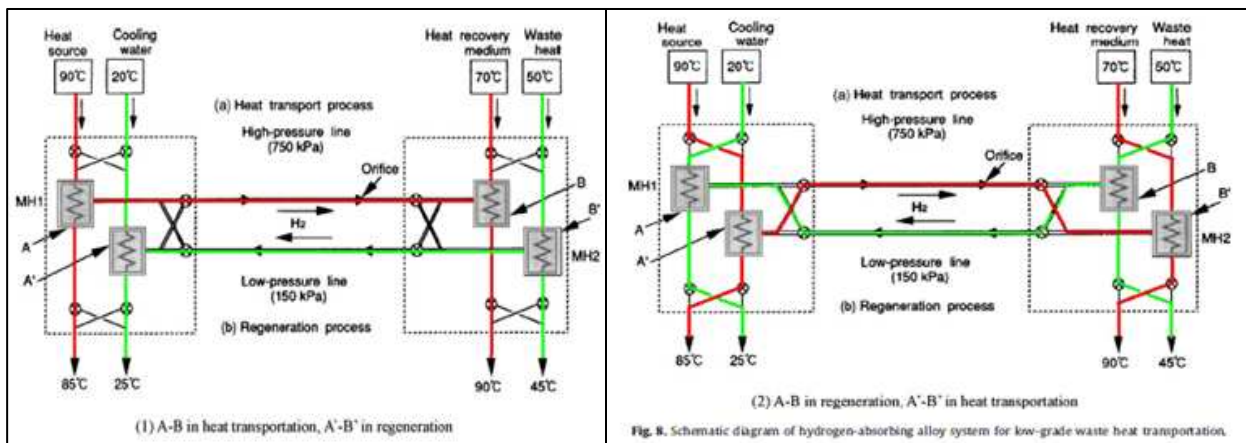
Sur le site d'utilisation, la chaleur est pompée pour alimenter la charge thermique par la pression d'hydrogène.

L'alliage est généralement composé de métaux rares et de certains métaux communs, par exemple, $Ti_{0.4}Zr_{0.6}Cr_{0.8}Fe_{0.7}Mn_{0.2}Ni_{0.2}Cu_{0.03}$.

Exemple

Comme le montre la figure ci-après, certains chercheurs ont construit un système expérimental de transport de la chaleur en utilisant les alliages absorbants d'hydrogène.

Dans ce système, les alliages $LmNi_{4.55}Mn_{0.25}Co_{0.2}Al_{0.1}$ et $LmNi_{4.4}Mn_{0.2}Co_{0.1}Sn_{0.1}$ sont respectivement utilisés sur le site source et le site de l'utilisateur (Lm: La rich mischmetal).



(Source: Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532-1540)

Sur le site source, l'hydrure A remplit d'alliages absorbants d'hydrogène libère de l'hydrogène en se servant d'une source de chaleur à 90°C puis en utilisant la différence de pression, l'hydrogène est transporté vers l'hydrure B. Comme nous l'avons dit précédemment, lorsque l'hydrogène est absorbé, une certaine quantité d'énergie est libérée. **Sur le site utilisateur**, cette énergie libérée est récupérée dans l'hydrure B par une réaction d'hydrogénation c'est-à-dire que l'hydrogène est absorbé par un autre alliage. De la chaleur à 90°C est alors libérée et permet d'approvisionner le chargement.

Après que tout l'hydrogène absorbé en A soit libéré, la chaleur des déchets à 50°C approvisionne l'hydrure B et l'eau de refroidissement à 20°C est fournie à l'hydrure A pour renvoyer l'hydrogène à travers la canalisation basse pression. Il s'agit du processus de régénération.

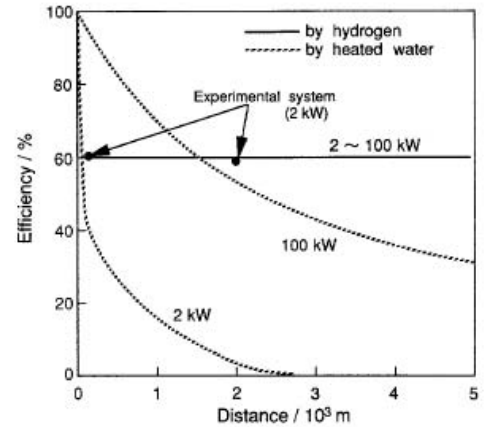
Afin de fournir de la chaleur en continue sur le site de l'utilisateur, deux paires de navires sont nécessaires (A-B, A'-B').

Le transport de la chaleur en utilisant les alliages absorbants d'hydrogène comprend deux parties. Il y a d'une part le transport de la chaleur et de l'autre la régénération

La pression d'hydrogène pour le transport de la chaleur est de 750 kPa tandis que celle de la régénération est de 150 kPa.

La différence de pression entre les deux processus étant tellement différente que lorsque les canalisations s'étendent sur plusieurs kilomètres, l'hydrogène libéré lors de la réaction dans le navire A est utilisé pour augmenter la pression à l'intérieur des canalisations et très peu pour la réaction en B. C'est ainsi que les commandes de commutation sont situées près des navires A et B afin de pouvoir maintenir la pression sur les lignes fixes haute et basse pression pour le transport longue distance d'hydrogène.

D'après les résultats d'une étude de faisabilité, on a constaté que de la chaleur à petite échelle (2 kW), qui ne peut être transportée par eau chaude, peut être transportée avec une grande efficacité sur de longues distances (2 km, 60%) par de l'hydrogène, et que ce système de transport de chaleur est également plus efficace, même sur une grande échelle (100 kW) de transport de chaleur à des distances de plus de 2 km.



Comparaison de la décomposition du méthanol avec les alliages absorbants d'hydrogène

Des chercheurs ont fait une analyse comparative entre la réaction de décomposition du méthanol et les alliages absorbant l'hydrogène. Le résultat montre que celle-ci n'est pas rentable à cause du coût des alliages. Un autre problème est lié au besoin d'une source de chaleur secondaire sur le site de l'utilisateur pour la régénération du processus, ce qui est une condition très contraignante.

3.2.5. Adsorption solide-gaz

Les laboratoires PROMES (CNRS) et LOCIE en France ont introduit la technologie de l'adsorption solide-gaz dans le transport de la chaleur à longue distance. Le cycle principal à simple effet est représenté sur la figure ci-dessous.

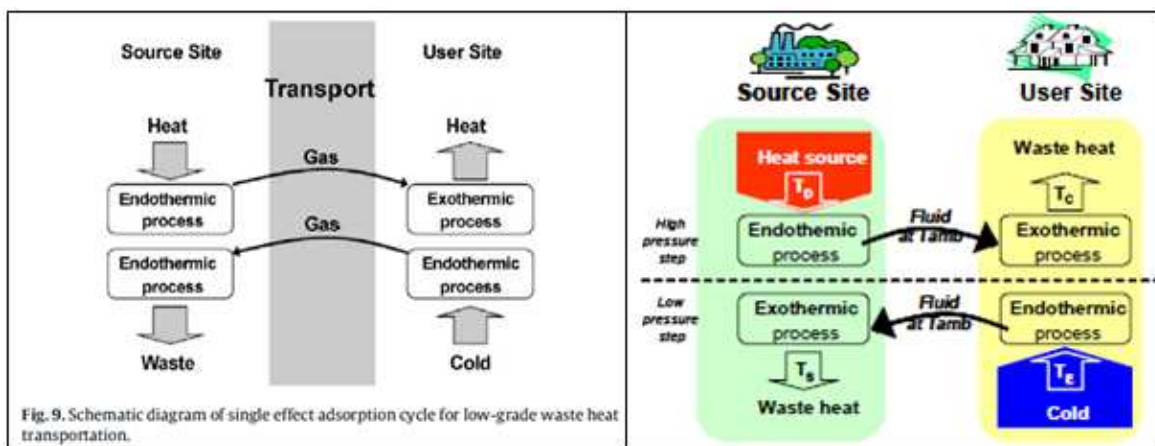


Fig. 9. Schematic diagram of single effect adsorption cycle for low-grade waste heat transportation.

(Source : Energy Conversion and Management 50 (2008) 2331-2339)

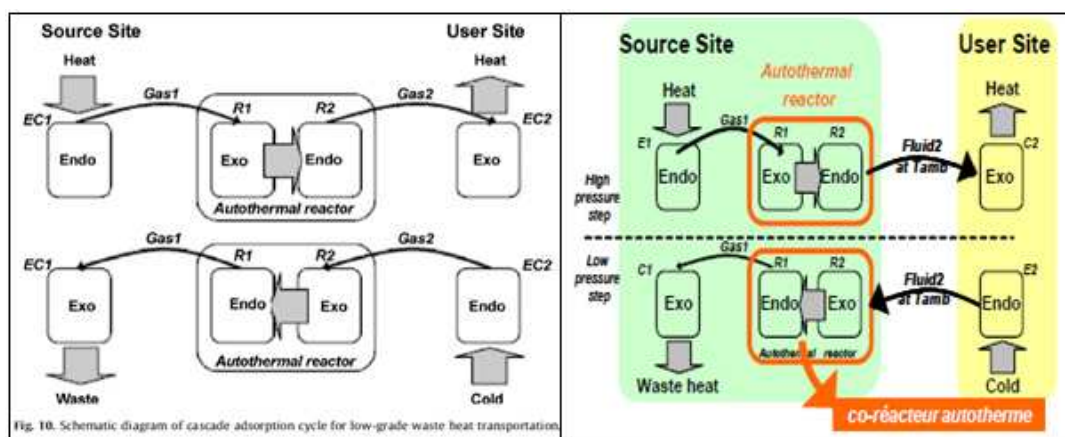
Le cycle est basé sur les processus physico-chimiques d'adsorption endothermique et exothermique.

Sur le site source, la chaleur à valoriser est utilisée par un processus endothermique pour générer un gaz réactif libéré par un sel ou enclenché un processus d'évaporation lorsque la chaleur résiduelle est introduite. Ce gaz est transporté par pipeline à température ambiante dans le cas de l'ammoniac jusqu'au site utilisateur où il est impliqué dans un autre processus exothermique restituant la chaleur à l'utilisateur. Sur le site utilisateur, la chaleur se développe par le processus d'adsorption ou par un processus de condensation.

Ces processus étant réversibles, le changement de conditions opératoires, en particulier la température, permet d'inverser les réactions et les effets thermiques sur les 2 sites. La seconde étape permet le retour du fluide sur le site source et ainsi boucle le cycle.

Des concepts originaux associant plusieurs procédés en cascade, par un couplage thermique entre deux composants endo/exothermiques ont été définis. Ils donnent un degré de liberté supplémentaire pour adapter les conditions opératoires du système complet aux sources/puits disponibles. Cependant, la complexité du système est accrue, car cette cascade implique un couplage thermique entre 2 réacteurs, en un "co-réacteur".

Un cycle innovant dit en cascade meilleur que le cycle simple pour le transport de chaleur a été breveté par PROMES, il est représenté sur la figure suivante :



(Source : *Energy Conversion and Management* 50 (2008) 2331-2339)

La figure montre le principe du transport de chaleur longue distance par procédé cascade. La source de chaleur à TE1 revalorisée à TC2.

Le procédé simple effet revaloriserait la chaleur de TE1 à TR1 et nécessiterait d'une source de chaleur secondaire sur le site utilisateur pour la régénération de R1 et la température de la source secondaire est abaissée à TE2. L'objectif de la cascade étant de baissée la température de la source secondaire jusqu'à la température ambiante pour pouvoir ainsi utiliser la source ambiante gratuite. Ceci se fait en utilisant des réactifs et des conditions opératoires bien particulières.

Le cycle en cascade est composé de deux cycles simple effet.

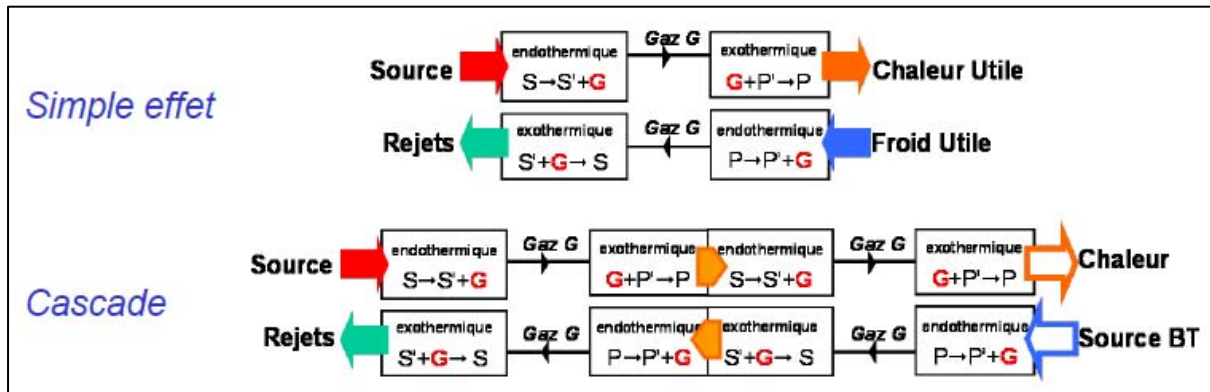
Le gaz transporté peut être le gaz 1 ou le gaz 2 et les réacteurs R1 et R2 échangent continuellement de la chaleur sans utiliser une source de chaleur supplémentaire constituant ainsi un réacteur autothermique « autothermal reactor ».

Défauts des systèmes à adsorption

Il y a principalement deux défauts pour les systèmes d'adsorption.

Le premier est la grande consommation d'énergie primaire pour le transport du gaz et le second est le processus de transport de chaleur qui est intermittent. Comme pour toutes les méthodes nouvellement développées, on retrouve peu de travail expérimental sur ce sujet.

Comparaison du système simple effet avec le système en cascade



(Source : Nathalie MAZET Défis et avancées scientifiques:Transport de Chaleur et/ou Froid à longue distancePI Energie 2 CNRS, Poitiers, Fev2008)

Le système en cascade permet d'élargir la gamme d'utilisation et a une plus grande flexibilité par rapport à la température de la source car le transport se voulant à température ambiante.

Comparaison alliages absorbants d'hydrogène et adsorption solide-gaz simple effet

Le processus d'adsorption solide-gaz est plus flexible et a une gamme d'utilisation plus diversifiée que le processus d'absorption d'hydrogène parce qu'il y a plus de couples de réactifs disponibles. Presque tous les types d'applications utilisant la chaleur résiduelle à différents niveaux de température (60-300°C) peuvent être proposés sur la base de plus de deux cents sels réactifs qui ont été étudiés par PROMES.

Toutefois, tout comme le système d'alliage absorbant d'hydrogène, un processus de régénération est nécessaire pour boucler le cycle.

3.2.6. Absorption liquide-gaz

Le système d'absorption est adapté à l'utilisation de l'énergie thermique à bas niveau de température.

Des chercheurs ont introduits une nouvelle solution de transport par absorption appelé STA (Solution Transportation Absorption system) basé sur le cycle utilisé par les technologies de pompes à chaleur par absorption. La figure 1 montre le concept de base du système STA.

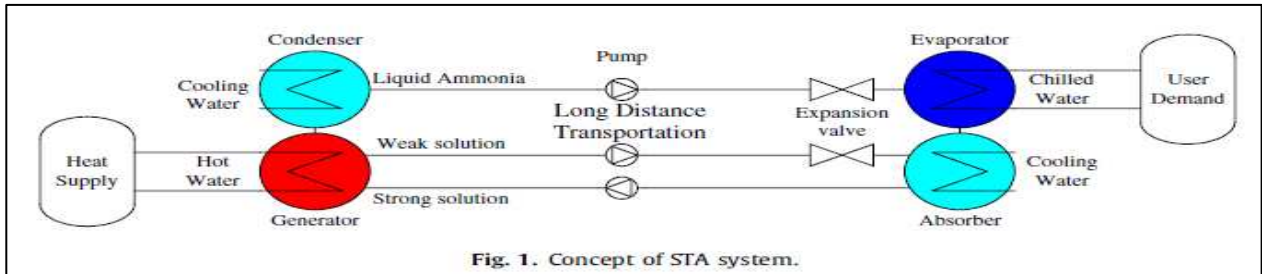


Fig. 1. Concept of STA system.

(Source : Energy Conversion and Management 50 (2009) 2331-2339)

Sur le site source, la chaleur résiduelle est fournie au générateur et l'évaporateur permet l'approvisionnement en eau glacée **sur le site utilisateur** situé à une certaine distance. Les couples de travail utilisés pour ce système sont le bromure de lithium eau et l'ammoniac-eau. Dans la suite, nous présenterons le fonctionnement d'un système à absorption liquide-gaz fonctionnant avec le couple ammoniac-eau.

Le schéma de principe du transport sur de longues distances en utilisant le couple ammoniac-eau est représenté sur la figure 11.

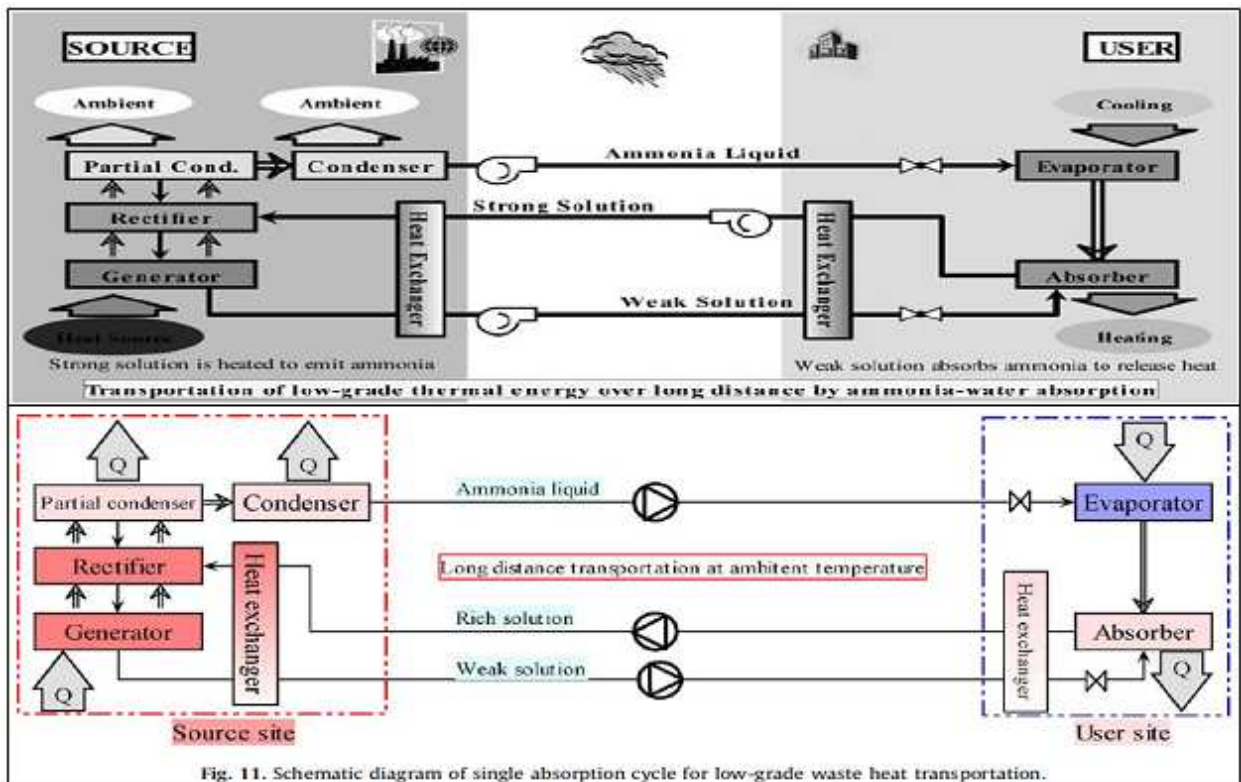


Fig. 11. Schematic diagram of single absorption cycle for low-grade waste heat transportation.

(Source : Energy Conversion and Management 50 (2009) 2331-2339)

Le principe de fonctionnement du système peut être décrit comme suit :

Sur le site source, la chaleur résiduelle à bas niveau de température est fournie au générateur et la solution concentrée d'ammoniac est divisée en deux solutions. Une solution chaude faible et une de vapeur d'ammoniac. Une colonne de distillation est disposée à corriger la vapeur d'ammoniac.

Après le processus de **rectification**, la concentration de vapeur d'ammoniac peut atteindre les 99,8% et la vapeur d'ammoniac est se condense dans le condenseur.

La solution faible et l'ammoniac liquide sont quant à elles envoyées sur le site utilisateur en utilisant la différence de pression entre le générateur et l'absorbeur. Si la distance est très longue, d'autres solutions sont nécessaires pour compenser la perte de pression. On parle de solution pompe.

Sur le site utilisateur, l'ammoniac liquide s'évapore et est absorbée par la solution faible permettant ainsi de produire un effet de refroidissement dans l'évaporateur ou de chauffage dans l'absorbeur selon les besoins de l'utilisateur.

Après le processus d'**absorption** dans l'absorbeur, la solution concentrée d'ammoniac est renvoyée vers le site source de chaleur via les canalisations grande distance.

Le système SAT dispose d'un échangeur de chaleur sur le site source et d'un sur le site utilisateur respectivement un échangeur à haute température (High temperature Solution Heat Exchanger : HSHX) et un échangeur basse température (Low temperature Solution Heat Exchanger : LSHX).

L'échangeur à basse température est utilisé pour augmenter la température de la solution faible avant absorption de la vapeur d'ammoniac. Dans le mode réfrigération, cet échangeur est inutile et devrait être isolé en utilisant des vannes convexes.

Les solutions chaudes et concentrées dégagent beaucoup de chaleur dans les deux échangeurs ce qui permet une chute de température de près de la température ambiante. Étant donné que l'énergie thermique a déjà été transformée en énergie chimique par la différence de concentration des solutions, les solutions peuvent être transportées à la température ambiante sans pertes de chaleur ne nécessitant pas ainsi une isolation des canalisations.

Comparaison des couples bromure de lithium-eau et ammoniac-eau

L'ammoniac-eau est considérée comme un meilleur choix d'utilisation que le bromure de lithium pour le transport de chaleur comme le montre le tableau 1 de comparaison.

Les principaux problèmes du lithium sont le coût élevé, la corrosion du matériau ainsi que les fuites éventuelles en raison des conditions d'exploitations sous-vide et pour l'ammoniac-eau, les inconvénients sont la légère toxicité et la nécessité d'un processus de rectification.

Comparison between lithium bromide-water and ammonia-water as working pair for heat transportation by absorption method.

	Lithium bromide-water	Ammonia-water
Refrigerant	Water	Ammonia
Minimum evaporator temperature	0 °C	-60 °C
COP (ambient temperature: 35 °C)	0.7-1.2	0.3-0.7
Crystallization problem	Yes	No
Rectification process	Not necessary	Necessary
Air cooling mode	Difficult	Possible
Air cooled type heat pump	Impossible	Possible
System pressure	Vacuum	High (up to 2 MPa)
Ozone depletion problem	No	No
Global warming potential	No	No

Comparaison de l'absorption liquide-gaz avec l'adsorption solide-gaz

Le cycle SAT surmonte l'inconvénient du système de transport par adsorption. La densité d'énergie de transport de liquide est plus élevée que celle du gaz, ce qui a pour conséquence de réduire le diamètre des pipelines et la consommation d'énergie. Le système de transport par absorption fonctionne en continue mais pas par intermittence.

Comparaison technologies d'adsorption et technologies de pompe à chaleur de réfrigération par absorption

Comparé aux technologies d'adsorption, les technologies de PAC de réfrigération par adsorption sont les plus développées.

Comparaison adsorption classique et système STA

En comparaison avec le système d'absorption classique, le système STA est conçu en deux parties dont une sur le site source et l'autre sur le site utilisateur. Tandis que l'absorption traditionnelle par pompe à chaleur, inclus 4 composants principaux que sont : générateur/alternateur, condenseur, évaporateur et absorbeur.

Dans le cycle de STA, le générateur et le condenseur sont localisés sur le site source tandis que l'évaporateur et l'absorbeur sont sur le site de l'utilisateur. De cette façon, l'énergie thermique est stockée et transportée par la différence de concentration des solutions.

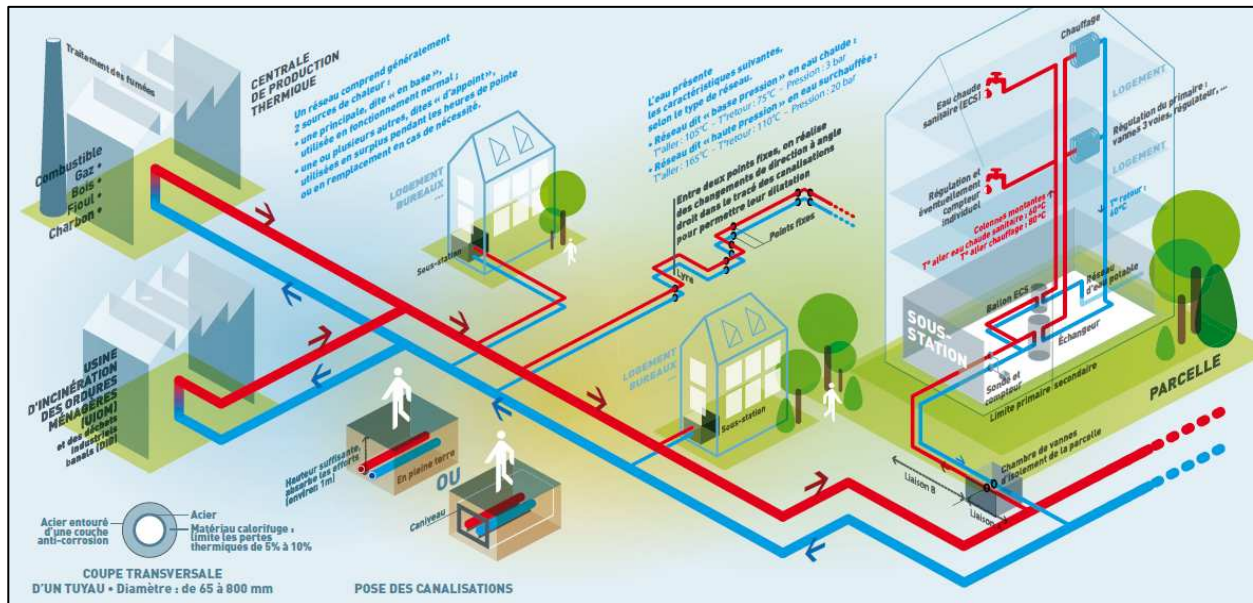
Trois canalisations sont disposées entre le site source et le site utilisateur. Ces canalisations contiennent respectivement des solutions d'ammoniac dont une concentrée, une diluée et une liquide.

3.3. TRANSPORT D'ÉNERGIE CLASSIQUE

3.3.1. Transport de chaud

On distingue deux types de réseaux de chauffage urbain. En effet le réseau peut être fermé ou ouvert.

Le réseau de chauffage urbain fermé est un mode de chauffage le plus communément utilisé. Il s'agit en effet du mode utilisé par de grands ensembles immobiliers.



Un réseau de chaleur ou chauffage urbain est un regroupement d'installations qui produisent, distribuent et livrent de la chaleur à plusieurs bâtiments pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire.

Une centrale de production thermique alimente en chaleur un réseau d'eau circulant dans des canalisations souterraines. Ce réseau primaire de canalisation emprunte le domaine public ou privé pour transporter la chaleur et alimenter les postes de livraison (sous stations) aux utilisateurs.

Production : la centrale de production thermique transfère de l'énergie calorifique à l'eau ; fluide caloporteur.

Distribution : le fluide caloporteur circule dans un réseau de canalisations. Ce réseau, dit primaire, fonctionne en circuit fermé au moyen d'une double canalisation : une pour aller de la centrale de production thermique vers chaque bâtiment et l'autre pour assurer le retour.

Dans chaque bâtiment raccordé se trouve une **sous-station** ; c'est le point de livraison de la chaleur. Ce local comporte un échangeur dans lequel le fluide du réseau primaire cède sa chaleur au fluide du circuit secondaire.

Le **réseau secondaire** appartient à chaque bâtiment. Il comporte sa propre régulation pour en assurer les différents besoins en chaleur : chauffage et/ou eau chaude sanitaire. C'est là où la chaleur est utilisée.

L'eau présente les caractéristiques suivantes, selon le type de réseau :

- Réseau dit « basse pression » en eau chaude : (Taller : 105°C - T_{retour} : 75°C - Pression : 3 bar)
- Réseau dit « haute pression » en eau surchauffée : (Taller : 165°C - T_{retour} : 110°C - Pression : 20 bar).

Pour plus d'informations, se reporter au chapitre 4 (& 4.3.1).

3.3.2. Transport de froid

Tout comme le réseau de chauffage urbain, le réseau de froid aussi appelé réseau urbain d'énergie frigorifique est constitué d'équipements collectifs de production et de distribution d'eau glacée. Produite par des centrales frigorifiques, l'eau glacée est acheminée par des canalisations desservant des immeubles équipés de postes de livraison. L'eau glacée cède une partie de son énergie frigorifique aux installations de l'immeuble.

Un réseau de froid peut fonctionner en circuit fermé, en circuit ouvert ou il peut être ramifié ou maillé ou combiné avec un réseau de chaleur urbain. En France en général le réseau de froid fonctionne en circuit fermé, c'est-à-dire qu'il comprend toujours au moins deux canalisations dont une pour l'aller et une pour le retour respectivement une pour la distribution vers l'utilisateur et l'autre pour le retour vers la centrale de production frigorifique.

Les trois éléments fondamentaux du réseau de froid urbain sont donc la centrale de production, le réseau de distribution et les postes de livraison.

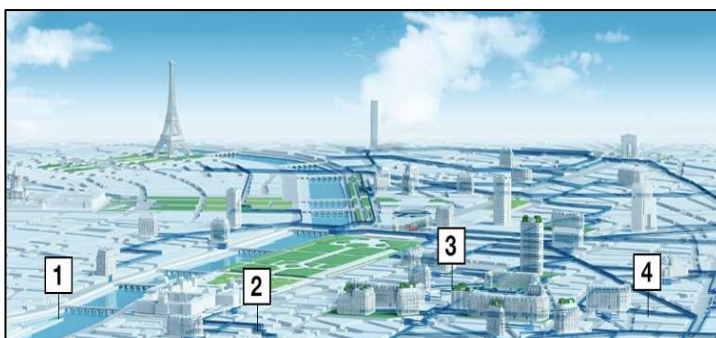
Comme exemple de réseau de froid urbain nous allons vous présenter le réseau de froid de Paris qui fonctionne suivant les procédés de CLIMESPACE.

1. La centrale production produit de l'eau entre 1 et 5°C.

2. Cette eau est acheminée par un réseau maillé de distribution par des canalisations souterraines jusqu'au poste de livraison.

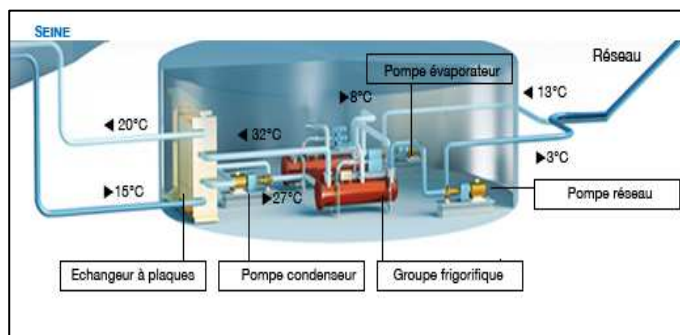
3. Les immeubles équipés de postes de livraison délivrent l'énergie frigorifique à un réseau intérieur.

4. La salle de contrôle permet une surveillance du réseau 24h/24.



La **production de froid** est assurée par des installations frigorifiques électriques, comprenant des groupes frigorifiques, des pompes, des transformateurs électriques, un réseau de canalisations.... Les groupes frigorifiques sont refroidis essentiellement par l'eau de Seine (73% de l'énergie produite).

Ces centrales refroidies par l'eau de la Seine ne génèrent aucun panache de vapeur et suppriment tout risque de dissémination bactérienne liée aux tours de refroidissement.



Réseau de distribution : A Paris, il existe 2 réseaux de froid urbain distincts baptisés « réseau Centre » et « réseau Bercy ».

Le réseau Centre ; réseau principal de CLIMESPACE s'étend dans le cœur de Paris (1^{er}, 2^{ème}, 7^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème} et 16^{ème}) arrondissements.

Le réseau Bercy quant à lui dessert les 12^{ème} et 13^{ème} arrondissements.

Entièrement maillé et interconnecté, le réseau de froid géré par CLIMESPACE est soumis à des opérations de contrôle régulières et quotidiennes et emprunte les ouvrages d'assainissement de Paris ou passe sous les voies publiques.

La température de l'eau glacée distribuée sur la canalisation Aller depuis l'unité de production varie de 1 à 4°C et l'eau de retour quant à elle varie entre 12 et 14°C.

Livraison : le froid est délivré aux utilisateurs (bâtiments publics et tertiaires, entreprises industrielles, habitat...) à partir d'un branchement effectué sur le réseau principal vers un poste de livraison. L'eau glacée est principalement destinée à la climatisation et au rafraîchissement d'immeubles. Malgré tout d'autres utilisations existent.

3.4. SYNTHÈSE ET COMPARAISON DES MODES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE CALORIFIQUE INNOVANTS

L'idée de transporter l'énergie thermique sur des distances allant au-delà de 10 km, connut deux périodes, deux domaines d'applications et plusieurs types de processus dont endo/exothermiques réversibles et les systèmes conteneurs. En effet, de 1970 à 1990 les projets/expériences étaient plus orientés vers des températures de chaleur de la source supérieure à 700°C (nucléaire ou solaire) pour une utilisation sous forme de vapeur pour l'industrie ou de chauffage pour le résidentiel.

De 1995 à aujourd'hui, les projets/expériences se développent pour des températures de chaleur de la source inférieure à 200°C essentiellement à partir de la valorisation de rejets thermiques pour une utilisation de chaleur ou de froid dans le résidentiel.

Les différents types de processus de transport d'énergie calorifique peuvent être regroupés en quatre groupes à savoir les réactions catalytiques réversibles, les systèmes à sorption, les systèmes conteneurs (batch), les systèmes classiques.

Des informations complémentaires notamment sur les avantages et les inconvénients technologiques, environnementaux et de sécurité ainsi que le coût et la durée de vie des technologies sont données en annexe 22.

3.5. LES REACTIONS CATALYTIQUES REVERSIBLES

Les réactions catalytiques réversibles regroupent quatre technologies de transport d'énergie sur longue distance (environ 30km) pour des températures de la source allant de 150 à 1000°C. Il s'agit du reformage du méthane avec la vapeur ou CO₂, de la synthèse et dissociation de l'ammoniac, de la synthèse et décomposition du méthanol et de réactions chimiques telles que SO₃/SO₂.

Réactions catalytiques réversibles								
	Reformage du méthane		Synthèse et dissociation de l'ammoniac		Synthèse et décomposition du méthanol			Réactions chimiques
Applications	Nucléaire (vapeur/méthanation)	Solaire (reformage CO ₂)	Nucléaire, Solaire	Déchets	Solaire	Déchets	Isopropanol	SO ₃ /SO ₂ (Solaire)
Température de la source: stockage (°C)	900	700-1000	800	500	700	150 -200	<200	900
Température d'utilisation de la chaleur (°C)	600	500	-	-	350	150	70	500
Puissance	pilote de 300 kW à 6MW	pilote de 8,5 à 400 kW (250 kW puissance de chauffage dans l'étape de méthanisation)	pilote de labo	pilote de 15 kW	pilote de labo	Réacteur de labo	100 MW	pilote de labo
Capacité volumétrique (kWh/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	-
Distance	30 km	30 km	-	-	-	30 km	50 km	-
Temps/ Durée du transport (h)	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyen de transport	-	-	-	-	-	-	-	-
Applications/ Utilisation	Electricité, Vapeur industrielle	Vapeur industrielle	Vapeur industrielle	Stockage électricité	Vapeur industrielle	Chauffage résidentiel et commercial	Chauffage résidentiel	Stockage
Travaux de recherche	1972-1984	1989-1996	1977-1981	1996-2004	1975-1980	-	-	1975-1992

(Source : Cadet International/GRETh)

Parmi ces technologies, s'il fallait en retenir une applicable au domaine des déchets ce serait la synthèse et la décomposition du méthanol. La bibliographie sur ce processus révèle qu'une expérience réalisée au Japon avec un réacteur de laboratoire a été menée sur une distance de 30 km pour une température de la source de chaleur essentiellement « énergie des déchets » comprise entre 150 et 200°C pour une utilisation à 150°C pour des besoins en chauffage résidentiel et commercial. De cette expérience on peut émettre l'hypothèse selon laquelle il n'existerait pas de perte thermique avec un tel processus. L'énergie se conserverait donc pendant tout le processus de transport.

3.5.1. Les systèmes à sorption

Les réactions systèmes à sorption regroupent quatre technologies de transport d'énergie sur longue distance (quelques km) pour des températures de la source allant de 60 à 300°C. Il s'agit de l'absorption liquide-gaz, de l'adsorption solide-gaz et des alliages absorbant d'hydrogène.

	Systèmes à sorption			
	Adsorption solide-gaz	Absorption liquide-gaz	Alliage absorbant d'hydrogène	
Applications		LiBr/H ₂ O ou NH ₃ /H ₂ O	Hydrures/H ₂	
Température de la source: stockage (°C)	60 - 300	90 - 160	50-90	90
Température d'utilisation de la chaleur (°C)	-	-7 à -12	20-50	90
Puissance	-	-	100 kW	Pilote de 2 kW
Capacité volumétrique (kWh/m ³)	-	40-80 (NH ₃ /H ₂ O)	2	-
Distance	-	-	-	Pilote de 2 kW 2km
Temps/Durée du transport (h)	-	-	-	-
Moyen de transport	-	-	-	-
Applications/ Utilisation	-	Climatisation	-	Chauffage résidentiel

(Source : Cadet International/GRETh)

Parmi ces technologies, la plus attractive applicable au domaine des déchets serait l'adsorption solide-gaz mais nous ne disposons pas à ce jour d'informations techniques nous permettant de statuer sur les performances d'un tel processus excepté la plage de température de la source de chaleur comprise entre 60 et 300°C.

3.5.2. Les systèmes conteneurs : transport « batch »

Les systèmes conteneurs regroupent deux technologies de transport d'énergie sur longue distance (environ 30km) pour des températures de la source allant de 80 à 200°C. Il s'agit du reformage des MCP conteneurs et des CHPC (Chemical Heat Pump Conteneur).

Transport par containers						
Chemical						
MCP						
Applications	CHPC	MgO/H2O	Chemical Heat Storage	MCP (Acétate de Sodium)	MCP (Erythritol)	MCP+Sensible
Température de la source: stockage (°C)	0-60	300 - 400	100 - 450	70-200	80 - 140	100 - 500
Température d'utilisation de la chaleur (°C)	-	70 - 180	50 - 200	40-95	110	100 - 180
Puissance	-	500 kW	1 MW	1 MW	200 kW	25 kW
Capacité volumétrique (kWh/m3)	-	-	-	-	85	-
Distance	30 jours de fonctionnement	-	10 km	20 km	-	-
Temps/Durée du transport (h)	-	-	1,8	>3,5	-	10
Moyen de transport	Batch	Batch	Batch	Batch	Batch	Batch
Applications/ Utilisation	-	-	Hôpital, Bureau	Hôpital, Bureau	Cold warehouse	Cold warehouse
Réalisation	Expérience à Tokyo	-	-	Expérience à l'échelle industrielle au Japon	-	-

(Source : Cadet International/GRETh)

Parmi ces technologies, l'utilisation des MCP par transport batch se révèle la plus intéressante qu'il s'agisse du stockage chaud ou du stockage froid. En effet, la bibliographie sur ces processus révèle qu'il est possible en fonction du MCP choisit de transporter la chaleur pour une utilisation en chauffage ou froid. Les Japonais ont menés des expériences industrielles sur des distances supérieures à 20 km pendant une durée de 10h. La plage de température de la source de chaleur pour ces processus est comprise entre 70 et 200°C avec une énergie de stockage pouvant aller jusqu'à 12,6 GJ.

3.5.3. Les modes de transport classiques

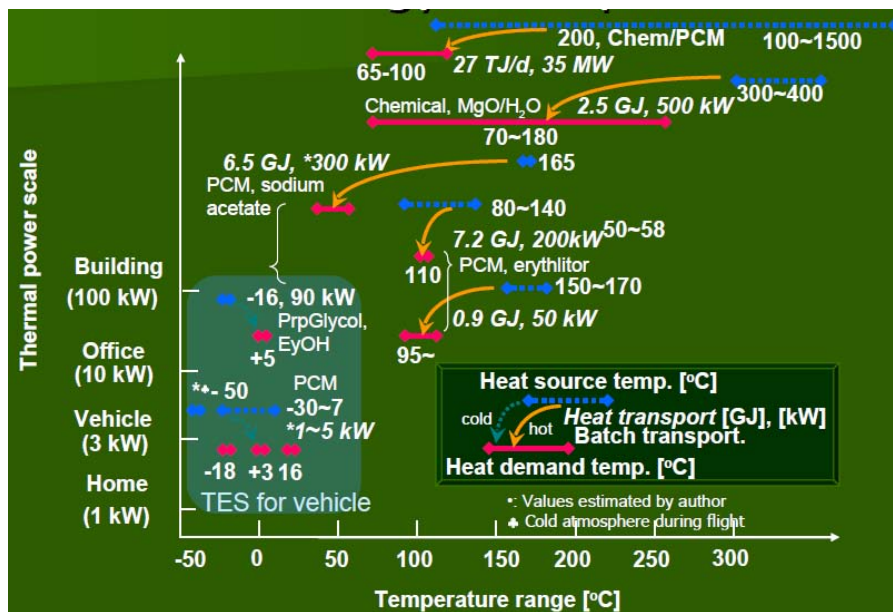
Les modes de transport classiques regroupent quatre technologies de transport d'énergie sur longue distance (environ 30km) pour des températures de la source allant de 1 à 350°C. Il s'agit du transport de chaud et du transport de froid.

	Transport classique	
	Transport chaud	Transport froid
Applications	(eau chaude, vapeur)	(eau glacée)
Température de la source: stockage (°C)	105-350	1-5
Température d'utilisation de la chaleur (°C)	à partir de 45/50°C	12 - 14
Puissance	quelques MW	quelques MW
Capacité volumétrique (kWh/m3)		
Distance	plusieurs km	plusieurs km
Temps/Durée du transport (h)	-	-
Moyen de transport	canalisation	canalisation
Applications/Utilisation	eau chaude, chauffage	eau glacée, refroidissement

(Source : Cadet International/GRETh)

3.6. COMPARAISON DES MODES DE TRANSPORT INNOVANTS AVEC LES MODES D'ENERGIE PRIMAIRE

3.6.1. Comparaison des performances technologies de transports innovants



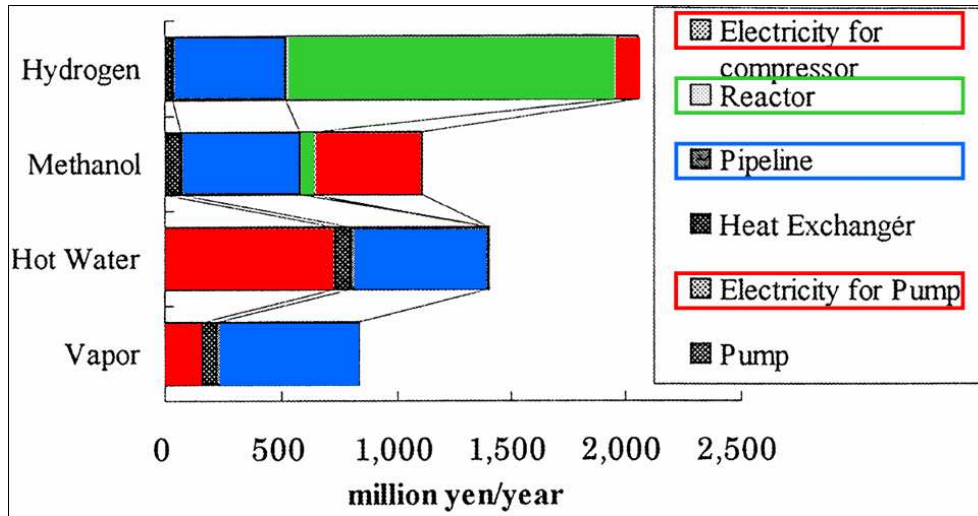
Source: Update on the questionnaire Survey for Thermochemical Energy Transportation, the second report. (Tukituki Kato Javier 2008)

Parmi les technologies innovantes en matière de transport d'énergie calorifique, les réactions chimiques réversibles et les MCP admettent des températures de source de chaleur très variées. L'énergie de transport pouvant aller jusqu'à 27 TJ/jour, 35 MW pour une source de chaleur comprise entre 100 - 1500°C pour une utilisation de la chaleur de 65 - 100°C sur le site d'utilisation.

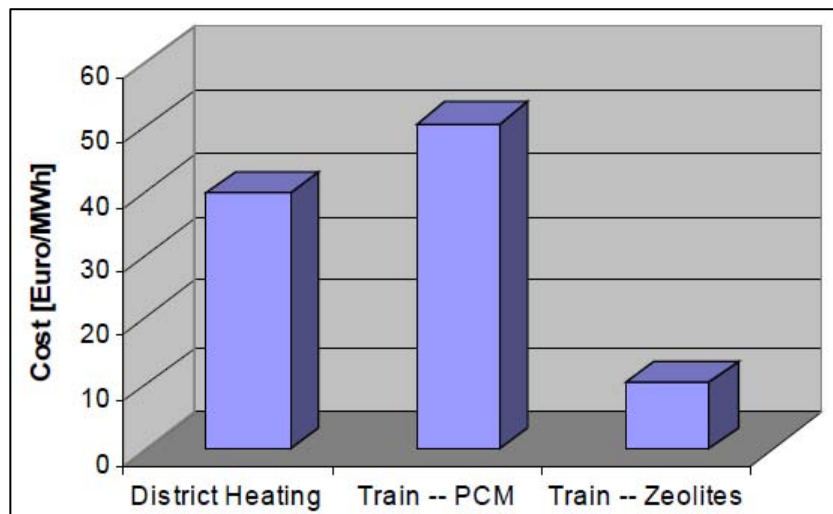
Le mode de transport présenté ici est le transport batch par utilisation des MCP et des réactions chimiques réversibles.

3.6.2. Comparaison en termes de coût

Une étude Japonaise présente le détail des coûts par poste pour un réseau de 30 MW sur 5 km de réseau de différents types : Source : HASEGAWA et al. / Applied Energy 61 (1998) 1-12



Une étude réalisée en Suède compare le coût de la chaleur fournie en utilisant les réseaux de chaleur avec la chaleur fournie en utilisant le stockage et le transport par train utilisant la technologie MCP et le transport par train utilisant la technologie zéolite sur une distance de 30 km.



A cost comparison for some alternatives regarding the storing and transportation of waste heat from SSAB Oxelösund to the city of Nyköping.

(Source IAE/ECES: Mapping of Waste Heat potential for Heat Transportation from SSAB Oxelösund Steel Works)

La figure ci-dessus montre que le coût par MWh de chaleur transporté d'un système basé sur le transport par MCP est plus cher que le mode de transport traditionnel à travers un réseau de chauffage urbain.

A titre indicatif, le transport par zéolite a un prix plus attractif mais cette solution n'a pas été retenue dans le cadre de cette étude.

Il a été conclu à la fin de l'étude réalisée en Suède que pour que le transport d'énergie par MCP soit rentable il faudrait que la densité énergétique des matériaux soit au moins de 200 kWh/tonnes.

Le tableau qui suit donne quelques propriétés typiques des modules de transport de chaleur.

Au travers de ce tableau on comprend que la plage d'énergie perdue en 24h en utilisant un système basé sur le transport d'eau chaude ou de MCP est la même. Par contre la capacité de stockage du MCP est nettement plus importante.

(Source IAE/ECES: *Industrial Waste Heat Utilization by Mobile Sorption*)

Storage

	hot water	PCM	Sorption
storage medium	water	sodium acetate tri-hydrate	zeolite 13 X
charging temperature	85 °C	85 °C	150 °C
discharging temperature	50 °C	50 °C	180 °C
lower temperature limit	35 °C	35 °C	n. a.
storage capacity	1.5 MWh	2.5 MWh	3.5 MWh
charging / discharging power	1000 kW	125 kW	650 kW
heat losses in 24 h	30...50 kWh	30...50 kWh	n. a.
unit cost	35.000 €	45.000 €	45.000 €

3.7. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 3

A review on transportation of heat energy over long distance exploratory

Appendix B: Chemical energy transmission systems <http://www.iea.org>

Update on the Questionnaire Survey for Thermal Energy Transportation, the Second report Yukitaka Kato

The development of Transport System of Thermal Energy Kazuo Takahashi, Yasuo Higashi

Waste heat transportation system, using phase change material (PCM) from steelworks to chemical plant Takahiro Nomura*, Noriyuki Okinaka, Tomohiro Akiyama

LATENT HEAT STORAGE AND TRANSPORTATION SYSTEM "TRANSHEAT CONTAINER" Y. Fujita, I. Shikata, A. Kawai, H. Kamano

Waste Heat Recycling System using Chemical Heat Pump Container Hironao Ogura

LONG-DISTANCE HEAT TRANSPORT SYSTEM USING A HYDROGEN COMPRESSOR K. NASAKO,*Tf Y. ITO* and M. OSUMIf

INTERMITTENT HEAT TRANSPORT USING HYDROGEN ABSORBING ALLOYS K. NASAKO*t, Y. ITO* and M. OSUMIt

Transport de Chaleur et/ou de Froid à longue distance : Défis et avancées scientifiques Nathalie MAZET

Colloque PI Energie 2 –CNRS PR3.3-12 : VALOTHERM Nathalie MAZET

Chemical reactions for transportation of thermal energy Fredrik Setterwall, Viktoria Martin <http://www.iea.org>

Chemical Heat Storage Technologies for Thermal Energy Transportation Yukitaka Kato

Annex 10 and 17 as a Background for Energy Transportation Fredrik Setterwall <http://www.iea.org>

VALOTHERM Evaluation comparative des technologies de transport d'énergie à longue distance pour la revalorisation de rejets thermiques PR3.3-12 Tlemenan

Evaluation comparative des technologies de transport d'énergie à longue distance pour la revalorisation de rejets thermiques basse température MAZET Nathalie, STITOU Driss, NEVEU Pierre, MAURAN Sylvain

Ammonia–water absorption cycle: a prospective way to transport low-grade heat energy over long distance P. Lin, R. Z.Wang*, Z. Z. Xia and Q. Ma

Experimental investigation on heat transportation over long distance by ammonia–water absorption cycle P. Lin, R.Z. Wang*, Z.Z. Xia, Q. Ma

Analysis on waste-heat transportation systems with different heat-energy carriers Hideo Hasegawaa,* , Hisashi Ishitani b, Ryuji Matsuhashi b, Michifumi Yoshioka

HASEGAWA et al. / Applied Energy 61 (1998) 1-12

4. CARACTÉRISATION DES PRODUCTIONS / UTILISATEURS D'ÉNERGIE CALORIFIQUE DES DÉCHETS - CHAPITRE 4

4.1. IDENTIFICATION DES PROCÉDES DE VALORISATION ÉNERGETIQUE DES DÉCHETS INTÉRESSÉS

4.1.1. Unités de valorisation énergétique UVE (Usine d'incinération des ordures ménagères)

4.1.1.1. Généralités

● Définition

Le terme incinération désigne « l'action de réduire en cendres, de détruire par le feu ».

Appliquée aux déchets, elle vise « tout équipement ou unité technique fixe ou mobile, affectée au traitement thermique de déchets, avec ou sans récupération de chaleur de la chaleur produite par la combustion ». (Source : technosup collection développement durable traitement des déchets)

D'une façon générale, l'incinération est un procédé de traitement thermique des déchets en présence d'oxygène de l'air dans des fours quel que soit le type de déchet.

Pour les déchets ménagers, c'est un mode d'élimination des ordures en les brûlant à haute température.

A l'origine, l'incinération avec récupération d'énergie n'était pas un but, mais visait l'élimination des déchets pour réduire le volume. Le premier incinérateur est né au Royaume Uni en 1876.

L'incinération a pour effet la réduction de 90% du volume et 70% du poids des déchets.

● Secteurs concernés

L'incinération s'applique :

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

● Principes généraux et aspects théoriques

En oxydant totalement les déchets ménagers, en particulier la matière organique, l'incinération permet de réduire le volume et la masse de la matière à éliminer.

Ces multiples réactions d'oxydation génèrent les deux produits ultimes souhaitables, gaz carbonique et vapeur d'eau, mais aussi une multitude de composés intermédiaires non désirés en faibles quantités dont le monoxyde de carbone, les dioxines, les furanes qui sont ensuite traité avec des procédés adaptés.

La composition des ordures ménagères est variable et l'humidité importante des déchets ne permet pas l'auto-inflammation spontanée et nécessite une étape de séchage dans le four avant sa combustion proprement dite.

La combustion terminée, les déchets pénètrent dans une zone de fin de combustion où ils se transforment en mâchefers incandescents.

Procédés de combustion

- Par incinération

Le four à grille. Les déchets progressent en couches relativement minces afin de faciliter l'alimentation en air indispensable à la combustion. Le four à grille, le plus répandu dans les installations de traitement thermique, est caractérisé par une grille mobile où les déchets progressent au fur et à mesure qu'ils sont brûlés. L'air de combustion est insufflé en partie au travers de cette grille qui mélange les déchets de façon à assurer un renouvellement permanent de l'air autour des matériaux à brûler. La majorité des incinérateurs de déchets ménagers utilisent des fours à grille.

Le four à rouleau est constitué de gros rouleaux qui tournent dans le sens de l'inclinaison.

Le four peut être utilisé pour des capacités de traitement moyennes à fortes.

Il existe également un système dans lequel c'est le four lui-même qui tourne ou oscille autour d'un axe légèrement incliné (four oscillant).

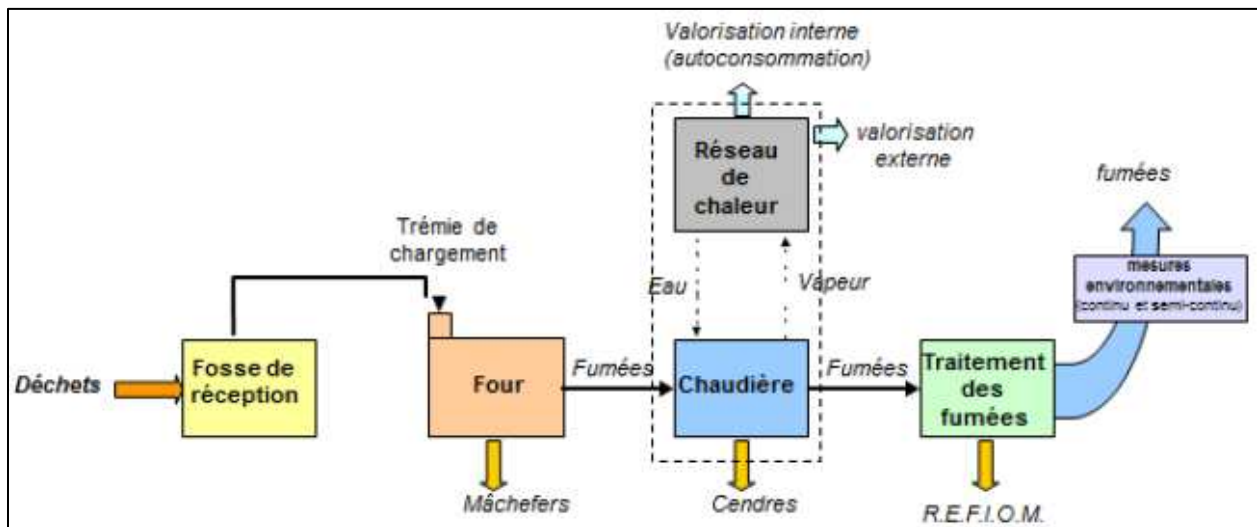
Le four à lit fluidisé mis au point pour l'utilisation de combustibles de très mauvaise qualité (tourbes, certains déchets de charbon) a été adapté aux ordures ménagères. Le four maintient le combustible en suspension, en général au sein d'une masse de produits inertes, grâce à un système d'injection d'air à la base de la chambre de combustion. Une préparation préalable des déchets est indispensable afin d'obtenir une granulométrie constante. Ce procédé reste peu utilisé par rapport au four à grille.

- Par gazéification

Non développée à ce jour en France, cette technologie est très présente au Japon notamment dans le domaine des déchets. On se reportera à l'étude RECORD N°09-0232/1A qui présente les différentes technologies d'abattage des gaz de synthèse issus de procédés de traitement des déchets.

Le déchet introduit est préparé pour disposer d'une granulométrie homogène et d'une composition à haut PCI.

● Valorisation énergétique



(Source : Cadet International)

Le traitement thermique, lorsqu'il est accompagné d'une récupération de l'énergie libérée par la combustion, permet une valorisation énergétique des déchets par un poste de valorisation énergétique sur l'UVE sous forme de chaleur, sous forme d'électricité ou les deux à la fois (cogénération). La récupération d'énergie peut se concevoir pour tous les types de déchets traités thermiquement.

La valorisation s'effectue généralement dans une chaudière à tube d'eau, la vapeur étant utilisée directement en chaleur ou par un groupe turbo-alternateur à contre-pression ou à condensation pour produire de l'électricité.

Dans tous ces cas, un équipement de condensation est nécessaire pour permettre la condensation de la vapeur résiduelle.

On citera le cas atypique de la gazéification avec production d'un gaz combustible brûlé en chaudière ou en cogénération gaz.

● Les principaux postes de valorisation de l'énergie sur une UVE sont les suivants :

- chaudière de récupération d'énergie (vapeur saturée ou surchauffée ; 200-400°C)
- gaines de fumées, cheminée (variation température des fumées entre 150 et 300°C)
- vapeur résiduelle de condensation et réseau de condensats (30-90°C)
- extracteur à mâchefers (buées)
- circuit de refroidissement de process

Le lecteur pourra également se reporter à l'étude RECORD N°10-0234/1A concernant la valorisation des énergies à bas niveaux de température réalisée par Cadet International/GRETh.

4.1.1.2. Etat des lieux sur les UVE en France

En France, on recense une quarantaine de réseaux de chaleur alimentés par des UVE, qui représentent une fourniture d'énergie de 4,2 TWh (0,36 Mtep) (données-enquête CIBE 12/2008).

On distingue deux grandes familles de réseaux de chaleur raccordés à des UVE (classement selon AMORCE):

- les réseaux qui se sont construits à partir de l'UVE, c'est-à-dire pour répondre à la problématique « une UVE produit de l'énergie, où pouvons nous la valoriser » ; le taux de couverture par l'UVE est alors généralement élevé, le réseau n'étant même parfois capable d'enlever qu'une partie de la chaleur, même en hiver ;
- les réseaux de chaleur préexistants par rapport à l'usine, sur lesquels un raccordement a été fait pour compléter le bouquet énergétique ; le taux de couverture est alors beaucoup plus variable.

On dénombre, **en 2010, 130 usines d'incinération d'ordures ménagères en France** alors que l'on pouvait en compter 300 en 1993 (données Syndicat des énergies renouvelables, mai 2010). Plusieurs catégories d'incinérateurs existent :

- les incinérateurs ne valorisant pas l'énergie produite
- les incinérateurs valorisant l'énergie produite par l'une des deux voies de valorisation (chaleur ou électricité)
- les incinérateurs valorisant leur production simultanément en électricité (turboalternateur) et en chaleur pour l'alimentation d'un réseau

On comptabilise **112 usines valorisant l'énergie des déchets**. Les 18 usines ne valorisant pas cette énergie tendent à disparaître sous la pression des autorités sous différentes formes (TGAP par exemple).

La production thermique (6 600 GWh) du parc d'UVE français est deux fois plus importante que la valorisation électrique (3 500 GWh).

L'état a mis en place différentes mesures de soutien pour permettre le développement de la valorisation des déchets par incinérations pour répondre aux objectifs du Grenelle :

- prix d'achat de l'électricité
- TGAP
- TVA à 5,5 % pour les réseaux de chaleur alimentés par des ENR dont les UVE

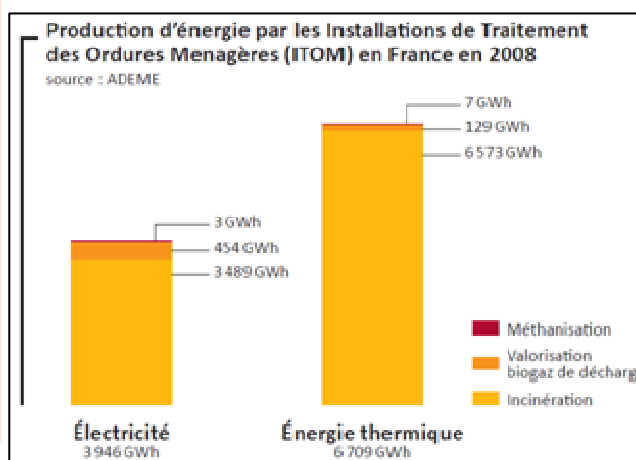
Les objectifs de l'incinération d'ici 2020

Le Grenelle de l'environnement a fixé les objectifs suivants aux Unités d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM) :

Production de chaleur	Situation 2006	Potentiel 2020	Supplément à réaliser
Part énergie renouvelable des UIOM et de bois DIB*	400 ktep	900 ktep	+ 500 ktep

source : Comopi n°10 (Grenelle)

L'objectif très ambitieux ci-dessus nécessite un accroissement important du parc d'usines d'ici 2020 et demande un signal fort de la part des pouvoirs publics en faveur du traitement des déchets par incinération.



Pour plus d'informations se référer à l'annexe 9 : Caractérisation des unités de valorisation énergétique en France.

● Bilan sur les UVE en France

Les 112 UVE avec valorisation énergétique peuvent être classées par mode de valorisation à savoir : chaleur seule, électricité seule et cogénération.

Un tableau récapitulatif des grandeurs nécessaires sera présenté en *annexe 9 « Unités de valorisation énergétique des déchets : caractéristiques des fours et des chaudières »*. Ce dernier regroupera les différents modes de valorisation énergétique ainsi que les caractéristiques de la chaleur produite et le mode de stockage/transport pouvant être utilisé dans chaque cas, ...

Voir aussi l'*annexe 10 « Unités de valorisation énergétique des déchets : vente d'électricité et de chaleur »*.

- Les modes de fournitures d'énergie

On note trois modes de fournitures d'énergie à savoir : tout chaleur ; tout électricité et cogénération.

Ces modes de valorisation énergétique dépendent de la capacité de chaque usine. Globalement les capacités sont comprises entre 5 et 670 kt/an. Basé sur un échantillon de 101 UVE, le tableau ci-dessous donne le nombre d'UVE par mode de valorisation ainsi que le tonnage qui lui est associé.

Echantillon	Tout chaleur	Tout électricité	Cogénération
98	28	41	29
Moy : 102,7 kt/an Min : 4,7 kt/an Max : 669,9 kt/an	Moy : 49,2 kt/an Min : 4,7 kt/an Max : 129,4 kt/an	Moy : 105,2 kt/an Min : 22,4 kt/an Max : 345 kt/an	Moy : 188,6 kt/an Min : 36,6 kt/an Max : 669,9kt/an

Tonnages moyens incinérés par usine par an (kt/an)

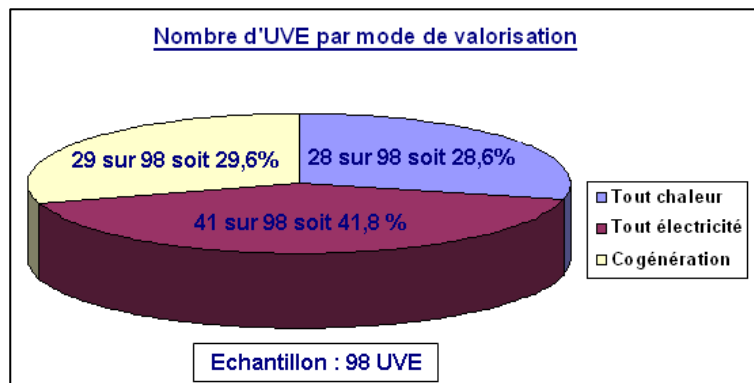
(Source : Cadet International)

Ce tableau ne concerne que les usines qui revendent de la chaleur, de l'électricité ou les deux.

Les moyennes minimales, maximales et totales sont faites sans les données de certaines usines.

D'une manière générale, la capacité des usines dépend du fait qu'elles fassent des toutes chaleurs, des toutes électricités ou de la cogénération.

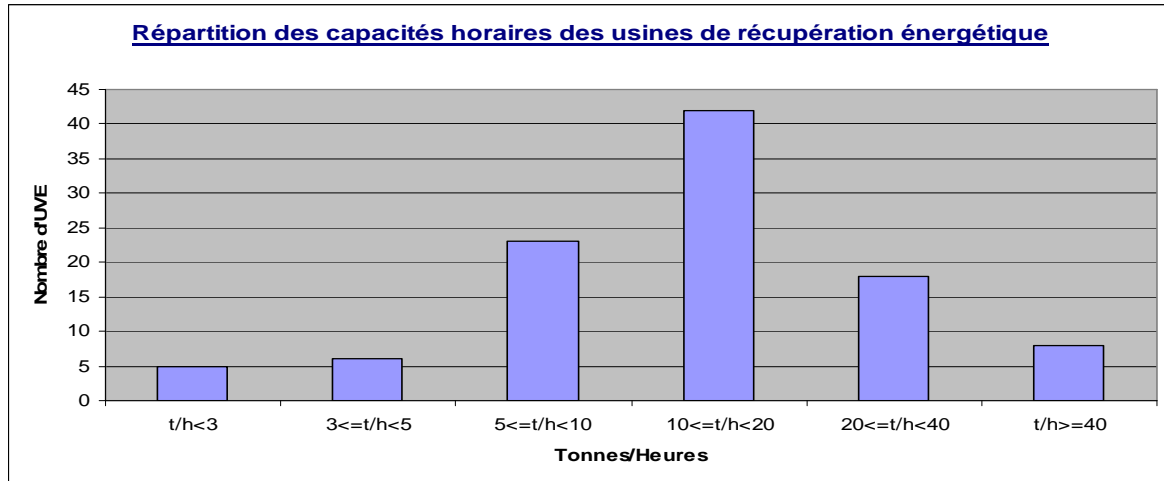
Les usines avec cogénération ont des capacités annuelles plus importantes que celles tout électrique ou tout chaleur. Ces usines disposent d'un potentiel énergétique assez important pour à la fois produire de l'électricité mais aussi satisfaire la demande totale ou partielle du besoin de chaleur de proximité.



(Source : Cadet International)

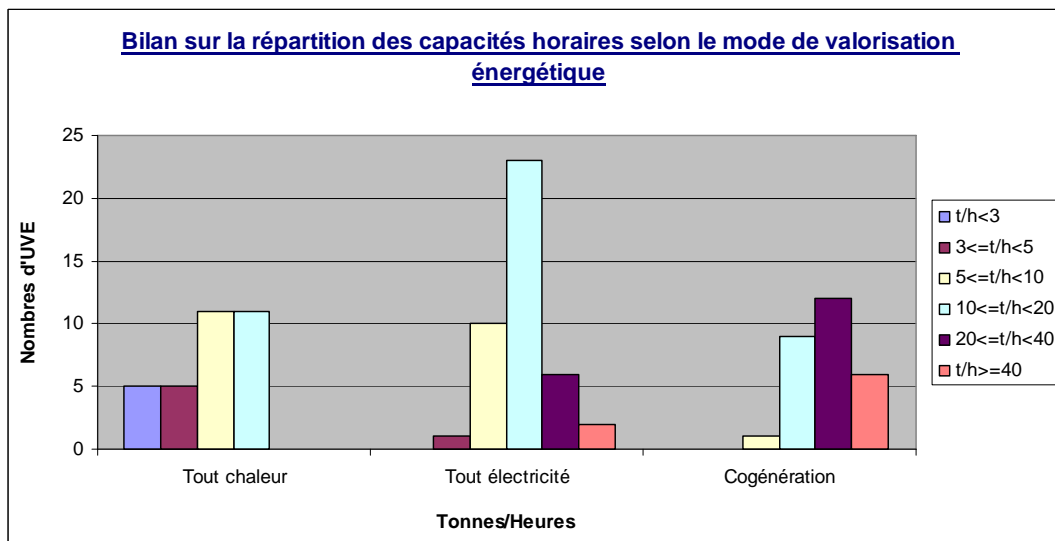
- Répartition des capacités horaires des UVE

La capacité horaire moyenne de l'échantillon est de 15,8 t/h variant entre 1 t/h et 100 t/h. 45% des usines avec valorisation énergétique se situent entre 10 et 20 t/h.



(Source : Cadet International)

Le bilan sur la répartition de la capacité horaire des UVE en France suivant le mode de valorisation à savoir : tout chaleur, tout électricité et cogénération est présenté dans le graphique qui suit :



(Source : Cadet International)

Les UVE « **tout chaleur** » ont toutes des capacités horaires inférieures à 20 t/h ; elles sont de petites capacités.

Les UVE « **tout électricité** » ont des capacités horaires très dispersées avec une prépondérance entre 10 et 20 t/h.

Les UVE « **cogénération** » ont des capacités horaires moyennes supérieures à 10 t/h.

- **Puissance thermique : répartition par mode de valorisation comprise entre 3 MW à 313 MW**

Comprise entre 2,6 et 260 MW, la puissance thermique est proportionnelle aux capacités horaires.

Echantillon	Tout chaleur	Tout électricité	Cogénération
101	32	41	29
Moy : 40 MW	Moy : 21,1 MW	Moy : 37,4 MW	Moy : 80,3 MW
Min : 2,6 MW	Min : 2,6 MW	Min : 10,3 MW	Min : 12,8 MW
Max : 313,1 MW	Max : 48,8 MW	Max : 111,7 MW	Max : 313,1 MW

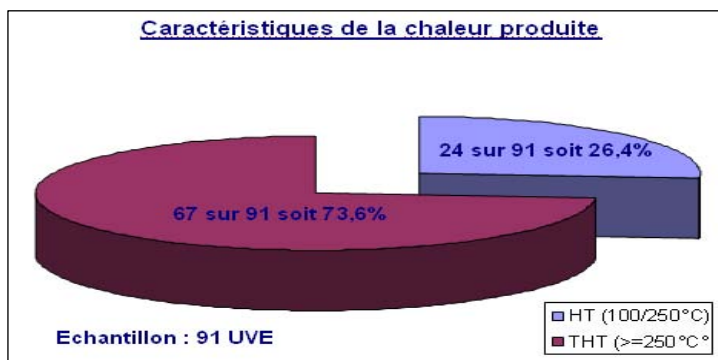
(Source : Cadet International)

- Les caractéristiques de la chaleur produite

Si l'on se réfère aux plages de températures définies au 1.3 concernant le stockage thermique, on note :

- Basse température (30/70°C) : aucune UVE
- Moyenne température (70/100°C) : aucune UVE
- Haute température (100/250°C) : 24 UVE
- Très haute température (>250°C) : 67 UVE

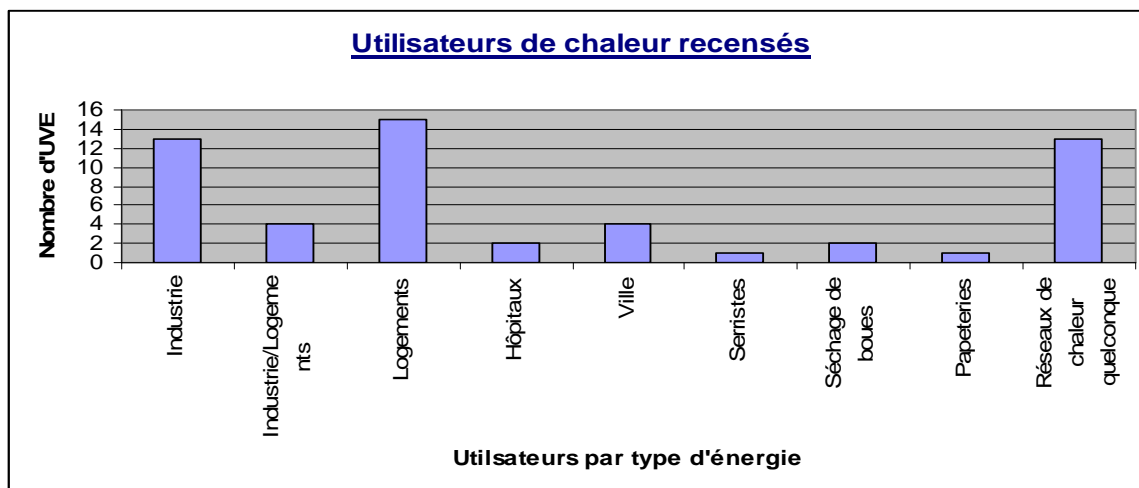
Nous n'avons pas les informations nécessaires concernant les autres UVE.



(Source : Cadet International)

- Les utilisateurs de chaleur par type d'énergie

Les sites utilisateurs se situent principalement à une dizaine de kilomètre du site de production. Néanmoins on note un infime partie des réseaux faisant plus de 20 km.



(Source : Cadet International)

- **Les caractéristiques des utilisateurs**

Utilisateurs	Caractéristiques
Industries : Blédina, Rhodia, usine chimique CRODA, France GRAS, SLP, SOFIVO, UCDEM, Kervallis, Cooper standard, Papeterie, Sidérurgie (Arcelor Mittal)...	Eau surchauffée (105 - 220°C) Vapeur surchauffée (200 - 400°C) ; avec une prédominance entre 350 - 380°C
Habitat/Loisirs/Santé : (piscines, théâtre, cinéma, centre commercial, logements, cité des congrès, hôpital, chauffage domestique...), réseau urbain	Eau chaude Eau surchauffée à 110 - 175 - 190 - 200°C
Autres : Séchage de boues, Serristes	Eau chaude

(Source : Cadet International)

4.1.1.3. Notions contractuelles de revente d'énergie

Bilan sur la vente de la chaleur

On compte 55 unités qui revendent de la chaleur et/ou de l'électricité.

Ces 55 unités peuvent être réparties en trois pôles de vente à savoir ceux qui revendent à un réseau de chaleur quelconque, ceux qui revendent à l'industrie et ceux qui revendent à un réseau de chaleur et à l'industrie.

Cogénération			Valorisation tout chaleur		
29			28		
Vente RC	Vente Indus	Vente RC+Indus	Vente RC	Vente Indus	Vente RC+Indus
21	1	6	13	9	5

(Source : Cadet International)

S'agissant des UVE cogénération, on constate que :

- certaines UVE ne vendent pas beaucoup de chaleur mais privilégient plutôt la vente d'électricité. Cela est dû en majorité au fait que les consommateurs qui se trouvent à proximité sont peu consommateurs de chaleur. Il peut s'agir de réseau chaleur urbain de petite puissance ou d'industriels.
- des UVE vendent beaucoup de chaleur car se trouvant à proximité de gros consommateurs de chaleur (exemple : UVE de la région parisienne alimentant le CPCU).

Autoconsommation de la chaleur

L'autoconsommation de la chaleur est un paramètre assez difficile à suivre car pouvant être due à :

- une utilisation de la chaleur dans le cycle thermique,
- une utilisation de la chaleur pour le process (réchauffage du panache),
- autres utilisations (séchage de boues), ...

Prix de vente du MWh chaleur

Compris entre 8 et 29 € HT/MWh, le prix moyen de la chaleur vendue à un réseau de chaleur est estimé à 17,35 € HT/MWh tandis que la chaleur vendue à un industriel oscille entre 9,7 et 24 € HT/MWh avec une moyenne à 14,65 € HT/MWh. (Source AMORCE Série technique RCT 22 avril/2007)

Principes contractuels

- Les prix de vente aux réseaux de chaleur

Les prix de vente de la chaleur issue des usines sont considérés soit départ usine (l'investissement et l'exploitation de la liaison UVE / réseau de chaleur étant à la charge de l'exploitant du réseau) soit livré en chaufferie centrale du réseau de chaleur (l'investissement et l'exploitation du réseau de liaison étant alors à la charge de l'exploitant de l'UVE).

Il est difficile de donner un prix objectif argumenté pour la vente de chaleur. Il est à considérer en fonction de deux critères :

- d'un côté le prix maximum que peut admettre de payer le réseau de chaleur (qui se situe entre le prix de son énergie la moins chère et son prix moyen départ chaufferie centrale),
- de l'autre côté, le prix de vente minimum que peut accepter l'UVE, fonction des coûts engendrés par les équipements de récupération de la chaleur et, pour les centrales de cogénération, des éventuelles pertes de production d'électricité pouvant être liées à la valorisation thermique (dans les cas de soutirage par exemple).

La détermination du prix de vente de la chaleur s'avère être un positionnement très politique, potentiellement source d'une tension particulière entre les deux parties prenantes.

A noter que deux réseaux de chaleur (Lyon et Rennes) ont des tarifs de vente de la chaleur avec un double barème, proposant une décote au-delà d'un certain niveau de consommation.

(Source AMORCE Série technique RCT 22 avril/2007)

- La durée des contrats

Les principes contractuels constatés pour la valorisation thermique de 5 UVE (Besançon, Blois, Chambéry, Lyon, Rennes) sur des réseaux de chaleur urbain sont les suivants : les cinq contrats observés ont des durées calées sur le contrat de gestion du réseau de chaleur. Ces contrats varient de 10 à 15 ans.

Dans certains cas, des clauses prévoient une révision des contrats par exemple en cas de dérive du prix de vente du fait des formules d'indexation. Pour le réseau de Besançon sont ainsi définies des « clauses de rencontre » dans plusieurs cas :

- modification de plus de 10% de la puissance raccordée sur le réseau de chaleur (par rapport à la puissance raccordée au moment de la signature du contrat),
- évolution de la capacité de traitement des équipements de l'usine d'incinération,
- modification du panel des énergies consommées par le réseau de chaleur,
- constat que, sur deux exercices de suite, les prix de la vapeur subissent une variation supérieure à 10% en plus ou en moins.

Ces clauses seront très probablement activées sur la durée de vie du contrat.

(Source AMORCE Série technique RCT 22 avril/2007)

4.1.2. Méthanisation et valorisation du biogaz d'ISDND

La méthanisation et la valorisation du biogaz d'ISDND (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux) n'est pas à ce jour une source de production de chaleur calorifique conséquente pour la livraison au travers de réseau de chaleur.

La méthanisation est amenée à un fort développement en France (50 projets biogaz, source ADEME 2010) notamment par un tarif d'achat d'électricité par EDF plus important si la chaleur produite est valorisée

Tarifs d'achat (parus le 19 mai 2011) :

- 8,121 à 9,145 c€/kWh pour le biogaz d'ISDND,
- 11,19 à 13,37 c€/kWh pour le biogaz de méthanisation,
- plus prime valorisation chaleur (0 à 4 c€/kWh sebn le % de valorisation),
- plus prime effluents d'élevage (0 à 2,6 c€/kWh selon le % traité).

Des verrous techniques et financiers restent encore à soulever. Il existe notamment des problèmes de production de ces gaz issues de la transformation des déchets. Le stockage d'énergie calorifique et un transport vers les zones de consommation, peut représenter une des réponses au développement de cette valorisation.

Il est nécessaire de noter la méthanisation comme une filière émergente mais souvent trop petite pour pouvoir alimenter un réseau de chaleur et les ISDND où le problème est la localisation de ces installations souvent très éloignées des consommateurs.

Secteurs	Etat des lieux de la production en 2008 (énergie finale)			Perspectives de production 2020 (énergie finale)		
	Chaleur (seule et cogénération)	Électricité (seule et cogénération)	Biométhane	Chaleur (seule et cogénération)	Électricité (seule et cogénération)	Biométhane
	(GWtht/an)	(GWhe/an)	(GWtht/an)	(GWtht/an)	(GWhe/an)	(GWtht/an)
Méthanisation d'OM	25	4	0	380	230	400
Agricole	25	13	0	280	230	200
Industrie	476	22	0	640	100	70
STEP	523	26	0	650	160	100
<i>Total méthanisation</i>	1 049	66	0	1950	720	770
ISDND	813	544	0	1910	1150	440
<i>Total</i>	1862	675	0	3860	1870	1210

Etat des lieux en 2008 et perspectives à l'horizon 2020 de production d'énergie issue de biogaz

(Source ADEME/GrDF septembre 2010)

4.1.2.1. Généralités

● Méthanisation

- Définition

La méthanisation est un procédé anaérobie de dégradation biologique qui transforme la matière organique en biogaz.

C'est une méthode qui permet d'obtenir un biogaz contenant $\approx 65\%$ de méthane.

- Les secteurs concernés par la méthanisation

Les déchets méthanisables sont les déchets organiques à savoir : les déchets verts, les déchets des industries agroalimentaires, les déchets agricoles, les déchets du marché, les déchets putrescibles, les ordures ménagères, les boues de station d'épuration des eaux usées urbaines ou industrielles et les déchets d'élevage (liste non exhaustive).

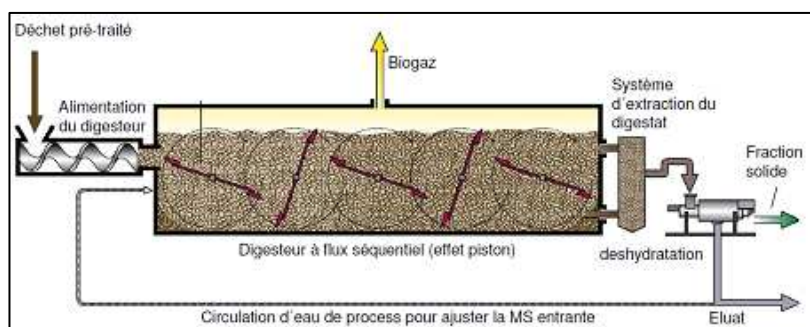
Le secteur agricole peut également être impliqué dans des projets de méthanisation de cultures énergétiques.

Ce développement, qui a contribué à l'essor de la méthanisation agricole en Allemagne, est actuellement peu développé en France.

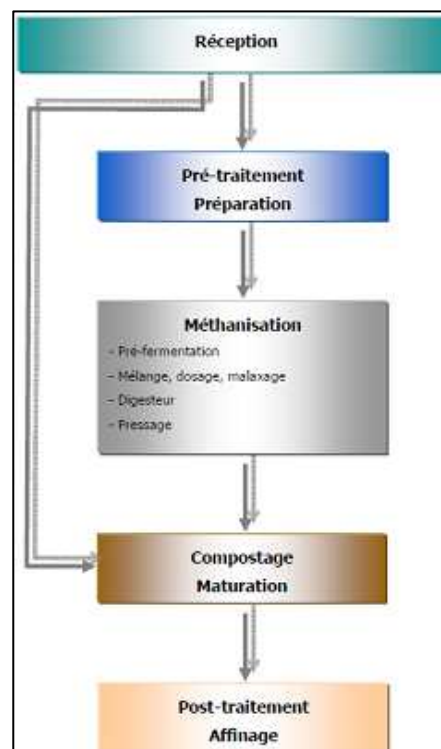
- Illustration

Le processus de méthanisation est illustré sur la figure de droite. Les déchets méthanisables sont pré-traités avant d'être introduit dans le digesteur où ils subiront les transformations nécessaires permettant d'aboutir à la production de biogaz et de digestat. Le biogaz et/ou biométhane extrait sera utilisé pour produire de l'électricité et/ou de la chaleur.

Le schéma ci-après illustre une étape d'extraction du procédé Strabag par digestion sèche thermophile dans la fraction fermentescible pour produire de l'énergie à partir du biogaz



(Source : Cadet International)



Biogaz d'ISDND

- Définition

Le biogaz est produit par la décomposition anaérobie des déchets organiques contenus dans les déchets ménagers (150 à 250 kg par tonne de déchets en fonction de l'origine urbaine ou rurale et des tris préalables effectués).

Le biogaz issu des centres de stockage de déchets contient $\approx 45\%$ de méthane (CH_4). Les techniques de valorisation du biogaz permettent de réduire et de valoriser efficacement ses émissions de CO_2 des sites, grâce notamment à une amélioration du captage du biogaz.

- Procédés de valorisation du biogaz

Il existe trois principaux modes de valorisation du biogaz à savoir :

- la valorisation électrique seule ou en cogénération,
- la valorisation thermique,
- la production de biométhane pour l'injection dans le réseau gaz ou pour l'utilisation en carburant.

Combustion en torchères : La valorisation du biogaz n'est rentable que pour des grandes productions. Le torchage consiste à brûler le méthane pour le transformer en CO_2 , dans le but de limiter son impact sur l'effet de serre.

Valorisation thermique : Le méthane peut être utilisé comme source de chaleur. C'est la voie la plus ancienne et la mieux maîtrisée. La combustion de 1 m³ de méthane libère 8 570 kcal qui en équivalent énergie donne : 1 litre de gas-oil, 0,94 m³ de gaz naturel ou 9,7 kW/h d'électricité.

Il suffit de brûler le gaz pour récupérer de la chaleur qui sert à produire de l'eau chaude ou de la vapeur, éventuellement utilisable par une collectivité ou un établissement de proximité.

Valorisation électrique : Le biogaz peut être transformé en électricité pour peu qu'il renferme au minimum 40% de méthane et une production avec un débit de 400 m³/h. La voie classique pour produire de l'électricité à partir du biogaz est l'utilisation de moteur.

Valorisation en cogénération : La cogénération est la production de chaleur et d'électricité à partir du biogaz.

Les moteurs possèdent un rendement électrique de 35%.

La récupération de la chaleur permet d'atteindre un rendement global de 85% si toute la chaleur produite est utilisée.

Valorisation en biocarburant : Largement développé en Suède, la valorisation en biocarburant reste assez limitée dans les autres pays d'Europe. En France plusieurs expériences ont été menées (Chambéry, Lille et Sonzay) pour alimenter les véhicules de collectivités locales. Les spécificités sur la qualité du biogaz dans cette application sont plus sévères que les précédentes.

Valorisation par injection dans les réseaux de gaz de ville : Pour injecter le biogaz dans les réseaux de gaz de ville, certaines spécifications sont nécessaires comme les teneurs en méthane, dioxyde de carbone, hydrogène sulfuré, oxygène, composés organo-halogénés. Cette valorisation est déjà appliquée dans plusieurs pays tels que le Danemark, les Pays-Bas, la Nouvelle-Zélande et arrive en France grâce notamment aux initiatives de la communauté urbaine de Lille Métropole.

4.1.2.2. Etats des lieux et perspectives de la production de biogaz en France

Dans le but d'atteindre l'objectif de 23% d'énergie produite à partir de sources renouvelables fixé par le Paquet Climat Européen et le Grenelle Environnement d'ici 2020, le biogaz a fait l'objet d'une récente étude initiée par l'ADEME et GrDF dans le cadre de leur collaboration sur la maîtrise d'énergie et des énergies renouvelables.

Le biogaz, produit à partir de la fermentation de matières organiques animales ou végétales, appelée méthanisation, doit devenir rentable afin de poursuivre son développement selon l'étude de marché de la méthanisation et des valorisations du Biogaz, menée par la Cabinet Ernst & Young.

D'après cette étude, les tendances de développement de la production du biogaz en France conduisent à évaluer la production totale de biogaz en 2020 à :

- près de **5,5 TWh par les installations de méthanisation**, soit un quasi triplement en un peu plus de 10 ans ;
- et près de **6 TWh pour le biogaz capté par les ISDND**, soit un niveau sensiblement constant par rapport à celui d'aujourd'hui.

L'étude englobe les évolutions de la filière survenues depuis 2004, notamment par la revalorisation de tarif d'achat et de l'avis favorable ordonné par l'Anses, anciennement l'AFSSET concernant la réintroduction du Biogaz dans le réseau de gaz naturel. Elle révèle en outre un bilan sur la production et la valorisation du Biogaz et les genèses de l'évolution par rapport à l'objectif de 23 % d'énergies renouvelables.

Les informations qui vont suivre sont en grande partie issues de l'étude menée par le Cabinet Ernst & Young et co-financé par l'ADEME et GRDF et présente des quantités d'énergie en GWh_{surPCI} biogaz.

Unités de production et/ou captage de biogaz

On dénombre en 2008 en France 481 sites de production et/ou captage de biogaz dont 180 installations pour la méthanisation et 301 ISDND (Source : Sinoe).

Sur les 301 ISDND recensées, 201 déclaraient capter le biogaz et 65 le valoriser (71 en 2010).

Le captage du biogaz dans les ISDND est une obligation réglementaire. Les installations ne captant pas le biogaz sont en général des sites où il n'y a plus de production de biogaz ou pas assez pour justifier la mise en place d'un dispositif de captation.

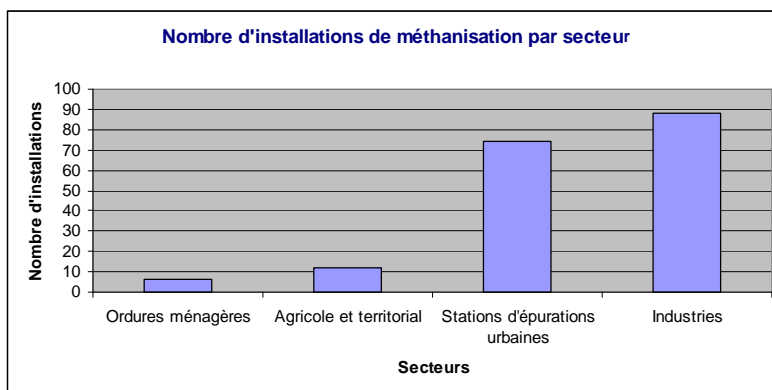
Sur les 180 installations de méthanisation qui sont opérationnelles en France en 2008, 90% appartiennent au secteur industriel et à celui de l'épuration urbaine. Il s'agit de secteurs pour lesquels les premières unités ont été construites dans les années 50 et ont connu depuis un développement constant.

Le secteur agricole ne compte que 12 installations récentes malgré la construction d'une centaine d'installations dans les années 80.

La méthanisation des ordures ménagères se limite en 2010 à 6 installations, pour la plupart récentes.

Nombre d'installations de méthanisation en 2008

Source : Enquête EY 2009, étude AND 2004, ADEME



● Valorisation

Le secteur de la méthanisation regroupe quatre secteurs dont les deux principaux à savoir industries et STEP urbaines ont la plus forte valorisation thermique ; respectivement 487 et 532 GWh/an.

Présente dans les quatre secteurs de la méthanisation, la cogénération reste toutefois primordiale dans le secteur agricole où 92% du biogaz produit est valorisé en cogénération.

Le secteur des industries possède le volume le plus important de biogaz non valorisé (177 GWh/an), suivi par le secteur des STEP urbaines (171 GWh/an).

Dans le secteur des OM, seules 5 installations ont produit du biogaz en 2008 (Amiens, Le Robert, Calais, Varennes-Jarcy et Lille). Toutes ces installations torchent une partie du biogaz qu'elles produisent : la totalité dans le cas du Robert (quantité de biogaz produite insuffisante pour faire fonctionner les moteurs), 35% à Amiens (dysfonctionnements), 6% à Varennes-Jarcy (proportion torchée difficilement compressible), et 79% à Calais (quantité de biogaz produite insuffisante pour faire fonctionner les moteurs).

Lille Métropole est la 1^{ère} collectivité en France depuis le 17/06/2011 et la seule à être équipée d'un système d'injection du biométhane produit au CVO de Sequedin.

- Types de valorisation

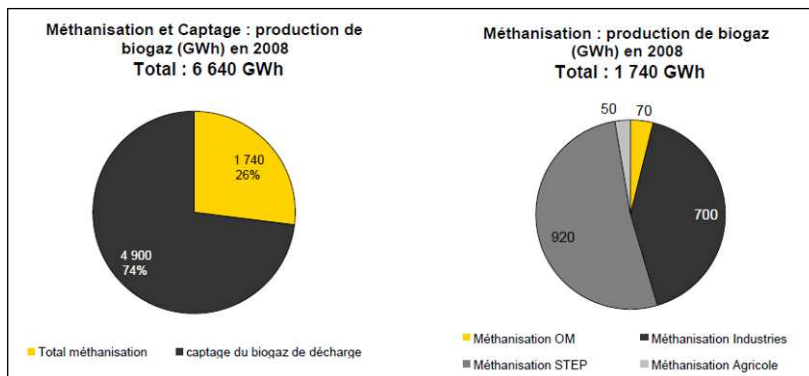
Les acteurs du marché impliqués en 2009 dans la valorisation du biogaz se positionnent en fonction du type de valorisation. Les principaux acteurs impliqués sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	Acteurs	Rôles
Valorisation sous forme d'électricité	Opérateurs de réseaux : transport ou distribution,	Les opérateurs de réseaux sont responsables de la gestion des réseaux d'électricité.
	EDF	EDF est tenue d'acheter l'électricité produite à partir de biogaz mise sur le réseau à un tarif d'achat fixé.
	Autres fournisseurs d'électricité	Ces opérateurs privés peuvent acheter l'électricité produite à partir du biogaz, à un tarif négocié.
Valorisation sous forme de chaleur	Acheteurs de chaleur : réseaux de chaleur, collectivités locales, tiers privés.	Un réseau de chaleur ou une collectivité locale, mais aussi un tiers privé peuvent acheter la chaleur produite par une installation
Valorisation sous forme de carburant	Collectivités locales (ex : Lille), particuliers, entreprises (ex : exploitants d'ISDND) Compressoristes, ou entreprise spécialisée (ex. GNVert) dans la conception, construction, exploitation, maintenance de stations GNV	Une collectivité locale ou une entreprise peut faire le choix du biométhane comme carburant pour sa flotte de véhicule de bus, de véhicules de collecte des ordures, ou de véhicules légers. Certains compressoristes ou d'autres entreprises spécialisées proposent une offre de construction, exploitation, maintenance de stations GNV.
Injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel (pour valorisation ultérieure sous les formes précédemment citées)	Fournisseurs de gaz naturel	Les fournisseurs pourraient acheter le biométhane à l'installation de méthanisation, à un tarif fixé par l'Etat.
	Opérateurs de réseaux : transport ou distribution	Les opérateurs de réseaux sont responsables de la construction, de l'exploitation et de la maintenance des réseaux de gaz naturel. Ils n'achètent pas le biométhane mais sont en charge de son injection puis de son acheminement dans le réseau qu'ils exploitent.

- La production de biogaz

Les installations de captage du biogaz d'ISDND représentent un peu plus des trois quarts de la production de biogaz en France.

93% du biogaz de méthanisation produit provient des secteurs des STEP urbaines et des industries. La méthanisation des OM quant à elle ne produit que 4% du biogaz produit par méthanisation contre 3% seulement pour le secteur agricole.



Les quantités de biogaz produites en France en 2008

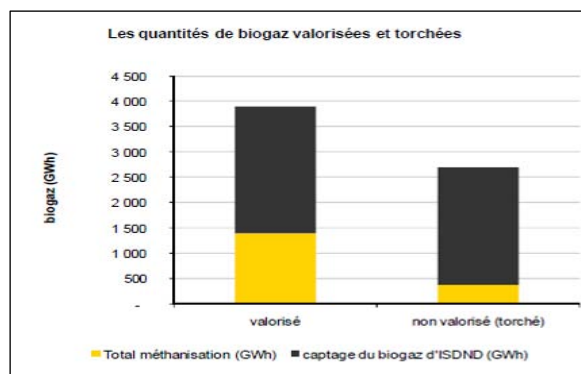
Source : enquête Ernst & Young 2009 et SINOE.

Les données relatives au captage de biogaz sont des données 2008, basées sur une extraction SINOE du 14 septembre 2009.

- La valorisation actuelle du biogaz

Au total, 60% du biogaz produit en France est valorisé, le reste est torché.

- 78% du biogaz issu de la méthanisation est valorisé (22% est torché)
- 53% du biogaz issu des ISDND est valorisé



Les quantités de biogaz torchées et valorisées en 2008 par les unités de méthanisation et les ISDND en 2008

Source : Enquête Ernst & Young 2009 et Sinoe

🌱 Perspectives d'évolution de la méthanisation et des valorisations du biogaz

Comme énoncé plus haut, les perspectives de développement de la production de biogaz en France en 2020 donnent, sans une modification majeure du contexte politique et économique, une production totale de près de 5,5 TWh par les installations de méthanisation soit un quasi triplement en un peu plus de 10 ans et près de 6 TWh issue du biogaz d'ISDND capté à l'horizon 2020 (soit un niveau sensiblement constant par rapport à celui d'aujourd'hui). Ce chiffre est à comparer au potentiel français de production de biogaz estimé entre 80 et 180 TWh par an sur la base de l'estimation du gisement de ressources fatales fermentescibles (rapport de l'AFGNV, 2009).

Cet écart important montre que la disponibilité de la ressource en biomasse ou déchets organiques n'est pas un frein au développement de la production de biogaz. Les principaux freins cités lors des entretiens d'experts et le séminaire stratégique sont le manque de rentabilité de la filière pour le secteur agricole et le manque de visibilité (retours d'expériences) pour les investisseurs.

Secteurs	Etat des lieux de la production en 2008 (énergie finale)			Perspectives de production 2020 (énergie finale)		
	Chaleur (seule et cogénération)	Électricité (seule et cogénération)	Biométhane	Chaleur (seule et cogénération)	Électricité (seule et cogénération)	Biométhane
	(GWth/an)	(GWhe/an)	(GWth/an)	(GWth/an)	(GWhe/an)	(GWth/an)
Méthanisation d'OM	25	4	0	380	230	400
Agricole	25	13	0	280	230	200
Industrie	476	22	0	640	100	70
STEP	523	26	0	650	160	100
<i>Total méthanisation</i>	1 049	66	0	1950	720	770
ISDND	813	544	0	1910	1150	440
<i>Total</i>	1862	675	0	3860	1870	1210

Etat des lieux en 2008 et perspectives à l'horizon 2020 de production d'énergie issue de biogaz

Secteur	Situation en 2008		Perspectives 2020 tendancielle	
	Nombre d'installations	Énergie primaire produite	Nombre d'installations	Énergie primaire produite
Agricole	12	50 GWh	70 - 250	500 - 2 000 GWh
Industrie	74	700 GWh	100 - 150	860 - 1 280 GWh
STEP urbaines	88	920 GWh	100 - 130	1 100 - 1 300 GWh
OM	6	70 GWh	18 - 36	500 - 770 GWh
Total Méthanisation	180	1 740 GWh	288 - 566	2960 - 5 350 GWh
ISDND	301	4 900 GWh	250	4 900 - 6 000 GWh
Total	481	6 640 GWh	538 - 816	7 860 - 11 350 GWh

Synthèse des perspectives de développement de la production de biogaz à l'horizon 2020

Mode de valorisation	Utilisateurs
Chaleur	Utilisation en interne pour les besoins de l'entreprise (procédé, chauffage de bâtiments); vente à une collectivité publique ou à un réseau de chaleur, vente à un tiers privés

Pour plus de détail sur tous les secteurs concernés par la méthanisation et la valorisation du biogaz de décharge en France, on renvoie le lecteur à l'étude des marchés et des valorisations des biogaz réalisée pour le compte de l'ADEME et GrDF par Ernst & Young.

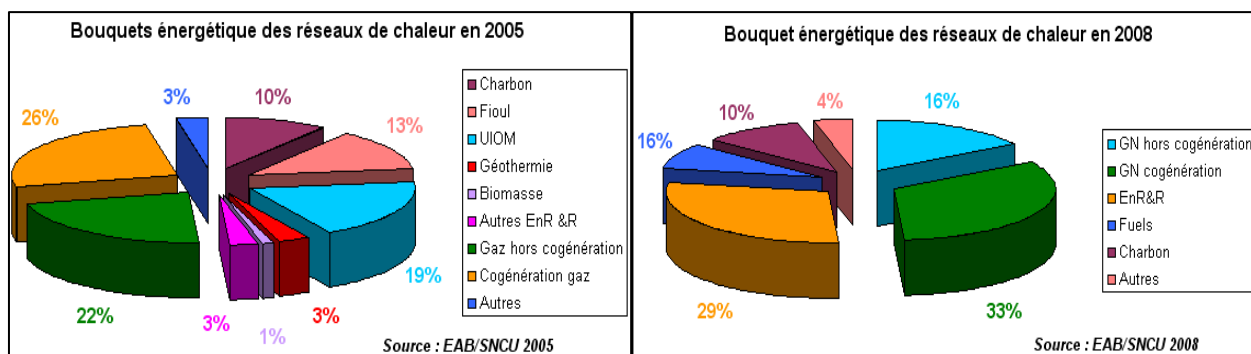
4.2. IDENTIFICATION DES UTILISATEURS D'ENERGIE CALORIFIQUE

4.2.1. Les réseaux de chaleur

Les réseaux de chaleur ont connus leurs essors lors de la période après guerre et ce sont développés en plusieurs vagues successives : les années 60, les années 80, en particulier à l'occasion du développement de nouveaux quartiers et zones urbaines.

La place de l'incinération dans le bouquet énergétique français des réseaux de chaleur est importante puisqu'elle représente près d'un cinquième de l'énergie consommée par le chauffage urbain (plaçant cette source d'énergie en seconde place derrière le gaz naturel).

Rappelons que la valorisation thermique de l'énergie issue de l'incinération représente de l'ordre de 0,7 Mtep/an en énergie finale (pour 0,28 Mtep/an d'électricité), dont 0,4 Mtep vers les réseaux de chaleur, alors que le potentiel énergétique des déchets incinérés serait de l'ordre de 1,9 Mtep/an (en énergie primaire) (données Amorce, RCT22, 2007).



Répartition du mix énergétique des réseaux de chaleur en 2005 et 2008 (données EAB/SNCU)

Le lien entre incinération et réseaux de chaleur, même s'il tend à se réduire avec l'éloignement des nouvelles usines des zones urbanisées pour cause de difficultés d'acceptation, reste donc très important pour une filière comme pour l'autre.

L'argument fort, du point de vue des gestionnaires de réseaux de chaleur, pour le développement des énergies renouvelables, est leur caractère local, en grande partie déconnecté des fluctuations internationales sur les prix de l'énergie, qui permettent une meilleure maîtrise des évolutions de prix dans le temps.

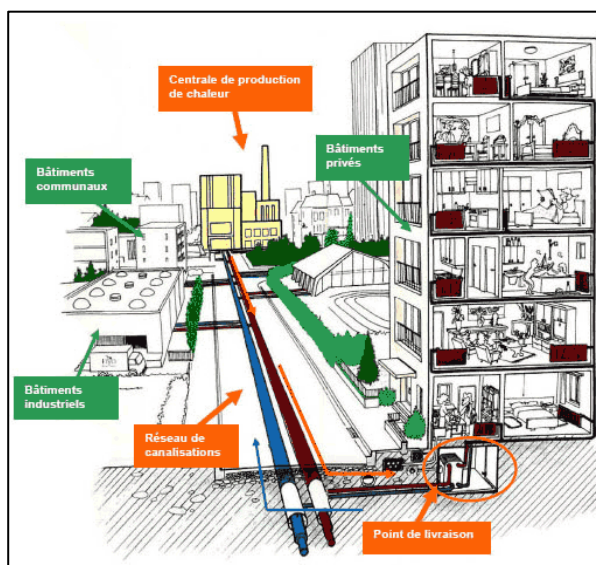
Les lois récemment votées pour l'environnement incitent fortement à recourir aux énergies renouvelables par le biais de plusieurs leviers :

- l'application d'un taux de TVA réduit sur la fourniture d'énergie lorsque les énergies renouvelables et fatales représentent plus de 60% du bouquet énergétique,
- le système d'échange de quotas de CO₂, qui concerne les plus grandes installations de chauffage urbain,
- les possibilités d'obtention de certificats d'économie d'énergie pour le raccordement de bâtiments à des réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables ou de récupération,
- l'affichage des performances énergétiques et environnementales des bâtiments.

La récupération d'énergie sur les incinérateurs permet donc d'améliorer les conditions de tarification de l'énergie finale consommée par tous ces mécanismes cités ci-dessus.

Le transport de l'énergie calorifique par des réseaux pour la distribution de chaud et de froid est déjà très utilisé mais il n'est pas pour le moment mis en œuvre le stockage de cette énergie transportée.

Le Syndicat National du Chauffage Urbain (SNCU) recense 427 réseaux de chaleur (enquête 2008), répartis sur 350 villes et s'étendant sur 3300km. Ce recensement porte essentiellement sur les réseaux d'une puissance supérieure à 3,5 MW (soit environ 3000 équivalents-logements). Il existe également des réseaux moins puissants, souvent alimentés par de la biomasse, non recensés de façon exhaustive à ce jour. Un réseau peut également distribuer du froid : sur les 427 réseaux identifiés, 14 sont des réseaux de froid ; celui de Paris est le plus important d'Europe.



● Fluide caloporteur primaire

Plusieurs états du fluide caloporteur peuvent être utilisés pour la distribution de chaleur, ce fluide est de l'eau pour les applications chauffage :

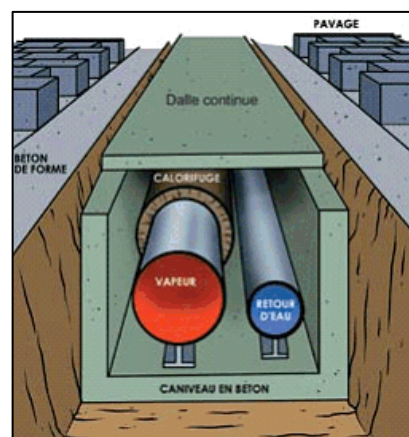
- **Réseau d'eau chaude** à une température comprise entre 60°C et 110°C. Il est généralement prévu pour les groupes d'immeubles d'habitation ou de bureau, ou encore les hôpitaux et établissements industriels qui ne consomment pas de vapeur.
- **Réseau d'eau surchauffée** à une température comprise entre 110°C et 180°C. Il est principalement utilisé dans les réseaux de grande envergure qui alimente des bâtiments nécessitant des températures élevées (laveries, abattoirs, industriels textiles).
- **Réseau vapeur** à une température de 200°C à 300°C. Son utilisation est de plus en plus limitée. Il est présent essentiellement pour la fourniture de chaleur industrielle, mais Paris l'utilise pour son réseau de chaleur (réseau de la CPCU).

● Conduite de l'énergie

Le chauffage urbain centralise la production de chaleur au niveau d'une grosse chaufferie qui dessert un ou plusieurs quartiers. Ces réseaux existent dans des grandes villes telles que Paris, Grenoble, Strasbourg, Lyon,... et se développent dans les villes moyennes, voire les zones rurales. La liaison entre le réseau de chauffage urbain et le réseau de chauffage central des bâtiments se fait au niveau d'une sous-station.

Des canalisations souterraines transportent la chaleur jusqu'aux immeubles sous forme de vapeur, d'eau surchauffée ou très chaude.

Ces canalisations sont en général constituées d'un système double enveloppe : une gaine extérieure en acier (jusqu'à 800 mm de diamètre) à l'intérieur de laquelle se trouve une autre gaine en acier transportant le fluide caloporteur entourée d'une épaisseur d'isolant (laine de roche, mousse de polyuréthane, etc.).

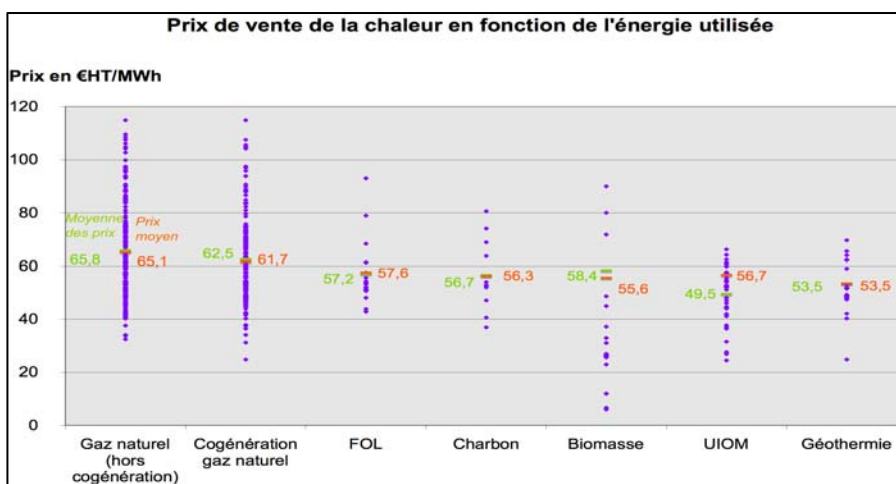


La pose peut se faire en **caniveau enterré**, ce qui permet une protection mécanique et minimise les effets dus à l'humidité par ventilation de ces caniveaux. Elle peut également se faire en **tranchée**, solution moins coûteuse, mais nécessitant que les gaines soient entourées d'un film protecteur contre l'humidité et quelles soient installées à une profondeur suffisante afin d'absorber les efforts de la surface.

Le coût de pose d'un mètre de réseau est de l'ordre de 1000 à 2000€. Ce coût dépend bien sûr en réalité de très nombreux facteurs liés à chaque projet (passage d'ouvrage d'art, densité de réseau existant, fluide caloporteur, type de canalisation...). (Source CPCU)

🌿 Prix de vente de la chaleur à l'utilisateur

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 UVE, 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 '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 UVE 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)

4.2.2. Les utilisateurs

Les installations de production de chaleur produisent l'énergie calorifique nécessaire pour alimenter le réseau garantissant ainsi la température de l'eau ou la pression de la vapeur dans les canalisations jusqu'aux consommateurs.

On recense plusieurs utilisateurs d'énergie calorifique. Ces derniers peuvent être classés en trois secteurs à savoir : publics, privés et industriels mais aussi en fonction de l'utilisation de l'énergie calorifique ou de l'état du fluide à savoir chauffage, eau chaude sanitaire, procédés industriels,...

Parmi les utilisateurs d'énergie calorifique on recense :

● Au niveau de l'industrie :

- Industrie pétrochimique
- Industrie agro-alimentaire
- Industrie du papier et du carton
- Industrie de nettoyage industriel
- Métallurgie
- Sidérurgie
- Les stations d'épuration
- Les serres agricoles
- ...

● Au niveau du chauffage/climatisation et de l'eau chaude sanitaire :

- Bureaux, hôtels, magasins, PME,
- Résidentiel collectif
- Lycées, collèges, hôpitaux, piscine, centres commerciaux, centres nautiques, complexes sportifs
- ...

D'une manière générale, les utilisateurs sont localisés à proximité des sites de production d'énergie. Mais il est retenu pour des raisons de rentabilité des **seuils limites de raccordement proche en général de 1 MWh/ml (ratio énergie) et 1 kW/ml (ratio puissance)**.

Etant donné qu'une chaudière est un appareil de combustion produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, de l'eau surchauffée, de la vapeur saturée, de la vapeur surchauffée, ou modifiant la température d'un fluide thermique, grâce à la chaleur libérée par la combustion ; les caractéristiques et le type de chaudières utilisées permettent d'établir le profil de chaque utilisateur de l'énergie calorifique.

En s'intéressant à l'état du fluide, les applications de l'eau et de la vapeur seront de mieux en mieux ciblées.

En moyenne, une chaudière génère 2,3 MWh/tonne de déchets ménagers à PCI de 2 300 kcal/kg.

Cas particulier des unités de valorisation énergétique :

Une unité de valorisation énergétique telle qu'une usine d'incinération des ordures ménagères fonctionne environ 8000 h par an. Soit un taux de disponibilité de 91%.

La chaleur produite par l'unité de valorisation énergétique est transformée par un poste de valorisation énergétique ; chaudière essentiellement puis utilisée à des fins industrielles ou pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'électricité,... des usagers se trouvant à quelques kilomètres de l'usine.

Dans cette partie on va s'intéresser aux différents états de la chaleur produite pour classer les différents utilisateurs de la chaleur produite. On rappelle que l'état du fluide à savoir eau chaude basse température, eau surchauffée, vapeur saturée, vapeur surchauffée,... dépendent de la température et de la pression aux bornes de la chaudière et pas de la température uniquement.

● Eau chaude / Chauffage

- ECS : Eau Chaude Sanitaire

L'ECS désigne l'eau utilisée pour les nécessités de toilette et de préparation des aliments. Elle est désignée comme une eau destinée à la consommation humaine (EDCH).

L'EDCH désigne les eaux qui peuvent être consommées ou utilisées dans la fabrication des denrées alimentaires à l'exclusion des eaux minérales. En d'autres termes, cela concerne l'eau froide ou l'eau chaude sanitaire dans l'habitat, l'hôtellerie, les bureaux, les cuisines,...

A chaque pièce correspond une température maximale à ne pas dépasser :

- dans les pièces destinées à la toilette, la température maximale de l'eau chaude sanitaire est fixée à 50 °C aux points de puisage ;
- dans les autres pièces, la température de l'eau chaude sanitaire est limitée à 60 °C aux points de puisage ;
- dans les cuisines et les buanderies des établissements recevant du public, la température de l'eau distribuée pourra être portée au maximum à 90 °C en certains points faisant l'objet d'une signalisation particulière.

- ECBT : Eau Chaude Basse Température (<=110°C)

L'ECBT a une température limite légale de 110°C. Elle est généralement utilisée pour le chauffage dans l'habitat. C'est le cas par exemple de l'UVE de LA ROCHELLE qui utilise une eau à 105°C pour le chauffage de logements.

L'ECBT peut être également utilisée dans l'agro-alimentaire.

- ECHT : Eau Chaude Haute Température dite ES : Eau Surchauffée (de 110°C à 180°C voire et jusqu'à 220°C)

L'eau surchauffée (ES) a une température limite légale supérieure à 110°C. Elle peut atteindre les 180 °C voire et jusqu'à 220°C.

Préparée en chaufferie centrale, elle est distribuée par un réseau de canalisations qui peut faire plusieurs kilomètres jusqu'à des sous-stations qui par l'intermédiaire d'échangeurs transmettent sa puissance thermique à un réseau « client » à eau chaude basse température.

Généralement utilisée dans les réseaux de chauffage urbain, l'ES concerne deux types d'installations : les installations dites à basse température (120/140°C) et les installations dites à haute température (180/220°C).

Les **installations dites à basse température (120/140°C)** sont par exemple généralement utilisées pour les centrales à cogénération (turbine à vapeur à soutirage). Le fluide caloporteur est réchauffé grâce à la vapeur et permet le maintien de production d'énergie électrique. C'est le cas par exemple de l'UVE d'ARCANTE située au centre-ouest en Loir-et-Cher à Blois.

L'UVE de Blois a une production électrique qui s'élève à environ 48 000 MWh/an. 80% de sa production est vendue/exportée sur le réseau d'EDF tandis que les 20% sont autoconsommée par l'usine. Sa production d'énergie thermique quant à elle s'élève à environ 210 000 MWh/an. L'UVE dispose de 2 chaudières de 12 MW (17t/h) permettant de produire de la vapeur à 360°C et 45 bars. Une partie de la vapeur est utilisée pour la production d'eau surchauffée à 120°C/16 bar alimentant un réseau de chauffage urbain équivalent à 7 000 logements. Le reliquat vapeur est détendu pour la production d'électricité (turbine à vapeur).

Les **installations dites à haute température (180/220°C)** utilisent des diamètres de tuyauteries réduits car les écarts de températures entre l'aller et le retour peuvent atteindre 100°C. L'eau surchauffée peut être utilisée directement dans les installations industrielles mais, pour les locaux d'habitation, des sous-stations de chauffage sont nécessaires.

L'UVE de Pontarlier dispose d'une chaudière de récupération de chaleur d'une puissance nominale de 10 MW qui produit de l'eau surchauffée à **180°C**/16 bars. Sa production d'énergie thermique s'élève à 70 000 MWh/an environ. 50% de cette production alimente un réseau de chaleur permettant de chauffer 2200 foyers par an.

L'UVE de Pontivy à Morbihan dispose d'une chaudière verticale de 12 t/h produisant de la vapeur à 220°C/23 bars. Elle produit environ 53 000 MWh/an et revend 43 000 MWh/an (équivalent de la consommation en chauffage de 2700 foyers) soit 82% de sa production d'énergie thermique est fournie à une laiterie et à un centre d'équarrissage installé à proximité. Soit respectivement à SLP (Société Laitière de Pontivy) et France GRAS.

Vapeur

- **Vapeur Saturée (de 110°C à 250°C)**

L'UVE SMECO de Pontmain dispose de 2 chaudières dont une est destinée à la production de vapeur saturée et l'autre de vapeur surchauffée. La chaudière de production de vapeur saturée a un débit de 13 t/h et produit de la vapeur saturée sous 21 bars à 215°C. La production d'énergie thermique de l'UVE de SMECO s'élève à environ 106 000 MWh/an. 80 000 MWh/an soit 75% du total correspond à la production de vapeur saturée desservant un réseau de chaleur industriel voisin (la société Sofivo).

L'UVE de Chinon produit elle aussi de la vapeur saturée pour le centre hospitalier régional de Saint-Benoit-la-forêt.

L'UVE de Tronville dans la MEUSE dispose quant à elle de chaudières produisant de la vapeur saturée à 225°C sous 25 bars destinée à l'industrie. Sa production thermique s'élève à 55 000 MWh/an. Elle revend 7500 MWh/an soit environ 14%.

L'UVE de Brive dispose de 3 chaudières produisant de la vapeur de 180-200°C/ 16 bars. Sa production d'énergie thermique s'élève à 200 000 MWh/an. 30% de cette énergie est véhiculée vers la société Blédina et 5% servent à chauffer partiellement les serres municipales de la ville.

- Vapeur Surchauffée (à partir de 200°C)

Cette source de chaleur est généralement produite dans les UVE pour de la valorisation en turbine à vapeur. Le régime de vapeur généralement par les chaudières est 40 bars et 400°C.

L'UVE CCUAT de Toulon dispose de 2 chaudières de récupération de chaleur d'une puissance nominale unitaire de 33 t/h et d'une chaudière de 38 t/h de vapeur surchauffée à 42 bars, 380 °C. La vapeur surchauffée produite par les 3 chaudières de récupération est utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de 2000 logements environ. Sa production d'énergie thermique s'élève à 525 000 MWh/an. Elle vend au réseau de chaleur 12 700 MWh/an. L'UVE dispose aussi de 2 turbo-alternateurs d'une puissance nominale chacun de 7,6 et 12,3 MW destinée à la production d'électricité. Sa production d'énergie électrique s'élève à 94 000 MWh/an. Une partie est autoconsommée et l'autre revendue. Elle revend à peu près 86 000 MWh/an (92%) d'énergie électrique soit environ 110 000 habitants éclairés par an.

L'UVE SCHWEIGHOUSE d'Haguenau dispose de 2 chaudières de 13 t/h qui produisent de la vapeur surchauffée à 320°C sous 30 bars. Elle est équipée d'un système de cogénération avec production d'électricité, de vapeur et d'eau chaude. Sa production d'énergie thermique s'élève à 165 000 MWh/an. Seul 40% de cette énergie est revendue soit 62 500 MWh/an. La vapeur est envoyée vers la papeterie de Schweighouse et l'eau chaude vers INA roulements à Haguenau. Sa production électrique s'élève à 16 000 MWh/an dont les 30% de cette production est autoconsommée et l'autre partie (11 000 MWh/an) est revendue au réseau national d'électricité.

4.3. LES AUTRES VOIES D'ETUDE ENVISAGEABLE

4.3.1. Cogénération

La cogénération est la production et/ou utilisation locales d'énergie pouvant être transformée en chaleur et/ou en électricité à partir de la même source d'énergie primaire, renouvelable ou non, ou du même vecteur énergétique et généralement à partir d'un seul équipement.

Les énergies primaires utilisables sont : le gaz naturel, le pétrole, le bois, la biomasse, le biogaz,...

La cogénération existe à plusieurs échelles. On note la micro-cogénération, la mini-cogénération, la petite cogénération et enfin la grande cogénération.

La classification par taille en France donne :

Type	Micro-cogénération	Mini-cogénération	Petite cogénération	Grande cogénération
Puissance en kW	1-50	50-215	215-1000	>1000

On parle souvent de micro-cogénération pour qualifier un usage domestique par rapport à la cogénération qui concerne plus particulièrement de grosses installations industrielles de production d'énergie.

4.3.2. Trigénération

La trigénération représente aussi l'un axe de recherche qui peut-être identifié dans le cas de production d'énergie calorifique par les unités de valorisation des déchets. La production de chaleur par les incinérateurs est continue sur l'année entière alors que la production de chaleur par les chaufferies biomasses ou d'énergies fossiles sont utilisés que lorsque les besoins sont présents. La chaleur produite par les incinérateurs l'été est donc utilisée pour alimenter le réseau de chaleur selon les besoins en eau chaude sanitaire et le restant de la production est dans la plupart des cas valorisée en électricité par l'intermédiaire de turbine à vapeur.

La chaleur et son réseau associé peuvent être utilisés en période estivale pour la production de froid à partir de la technologie par sorption en sous-station. Ce qui permet de consommer l'excédent de chaleur produite à partir d'un réseau déjà existant.

On peut aussi imaginer qu'en période hivernale la chaleur non consommée par les besoins de chauffage peut être consommée pour la production de froid à destination d'industrie ou autre. Le stockage de froid permettrait donc d'allier les besoins entre les consommateurs de froid et de chaud tout en conservant un appel de puissance constant dans le temps qui correspond plus à une production de chaleur par des unités de valorisation énergétique.

Ce type de solution est étudié par la CCIAG (Compagnie de Chauffage de Grenoble) qui est associée au projet européen Summerheat piloté, pour la France, par Rhônalénergie Environnement.

Principe

Il s'agit de produire, à partir d'une énergie primaire (le gaz naturel le plus fréquemment), trois énergies secondaires utilisables conjointement :

- une énergie thermique, qui est utilisée (chauffage, séchage, chauffage de serre, piscines, d'eau chaude sanitaire procédés industriels
- une production de froid (produit mécaniquement ou indirectement au travers par exemple d'un groupe à absorption), etc.
- une énergie électrique ; produite avec un dispositif turbine + dynamo (courant continu) ou + alternateur (courant alternatif), avec le cas échéant une tension relevée par un transformateur.

C'est un type de production parfait pour des unités industrielles ayant besoin simultanément des 3 types d'énergie (papeterie par exemple) ou du gaz naturel peut mouvoir une turbine à gaz produisant de l'électricité et du mouvement, et produire de la vapeur d'eau utilisée dans les rouleaux sécheurs. De l'énergie peut in fine toujours être tirée de la condensation de la vapeur d'eau.

L'énergie primaire la plus couramment utilisée est le Gaz naturel, mais théoriquement toute forme d'énergie est parfois utilisée (essence, fioul, gaz, biogaz, gaz «fatal» produit par certaines industries, gaz provenant du procédé industriel et fréquemment gaspillé, par exemple gaz des torchères des industries chimiques et pétrolières, hydrogène, etc., ou alors énergie solaire ou pile à combustible à l'avenir).

Le rendement de conversion mécanique/électrique peut dépasser les 95% et celui de la récupération de la chaleur dépend de la configuration du dispositif et de la bonne isolation des tuyauteries.

Dans un équipement de trigénération, comme dans le cas de la cogénération, l'énergie électrique est autoconsommée et/ou réinjectée sur le réseau électrique public. En France EDF ou ailleurs une entreprise nationale ou locale de distribution d'électricité achète l'électricité suivant des conditions économiques fixées par les pouvoirs publics.

4.3.3. Différentes unités de cogénération-trigénération

● Les unités de cogénération-trigénération

Il existe plusieurs unités de cogénération. On peut citer : moteur Stirling, Cycle ORC de Rankine, Turbine à vapeur, moteur à vapeur, moteur à combustion interne, pompe à chaleur, chaudière de récupération, machines à sorption,...

S'agissant de la production d'électricité à partir de la combustion de la biomasse, il existe différentes solutions à savoir : des turbines à vapeur, des Cycle Organique de Rankine, du moteur Stirling et du moteur à vapeur.

Le tableau ci-dessous présente les principales options technologiques.

Technologie	Gamme de puissance	Rendement électrique
Turbine à vapeur	> 500 kW _e	12 à 25 %
Cycle ORC	1 kW _e – 1,5 MW _e	10 à 17 %
Moteur Stirling	1 kW _e – 150 kW _e	7 à 12 %
Moteur à vapeur	20 kW _e à 1 MW _e	8 à 15 %

- Turbine à vapeur

La turbine à vapeur est sans doute la technologie la plus employée actuellement pour la production électrique à partir de biomasse. Elle est cependant réservée à des installations de forte puissance (supérieures au mégawatt). Elle fonctionne selon le cycle de Rankine et nécessite la mise en œuvre de chaudières produisant de la vapeur à haute pression. Cette technologie est ancienne et bien maîtrisée.

- Cycle organique de Rankine (ORC)

Au lieu de la vapeur d'eau utilisée dans les cycles de Rankine traditionnels, un cycle organique de Rankine (ORC) fonctionne avec un fluide organique à grande masse molaire. La détente d'un tel fluide est en effet plus efficace que celle de l'eau à petite échelle. Pour son application à la cogénération à partir de biomasse, on utilise un caloporteur (huile thermique) produit par la chaudière et servant à vaporiser le fluide organique qui est ensuite détendu dans une turbine.

- Moteur Stirling

Le moteur Stirling est un moteur à air chaud dans lequel le mouvement du piston est obtenu par échauffement et refroidissement d'un gaz captif sous pression. En pratique, ce gaz est de l'air, de l'hydrogène ou de l'hélium. Le principe du moteur Stirling est très ancien mais la mise en œuvre industrielle, notamment en cogénération biomasse, est beaucoup plus récente.

- Moteur à vapeur

Le cycle thermodynamique mis en œuvre pour un moteur à vapeur est similaire à celui d'une turbine à vapeur. Par contre, la vapeur est détendue dans un ensemble de cylindres en permettant le mouvement de pistons actionnant in fine un alternateur. Pour les faibles puissances, le rendement obtenu est plus élevé que celui d'une turbine. Cette technologie très ancienne est aujourd'hui assez peu employée.

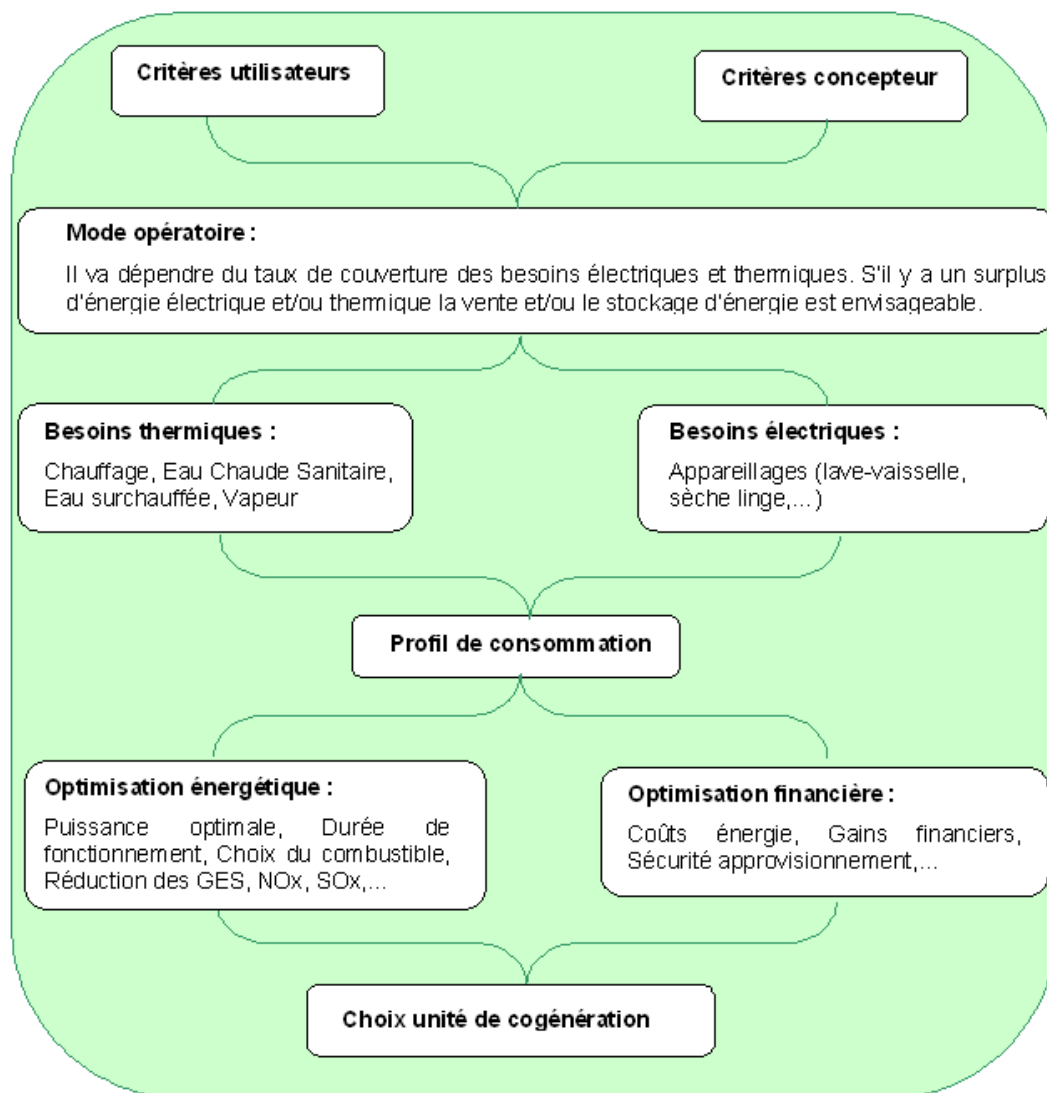
● Critères de sélection d'une unité de cogénération

L'installation d'une unité de cogénération résulte de plusieurs choix. Ces derniers peuvent être différents selon qu'on considère l'utilisateur ou le concepteur.

Le concepteur devra évidemment intégrer les critères mis en avant par les utilisateurs et les convertir en une proposition technique et financière basée sur ses critères.

Une optimisation énergétique et financière devrait être au préalable faite avant de choisir l'unité de micro-cogénération. Toutes les étapes clés nécessaires à un meilleur choix d'une unité de cogénération seront exposées de manière succincte dans la suite avec un développement possible de certaines.

Les différentes étapes peuvent être résumées comme suit :



Cet organigramme retrace les étapes nécessaires pour le choix d'une unité de cogénération.

(Source : Cadet International)

4.3.4. Systèmes hybrides

Un système hybride c'est la combinaison d'au moins deux technologies différentes permettant de mieux adapter la production d'énergie aux besoins.

Cet apport peut être électrique ou thermique. L'apport thermique peut être assuré par une chaudière classique et/ou un stockage thermique. Ainsi il existe deux types de systèmes hybrides: systèmes hybrides avec chaudière et systèmes hybrides avec stockage de chaleur.

Dans notre cas, on ne s'intéressera qu'aux systèmes hybrides avec stockage de chaleur.

Systèmes hybrides avec stockage de chaleur :

On parle de systèmes hybrides avec stockage de chaleur lorsqu'une unité de cogénération est couplée avec un système de stockage de chaleur. Cela peut être du stockage par chaleur latente, par chaleur sensible ou thermochimique/sorption. Le cas le plus répandu est l'utilisation d'une cuve tampon de stockage.

Dans le cas d'un système hybride avec stockage de chaleur dans une cuve tampon, l'unité de micro-cogénération est pilotée par la demande en électricité. Cette dernière se met en route ou s'adapte à la demande électrique. Cette demande peut être ou non couplée avec une demande de chaleur.

L'excédent de chaleur non utilisé pour le chauffage ou pour l'eau chaude sanitaire peut être stockée dans une cuve tampon.

Lorsque le niveau maximal de stockage de la cuve est atteint, la demande en chaleur est en priorité fournie par la cuve tampon.

En cas de faibles besoins électriques ; la nuit par exemple, la chaleur nécessaire provient d'abord de la cuve avec, si nécessaire, un appoint issu de l'unité de cogénération de puissance modulable afin de s'adapter à la faible demande électrique.

Pour une utilisation énergétique rationnelle, il est donc préférable de favoriser d'abord la chaleur stockée dans la cuve tampon puis le fonctionnement de l'unité de cogénération et finalement si nécessaire d'utiliser le dispositif de chauffage (chaudière, récupérateur de chaleur).

BESOINS	UNITE MICRO-COGENERATION	CUVE DE STOCKAGE TAMPON	CHAUDIERE
Electricité sans chaleur	En fonctionnement	Stockage	
Electricité et chaleur	En fonctionnement	Restitution si nécessaire	Appoint éventuel
Faible électricité sans chaleur	En fonctionnement à puissance réduite	Stockage	
Faible électricité et chaleur	En fonctionnement à puissance réduite	Restitution si nécessaire	Appoint éventuel

Il faut donc une adéquation entre l'unité de micro-cogénération et la capacité de stockage de chaleur.

Le dimensionnement de la cuve est basé sur la courbe de besoins thermique journaliers. Son volume est fonction de cette courbe et de la puissance thermique de l'unité de micro-cogénération.

4.3.5. Récupération d'énergie sur les réseaux d'eaux usées

La récupération d'énergie sur les réseaux d'eaux usées peut être vue comme un transport d'énergie à basse température.

Lorsqu'on prend une douche, qu'on fait la vaisselle ou qu'on fait marcher le lave-linge, on utilise de l'eau chaude qui va ensuite dans une canalisation puis qui part dans les égouts. Cette eau n'est utilisée qu'une seule fois et toutes ses calories se « dissipent dans la nature ». La température des eaux usées varie entre 10 et 20 °C toute l'année, ce qui constitue une source d'énergie durable utilisable.

En hiver, elles sont plus chaudes que l'air ambiant et de la chaleur peut être récupérée. En été, c'est l'inverse qui se produit et les bâtiments peuvent être rafraîchis.

Encore au stade expérimental ou non, des technologies permettant de récupérer la chaleur des eaux usées existent sous forme de label si on peut le dire ainsi. Il s'agit notamment des technologies :

- Degrés Bleus et STEP Stream proposées par la Lyonnaise des Eaux ;
- Energy Recycling System (ERS) proposée par Biofluides Environnement.

4.3.5.1. La Lyonnaise des Eaux

Degrés Bleus

La Lyonnaise des Eaux propose une solution baptisée « Degrés Bleus » qui permet de récupérer la chaleur des eaux usées pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments.

La gamme Degrés Bleus comprend deux produits :

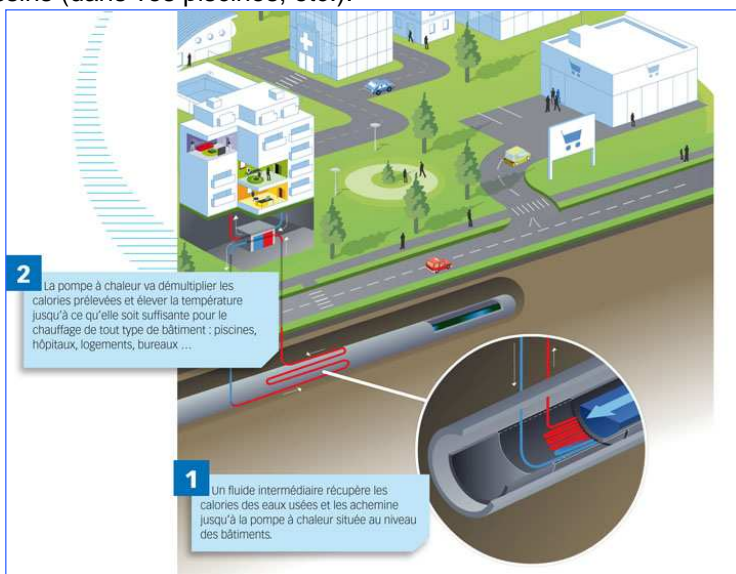
- Degrés Bleus® Chaleur & Rafraîchissement vous permet de réaliser des opérations avec pompe à chaleur à partir des réseaux d'assainissement pour chauffer et/ou rafraîchir vos bâtiments collectifs.
- Degrés Bleus® Eau Chaude permet de récupérer la chaleur des eaux usées pour préchauffer l'eau de vos douches et de vos bassins (dans vos piscines, etc.).

Degrés Bleus permet de diminuer durablement les dépenses énergétiques en valorisant les ressources locales d'énergie renouvelable, avec une seule installation pour le chauffage et le rafraîchissement.

Le système de récupération de chaleur des eaux usées permet de récupérer les calories dans les canalisations et de les transférer aux bâtiments via une pompe à chaleur.

Cette technologie associe un échangeur de chaleur avec une pompe à chaleur et permet de chauffer plusieurs milliers de mètres carrés.

Le système est réversible, il permet de rafraîchir les bâtiments (maisons de retraite, hôpitaux...) en été lorsque la température des eaux usées est inférieure à la température intérieure des bâtiments.

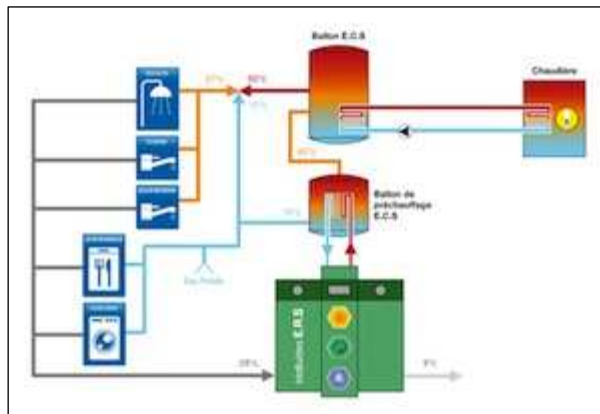


4.3.5.2. Biofluides Environnement

Créée en 2005, Biofluides Environnement compte 9 salariés. Son siège social se trouve à Courcouronnes dans le 91 et son chiffre d'affaires de 1,2 millions d'euros en 2008 est passé à 1,4 millions en 2009.

A l'instar de la technologie mise au point par Degrés Bleus, la PME française Biofluides Environnement a développé un nouveau système de récupération de la chaleur contenue dans les eaux usées. Très compact, celui-ci s'intègre directement dans les bâtiments résidentiels et industriels, dans le prolongement de l'écoulement des eaux usées.

La technologie proposée par Biofluides Environnement, l'Energy Recycling System (ERS), fonctionne selon le même principe, mais contrairement à Degrés Bleus, l'ERS ne va pas chercher les calories dans les égouts publics, mais directement dans les bâtiments, en prolongement de l'écoulement des eaux usées. Et donc sans toucher aux canalisations souterraines. Il offre ainsi un plus grand potentiel d'application, aussi bien dans le bâtiment neuf qu'existant. Mais aussi dans l'industrie qui produit beaucoup de rejets d'eau chaude non valorisée.



Echangeur, PAC et ballon de préchauffage

Des fiches détaillées sur les technologies permettant de récupérer la chaleur des eaux usées sont données en annexe. On renvoie le lecteur aux fiches suivantes :

- Annexe11 : Fiche Degrés Bleus
- Annexe 12 : Fiche STEP Stream
- Annexe 13 : Fiche Biofluides environnement
- Annexe 14 : Fiche : la géothermie à partir des eaux usées

Nous avons vu qu'il existe actuellement trois principaux modes de traitements de déchets permettant de récupérer de l'énergie à savoir : incinération, méthanisation et biogaz de décharge.

Ces trois modes de traitements permettent une valorisation énergétique sous trois formes essentiellement à savoir : valorisation sous forme de chaleur, valorisation sous forme électrique et valorisation conjointe sous forme de chaleur et d'électricité. A ces modes peut être ajouté la valorisation sous forme de chaleur, électricité et froid.

Tous les modes de valorisation précités peuvent être associés un stockage spécifique à savoir stockage de chaleur, stockage d'électricité sous forme thermique et stockage hybride. Nous pouvons toutefois ajouter le stockage dynamique qui associe le stockage et le transport. Ne s'intéressant qu'au stockage de chaleur, le stockage d'électricité sous forme thermique sera omis. Toutefois, quelque soit le type de stockage, le but final recherché est le même. Il s'agit de pouvoir stocker le supplément d'énergie et de la restituer au moment opportun.

D'une manière générale, toute la chaleur produite en hiver est consommée. En été seul 25% de la chaleur produite est consommée. Durant la période inter saisonnière, 75% de cette énergie est consommée. En intersaison mais plus particulièrement en été, le stockage de la chaleur serait bénéfique pour plusieurs raisons.

En effet, le stockage d'énergie va permettre de gérer l'énergie de manière plus efficace mais aussi par exemple pour un logement de récupérer les apports gratuits d'énergie thermique de jour en rafraîchissant l'habitation et les réutiliser la nuit en la chauffant. Ceci est particulièrement le cas d'une habitation à faible inertie thermique (ex : maison en bois).

Dans le cas d'applications stationnaires, le stockage de l'énergie peut avoir les fonctions suivantes :

- Fourniture d'énergie : il compense alors une insuffisance due à un pic de la demande, ou un déphasage entre la production et la consommation d'énergie.
- Secours : il pallie à une déficience ou à un accident dans la fourniture d'énergie.
- Récupération : le système récupère et stocke un excédent de fourniture d'énergie.

Raisons pour lesquels au niveau d'un bâtiment/quartier par exemple, le stockage de l'énergie est intéressant :

- L'utilisation optimale des énergies renouvelables et intermittentes et la possibilité de mieux adapter la production de chaleur à la consommation
- La récupération de chaleur ou de froid
- L'utilisation d'un tarif préférentiel (principalement électrique) et donc la contribution au lissage des pics de consommation électrique
- La réduction de la puissance installée et l'écrêtage des pics de puissance
- La réduction du nombre d'enclenchements/déclenchements des systèmes et donc un accroissement de leur durée de vie.

Le stockage thermique pour le bâtiment peut se réaliser soit dans la structure pour profiter de l'inertie (approche « passive »), soit dans des volumes de stockage dédiés à cet effet (ballons, cuves,...) ou dans le sous-sol (sondes ou nappes aquifère).

Bien qu'étant difficile d'évaluer l'économie du stockage d'énergie, on peut toutefois dire qu'il induit un surcoût d'investissement non négligeable parfois mais qu'il engendre aussi des gains qui ne sont pas qu'économiques. Il permet d'améliorer le confort thermique, les performances du système, la durée de vie

du procédé et contribue à la diminution des émissions de CO2 et donc de l'effet de serre ; il rentre dans une approche globale du respect de l'environnement,...

Le stockage de l'énergie ne présente bien sûr qu'un intérêt que si un besoin d'énergie déphasé dans le temps se manifeste à proximité.

Le stockage d'énergie est donc associé à une ressource excédentaire (eau chaude sanitaire en été, chaleur fatale,...) et une demande d'énergie déphasée dans le temps (besoin de chauffage pour chauffer les bâtiments en hiver...).

Il existe de nombreux exemples. On peut citer par exemple :

- Le stockage d'énergie thermique par changement de phase utilisée par l'usine IBM Bromont au Canada
- Le stockage d'eau chaude pour réguler le fonctionnement des pompes à chaleur
- Le stockage de froid pour la climatisation tertiaire

Des fiches présentant de manière synthétique tous ces exemples seront données en annexe. Il s'agit en particulier de fiches « projet PREMIO ».

L'objectif principal du projet PREMIO (Production Répartie, Energies Renouvelables et Maîtrise de la Demande en Electricité, Intégrées et Optimisées) est d'expérimenter l'association des acteurs locaux (« petits » producteurs d'électricité et consommateurs) dans une plate-forme dédiée à la flexibilité du système électrique. PREMIO va donc piloter les équipements électriques qui lui sont reliés (production, stockage ou bien usages) pour une utilisation optimale de toutes les ressources locales disponibles.

La MDE (Maîtrise de la Demande d'Energie) et les énergies renouvelables sont les deux autres composantes du projet. La première consiste à améliorer l'efficacité énergétique, les secondes à produire autrement.

En pilotant l'offre et la demande locale en électricité, la plate-forme rend le système électrique plus flexible. Elle permet de consommer moins et/ou mieux, et donc de diminuer la facture énergétique (locale et/ou globale) et les émissions de CO.

En intégrant la production locale d'énergies renouvelables, la plate-forme permet non seulement d'accroître les gains en émission de CO, mais aussi de diminuer la charge sur les réseaux de transport d'électricité.

Les dimensions MDE et EnR du projet se retrouvent en particulier dans le choix des équipements testés sur PREMIO. Certains font appel au « consommer moins », d'autres au « produire autrement » (voir article "Quelques expérimentations portées par la commune de Lambesc et de Gardanne sur leur propre patrimoine et chez les habitants administrés"). Tous participent à la flexibilité du système puisqu'ils sont pilotables à distance.

Des fiches détaillées présentant des exemples de stockage de chaleur et/ou froid sont données en annexe. On renvoie le lecteur aux fiches suivantes :

- Annexe 15 : Fiche PREMIO : Stockage du biogaz
- Annexe 16 : Fiche PREMIO : CRISTOPIA : Stockage de froid pour la climatisation tertiaire
- Annexe 17 : Fiche PREMIO : EDF : Stockage PAC
- Annexe 18 : Fiche PREMIO : SAED
- Annexe 19 : Fiche : Usine IBM Bromont au Canada : stockage d'énergie thermique à changement de phase

4.5. BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 4

Amorce - « Valorisation de l'énergie Issue des usines D'incinération d'ordures ménagères » - Série Technique DT 05 / Janvier 2008

Amorce - « Étude sur la place de l'incinération avec valorisation énergétique des déchets municipaux en Europe »

Baromètre européen des déchets municipaux renouvelables – Bilan 2009 Euroserv'ER

ADEME - « Toutes les ITOM (Toutes les Installations de Traitement des Ordures Ménagères (sans les stations de transfert)) » <http://www.sinoe.org>

SVDU/Localconsult - « ENQUÊTE SUR L'ÉNERGIE DES DÉCHETS, MÉNAGERS EN France »

Ademe - « Second état d'avancement de la mise en conformité des usines d'incinérations d'ordures ménagères (UVE) »

Ademe - « Les installations de traitement des ordures ménagères »

Amorce - « Méthanisation des déchets ménagers. Etat des lieux-Janvier 2010 »

Ademe - « EVALUATION DU PROGRAMME R&D ADEME 2000 – 2007 SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE DECHETS NON DANGEREUX (ISDND) »

CENTRALE DE VALORISATION DU BIOGAZ DE Gastec à Vémars (Val d'Oise – France) / DE CREPY / DE TETING SUR NIED / DE HANCHES / DE HERSIN COUPIGNY / DE SONZAY <http://www.fairtec.fr/>

Le baromètre du biogaz en 2006 / Le baromètre du biogaz en 2007

Ademe La méthanisation en France, potentiel de développement et l'évolution du cadre réglementaire français

ETUDE DE MARCHE DE LA METHANISATION ET DES VALORISATIONS DU BIOGAZ RAPPORT FINAL Ernst et Young co-financé par l'ADEME

Amorce - « La cogénération dans les réseaux de chaleur (Synthèse) »

Méziane Boudellal « La cogénération : efficacité énergétique / micro-cogénération » DUNOD / Février 2010
Collection technique et ingénierie

Solid sorption coolers for tri-generation

Fiche PREMIO Cristopia Stockage de froid / Fiche_ PREMIO_stockage_biogaz/ Fiche_PREMIO_EDF_-_stockage_PAC / Fiche_PREMIO_SAED_V3_2

AMORCE - « Note sur les conditions de vente de la chaleur d'usines d'incinération vers les réseaux de chaleur » - Série Technique RCT 22 / Avril 2008

AMORCE - « Enquête CIBE sur les réseaux de chaleur au bois » - Série Technique RCT 32 / Avril 2010

AMORCE - « Le prix de vente de la chaleur en 2008 » - Série Economie et Fiscalité RCE 09 / Mars 2010

AMORCE - « Note sur les réseaux de froid et la production de froid à partir de réseaux de chaleur » - Série Technique RCT 26 / Avril 2008

AMORCE - « Le prix de vente de la chaleur en 2009 » - Série Economie et Fiscalité RCE 10 / Décembre 2010

5. CONFRONTATION/APPLICABILITÉ DES SOLUTIONS DE STOCKAGE/TRANSPORT SELON LES PRINCIPES NON CONVENTIONNELS AU DOMAINE DU DÉCHET - CHAPITRE 5

Nous avons vu au chapitre 2 qu'il existe 3 modes de stockage d'énergie thermique à savoir le stockage par chaleur latente, le stockage par chaleur sensible et le stockage thermochimique/sorption ainsi que des procédés de stockage de froid. A tous ces modes de stockage d'énergie calorifique peut être associé un ou plusieurs modes de transport d'énergie calorifique. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, il existe plusieurs modes de transport d'énergie calorifique pouvant être distingués par processus à savoir : les réactions catalytiques réversibles, les systèmes à sorption, les systèmes conteneurs et les systèmes classiques dit conventionnels.

En se basant sur les caractéristiques d'utilisation d'énergie calorifique repris au chapitre 6 section 6.1 « Synthèse sur les utilisateurs d'énergie calorifique » ainsi que sur les études de cas, nous vous présenterons les techniques de stockage/transport d'énergie calorifique réellement applicables au domaine du déchet. Pour cela, il sera présenté sous forme de tableau bien distinct les modes de transport/stockage d'énergie calorifique pouvant être utilisés dans le secteur habitat, le secteur IAA ainsi que le secteur des industries à haute température.

5.1. TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR HABITAT/ TERTIAIRE

5.1.1. Technologies de stockage applicables au secteur habitat/tertiaire

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	Niveau de développement	Modes de transport associé
Habitat/ Tertiaire 90°C	Réservoir d'eau (WTES)	T<100°C	1,16	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Réservoir d'huile thermique	50°C<T<400° C	0,55	mure mais peu utilisé	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Aquifer TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	1,16	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Cavern TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	1,16	mure mais peu utilisé	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Borehole TES	T<100°C	De 0,3 à 1 (suivant le type sol voir tableau matériau solide)	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	lit à garnissage solide (fluide de transfert eau ou huile)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de garnissage)	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	mure	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	lit à garnissage avec MCP paraffine	T<100°C	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	lit à garnissage avec autres MCP (hydrates de sels, eutectiques)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de MCP)	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique

	Stockage avec Matrice graphite/paraffine	T<100°C	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	Prototype (DLR)-matériaux commercialisés	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Stockage avec MCP à transition solide/solide	40°C<T<180°C	De 37 à 107 (DT de changement d'état)	Prototype-matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	CaCl ₂ +H ₂ O	60 à 80°C	jusqu' plusieurs milliers KWh/m ³ suivant les réactions voir onglet propriétés d'e stockage thermochimique	Prototype de recherche	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	CaSO ₄ +H ₂ O	100°C	jusqu' plusieurs milliers KWh/m ³ suivant les réactions voir onglet propriétés d'e stockage thermochimique	Prototype de recherche	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad), containers MCP, réaction chimique
	Zéolite/H ₂ O Zéolite silicate d'alumine (physisorption)	<100°C	De 124 kWh/m ³ en mode chauffage à 100 kWh/m ³ en mode rafraichissement relevés avec une zéolite 13X (température de stockage<100°C)	prototype de recherche seulement (Nombreuses études réalisées avec différents structures de zéolites)	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP

(Source : GRETH/Cadet International)

Dans le secteur habitat/tertiaire, on souhaite stocker l'énergie entre 90 et 130°C sur le site utilisateur. Les technologies de stockage ainsi retenues répondent toutes à cette gamme de température. Ces technologies sont pour la plus part du stockage par chaleur latente ou par chaleur sensible. Le stockage thermochimique est tout aussi envisageable mais on réserve ces technologies pour les applications industrielles, les technologies par chaleur latente et sensible ayant été déjà expérimentée dans le bâtiment. Certaines technologies étant mûres et très utilisées.

5.1.2. Technologies de transport applicables au secteur habitat/tertiaire

			Technique	Température de la source: stockage (°C)	Température d'utilisation de la chaleur (°C)	Distance	Moyen de transport
Habitat/Tertiaire	Transport classique	Transport froid	(eau glacée)	1-5	12 - 14	plusieurs km	Canalisation
	Systèmes à sorption	Alliage absorbant d'hydrogène	Alliage absorbant d'hydrogène	50-90	20-50	-	-
	Systèmes à sorption	Adsorption solide-gaz	Alliage absorbant d'hydrogène	60-300	-	-	-
	Transport par conteneurs	MCP	MCP (Acetate de Sodium)	70 - 200	40-95	20 km	Camion
	Transport par conteneurs	MCP	MCP (Erythritol)	80 - 140	-	30 km	Pipeline
	Systèmes à sorption	Absorption liquide-gaz	LiBr/H2O ou NH3/H2O	90-160	-7 à -12	-	-
	Systèmes à sorption	Alliage absorbant d'hydrogène	Hydrures/H2	90	90	-	-
	MCP batch	MCP + Sensible	Sensible	100-500	100-180	-	Camion
	Batch	Chemical	Chemical	100-450	50-200	10 km	Camion
	Transport classique	Transport chaud	(eau chaude, vapeur)	105-350	-	plusieurs km	Canalisation

(Source : GRETh/Cadet International)

Dans le secteur habitat/tertiaire, on souhaite stocker l'énergie entre 90 et 130°C sur le site utilisateur. En estimant les pertes liées au transport à 20%, les technologies de transport sélectionnées doivent répondre au minima à la gamme de température 110 - 160°C. Ce qui est le cas pour les technologies retenues dans ce secteur. Les technologies de transport qui semblent les plus intéressantes sont celles utilisant des camions à savoir MCP essentiellement du point de vue des caractéristiques et de la distance de transport qui est supérieure à 20 km. Des études au stade industriel ont déjà été menées et les résultats étaient concluants notamment au Japon.

5.2. TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR INDUSTRIE BASSE TEMPERATURE : BLANCHISSERIE

5.2.1. Technologies de stockage applicables au secteur blanchisserie

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	Niveau de développement	Modes de transport associé
IAA, Blanchisserie 200°C	Réservoir d'eau sous Pression	<250°C	1,16	mure	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Réservoir d'huile thermique	<400°C	0,55	mure mais peu utilisé	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	lit à garnissage solide (fluide transfert: huile)	50°C<T< 400°C	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	mure	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Réservoirs à Sels fondus	150°C<T<400°C	Environ 0,7(suivant le type de sels)	Mure	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage en Béton Haute température	100°C<T<400°C	0,7	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage en céramique	100°C<T<400°C	0,84	Prototype (DLR)	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP

	lit à garnissage avec MCP HT (eutectiques, sels)	110°C < T < 400°C	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage avec matrice graphite/sels	110°C < T < 400°C	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	Prototype (DLR)	réaction catalytique réversibles, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	adsorption avec des zéolites (prototype du ZAE Bayern)	150°C à 180°C (prototype du ZAE Bayern)	-	prototype de recherche seulement	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	réaction endo/exo thermique	1000°C > T > 200°C	Plusieurs milliers de kWh/m ³ suivant la réaction (MgO+H ₂ O T>200°C)	Prototype de recherche	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP

(Source : GRETh/Cadet International)

Dans le secteur blanchisserie, on souhaite stocker l'énergie entre 190 et 250°C sur le site utilisateur. Les technologies de stockage ainsi retenues répondent toutes à cette gamme de température. Ces technologies sont pour la plus part du stockage par chaleur latente ou par chaleur sensible. Le stockage thermo-chimique est tout aussi envisageable.

5.2.2. Technologies de transport applicables au secteur blanchisserie

			Technique	Température de la source: stockage (°C)	Température d'utilisation de la chaleur (°C)	Distance	Moyen de transport
Blanchisserie	Systèmes à sorption	Adsorption solide-gaz	Alliage absorbant d'hydrogène	60-300	-	-	-
	Transport par conteneurs	MCP	MCP (Acétate de Sodium)	70-200	40-95	20 km	Camion
	Autres	Sensible	Sensible	100-500	100-180	-	Camion
	Autres	Chemical	Chemical	100-450	50-200	10 km	Camion
	Transport classique	Transport combustible classique	(eau chaude, vapeur)	105-350	-	plusieurs km	Canalisation
	Réactions catalytiques réversibles	Synthèse et décomposition du méthanol	Déchets	150-200	350	-	-
	Réactions catalytiques réversibles	Synthèse et décomposition du méthanol	Isopropanol	<200	150	-	-

(Source : GRETh/Cadet International)

Dans le secteur blanchisserie, on souhaite stocker l'énergie entre 190 et 250°C sur le site source. En estimant les pertes liées au transport à 20%, les technologies de transport sélectionnées doivent répondre au minima à la gamme de température 230 - 300°C. Ce qui est le cas pour les technologies retenues dans ce secteur. Les technologies de transport pour ce secteur sont très diverses. Les réactions chimiques réversibles et les MCP semblent les plus intéressantes compte tenu de leurs caractéristiques physiques.

5.3. TECHNOLOGIES DE STOCKAGE ET TRANSPORT APPLICABLES AU SECTEUR INDUSTRIE HAUTE TEMPERATURE : SIDERURGIE

5.3.1. Technologies de stockage applicables à la sidérurgie

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	Niveau de développement	Modes de transport associé
Sidérurgie 350°C	Réservoir d'huile thermique	<400°C	0,55	mure mais peu utilisé	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	lit à garnissage solide HT	50°C<T< 400°C	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	mure	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Réservoirs à Sels fondus	150°C<T<400°C	Environ 0,7(suivant le type de sels)	Mure	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage en Béton Haute température	100°C<T<400°C	0,7	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage en céramique	100°C<T<400°C	0,84	Prototype (DLR)	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Stockage en réservoir avec MCP HT (eutectiques, sels)	110°C<T<400°C	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Reflux Heat Transfert Storage (avec alliage Zn70Sn30 (MCP))	270°C<T<400°C	176 (DT de changement d'état)	prototype de recherche	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
	Cascad LHTS	300°C<T<400°C	-	Prototype de recherche	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP

	réaction endo/exo thermique	1000°C >T>200°C	Plusieurs milliers de kWh/m ³ suivant la réaction (MgO+H ₂ O T>200°C)	Prototype de recherche	réaction catalytique réversibles (reformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, Chemical, containers MCP
--	-----------------------------	--------------------	---	------------------------	--

(Source : GRETh/Cadet International)

Dans le secteur sidérurgie, on souhaite stocker l'énergie entre 350 et 400°C sur le site de production . Les technologies de stockage ainsi retenues répondent toutes à cette gamme de température. Ces technologies sont pour la plupart du stockage par chaleur latente ou par chaleur sensible. Le stockage thermochimique est tout aussi envisageable.

5.3.2. Technologies de transport applicables à la sidérurgie

			Technique	Température de la source: stockage (°C)	Température d'utilisation de la chaleur (°C)	Distance	Moyen de transport
Sidérurgie	Réactions catalytiques réversibles	Reformage du méthane	MgO/H ₂ O	300-400	-	-	-
	Systèmes à sorption	Adsorption solide-gaz	Alliage absorbant d'hydrogène	60-300	-	-	-
	Autres	Sensible	Sensible	100-500	100-180	-	Camion
	Autres	Chemical	Chemical	100-450	50-200	10 km	Camion
	Transport classique	Transport combustible classique	(eau chaude, vapeur)	105-350	-	plusieurs km	Canalisation

(Source : GRETh/Cadet International)

Dans le secteur sidérurgie, on souhaite stocker l'énergie entre 350 et 400°C sur le site de production . En estimant les pertes liées au transport à 20%, les technologies de transport sélectionnées doivent répondre au minima à la gamme de température 420 - 480°C. La température maximale de stockage de chaleur est de 450°C. Les technologies de transport pour ce secteur sont très diverses mais les réactions chimiques réversibles, les MCP semblent les plus intéressantes compte tenu de leurs caractéristiques physiques mais les systèmes thermochimiques répondent mieux aux attentes.

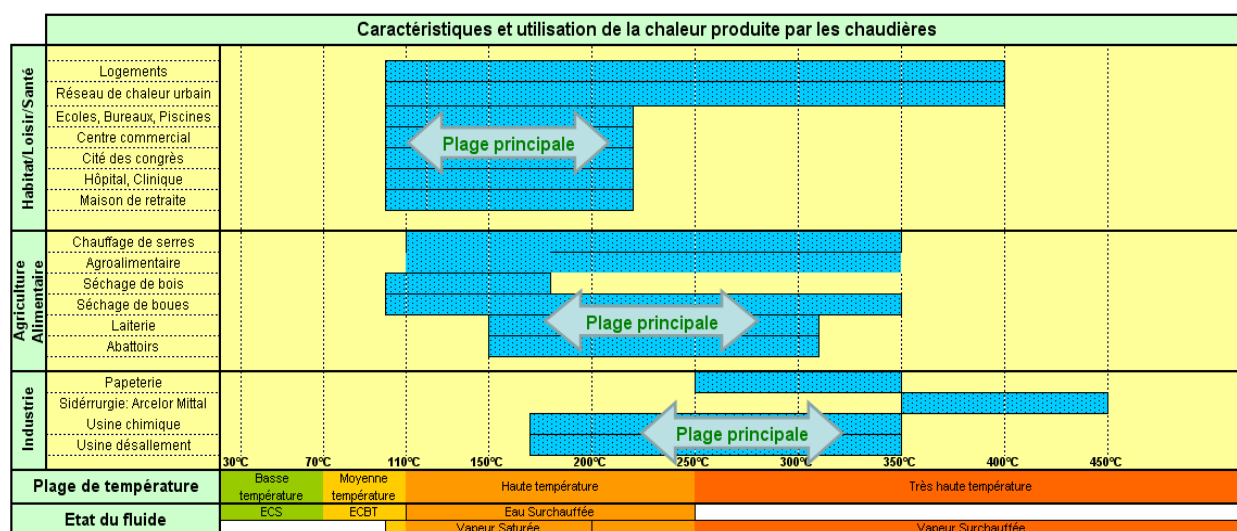
6. ÉTUDES DE CAS - CHAPITRE 6

6.1. SYNTHÈSE SUR LES UTILISATEURS D'ÉNERGIE CALORIFIQUE

Dans le cadre de notre étude, les utilisateurs d'énergie calorifique recensés sont représentés dans le tableau ci-après. On les a classés en 3 secteurs à savoir :

- Secteur 1 : Habitat/Loisir/Santé
- Secteur 2 : Blanchisserie
- Secteur 3 : Sidérurgie

À ces utilisateurs, nous avons fait correspondre les plages de température et les caractéristiques de la chaleur.



(Source : Cadet International)

Dans les conditions actuelles de l'évolution de l'habitat et de l'industrie en France, il est plus intéressant d'étudier les cas suivants :

- habitat - 90°C (chaud) avec la problématique de la saisonnalité et des appels de puissance journalier irréguliers
- industrie - 200°C (blanchisserie) avec la problématique des différences d'appels de puissance jour/nuit/weekend mais réguliers.
- industrie - 350°C (sidérurgie)

Nous avons vu que les utilisateurs d'énergie calorifique peuvent être classés en 3 secteurs divisés en plusieurs sous-catégories. Étant donné la diversité des études de cas qui peuvent en découler nous vous présenterons une méthodologie pour les études de cas. Ce sous-chapitre ne sera pas toutefois exhaustif car la méthodologie complète sera présentée en annexe sous forme de rapport technique.

La méthode choisie se divise en 2 phases et se veut d'intégrer les considérations technico-économiques.

6.2.1. Phase 1 : préliminaires et étude de faisabilité technique

La phase 1 comprend deux points essentiellement importants à savoir une partie préliminaire et une étude de faisabilité.

Dans un premier temps les éléments de contexte de l'étude de cas seront rappelés. En effet, une description du cas à étudier sera faite d'une part en intégrant les points suivants :

- les paramètres architecturaux
- les besoins/caractéristiques énergétiques de l'utilisateur (nature de la demande, température de l'usage, pic de puissance, localisation géographique, ...)
- les caractéristiques de la source de chaleur (nature du fluide, température de la source, pic de puissance, localisation géographique,...)

Ainsi qu'une évaluation de la pertinence énergétique du système étudié. Cette évaluation concernera essentiellement la ressource thermique, l'usage thermique ainsi que le système de stockage/transport d'énergie calorifique choisi :

- stockage à proximité de l'usine assurant la génération de la source de chaleur (capacité de stockage, temps de stockage,...)
- stockage à proximité de l'usager (capacité de stockage, temps de stockage,...)
- transport d'énergie calorifique (transport batch, thermochimique, sorption,...)

A la fin de l'étude préliminaire, une fiche de synthèse de l'étude de cas sera établie. Sur cette fiche apparaîtra les principales données sur la ressource énergétique et l'usage ainsi que les paramètres d'évaluation du système. Cette phase permettra en outre d'établir des indicateurs de performance énergétique (émissions de CO₂ du système, niveau de criticité de la phase de transport d'énergie calorifique).

En parallèle, les matériaux potentiels du stockage et des technologies seront identifiés. Une comparaison des performances énergétiques du dispositif de stockage/source thermique avec un dispositif de référence (chaudière gaz par exemple) permettra de juger la pertinence du système innovant (stockage/source thermique).

A la fin de cette phase, une fiche de sélection des matériaux sera fournie et une réponse à la question de savoir s'il est pertinent de poursuivre l'étude de faisabilité technico-économique ou non sera apportée.

6.2.2. Phase 2 : phase finale

Comme son nom l'indique, cette phase clôturera l'étude de cas sur :

- l'acceptabilité environnementale (contraintes environnementales et de sécurité,...)
- la faisabilité économique.

Après l'analyse des critères environnementaux et de sécurité, il peut apparaître qu'aucun matériau disponible ne réponde à ces contraintes. Il sera donc constaté l'échec du cas étudié.

A la fin de cette phase, une fiche de sélection des critères environnementaux sera établie. Elle regroupera :

CRITERES ENVIRONNEMENTAUX ET NORMES		
CRITERES	TYPE	CAS DE L'ETUDE
CRITERE 1	TOXICITE	OUI/NON
CRITERE 2	INFLAMMABILITE & EXPLOSIVITE	LII et LSI LIE et LES Point éclair, d'auto-inflammation...etc.
CRITERE 3	IMPACT ENVIRONNEMENTAL	ODP= ? GDP= ?
CRITERE 4	RECYCLABILITE	Taux de recyclabilité [%]
CRITERE 5	Réglementation GES (Gaz à Effet de Serre)	Protocole de Kyoto (Quota de CO₂)
CRITERE 6	Réglementation ICPE (Installation Classé pour la Protection de l'Environnement)	Classe A, Classe D, Seveso...
CRITERE 7	Directive DESP (Directive Equipements Sous Pression)	Si Pmax admissible > 0.5 bar
CRITERE 8	Directive REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances)	OUI/NON

(Source : GRETh)

Les normes et les contraintes à respecter sont différentes par rapport à l'usage.

6.3. CAS 0 : STOCKAGE SAISONNIER

Dans ce sous-chapitre, nous étudions la faisabilité et l'applicabilité du stockage saisonnier pour la production d'une UVE.

Lors de cette étude pour RECORD, il a été question d'étudier la faisabilité et l'applicabilité d'un stockage saisonnier pour la production d'une Usine d'Incinération d'Ordures ménagères (UIOM). Suite à des analyses de fonctionnement de ses UIOM, nous remarquons que les installations sont surdimensionnées (surproduction par rapport à la demande en chaleur) à 75% du temps. En effet, les UIOM fonctionnant généralement en continue et les besoins étant eux intermittents, cela conduit à un surdimensionnement par rapport aux besoins sur les ¾ de l'année. Voici ci-dessous un exemple (Cadet/GRETh):

Saison de l'année	Puissance de l'UIOM	Besoin (MW)	% de Puissance de l'UIOM
HIVER	60MW	60	100
INTERSAISON		45	75
ETE		15	25

La période hivernale est de décembre à février. La période d'intersaison comprend les mois de Mars, Avril, Octobre et Novembre. La période estivale est donc de Mai à septembre.

Source Cadet/GRETh

On voit donc bien que l'UIOM devra fonctionner en sous régime, et donc de ce fait ces rendements d'installation seront diminués (bien que le nombre de fours en fonctionnement soient abaissés durant les périodes de basses consommations afin de plutôt faire fonctionner un seul four à fort rendement plutôt que 3 fours avec de faible rendement). On comprend donc bien que pendant 75% de l'année, les UIOM ont un nombre de fours surdimensionné par rapport à la demande en chaleur (et non pas pour la demande en incinération de déchets qui est quasiment constante durant l'année). De ce fait, les questions suivantes nous ont été posées :

-Est-il possible de réguler ce surdimensionnement à partir d'un stockage de l'énergie calorifique en période de surproduction et de l'utiliser en période de forte consommation (réalisation d'un stockage saisonnier) ?

-Dans ce cas, serait-il possible de réduire la puissance de ces UIOM et de la compléter en hiver à partir du stockage saisonnier ?

Pour répondre à ces questions, voici ci-dessous un tableau récapitulatif des quantités stockables d'énergie :

Saison de l'année	Puissance nécessaire	Nbre de jour	Energie stockable (MWh)
HIVER	60MW	90	0
INTERSAISON	45MW	122	43 920
ETE	15MW	153	165 240

Source Cadet/GRETh

Les quantités stockables d'énergie se calculent de la manière suivante : $E = P \times t$

Avec P = Puissance en surplus en MW

t = temps en heure

Donc pour l'intersaison : $t = 122 \times 24 = 2928$ h ; $P = (60-45) = 15$ MW donc $E = 43920$ MWh

Pour l'été : $t = 153 \times 24 = 3672$ h ; $P = (60-15) = 45$ MW donc $E = 165\,240$ MW

La quantité d'énergie totale à stocker serait donc de 209 160 MWh (209,16 GWh) pendant un temps de 275 jours. Néanmoins, il faut prendre en compte une valorisation de ce stockage afin d'en tirer une utilité. Pour cela, il faut donc revoir les puissances des fours et permettre grâce à ce stockage de baisser la puissance nécessaire et de couvrir les besoins supplémentaires par le stockage (induit par la baisse de puissance des fours). On peut penser utiliser une partie du stockage réalisé l'été pendant les périodes d'intersaison et d'hiver. Ainsi, si l'on abaisse la puissance à 40 MW on obtient les résultats suivants :

Saison de l'année	Puissance nécessaire	Puissance disponible	Nbre de jour	Energie stockable (+) ou à fournir par le stockage (-) (MWh)
HIVER	60MW	40 MW	90	- 43200
INTERSAISON	45MW	40 MW	122	- 14640
ETE	15MW	40 MW	153	+ 91800

On pourrait ainsi stocker 91800 MWh l'été et les utiliser en période d'intersaison pour fournir les 14 640 MWh manquant pour l'intersaison et une partie des 43200 MWh pendant le début de l'hiver.

De ce calcul, on peut donc se rendre compte de l'énorme quantité d'énergie à stocker et donc des volumes que cela peut engendrer. De plus, les températures fournies par l'UIOM sont à un niveau élevé :

Saison de l'année	Puissance	Température (°C)	
		Aller	Retour
HIVER	60MW	180	110
INTERSAISON	45MW	165	110
ETE	15MW	130	110

Source Cadet/GRETh

Ces niveaux de température correspondent par exemple au réseau de chauffage urbain de Grenoble

On peut voir que la température minimale de retour est de 110°C et qu'il faudrait respecter cette contrainte de température de retour du stockage afin de ne pas devoir rehausser le niveau de température en entrée de l'UIOM, et donc engendrer un coût supplémentaire.

Seul un stockage thermochimique ou latent pourrait répondre à ce critère et permettrait de stocker une grande quantité d'énergie avec un faible différentiel de température.

Les niveaux de température très hauts (180°C) et le temps de stockage induiraient de très fortes déperditions même avec une très bonne isolation du réservoir de stockage. Ici, les niveaux d'énergie à stocker sont gigantesques, nous donnons pour mémoire que les plus gros réservoirs de stockage (bassin d'eau ou réservoir à sels fondus) en service sont de l'ordre de la centaine de MWh (Facteur 100 à 1000 par rapport au niveau de stockage d'énergie de l'étude). Les plus gros bassins d'eau de stockages réalisés (Allemagne 63000 m³) permettent un stockage saisonnier de l'énergie mais à de bas niveau de température, et les plus gros réservoirs à sels fondus, qui sont installés sur les centrales à concentration solaire, et qui ont donc des niveaux de température élevés ($T_{\text{stock}} > 150^{\circ}\text{C}$) ne permettent qu'un stockage horaire à journalier de l'énergie (Andasol 1010MWh). De même, les projets de recherche en cours (notamment ceux du DLR) sont des stockages horaires et les pilotes industrielles réalisés sont de l'ordre du MWh. La réalisation d'un tel stockage demanderait donc d'énormes moyens de réalisation, liés à la taille du stockage et à la surface de l'échangeur à mettre en jeu.

Sachant que l'UIOM ne permet pas de stocker de l'énergie calorifique pendant la période hivernale (décembre, janvier et février), il est logique qu'aucune valorisation de stock ne soit possible pour les mois d'intersaison de mars et avril (puisque aucun stockage n'est possible au préalable). Seul un stockage durant la période d'été en vue d'une réutilisation pour les mois suivants serait possible.

On peut aussi faire un calcul afin d'évaluer le volume et la taille de stockage que ce système pourrait engendrer:

$$\text{Energie à stockée} = 91\,800 \text{ MWh} = 3.3048 \times 10^{14} \text{ Joules}$$

Avec $C_{\text{peau}} = 4180 \text{ J/kg.K}$
 $DT \text{ de stockage} = 70\text{K} = (180-110)$

Il faudrait donc, avec de l'eau comme liquide de stockage, avoir un volume de :

$$E = m \cdot C_p \cdot DT \Leftrightarrow m = E / (C_p \cdot DT) = 1129,5 \times 10^6 \text{ kg}$$

Soit l'équivalent d'un volume de 1,13 Millions de mètres cube (avec une masse volumique de 1000 kg/m³).

Si l'on prend un ratio hauteur/diamètre = 1, alors on devrait avoir l'équivalent d'un cylindre d'un diamètre et d'une hauteur de 112.9m.

Même si l'on sait que les pertes d'un stockage d'une telle envergure seraient faibles par rapport à la quantité d'énergie stockée, on se doute bien qu'un tel stockage est irréalisable et nécessiterait une grande quantité d'isolation. Sans compter que pour de tels niveaux de température il faudrait maintenir cette enceinte de stockage sous une pression de l'ordre de 10 bars, et il serait donc nécessaire de mettre en œuvre une très grande épaisseur et donc un coût de matériaux énorme (béton haute densité). L'installation ne serait donc jamais rentabilisée et donc non envisageable.

Le cas d'exemple présenté dans ce chapitre est une installation importante de production d'énergie (réseau urbain d'une ville). Nous pouvons imaginer **des installations de stockage saisonnier d'énergie thermique à l'échelle d'un quartier ou d'un immeuble**, ce qui réduit la taille de l'installation de stockage à des caractéristiques connues dans d'autres pays (Allemagne, ...) **avec des efficacités acceptables** (voir cahier 1 en annexe).

Réflexion sur une valorisation envisageable :

Une solution qui peut-être envisageable est l'utilisation de la chaleur excédentaire d'été afin de produire du froid (qui est en forte demande lors des périodes estivales), via des systèmes à absorption et un réseau d'eau glacée (ou RFU = Réseau de Froid Urbain). C'est le cas de la ville de Paris (production d'eau glacée via des groupes froid à compression).

Néanmoins, la construction d'un RFU nécessite une étude et des travaux très importants. En effet, dans un RFU, la distribution assure la liaison entre la production et les utilisateurs. Cette partie du système fait l'objet d'études attentives dès la conception du RFU (mais aussi tout au long de sa vie, chaque fois qu'un nouvel événement se présente comme par exemple le raccordement éventuel d'un nouveau client) pour l'adapter à un nouveau profil de charge. C'est un élément de coût du RFU très important dès l'investissement et tout au long de son exploitation. En effet, la mise en place d'un RFU est très onéreuse et perturbatrice (la plupart du temps en sous-terrain et en milieu urbain) et nécessite des travaux considérables pour atteindre des utilisateurs souvent éloignés de la zone de production.

Le tracé et le dimensionnement des canalisations impliquent aussi une vision de la charge sur l'avenir nécessitant un plan de développement difficile à établir compte tenu des multiples paramètres qui interviennent (les travaux conduisent à poser des canalisations qui ne seront pas immédiatement rentabilisées car elles traversent souvent des voies importantes de circulation).

À partir des paramètres fixés par le cahier des charges des clients et du régime des températures déterminé en production, l'optimisation du réseau intègre la réduction des diamètres des canalisations, donc des débits, mais aussi la réduction des pertes de charge et des gains thermiques qui contribuent à réchauffer le fluide frigopporteur sur son parcours. Ces aspects ont un impact bien plus important pour les RFU que pour les réseaux de chauffages urbains (RCU) car l'écart maximal possible de température entre départ et retour est de l'ordre de 12 à 15 K, ce qui conduit à des canalisations de dimensions très importantes, alors qu'en RCU, les écarts vont jusqu'à 50, voire 80 K, ce qui permet de réduire significativement la taille des canalisations et donc le coût des réseaux.

Les technologies actuelles offrent un choix important de solutions pour la construction des réseaux, allant des classiques tuyauteries en acier en caniveau aux tubes en époxyde armé de fibres de verre en pose enterrée, sans isolation sur le retour.

Le coût du pompage est une des dépenses importantes du bilan d'exploitation qu'il faut maîtriser au mieux, en adaptant le débit à la demande, en réduisant les pertes de charge et en maintenant un écart de température aussi élevé que possible entre départ et retour, pour que chaque mètre cube distribué transporte le maximum d'énergie (notion de COP de transport = ratio entre l'énergie distribuée et l'énergie dépensée pour le pompage). Cela explique les recherches en cours pour mettre au point des additifs et des « fluides intelligents » permettant de réduire les pertes de charge sans réduire les échanges thermiques et la capacité calorifique. (cf. **cahier n°6 : les milieux diphasiques solide-liquide pour le stockage et le transport de chaleur**).

De plus, les frais d'exploitations du réseau comprennent le traitement d'eau, la recherche des fuites, la surveillance de l'isolation thermique, de la corrosion et de la robinetterie, ce qui en fait aussi un poste important du budget d'exploitation.

Une autre voie de valorisation similaire serait la généralisation d'installation de groupe à sorption sur les zones d'usages. Ainsi, un RCU pourrait alors directement alimenter ses groupes à absorption qui produirait du froid directement sur la zone d'usage.

6.4.1. Éléments de contexte

Une unité de valorisation énergétique produit de l'énergie calorifique en continue sur toute l'année. Il est plus judicieux pour les études de cas de remonter à la chaîne de production en commençant par les besoins de l'utilisateur. Le cas d'étude qui sera traité ici c'est celui de l'habitat. Ainsi les besoins qui nous intéressent dans ce cas d'étude sont :

- Production de chaud : chauffage de locaux, eau chaude
- Production de froid : ventilation, climatisation

Compte tenu des besoins répertoriés, ce cas d'étude sera traité en deux volets ; un pour répondre aux besoins en chaleur et un pour les besoins de froid.

Dans l'habitat, il est nécessaire d'étudier les cas de distribution de chaud et de froid.

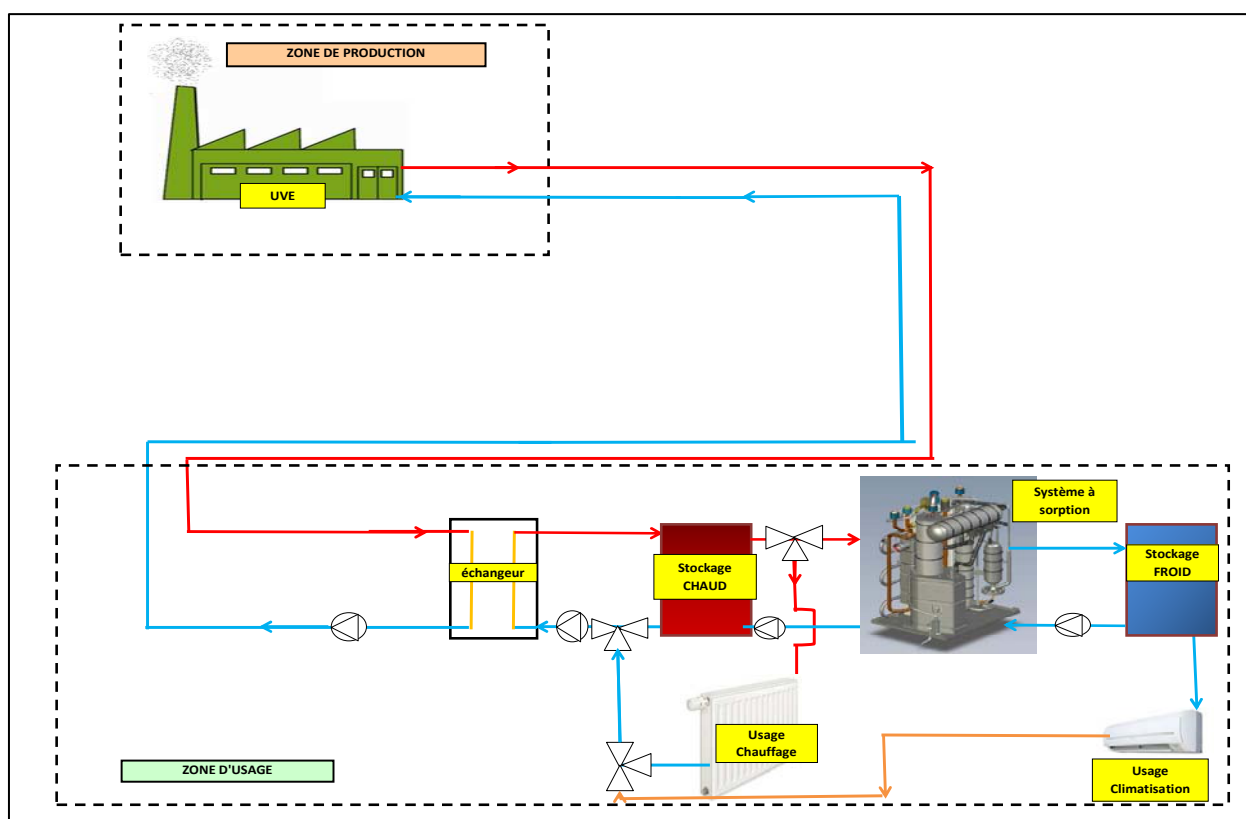
Pour l'étude de cas habitat, nous avons sélectionné 3 villes à savoir : Marseille, Lyon et Lille.

Dans ce sous-chapitre nous ne présenterons que les résultats pour la ville de Lyon mais le principe reste le même pour les autres villes.

Toutefois on retrouvera en annexe 20 les résultats des autres villes.

6.4.2. Architecture système

L'architecture retenue pour cette étude de cas est un stockage sur le site utilisateur.



(Source : GRETh)

L'UVE produit de l'énergie calorifique entre 180 et 400 °C en sortie chaudière. Cette énergie calorifique est transportée jusqu'au lieu d'usage par un mode de transport puis grâce à des échangeurs de chaleur et à l'utilisation souhaitée sur le site utilisateur, le niveau de température et l'état du fluide seront adaptés entre le site de production et l'usage par l'intermédiaire de ces derniers. Un fluide secondaire sera utilisé pour alimenter le stockage « chaud » pendant la nuit et éventuellement le réseau de chaleur par l'intermédiaire d'un by-pass. Le stockage chaud choisi devra être capable de fournir la totalité des besoins en chauffage et ECS, mais aussi les besoins en climatisation lorsque que cette demande est nécessaire. En effet, le stockage chaud alimentera un groupe à sorption simple effet (ammoniac/eau ou LiBr/eau) qui lui même alimentera un stockage froid de technologie type CRISTOPIA (voir fiche annexe 8 : « technologie de stockage froid CRISTOPIA ») afin de lisser la demande de froid.

Plusieurs jeux de vanne 3 voies et de by-pass permettront une régulation et une alimentation des différents circuits.

Le système sera ainsi capable de fournir la totalité des besoins durant toute l'année.

Le système stockage de froid « absorption simple effet » a été favorisé pour cette étude dans le seul but de limiter les températures de stockage. En effet, contrairement au groupe double et triple effet, un groupe simple effet ne nécessite pas des températures d'alimentation supérieure à 100-120°C limitant ainsi les températures de stockage mais aussi les pertes dues au stockage.

6.4.3. Besoins de l'utilisateur

Les besoins dans l'habitat dépendent de la période de l'année considérée à savoir : hiver (Décembre, Janvier, Février), en été (Mai à Septembre) et intersaison (Mars, Avril, Octobre, Novembre).

Sous-forme de tableau on présentera les caractéristiques principales du besoin à savoir : température, puissance,...

En fonction de la période de l'année, l'utilisateur dans le cas d'étude habitat/tertiaire a besoin de chauffage, d'ECS et/ou de climatisation. Ainsi nous avons caractérisé les besoins de l'utilisateur sur tous les mois de l'année et donc pour chaque saison à savoir : hiver (Décembre, Janvier, Février), en été (Mai à Septembre) et intersaison (Mars, Avril, Octobre, Novembre) en nous servant de plusieurs paramètres. En effet, pour estimer la consommation moyenne d'énergie en combustible d'un bâtiment, il faut tenir compte des caractéristiques de l'installation, des degrés jours unifiés (DJU) ainsi que de la saison et du type d'énergie utilisée.

Calculés sur la base de 18°C pour le chauffage (température minimale de confort d'où l'appellation DJU-base 18) et 22°C pour la climatisation, les degrés jours unifiés permettent entre autre de connaître la nature du climat et permettent de mieux estimer les besoins en chauffage et en climatisation pour un habitat en kW/m²/jour.

Les besoins vont être calculés pour un logement de 70m² occupé par 3 personnes et ayant une consommation annuelle de 10 MWh (bien que dépendant de la région et des années) en chauffage et ECS.

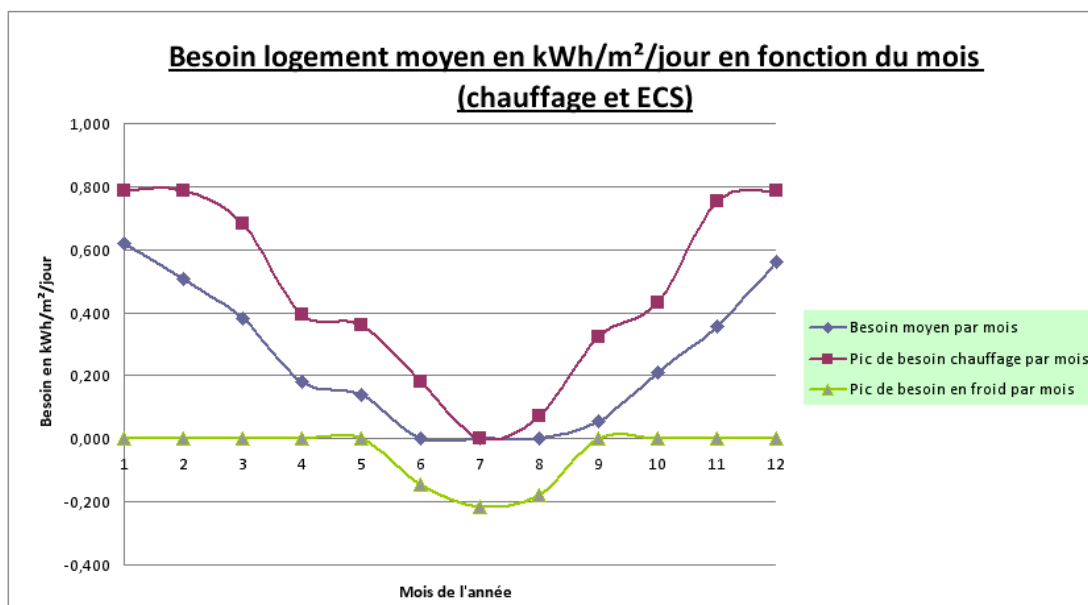
Besoins moyen en chauffage, ECS et climatisation

Les besoins énergétiques en chauffage et climatisation d'un jour dans le mois en kWh/m² ainsi que le besoin en ECS pour une personne en kWh/jour sont donnés dans le tableau suivant :

Période de l'année	Mois de l'année	Pic maximum de besoin moyen de chauffage d'un jour dans le mois (kWh/m ² /jour)	Pic maximum de besoin moyen de clim d'un jour dans le mois (kWh/m ² /jour)	Besoin en ECS/personne (kWh/jour/pers)
Hiver	Janvier	0,789	0,00	2,613
Hiver	Février	0,789	0,00	2,613
intersaison	Mars	0,681	0,00	2,613
intersaison	Avril	0,394	0,00	2,613
intersaison/été	Mai	0,359	0,00	2,613
été	Juin	0,000	-0,14	2,613
été	juillet	0,000	-0,22	2,613
été	Aout	0,000	-0,18	2,613
intersaison	Septembre	0,323	0,00	2,613
intersaison/Hiver	Octobre	0,430	0,00	2,613
Hiver	Novembre	0,753	0,00	2,613
Hiver	Décembre	0,789	0,00	2,613

(Source : GRETh)

Le graphique qui suit représente les besoins moyens en chaleur en kWh/m²/jour pour un logement à Lyon ainsi que les besoins moyens en froid lors des périodes de chaleur en kWh/m²/jour à Lyon.



(Source : GRETh)

On note :

- BC : besoin moyen maximum en chauffage : 0,6 kWh/m²/jour
- N : le nombre de jours de chauffe dans l'année : 273 jours
- S : la surface habitable en m² : 70

Le besoin moyen en chauffage en MWh est égal à : $BC*N*S = 11,466$ MWh/an.

Le besoin en ECS quant à lui étant de 2,613 kWh/jour/pers, pour avoir le besoin moyen annuel en ECS on procède de la manière suivante :

On note :

- ECS : besoin moyen en ECS : 2,613 kWh/jour/pers
- Pers : le nombre de personnes occupants le logement : 3
- N : le nombre de jours dans l'année : 365 jours

Le besoin moyen en ECS en MWh est égal à : $ECS*Pers*N = 2,861$ MWh/an.

Le besoin moyen en chauffage et ECS pour un habitat situé dans la ville de Lyon s'élève donc à :
 $7,665 + 2,861$ soit 10,53 MWh/an.

Le besoin en froid est calculé de la manière suivante :

On note :

- Clim : besoin moyen maximum en froid : 0,22 kWh/m²/jour
- N : le nombre de jours de chauffe dans l'année : 92 jours
- S : la surface habitable en km² : 70

Le besoin moyen en chauffage en MWh est égal à : $Clim*N*S = 1,417$ MWh/an.

6.4.4. Stockage/Transport d'énergie thermique

A partir des courbes de consommation mensuelle un ou plusieurs modes de stockage seraient envisageables. Pour chaque besoin nous déterminerons :

- Quels systèmes de stockage d'énergie thermique seraient intéressants pour une plus grande utilisation et une plus grande efficacité de l'énergie récupérable non utilisée afin de faire correspondre l'approvisionnement en énergie à la demande ?
- Quels sont les critères thermodynamiques et physico-chimiques ?
- Quels sont les critères environnementaux ? De sécurité ? De toxicité ?

Pour les modes de stockage choisis, un mode de transport sera associé.

En fonction des données caractéristiques du stockage et de la source de chaleur, on choisira le moyen de transport le mieux adapter.

Les caractéristiques que doivent remplir le stockage chaud et le stockage froid en fonction des mois de l'année sont données dans le tableau qui suit :

Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage chaud (°C)		Température d'utilisation (°C)	Besoin de stockage nécessaire (rendement de stockage= 0,8)	Besoin de stockage nécessaire (COP sorption = 0,7)
		Min	Max			
Hiver	Janvier	90	110	70/90	78,826	0
Hiver	Février	90	110	70/90	78,826	0
intersaison	Mars	90	110	70/90	69,413	0
intersaison	Avril	100	120	100/120	44,312	0
intersaison/été	Mai	100	120	100/120	41,174	0
été	Juin	100	130	100/120	32,209	17,9296875
été	juillet	100	130	100/120	43,415	26,89453125
été	Aout	100	130	100/120	37,812	22,41210938
intersaison	Septembre	100	120	100/120	38,036	0
intersaison/Hiver	Octobre	100	120	100/120	47,449	0
Hiver	Novembre	90	110	70/90	75,688	0
Hiver	Décembre	90	110	70/90	78,826	0

(Source : GRETh/Cadet International)

Les valeurs minimales, maximales et moyennes de l'énergie à fournir au stockage chaud et froid sont données dans le tableau qui suit pour une puissance de stockage calculée sur 12 h.

	Besoin de stockage nécessaire (rendement de stockage= 0,8)	Besoin de stockage nécessaire (COP sorption = 0,7)
Valeur max	78,826	26,895
Valeur min	38,036	0,000
Moyenne	61,395	13,447
Emoy A retenir (kWh/jr) pour 70m²/3pers	61,395	13,447
Puissance du stockage 12 h de charge (kW)	5,116	1,121

Résultats :

Le stockage chaud devra fournir en moyenne 62 kWh/m²/jour pour 70m² / 3 personnes en chauffage soit une puissance de stockage de 5,2 kW pendant 12h.

Le stockage froid devra fournir 14 kWh/m²/jour pour les mois de climatisation pour 70m² / 3 personnes en froid soit une puissance de 1,2 kW pendant 12h.

Les besoins supérieurs à la valeur moyenne seront compensés par un système d'appoint par une chaudière gaz par exemple.

Les caractéristiques de la solution d'appoint sont données dans le tableau qui suit :

Période de l'année	Mois de l'année	Besoins chauffage+clim (kWh/70m ² /jour) +3 pers ECS	Besoin en combustion (m ³ /jour/chaudière gaz (η=90%; PCI=10,53 kWh/m ³) avec ECS pour 70m ² 3pers	Besoin en combustion (m ³ /mois) chaudière gaz (η=90%; PCI=10,53 kWh/m ³)
Hiver	Janvier	63,061	6,92	214,82
Hiver	Février	63,061	6,92	194,03
intersaison	Mars	55,530	6,13	190,19
intersaison	Avril	35,449	4,01	120,48
intersaison/été	Mai	32,939	3,75	116,29
été	Juin	25,767	2,99	89,83
été	juillet	34,732	3,94	122,15
été	Aout	30,250	3,46	107,49
intersaison	Septembre	30,429	3,48	104,59
intersaison/Hiver	Octobre	37,959	4,28	132,71
Hiver	Novembre	60,551	6,66	199,94
Hiver	Décembre	63,061	6,92	214,82
TOTAL AN		16175,09414	-	1807,39

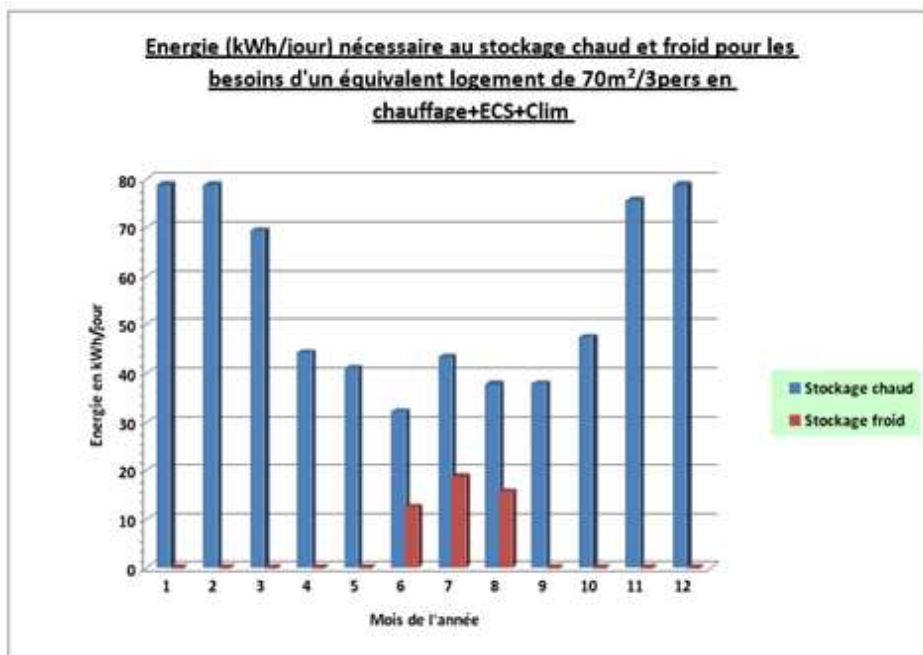
(Source : GRETh)

La puissance maximale de la chaudière devra être de 5,3 kW pour répondre aux pics de puissance d'un logement de 70m² occupé par 3 personnes dans la ville de Lyon.

6.4.5. Caractéristiques de la source

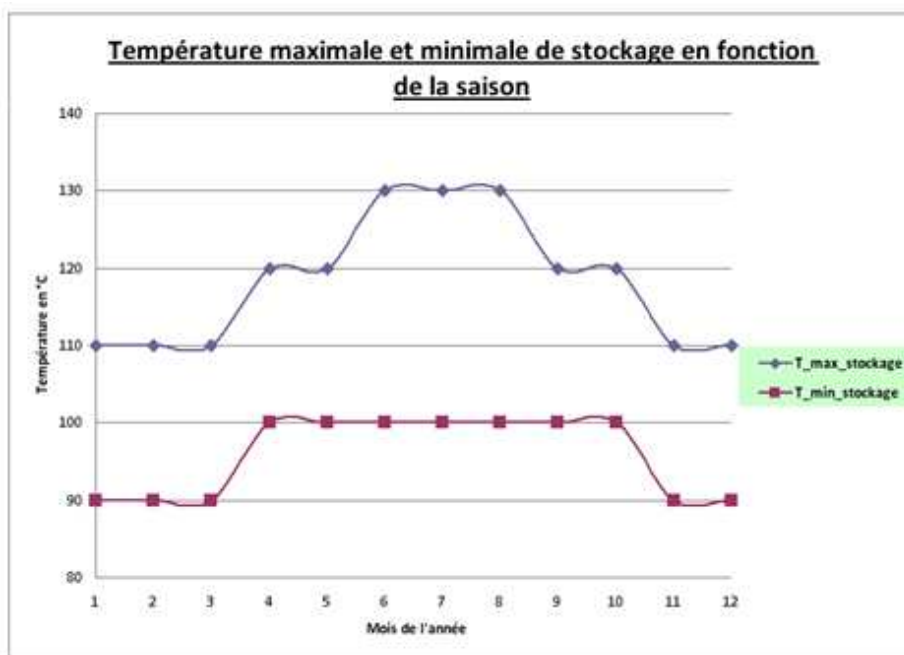
En analysant les besoins de l'utilisateur et le dimensionnement du stockage froid et chaud, on arrive à faire le dimensionnement de l'UVE c'est-à-dire qu'on détermine la quantité d'énergie que doit fournir la source de chaleur pour alimenter le stockage chaud qui lui alimentera en cas de besoins le stockage froid.

Le diagramme du dessus donne l'allure de la fourniture d'énergie nécessaire pour le stockage chaud et froid pour un logement de 70m² occupé par 3 personnes dans la ville de Lyon et la courbe en dessous donne l'allure des températures minimale et maximale du stockage en fonction de la saison.



(Source : GRETh/
Cadet International)

Les températures de stockage étant comprises entre 90 et 130°C. En considérant des pertes de 20% pendant le transport, l'UVE devra fournir un ΔT compris entre 18 et 26°C supérieur soit des températures en sortie usine comprise entre 110 et 150°C.



(Source : GRETh/
Cadet International)

Au chapitre 4, nous avons vu que la France comptait une vingtaine d'UVE dont les températures en sortie chaudière sont comprise entre 100 et 250°C mais il est clair que toutes les unités de valorisation énergétique peuvent répondre à ce niveau de température. Grâce aux échangeurs de chaleur, la température pourra être ajustée pour le module de stockage.

- Énergie maximum à fournir au stockage chaud : 78,83 kWh/jour pour un logement de 70m² + 3 personnes.
- Énergie minimale à fournir au stockage chaud : 37,81 kWh/jour
- Énergie moyenne à fournir au stockage chaud : 61,395 kWh/jour

● Dimensionnement de la source de chaleur

Nous avons dimensionné la source pour une ligne de production de 10 t/h. La France compte près de 70 UVE dont la capacité horaire est supérieure ou égale à 10 t/h. Dont 29 fonctionnant en tout électricité, 10 en tout chaleur et 27 en cogénération.

Résultats :

Le dimensionnement pour une ligne de production de 10 t/h de déchets nous donne les résultats suivants pour un PCI de 2 200 kcal/kg:

L'énergie maximale qu'une ligne de production de 10 t/h pourra fournir est de :

- Capacité horaire : 10 t/h soit 2,8 kg/s
- Puissance PCI : 25 483 kW_{PCI}
- Puissance chaudière : 21 915 kW (rendement chaudière : 86%)

Énergie que la source pourra fournir par jour : 525 960 kWh/jour.

Sachant que le stockage de chaleur a besoin au maximum de 62 kWh/jour pour un logement de 70m² + 3 personnes, la surface maximale habitable qui pourra être chauffée est de **593 826 m²** soit **8 483 foyers** chauffés par an.

6.4.6. Fiche de synthèse

La fiche de synthèse comme son nom l'indique regroupe tous les paramètres de l'étude de cas en passant par le contexte général aux solutions de stockage, transport ainsi que des critères environnementaux.

La fiche de synthèse se divise en plusieurs parties :

● Première partie : présentation étude de cas

Dans cette partie on retrouvera le secteur concerné, les applications visées ainsi que les besoins de l'utilisateur.

Fiche de Synthèse - Etude de cas HABITAT LYON	
Secteur	
Habitat/Tertiaire <input checked="" type="checkbox"/>	Blanchisserie <input type="checkbox"/> Industrie Sidérurgie <input type="checkbox"/>
Applications visée	
Production de chaud <input checked="" type="checkbox"/>	Production de froid <input checked="" type="checkbox"/>
Besoins	
<p><i>La courbe représente les besoins équivalent pour le chauffage, l'ECS et la climatisation (basé sur le calcul des DJU) en prenant en compte les différent rendement du système. Ces valeurs correspondent pour un équivalent logement de 70m²/3pers. Le stockage chaud alimente le réseau de chauffage de l'immeuble et le groupe à sorption, qui lui alimente le stockage froid. Les rendements de stockage (chaud et froid) sont de 80% et le rendement de conversion du groupe à sorption est de 70%, soit un rendement globale de 45% (sans rendement de transport).</i></p>	

● Deuxième partie : les modes de stockage chaud/froid

Dans cette partie on retrouvera les modes de stockage chaud/froid retenus ainsi que les matériaux répondant aux températures de stockage.

○ Stockage chaud

STOCKAGE CHAUD	
Sensible <input checked="" type="checkbox"/>	Latent <input checked="" type="checkbox"/> Thermo-chimique/physique <input type="checkbox"/>
Technologie/Matériaux de stockage	stockage mixte sensible liquide & latent / eau + macro encapsulation de MCP (Tfusion>=90°C Tmax=130°C)
Température de stockage	90-130°C (voir courbe "Température maximale et min imale de stockage en fonction de la saison")
Capacité thermique volumétrique du MCP de stockage	De 50 à 80 kWh/m ³ (suivant le MCP)
Fraction volumique de MCP dans le stockage	70%
Fraction volumique de caloporteur dans le stockage (eau)	30%
Capacité thermique volumétrique du stockage (DT=20°C+changement de phase)	De 40 à 63 kWh/m ³
Quantité max d'énergie à fournir au stockage chaud (kWh/jour) pour un équivalent logement de 70m ² /3pers	78,83
Quantité moyenne d'énergie à fournir au stockage chaud (kWh/jour) pour un équivalent logement de 70m ² /3pers	61,39
Estimation du volume du stockage pour un équivalent logement (m ³)	De 1 à 1,6 m ³
Temps de charge	nuit (suivant la saison)
Temps de décharge	jour (suivant la saison)
<p><i>Le stockage peut-être directement intégré dans un bâtiment existant, dans ce cas là il faut déterminer la taille maximale du stockage admissible par la structure et donc le nombre de logement pouvant être alimenter par le stockage. Sinon, une intégration du stockage lors de la construction du bâtiment(par ex: dans des sous sol prévu à cet effet) permet de palier ce problème est d'alimenter tout les logements</i></p>	

○ **Stockage froid**

STOCKAGE FROID	
Type/technologie	latent/MCP CRISTOPIA STL AC 0
Quantité max d'énergie à fournir au stockage froid(kWh/jour) pour un équivalent logement de 70m²/3pers	26,89
Quantité moyenne d'énergie à fournir au stockage froid(kWh/jour) pour un équivalent logement de 70m²/3pers	13,45
Estimation du Volume du stockage (m³)	0,54

○ **Situation du point de stockage**

Situation du point de stockage	
Stockage en zone de production <input type="checkbox"/>	Stockage en zone d'usage <input checked="" type="checkbox"/>

● **Troisième partie : la source de chaleur**

○ **Énergie d'appoint**

Énergie d'appoint (niveau utilisateur)					
Indispensable <input checked="" type="checkbox"/>					Non indispensable <input type="checkbox"/>
Si oui lesquelles?	Fioul <input type="checkbox"/>	Gaz <input checked="" type="checkbox"/>	Bois <input checked="" type="checkbox"/>	Charbon <input type="checkbox"/>	Autres <input type="checkbox"/>

○ **Caractéristiques source de chaleur**

Source de chaleur (zone de production)	
Température de la source	180 - 400°C
Pression de service	15 - 40 bar
Débit de la source/nature du fluide	10 t/h (Eau surchauffé - Vapeur surchauffée)
Quantité de chaleur fournie par jour	1,76 GJ/jour
Durée de fonctionnement	7 500 h/an
Puissance maximale de sortie	21 915 Kw
Nombre de logement équivalent pouvant être alimenté par la source	8 483 foyers

● **Quatrième partie : les modes de transports**

Transport	
Distance source-utilisateur	30 km
Transport Haute Température <input checked="" type="checkbox"/>	Transport Basse Température <input checked="" type="checkbox"/>
Technologies	MCP transport batch
Température du fluide de transport (°C)	70 - 200°C
Puissance (kW)	120
Temps (h)	10

● **Cinquième partie : impact environnemental**

Impact environnemental	
Emission de CO2 par kWh produit par l'UIOM (kgCO2/kWh)	0,149
Emission de CO2 par kWh produit par la solution de référence GN (kgCO2/kWh)	0,234
Réduction du CO2 par le processus de transport de chaleur (kgCO2/kWh)	0,398
Réduction du CO2 par stockage thermique/solution de référence (kgCO2/kWh)	0,085

● Sixième partie : Analyse de coûts

Analyse de cout/disponibilité																																								
Coût du MCP (euro/kg)	Voir sous-chapitre info prix																																							
Fabricant de système à absorption simple effet	ROBUR;YORK;TRANE;CARRIER;YAKASI...																																							
Prix moyen d'un groupe à absorption simple effet	suivant la puissance: environ 35 000€/100kW environ 70 000€/300kW environ 180 000€/1MW																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fabricant (distributeur)</th> <th colspan="4">gamme de puissance en kW</th> </tr> <tr> <th>17</th> <th>100</th> <th>350</th> <th>1350 →</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Robur (ClimgazPro + IDP)</td> <td>■</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Yazaki (ClimgazPro)</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Kawasaki (Trane)</td> <td></td> <td></td> <td>■</td> <td></td> </tr> <tr> <td>TRANE</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>■</td> </tr> <tr> <td>Hitachi (York)</td> <td></td> <td>■</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>YORK</td> <td></td> <td></td> <td>■</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Fabricant (distributeur)	gamme de puissance en kW				17	100	350	1350 →	Robur (ClimgazPro + IDP)	■				Yazaki (ClimgazPro)		■			Kawasaki (Trane)			■		TRANE				■	Hitachi (York)		■			YORK			■	
Fabricant (distributeur)	gamme de puissance en kW																																							
	17	100	350	1350 →																																				
Robur (ClimgazPro + IDP)	■																																							
Yazaki (ClimgazPro)		■																																						
Kawasaki (Trane)			■																																					
TRANE				■																																				
Hitachi (York)		■																																						
YORK			■																																					

● Septième partie : remarques

Remarques
<i>On peut voir que pour cette étude réalisée pour la ville de Lyon, la demande en froid se situe en période estivale et pendant une durée de 3 mois. La nécessité d'un stockage froid devra donc être étudié plus précisément lors d'un projet.</i>

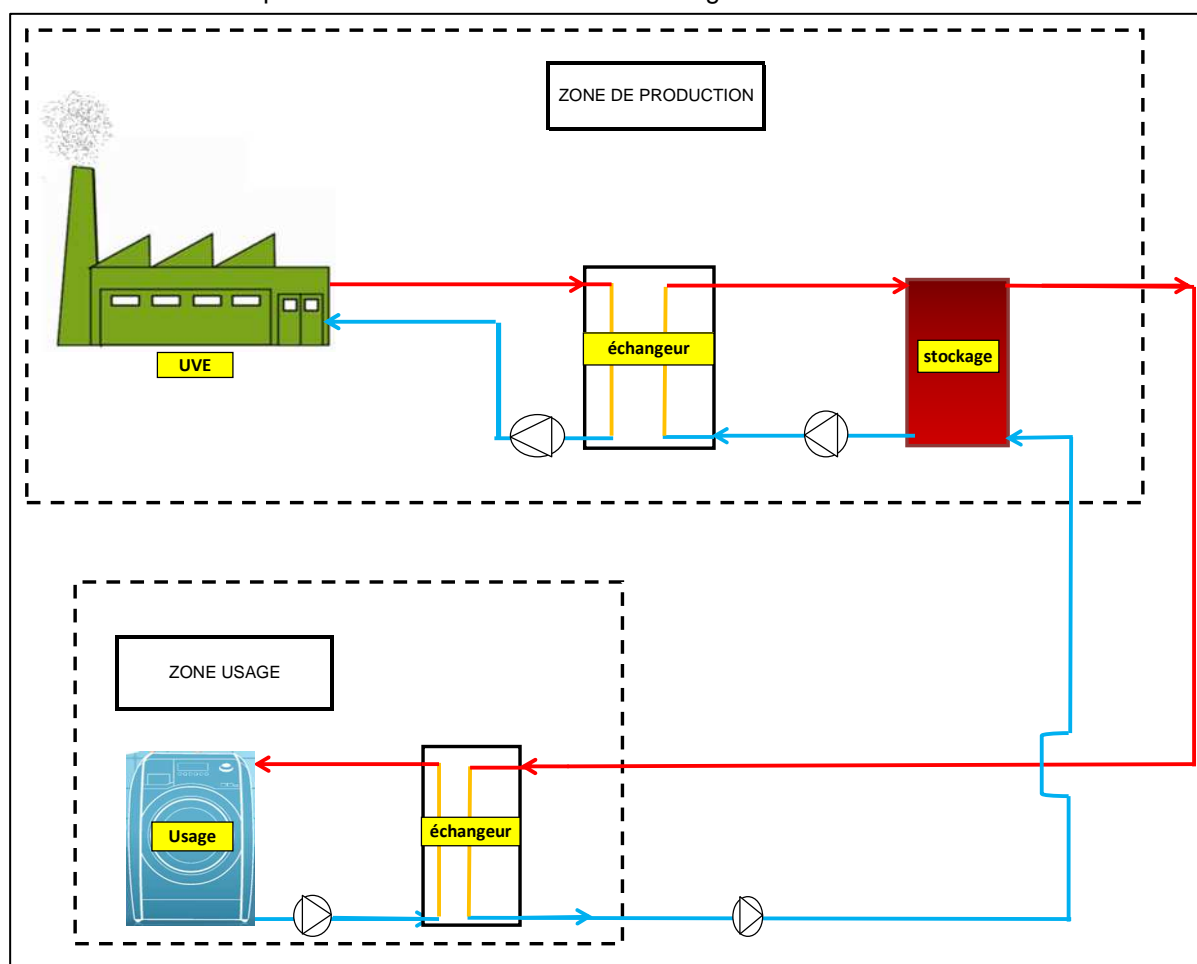
6.5.1. Éléments de contexte

Une unité de valorisation énergétique produit de l'énergie calorifique en continue sur toute l'année. Il est plus judicieux pour les études de cas de remonter à la chaîne de production en commençant par les besoins de l'utilisateur. Le cas d'étude qui sera traité ici c'est celui d'une blanchisserie type. Ainsi les besoins qui nous intéressent dans ce cas d'étude sont :

- Production de chaud : utilisation vapeur

6.5.2. Architecture système

L'architecture retenue pour cette étude de cas est un stockage sur le site utilisateur.



(Source : GRETh/Cadet International)

L'UVE produit de l'énergie calorifique entre 110 et 400 °C en sortie chaudière. Cette énergie calorifique est transportée jusqu'au lieu d'usage par un mode de transport puis grâce à des échangeurs de chaleur et à l'utilisation souhaitée sur le site utilisateur, le niveau de température et l'état du fluide seront adaptés entre le site de production et l'usage par l'intermédiaire de ces derniers. Un fluide secondaire sera utilisé pour alimenter le stockage « chaud ». On s'intéressera donc aux UVE dont les caractéristiques sorties chaudières sont au minimum de 290°C

6.5.3. Besoins de l'utilisateur

Une blanchisserie a besoin de vapeur toute l'année et fonctionne 6 jours/7 hors 3 week-ends dans l'année à raison de 16 h de fonctionnement en moyenne par jour.

Les besoins en vapeur de la blanchisserie sont discontinus sur la journée.

Le temps de fonctionnement de la blanchisserie est estimé à 2 500 h/an à raison de 47 h/semaine.

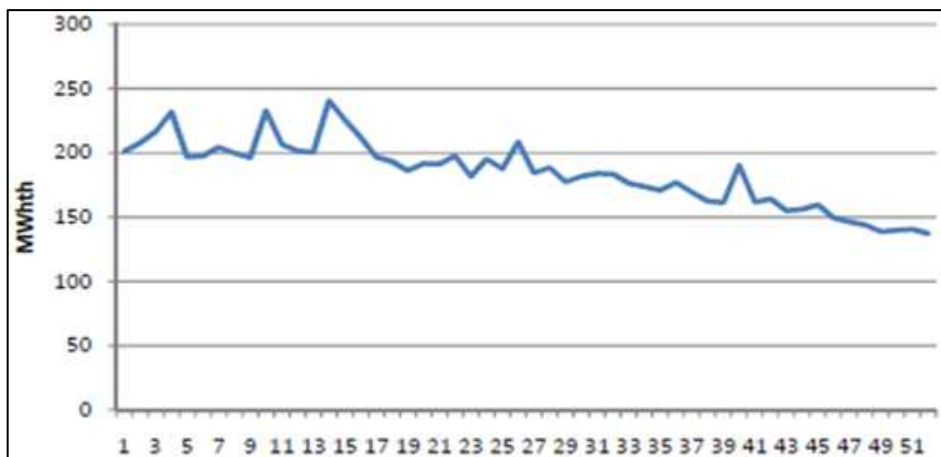
Les besoins dans l'habitat dépendent de la période de l'année considérée à savoir : hiver (Décembre, Janvier, Février), en été (Mai à Septembre) et intersaison (Mars, Avril, Octobre, Novembre).

Sous-forme de tableau on présentera les caractéristiques principales du besoin à savoir : température, puissance,...

Dans cet exemple, on considère le type de blanchisserie suivant :

- Consommation moyenne de vapeur : 48 t/jour suivant un temps de déstockage de 10h/jour
- Nombre de jours de fonctionnement dans le mois : 21
- Consommation mensuelle moyenne de vapeur : $48 * 21 = 1\ 008\ t$

La courbe qui suit présente la consommation de chaleur sortie chaudière toute l'année de la « blanchisserie type » :



(Source : GRETh/Cadet International – Relevé réel des consommations d'une blanchisserie)

6.5.4. Stockage/Transport d'énergie calorifique

A partir des courbes de consommation mensuelle un ou plusieurs modes de stockage seraient envisageables. Pour chaque besoin nous déterminerons :

- Quels systèmes de stockage d'énergie thermique seraient intéressants pour une plus grande utilisation et une plus grande efficacité de l'énergie récupérable non utilisée afin de faire correspondre l'approvisionnement en énergie à la demande ?
- Quels sont les critères thermodynamiques et physico-chimiques ?
- Quels sont les critères environnementaux ? De sécurité ? De toxicité ?

Pour les modes de stockage choisis, un mode de transport sera associé.

En fonction des données caractéristiques du stockage et de la source de chaleur, on choisira le moyen de transport le mieux adapter.

Les caractéristiques que doivent remplir le stockage chaud en fonction des mois de l'année sont données dans le tableau qui suit :

Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage (°C)		Température d'usage (°C)	Pression de service (bar)	Besoin journalier que le stock doit donner (kWh)	Besoin de stockage nécessaire (MWh/jour) (rendement de stockage= 0,8)
		Minimale	Maximale				
Hiver	Janvier	191	250	191	13	39840	49,8
Hiver	Février	191	250	191	13	39840	49,8
intersaison	Mars	191	250	191	13	39840	49,8
intersaison	Avril	191	250	191	13	39840	49,8
intersaison/été	Mai	191	250	191	13	39840	49,8
été	Juin	191	250	191	13	39840	49,8
été	juillet	191	250	191	13	39840	49,8
été	Aout	191	250	191	13	39840	49,8
intersaison	Septembre	191	250	191	13	39840	49,8
intersaison/Hiver	Octobre	191	250	191	13	39840	49,8
Hiver	Novembre	191	250	191	13	39840	49,8
Hiver	Décembre	191	250	191	13	39840	49,8

(Source : GRETh/Cadet International)

Résultats :

Le stockage chaud devra fournir au maximum 48 MWh/jour soit une puissance de stockage de 4,15 MW pendant 10h.

La puissance de déstockage étant de 4,98 MW.

6.5.5. Caractéristiques de la source

En analysant les besoins de la blanchisserie et le dimensionnement du stockage chaud, on arrive à faire le dimensionnement de l'UVE c'est-à-dire qu'on détermine la quantité d'énergie que doit fournir la source de chaleur pour alimenter le stockage chaud.

Souhaitant utilisée la vapeur à 191°C, la température minimale de stockage est comprise entre 190°C et 250°C.

Les températures de stockage étant comprises entre 190 et 250°C, on s'intéressera aux UVE dont les températures en sortie usine sont supérieures à 190°C.

Toutes les UVE que compte la France répondent à ces caractéristiques. Grâce aux échangeurs de chaleur, la température pourra être ajustée pour le module de stockage.

Énergie maximum à fournir au stockage chaud : 49,8 MWh/jour pour une blanchisserie.

Dimensionnement de la source de chaleur :

Nous avons dimensionné la source pour une ligne de production de 10 t/h déchets. La France compte près de 70 UVE dont la capacité horaire est supérieure ou égale à 10 t/h. Dont 29 fonctionnant en tout électricité, 10 en tout chaleur et 27 en cogénération.

Résultats :

Le dimensionnement pour une ligne de production de 10 t/h nous donne les résultats suivants :

L'énergie maximale qu'une ligne de production de 10 t/h pourra fournir est de :

- Capacité horaire : 10 t/h soit 2,8 kg/s
- Puissance PCI : 25 483 kW_{PCI}
- Puissance chaudière : 21 915 kW (rendement chaudière : 86%)

Énergie que la source pourra fournir par jour : 525,96 MWh/jour.

Sachant que le stockage de chaleur a besoin au maximum de 49,8 MWh/jour pour une blanchisserie, une ligne de production de 10 t/h déchets pourrait alimenter **10 blanchisseries par jour** (selon le type défini).

6.5.6. Fiche de synthèse

La fiche de synthèse comme son nom l'indique regroupe tous les paramètres de l'étude de cas en passant par le contexte général aux solutions de stockage, transport ainsi que des critères environnementaux.

La fiche de synthèse se divise en plusieurs parties :

● Première partie : présentation étude de cas

Dans cette partie on retrouvera le secteur concerné, les applications visées ainsi que les besoins de l'utilisateur.

Fiche de Synthèse - Etude de cas BLANCHISSERIE		
Secteur		
Habitat/Tertiaire <input type="checkbox"/>	Blanchisserie <input checked="" type="checkbox"/>	Industrie Sidérurgie <input type="checkbox"/>
Applications visées		
Production de chaud <input checked="" type="checkbox"/>		Production de froid <input type="checkbox"/>
Besoins		
La courbe représente les besoins en chaleur par semaine. Pour cette étude, nous retiendrons donc une valeur de 200MWh/semaine avec une consommation horaire de 4,8 t/h de vapeur.		

● Deuxième partie : les modes de stockage chaud

Dans cette partie on retrouvera les modes de stockage chaud retenus ainsi que les matériaux répondant aux températures de stockage.

○ Stockage chaud

STOCKAGE CHAUD		
Sensible <input checked="" type="checkbox"/>	Latent <input checked="" type="checkbox"/>	Thermo-chimique/physique <input type="checkbox"/>
Température de stockage	190-250°C	
Technologie/Matériaux de stockage possible	*Stockage sensible liquide/ huile ou sels fondu *Stockage sensible solide/ béton et céramique *Stockage MCP Haute température / Prototype DLR/ MCP=eutectiques de sels	
1-Technologie disponible la plus mure	Stockage sensible liquide/ huile;sels fondu	
2-Technologie la moins chère	Stockage sensible solide/ béton et céramique	
3-Technologie la plus innovante (prototype seulement)	Stockage MCP Haute température / Prototype DLR/ MCP=eutectiques de sels / matrice graphite/concept tube et ailettes du DLR (DSG)	
Quantité d'énergie à stocker par jour (MWh/jour)	49,80	
Capacité volumétrique du stockage pour 1 (kWh/m ³ .K)	0,55(huile); 0,7 (sels fondus)	
Capacité volumétrique du stockage pour 2 (kWh/m ³ .K)	0,7 (Béton) et 0,84 (céramique)	
Volume du stockage pour solution 1 (DT=50°C)	1810 m ³ (huile) ou 1422m ³ (sels fondu)	
Volume du stockage pour solution 2 (DT= 50°C)	1422m ³ de béton ou 1185 m ³ de céramique	
Temps de charge	14h maximum (nuit)	
temps de décharge	10h (jour)	

○ Situation au point de stockage

Situation du point de stockage	
Stockage en zone de production <input checked="" type="checkbox"/>	Stockage en zone d'usage <input type="checkbox"/>
On pourra prévoir un stockage en zone de production en fonction du mode de transport et de la distance.	

● Troisième partie : la source de chaleur

o **Énergie d'appoint**

Énergie d'appoint (niveau utilisateur)						
Indispensable	<input checked="" type="checkbox"/>	Non indispensable				<input type="checkbox"/>
Si oui lesquelles?	Fioul <input type="checkbox"/>	Gaz <input checked="" type="checkbox"/>	Bois <input type="checkbox"/>	Charbon <input type="checkbox"/>	Autres <input type="checkbox"/>	

o **Caractéristiques source de chaleur**

Source de chaleur (zone de production)	
Température de la source	291 °C
Pression de service	21 bar
Débit de la source/nature du fluide	10 t/h
Quantité de chaleur de la source	1,76 GJ
Quantité de chaleur produite par jour	GJ/jour
Durée de fonctionnement	7 500 h/an
Puissance maximale de sortie	21 915 kW

Quatrième partie : les modes de transports

Transport	
Distance source-utilisateur	10 km
Transport Haute Température <input checked="" type="checkbox"/>	Transport Basse Température <input checked="" type="checkbox"/>
Technologies	Chemical
Température du fluide de transport (°C)	100 - 450°C
Puissance (kW)	1000
Temps (h)	1,8

Cinquième partie : impact environnemental

Impact environnemental	
Emission de CO2 par kWh produit par l'UVE (kgCO2/kWh)	0,149
Emission de CO2 par kWh produit par la solution de référence GN (kgCO2/kWh)	0,234
CO2 émis par le processus de transport de chaleur (kgCO2/kWh)	-
Réduction du CO2 par stockage thermique/solution de référence (kgCO2/kWh)	0,085

Sixième partie : Analyse de coûts

Analyse de coût/disponibilité (sous-chapitre info prix)	
Stockage solution 1 (la plus mure)	entre 17€/kWh et 21€/kWh
Stockage solution 2 (innovante / démonstrateur)	environ 18€/kWh
Stockage solution 3 (prototype)	de 18€/kWh à 91€/kWh
Stockage solution 4 (prototype)	-
Coût global du stockage pour 49,8MWh	entre 0,687 M€ et 4,530 M€ (suivant la technologie)

Septième partie : remarques

Remarques
<i>L'analyse de prix prend en compte le coût de l'installation du dispositif de stockage, le coût des échangeurs de chaleur ainsi que le prix des matériaux de stockage. Il est évident que le stockage de 49,8 MWh induit des coûts significatifs mais non rédibitoires et permet en revanche d'éviter le rejet d'une grande quantité de CO2.</i>

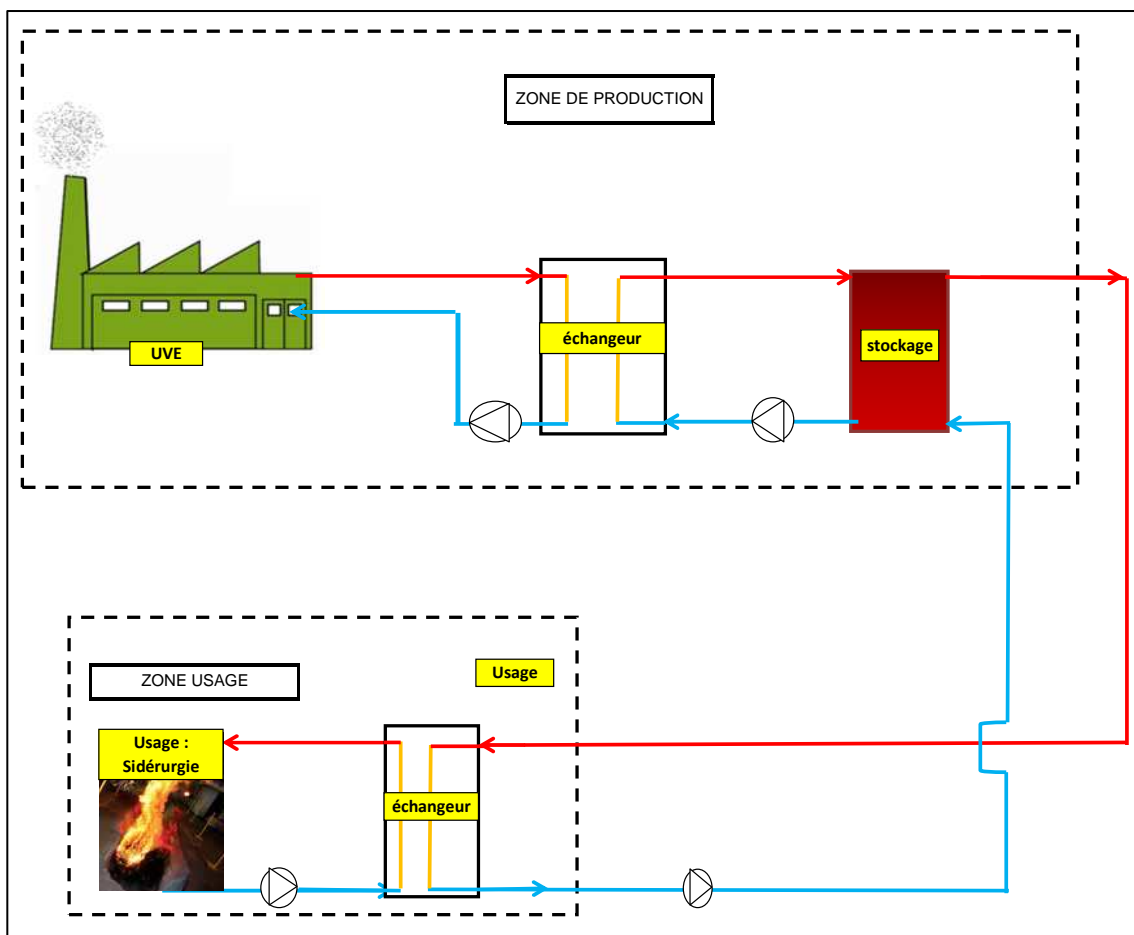
6.6.1. Éléments de contexte

Une unité de valorisation énergétique produit de l'énergie calorifique en continue sur toute l'année. Il est plus judicieux pour les études de cas de remonter à la chaîne de production en commençant par les besoins de l'utilisateur. Le cas d'étude qui sera traité ici c'est celui d'une sidérurgie type. Ainsi les besoins qui nous intéressent dans ce cas d'étude sont :

- Production de chaud : utilisation vapeur

6.6.2. Architecture système

L'architecture retenue pour cette étude de cas est un stockage sur le site utilisateur.



(Source : GRETH/Cadet International)

L'UVE produit de l'énergie calorifique entre 110 et 400 °C en sortie chaudière. Cette énergie calorifique est transportée jusqu'au lieu d'usage par un mode de transport puis grâce à des échangeurs de chaleur et à l'utilisation souhaitée sur le site utilisateur, le niveau de température et l'état du fluide seront adaptés entre le site de production et l'usage par l'intermédiaire de ces derniers. Un fluide secondaire sera utilisé pour alimenter le stockage « chaud ». On s'intéressera donc aux UVE dont les caractéristiques sorties chaudières sont au minimum de 400°C

6.6.3. Besoins de l'utilisateur

Une sidérurgie a besoin de vapeur toute l'année et fonctionne 6 jours/7 hors 3 week-ends dans l'année à raison de 16 h de fonctionnement en moyenne par jour.

Les besoins en vapeur de la blanchisserie sont discontinus sur la journée.

Le temps de fonctionnement de la sidérurgie est estimé à 2 500 h/an à raison de 47 h/semaine.

Sous-forme de tableau on présentera les caractéristiques principales du besoin à savoir : température, puissance,...

Dans cet exemple, l'on considère le type de sidérurgie suivant :

- Consommation moyenne de vapeur : 35 t/jour suivant un temps de déstockage de 10h/jour
- Nombre de jours de fonctionnement dans le mois : 21
- Consommation mensuelle moyenne de vapeur : $35 * 21 = 735$ t

6.6.4. Stockage/Transport d'énergie calorifique

A partir des courbes de consommation mensuelle un ou plusieurs modes de stockage seraient envisageables. Pour chaque besoin nous déterminerons :

- Quels systèmes de stockage d'énergie thermique seraient intéressants pour une plus grande utilisation et une plus grande efficacité de l'énergie récupérable non utilisée afin de faire correspondre l'approvisionnement en énergie à la demande ?
- Quels sont les critères thermodynamiques et physico-chimiques ?
- Quels sont les critères environnementaux ? De sécurité ? De toxicité ?

Pour les modes de stockage choisis, un mode de transport sera associé.

En fonction des données caractéristiques du stockage et de la source de chaleur, on choisira le moyen de transport le mieux adapter.

Les caractéristiques que doivent remplir le stockage chaud en fonction des mois de l'année sont données dans le tableau qui suit :

Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage (°C)		Température d'usage (°C)	Pression de service (bar)	Besoin journalier que le stock doit donner (kWh)	Besoin de stockage nécessaire (MWh/jour) (rendement de stockage= 0,8)
		Min	Maximale				
Hiver	Janvier	400	450	400	40	468,563	468,563
Hiver	Février	400	450	400	40	468,563	468,563
intersaison	Mars	400	450	400	40	468,563	468,563
intersaison	Avril	400	450	400	40	468,563	468,563
intersaison/été	Mai	400	450	400	40	468,563	468,563
été	Juin	400	450	400	40	468,563	468,563
été	juillet	400	450	400	40	468,563	468,563
été	Aout	400	450	400	40	468,563	468,563
intersaison	Septembre	400	450	400	40	468,563	468,563
intersaison/Hiver	Octobre	400	450	400	40	468,563	468,563

Hiver	Novembre	400	450	400	40	39840	468,563
Hiver	Décembre	400	450	400	40	39840	468,563

(Source : GRETh/Cadet International)

Résultats :

Le stockage chaud devra fournir au maximum 468,563 MWh/jour soit une puissance de stockage de 46,856 MW pendant 10h.

La puissance de déstockage étant de 58,570 MW.

6.6.5. Caractéristiques de la source

En analysant les besoins de la blanchisserie et le dimensionnement du stockage chaud, on arrive à faire le dimensionnement de l'UVE c'est-à-dire qu'on détermine la quantité d'énergie que doit fournir la source de chaleur pour alimenter le stockage chaud.

Température d'utilisation de la vapeur : 400°C.

Plage température de stockage : 400 - 450°C.

La France compte quelques UVE dont les températures en sortie chaudière sont comprise supérieures ou égales à 400°C.

Énergie maximum à fournir au stockage chaud : 468,6 MWh/jour pour une sidérurgie.

Dimensionnement de la source de chaleur :

Nous avons dimensionné la source pour une ligne de production de 10 t/h déchets. La France compte près de 70 UVE dont la capacité horaire est supérieure ou égale à 10 t/h. Dont 29 fonctionnant en tout électricité, 10 en tout chaleur et 27 en cogénération. Mais seul une dizaine d'UVE ont des températures minimales en sortie chaudière de 400°C.

Résultats :

Le dimensionnement pour une ligne de production de 10 t/h nous donne les résultats suivants :

L'énergie maximale qu'une ligne de production de 10 t/h pourra fournir est de :

- Capacité horaire : 10 t/h soit 2,8 kg/s
- Puissance PCI : 25 483 kW_{PCI}
- Puissance chaudière : 21 915 kW (rendement chaudière : 86%)

Énergie que la source pourra fournir par jour : 525,96 MWh/jour.

Sachant que le stockage de chaleur a besoin au maximum de 468, 6 MWh/jour pour une sidérurgie, une ligne de production de 10 t/h déchets pourrait alimenter **1 sidérurgie par jour** (selon le type défini).

6.6.6. Fiche de synthèse

La fiche de synthèse comme son nom l'indique regroupe tous les paramètres de l'étude de cas en passant par le contexte général aux solutions de stockage, transport ainsi que des critères environnementaux.

La fiche de synthèse se divise en plusieurs parties :

● Première partie : présentation étude de cas

Dans cette partie on retrouvera le secteur concerné, les applications visées ainsi que les besoins de l'utilisateur.

Fiche de Synthèse - Etude de cas SIDERURGIE		
Secteur		
Habitat/Tertiaire <input type="checkbox"/>	Blanchisserie <input type="checkbox"/>	Industrie Sidérurgie <input checked="" type="checkbox"/>
Applications visée		
Production de chaud <input checked="" type="checkbox"/>	Production de froid <input type="checkbox"/>	
Besoins		
Pour cette étude, nous retiendrons donc une consommation horaire de 35 t/h de vapeur.		

● Deuxième partie : les modes de stockage chaud

Dans cette partie on retrouvera les modes de stockage chaud retenus ainsi que les matériaux répondant aux températures de stockage.

○ Stockage chaud

STOCKAGE CHAUD		
Sensible <input checked="" type="checkbox"/>	Latent <input type="checkbox"/>	Thermo-chimique/physique <input checked="" type="checkbox"/>
Température de charge/de décharge	1- Stockage sensible avec des sels fondus pour T>400°C 2- Stockage thermochimique	
Technologie/Matériaux de stockage possible	1-Stockage sensible sels fondus (Nitrate ou Nitrite) 2-thermochimique/thermophysique (réaction par hydratation ou adsorption avec des zéolithe)	
Quantité d'énergie à stocker par jour (MWh/jour)	468,56	
Capacité volumétrique du stockage (kWh/m ³ .K)	1- environ 0,7 (suivant le sel utilisé)	
Temps de charge	12h maximum	
temps de décharge	12h maximum	

○ Situation au point de stockage

Situation du point de stockage	
Stockage en zone de production <input checked="" type="checkbox"/>	Stockage en zone d'usage <input type="checkbox"/>
<p>On pourra prévoir un stockage en zone de production en fonction du mode de transport et de la distance de l'utilisateur. En France, à la vue de la densité du réseau, un mode de transport par les fleuves et canaux fluviaux est envisageable avec un stockage de type thermo-chimique (adsorption de vapeur par des zéolithes) qui n'induit pas de perte thermique vers l'ambiance et permettrait donc de réaliser d'assez longues distances et de longs temps de parcours sans perte; Le réseau français de voies fluviales est en effet très développé (voir carte "réseau fluviale").</p>	

● Troisième partie : la source de chaleur

○ Énergie d'appoint

Énergie d'appoint (niveau utilisateur)						
Indispensable <input checked="" type="checkbox"/>			Non indispensable <input type="checkbox"/>			
Si oui lesquelles?	Fioul <input type="checkbox"/>	Gaz <input checked="" type="checkbox"/>	Bois <input type="checkbox"/>	Charbon <input type="checkbox"/>	Autres <input type="checkbox"/>	

○ Caractéristiques source de chaleur

Source de chaleur (zone de production)	
Température de la source	400 - 475°C
Pression de service	40 - 75 bar
Débit de la source/nature du fluide	10 t/h
Quantité de chaleur produite par jour	1,76 GJ
Durée de fonctionnement	7 500 an
Puissance maximale de sortie	21 915 kW

● Quatrième partie : les modes de transports

Transport	
Distance source-utilisateur	30 km
Transport Haute Température <input checked="" type="checkbox"/>	Transport Basse Température <input type="checkbox"/>
Technologies	Réaction endo/exothermique; zéolite...
Température du fluide de transport (°C)	400 - 450

● Cinquième partie : impact environnemental

Impact environnemental	
Emission de CO2 par kWh produit par l'UIOM (kgCO2/kWh)	0,149
Emission de CO2 par kWh produit par la solution de référence GN (kgCO2/kWh)	0,234
CO2 émis par le processus de transport de chaleur (kgCO2/kWh)	-
Réduction du CO2 par stockage thermique/solution de référence (kgCO2/kWh)	-

● Sixième partie : Analyse de coûts

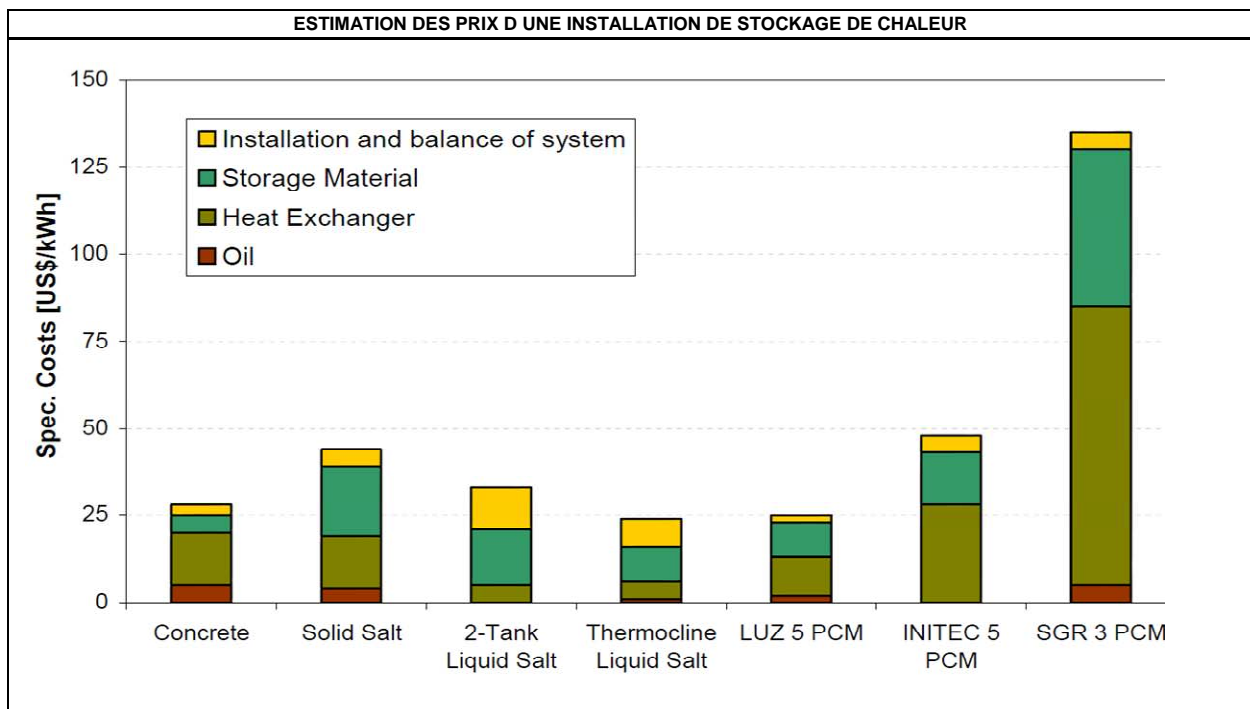
Analyse de cout/disponibilité (voir sous chapitre nfo prix)	
Stockage solution 1 (mure)	entre 185€/kWh et 21€/kWh
Stockage solution 2	rupture technologique/prototype

● Septième partie : remarques

Remarques
<i>L'analyse de prix prend en compte le cout de l'installation du dispositif de stockage, le cout des échangeurs de chaleurs ainsi que le prix des matériaux de stockages. Il est certains que le stockage de 468 MWh par jour induit de très fort cout du système de stockage, néanmoins cela permet d'éviter le rejet de grande quantité CO2.</i>

6.7.1. Estimation du prix d'une installation de stockage de chaleur

Ce graphique nous permet d'évaluer et de comparer les coûts de différentes installations. Cette évaluation doit être prise avec précautions car elle ne tient pas compte du contexte géographique du lieu du projet.



INITEC et SGR = storage heat exchanger

LUZ = Cascad Latent heat thermal storage

6.7.2. Prix et caractéristiques des matériaux de stockage

Material	Melting point (°C)	Cost (US\$/kg)
Erythritol	120	5.0
D-mannitol	166–168	6.7–7.5
Galactitol	188–189	—
Xylitol	93–94.5	6.7–8.3
D-sorbitol	96.7–97.7	1.1

Les prix sont donnés pour les MCP car on les retrouve plus dans la bibliographie.

Le tableau qui suit donne des caractéristiques supplémentaires des matériaux de stockage.

7. CONCLUSIONS

L'objet de cette étude était de réaliser un état de l'art sur le transport longue distance et le stockage d'énergie calorifique et d'en étudier le couplage avec les procédés de valorisation énergétique des déchets.

Dans le domaine des déchets en France, il existe actuellement trois principaux procédés de valorisation énergétique des déchets à savoir : incinération, méthanisation et valorisation du biogaz de décharge. Ces unités sont souvent éloignées des sites de forte consommation d'énergie calorifique (habitat, tertiaire) mais présente un potentiel de livraison d'énergie calorifique important et en particulier les nouvelles unités du fait du phénomène NIMBY (.

Pourtant il s'agit de véritable source de production d'énergie sous-exploitée pour cette notion de distance.

Tout au long de cette étude, nous avons amené le lecteur à prendre connaissance des technologies existantes en matière de stockage d'énergie calorifique et des processus de transport associés.

Nous avons vu qu'il existe 3 modes de stockage d'énergie thermique à savoir sensible, latent et thermochimique.

Parmi les technologies de stockage sensible, on retrouve le stockage saisonnier. Nous avons montré dans le cadre de cette étude que ce mode de stockage n'était pas pertinent compte tenu de la production continue des UVE mais aussi de l'envergure de l'étude d'avant projet ainsi que du lourd investissement matériel et en construction que cela nécessite.

Le stockage saisonnier a donc été ainsi écarté d'une possible applicabilité dans le domaine des déchets pour des stockages à l'échelle de la production. Par contre, ce type de stockage doit être étudié à l'échelle du consommateur (quartier ou immeuble).

S'agissant des technologies de **stockage en chaleur sensible sous phase liquide**, quelques unes ont été étudiées et développées pour la gamme de température qui nous intéresse dans cette étude (100 - 250°C). Il s'agit de :

- La technologie des réservoirs à sels fondus : cette technologie est mature et envisageable pour des niveaux de températures assez élevée par rapport à leur point de solidification ($T > 150^{\circ}\text{C}$).
- L'utilisation de l'eau sous pression : c'est une technologie fiable dotée d'une réelle maturité
- L'utilisation d'huiles thermiques : c'est une technologie plus abordable techniquement dans ce domaine de température que celle de l'eau pressurisée.

Dans la gamme de température 100 - 250°C toujours, il existe peu de technologies de **stockage par chaleur sensible sous forme solide** mais le stockage solide sensible en béton et céramique reste prometteur en termes de ratio performance/prix de conception et d'exploitation. C'est le cas du prototype développé par le DLR. (Confère annexe 3 pour plus d'informations).

En identifiant les fabricants de MCP (matériaux à changement de phase) et leurs différentes mise en œuvre, nous avons constaté que quelques MCP commercialisés rentrent dans la gamme des températures visées par cette étude ($> 100^{\circ}\text{C}$).

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 stade de pilotes de recherche (prototype). 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 chaleur 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) présente une bonne maturité. On notera néanmoins les projets de recherche du DLR qui sont prometteurs mais encore au stade d'essai.

Se conférer à l'annexe 4 pour plus d'informations.

Le **stockage par sorption ou thermochimie** quant à lui admet une gamme de température de la source plus large (100 - 1000°C). Les travaux portant sur ces méthodes de stockage se sont développés depuis plusieurs années, mais à ce jour, les travaux n'ont pas aboutis à des démonstrateurs industriels. Les difficultés expliquant ce manque de résultats concrets étant le choix de matériaux adaptés, la conception des réacteurs et le coût des dispositifs complets

Il est donc prématuré d'envisager ces solutions dans des démonstrateurs industriels de taille significative.

Aux fins de valider la faisabilité de la mise en œuvre des technologies de stockage d'énergie dans le domaine des déchets, nous avons réalisé sur la base d'une méthodologie à ce titre, 3 études de cas à partir de la production d'énergie produite par une UVE (incinérateur).

Préalablement, le lecteur retrouvera dans le chapitre 5 toutes les technologies de stockage applicables par secteur et compatibles au domaine des déchets.

Tout comme les technologies de stockage d'énergie calorifique, les technologies de transport d'énergie calorifique par secteur sont identifiés et classés.

Ce travail nous permet de conclure ci-après.

Les **réactions catalytiques réversibles** admettent des températures de la source de chaleur comprise entre 150 et 1000°C. Dans le domaine des déchets, la technologie qui semble la plus intéressante est la synthèse et la décomposition du méthanol. Des travaux de recherche à l'échelle de laboratoire ont déjà été testés au Japon sur des distances supérieures à 20 km pour des applications en chauffage dans le résidentiel et le tertiaire.

Les **systèmes à sorption** sont quant à eux plus limités en termes d'admissibilité de la source de chaleur (60 -300°C) et la bibliographie sur ces techniques n'est guère dense. Il nous est donc à ce jour impossible de statuer sur ces techniques.

S'agissant des systèmes batch utilisant des réactions chimiques et des MCP, la bibliographie est plus importante avec des pilotes de laboratoire et industriels. D'un point de vue des caractéristiques physiques notamment en termes de quantité d'énergie transportée mais aussi de réduction d'émission de gaz à effet de serre, l'utilisation des MCP est très intéressante.

Les réseaux de chaleur classique (eau, eau surchauffée) **présente de loin la technologie de transport d'énergie thermique la mieux maîtrisée et la plus adaptée au milieu urbain** (absence de substances chimiques ou autre). De plus, il est important de souligner que le coût des énergies fatales relativement bas (énergie des installations de traitement des déchets produisant de l'énergie thermique) implique des retours sur investissement (construction et l'exploitation du réseau de chaleur) plus faible que pour les autres sources de production de chaleur (fossiles, biomasse, ...). Il est alors économiquement plus acceptable de mettre en place des réseaux de chaleur de longue distance pour s'alimenter de ces énergies fatales.

De nombreux verrous notamment dans l'accès à l'information que ce soit tant pour les technologies de stockage et de transport d'énergie calorifique existent et nous pouvons déjà dire que s'orienter sur cet axe permettrait entre autre d'améliorer l'efficacité énergétique en élargissant le champ des utilisateurs d'énergie non valorisée produite par les installations de traitement des déchets, de réduire les émissions de gaz à effet de serre mais aussi de répondre à la demande du bâtiment qui ne cesse d'augmenter et à l'industrie qui recherche des sources énergétiques instantanées autres que les énergies fossiles.

Dans un souci de faciliter la compréhension pour le lecteur et dans l'optique d'une aide à la décision, nous avons réalisé des études de cas sur 3 secteurs à savoir habitat/tertiaire, blanchisserie et sidérurgie. Le secteur habitat/tertiaire est le secteur le plus énergivore en France. En effet, en France, en 2009, la consommation d'énergie finale dans le bâtiment et dans l'industrie est respectivement de 44% et de 22%.

L'étude montre qu'il est aussi important que **les acteurs concernée par la valorisation de l'énergie thermique s'intéresse à la production** de froid en accord avec l'évolution des consommations de froid et pour l'amélioration de l'efficacité du système complet (transport, stockage et production).

Cette étude met en avant la faisabilité de mise en œuvre de ces techniques dans le monde de la valorisation énergétique des déchets. On peut espérer que les actuelles incitations fiscales et réglementaires du gouvernement français permettront au Maître d'ouvrage public, aux opérateurs et aux bureaux d'études d'imaginer ce type de solution dans les phases de conception ou d'optimisation des projets futurs.

8. ANNEXES

- ANNEXE 1 : Cahier n°1, les dispositifs techniques de stockage géologique ou en grand réservoir d'eau de longue durée (inter-saisonnier) et basse température
- ANNEXE 2 : Cahier n°2, les dispositifs techniques de stockage sous phase liquide à haute température
- ANNEXE 3 : Cahier n°3, les dispositifs techniques de stockage sous phase solide à haute température
- ANNEXE 4 : Cahier n°4, les matériaux de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à basse et moyenne température
- ANNEXE 5 : Cahier n°5, les matériaux de stockage par chaleur latente et leur mise en œuvre pour les applications à haute température
- ANNEXE 6 : Cahier n°6, les milieux diphasiques solide-liquide pour le stockage de chaleur
- ANNEXE 7 : Cahier n°7, les matériaux de stockage par procédés thermo-chimique et thermophysique et leur mise en œuvre
- ANNEXE 8 : Stockage de froid : technologie CRISTOPIA
- ANNEXE 9 : Unités de valorisation énergétique des déchets : caractéristiques des fours et des chaudières
- ANNEXE 10 : Unités de valorisation énergétique des déchets : vente d'électricité et de chaleur
- ANNEXE 11 : Fiche Degrés Bleus
- ANNEXE 12 : Fiche STEP Stream
- ANNEXE 13 : Fiche Biofluides environnement
- ANNEXE 14 : Fiche : la géothermie à partir des eaux usées
- ANNEXE 15 : Fiche PREMIO : stockage biogaz
- ANNEXE 16 : Fiche PREMIO : Cristopia : stockage de froid pour la climatisation tertiaire

ANNEXE 17 : Fiche PREMIO : EDF : stockage PAC

ANNEXE 18 : Fiche PREMIO : SAED

ANNEXE 19 : Usine IBM Bromont au Canada :
Stockage d'énergie thermique à changement de phase

ANNEXE 20 : Méthode de calcul : Etude de cas Habitat

ANNEXE 21 : Tableaux des technologies de stockage de chaleur par type (sensible, latent, thermochimique/thermophysique) et par secteur (habitat/tertiaire, blanchisserie, sidérurgie)

ANNEXE 22 : Tableaux de propriétés physiques des huiles et matériaux solides pour le stockage de chaleur

ANNEXE 1



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°1 : Les dispositifs techniques de stockage en
grand réservoir d'eau de longue durée et basse
température**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. LES TECHNIQUES DE STOCKAGE SAISONNIER EN GRAND RESERVOIR D'EAU ET BASSE TEMPERATURE	4
2.1 Généralités sur le stockage saisonnier	4
2.2 Les grands réservoirs d'eau (HWTES)	6
2.2.1 Fonctionnement d'un bassin solaire (Salt water pond)	6
2.2.2 Fonctionnement d'un stockage d'eau saisonnier en réservoir.....	8
2.3 Les bassin d'eau avec lit de gravier (GWTES).....	11
2.4 Le stockage en Aquifères (ATES)	14
2.5 Dispositif de stockage en caverne (CTES).....	18
3 TABLEAU RESUME DES REALISATIONS ET COMPARAISON	19
4. APPLICABILITE AUX UIOM.....	22
5. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	26
6. BIBLIOGRAPHIES.....	26

1. Élément de contexte

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 critique pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représente une grande part d'énergie perdue dans notre société. 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 (cf. cahier introductif) mais dans ce cahier nous aborderons les dispositifs techniques de stockage en grand réservoir d'eau de longue durée (inter-saisonnier) et basse température.

En ce qui concerne le stockage saisonnier, la motivation principale est la recherche de solutions pour le recours à l'énergie solaire suite au choc pétrolier de 1973. Les pays de l'AIE notamment, ont tous pressenti que le solaire thermique ne pourrait pas se développer massivement sans une solution de stockage saisonnier. Elle a d'abord été recherchée pour des ensembles collectifs du fait de l'avantage thermique que procure un grand stock, puis petit à petit des solutions individuelles ont été testées.

C'est l'anticipation de la pénurie et/ou de la hausse des prix des énergies fossiles qui ont été la cause de la recherche en stockage et en solaire thermique. Des technologies plus avancées que celle de l'accumulateur thermosiphon ont été développées dès 1973 dans les pays européens et aux USA.

En 1984, les USA très présents dans le solaire jusque'à cette époque ont diminué très fortement leur effort de recherche sous la poussée d'une politique libérale. L'acuité de cette peur a diminué dès 1990 et l'effort de recherche a nettement baissé, sauf en Allemagne qui est resté depuis lors un des pays les plus actifs dans le domaine de l'énergie solaire et du stockage saisonnier.

Les premières expériences ont été réalisées dans des aquifères aux USA, en Suisse et en France. Ensuite la Suède a testé de nombreuses technologies durant les années 80, puis l'Allemagne depuis 1995 développe un programme d'évaluations des techniques les plus prometteuses (Solarthermie-2000).

Dans le cas des réseaux de chauffage, un stock tampon sous forme de cuve à eau est souvent disposé en tête de réseau pour découpler la production de la consommation. Il est en général dimensionné pour 1 à 2 heures de production et peut atteindre plus de 10 ou 20'000 m³ dans les grands réseaux (Helsinki, Copenhague). Dès l'apparition des premiers réseaux de chaleur, une certaine capacité de stockage dans le réseau lui-même est apparue. Celle-ci est cependant rarement considérée, sauf dans le cas de réseau solaire d'ampleur comme celui de Marstal au Danemark dans lequel on surchauffe temporairement ce réseau pour stocker une production solaire. Les équipements de distribution doivent être néanmoins adaptés.

Le stockage saisonnier peut être réalisé par différents principes (comme indiqué sur la figure 1), les stockages à convection (eau), à diffusion (sonde géothermique) et mixe (eau+gravier/sable).

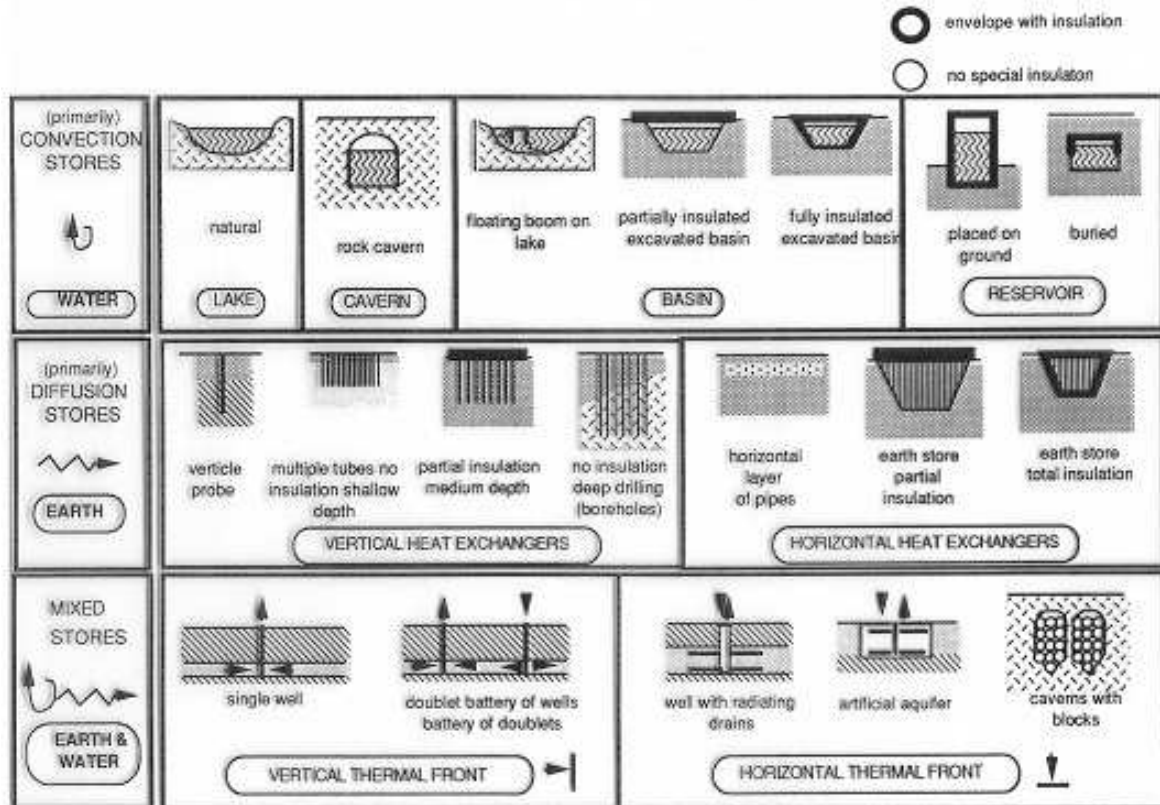


Figure 1 : Typologie du stockage saisonnier de chaleur, eau, sol et aquifère qui offre des coûts bas pour des volumes importants (Hadorn)[1]

Au cours des 20 dernières années, quatre techniques de stockage saisonnier se sont imposées :

- le stockage à eau (WaterTES)
- le stockage de type « lit de cailloux » (eau+gravier) (GWTES)
- le stockage par champs de sondes géothermiques (BTES)
- le stockage en nappe aquifère (ATES)

Parmi ses technologies de stockage saisonnier, la technologie BTES (Borehole Thermal Energy Storage) est détaillée dans le cahier n°3 car elle fait partie du stockage sensible solide (par conduction et transfert par un fluide caloporteur). Nous nous efforcerons donc de décrire plus précisément le stockage en grand réservoir à eau saisonnier (HWTES=Hot Water Thermal Energy Storage), le stockage de type « lit de cailloux » plus communément appelé GWTES (Gravel&Water Thermal Energy Storage), ainsi que le stockage en aquifère (ATES). Nous aborderons aussi rapidement le stockage en Caverne (CTES) mais celui-ci est peu répandu.

2. Les techniques de stockage saisonnier en grand réservoir d'eau et basse température

2.1 Généralités sur le stockage saisonnier

Dans ce cahier, nous parlerons donc uniquement de stockage sensible, soit avec de l'eau seule ou alors couplé avec un solide (gravier/roche+eau).

Dans le cas du stockage sensible, comme expliqué dans les cahiers n°2 et n°3, l'énergie stockée dans un matériau donné dépend essentiellement du volume et de l'élévation de température de ce matériau. Ainsi ce type de stockage est efficace à très grand différentiel de température et nécessite de grands volumes. Cependant à des températures élevées le problème des pertes thermiques et donc de l'isolation diminue la performance du stockage.

Un exemple de la charge et décharge d'un stock saisonnier en bassin est montré dans la Figure 2. Un résultat typique est, pour le cas où l'on n'obtient pas d'autonomie complète, c'est-à-dire une décharge en début d'hiver avec une sollicitation de plus en plus forte en fin de la même saison. Le stock est insuffisant dès janvier et un appoint doit être apporté. Pour couvrir les trois premiers mois de l'année avec un stockage saisonnier, son dimensionnement augmente donc fortement.

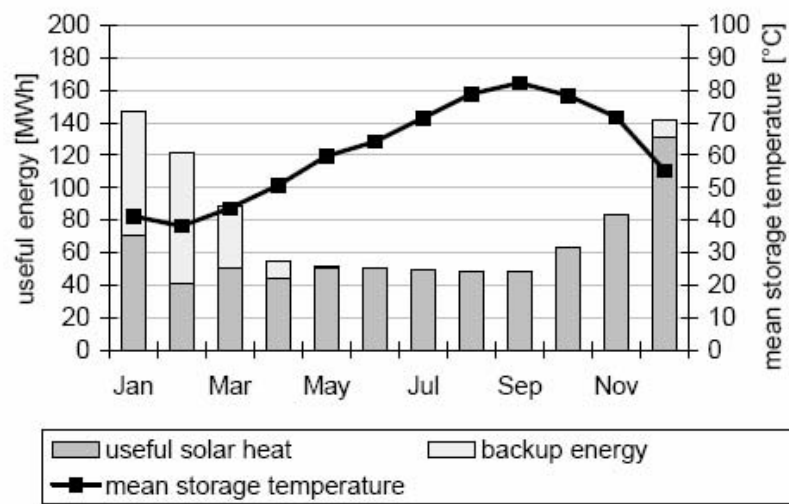


Figure 2 : Exemple typique de bilan de stock saisonnier en bassin de 5000m³ chargé par 2500m² de capteurs solaires[1]

La Figure 3 montre l'impact du volume de stockage sur les pertes spécifiques. On voit clairement l'intérêt de nouveaux systèmes de stockage de chaleur à volume réduit, par exemple le stockage latent (cf. cahier n°4 et n°5), à adsorption et absorption (cf. cahier n°7).

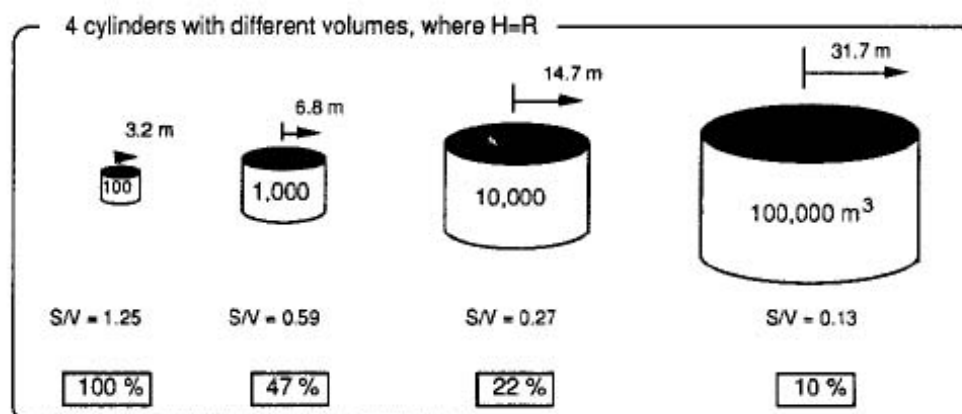


Figure 3 : Effet de taille : les grands stocks ont des pertes spécifiques plus faibles (Hadorn) [1]

Les stockages saisonniers nécessitent une étude de détail qui peut être lourde (reconnaissance géologique et tests in situ). Dans tous les cas, une adaptation d'un concept existant au site particulier est nécessaire pour le moment car il n'y a pas assez de recul pour avoir des

concepts totalement génériques. Sauf dans le cas des aquifères pour le rafraîchissement où l'on a désormais des solutions génériques pour les équipements de surface, néanmoins une adaptation aux conditions hydrogéologiques est quand même nécessaire.

2.2 Les grands réservoirs d'eau (HWTES)

2.2.1 Fonctionnement d'un bassin solaire (Salt water pond)

Un grand bassin de type étang est un moyen de stockage d'énergie thermique basé sur un phénomène de stratification d'eau contenant une quantité variable de sel.

Dans un étang normal, l'eau chauffée par le soleil diminue en densité et monte à la surface où elle est évaporée. Ainsi, l'eau de l'étang reste à la température moyenne de l'air ambiant.

Dans un "étang solaire" la thermo-circulation de l'eau est rendue difficile par le sel dissous au fond du bassin. Avec ou sans fond sombre le bassin absorbe l'énergie solaire et chauffe l'eau fortement chargée en sel. Celle-ci, plus lourde que l'eau moins chargée, reste au fond; il n'y a donc pas de mouvement de convection, elle reste isolée de celle de la surface moins chargée en sel qui a tendance à s'évaporer. L'eau du fond peut dépasser 80°C alors que l'eau de surface reste à température ambiante.

Un étang solaire est un bassin d'eau salée, naturel ou artificiel, composé de trois zones comme montré sur la figure 4.1:

-A : La partie haute est peu salée, l'eau réagit comme dans un étang normal et la température reste proche de l'air ambiant.

-B : La partie basse très salée, est exposée au rayonnement solaire, elle peut se réchauffer de 60 à 80°C.

-C : La partie intermédiaire, dans laquelle la salinité augmente avec la profondeur, un gradient de densité est créé qui empêche la thermo-circulation. Cette zone réagit comme une isolation thermique, elle est traversée par le rayonnement solaire qui est alors absorbé et piégé par l'eau très salée en partie basse.

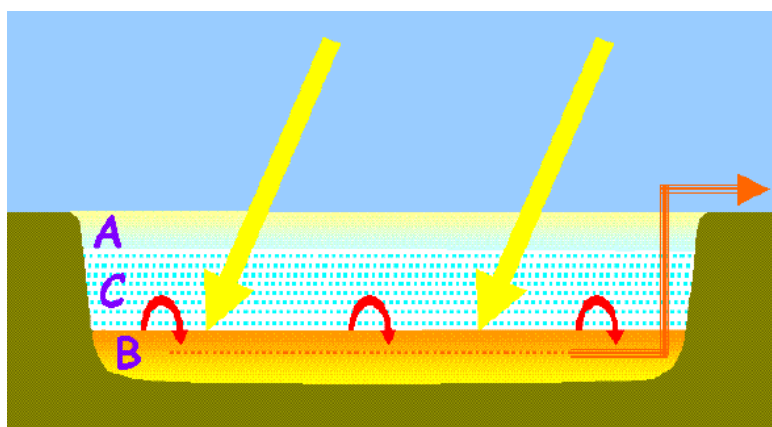


Figure 4.1 : Schéma montrant les 3 zones d'un étang solaire

La chaleur accumulée au fond de l'étang solaire peut être extraite au moyen d'un échangeur de chaleur et servir pour des besoins industriels. L'énergie peut être stockée pendant longtemps avec une perte de chaleur beaucoup plus basse qu'un réservoir de stockage d'eau classique. Pendant la phase d'hiver, l'eau au fond de l'étang peut être utilisée pour chauffer les bâtiments.

Il y a une soixantaine de réalisations dans le monde, en voici quelques unes :

-L'étang solaire de En Bodeq sur la Mer morte en Israël :

L'étang solaire d'environ 7.500 m² avec une profondeur de près de 3 mètres est utilisé en liaison avec un générateur électrique d'une puissance nominale de 150 kW. Des filets sont utilisés pour supprimer les vagues sur la surface de l'eau provoquées par le vent. En effet, tout mouvement trouble le gradient de salinité et diminue les performances. Cette installation mise en oeuvre par l'entreprise *Ormat Turbines* est considérée comme un laboratoire de recherche en vue de la réalisation d'un projet de 5000 kW utilisant quelques 200 km² de la Mer Morte comme étang solaire.

-L'étang solaire de Bhuj dans l'état de Gujarat aux Indes :

L'étang artificiel de 6.000 m² avec une profondeur de 3,50 mètres a été rempli de 4000 tonnes de sel. Depuis 1993, l'étang solaire produit de l'eau chaude pour une laiterie. L'installation fournit jusqu'à 80 000 litres d'eau par jour, à une température moyenne de 70°C. La construction du bassin a été très simple avec l'utilisation des couches de terre glaise comme étanchéité. L'installation a été amortie sur moins de 5 ans sans aucune aide financière, en tenant compte des économies d'énergie de la chaudière à lignite utilisée auparavant pour chauffer l'eau. *(le lignite est une roche composée de restes fossiles de plantes. C'est une roche intermédiaire entre la tourbe et la houille)*

-L'étang solaire de l'Université de Texas à El Paso :

C'est un étang artificiel de 3350 m² avec une profondeur de 3 mètres, réalisé avec un liner de caoutchouc faisant office d'étanchéité et de corps noirs. L'installation est étudiée par l'Université de Texas afin d'améliorer les performances et le fonctionnement pratique de ses bassins.



Figure 4.2 : Etang solaire de El paso (University of Texas USA)

2.2.2 Fonctionnement d'un stockage d'eau saisonnier en réservoir

Il est généralement composé d'un réservoir en béton armé partiellement enfoui dans le sol, qui peut être construit indépendamment des conditions géologiques. Il est isolé thermiquement uniquement sur le toit et sur les parois verticales.

En outre, des liners en acier sont introduits dans la structure pour assurer l'étanchéité à l'eau et réduire les pertes de chaleur causées par le transport de vapeur à travers les murs.

En effet, une des pertes les plus importantes dans les cuves en béton est la perte d'eau par diffusion de vapeur. A 80°C durant 6 mois, aucun béton classique ne résiste, et une perte de 0.5% par jour signifie 90% du stock parti en 180 jours (et surtout aucun liner plastique ne résiste). Pour palier ce problème, une feuille en inox à soudure double a été mise dans la cuve de Rottweil, ITW Stuttgart a mené une longue étude pour aboutir à un béton spécial (HDC=High Density Concrete (béton haute densité)) avec un cimentier allemand.

La dégradation des performances peut provenir de la dégradation des matériaux, surtout des isolants, de colmatage de tubes et surtout du colmatage d'échangeurs, ou de modification de qualité d'eau par exemple.

Différents stockage de chaleur intégré dans le programme CSHPSS (Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage) ont été développés en Allemagne depuis 1995 au sein du programme de R&D Solarthermie-2000. Le concept du réservoir d'eau a été testé dans le stockage pilote de 600 m³ à Rottweil. La forme était cylindrique, la moitié du stockage a été immergé dans le sol, le sol creusé a été distribué autour et au-dessus du stockage. Il a été construit avec des murs et un couvercle (toit) en béton.

Un stockage saisonnier avec de l'eau a été réalisé dans plusieurs projets de démonstration réels, surtout en Allemagne. La Figure 5 montre le principe du stockage du projet CSHPSS à Munich, le volume de stockage étant intégré au sous-sol, ce qui représente le cas le plus courant.

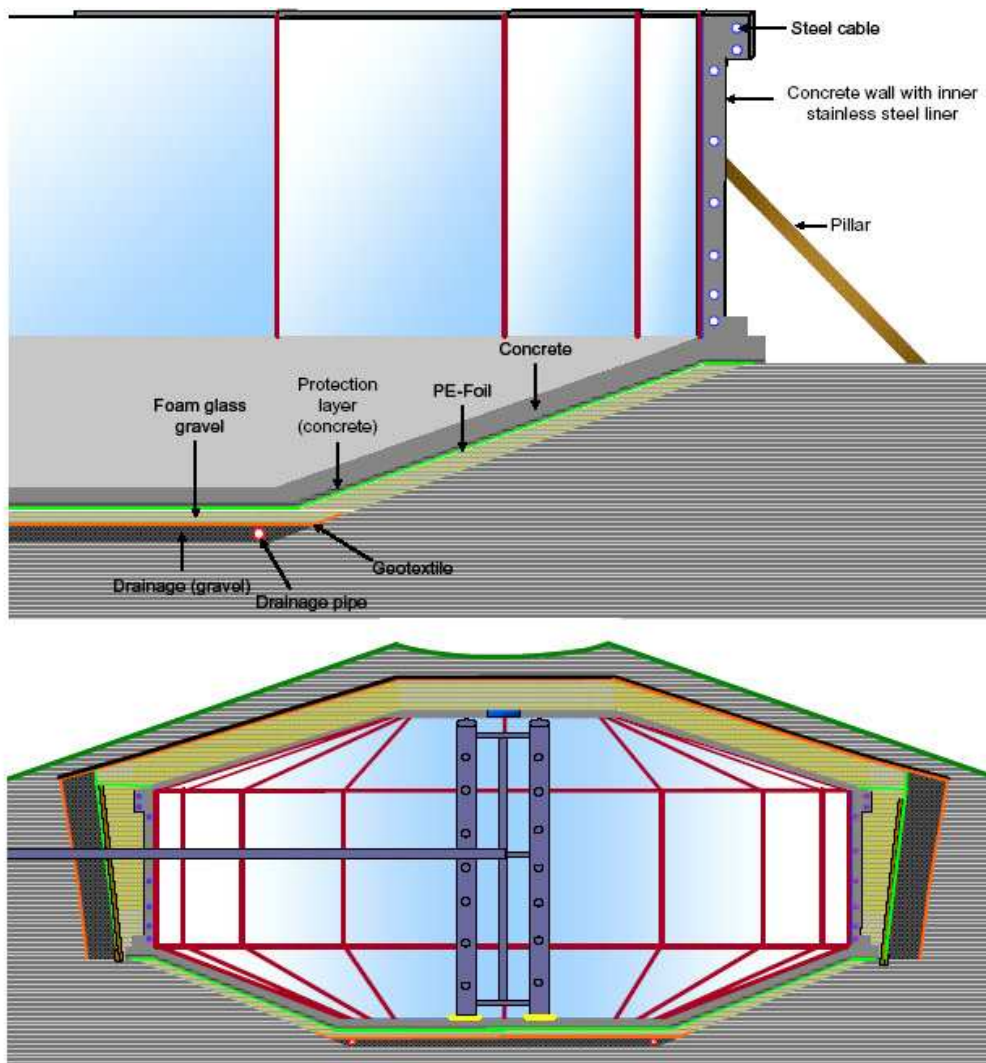


Figure 5 : Coupe du stock du projet CSHPSS de Munich[1]

Un autre exemple est l'intégration du volume de stockage dans le bâtiment. La Figure 6 montre le projet de Jenni en Suisse. Un ballon de stockage de 205m³, chauffé par 276m² de capteurs solaires, est intégré au centre du bâtiment. Avec cette technique un stockage saisonnier est possible.

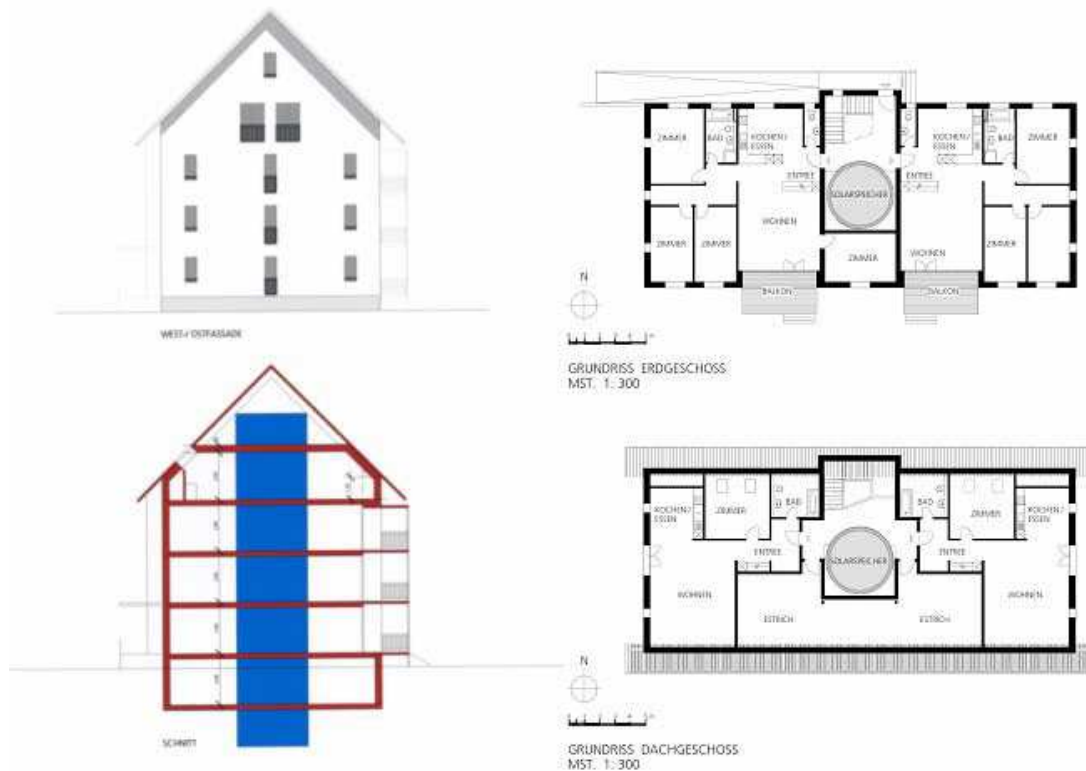


Figure 6 : Projet de bâtiments locatifs de Jenni avec une cuve centrale de 205m³ et 276m² de capteurs solaires (Jenni 2006)[1]

Cependant, pour un fonctionnement optimisé, la charge et décharge de la cuve doivent être gérées afin de maximiser la stratification dans la cuve. Un exemple est montré sur la Figure 7 : l'exemple de Jenni en Suisse : le chargement de la cuve est géré par un ensemble de vannes hydrauliques pour éviter une déstratification du stock.

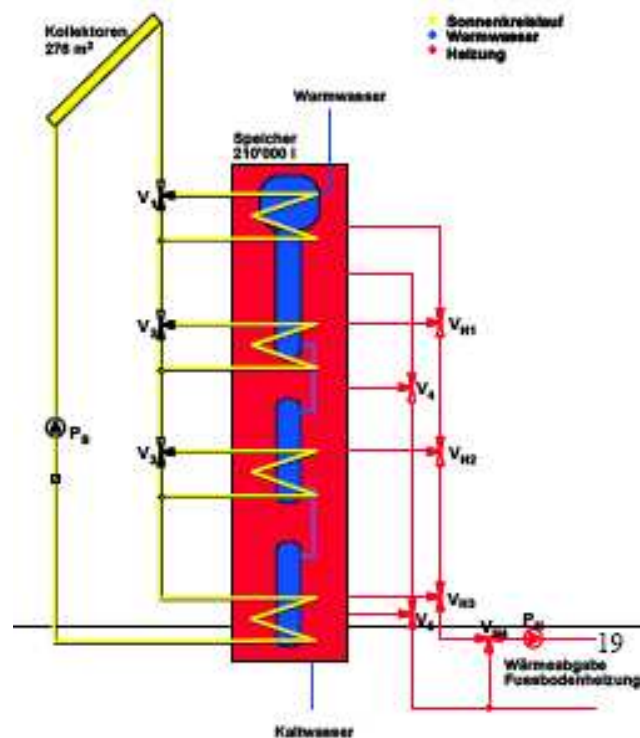


Figure 7 : Gestion de la stratification pour la charge/décharge d'un stock de 205m³ (Jenni 2006)[1]

La cuve de 205 m³ du projet Jenni est chiffrée à 422 €/m³ et ceci dans des conditions favorables du fait de la proximité de la source de production de chaleur (500 m) et de l'isolation relativement faible (25 cm).

Sur la figure suivante, on peut observer les différentes techniques d'étanchéité des cuves à eau.

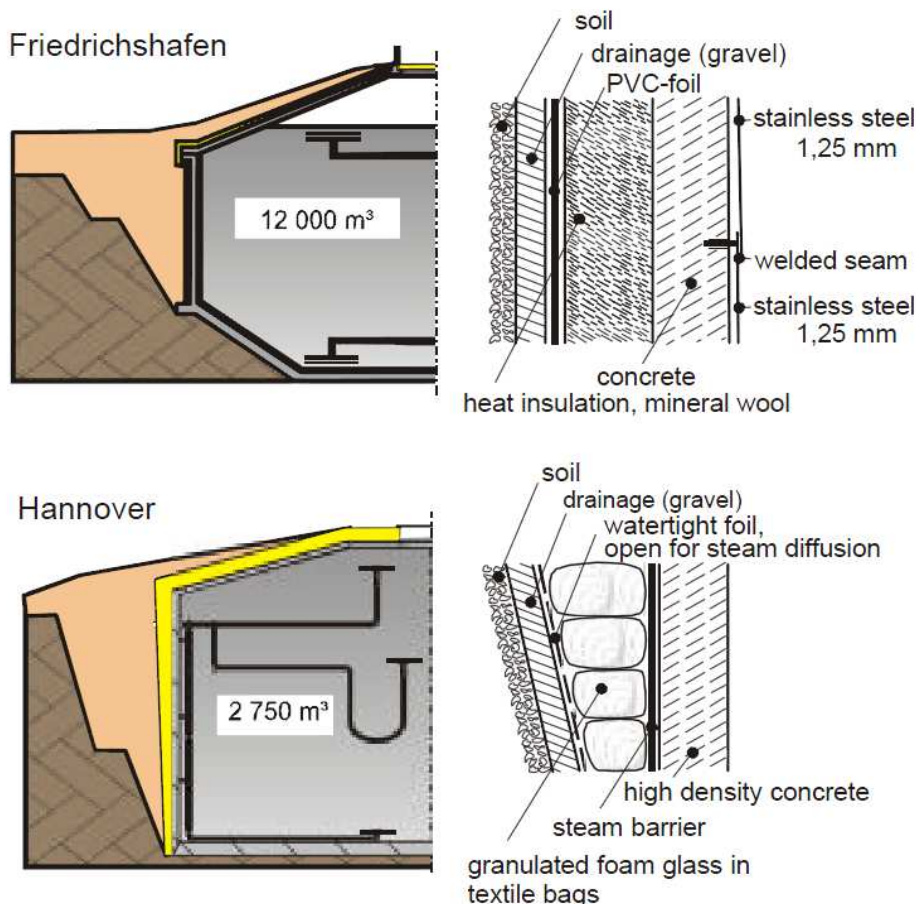


Figure 8 : Techniques d'étanchéité de cuves à eau [4]

Une comparaison du système HWTES avec les autres technologies à été réaliser dans le chapitre 3 de ce cahier.

2.3 Les bassin d'eau avec lit de gravier (GWTES)

Les Fosses de stockage sont normalement remplies d'eau, mais il ya des exemples où la fosse est remplie à la fois avec de la roche/gravier et de l'eau. En effet, on utilise des fosses qui sont enfouies dans le sol et qui doivent être étanches et isolées au moins sur les parois latérales et sur le dessus.

Le revêtement étanche en plastique (liner) est rempli d'un mélange de gravier et d'eau (ou sable/eau ou terre/eau) qui constitue le matériau de stockage. La chaleur est chargée et déchargée soit par un échange direct avec l'eau ou par des conduites en plastique (échangeurs en serpentin) installées dans les différentes couches à l'intérieur du stockage (voir figure 9 et 9'). Aucune autre structure d'appui n'est nécessaire en dehors de la couverture (couvercle). Le mélange de gravier et d'eau a une capacité de chaleur spécifique plus faible que l'eau seule, pour cette raison, le volume de l'ensemble du bassin doit être d'environ 50% plus élevé par

rapport aux installations de stockage d'eau chaude pour obtenir la même capacité thermique de stockage.

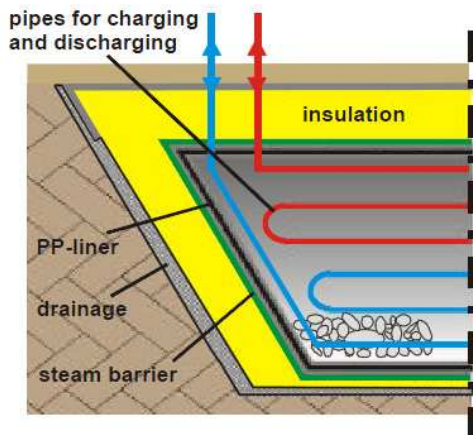


Figure 9 : Vue de la construction d'un stockage de chaleur avec échangeur en serpentin[4]

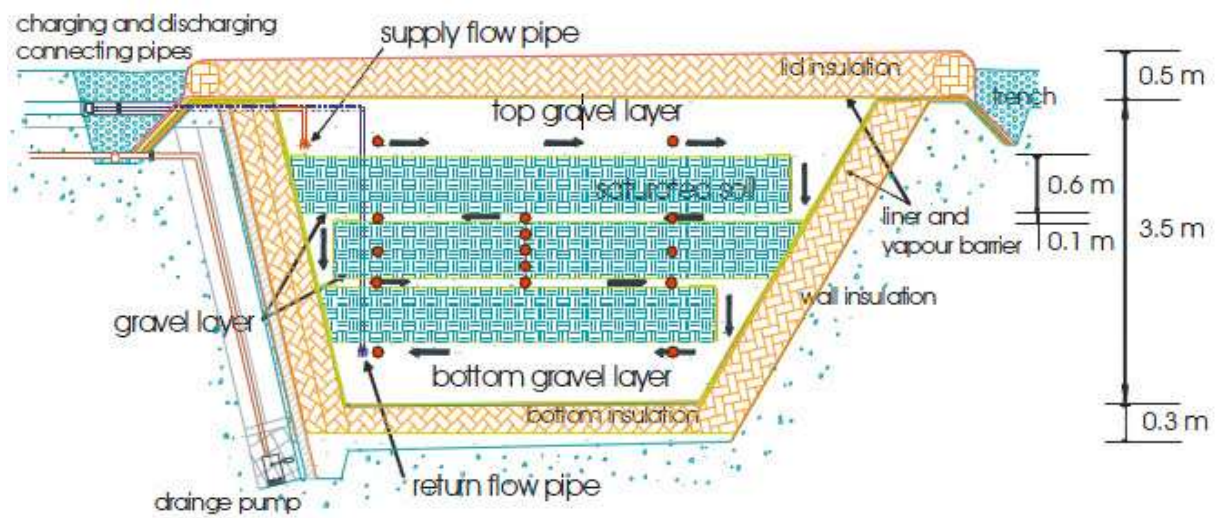


Figure 9' : Schéma d'une installation de stockage[4]



Figure 10 : La construction du stockage ; côté gauche: le remplissage de la couche de sable
côté droite : côté enveloppant la couche de sable en géotextile (laine), afin d'éviter éluviation (décantation); sur le côté droit du stockage la couche de gravier vertical peut être observé

Ce type de stockage de chaleur a été réalisé à grande échelle à l'Institut de Thermodynamique et Génie Thermique de l'Université de Stuttgart (ITW) en 1984. Le stockage se composait d'une fosse en forme de cône tronqué creusée dans le terrain, remplie de cailloux et d'eau, garnie de polyéthylène haute densité (HDPE) et d'isolation thermique sur le dessus avec de la lave poreuse et des couches de terre. Basés sur les expériences de l'installation pilote à l'Université de Stuttgart, les mêmes aspects constructifs ont été adoptés dans un stockage de 8000 m³ dans l'installation expérimentale à Chemnitz. Le revêtement utilisé est le polyéthylène haute densité (HDPE) et l'isolation thermique est en polystyrène expansé.

Un autre stockage de chaleur de 1500 m³ a été construit en Steinfurt-Borghorst avec quelques modifications liées au revêtement et aux matériaux d'isolation thermique qui étaient cette fois-ci l'adoption d'une double coque interne en polypropylène avec un composé feuille aluminium&PE (comme obstacle à la diffusion de vapeur). Le stock comprenait un système d'échangeur de chaleur indirect constitué de tubes polyéthylène (PE). Jusqu'à présent, la technologie stockage GWTES est présentée comme une alternative à la réduction des coûts de construction.

Il faut aussi savoir que l'étanchéité d'un stock saisonnier qui doit garder de l'eau, et en plus chaude durant 6 mois, est un problème très délicat. Plusieurs solutions ont été essayées en Allemagne avant d'aboutir au choix d'un béton nouveau ultra haute étanchéité.

Un autre projet, plus récent (2008) est celui de Eggenstein. Il s'agit d'une nouvelle génération de stockage GWTES qui consiste à réaliser plusieurs couches de gravier et de sable (comme montré sur la figure 11 et 11'). Il se constitue d'une couche inférieure de gravier lavé, d'une couche de sable intermédiaire (excavation) et d'une couche supérieure de gravier lavé. L'isolation est constituée de 30 chambres à vide remplies d'un isolant de granulés en verre expansé, de mousse de verre et de gravier.

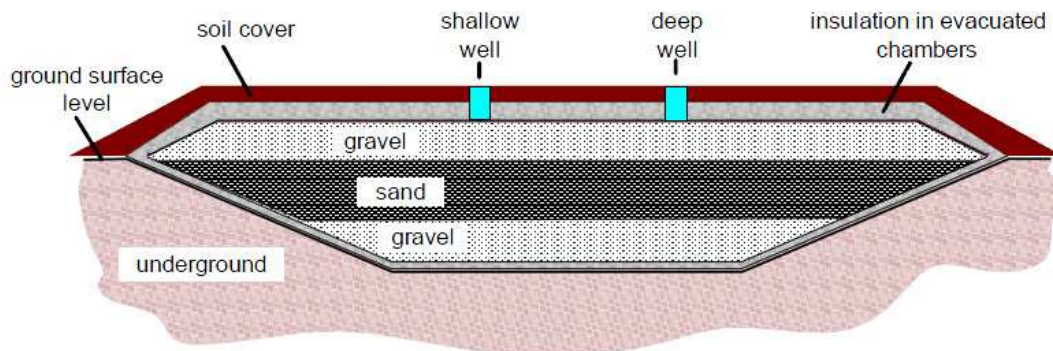


Figure 11 : Principe de stockage GWTES de Eggenstein[5]



Figure 11' : photo aérienne de la réalisation du stockage GWTES à Eggenstein[5]

Le stockage de Eggenstein est la première installation de type CSHPSS à être installée dans des bâtiments déjà existant. Le stockage fait environ 4500m³, il est chargé thermiquement par 1600m² de panneaux solaires.

2.4 Le stockage en Aquifères (ATES)

Son principe est simple: utiliser l'inertie thermique du sous-sol pour stocker la chaleur disponible. En injectant, sous terre et dans des aquifères profonds, l'énergie excédentaire des usines d'incinération par exemple, cette énergie peut être conservée plusieurs mois et utilisée aux moments propices.

Plusieurs projets ont essayé de réaliser ces stockages à plus haute température. En effet, en 1982, le projet à St Paul (Minnesota, USA) a expérimenté un stockage en aquifère à une profondeur de 180-240 m permettant une température maximale de stockage de 150°C, elle est désormais fermée. Enfin, en 1987, à Thiverval-Grignon (Yvelines (78), France), à l'aide de 2 aquifères d'environ 500 m de profondeur, des températures de 180°C ont été atteintes mais l'expérience n'a pas réussi et la chaleur n'a jamais pu être récupérée. Les matériaux ainsi que les lubrifiants des pompes se sont révélés inappropriés. Les projets ont dérivé vers une exploitation à plus bas niveaux de température.

La France aussi redécouvre depuis ses dernières années le stockage saisonnier de chaleur. Pas moins de quatre projets de recherche et développement sont actuellement lancés par l'Agence Nationale de la Recherche. En effet, lancée dans les années 1970, à la suite du choc pétrolier, cette technologie connaît un regain d'intérêt.

Parmi les projets développés par l'ANR, on peut citer le projet GEOSTOCAL, qui étudie la faisabilité scientifique, technique et économique d'un stockage inter-saisonnier d'énergie thermique en aquifère. Pour qu'un tel projet puisse se développer, il faut localement et simultanément disposer d'une source de chaleur excédentaire en période estivale, de niveaux géologiques permettant du stockage (réservoir aquifère) et avoir la possibilité de valoriser le déstockage en période hivernale.

Le projet GEOSTOCAL a permis de montrer que ces trois conditions sont parfaitement remplies sur un site situé à Ivry-sur-Seine (Val de Marne) :

- Les trois usines d'incinération des ordures ménagères parisiennes produisent de la chaleur en excès en période estivale : une puissance (jusqu'à 100 MW) pourrait être accessible à Ivry via le réseau de vapeur de la CPCU.

- L'aquifère du Dogger est un réservoir géologique potentiellement favorable pour du stockage. Un ancien doublet géothermique sur le site d'Ivry donne accès à une première connaissance locale du réservoir qui est complétée par les retours sur expérience des nombreuses exploitations de la ressource géothermale du Dogger en Ile de France.

- Les besoins énergétiques du réseau de chaleur local existant devraient pouvoir facilement valoriser l'énergie déstockée. De plus, un projet de renouvellement urbain programmé à Ivry prévoit à moyen terme une extension des réseaux de chaleur avec des caractéristiques directement compatibles avec la température de déstockage.

Le principe de fonctionnement de cette installation consiste en un doublet de forage (cf. figure 12), grâce auquel on soutire et injecte de l'eau afin de préserver le volume de l'aquifères et de ne pas provoquer de son affaissement. Comme on peut le constater sur les *figures 13 et 13'*,

seuls les aquifères salins sont utilisables afin de ne pas provoquer la pollution d'aquifère en eau potable. On injecte donc la chaleur excédentaire estivale dans l'aquifère afin de créer une bulle thermique chaude (cf. *figure 12, 13 et 13'*). Cette bulle thermique sera donc préservée et stockée dans l'aquifère en vue de sa réutilisation en période hivernale.

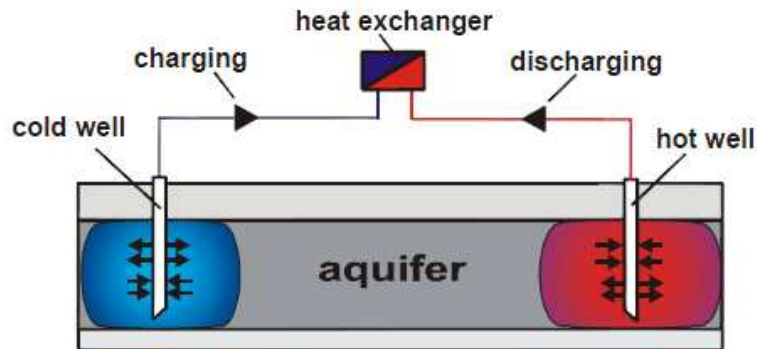


Figure 12 : Schéma d'un doublet géothermique (Aquifères)[4]

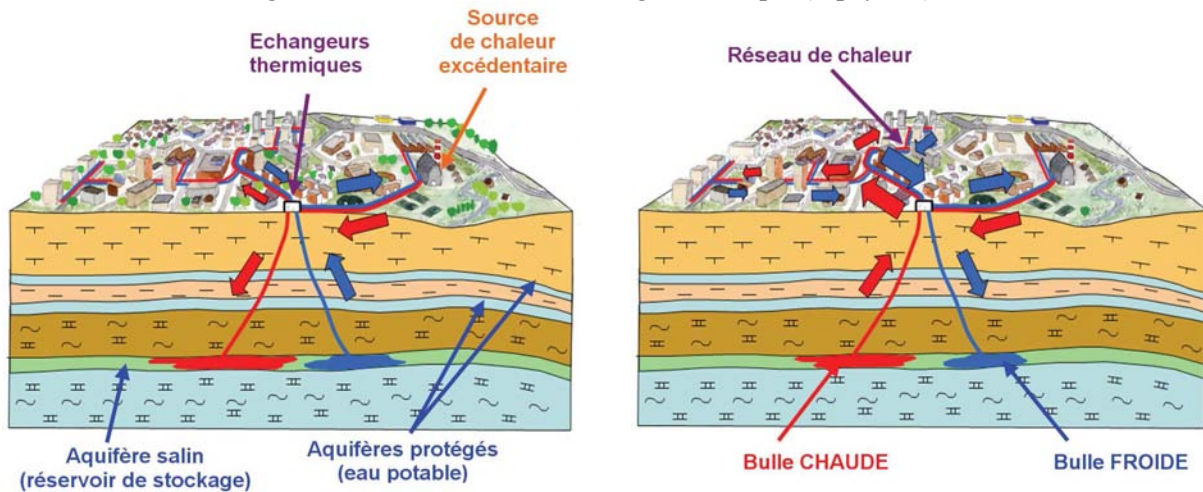


Figure 13

Figure 13'

Le scénario évolutif de base prévoit, avec une alimentation en eau à 90°C et éventuellement un appoint en vapeur d'eau, de pouvoir stocker de l'eau à 90°C-95°C. Après décharge, il pourrait permettre de disposer d'une température d'eau à environ 75°C. Cette installation reste donc à des températures inférieures à 100°C.

L'Allemagne est aussi (et encore une fois) une nation active dans la construction de projet de stockage de type ATES. Parmi cela, on pourra citer les projets situés à Rostock, à Berlin et enfin à Neubrandenburg dans des aquifères profonds.

A Berlin, deux ATES à différents niveaux pour les bâtiments du parlement Allemand (Bundestag). Sur la figure suivante on peut voir un schéma de la construction. Cette installation permettra d'alimenter plusieurs bâtiments.

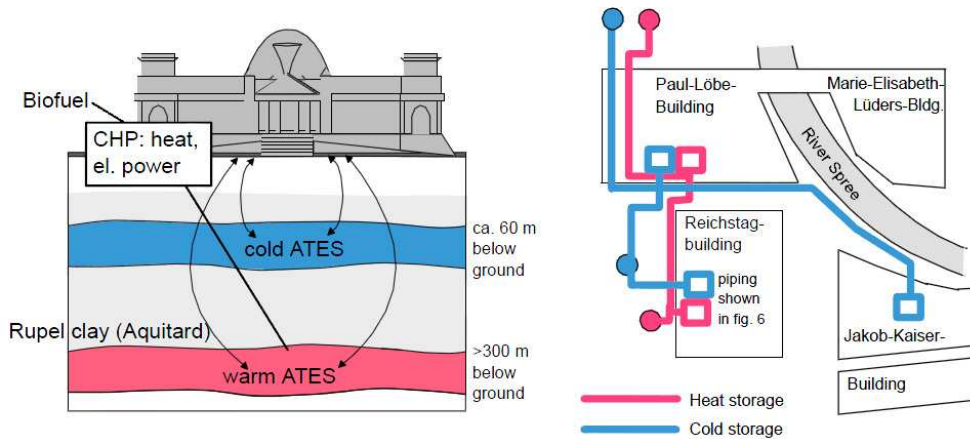


Figure 14 : Schéma de principe de l'ATES à Berlin[6]

Il y a donc deux stocks à réaliser, un froid et un chaud. Voici les différentes caractéristiques des deux stockages [6] :

COLD STORAGE	HEAT STORAGE
Summer :	Summer :
Température produite : 6-10°C (décharge) Température d'injection : 15-28°C Froid récupéré : 3 950 MWh/an	Température moyenne produite : 20°C (charge) Température d'injection : 70°C Chaleur stocké : 2650 MWh/an
Winter :	Winter :
Température moyenne produite : 22°C (charge) Température d'injection : 5°C Froid récupéré : 4250 MWh/an	Température produite : 65 - 30°C Chaleur récupéré : 2050 MWh/an
Energie de pompage : 220 MWh Ratio entre la récupération de froid et le stockage de froid : 93%	Energie de pompage : 280 MWh Ratio entre la récupération de froid et le stockage de froid : 77%

Voici sur la figure 15 suivante un graphique qui représente l'évolution des températures en tête de puits pour le stockage chaud entre 2001 et 2005. En rouge la charge et en bleu la décharge :

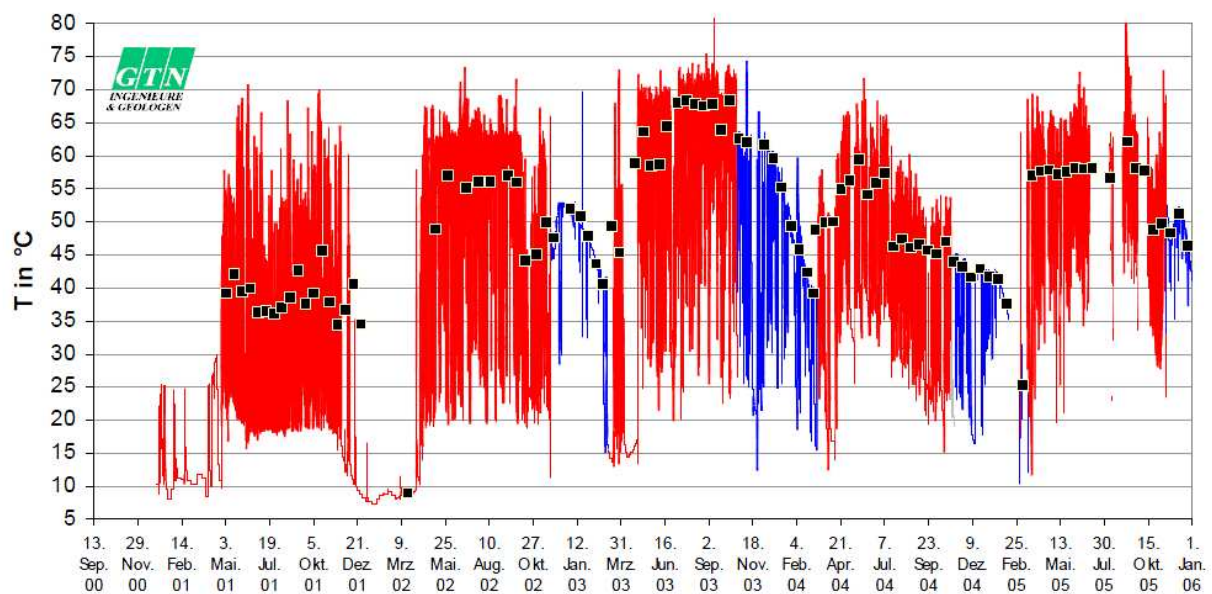


Figure 15 : Evolution des températures du stockage chaud entre 2001-2005[6]

On peut donc voir qu'aucune décharge n'a été réalisée les premières années afin de charger le stock correctement en vue d'une utilisation efficace les années suivantes. Les températures du stock commencent donc à augmenter graduellement au cours des années, puis on observe une première décharge assez faible qui ne fait pas baisser les niveaux de températures. Puis, après 3 années de quasi fonctionnement en charge, une deuxième décharge plus importante cette fois-ci a fait nettement baisser les niveaux de températures du stockage, l'équilibre entre charge et décharge est ensuite atteint.

Des simulations ont été réalisées afin de prévoir cette évolution des températures avec des décharges durant l'Hiver 2008/2009, des mesures ont été réalisées afin de savoir si le modèle de simulation était en adéquation avec les mesures, voici sur la figure 16 les résultats :

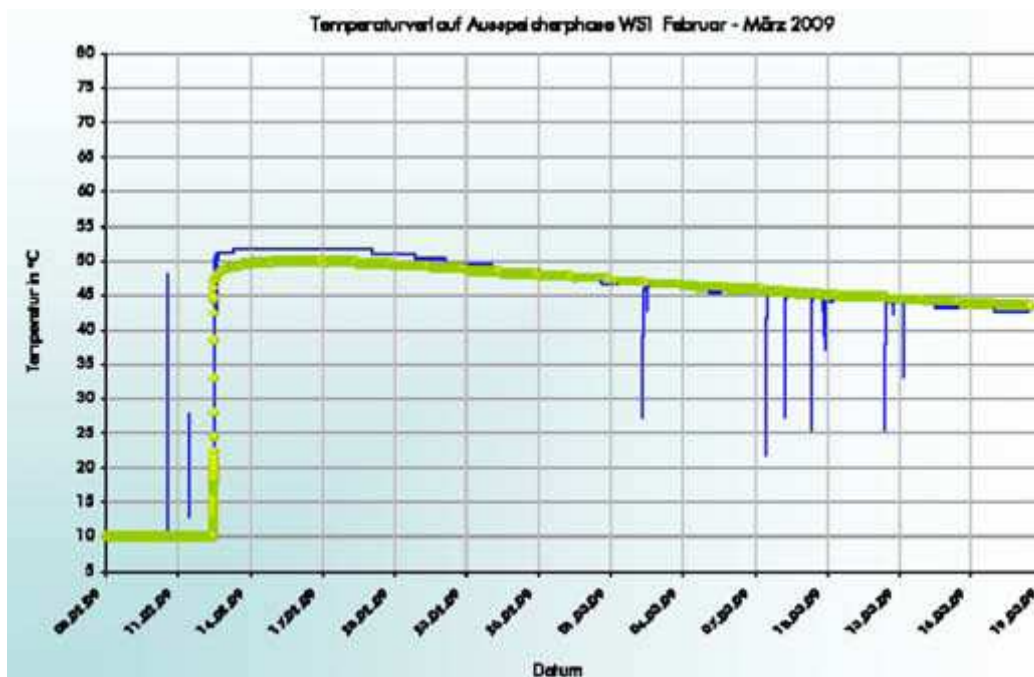


Figure 16 : Evolution des températures du stockage (vert=simulation ; bleu=mesure)[6]

En vert on peut voir les résultats de la simulation et en bleu les mesures effectuées entre 2008/2009. On voit donc que le modèle colle parfaitement avec les mesures.

Un autre projet cité précédemment est celui de Neubrandenburg. Il s'agit d'aquifères dit profonds qui se situent à environ 1250m de profondeur. Voici les différentes caractéristiques de cette installation [6] :

Profondeur :	1228m -1268m
Température de l'aquifère :	55°C
Porosité :	26.6%
Perméabilité :	0.94 μm^2 - 2.8 μm^2
Nbre de puits :	2
Débit de production et d'injection :	100 m^3/h
Démarrage de l'installation	2004
Température d'injection :	80°C
Température de décharge (5 ^{ème} année)	78°C-72°C

Sur la figure suivante on peut voir le gain engendré par le stockage en aquifère sur l'utilisation de la chaudière.

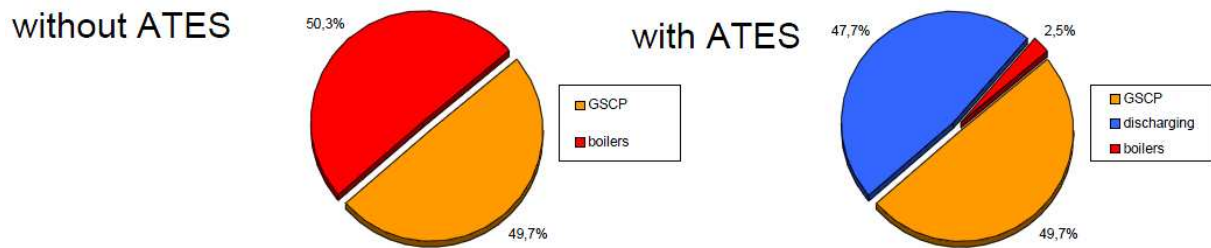


Figure 17 : Représentation des répartitions d'utilisation de chaudière et GSPC avec et sans stockage (GSPC=Gaz and Steam Plant Cogeneration)[6]

La construction de ce stockage a donc permis de passer de 50,3% d'utilisation de la chaudière pour couvrir les besoins à seulement 2,5%.

2.5 Dispositif de stockage en caverne (CTES)

Ce dispositif de stockage, qui fait partie des UTES (Underground Thermal Energy Storage) est peu répandu car il nécessite la présence de caverne. Mais la Suède, qui est un pays où de nombreuses cavernes rocheuses sont présentes, exploite depuis de nombreuses années ce potentiel.

En 1982, l'installation d'Avesta (Suède) consiste en une caverne rocheuse d'un volume de 15000 m³ qui sert d'amortisseur d'énergie dans l'installation de chauffage urbain de la ville. L'eau est chauffée par une usine d'incinération des ordures ménagères et a permis une température maximale de stockage de 115°C. On notera que ce pilote est toujours en service.

En 1983, toujours en Suède mais à Uppsala, une caverne de 115 000 m³ a permis de réaliser un stockage saisonnier ayant une température d'eau de 90°C et plus de 5500 MWh de chaleur stockée.

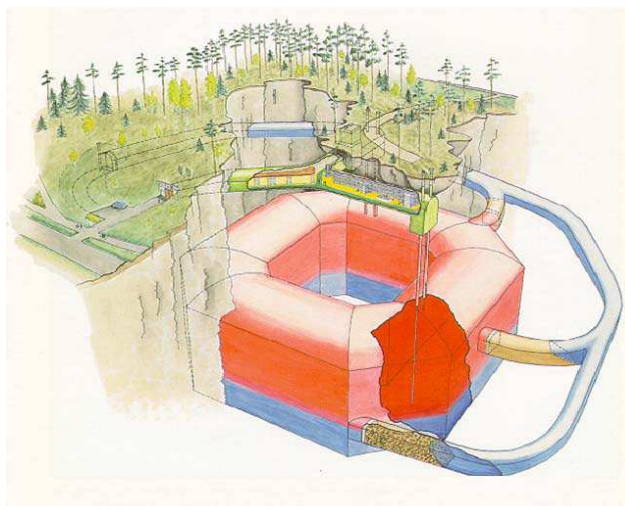


Figure 18: The Uppsala rock cavern heat storage (CTES)

Ce stockage, qui a été connecté au réseau de chauffage urbain d'Uppsala, a été utilisé pour le stockage à court terme et saisonnier de la chaleur. Il a été en partie chauffé par des capteurs solaires et utilisé pour répondre aux pics de puissance du matin et du soir.

Néanmoins, les cavernes de stockage d'énergie thermique nécessitent donc la présence d'une cavité souterraine et d'études géologiques coûteuses en amont de la construction ce qui limite l'application pratique de la méthode de stockage souterrain.

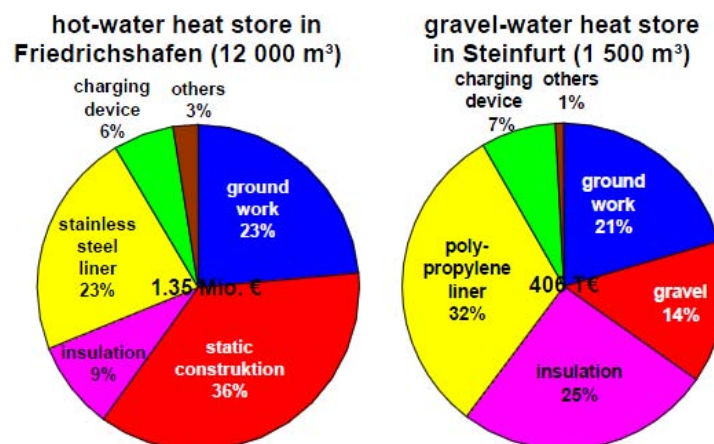
3 Tableau résumé des réalisations et comparaison

Dans cette partie du cahier, nous faisons un inventaire des réalisations en Allemagne et une comparaison entre les techniques les plus utilisées, c'est-à-dire les réservoirs à eau (avec du béton haute densité ou non), les réservoirs mixte gravier+eau (GWTES), le stockage en aquifère (ATES) et le stockage diffusif avec des sondes géothermiques (BTES).

location	type	size [m ³]	start of operation
Rottweil ¹⁾	hot-water (concrete)	600	1995
Friedrichshafen	hot-water (concrete)	12 000	1996
Hamburg	hot-water (concrete)	4 500	1996
Ilmenau ¹⁾	hot-water (GFP)	300	1997 / 98
Hannover	hot-water (HDC)	2 750	2000
Stuttgart ²⁾	gravel-water	1 050	1985
Chemnitz	gravel-water	8 000	1995 / 2000
Augsburg ²⁾	gravel-water	6 500	1997
Steinfurt	gravel-water	1 500	1999
Neckarsulm	duct	63 360	1997 / 98 / 2001
Berlin ²⁾	aquifer	-	1999
Rostock	aquifer	20 000	2000
Attenkirchen	hot-water / duct	9 850	2002

Figure 19 : Installation de stockage saisonnier en Allemagne (GFP=Glass fibre reinforced plastics ; HDC=High density concrete ; 1) pilot store ;2) not within « solarthermie-2000)[4]

On peut voir que depuis le développement des bétons à haute densité, les projets de réalisation avec du béton classique se sont rarifiés. Les projets de réalisation de GWTES sont eux toujours présents et ont connu un regain depuis 1995.



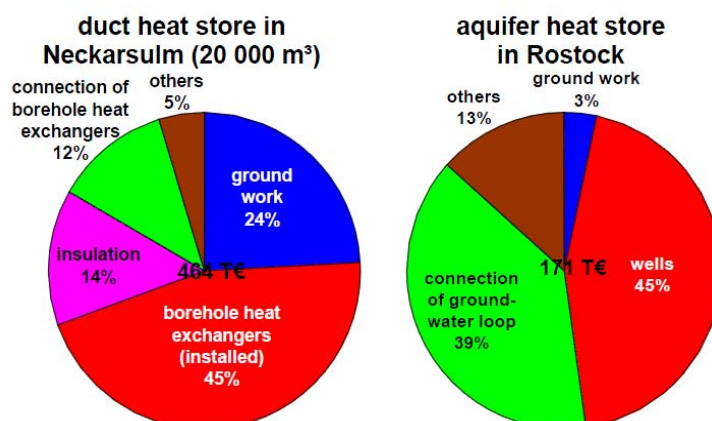


Figure 20 : représentation de répartition des coûts d'investissement par techniques de stockages[4]

Sur la figure 20, on peut voir la composition des couts d'investissement pour 4 techniques de stockages. Concernant le stockage d'eau, le principal investissement est dû au béton de construction (36%). Ensuite, le terrassement et le liner en acier impactent fortement l'investissement (23% chacun).

Pour le système GWTES, la plus importante part d'investissement est due à l'étanchéité de la fosse et donc à la double enveloppe de liner en PP (32%). Ensuite les couts de l'isolation (25%) et le terrassement qui reste toujours une part importante de l'investissement quelque soit la technique de stockage (21%). Le gravier quand à lui ne représente que 14% de l'investissement mais celui-ci est spécifique au site.

Pour l'installation de Neckarsulm de type BTES, la moitié de l'investissement est due au sonde géothermique (borehole HE) qui inclut le prix des sondes et le forage. L'autre moitié comprend l'excavation du terrain, les couts d'isolation et la connexion des échangeurs.

Pour l'installation de type ATES de Rostock, de même que pour une installation de type BTES, les cout de forage des puits représente la moitié de l'investissement. L'autre moitié est en partie due à la connexion de la boucle d'eau.

Type de stock	Projet	Volume m3	Coût spécifique €/m3
Cuve en béton	Friedrichshafen 1996	12'000	112
Gravier-eau	Chemnitz 1997	8'000	126
Sol	Egenhausen	300	179
Cuve en béton	Hamburg 1996	4'500	183
Cuve en béton	Hannover 2000	2'750	241
Cuve en béton	Steinfurt 1999	1'500	405
Cuve en béton	Rottweil 1995	600	452
Cuve en béton	Ilmenau 1998	300	467

Figure21 : coût d'investissement de stocks saisonniers en Allemagne[4]

Sur la figure 21, on peut voir les différents couts spécifiques des stockages réalisés en Allemagne (€/m³). Ainsi, en se reportant au technique d'étanchéité de la figure 8 ainsi qu'à la figure 11, on peut constater l'influence de la technique d'étanchéité sur le prix spécifique du

stockage entre les deux solutions de Friedrichshafen et Hannover. En effet, pour des volumes 4 fois supérieurs on obtient un coût spécifique 2 fois inférieur. Ce surcôt est donc dû à la présence du béton à haute densité (HDC). Les projets de Steinfurt, Rottweil et Ilmenau utilise la même technique d'étanchéité que le projet de Hannover et on donc des couts spécifiques similaires.

On peut aussi voir grâce à ce tableau que seule la technique de GWTES (pour les technologies en réservoir) réaliser à Chemnitz permet d'atteindre des couts spécifiques aussi bas.

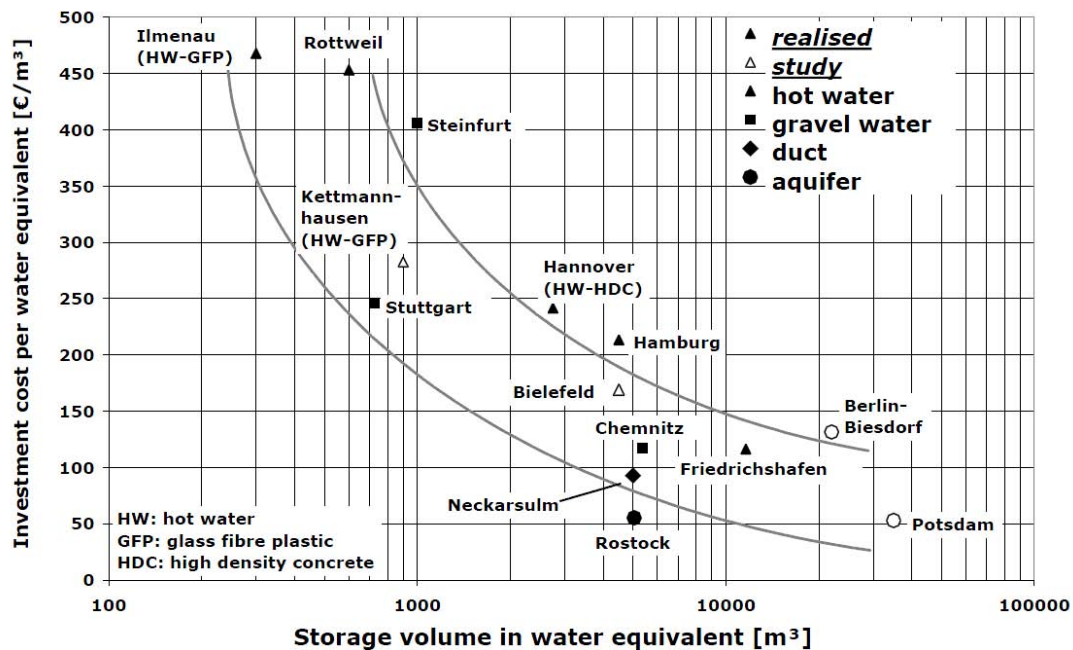


Figure 22 : Coûts spécifiques de différents stocks saisonniers en Allemagne[4]

Sur cette figure 22, on peut remarquer que la plupart des installations de GWTES représente, à volume égal de stockage, un cout moins important qu'un réservoir d'eau saisonnier.

Que ce soit pour un stockage d'eau ou GWTES, le nombre de cycles équivalent qu'effectue un stock durant une année est aussi un paramètre déterminant pour évaluer le coût de l'énergie produite par le stock. Voici un exemple de calcul comparatif [1]:

Stock pour ECS dans un ensemble locatif de 10m³ :

Coût d'investissement : 10'000 €

Durée d'un cycle : 24h

Nombre de cycles équivalent dans l'année : 300

Energie introduite dans le stock entre 10 et 90°C : $10 * 1.163 * (90-10) = 930$ kWh

Pertes thermiques durant 1 cycle : 10%

Energie produite par cycle : 837 kWh

Taux d'intérêt de l'emprunt: 5%

Amortissement sur 20 ans : 5%

Entretien et maintenance : 2%/an

Coût du kWh fourni : $10'000 * 0.12 / 300 / 837 * 100 = 0.5$ € cts/kWh

Stockage saisonnier pour une villa de 10m³

Coût d'investissement : 15'000 € (isolation renforcée)

Durée d'un cycle : max 3 à 6 mois

Nombre de cycles équivalent dans l'année : 10 (attention un stockage saisonnier ne fait pas 1 seul cycle par an)

Energie introduite dans le stock entre 10 et 90°C : $10 * 1.163 * (90-10) = 930$ kWh

Pertes thermiques durant 1 cycle : 25%

Energie produite par cycle : 697 kWh

Taux d'intérêt de l'emprunt: 5%

Amortissement sur 20 ans : 5%

Entretien et maintenance : 2%/an

Coût du kWh fourni : $15'000 * 0.12 / 10 / 697 * 100 = 26$ € cts/kWh

Ainsi d'un faible cout pour un chauffe-eau solaire (0.5), le coût du stock dans la composition d'un kWh solaire passe à une valeur très importante (26cts€) et ce sans même considérer le coût de production de la chaleur. Le nombre de cycles est bien la valeur cruciale pour apprécier le coût de l'énergie fournie par un stock.

Dans une installation solaire avec stock saisonnier la productivité des capteurs peut être doublée. Mais ceci ne suffit pas pour réduire le coût de l'énergie de l'ensemble. Les stocks saisonniers doivent coûter le minimum pour permettre la rentabilité d'une installation.

Nous pouvons alors résumer les avantages et inconvénients de chacune de ces technologies. A même volume de stockage, les technologies de type BTES et ATES ont des couts d'investissement et de construction moins importants que la construction de HWTES et de GWTES. Néanmoins, ces dernières sont plus rapides à construire et permettent, toujours pour un volume équivalent, de stocker plus d'énergie.

4. Applicabilité aux UIOM

Lors de cette étude pour RECORD, il a été question d'étudier la faisabilité et l'applicabilité d'un stockage saisonnier pour la production d'une Usine d'Incinération d'Ordures ménagères (UIOM). Suite à des analyses de fonctionnement de ses UIOM, nous remarquons que les installations sont surdimensionnées (surproduction par rapport à la demande en chaleur) à 75% du temps. En effet, les UIOM fonctionnant généralement en continue et les besoins étant eux intermittents, cela conduit à un surdimensionnement par rapport aux besoins sur les $\frac{3}{4}$ de l'année. Voici ci-dessous un exemple (Cadet/GRETh):

Saison de l'année	Puissance de l'UIOM	Besoin (MW)	% de Puissance de l'UIOM
HIVER	60MW	60	100
INTERSAISON		45	75
ETE		15	25

La période hivernale est de décembre à février. La période d'intersaison comprend les mois de Mars, Avril, Octobre et Novembre. La période estivale est donc de Mai à septembre.

Source Cadet/GRETh

On voit donc bien que l'UIOM devra fonctionner en sous régime, et donc de ce fait ces rendements d'installation seront diminués (bien que le nombre de fours en fonctionnement soient abaissés durant les périodes de basses consommations afin de plutôt faire fonctionner un seul four à fort rendement plutôt que 3 fours avec de faible rendement). On comprend donc bien que pendant 75% de l'année, les UIOM ont un nombre de fours surdimensionné par rapport à la demande en chaleur (et non pas pour la demande en incinération de déchets qui est quasiment constante durant l'année). De ce fait, les questions suivantes nous ont été posées :

-Est-il possible de réguler ce surdimensionnement à partir d'un stockage de l'énergie calorifique en période de surproduction et de l'utiliser en période de forte consommation (réalisation d'un stockage saisonnier) ?

-Dans ce cas, serait-il possible de réduire la puissance de ces UIOM et de la compléter en hiver à partir du stockage saisonnier ?

Pour répondre à ces questions, voici ci-dessous un tableau récapitulatif des quantités stockables d'énergie :

Saison de l'année	Puissance nécessaire	Nbre de jour	Energie stockable (MWh)
HIVER	60MW	90	0
INTERSAISON	45MW	122	43 920
ETE	15MW	153	165 240

Source Cadet/GRETh

Les quantités stockables d'énergie se calculent de la manière suivante : $E = P \times t$

Avec P = Puissance en surplus en MW

t = temps en heure

Donc pour l'intersaison : $t = 122 \times 24 = 2928 \text{ h}$; $P = (60-45) = 15 \text{ MW}$ donc $E = 43920 \text{ MWh}$

Pour l'été : $t = 153 \times 24 = 3672 \text{ h}$; $P = (60-15) = 45 \text{ MW}$ donc $E = 165\,240 \text{ MWh}$

La quantité d'énergie totale à stocker serait donc de 209 160 MWh (209,16 GWh) pendant un temps de 275 jours. Néanmoins, il faut prendre en compte une valorisation de ce stockage afin d'en tirer une utilité. Pour cela, il faut donc revoir les puissances des fours et permettre grâce à ce stockage de baisser la puissance nécessaire et de couvrir les besoins supplémentaires par le stockage (induit par la baisse de puissance des fours). On peut penser utiliser une partie du stockage réalisé l'été pendant les périodes d'intersaison et d'hiver. Ainsi, si l'on abaisse la puissance à 40 MW on obtient les résultats suivants :

Saison de l'année	Puissance nécessaire	Puissance disponible	Nbre de jour	Energie stockable (+) ou à fournir par le stockage (-) (MWh)
HIVER	60MW	40 MW	90	- 43200
INTERSAISON	45MW	40 MW	122	- 14640
ETE	15MW	40 MW	153	+ 91800

On pourrait ainsi stocker 91800 MWh l'été et les utiliser en période d'intersaison pour fournir les 14 640 MWh manquant pour l'intersaison et une partie des 43200 MWh pendant le début de l'hiver.

De ce calcul, on peut donc se rendre compte de l'énorme quantité d'énergie à stocker et donc des volumes que cela peut engendrer. De plus, les températures fournies par l'UIOM sont à un niveau élevé :

Saison de l'année	Puissance	Température (°C)	
		Aller	Retour
HIVER	60MW	180	110
INTERSAISON	45MW	165	110
ETE	15MW	130	110

Source Cadet/GRETh

Ces niveaux de température correspondent par exemple au réseau de chauffage urbain de Grenoble

On peut voir que la température minimale de retour est de 110°C et qu'il faudrait respecter cette contrainte de température de retour du stockage afin de ne pas devoir rehausser le niveau de température en entrée de l'UIOM, et donc engendrer un coût supplémentaire.

Seul un stockage thermochimique ou latent pourrait répondre à ce critère et permettrait de stocker une grande quantité d'énergie avec un faible différentiel de température.

Les niveaux de température très hauts (180°C) et le temps de stockage induiraient de très fortes déperditions même avec une très bonne isolation du réservoir de stockage. Ici, les niveaux d'énergie à stocker sont gigantesques, nous donnons pour mémoire que les plus gros réservoirs de stockage (bassin d'eau ou réservoir à sels fondus) en service sont de l'ordre de la centaine de MWh (Facteur 100 à 1000 par rapport au niveau de stockage d'énergie de l'étude). Les plus gros bassins d'eau de stockages réalisés (Allemagne 63000 m³) permettent un stockage saisonnier de l'énergie mais à de bas niveau de température, et les plus gros réservoirs à sels fondus, qui sont installés sur les centrales à concentration solaire, et qui ont donc des niveaux de température élevés ($T_{\text{stock}} > 150^\circ\text{C}$) ne permettent qu'un stockage horaire à journalier de l'énergie (Andasol 1010MWh). De même, les projets de recherche en cours (notamment ceux du DLR) sont des stockages horaires et les pilotes industrielles réalisés sont de l'ordre du MWh. La réalisation d'un tel stockage demanderait donc d'énormes moyens de réalisation, liés à la taille du stockage et à la surface de l'échangeur à mettre en jeu.

Sachant que l'UIOM ne permet pas de stocker de l'énergie calorifique pendant la période hivernale (décembre, janvier et février), il est logique qu'aucune valorisation de stock ne soit possible pour les mois d'intersaison de mars et avril (puisque aucun stockage n'est possible au préalable). Seul un stockage durant la période d'été en vue d'une réutilisation pour les mois suivants serait possible.

On peut aussi faire un calcul afin d'évaluer le volume et la taille de stockage que ce système pourrait engendrer:

$$\text{Energie à stockée} = 91\,800 \text{ MWh} = 3.3048 \times 10^{14} \text{ Joules}$$

$$\begin{aligned} \text{Avec} \quad C_{\text{eau}} &= 4180 \text{ J/kg.K} \\ \text{DT de stockage} &= 70\text{K} = (180-110) \end{aligned}$$

Il faudrait donc, avec de l'eau comme liquide de stockage, avoir un volume de :

$$E = m \cdot C_p \cdot \text{DT} \Leftrightarrow m = E / (C_p \cdot \text{DT}) = 1129,5 \times 10^6 \text{ kg}$$

Soit l'équivalent d'un volume de 1,13 Millions de mètres cube (avec une masse volumique de 1000 kg/m³).

Si l'on prend un ratio hauteur/diamètre = 1, alors on devrait avoir l'équivalent d'un cylindre d'un diamètre et d'une hauteur de 112.9m.

Même si l'on sait que les pertes d'un stockage d'une telle envergure seraient faibles par rapport à la quantité d'énergie stockée, on se doute bien qu'un tel stockage est irréalisable et nécessiterait une grande quantité d'isolation. Sans compter que pour de tels niveaux de

température il faudrait maintenir cette enceinte de stockage sous une pression de l'ordre de 10 bars, et il serait donc nécessaire de mettre en œuvre une très grande épaisseur et donc un coût de matériaux énorme (béton haute densité). L'installation ne serait donc jamais rentabilisée et donc non envisageable.

Réflexion sur une valorisation envisageable :

Une solution qui peut-être envisageable est l'utilisation de la chaleur excédentaire d'été afin de produire du froid (qui en plus est en forte demande lors des périodes estivales), via des systèmes à absorption et un réseau d'eau glacé (ou RFU = Réseau de Froid Urbain). C'est le cas de la ville de Paris (production d'eau glacée via des groupes froid à compression).

Néanmoins, la construction d'un RFU nécessite une étude et des travaux très importants. En effet, dans un RFU, la distribution assure la liaison entre la production et les utilisateurs. Cette partie du système fait l'objet d'études attentives dès la conception du RFU (mais aussi tout au long de sa vie, chaque fois qu'un nouvel événement se présente comme par exemple le raccordement éventuel d'un nouveau client) pour l'adapter à un nouveau profil de charge. C'est un élément de coût du RFU très important dès l'investissement et tout au long de son exploitation. En effet, la mise en place d'un RFU est très onéreuse et perturbatrice (la plupart du temps en sous-terrain et en milieu urbain) et nécessite des travaux considérables pour atteindre des utilisateurs souvent lointains de la zone de production.

Le tracé et le dimensionnement des canalisations impliquent aussi une vision de la charge sur l'avenir en nécessitant un plan de développement difficile à établir compte tenu des multiples paramètres qui interviennent (les travaux conduisent à poser des canalisations qui ne seront pas immédiatement rentabilisées car elles traversent souvent des voies importantes de circulation).

À partir des paramètres fixés par le cahier des charges des clients et du régime des températures déterminé en production, l'optimisation du réseau intègre la réduction des diamètres des canalisations, donc des débits, mais aussi la réduction des pertes de charge et des gains thermiques qui contribuent à réchauffer le fluide frigoporteur sur son parcours. Ces aspects ont un impact bien plus important pour les RFU que pour les réseaux de chauffages urbains (RCU) car l'écart maximal possible de température entre départ et retour est de l'ordre de 12 à 15 K, ce qui conduit à des canalisations de dimensions très importantes, alors qu'en RCU, les écarts vont jusqu'à 50, voire 80 K, ce qui permet de réduire significativement la taille des canalisations et donc le coût des réseaux.

Les technologies actuelles offrent un choix important de solutions pour la construction des réseaux, allant des classiques tuyauteries en acier en caniveau aux tubes en époxyde armé de fibres de verre en pose enterrée, sans isolation sur le retour.

Le coût du pompage est une des dépenses importantes du bilan d'exploitation qu'il faut maîtriser au mieux, en adaptant le débit à la demande, en réduisant les pertes de charge et en maintenant un écart de température aussi élevé que possible entre départ et retour, pour que chaque mètre cube distribué transporte le maximum d'énergie (notion de COP de transport = ratio entre l'énergie distribuée et l'énergie dépensée pour le pompage). Cela explique les recherches en cours pour mettre au point des additifs et des « fluides intelligents » permettant de réduire les pertes de charge sans réduire les échanges thermiques et la capacité

calorifique.(cf. *cahier n°6 : les milieux diphasiques solide-liquide pour le stockage et le transport de chaleur*).

De plus, les frais d'exploitations du réseau comprennent le traitement d'eau, la recherche des fuites, la surveillance de l'isolation thermique, de la corrosion et de la robinetterie, ce qui en fait aussi un poste important du budget d'exploitation.

Une autre voie de valorisation similaire serait la généralisation d'installation de groupe à sorption sur les zones d'usages. Ainsi, un RCU pourrait alors directement alimenter ses groupes à absorption qui produirait du froid directement sur la zone d'usage.

5. Recommandations générales

On a donc pu voir que de nombreuses installations de stockages saisonniers ont été développées par le passé et sont toujours en développement de nos jours. Néanmoins, ce domaine s'applique surtout au solaire thermique et peu d'études ont été réalisées pour des couplages avec des usines d'incinérations d'ordures ménagères.

Un stockage saisonnier nécessite de très importantes études en amont d'un projet, mais aussi de lourds investissements matériels et en construction. Ce sont souvent des projets très onéreux et risqués en terme d'investissement.

6. Bibliographies

[1] **Jean-Christophe HADORN, Peter Riederer , Orlando Catarina**, Comparaison internationale Bâtiment et énergie - C7 - STOCKAGE DE CHALEUR – 12/2007-CSTB-ADEME-PUCA

[2] **A.V. Novo et al**, Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel–water pits, Applied Energy 87 (2010) 390–397

[3] **Jacques DELBÈS, Adrien VADROT** Réseaux de froid urbain - Réseaux de distribution
Référence BE9322 | Date de publication : 10 avr. 2000

[4] **T. Schmidt, D. Mangold, H. Muller-Steinhagen**, SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE IN GERMANY-ISES Solar World Congress 2003.

[5] **D. Bauer, R. Marx, J. Nußbicker-Lux, F. Ochs, W. Heidemann,H. Muller-Steinhagen**, German central solar heating plants with seasonal heat storage- Solar Energy 84 (2010) 612–623

[6] **Burkhard Sanner, Frank Kabus , Peter Seibt and Jörn Bartels**, Underground Thermal Energy Storage for the German Parliament in Berlin, System Concept and Operational Experiences-Proceedings World Geothermal Congress (2005)

ANNEXE 2



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°2 : Techniques de stockage par chaleur sensible
liquide à Haute Température**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. LES CRITERES DE CHOIX D'UN FLUIDE POUR LE STOCKAGE PAR CHALEUR SENSIBLE A HAUTE TEMPERATURE	3
3. MATERIAUX ET MISE EN ŒUVRE.....	3
3.1 Propriétés thermo-physiques	3
3.2 Différents procédés de stockage par chaleur sensible à haute température.....	4
3.2.1-Le stockage d'eau chaude sous pression (WaterTES)	4
3.2.2-L'huile comme liquide de stockage	8
3.2.3- Les sels fondus comme liquide de stockage	10
3.2.4- Le stockage en géothermie profonde	13
4. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	15
5. BIBLIOGRAPHIE	15

1. Élément de contexte

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 critique pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représente une grande part d'énergie perdue dans notre société. 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 (cf. cahier introductif) mais dans ce cahier nous aborderons le thème du stockage par chaleur sensible sous forme liquide.

Le stockage par chaleur sensible consiste à mettre en contact un fluide primaire avec le milieu de stockage (fluide ou solide) qui se trouve à température distincte du fluide primaire, le résultat de cette opération est alors l'augmentation de la température moyenne du milieu stockant alors que l'état physique de ce milieu n'est pas modifié par ce changement de température (pas de changement de phase). La quantité d'énergie stockée est donc alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité calorifique du milieu de stockage.

Dans ce domaine de stockage on peut trouver l'utilisation des fluides (eau, fluides organiques et huiles synthétiques sont des fluides potentiellement utilisables) ou des solides (béton, céramiques et carbone sont également utilisés dans ces procédés). Dans ce cahier n°2, nous parlerons uniquement du stockage par chaleur sensible en phase liquide à haute températures, c'est-à-dire, dans une gamme de température comprise entre 100°C et 250 °C maximum, ce domaine étant dans la gamme de température des rejets thermiques qui font l'objet de cette étude.

2. Les critères de choix d'un fluide pour le stockage par chaleur sensible à haute température

Le choix d'un fluide de stockage est le résultat d'un compromis entre des critères de natures fort diverses :

- Performances énergétiques élevées, conditionnées par les propriétés thermo-physiques du fluide.
- Sécurité élevée, conditionnée par des caractéristiques d'inflammabilité, d'explosivité et de toxicité.
- Impacts environnementaux limités, conditionnés par de nombreux paramètres suivant tels que la pollution des eaux, des sols ou de l'air.
- Critères techniques variés qui incluent la compatibilité avec les matériaux, les effets du vieillissement, la facilité de mise en œuvre du produit.
- Critères économiques : prix du produit, disponibilité...

3. Matériaux et mise en œuvre

3.1 Propriétés thermo-physiques

Les principales propriétés thermo-physiques à prendre en compte pour caractériser le milieu liquide ainsi que les paramètres performanciels qui s'en déduisent sont résumées dans le tableau 1 :

Propriétés thermo-physiques de stockage	Paramètres performanciels	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Température de congélation et de vaporisation à différente pression	Température minimal et maximal de stockage (haute température entre 100°C et 250°C)	Dimensionnement en pression de la capacité de stockage – Application de la DESP
-Masse volumique ρ [kg/m ³] -Chaleur spécifique massique Cp [J/kg.K]	-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
-viscosité cinématique ν [m ² /s]	-coefficient d'échange thermique entre le fluide de stockage et la paroi de transfert -temps de charge/décharge	Dimensions et conception des échangeurs pour répondre à la dynamique de la production ou de l'usage.
-coefficient de dilatation β [K ⁻¹]		
-Conductivité thermique λ [W/m.K]		

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux pour le stockage en chaleur sensible liquide [Cadet/GRETh]

3.2 Différents procédés de stockage par chaleur sensible à haute température

Il existe de nombreuses solutions de stockage par chaleur sensible liquide. Néanmoins la gamme des hautes températures (comprise entre 100°C et 250°C) restreint le nombre d'applications de stockage. En effet, de nombreux procédés de stockage de chaleur rentrent dans la gamme des basses températures pour des applications concernant le bâtiment c'est à dire des températures notablement inférieures à 100°C. Nous présentons donc, dans la suite du document, les solutions retenues pour des applications à haute température.

3.2.1-Le stockage d'eau chaude sous pression (WaterTES)

L'eau est le liquide de base le plus économique pour des applications de « basse température », du fait de sa facilité d'utilisation (ressource, prix, facilité de mise en circulation..) et de ses propriétés thermo-physiques, il reste néanmoins le problème de sa température d'évaporation sous pression atmosphérique qui est de 100°C.

La seule solution pour utiliser ce fluide dans le domaine de température visée est donc la mise sous pression du dispositif de stockage. Cela induit donc des coûts plus importants en ce qui concerne la réalisation et le dimensionnement du réservoir de stockage pour assurer la tenue à la pression. Ainsi il serait nécessaire d'augmenter la PMS (Pression Maximale de Service) de l'enceinte à 15 bars pour une température de 200°C. (Loi d'Antoine)

L'échangeur de chaleur intégré à ce dispositif devra donc lui aussi résister à de telles valeurs de pression. Il est également évident que l'échangeur de chaleur sera dimensionné en fonction de la puissance à échanger et des niveaux de températures à atteindre. La technologie de cet échangeur dépendra également des débits à traiter, de la nature des fluides et de la pression régnant dans les circuits. En général, il s'agit d'échangeurs cintrés comme montré sur la figure 1'. Les échangeurs sont dotés de grande surface d'échange afin d'assurer un bon transfert thermiques.

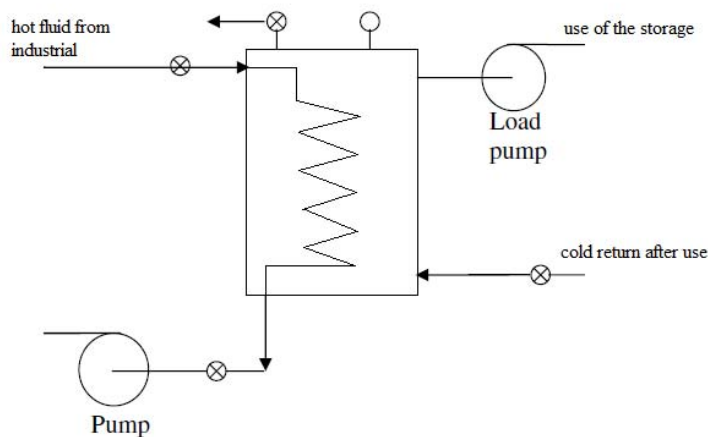


Figure 1 : exemple de système de stockage de chaleur en réservoir d'eau pressurisé avec échangeur immergé [1]

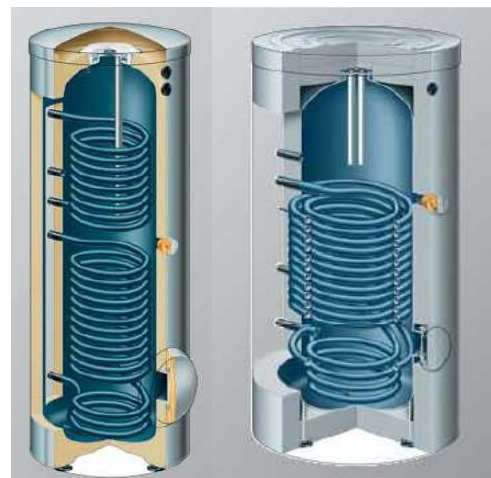


Figure 1' : Vue en coupe de 2 ballon de stockage

Si le fluide chaud (provenant de rejets industriels) est un fluide qui pose problème (autres que de l'eau ou de l'huile), par exemple un fluide corrosif, il ne pourra donc pas être stocké directement dans le réservoir et il sera nécessaire d'utiliser un échangeur immergé à l'intérieur du volume de stockage afin d'échanger sa chaleur avec le fluide de stockage.

De plus, dans un réservoir de stockage le problème de la stratification est à prendre en compte : la différence de densité entre l'eau chaude et l'eau froide crée des couches d'eau à température différente qui peuvent se mélanger grâce, par exemple, à un effet de brassage dû à l'alimentation en eau du ballon de stockage. La fine couche de séparation entre ses deux couches, où siège un fort gradient thermique, est appelée thermocline (voir figure 2). L'épaisseur de la thermocline est un indicateur important de la stratification : elle est fonction de plusieurs paramètres tels que la géométrie du ballon et de l'entrée d'alimentation en eau, ...

Le mode d'injection du fluide, compte tenu du rapport entre forces d'Archimède et forces inertielles, est également un paramètre important dans la formation d'une thermocline. Le nombre adimensionnel de Richardson ($Ri = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \Delta z / u^2$), qui mesure le ratio entre les forces d'Archimède et les forces d'inertie, est un indicateur de la qualité de la stratification : ce nombre devra donc être grand ($Ri > 1$) pour assurer les conditions d'un ballon stratifié.

Il convient en général de diminuer au mieux les échanges entre ces deux couches afin que l'eau chaude ne se mélange pas avec l'eau froide afin d'améliorer la stratification au maximum.

De nombreuses études ont été réalisées qui traitent de cette question : la mise en place d'obstacles au bas du ballon de stockage (tôles de stratification) ainsi qu'une alimentation en eau, toujours dirigée vers le bas du ballon, avec des diffuseurs basse vitesse permettent de diminuer le brassage du milieu froid vers le milieu chaud (limitation de la déstratification).

Ces techniques sont décrites sur les figures 3, 4 et 5.

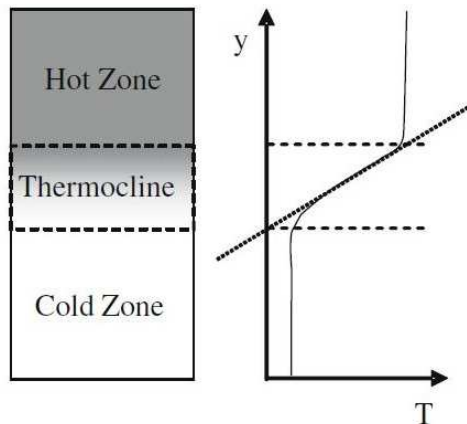


Figure 2 : Thermocline

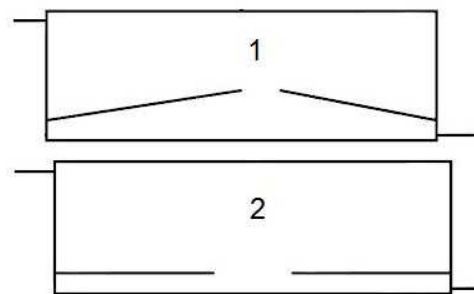


Figure 3 : obstacles améliorant la stratification [5]

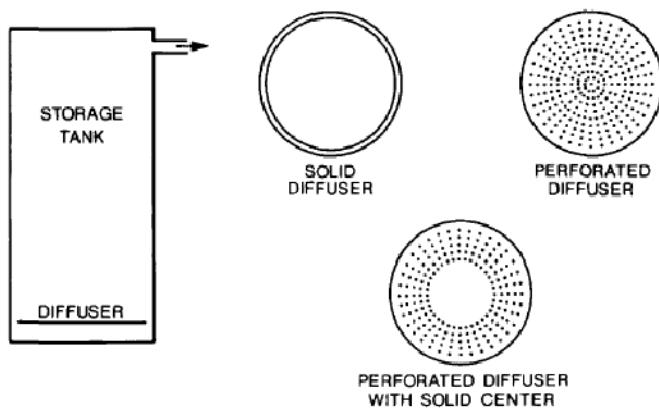


Figure 4 : différent type de diffuseur

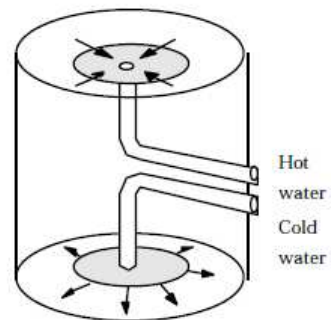


Figure 5

Ces réservoirs de stockage doivent par ailleurs être bien isolés thermiquement, surtout pour des niveaux de température supérieure à 100°C. Une épaisseur suffisante d'isolant (laine de verre, double couche avec injection de mousse polyuréthane (attention : utilisation du polyuréthane à $T_{max}=140^{\circ}C$)) devra donc totalement envelopper le réservoir afin de limiter au maximum les échanges avec le milieu extérieur, mais aussi pour limiter la création de courant de convection au sein du volume de stockage. Une bonne qualité d'isolation favorisera ainsi la stratification.

On peut également envisager d'enfouir ce réservoir de stockage dans le sol. En effet, à partir d'une certaine profondeur, le sol est dit en zone de « hors gel » et le ballon de stockage sera

donc moins soumis aux perturbations météorologiques. Cette profondeur de « hors gel » diffèrent suivant la nature du sol, mais on peut envisager d'entourer le réservoir avec du sable sec ($\lambda=0.15 \text{ W/m.K}$), le tout cloisonné dans une enceinte de béton afin d'améliorer l'inertie du système et de diminuer l'épaisseur d'isolant. (cf. *figure 6*)

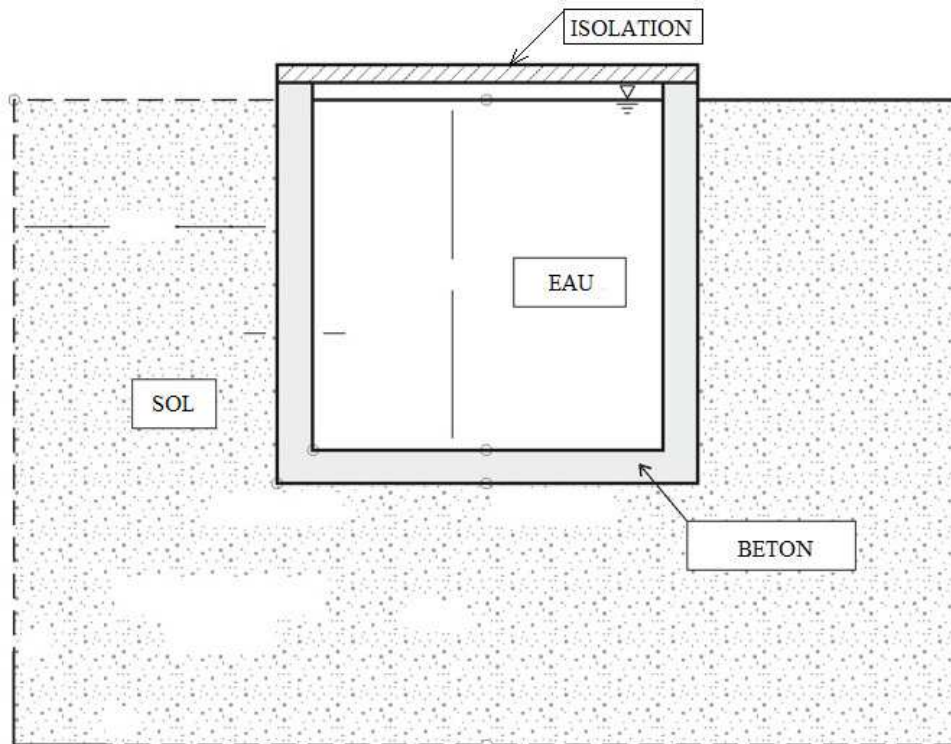


Figure 6 : Underground Water Heat Storage (Underground TES)

On pourra aussi trouver des réservoirs avec agitation pour éliminer la stratification de température et permette une température homogène (mais néanmoins plus basse) dans tout le volume de stockage. Il sera toutefois préférable, pour un stockage à haute température, et ceci afin de ne pas abaisser la température du stockage, d'utiliser un réservoir stratifié qui aura une meilleure efficacité et permettra d'obtenir de plus haute température de stockage.

En ce qui concerne les volumes de stockage, on peut trouver des réservoirs allant d'une dizaine de litres à plusieurs m^3 .

3.2.2-L'huile comme liquide de stockage

Les huiles font aussi partie des solutions envisageables pour des applications de stockage de chaleur à haute température. On distingue les huiles minérales et les huiles synthétiques.

Les huiles minérales commerciales sont généralement à caractère naphthénique. Le point d'éclair des huiles minérales varie entre 200 et 270 °C. Ces fluides ne sont pratiquement pas toxiques et sont bon marché. En contrepartie, leur tension de vapeur, leur point de feu et leur stabilité thermique limitent leur utilisation au-dessous de 300 °C.

L'utilisation d'huile synthétique comme liquide de stockage fait aussi partie des solutions envisageables pour un stockage à haute température. On trouve déjà de nombreux projets où l'huile est utilisée comme fluide caloporteur à hautes températures ($T \approx 400^\circ\text{C}$), notamment pour les centrales solaires thermiques à concentration (CSP) : elle circule à travers des échangeurs de chaleurs pour produire de la vapeur d'eau surchauffée pour générer de l'électricité via les turbines et alternateurs.

En ce qui concerne l'utilisation de l'huile comme fluide de stockage à haute température, ils existent différents points critiques

- les propriétés thermo-physiques des huiles synthétiques sont loin d'être équivalente à celle de l'eau. Par exemple, à même température, la chaleur spécifique de l'huile est environ deux fois moins importante que celle de l'eau et sa conductivité thermique est 6 fois plus faible. Leur viscosités élevées impliquent de grande puissance de pompage.
- la toxicologie, le comportement et la compatibilité vis-à-vis des matériaux en contact avec ces huiles (plastiques, caoutchoucs), mais aussi les risques incendies (point éclair, point de feu) sont à prendre en compte. Il est donc recommandé que ces huiles soient utilisées dans des systèmes avec un gaz inerte. De plus, ces huiles ont tendances à se dégrader avec le temps.

Néanmoins, l'huile synthétique permet d'atteindre des températures nettement plus élevées que l'eau à des pressions de services réduites. Elles constituent donc une solution envisageable pour des applications industrielles.

On distingue deux groupes dans les huiles synthétiques :

- les hydrocarbures aromatiques (alkylbenzène et polyphényles hydrogénés)
- les huiles silicones

Les hydrocarbures aromatiques présentent une stabilité thermique élevée, jusqu'à des températures proches de 400°C. Ce type de fluide permet de couvrir un large domaine d'applications compris entre -50°C et 400°C .

Les huiles silicones présentent plusieurs intérêts :

- Elles couvrent de plus grands domaines de température que les huiles minérales ou aromatiques.
- La variation de la viscosité des huiles silicones avec la température est faible.

Parmi les huiles de transferts de chaleurs utilisés, on pourra citer les huiles Dowtherm et Therminol.

Voici dans le tableau 2 et 2' une liste des huiles thermiques potentiellement utilisables pour l'application visée ainsi que leurs propriétés physiques :

Propriété	Dowtherm RP	Dowtherm G	Dowtherm Q	Therminol 55	Therminol 66
Temperature range	-	-6°C à 360°C	-35°C à 330°C	-25°C-290°C	0°C à 345°C
Boiling point	353°C	289°C	267°C	340°C	359°C
Flash point	194°C	137°C	120°C	177°C	184°C
Fire point	206°C	-	124°C	218°C	212°C
Autoignition temperature	385°C	432°C	412°C	343°C	374°C
Density [kg/m ³]	908.3 (190°C)	911.3 (195°C)	829.3 (200°C)	745 (204°C)	882 (25°C)
Critical temperature	575°C	548°C	489°C	512°C	569°C
Critical pressure [atm.]	20.4	27.56	23.7	13.2	24.3
Specific Heat [J/kg.K]	2126 (190°C)	2158 (195°C)	2208 (200°C)	2560 (204°C)	2210 (204°C)
Thermal conductivity [W/m.K]	0.1093 (190°C)	0.1061 (195°C)	0.0967 (200°C)	0.1069 (204°C)	0.1051 (204°C)
Viscosity dynamique [mPa.s]	0.87 (190°C)	0.62 (195°C)	0.31 (200°C)	0.718 (204°C)	0.825 (204°C)
Vapor pressure [bar]	0.01 (190°C)	0.1 (195°C)	0.17 (200°C)	0.0249 (204°C)	0.0255 (204°C)

Tableau 2 : Propriétés physiques d'huiles Dowtherm et Therminol [Cadet/GRETh]

Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _t /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh _t (US\$/kWh _t)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Liquid media								
Mineral oil	200	300	770	0.12	2.6	55	0.30	4.2
Synthetic oil	250	350	900	0.11	2.3	57	3.00	43.0
Silicone oil	300	400	900	0.10	2.1	52	5.00	80.0

Tableau 2 : Synthèse des propriétés physiques des huiles et prix [7]

En ce qui concerne l'enceinte de stockage, on pourra se référer aux techniques et éléments de conception précédemment décrits pour le stockage de l'eau. Néanmoins, l'utilisation de l'huile comme liquide de stockage permet de disposer de haute température à pression atmosphérique et donc sans mise sous pression du réservoir. Cela implique une diminution des coûts de matériaux (réduction de l'épaisseur de l'enceinte de stockage et donc de la masse totale de matériaux).

En ce qui concerne les effets de stratification, la masse volumique de l'huile ayant une grande sensibilité à la température, les couches chaudes et froide seront aisément séparées et les phénomènes de stratification seront aisément réalisés.

Une très bonne qualité d'isolation, de même que pour le stockage avec de l'eau sous pression, sera nécessaire afin de limiter les déperditions avec l'extérieur et favoriser la stratification. Les mêmes techniques vues précédemment pourront être utilisées (matériaux d'isolation, enfouissement).

L'utilisation des huiles synthétiques, en tant que liquide de stockage, pourra donc être envisager pour des applications à haute température.

-EXEMPLE DE REALISATION :

SEGS II, Mojave Desert, Daggett, California USA: (1983-2001)

-Stockage avec huile minérale (CALORIA)

-Capacité de stockage 115 MWh_{th} (température >300°C)

3.2.3- Les sels fondus comme liquide de stockage

Les sels fondus les plus courants sont formés de nitrite de sodium (NaNO₂), de nitrate de sodium (NaNO₃) et de nitrate de potassium (KNO₃). Leurs principaux avantages est de pouvoir fonctionner à la pression atmosphérique pour des températures comprises entre 150 °C et 550 °C. Pris séparément, ces sels ne sont liquides qu'au-dessus de 300 °C, mais on peut réaliser des eutectiques qui présentent des points de fusion sensiblement plus bas. L'un des eutectiques les plus communs, le HTS1, possède une température de fusion de 142°C. Le HTS1 est un mélange de 40% de nitrite de sodium, 53% de nitrate de potassium et de 7% de nitrate de sodium.

Propriétés physique du HTS [8]:

Température (°C)	250	350
Masse volumique (kg/m ³)	1895	1748
Chaleur spécifique (J/kg.K)	1560	1560
Conductivité thermique (W/m.K)	0.43	0.3
Viscosité dynamique (N.S/m ²)	4.57x10 ⁻³	1.53x10 ⁻³
Température de fusion (°C)	146	
Capacité thermique volumétrique (kWh/m ³) entre 250°C et 450°C	152	
Coefficient de transfert thermique (W/m ² .K)	De 5000 à 8000	

Le HTS est un fluide de transfert thermique assez médiocre, il permet d'obtenir des coefficients de transfert thermique de 5 à 8 kW/m².°C si on ne veut pas être pénalisé par les pertes de charges dues à une masse volumique importante. Il est donc meilleur que les fluides organiques mais conduit à utiliser des échangeurs de dimensions relativement importantes.

On peut aussi citer différents sels ainsi que leurs propriétés physiques [7]:

Storage Medium	Temperature		Average density (kg/m ³)	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kgK)	Volume specific heat capacity (kWh _v /m ³)	Media costs per kg (US\$/kg)	Media costs per kWh (US\$/kWh)
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Liquid media								
Nitrite salts	250	450	1,825	0.57	1.5	152	1.00	12.0
Nitrate salts	265	565	1,870	0.52	1.6	250	0.50	3.7
Carbonate salts	450	850	2,100	2.0	1.8	430	2.40	11.0
Liquid sodium	270	530	850	71.0	1.3	80	2.00	21.0

Les applications des sels fondus sont très spécifiques, elles concernent des applications à haute température comme le refroidissement de réacteurs chimiques ou comme fluide caloporteur et de stockage thermique dans certaines centrales solaires. Ainsi, on peut citer plusieurs constructions qui utilisent cette technique de stockage (*Andasol 1, Thémis, Solar*). Pour ces systèmes de stockage, les températures de stockages sont supérieures à 400°C, et dépasse largement le domaine de température visé dans cette étude (100°C à 250°C).

Une des techniques de stockage envisageable, dite indirecte (car deux fluides différents) à 2 réservoirs, utilise 2 réservoirs de stockage à sels fondus (l'autre technique est dotée d'un seul réservoir à stratification dit réservoir en thermocline (voir chap 3.2.1)). L'un est dit à basse température et l'autre à haute température. Pendant les phases de charge, le fluide chaud passe au travers d'un échangeur de chaleur qui transmet ses calories aux sels fondus. Lors du déchargement, les sels fondus du réservoir chaud passe au travers d'un échangeur de chaleur qui échange sa chaleur avec un fluide caloporteur plus froid (ex : production de vapeur à partir d'eau) et se déverse dans le réservoir froid. La vapeur produite peut alors servir à la production d'électricité via un alternateur. L'opération peut être schématisée comme sur la figure 7 suivante :

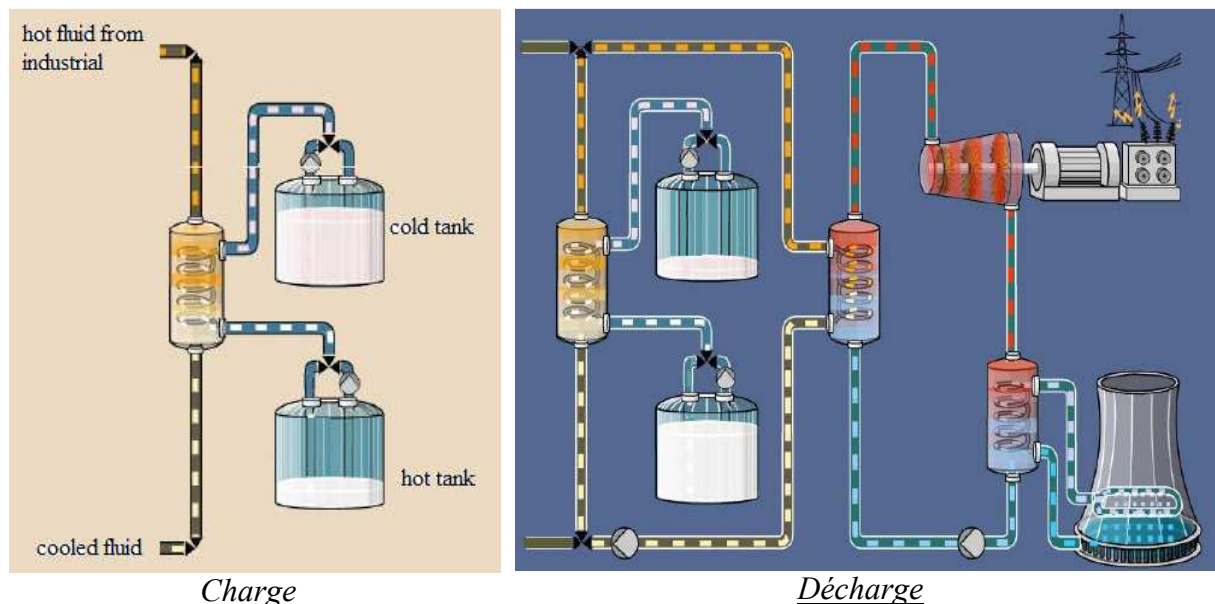


Figure 7 : Système de stockage par sels fondus et production d'électricité [6]

Sur la figure 7.1 suivante, on peut voir l'impact d'un stockage sur la production d'une centrale solaire à concentration:

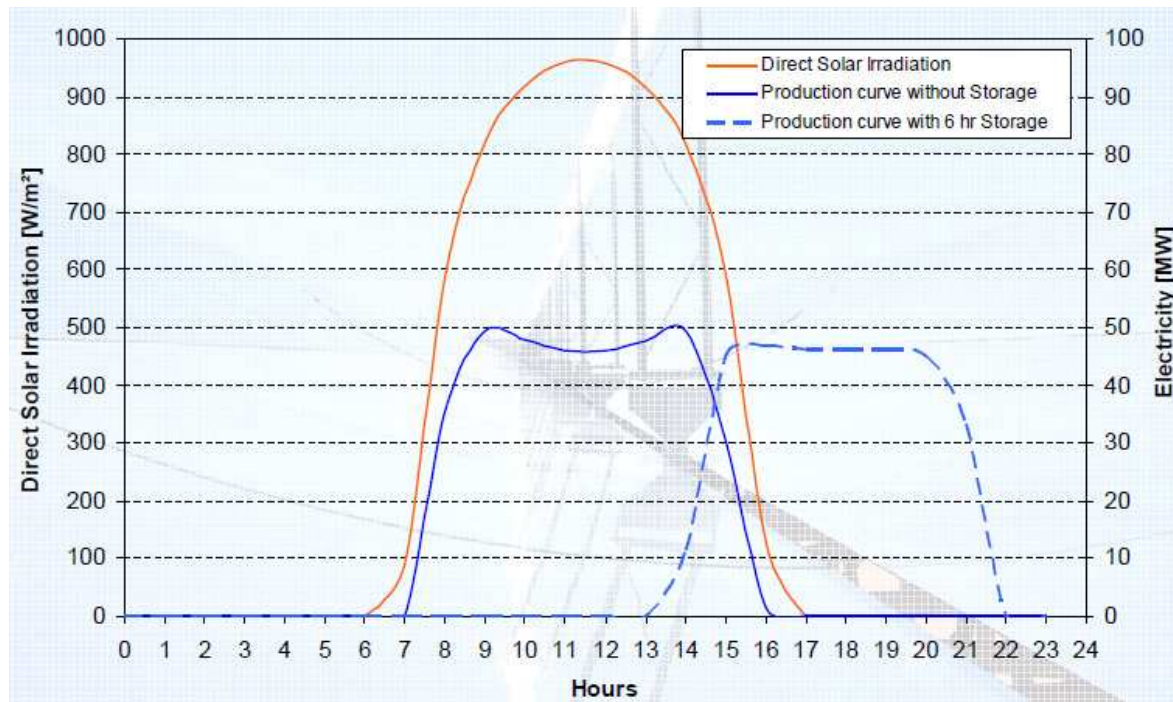


Figure 7.1 : Production with 6 hours storage [6]

S'ils présentent comme avantage majeur par rapport aux fluides organiques d'atteindre des niveaux de température supérieurs à 400 °C, les sels fondus présentent également quelques limites qu'il est nécessaire de rappeler :

- Lors de la fusion du sel, une expansion importante peut être notée : cela impose des précautions quant au démarrage des installations et des règles strictes quant à leur conception, en particulier, la mise en place impérative de vases d'expansion.

- Certains gaz comme le dioxyde de carbone ou la vapeur d'eau peuvent être dissous dans ces sels et former des carbonates et des hydroxydes insolubles. Afin d'éviter ces effets, il est indispensable d'utiliser des gaz inertes (azote, par exemple) pour remplir les vases d'expansion et éviter tout contact entre les niveaux libres de sels et l'atmosphère ambiante.

- A haute température ($T > 400$ °C), ces sels sont corrosifs et il est nécessaire d'utiliser, pour les éléments de tuyauteries et les organes mis en contact avec ces fluides (échangeur de chaleur...), des aciers au chrome ou des aciers austénitiques au chrome-nickel.

- Des réactions peuvent se produire avec certains polymères et amener au dégagement d'oxyde de carbone ou d'azote toxique. Une ventilation suffisante doit donc être prévue pour de telles éventualités.

- Compte tenu des niveaux élevés de température, une fuite sur l'installation peut générer indirectement des risques d'incendie et les précautions nécessaires au confinement du fluide doivent être prises.

Par ailleurs, ces sels ne présentent pas de caractères toxiques ni d'inflammabilité et sont financièrement accessibles.

On peut toutefois conclure que la solution de stockage avec des sels fondus nécessite une ingénierie complexe pour assurer une installation à haut niveau de sécurité.

-EXEMPLE DE REALISATION :

Andasol I (Espagne): (2008)

2 réservoirs à sels fondus
(chaud et froid)

- Capacité de stockage 1010 MWh (7,5h)
- 60% NaNO₃ et 40% KNO₃
- Melting Point = 223°C (292-336°C)
- Hauteur=14m et Ø=37m

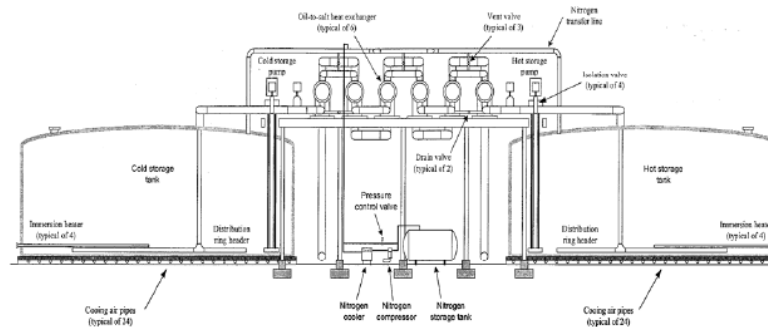


Stockage de chaleur à SOLAR : Ces 2 réservoirs de sel fondu permettent une production électrique de pleine puissance pendant 3 heures sans soleil

Solar Tres (Espagne): (2008)

2 réservoirs à sels fondus
(chaud et froid)

- Capacité de stockage 600 MWh (16h)
- NaNO₃ et KNO₃
- 565°C-288°C



3.2.4- Le stockage en géothermie profonde

Un projet entrant lui dans la gamme de la géothermie profonde est le projet de Soultz-Sous-Forêts. En effet, plus les forages sont profonds dans la croûte terrestre, plus la température des roches augmentent. En moyenne, l'augmentation de température atteint 20 à 30 degrés par kilomètre. Ce gradient thermique dépend beaucoup de la région du globe considérée. Il peut varier de 2-3 °C / 100 m (régions sédimentaires) jusqu'à 1 000 °C / 100 m (régions volcaniques, zones de rift comme en Islande ou en Nouvelle-Zélande).

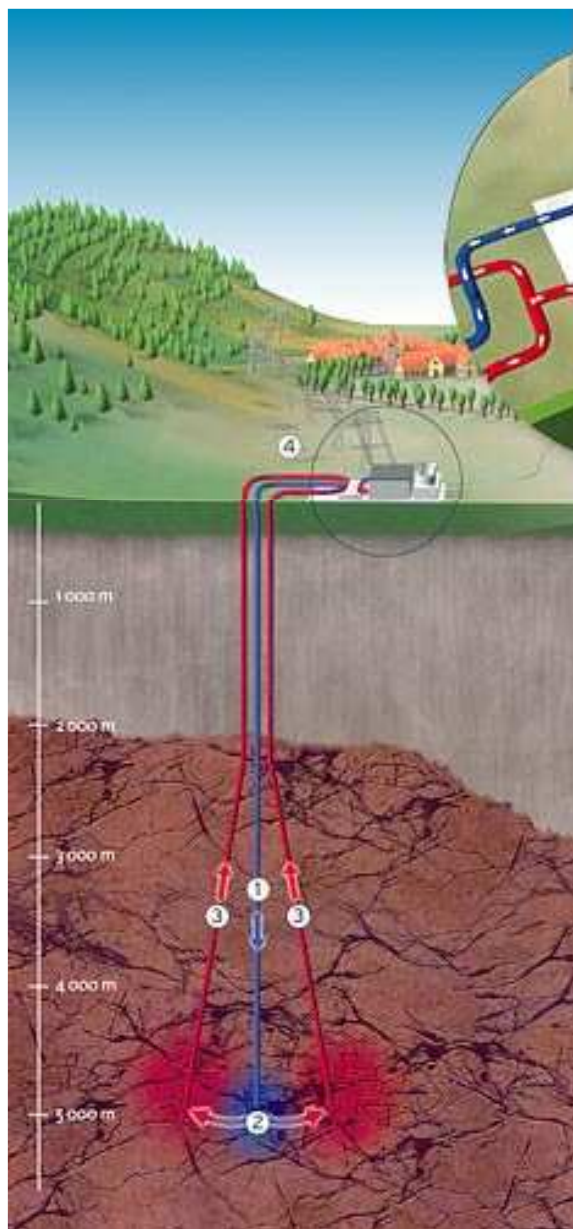
À quelques kilomètres de profondeur, la chaleur du sous-sol pourrait être valorisée. Cette énergie est planétaire, abondante et quasi inépuisable. Elle possède aussi une qualité essentielle à la protection de notre environnement : son utilisation ne génère ni déchet ni gaz à effet de serre. Malheureusement, la ressource de chaleur se trouve en grande partie emmagasinée dans des formations rocheuses peu perméables. En l'absence d'eau, il est donc difficile de la capter.

L'idée est donc venue de créer artificiellement des réservoirs géothermiques en profondeur, en fracturant les roches et en leur injectant de l'eau. Simple dans sa conception mais difficile dans son application, ce concept inventé par les Américains dans les années 1970 correspond à ce que l'on appelle la géothermie profonde ou "géothermie des roches chaudes fracturées" (HFR).

Plusieurs expériences ont été tentées dans le monde pour mettre au point la technique. La plus avancée a démarré en 1987, en France, dans le cadre d'une collaboration franco-anglo-allemande avec le support de l'Union européenne, de l'ADEME et des ministères allemands concernés.

La station est composée de 3 puits de forages à plus de 5000 m de profondeur afin d'atteindre des températures d'eau de 200°C. Un des puits sert à l'alimentation en eau froide et les deux autres au soutirage de l'eau réchauffé.

Contrairement aux puits pétroliers et aux puits de géothermie basse enthalpie du Bassin Parisien, les tubages des trois puits ne sont cimentés que sur les 500 premiers mètres, en fond de puits. En effet, 1 m d'acier se dilate de 1 mm pour 100 °C d'échauffement, les 4500 m de tubage de Soultz se dilatent de plus de 8 m. Une telle dilatation est incompatible avec la bonne tenue de la cimentation, c'est pourquoi les 4000 m supérieurs ne sont pas cimentés.



4-En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique (a) de l'eau chaude du circuit primaire (b) en vapeur dans le circuit secondaire (c) pour entraîner une turbine (d) qui produit de l'électricité (e)

1-Injection d'eau froide à 5000 m de profondeur par le puits central

2 - Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200°C)

3 - Extraction de l'eau réchauffée du sous-sol par deux puits de production

Cette technologie n'est pas destinée à un stockage de chaleur mais plutôt à une production d'électricité grâce au potentiel géothermique, nous pourrions néanmoins envisager d'utiliser cette source géothermique en tant que valorisation énergétique, pour augmenter la température d'eau d'un rejet industriel afin de produire de l'électricité.

4. Recommandations générales

Quelques technologies de stockage en chaleur sensible sous phase liquide ont été étudiées et développées pour la gamme de température concernant cette étude : la technologie des réservoirs à sels fondus est une technologie mature et envisageable s'il on envisage des niveaux de températures assez élevée par rapport à leur point température de solidification ($T > 150^{\circ}\text{C}$). L'utilisation de l'eau sous pression reste une technologie fiable du fait d'une réelle maturité. L'utilisation d'huiles thermique est une technologie plus abordable techniquement (dans ce domaine de température) que celle de l'eau pressurisée.

Lors de l'analyse de faisabilité d'un projet, il sera nécessaire d'évaluer ces trois technologies en prenant en compte les performances intrinsèques de chacune mais également en chiffrant les coûts associées à chacune de ses solutions.

5. Bibliographie

[1] **Govind N. Kulkarni, Shireesh B. Kedare, Santanu Bandyopadhyay**, Design of solar thermal systems utilizing pressurized hot water storage for industrial applications.

[2] **Bo Nordell, Mohamed Grein & Mohamad Kharseh** (Luleå University of Technology). Large-scale Utilisation of Renewable Energy Requires Energy Storage, Int. Conf. for Renewable Energies and Sustainable Development (ICRESD_07)

[3] **Burkhard Sanner and Klaus Knoblich** (Justus-Liebig-University), NEW IEA-ACTIVITY ECES ANNEX 12, "HIGH TEMPERATURE UNDERGROUND THERMAL ENERGY STORAGE"

[4] **C. Marvillet**, Fluides caloporteurs-Propriétés, (2003)

[5] **Necdet Altuntop, Mevlut Arslan, Veysel Ozceyhan, Mehmet Kanoglu**. Effect of obstacles on thermal stratification in hot water storage tanks, Applied Thermal Engineering 25 (2005) 2285-2298

[6] **Frank Niendorf**, Solar Millennium AG, ANDASOL, The Success Story of the first Parabolic Trough Power Plants in Europe, EFEF, Bilbao June 10th 2009

[7] **Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana La'zaro, Pablo Dolado, Bele'n Zalba, Luisa F. Cabeza**. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2009)

[8] **M. ROCHE**, EDF, Département Systèmes énergétiques. L'utilisation d'un mélange de sels fondus pour le stockage de chaleur, revue Phys. Appl 15 (1980) 895-902

ANNEXE 3



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°3 : Techniques de stockage par chaleur sensible
solide à Haute Température**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. LES CRITERES DE CHOIX D'UN SOLIDE POUR LE STOCKAGE PAR CHALEUR SENSIBLE A HAUTE TEMPERATURE	3
3. MATERIAUX ET MISE EN ŒUVRE.....	3
3.1 Propriétés thermo-physiques	3
3.2 Différents procédés de stockage par chaleur sensible à haute température.....	4
3.2.1-Dispositif de stockage en béton haute température (concrete storage) et céramique ...	4
3.2.3-Dispositif de stockage de chaleur en lit à garnissage (pebble bed):.....	8
3.2.4-Stockage directement dans la roche (BoreholeTES).....	16
4. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	17
5. BIBLIOGRAPHIE	18

1. Élément de contexte

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 critique pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représente une grande part d'énergie perdue dans notre société. 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 (cf. cahier introductif) mais dans ce cahier nous aborderons le thème du stockage par chaleur sensible sous forme solide.

Le stockage par chaleur sensible consiste à mettre en contact un fluide primaire avec le milieu de stockage (fluide ou solide) qui se trouve à température distincte du fluide primaire, le résultat de cette opération est alors l'augmentation de la température moyenne du milieu stockant alors que l'état physique de ce milieu n'est pas modifié par ce changement de température (pas de changement de phase). La quantité d'énergie stockée est donc alors directement proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité calorifique du milieu de stockage.

Dans ce domaine de stockage on peut trouver l'utilisation des fluides (eau, fluides organiques et huiles synthétiques sont des fluides potentiellement utilisables) ou des solides (béton, céramiques et carbone sont également utilisés dans ces procédés). Dans ce cahier n°3, nous parlerons uniquement du stockage par chaleur sensible en phase solide à haute température, c'est-à-dire, dans une gamme de température comprise entre 100°C et 250 °C maximum, ce domaine étant dans la gamme de température des rejets thermiques qui font l'objet de cette étude.

2. Les critères de choix d'un solide pour le stockage par chaleur sensible à haute température

Le choix d'un solide de stockage est le résultat d'un compromis entre des critères de natures fort diverses :

- Performances énergétiques élevées, conditionnées par les propriétés thermo-physiques du solide.
- Impacts environnementaux limités,
- Critères techniques variés qui incluent la compatibilité avec les matériaux, les effets du vieillissement, la facilité de mise en œuvre du produit.
- Critères économiques : prix du produit, disponibilité...

3. Matériaux et mise en œuvre

3.1 Propriétés thermo-physiques

Les principales propriétés thermo-physiques à prendre en compte pour caractériser ce milieu solide ainsi que les paramètres performanciels qui s'en déduisent sont résumées dans le tableau 1 :

Propriétés thermo-physiques de stockage	Paramètres performanciels	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Température de liquéfaction	Température minimal et maximal de stockage (haute température entre 100°C et 250°C)	Choix du matériau de stockage
-Chaleur spécifique massique C_p [J/kg.K]	-temps de charge/décharge	-Volume et masse du dispositif de stockage
-Masse volumique ρ [kg/m ³]	-Capacité thermique massique de stockage (kWh/kg ou J/kg)	- Dimensions des briques (modules solides) élémentaires de stockage et de la surface d'échange fluide/matériau pour répondre à la dynamique de la production ou de l'usage.
-Conductivité thermique λ [W/m.K]	-Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ ou J/m ³)	
-Diffusivité thermique [m ² /s]		

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux pour le stockage en chaleur sensible solide [Cadet/GRETh]

3.2 Différents procédés de stockage par chaleur sensible à haute température

Il existe de nombreux procédés de stockage par chaleur sensible solide. Voici donc les procédés retenus pour des applications à haute température :

3.2.1-Dispositif de stockage en béton haute température (concrete storage) et céramique

Le béton est un matériau bien connu en thermique du bâtiment pour son inertie thermique. En effet, l'inertie thermique est la prédisposition d'un matériau à garder longtemps sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de son équilibre thermique. Suite à une perturbation thermique, le temps de réponse du dispositif de l'inertie du matériau qui est quantifiée par la diffusivité en m²/s ($a=\lambda/\rho.C_p$).

Généralement, plus les matériaux sont denses, plus ils sont inertes, c'est la raison pour laquelle on parle aussi de masse thermique.

Le béton, par son inertie thermique élevée, facilement mobilisable et économique, apparaît comme un matériau privilégié pour atteindre cet objectif.

C'est dans cette optique que le Centre Allemand de recherche aérospatial (DLR) et son partenaire industriel Züblin AG ont présenté en septembre 2008 un nouveau système pilote de stockage de chaleur pour centrales solaires thermiques à concentration (centrales CSP). Installé dans la zone de tests de l'Université de Stuttgart, le démonstrateur stocke la chaleur dans du béton et représente une solution performante et à bas coût en vue d'une application commerciale.

Les nombreux tests effectués ont maintenant confirmé la performance du système. Par rapport aux systèmes de stockage thermique par sel fondu actuellement disponibles sur le marché, l'accumulateur testé représente une solution très économique. Ceci a déjà été démontré avec succès en Espagne, sur la Plateforme Solar de Almeria, où le DLR exploite des installations solaires expérimentales.

Grâce au principe de montage du système de stockage, à partir de modules élémentaires, l'accumulateur en béton peut être adapté à n'importe quelle puissance. Il est non seulement approprié pour des applications dans des centrales CSP, mais il trouve également sa place pour le stockage de la chaleur rejeté par les procédés industriels, par exemple, ou encore dans le domaine de la cogénération.

Le système se compose donc de modules en béton qui sont traversés par un faisceau de tubes (échangeur). Le fluide chaud, issue de rejets industriels par exemple, circule à l'intérieur des tubes et cède donc sa chaleur au béton. Le béton absorbe la chaleur du fluide chaud qui circule, et la stocke pendant une courte durée (horaires ou journalière).



Figure 1 : Prototype du DLR

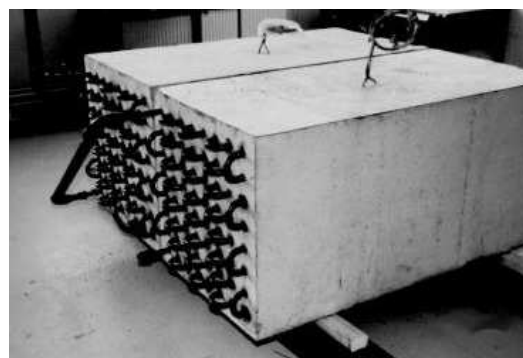


Figure 2 : Concrete Storage probes [2]



Figure 3 : Vue du faisceau de tubes du prototype du DLR et de l'armature

Des projets ont vu le jour avec la même conception mais en remplaçant le béton par des céramiques dites « techniques » ($Al_2O_3+Ox\ Fe$).

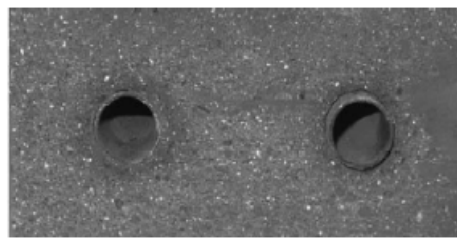
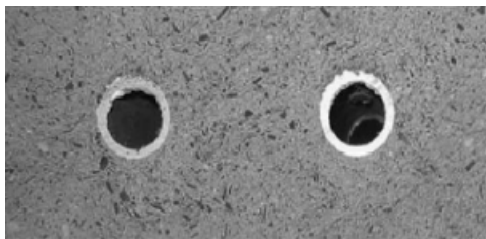


Figure 4 : vue en coupe, béton haute température *Figure 5 : vue en coupe, céramique ($Al_2O_3+Ox\ Fe$)*

Voici, dans le tableau 2 suivant, les principales caractéristiques du béton haute température et des céramiques utilisées par le DLR :

Matériau	Céramique	Béton HT
Masse volumique [kg/m^3]	3500	2750 (2700 à 200°C)
Chaleur spécifique à 350°C [$J/kg.K$]	866	916 (910 à 200°C)
Conductivité thermique à 350 °C [$W/m.K$]	1.35	1.0
Coefficient thermique d'expansion [$10^{-6}/K$]	11.8	9.3
Capacité thermique volumétrique [$kWh/m^3.K$]	0.84	0.7 (0.68 à 200°C)
Résistance du matériau	Faible	Moyenne
Fissure	Presque pas de fissure	Plusieurs fissures

Tableau 2 : Principal propriétés physiques des matériaux de stockage solides utilisés par le DLR[1]

On sait aussi que le coefficient thermique de dilatation du béton est proche de celui de l'acier, ce qui permet aux tubes du faisceau de se dilater de la même façon que le béton et limite donc les contraintes et les risque de fissures.

De plus, le transfert thermique entre le solide (béton ou céramique) et le faisceau de tube est élevé dû au très bon contact entre ces deux matériaux. De ce faite, il y a peu de dégradation thermique des échanges avec le temps.

Néanmoins, les inconvénients d'un tel système sont l'augmentation du coût de l'échangeur de chaleur noyé dans le matériau de stockage et une instabilité à long terme.

A noter que le prix du béton est plus bas que celui des céramiques techniques, mais par exemple, pour un même volume de stockage de 10m^3 et une même différence de température de 100°C , les différents matériaux pourront stocker les quantités de chaleur suivante :

-Béton HT: $Q = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot \Delta T = 2750 \cdot 10 \cdot 0,916 \cdot 100 = 2,519 \times 10^6$ kJ soit **700 kWh**

-Céramique : $Q = 3500 \cdot 10 \cdot 0,866 \cdot 100 = 3,031 \times 10^6$ kJ soit **842 kWh**

Le dispositif de stockage doit être très bien isolé thermiquement afin de limiter les déperditions avec le milieu extérieur, aussi bien au niveau du sol (dalle de béton) que vers l'ambiance. Le dispositif d'isolation devra aussi autoriser un accès aisé afin de permettre des inspections régulières (fissures) et l'entretien courant. La figure 6 suivante montre un exemple de réalisation d'un dispositif d'isolation pour un stockage de chaleur en béton ou céramique.

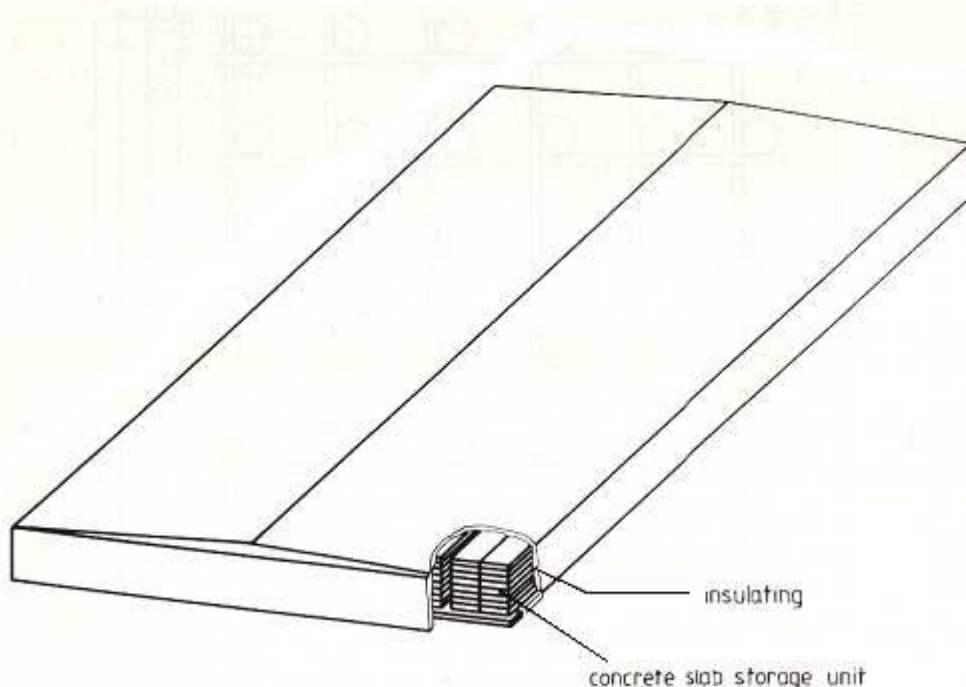


Figure 6 : Dispositif d'isolation avec dalle en béton [2]

Pour conclure, cette technologie de stockage est donc récente mais est déjà présente sur des installations pilotes et possède donc un degré de maturité assez élevé pour envisager une utilisation à court terme.

3.2.3-Dispositif de stockage de chaleur en lit à garnissage (pebble bed):

Un système intéressant permettant le stockage de chaleur à haute température qui est étudié pour des températures supérieures à 100°C, consiste à remplir un réservoir d'un lit à garnissage solide (« solid pebble bed ») et de les mettre en contact avec un fluide chaud (souvent de l'air ou de l'huile) afin que les galets absorbent la chaleur. Une fois la charge réalisée, il suffit de faire passer le fluide froid au travers de ce lit à garnissage afin qu'il restitue la chaleur emmagasinée (décharge) et puisse chauffer le fluide froid.

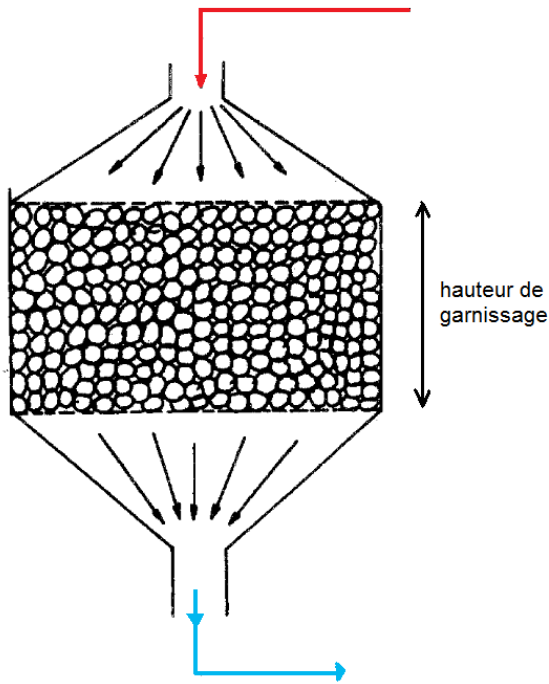


Figure 8: Rock pebble bed Thermal Heat Storage (Charge)

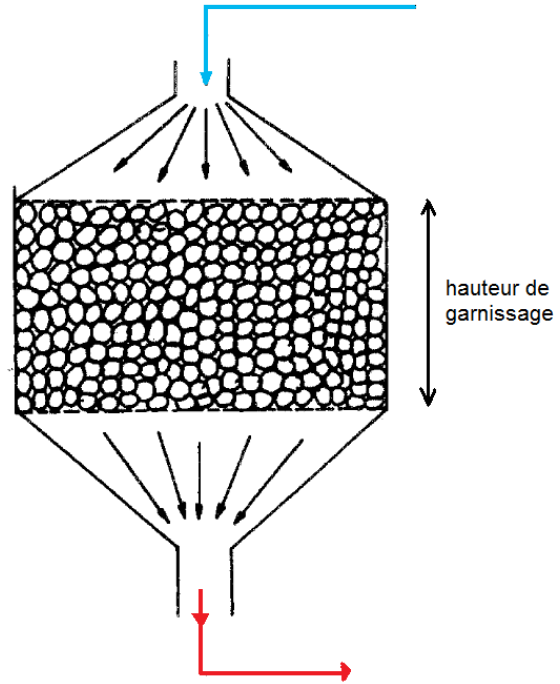


Figure 9: Rock pebble bed Thermal Heat Storage (Discharge)

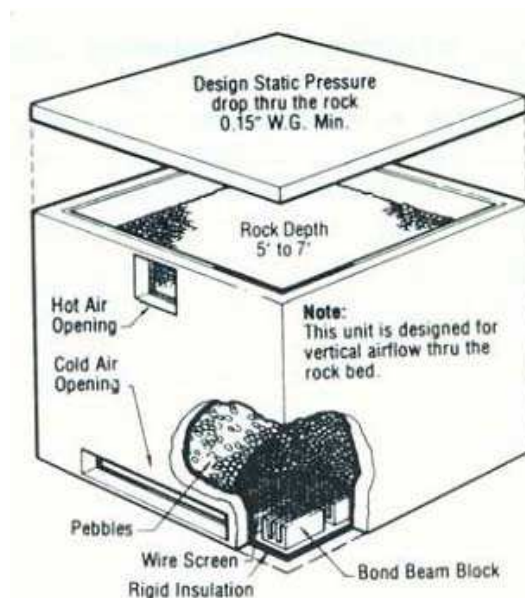


Figure 10 : Autres formes de stockage en lit à garnissage

Les solides fréquemment utilisés pour cette technologie sont des graviers, des billes d'acier inoxydable, d'oxyde d'aluminium ou des morceaux de silice fondue...

Il est évident que la géométrie, le matériau et l'isolation du réservoir influent sur la distribution de chaleur et les déperditions de chaleur, mais aussi sur la stratification. Les performances de ces systèmes de stockage de chaleur dépendent de nombreux paramètres comme la fraction de vide du lit de garnissages, les dimensions des billes de garnissages et du réservoir de stockage (hauteur, diamètre), des propriétés thermo-physiques du fluide de transfert et du solide de stockage. Tous ces paramètres influenceront sur la vitesse de circulation du fluide et donc sur la valeur du coefficient d'échange thermique. On notera aussi que plus le taux de vide au sein du garnissage est petit et plus la perte de charges induite est grande, cela se traduit par une augmentation de la puissance de pompage ou de ventilation. Néanmoins, une réduction de la fraction de vide conduit à une augmentation de la masse des particules présentes dans le lit, une augmentation de la capacité de stockage thermique du lit et aussi une augmentation de la superficie de transfert de chaleur. Pour une géométrie de garnissage donnée, ce taux de vide peut être évolutif (dans une certaines gammes) en fonction de l'agencement de remplissage du lit.

Parmi les métaux, l'aluminium, le magnésium et le zinc ont été mentionnés comme matériau approprié. L'utilisation des médias métallique est utile lorsqu'une conductivité thermique élevée est requise et que le coût est d'importance secondaire. Les déchets solides industriels tels que les copeaux de cuivre, des scories de fer, des scories d'aluminium et de cuivre peuvent être utilisés comme matériau de stockage de chaleur. Divers matériaux réfractaires et différentes pierres peuvent également être utilisés. Une liste des différents matériaux ainsi que leurs propriétés est donnée dans le tableau 3.

Matériau	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]	Masse volumique [kg/m ³]	Diffusivité thermique x10 ⁶ [m ² /s]	Capacité thermique volumétrique [kWh/m ³ .K]
Alumina	765	30	3900	10.05	0.828
Brick	840	0.69	1698	0.484	0.396
Brick magnesia	1130	5.07	3000	1.496	0.941
Concrete	1130	0.9-1.3	2240	0.356-0.514	0.703
Cast Iron	837	29.3	7900	4.431	1.836
Copper	383	385	8954	112.3	0.952
Earth (wet)	2093	2.5	1700	3.558	0.988
Earth (dry)	795	0.25	1260	1.002	0.278
Fused silica	745	0.93	2600	0.48	0.538
Stone, granite	820	1.73-3.98	2640	0.799-1.840	0.601
Stone, limestone	900	1.26-1.33	2500	0.560-0.591	0.625
Stone, marble	800	2.07-2.94	2600	0.995-1.413	0.577
Stone, sandstone	710	1.83	2200	1.172	0.434
Stainless Steel	480	16	7900	4.22	1.053

Tableau 3 : Propriétés thermo-physiques des matériaux solides utilisés pour le stockage de chaleur [Cadet/GRETh]

L'utilisation de roches pour le stockage thermique offre des avantages tels que :

- les roches sont non-toxiques et non inflammables

- les roches sont peu coûteuses
- les roches agissent à la fois comme surface de transfert thermique et de support de stockage.

Le transfert de chaleur entre l'air et un lit de roche est bon, en raison de surface de transfert de chaleur importante, d'une faible conductivité thermique effective de l'amas de roches et des petites surfaces de contact entre les roches. Tous ces facteurs contribuent à de faibles pertes de chaleur du lit de roches.

Les types de garnissages utilisés varient aussi bien au niveau de la forme (sphère, brique, cube, cylindre...) qu'au niveau de la taille (du mm à quelques cm).

De plus, une segmentation au niveau du réservoir de stockage peut être réalisée afin d'augmenter l'efficacité de stockage (cf. *figure 11*), ainsi, en distribuant sur chaque segment la température d'entrée du fluide chaud (charge), la température du stockage au sein du lit de solide sera plus homogène.

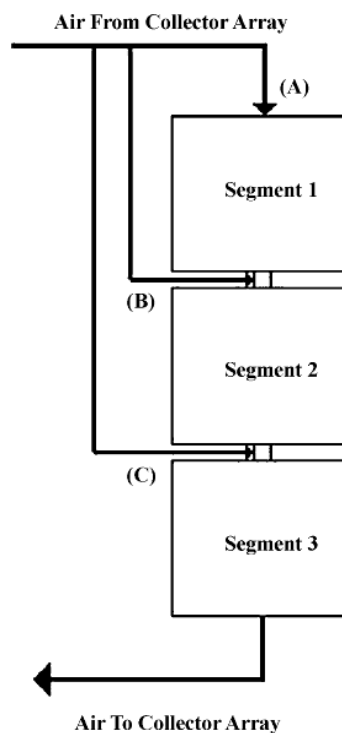


Figure 11 : Arrangement du système de réservoir segmenté[3]

Pour résumer, les lits à garnissage ont été largement étudiés à la fois analytiquement et expérimentalement, ils constituent des systèmes de conception simple et peu coûteuse. Un certain nombre d'études analytiques a été effectué afin d'étudier les effets de différents paramètres sur les performances du garnissage. La forme et la taille des matériaux de garnissage et le taux de vide sont considérés comme des paramètres importants qui affectent les performances du système. Certaines études sont intéressantes du point de vue de l'optimisation sur la base du rapport coût-efficacité.

Par ailleurs, certaines études ont été réalisées avec différents matériaux de garnissage et présentent des corrélations pour les coefficients de transfert de chaleur et de frottement en

fonction de la forme, de la taille du garnissage, du taux de vide et du régime d'écoulement, elles seront nécessaires lors de la conception et du dimensionnement d'un tel dispositif.

Dans cette catégorie de stockage par chaleur sensible solide nous allons donner aussi quelques indications sur la technologie HiTAC.

La technologie HiTAC :

La technologie HiTAC (High Temperature Air Combustion) est une méthode pour améliorer la combustion dans les milieux industriels, permettant la réduction des émissions issues de la combustion, l'amélioration des processus de combustion et l'augmentation des transferts de chaleur pour les applications intensives à haute température.

La principale caractéristique de la technologie de combustion HiTAC est la propagation des processus de combustion à grand volume (généralement au volume total du four) et la réalisation du processus de combustion avec une concentration en oxygène faible. Par conséquent, HiTAC est souvent désigné comme fonctionnant en «combustion volumétrique" ou "combustion sans flamme» (nous reviendrons par la suite sur la définition du mot combustion sans flamme). Ceci, combiné avec une température élevée du processus de combustion, conduit à une température et un flux de chaleur très uniforme et permet d'éviter les pics de température considérables, et réduit les émissions de NOx.

HiTAC fonctionne sur le principe de stockage de la chaleur à court terme en utilisant un échangeur de chaleur régénératif compacte en céramique (régénérateur/échangeur en céramique). Dans les régénérateurs, les gaz de combustion de four et l'air nécessaire à la combustion circule en alternance à travers une chambre remplie de céramique (comme matériau de stockage de chaleur), la chaleur issue des gaz de combustion est stockée pendant le mode de régénération et ensuite libérée à l'air de combustion. Le régénérateur utilisé pour cette application est soit un lit fixe avec des billes en céramique empilées (au hasard) ou des briques ayant une structure en nid d'abeille avec des cellules identiques. Ils récupèrent entre 65% et 85% de la chaleur sur les gaz perdus de fours (issue de la combustion), l'air de combustion entrant peut ainsi être préchauffé à très haute température (environ 50-100 degrés en dessous de la température de fonctionnement du four si des régénérateurs efficaces sont utilisés). Par conséquent, le matériau doit résister aux températures élevées et aux contraintes thermiques dues au gradient de température élevée le long du régénérateur.

En réalité, l'alumine pure est le matériau le plus couramment utilisé dans de telles applications de régénérateur, en dépit de son coût élevé. Afin de réduire ce coût, le régénérateur est fait de matériaux composites dans lesquels seulement la partie chaude est faite d'alumine (la partie froide et le milieu sont faits d'un autre matériel moins coûteux). Par conséquent, la performance thermique du régénérateur, qui est probablement l'élément le plus important du système de combustion HiTAC, est un facteur important pour atteindre la température désirée de l'air de combustion.

L'efficacité d'échange thermique dépend principalement de la structure du régénérateur, les propriétés thermiques des matériaux du régénérateur, le temps de commutation (temps de stockage) et du débit d'aspiration des gaz de combustion et de l'air. Ce temps de commutation/stockage est en général très court (entre 30 et 90 secondes suivant l'efficacité et la géométrie de garnissage de stockage ainsi que du type de matériau utilisé).

La combustion sans flamme :

La combustion sans flamme est l'une des technologies de combustion qui se développe le plus rapidement, ceci est dû au très faible taux de polluants émis et aux économies en combustible que permet d'attribuer à cette technologie un atout indéniable dans le contexte énergétique actuel. Les applications actuelles de la « combustion sans flamme » sont les fours industriels (verre, acier, céramiques).

Le phénomène le plus impressionnant est l'absence de flamme visible (cf. Figure 12). Cette figure montre que la transition entre les gaz frais et les gaz brûlés se fait beaucoup plus lentement dans la combustion sans flamme que dans le cas d'une flamme de pré-mélange. Cette figure montre aussi que le terme "sans flamme" signifie qu'une zone de réaction ne peut pas être localisée, elle est plus large et incolore. Le faible écart de température donne une température presque uniforme dans le four, ce qui est idéal pour l'échange thermique avec une charge. C'est pourquoi la première application industrielle concerne les fours industriels. De plus, la faible température à laquelle se trouve le matériau de l'enceinte comparée à celle des points chauds qui peuvent apparaître avec une flamme classique permet une plus longue durée de vie et une meilleure tenue mécanique.

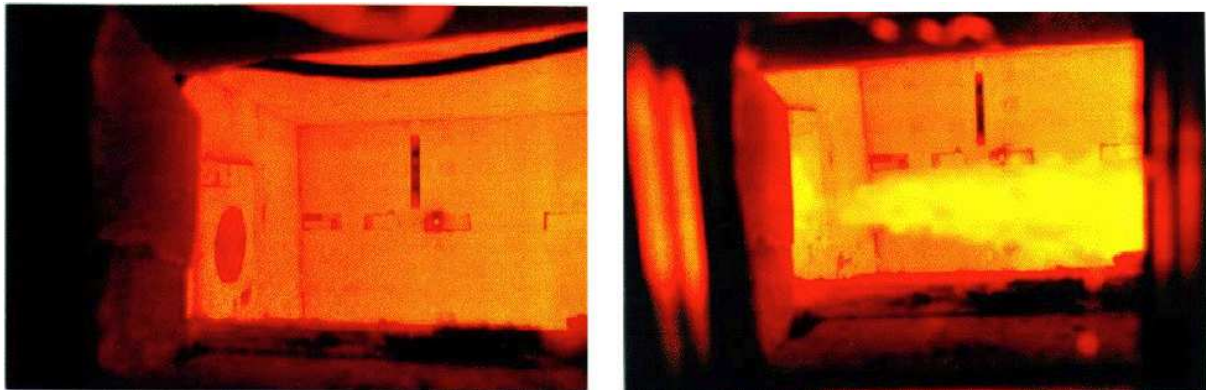


Figure 12 : Comparaison Combustion sans flamme et avec flamme [6]

Le Japon a été le pionnier dans ce domaine au début des années 90 où beaucoup de fours fonctionnent aujourd'hui en combustion sans flamme. Il a ensuite été suivi par les Etats-Unis et l'Europe (Allemagne et Suède principalement). La connaissance scientifique sur ce nouveau mode de combustion est encore limitée et les effets physico-chimiques mis en jeu ne sont pas encore tous expliqués.

La combustion sans flamme peut être caractérisée par des paramètres globaux (température d'injection, débit, température de sortie) mais la manière dont brûlent les réactifs (propagation de flamme, flamme de diffusion, auto-allumage) est encore mal comprise. De multiples définitions du mode de combustion sans flamme ont été déterminées à partir de plage de variation de paramètres globaux :

- FLOX (Flameless Oxidation)
- HiTAC (High Temperature Air Combustion)
- HPAC (Highly Preheated Air Combustion)
- MILD Combustion (Moderate or Intense Low Dilution)

Le mode de combustion sans flamme possède plusieurs caractéristiques :

- Gradients de température faibles
- Très peu polluant
- Economie de combustible
- Peu bruyant
- Pas de flamme visible

Il est obtenu en diluant les réactifs et en préchauffant au moins l'un d'eux (généralement l'air) au-delà de la température d'auto-inflammation. Les combustibles les plus utilisés sont le méthane et le gaz naturel. Si le préchauffage est réalisé sans dilution, il s'agit alors d'une combustion avec de l'air à haute température (HiTAC) qui est caractérisée par une très haute température de flamme. Au contraire si la dilution a lieu sans préchauffage, on risque de dépasser la limite d'inflammabilité et le combustible ne brûle pas. Si aucun des deux procédés n'est utilisé, il se produit une combustion classique. La figure 13 représente le domaine de combustion sans flamme. On constate que la plage de température est réduite par rapport à une flamme conventionnelle.

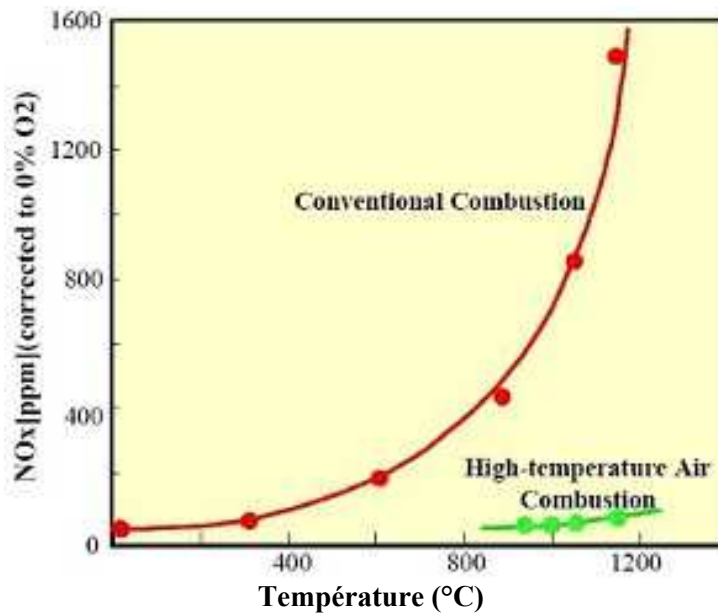


Figure 13 : Emission de NOx dans le domaine de combustion en fonction de la température
[\[http://icsco.eu/technology/hitac.html\]](http://icsco.eu/technology/hitac.html)

Le préchauffage est effectué sur l'air le plus souvent. Cette technique permet de faire des économies en combustible considérable et donc aussi des rejets de dioxyde de carbone moins importants. Dans la combustion sans flamme, le chauffage de l'air assure l'inflammabilité du mélange de combustible, d'air et de gaz brûlés. Dans les fours industriels, l'utilisation d'un couple de brûleurs régénératifs est très efficace pour chauffer l'air. Lors d'un premier cycle l'un des brûleurs injecte les réactifs tandis que l'autre évacue les fumées. Au cycle suivant, leurs rôles s'inversent. Comme ils sont équipés de capacité thermique inertielle, l'air est chauffé par cette capacité qui avait été à son tour chauffée par les gaz brûlés au cycle précédent. Les cycles peuvent durer de trente secondes à une minute. Ce système permet d'atteindre des températures d'injection de 1200°C.

Comme nous venons de le dire, les techniques de récupération les plus performantes (les brûleurs régénératifs) permettent un préchauffage de l'air à plus de 1200°C dans le brûleur avant injection dans le four. Avec un rendement global qui passe de 40 à 80%, ces brûleurs à haute efficacité énergétique présentent également l'avantage, par rapport à des brûleurs

conventionnels, de diviser par deux la consommation de combustible et la quantité d'émission de dioxyde de carbone (un des principaux gaz à effet de serre) pour une même quantité d'énergie transmise à la charge. Pour atteindre ce régime de combustion sans flamme, une géométrie particulière des injections de combustible et d'air induisant une forte recirculation interne des gaz brûlés dans la chambre de combustion doit être utilisée. La configuration optimale de cette géométrie nécessite de disposer d'une compréhension approfondie des régimes de combustion.

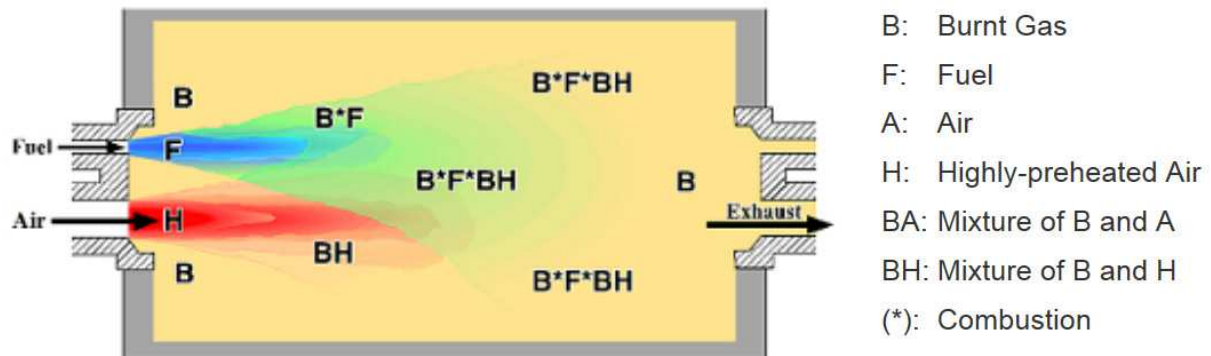


Figure 14 : Système HiTAC [<http://icsco.eu/technology/hitac.html>]

Concernant les différentes évolutions de ces brûleurs régénératifs, différents travaux ont permis d'améliorer certains points, notamment avec les travaux du Japon et des USA pour concevoir de nouveaux brûleurs capables d'utiliser de l'air à très haute température, sans dégrader les émissions de NOx. Les brûleurs régénératifs compacts (à billes de céramique) ont été développés au cours des années 1980 par British Gas puis par Hotwork International. Ils ont permis un meilleur préchauffage de l'air, jusqu'à environ 1000 °C. Au début des années 1990, des constructeurs japonais, NFK (Nippon Furnace Kogyo Kaisha) et NGK Insulators, ont réalisé un autre bond en avant en utilisant des bacs régénératifs à base de nids d'abeille en céramique, et dont le temps de cycle est réduit à environ 30 secondes. Ce procédé a permis de réduire à nouveau la taille des brûleurs, et d'atteindre des différences de température entre produit de combustion et air préchauffé de seulement 100°C. Le tableau ci-dessous permet de comparer les différentes performances des différents éléments de stockage :

Regenerator	Honeycomb (100 cell/in ²)	Ball (20mm dia.)
1. Heat transfer surface area per vol.	1307m ² /m ³ (7 times)	186m ² /m ³
2. Heat transfer coefficient@1.5Nm/s	126W/m ² .K (0.7 times)	174W/m ² .K
3. Equivalent heat transfer rate per vol.	165kW/m ³ .K (5 times)	32kW/m ³ .K
4. Temperature efficiency	90~96%	70~85%
5. Pressure loss@1.5Nm/s, 300mL	88mmH ₂ O (0.3 times)	289mmH ₂ O
6. Weight	500kg/m ³ (0.35 times)	1430kg/m ³

Figure 15 : Comparaison de performances entre différents éléments de stockage [<http://icsco.eu/technology/hitac.html>]

Sans conteste, la technologie de combustion sans flamme nécessite des éléments de stockage performant, autant en terme de matériau que d'agencement.

En effet, le bon agencement de ces matériaux ainsi que de leurs formes permet d'accroître les coefficients de transfert de chaleur et ainsi d'atteindre de meilleures efficacités. Par exemple, dans certains fours de verrerie, des briques munies de turbulateurs sur la longueur qui permettent de casser la couche limite thermique et donc d'augmenter le coefficient d'échange convectif (par 2 en convection forcée), mais aussi de favoriser la turbulence proche de ces parois. Avec un agencement qui favorise aussi un régime d'écoulement des gaz turbulents, on obtient un régénérateur efficace et optimisé :

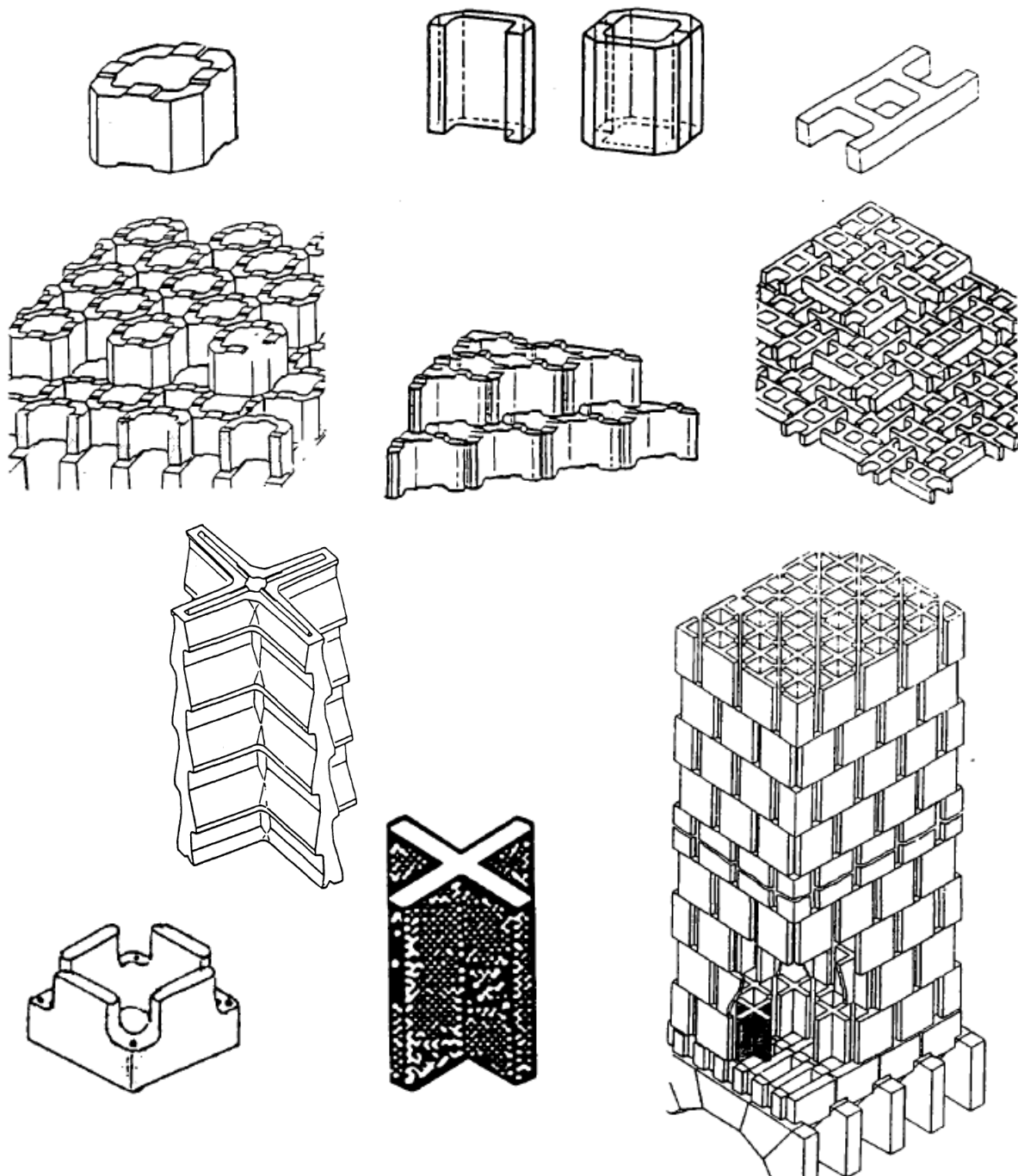


Figure 16 : Différente forme de briques de stockage et d'agencement d'empilement [6]

3.2.4-Stockage directement dans la roche (BoreholeTES)

Un système BTES (Borehole Thermal Energy System) est une alternative à l'ATES (Aquifers Thermal Energy System), il se compose de plusieurs sondes souterraines introduites dans des forages à une profondeur variant de la dizaine à la centaine de mètre, dans lesquelles on fait circuler un liquide chaud à l'intérieur de celle-ci. Comme la terre est plus froide que le liquide chaud, la circulation du liquide chaud au travers de cet échangeur (sonde) provoque l'échauffement de la terre environnante et créer ainsi une bulle thermique servant de stockage saisonnier. En été, l'excédent de chaleur étant important, lors de la charge thermique, la bulle thermique se forme. En hiver, lorsque que la demande en chaleur est forte, on restitue cette énergie emmagasiné grâce à la bulle thermique créé lors de la saison estivale précédente (cf. *figure 17 et 18*).

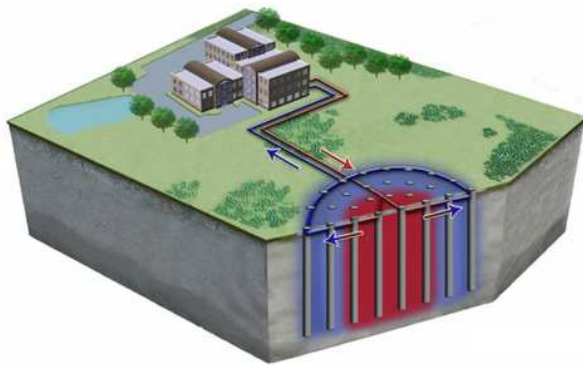


Figure 17: BTES summer Operation-Cooling

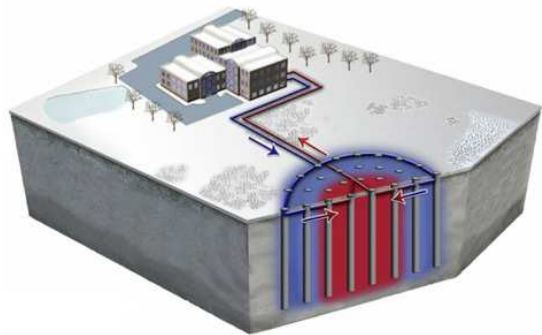
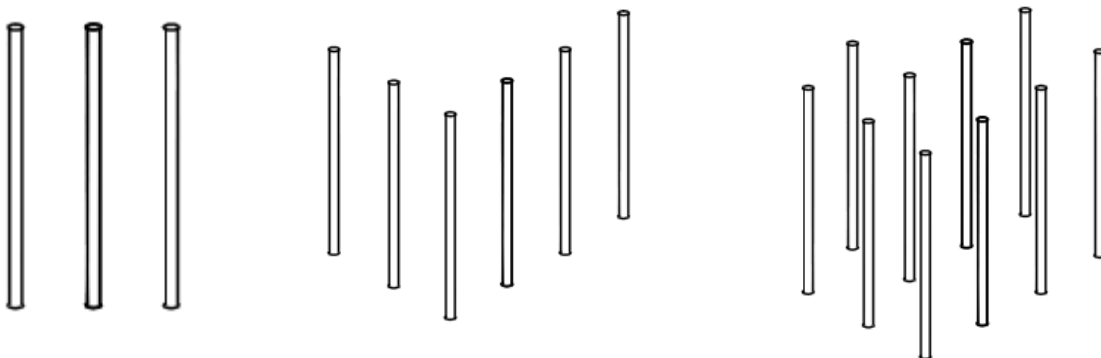


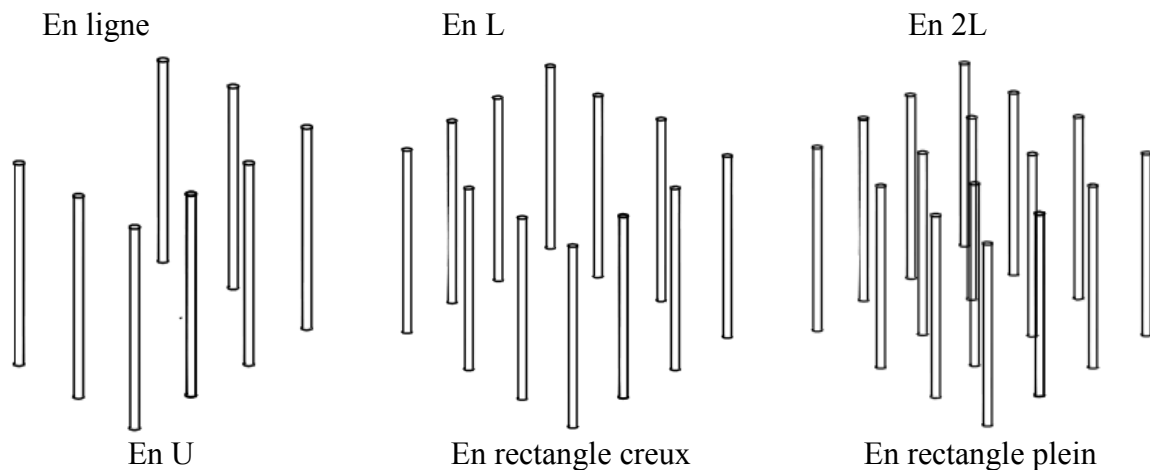
Figure 18: BTES winter Operation-Heating

L'échauffement du sol dépend de nombreux paramètres :

- la nature du terrain (bentonite, sable...)
- des propriétés thermo-physiques du terrain (température, conductivité thermique, chaleur spécifique volumétrique...)
- du type de sondes (coaxial, simple U, double U, triple U), du matériau (PE, PP, Cuivre), du nombre et de l'arrangement des sondes (en ligne, en L, en carré, en rectangle, cf. *figure 19*), de l'espacement entre les sondes, de leur profondeur, de leur diamètre ainsi que de leur épaisseur.
- de la température d'injection du liquide chaud.

Voici sur la figure 14 plusieurs arrangements possibles de sondes :





Figures 19 : différents arrangement de sondes

Malgré une grande utilisation de cette technologie de stockage dans les pays nordique, son utilisation pour des températures de stockage au-delà de 100°C pose quelques problèmes. Les matériaux des sondes comme le PE (polyéthylène) et PP (Polypropylène) sont utilisables jusqu'à une température de 75°C, il devient donc nécessaire, pour des températures supérieures, d'utilisé des polymères qui allie performance thermique et mécanique, ainsi qu'un prix abordable comme le PB (polybutylene) et le PE-X (cross-linked polyethylenes (polyéthylène réticulé, création de lien entre les molécules de polyéthylène afin de crée des ponts d'où le terme « cross-linked »))

Les systèmes appelé « High Temperature BTES » sont associé à des températures supérieures à 50°C (en dessous du domaine visé de température). On peut citer la construction réalisée en 1982 à Lulea (Suède), où plus de 120 sondes ont été introduites dans le sol à une profondeur de 65m, soit une longueur totale de sonde de plus de 7380 m introduite dans un volume de 120 000 m³. Ce stockage permet d'atteindre une température de stockage maximum de 82°C (au centre du stock), dont plus de 50% est utilisé l'hiver ce qui représente une énergie extraite d'environ 1200 MWh.

L'Allemagne aussi présente de très grande installation de type BTES, notamment à Neckarsulm. (Vous pourrait trouver une comparaison de cette installation avec les autres types de stockages saisonniers (ATES, GWTES, HWTES) dans le cahier n°1).

4. Recommandations générales

D'après cette étude sur le stockage d'énergie pour une gamme de température de 100°C à 250°C, peu de systèmes sont existants mais il semblerait que le stockage solide sensible en béton et céramique, comme le prototype développé par le DLR soit prometteur en termes de ratio performance/prix de conception et d'exploitation. On notera tout de même que ses technologies ne permettent pas de soutirer de grand flux de chaleur et nécessite donc des échangeurs de chaleurs de taille relativement importantes.

5. Bibliographie

- [1] **Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana La'zaro, Pablo Dolado, Belén Zalba, Luisa F. Cabeza.** State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2009)
- [2] **Michael Geyer,** Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Plataforma Solar de Almeria, Spain. *CONTEST Concrete Thermal Energy Storage for Parabolic Trough Plants. A Proposal to the 5th Framework Program of the European Union*
- [3] **Harmeet Singh, R.P. Saini, J.S. Saini.** A review on packed bed solar energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2009)
- [4] **D.M. Crandall, E.F. Thacher.** Segmented thermal storage. *Solar Energy* 77 (2004) 435-440.
- [5] **Mahmud M.Alkilani, K.Sopian, M.A.Alghoul, M.Sohif, M.H.Ruslan.** Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1476–1490.
- [6] **Denis LAGARENNE** - Thèse- Récupération d'énergie par les régénérateurs de chaleur des fours de verrerie : expérimentation, modélisation et optimisation – 1990
- [7] **Ludovic FERRAND** - Thèse - Modélisation et expérimentation des fours de réchauffage sidérurgiques équipés de brûleurs régénératifs à Oxydation sans Flamme - 2003

ANNEXE 4



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°4 : les matériaux de stockage par chaleur latente
et leur mise en œuvre pour les applications à basse et
moyenne température**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. LES CRITERES DE CHOIX D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) POUR LE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE A HAUTE TEMPERATURE	4
2.1 Terminologie	4
2.2 Propriétés thermo-physiques	4
3. MATERIAUX ET MISE EN ŒUVRE.....	5
3.1 Classification.....	5
3.2 Les MCP commercialisés.....	9
3.2.1 Les produits de EPS Ltd.....	9
3.2.2 Les produits de RUBITHERM®.....	13
3.2.3 Les produits PURETEMP :	19
3.2.4 Les produits Astorstat® (by Honeywell):	20
3.2.5 Les produits de CAPZO International BV	21
3.2.6 Les produits Pluss Polymers Pvt. Ltd.....	23
3.2.7 Les produits de TEAP	24
3.2.8 Les produits de Climator	26
3.2.9 Le produit E-STOCKER de KAPLAN ENERGY	27
4. LA MISE EN ŒUVRE DES MCP	28
4.1 Les échangeurs de chaleurs tubulaires avec MCP intégrés.....	28
4.2 Réservoir intégrant des MCP	29
4.3 Les matériaux de construction intégrant des MCP.....	36
5. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	41
5. BIBLIOGRAPHIE	42

1. Elément de contexte

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 représente 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 (cf. cahier introductif) mais dans ce cahier nous aborderons le thème du stockage par chaleur latente *pour des applications à basse et moyenne température ($30^{\circ}\text{C} < T < 100^{\circ}\text{C}$)*.

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 jeux des chaleurs latentes intéressantes ($> 150 \text{ kJ/kg}$). 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 (cf. Figure 1).

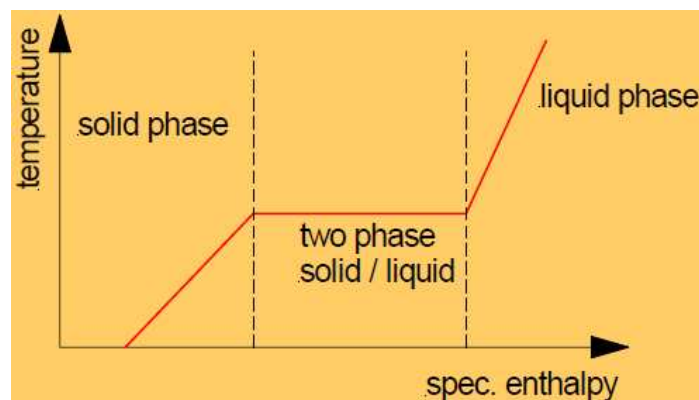


Figure 1 : Représentation du changement de phase

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 $\Delta T = 10\text{K}$ 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 ($C_{p\text{eau}} = 4.18\text{kJ/kg.K}$) (Source Cadet/GRETh) :

Avec le MCP (sensible+ latent) :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot \Delta H = 1 \cdot 2 \cdot 10 + 1 \cdot 150 = 170 \text{ kJ} = 47.2 \text{ Wh}$$

Avec l'eau (sensible) :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 1 \cdot 4.18 \cdot 10 = 41.8 \text{ kJ} = 11.6 \text{ Wh}$$

} Facteur 4

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 $1000\mu\text{m}$. 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 0°C et 100°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 des briques élémentaires de stockage pour répondre à la dynamique de la source.
Liquide : -Conductivité thermique λ [W/m.K] -viscosité cinématique ν [m ² /s]	Temps de charge	

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 :

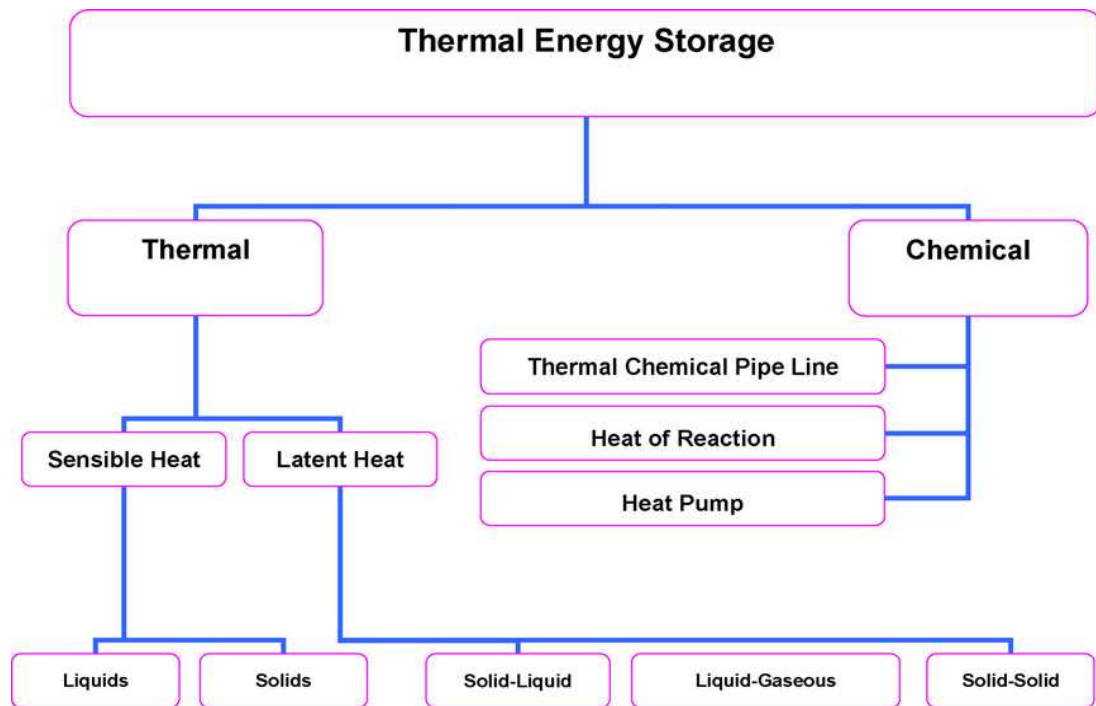


Figure 2 : Classification des techniques de stockage de chaleur

Parmi les différents modes de stockage en chaleur latente (solide/liquide ; liquide/gaz ; solide/solide), il existe plusieurs catégories de MCP suivant leur composition :

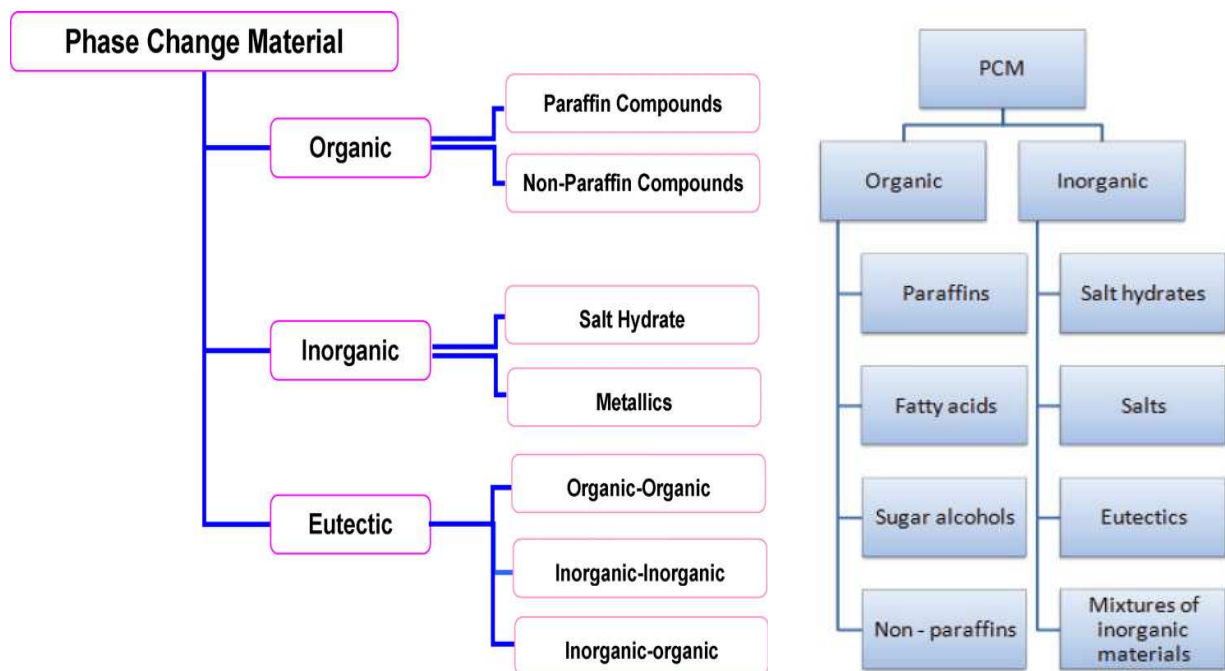


Figure 3 : Classification des types de MCP pour le stockage de chaleur[2]

-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 :

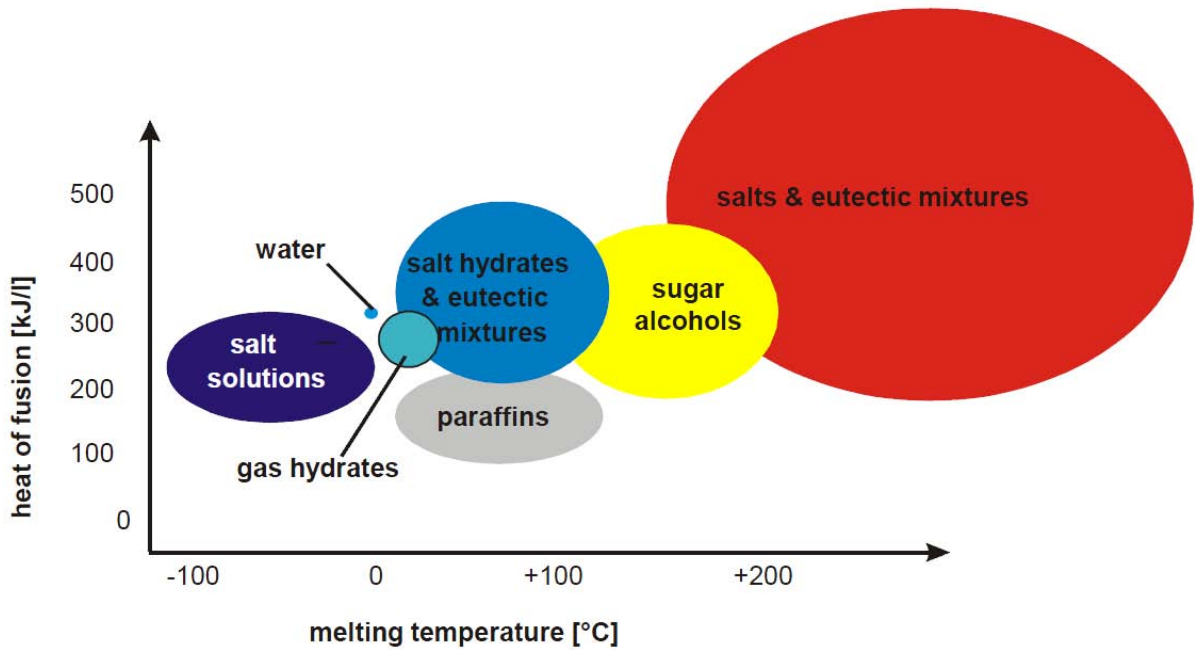


Figure 4 : Répartition des différents MCP en fonction de leur gamme de température d'utilisation

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:

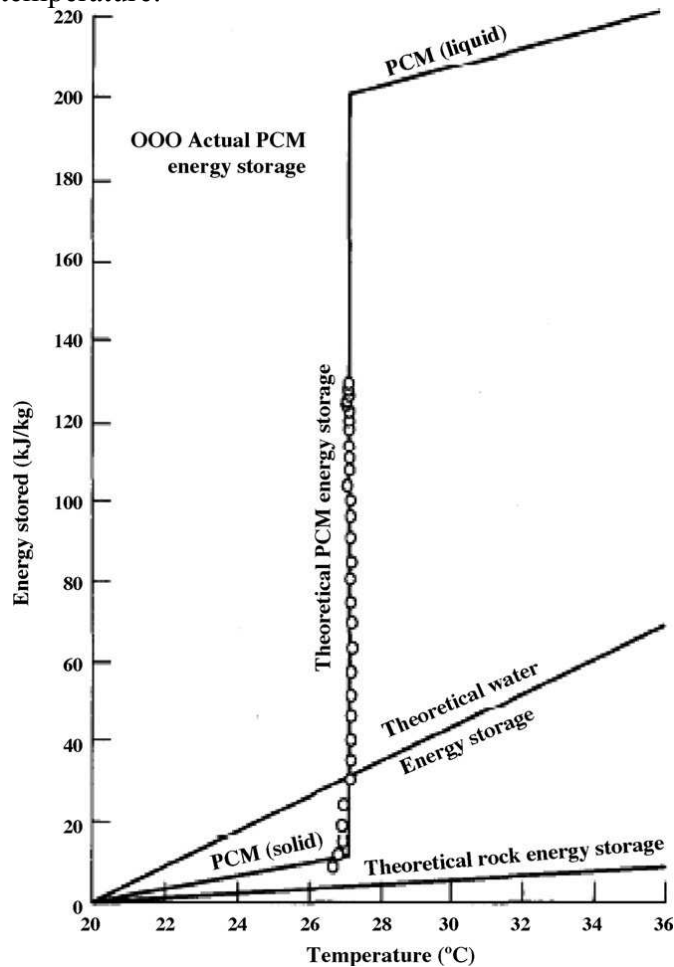


Figure 5: Performance comparison of PCM, water and rock heat storage system[2]

3.2 Les MCP commercialisés

Ces dernières années, de nombreux MCP ont été développés pour des applications à basse et moyenne température, qui sont 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...etc.) que commercialisent les différents fabricants.

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 0°C et 100°C :

PlusICE PCM RANGE (HYDRATED SALT)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m³]- [kWh/m³]	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
S58	58	1505	167	251-69.7	2.55	0.690
S50	50	1601	104	167-46.3	1.59	0.430
S46	46	1587	190	302-83.8	2.41	0.450
S44	44	1584	105	166-46.1	1.61	0.430
S34	34	2100	115	242-67.2	2.10	0.520
S32	32	1460	186	272-75.5	1.91	0.510
S30	30	1304	201	262-72.7	1.90	0.480
S27	27	1530	192	294-81.6	2.20	0.540
S23	23	1530	190	291-80.8	2.20	0.540
S21	21	1530	190	291-80.8	2.20	0.540
S19	19	1520	146	291-80.8	1.90	0.430
S17	17	1525	143	222-61.6	1.90	0.430
S15	15	1510	142	218-60.5	1.90	0.430
S13	13	1515	140	212-58.8	1.90	0.430
S10	10	1470	140	206-57.2	1.90	0.430
S8	8	1475	140	207-57.5	1.90	0.440
S7	7	1700	140	204-56.6	1.85	0.400

Tableau 4 : hydrated salt based PCM solution (Tm<100°C) (EPS Ltd)

PlusICE PCM RANGE (ORGANIC)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m³]- [kWh/m³]	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]
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
A62	62	910	202	184-51.1	2.2	0.220
A60	60	910	197	179-49.7	2.22	0.220
A58	58	910	210	191-53	2.22	0.220
A55	55	905	195	176-48.6	2.22	0.220
A53	53	910	210	191-53	2.22	0.220
A42	42	905	195	176-48.6	2.22	0.210
A39	39	900	190	171-53	2.22	0.220
A32	32	845	215	182-50.5	2.20	0.210
A28	28	789	230	181-50.2	2.22	0.210
A26	26	790	225	178-49.4	2.22	0.210
A25	25	785	172	135-37.5	2.26	0.180
A24	24	790	225	178-49.4	2.22	0.180
A23	23	785	170	133-36.9	2.22	0.180
A22	22	785	172	135-37.5	2.22	0.180
A17	17	785	172	135—37.5	2.22	0.180
A15	15	790	173	137-38	2.26	0.180
A9	9	775	220	171-47.5	2.16	0.210
A8	8	773	220	170-47.2	2.16	0.210
A6	6	770	222	171-47.5	2.17	0.210
A4	4	766	227	174-48.3	2.18	0.210
A3	3	765	225	172-47.7	2.2	0.210
A2	2	765	225	172-47.7	2.2	0.210

Tableau 5 : organic PCM solution (EPS Ltd)

PlusICE SOLID-SOLID SOLUTIONS						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]		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
X40	40	1046	986	131	0.253	0.209
X80	80	1193	1120	192	0.31	0.335

Tableau 6 : solid-solid PCM solution (T_m<100°C) (EPS Ltd)

La dernière 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 16), de tube (TubeICE Concept pour les hydrates de sels, cf. Figure 14) ou de plaques (FlatICE cf. Figure 6), ainsi ces macro-encapsulations de MCP sont intégrés directement dans les réservoirs de stockage.

-FlatICE :

Le produit FlatICE est un contenant en plastique (HDPE) (cf. Figure 6) dans lequel est introduit un MCP. Il peut contenir la gamme de MCP des sels hydratés allant de S7 à S46 ($7^{\circ}\text{C} < T_{\text{fusion}} < 46^{\circ}\text{C}$). Il est empilable (cf. Figure 7) et ainsi permet de créer des réservoirs compacts et efficaces (cf. Figure 9, 10, 11 et 12). Grâce au confinement du MCP dans le FlatICE, il peut être utilisé avec un médium comme l'air ou l'eau, sans risques de contamination. L'entreprise propose des réservoirs de stockage adaptés.



Figure 6 : FlatICE



Figure 7 : FlatICE cross

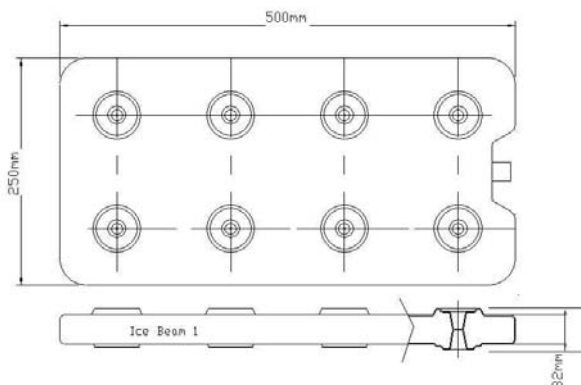


Figure 8 : FlatICE Standard Dimensions



Figure 9 : Réservoir contenant un empilement de FlatICE

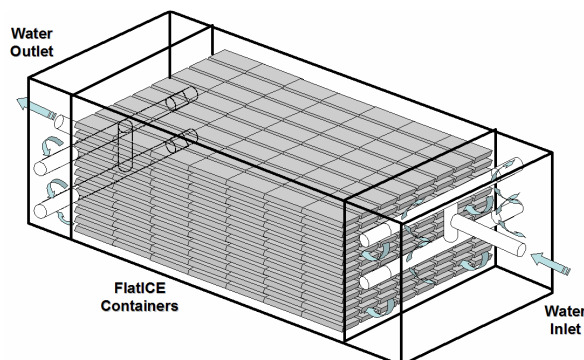


Figure 10 : FlatICE plastic containers (HTF:water)

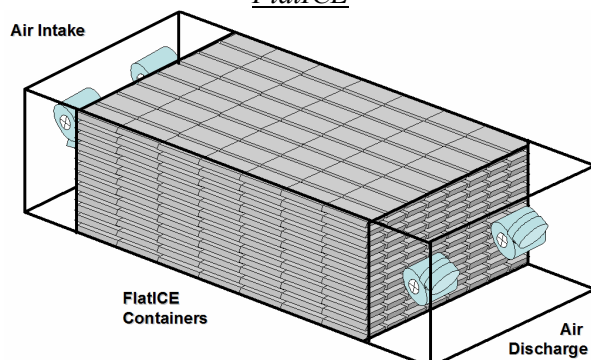


Figure 11 : FlatICE plastic containers (HTF:air)

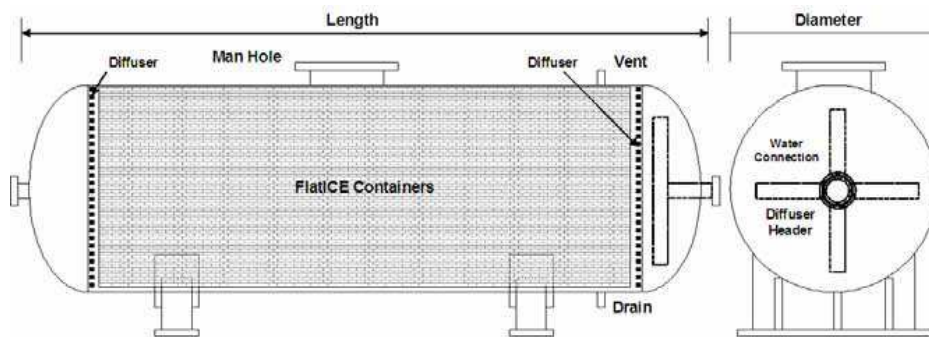


Figure 12 : FlatICE cylindrical Tank

Ses réservoirs peuvent être disposés à l'extérieur, à l'intérieur d'un bâtiment ou dans le sol (enfouissement). Les FlatICE peuvent être agencés 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.

-TubeICE & PlusICE beam :

Le produit TubeICE, de même que le produit FlatICE, est constitué d'un contenant plastique dans lequel est confiné un MCP. Ce produit TubeICE, se présente donc comme un tube (cf. Figure 14), sa gamme de températures d'utilisation est plus large, elle permet de stocker les MCP de la gamme S7 à S117 pour des températures positives ($7^{\circ}\text{C} < T_{\text{fusion}} < 117^{\circ}\text{C}$). (Le produit peut aussi contenir la gamme de MCP E0 à E-37 pour des stockages à températures négatives, qui ne concernent pas cette étude).

Le MCP peut aussi être confiné dans des barres en métal. (cf. Figure 16).

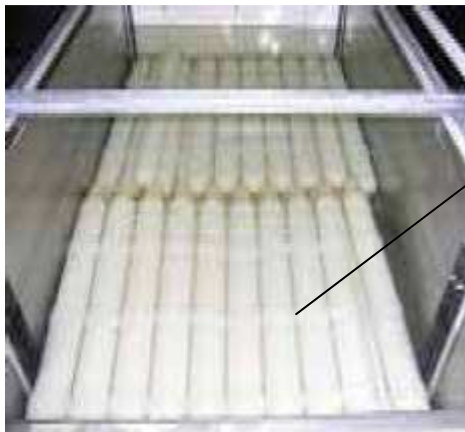


Figure 13 : TubeICE storage

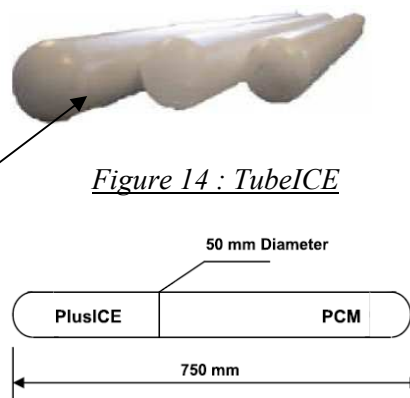


Figure 14 : TubeICE

Figure 15 : TubeICE Dimensions



Figure 16 : PlusICE beam

De même que pour le produit FlatICE, 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 17 : BallICE Design

Il permet de stocker les MCP de la gamme organique pour les références A2 à A95 ($2^{\circ}\text{C} < T_{\text{fusion}} < 95^{\circ}\text{C}$). 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 de A58 à 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 . Elle propose aussi plusieurs types d'encapsulation. Il existe plusieurs gammes de MCP dénommés différemment en fonction de leur composition :

-RT pour les paraffines : *Caractéristiques du produit*



- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage et déstockage de la chaleur à une température quasi constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- performances stables aux nombre de cycles fusion solidification
- manipulation facile

Nom du MCP	Temp. de fusion [$^{\circ}\text{C}$]	Chaleur latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	Expansion de volume [%]	Densité [kg/m ³]	
					liquide	solide
RT3	3	198	0.2	14	770	880
RT4	4	182	0.2	14	770	880
RT5	5	198	0.2	14	770	880
RT6	6	175	0.2	14	770	880
RT21	21	134	0.2	14	770	880
RT27	27	184	0.2	16	760	880
RT31	29	169	0.2	16	760	880
RT42	41	174	0.2	16	760	880
RT50	49	168	0.2	16	760	880
RT52	52	173	0.2	16	760	880
RT55	55	172	0.2	14	770	880
RT58	58	178	0.2	14	770	880
RT60	60	144	0.2	14	770	880
RT62	61	146	0.2	12	780	880
RT65	65	152	0.2	12	780	880
RT82	28	176	0.2	14	770	880
RT100	100	124	0.2	14	770	880

Tableau 7 : Propriétés thermo-physiques de la gamme RUBITHERM® RT

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]
GR42	41°C (Tmax utilisation= 70°C)	57	0.2	aucune	849	SiO ₂ , Paraffine	13.4
GR50	49°C (Tmax utilisation= 70°C)	55	0.2	aucune	849	SiO ₂ , Paraffine	13
GR82	82°C (Tmax utilisation= 110°C)	58	0.2	aucune	800	SiO ₂ , Paraffine	12.9

Tableau 8 : 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 possible.

Caractéristiques du produit

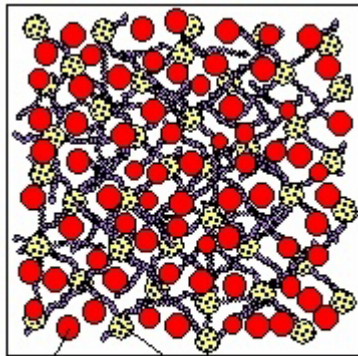
- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- performances stables au cours des cycles de changement de phase
- manipulation facile

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]	Compo	Taille de particule [µm]	Chaleur latente volumétrique [KWh/m ³]
PX42	41°C (Tmax utilisation=62°C)	114	0.1	aucune	694	SiO ₂ , Paraffine	250	22
PX50	49°C (Tmax utilisation=70°C)	110	0.1	aucune	694	SiO ₂ , Paraffine	-	21.2
PX58	58°C (Tmax utilisation=70°C)	117	0.1	aucune	694	SiO ₂ , Paraffine	250	22.5
PX82	82°C (Tmax utilisation=110°C)	116	0.1	aucune	694		250	22.3

Tableau 9 : 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 :



PCM Cross-linked structure

Figure 18 : MCP dans une structure réticulée

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 18). 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.

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.**

-SP pour les mélanges :



RUBITHERM® SP consiste en une composition d'hydrates de sel et de composés organiques. Cette combinaison réunit les avantages des deux classes de MCP.

Ce MCP est utilisé dans le secteur de la construction (refroidissement passif, actif, par exemple dans les éléments de paroi et de climatisation).

Caractéristiques du produit

- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- non-toxique
- faible inflammabilité
- limite la surfusion
- performances stables au cours des cycles de changement de phase
- Différentes températures de fusion entre 21°C et 29°C sont disponibles.

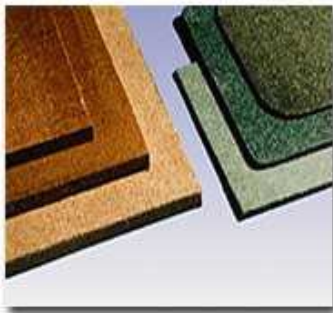
Nom du MCP	Température de fusion/congélation [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]	Conductivité thermique [W/m.K]	Expansion de volume [%]	Densité[kg/m ³]	
					liquide	solide
SP22A17	23°C/20°C	150	0.6	4.03 pour DT=20K	1430	1490
SP25 A8	26°C/25°C	180	0.6	2 pour DT=20K	-	1380

Tableau 10 : Propriétés thermo-physiques de la gamme RUBITHERM® SP

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.

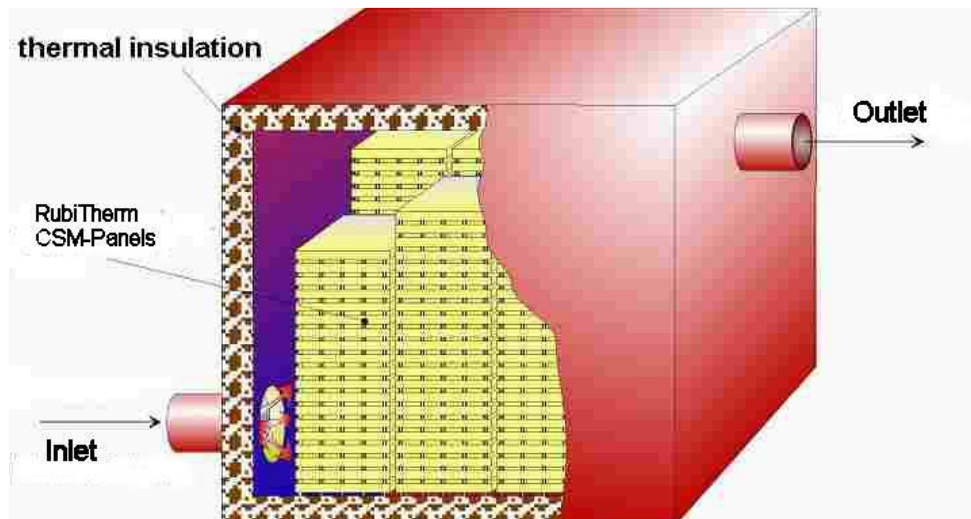


Caractéristiques du produit

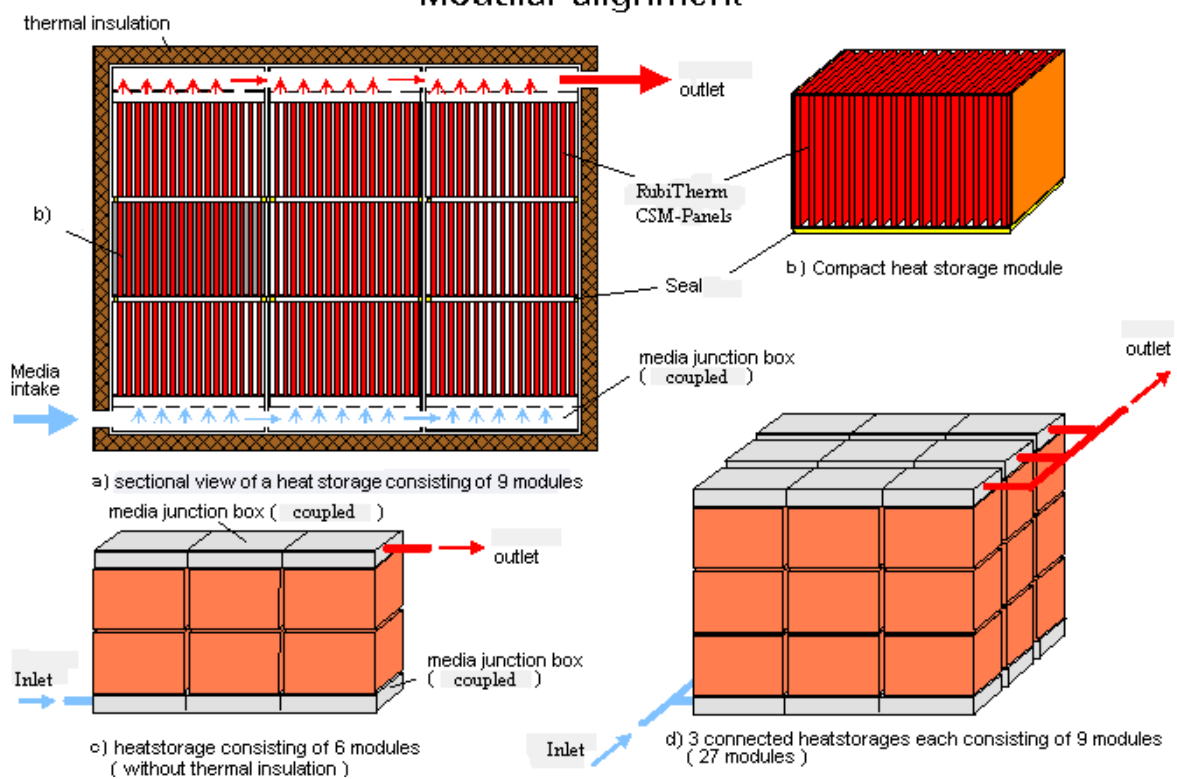
- grande capacité de stockage d'énergie thermique
- stockage de la chaleur et décharge à une température relativement constante
- écologiquement inoffensif
- non-toxique
- 100% recyclable
- longue durée de vie
- élimine la manipulation des liquides
- plusieurs épaisseurs de panneau sont disponible (5.5mm, 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.

3.2.3 Les produits PURETEMP :

Le fabricant de **PURETEMP** propose lui aussi une gamme assez large de MCP. 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 :

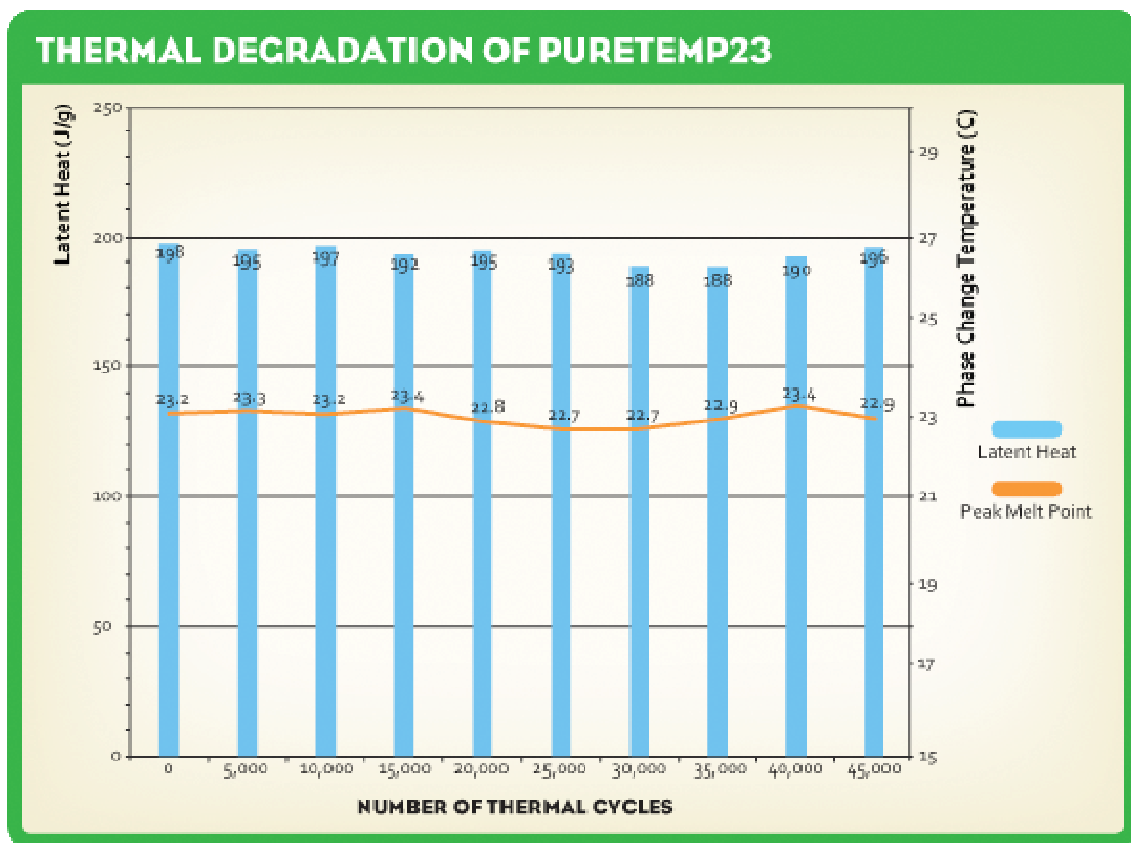


Figure 19 : Analyse des performances thermiques d'un MCP PURETEMP en fonction du nombre de cycles thermiques

Dans leur offre, nous avons pu identifier une gamme assez large de MCP ayant une température de changement de phase comprise entre 0°C et 100°C :

Produit	Température de fusion [°C]	Densité [kg/m ³]	Chaleur latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [kWh/m ³]	Chaleur spécifique [J/kg.k]	
					Solide	liquide
PT1	1	870	195	47.125	1280	1650
PT4	4	-	-	-	-	-
PT6	6	-	-	-	-	-
PT8	8	-	-	-	-	-
PT12	12	-	-	-	-	-
PT15	15	-	-	-	-	-
PT18	18	855	189	44.88	1470	1740
PT20	20	-	-	-	-	-
PT23	23	831	209	48.24	1840	1990
PT24	24	-	-	-	-	-
PT27	27	-	-	-	-	-
PT28	28	-	-	-	-	-
PT29	29	852	189	44.73	1770	1940
PT30	30	893	163	40.43	1580	1620
PT33	33	-	-	-	-	-
PT35	35	-	-	-	-	-
PT37	37	840	222	51.8	1000	1090
PT40	40	850	198	46.75	1980	2130
PT43	43	883	180	44.15	1870	1940
PT48	48	818	245	55.67	2100	2270
PT50	50	861	-	-	1940	-
PT56	56	812	237	53.45	2470	2710
PT61	61	840	199	46.43	1990	2160
PT68	68	870	198	47.85	1850	1910

Tableau 11 : Les MCP de PureTemp ayant une Température de fusion comprise entre 0°C et 100°C

Les produits PURETEMP ont les propriétés qui conviennent à plusieurs méthodes de confinement (micro et macro encapsulation, films souples, tuyaux métalliques, panneaux et sphères en plastiques).

Le confinement est dépendant de nombreux facteurs et il convient d'adapter le choix du confinement en fonction des gammes de température et de l'application.

Nous n'avons pas trouvé de références concernant ces MCP.

3.2.4 Les produits Astorstat® (by Honeywell):

L'entreprise **Honeywell Chemical** (IGI) 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 telles que le stockage thermique entre -23°C et 89°C.

Voici la liste des produits pour des applications qui concernent les basses et moyennes températures :


Nom de Produit	Température de congélation [°C]	Expansion de volume
Astorstat HA16	17.8-18.9	14-18
Astorstat HA18	27.2-28.3	14-18
Astorstat HA20	36.7-37.8	16-20
Astorstat HA300B	41-42.5	9-13
Astorstat 134	56.2-57.3	8-11
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

Tableau 12 : 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.

3.2.5 Les produits de CAPZO International BV

Nous pouvons aussi citer **CAPZO International BV** comme développeur et fabricant de MCP. En partenariat avec **SALCA BV**, ils développent des gammes de MCP (hydrates de sels) micro-encapsulés pour des températures comprises entre 0°C et 120°C, ces produits sont commercialisés sous les noms de Thermusol® et Thermupod®. Voici ci-dessous les principales propriétés des différents produits :

Thermusol® HD sont des MCP micro-encapsulé (salt hydrate) avec une température de changement d'état comprise entre 20°C et 60°C.			
		<i>Thermusol® Powder</i>	
Nom	Thermusol®HD28SE	Thermusol®HD32SE	Thermusol®HD60SAE
Forme physique	White powder	White powder	White powder
Densité	1,5 kg/L	1,3 kg/L	1,3 kg/L
Densité en vrac	0,9 kg/L	0,78 kg/L	0,78 kg/L
Gamme de température de stockage	20°C-30°C	30°C-40°C	50°C-60°C
Chaleur latente	110 kJ/kg	150 kJ/kg	160 kJ/kg
Capacité	165 kJ/L =	195 kJ/L	260 kJ/L

volumétrique de stockage			
Chaleur spécifique massique	2 kJ/kg.K	2 kJ/kg.K	2,5 kJ/kg.K
Taille de particule	50µm-500µm	50µm	<750µm

Prix:

entre 0 et 5 kg	250 €
entre 5 et 1000 kg	250 € + 12.5 €/kg
Entre 1000 et 10000 kg	10 €/kg
>10000 kg	8 €/kg

On notera que l'entreprise est capable de fournir sur demande des MCP Thermusol avec des températures de fusion comprises entre 5°C et 90°C.

Thermupod® est un produit qui permet d'accroître significativement la capacité de stockage thermique d'un réservoir en utilisant le fait que le MCP Thermusol peut stocker plus de chaleur que l'eau avec un faible delta de température.

L'important étant d'avoir un échange thermique optimal, l'emballage et l'épaisseur du produit doivent être choisis afin d'optimiser les phénomènes de transfert thermique et donc d'avoir la plus grande surface de contact possible entre le fluide de transfert et le MCP. SALCA a choisi un contenant ayant la forme d'une capsule.

Caractéristique de Thermupod WB60

Densité : 1,32 kg/L
 Densité en vrac (apparente): 0,59 kg/L
 Gamme de température de stockage : 50°C-60°C
 Chaleur latente: 180 kJ/kg
 Capacité volumétrique de stockage: 238kJ/L
 Chaleur spécifique massique: 3 kJ/kg.K
 Résistant à l'eau



Thermupod®

Prix:

entre 0 et 500kg	13.53 €/kg
entre 500 et 1000kg	12.49 €/kg
>1000kg	sur demande

Cette entreprise est une des seules à transmettre les prix de ses MCP. Les Thermupod (rempli de Thermusol) sont utilisés pour accroître les capacités de stockage thermique ou pour diminuer leur volume.

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 haute température (HS 89), les balles utilisées sont en PP ou SS.

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 08	Organic Mixture	8 à 9	2 à 13	1050	190-55.41	Aucun	Oui	~ 80
HS	Organic Mixture	10 à 11	5 à 16	1060	260-76.55	Aucun	Oui	~ 80

11								
HS 22	Inorganic Salts	21 à 23	16 à 28	1540	185-79.13	faible	Non	~ 80
HS 24	Inorganic Salts	23 à 25	18 à 30	1540	185-79.13	faible	Non	~ 80
HS 29	Inorganic Salts	27 à 29	22 à 34	1550	190-81.8	Aucun	Non	~ 80
HS 32	Inorganic Salts	30 à 32	25 à 37	---	165-/-	Aucun	Non	~ 80
HS 34	Inorganic Salts	32 à 35	27 à 40	1850	150-77.08	faible	Non	~ 80
HS 58	Inorganic Salts	55 à 59	52 à 64	1290	250-89.6	faible	Non	~ 90
HS 89	Inorganic Salts	87 à 89	82 à 94	1540	180-77	Aucun	Non	~ 105

Tableau 13 : PLUSS® products

3.2.7 Les produits de TEAP

Voici une liste des MCP vendus par TEAP :

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]
4°C	0 à 10°C	105	135	1400	52.5
7°C	2 à 12°C	135	170	1400	66.1
7°C	2 à 12°C	300	330	1400	128.3
10°C	5 à 15°C	170	200	1400	77.8
15°C	10 à 20°C	175	210	1400	81.7
18°C	15 à 21°C	175	210	1500	87.5
21°C	18 à 24°C	175	210	1500	87.5
24°C	18 à 30°C	175	210	1500	87.5
27°C	22 à 32°C	175	210	1500	87.5
29°C	22 à 36°C	>175	>210	1500	>87.5
32°C	22 à 36°C	210	250	1400	97.2
36°C	30 à 50°C	260	300	1400	116.6
40°C	30 à 50°C	220	260	1400	101.1
45°C	40 à 55°C	220	260	1400	101.1
48°C	40 à 58°C	220	260	1400	101.1
58°C	40 à 58°C	220	260	1400	101.1
68°C	40 à 70°C	220	280	1800	140
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 14 : TEAP MCP products

Produit	29T	25T	20T	18T	32S	34S	36S	48S
Série	T-series Latest™				S-series Latest™			
Type de MCP	Inorganic Salts							
Température de changement de phase	28-30°C	24-26°C	19-20°C	17-19°C	31-32°C	33-34°C	36°C	48°C
Sous refroidissement	2°C max.	2°C max.	2°C max.	2°C max.	faible	Faible	faible	faible
Densité	1.48-1.50	1.48-1.50	1.48-1.50	1.48-1.50	1.45	1.45	1.45	1.45
Chaleur latente	175 kJ/kg	175 kJ/kg	175 kJ/kg	175 kJ/kg	>200 kJ/kg	>220 kJ/kg	>230 kJ/kg	>230 kJ/kg
Chaleur latente théorique	188 kJ/kg	188 kJ/kg	188 kJ/kg	188 kJ/kg	230 kJ/kg	250 kJ/kg	260 kJ/kg	260 kJ/kg
Chaleur spécifique	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C	2 kJ/kg.°C
Conductivité thermique	1W/m°C	1W/m°C	1W/m°C	1W/m°C	0.6W/m°C	0.6W/m°C	0.6W/m°C	0.6W/m°C
Stabilité thermique	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles	> 10000 cycles
Temp. maximum d'utilisation	100°C	100°C	100°C	100°C	100°C	100°C	100°C	100°C

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 de ces MCP :

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 C7	Sodium sulphate/ Water & additive	7	60	140.4	3.6	1.42	0.5-0.7	55.38
ClimSel C21-22	Sodium sulphate/ Water & additive	21-22	60	144	3.6	1.45	0.5-0.7	58
ClimSel C24	Sodium sulphate/ Water & additive	24	60	144	3.6	1.48	0.5-0.7	59.2
ClimSel C28	Sodium sulphate/ Water & additive	28	60	162	3.6	1.45	0.5-0.7	65.25
ClimSel C32	Sodium sulphate/ Water & additive	32	60	162	3.6	1.45	0.5-0.7	65.25
ClimSel C48	Sodium acetate/ Water & additive	48	70	226.8	3.6	1.36	0.5-0.7	85.68

ClimSel C58	Sodium acetate/ Water & additive	58	75	288	3.6	1.46	0.5-0.7	116.8
ClimSel C70	Sodium pyrophosphate/ water & additive	70	85	280.8	2.088	1.7	0.6-0.7	132.6

Tableau 15 : 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.



E-STOCKER

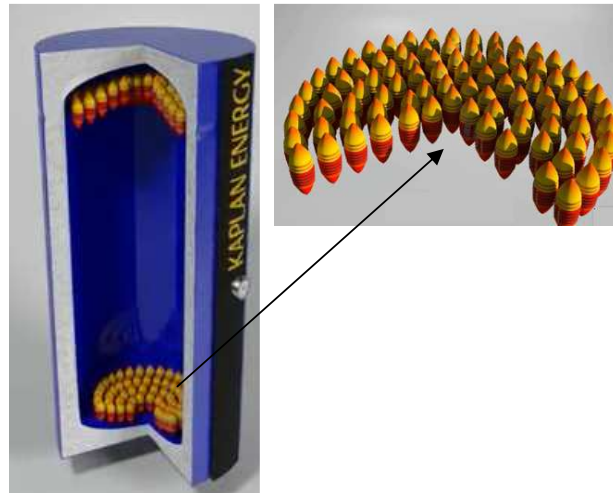
L'E-STOCKER® est un accumulateur d'énergie thermique à base de MCP, conçu pour les installations solaires, les installations de chauffage dont celles à bois et les pompes à chaleur.

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)
- MCP 100% biodégradables, non toxique (E-stockers 100% recyclables)



Coupe d'un Ballon de stockage solaire Kaplan

4. La mise en œuvre des MCP

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 des technologies pour la mise en œuvre des 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 à 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 20).

Lors de la charge, le fluide de transfert apporte 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 cédée au fluide de transfert. Voici les illustrations des échangeurs de chaleurs intégrant des MCP sur la figure suivante.

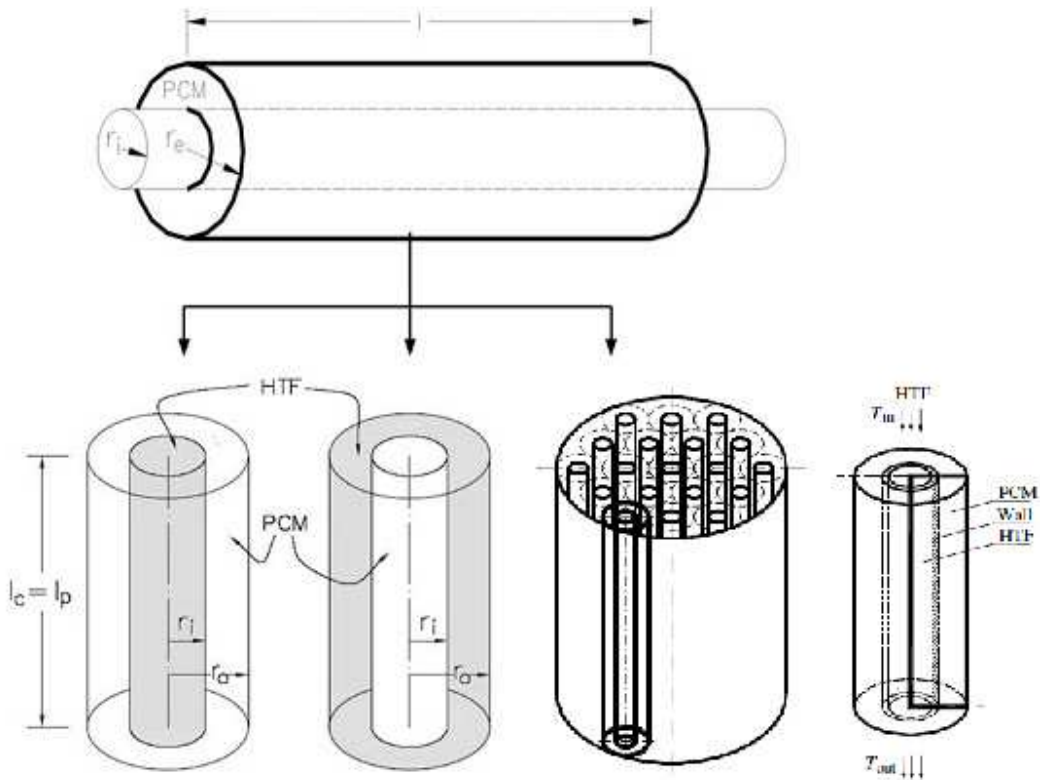


Figure 20 :échangeurs coaxiaux et multi-tubes intégrant des MCP

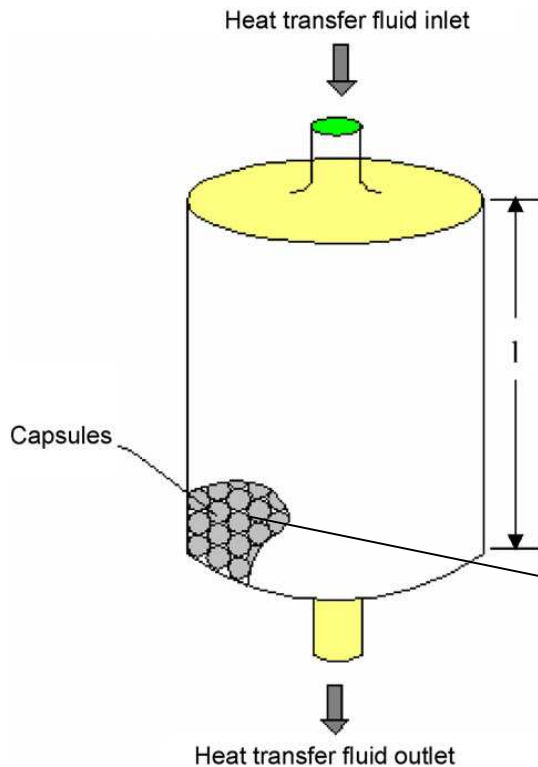
Les échangeurs avec MCP intégrés sont encore au niveau de la recherche, notamment pour les échangeurs intégrant des composés solides graphite/MCP (projet HP-Stock et DLR) qui sont plus développés dans le domaine des hautes températures (cf. cahier n°5).

4.2 Réservoir intégrant des 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. On pourra donc se référer au cahier n°3 pour les recommandations générales pour ce type de réservoir (stratification, remplissage, arrangement, taux de vide...etc.).

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 $+27^{\circ}\text{C}$.

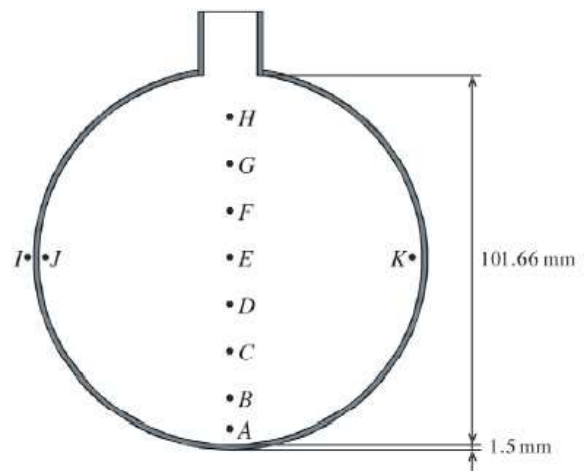
L'entreprise EPS Ltd développe aussi ce genre de nodules de stockage pour des températures comprises entre 50°C et 82°C .



Heat transfer fluid outlet
Figure 21 : Réservoir cylindrique avec garnissage en billes de MCP

Nous allons vous présenter une étude sur les cinétiques de charges et décharges pour un nodule sphérique encapsulant un MCP [5]. 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 montre l'implantation des thermocouples pour l'expérimentation.



Voici les propriétés de la paraffine dans le tableau suivant [5]:

Température de fusion	28.2°C
Densité	772 kg/m^3
Viscosité cinématique	$5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
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 maintenu 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.

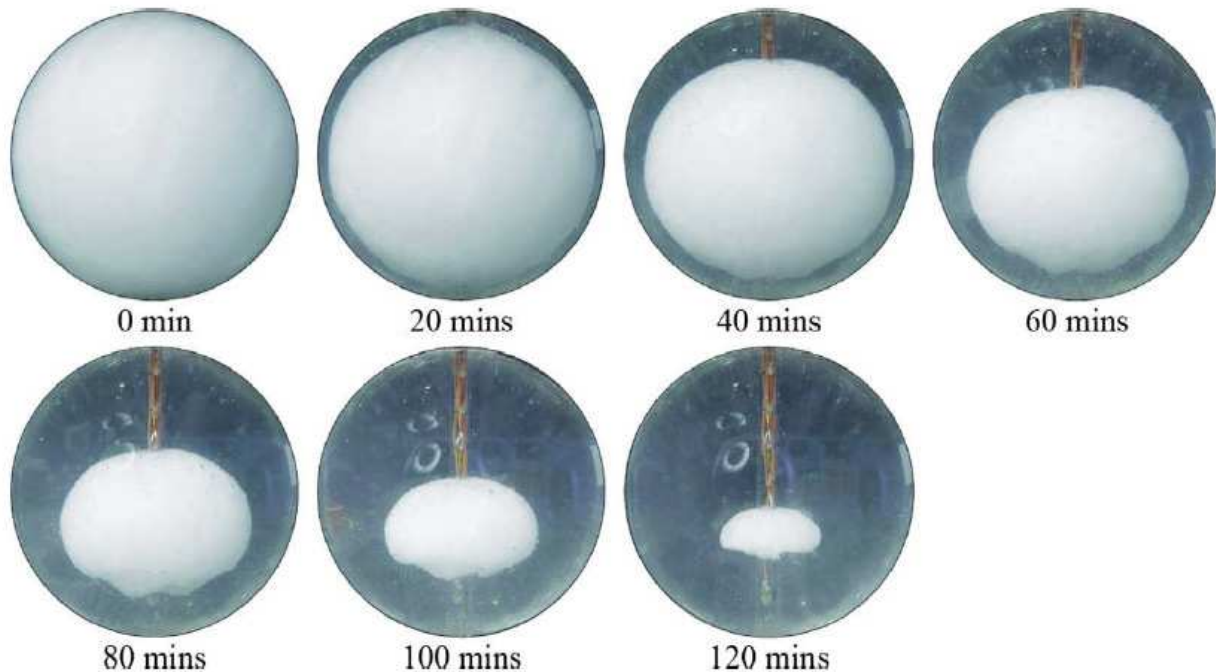


Figure 21.a) : Photographie de la fonte du MCP pendant la phase de charge [5]

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 21.a) pour un temps de 20 minutes. La fusion du MCP solide se poursuit et les photographies de la figure 21.a) 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.

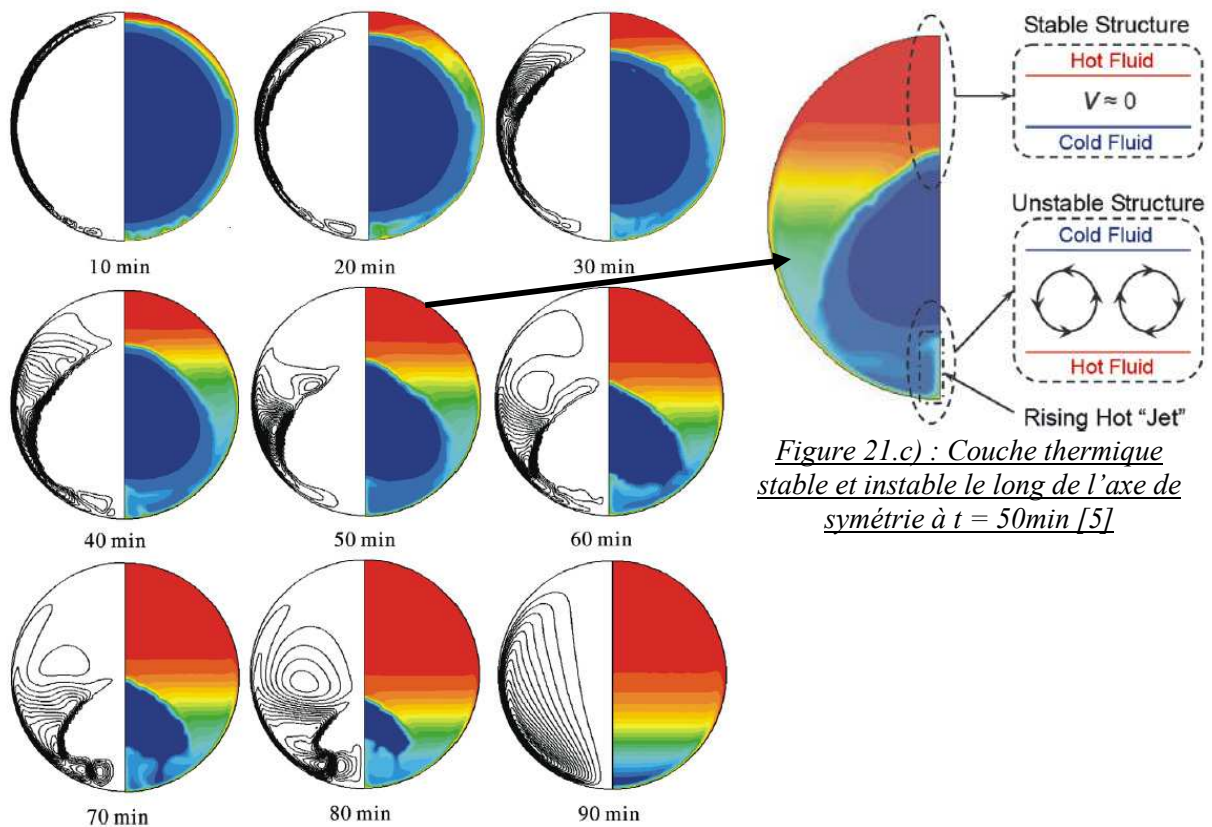


Figure 21.b) : Contours des lignes de courants et de température par simulation [5]

Figure 21.c) : Couche thermique stable et instable le long de l'axe de symétrie à t = 50min [5]

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 21.b). 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 21.b) 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 21.b) 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 21.c) 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 froids 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 21.c)). 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. Une autre étude sur la cinétique de charge/décharge pour des MCP (erythritol) encapsulé dans des tubes (dans la partie coaxiale d'un échangeur tubulaire) est disponible dans le cahier n°4.

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.

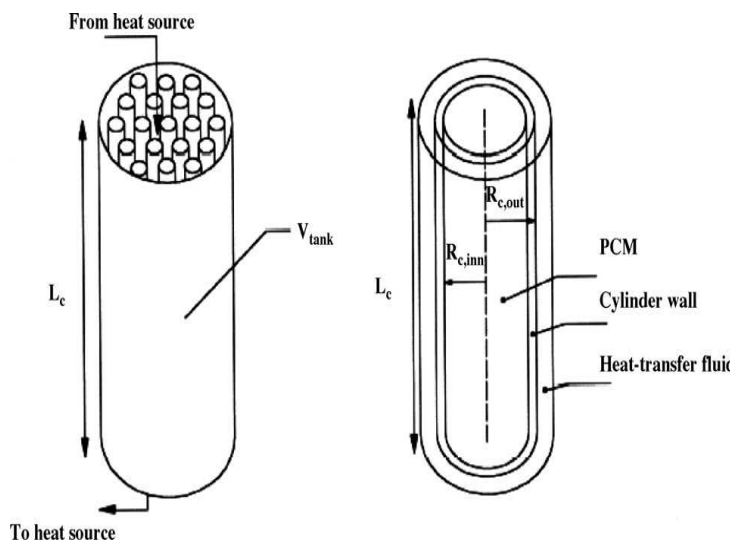


Figure 22 : Réservoir cylindrique avec barres de MCP intégré[2]

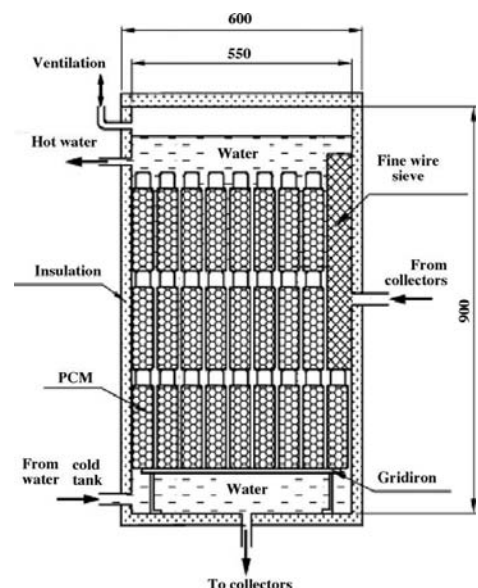


Figure 23°: Cross-sectional view of the cylindrical heat storage tank combined with PCM bottle[2]

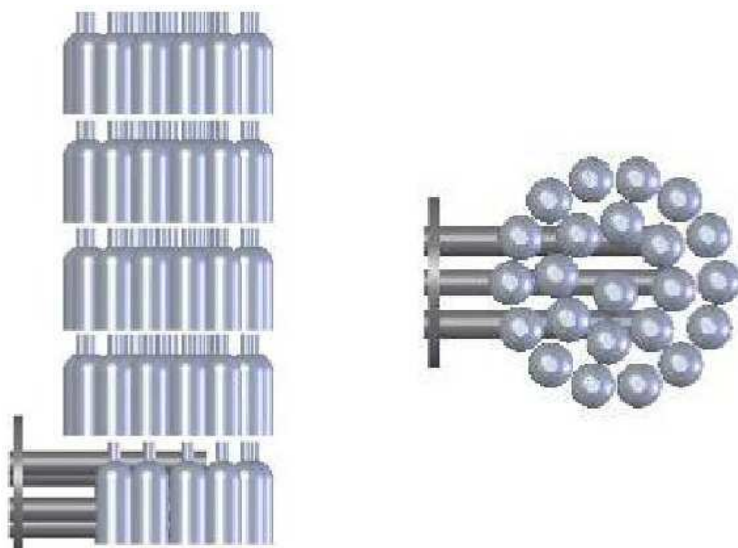


Figure 24 : réservoir rempli avec des bouteilles de MCP intégré (Projet POWER PCM)[4]



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.

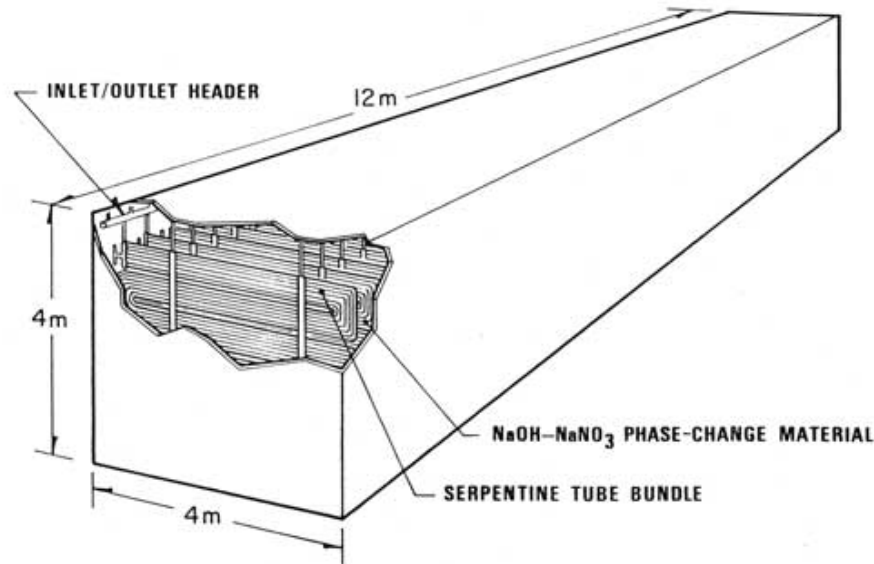


Figure 25 : réservoir horizontal avec échangeur noyé dans un MCP

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.

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 prévue, 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 qui se fatigue et peut ainsi se

détérioré 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 apparaitre, 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 apparait un coefficient de dilatation volumique (en K^{-1} ou en %) qui permet de quantifier l'augmentation lors de ce changement de phase).*

4.3 Les matériaux de construction intégrant des MCP

L'utilisation des MCP ne se limite pas aux seuls équipements de stockage industriel et touche au vaste domaine des matériaux de construction. Incorporés à l'intérieur des bâtiments, dans des produits à base de polymères, de plâtre, ou de béton, les MCP s'avèrent capables d'améliorer les performances énergétiques de l'enveloppe tout en augmentant l'inertie thermique. Complémentaires d'une isolation, ils constituent ainsi une réponse au durcissement de la réglementation thermique et à la prise en compte de la notion de confort d'été et de confort d'hiver, plus particulièrement dans la rénovation des bâtiments à ossature légère. Se caractérisant par leurs faibles épaisseur et poids, les produits peuvent en effet être mis en œuvre sans trop grignoter sur les surfaces habitables, ni affecter les reports de charges sur la structure. En été, ils limitent le recours à la climatisation en agissant comme une climatisation passive, sous réserve d'être associés à une ventilation nocturne efficace. Le jour, lorsque la température intérieure s'élève au-dessus du point de fusion du MCP, celui-ci fond et emmagasine de la chaleur qu'il restitue la nuit en se solidifiant, lorsque la température est redescendue sous le seuil de solidification. En hiver et en intersaison, les MCP permettent d'optimiser les apports solaires gratuits. Placés de préférence sur les parois intérieures ou les cloisons les plus sollicitées par le rayonnement solaire direct, ils stockent la chaleur la journée et la restituent le soir. En augmentant la masse thermique des parois (murs, plafonds, cloisons), ces matériaux réduisent les chocs thermiques à l'intérieur des locaux. Selon les premières séries de mesures in situ, ils permettraient d'écarter les températures de 3 à 5 °C en moyenne.

-Micronal® de BASF :

Dans cette optique, l'entreprise BASF a développé Micronal® qui se présente sous la forme de microbilles de polymère contenant de la cire. Quand la température augmente, la cire absorbe la chaleur et la stocke. Quand la température diminue, la cire dans les microbilles

restitue la chaleur latente emmagasinée. Durant la période de changement de phase, la température demeure constante et permet de réguler la température à des niveaux confortables entre 22 et 26°C.

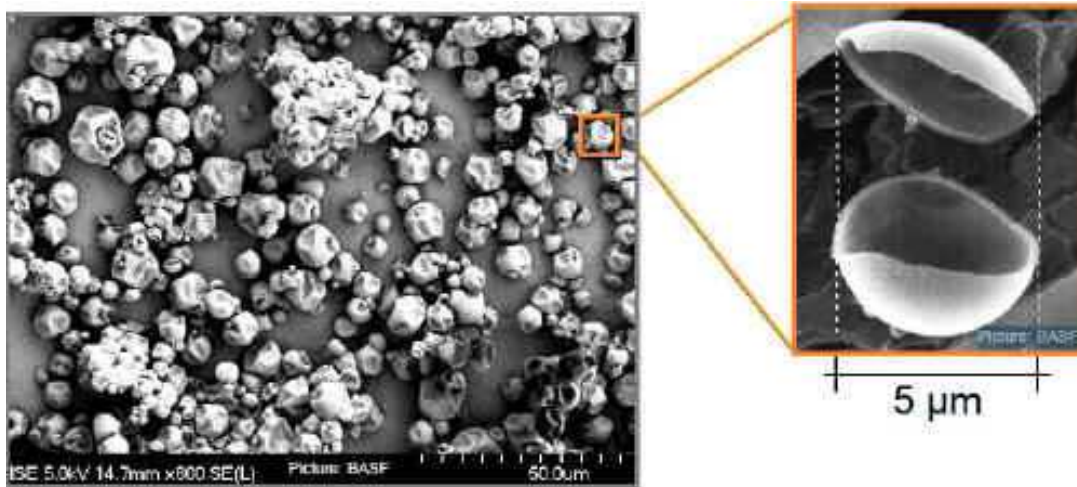


Figure 26 : Micronal®

Grâce à la micro-encapsulation les Micronal peuvent être incorporés dans les matériaux de construction et sont principalement destinés aux fabricants de peintures et de plaques de plâtre. Les Micronal sont indestructibles, inertes et non toxiques. Ils sont disponibles sous forme liquide ou en poudre.

-Les produits intégrant le MCP Micronal®:

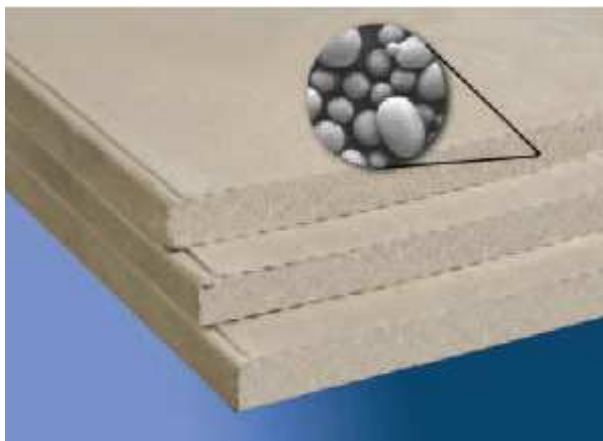


Figure 27 : Micronal® PCM SmartBoard™

Smartboard est un panneau de plâtre avec des microbilles de Micronal incorporées.

Caractéristiques techniques des panneaux :

- Dimensions : 2,00 m x 1,25 m
- Épaisseur : 15 mm
- Poids : 11,5 kg/m²
- Capacité de chaleur latente : environ. 330 kJ/m², soit la capacité thermique équivalente d'un mur de briques avec une épaisseur de 12 cm ou de 9 cm de béton.



Figure 28 : CelBloc Plus

Micronal® PCM est incorporé dans les blocs de construction en béton cellulaire "CelBloc Plus".

Ainsi une capacité thermique importante est ajoutée aux autres qualités.



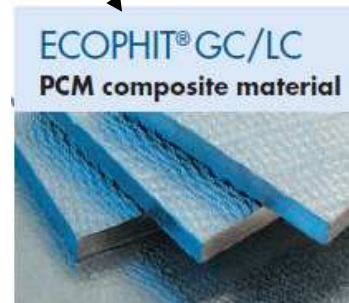
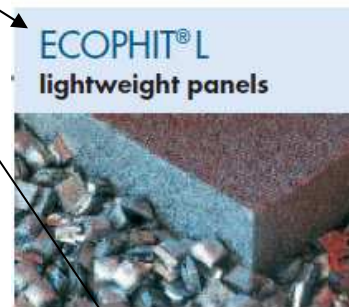
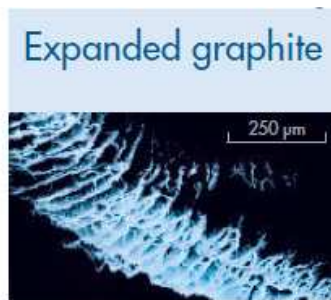
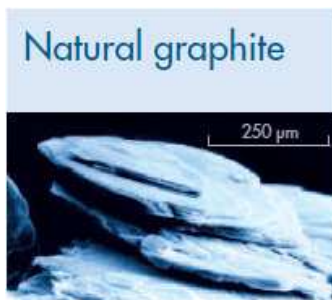
Figure 29 : Maxit Clima

Maxit Clima est un enduit de plâtre avec du Micronal incorporé, développé par la société Maxit en collaboration avec BASF. Une couche de 3 cm de l'enduit maxit clima correspond à la capacité thermique de 8 cm de béton, de 13 cm de plâtre ordinaire ou de 29 cm de briques creuses.

-ECOPHIT® de SGL Gmbh :

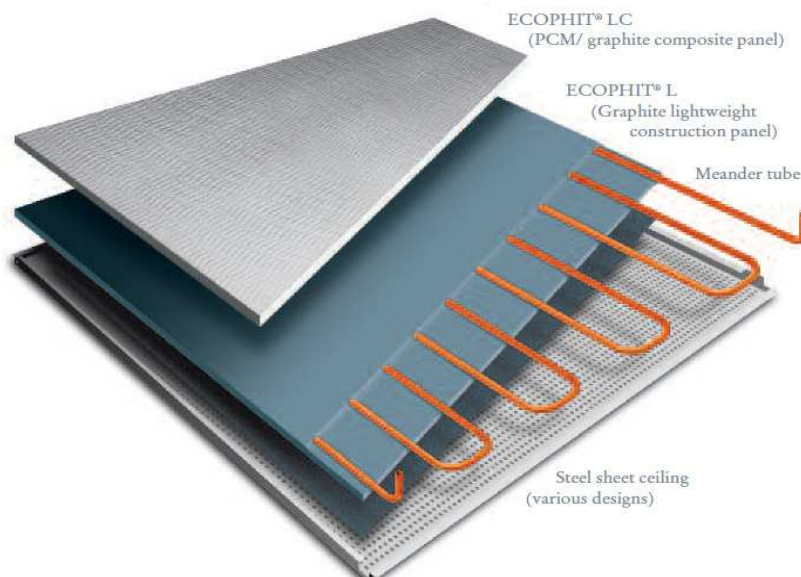
A travers sa gamme ECOPHIT®, la société allemande SGL Gmbh commercialise des matrices graphites dopées en MCP pour des applications de stockage de chaleur mais aussi pour des isolations et systèmes de chauffage/climatisation passif. L'incorporation des MCP dans une matrice graphite permet d'accroître considérablement la conductivité thermique du MCP, ce qui en fait un matériau très efficace, compacte 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 °C à des systèmes à haute température pour le chauffage et le processus de stockage jusqu'à 200°C.

Par exemple, des plafonds de refroidissement sont construits à partir de composite PCM / graphite équipés de sorte qu'ils sont en contact avec l'élément de refroidissement de plafond. Afin de garantir une performance maximale et une rapide activation du composé de stockage, le tube monté en serpentin est noyé dans une couche ECOPHIT®L de graphite.



-Le produits GLASSX®crystal de saint Gobain:

GLASSX®crystal intègre 4 éléments dans une même unité fonctionnelle:

- Isolation thermique transparente
- protection contre la chaleur excessive
- transformation de l'énergie
- collecteur thermique

Une triple structure de verre isolant assure une excellente isolation thermique avec une valeur U inférieure à $U=0,48 \text{ W/m}^2.\text{K}$

Un verre prismatique placé dans l'espace entre les vitres réfléchit vers l'extérieur le soleil estival quand il est au plus haut, avec des angles d'incidence supérieurs à 40° . Le soleil hivernal franchit à sa pleine intensité la protection solaire.

L'élément central de GLASSX®crystal est un module d'accumulateur thermique qui absorbe l'énergie solaire et la restitue avec un décalage dans le temps. Ce produit utilise comme matériau accumulateur un PCM sous la forme d'un hydrate de sel. L'accumulation de la chaleur s'effectue par la fusion du PCM. L'hydrate de sel est soudé de manière hermétique dans des récipients de polycarbonate. A l'intérieur des locaux, l'élément est fermé par un verre de sécurité à une seule vitre de 6 mm dont la disposition peut être modifiée.

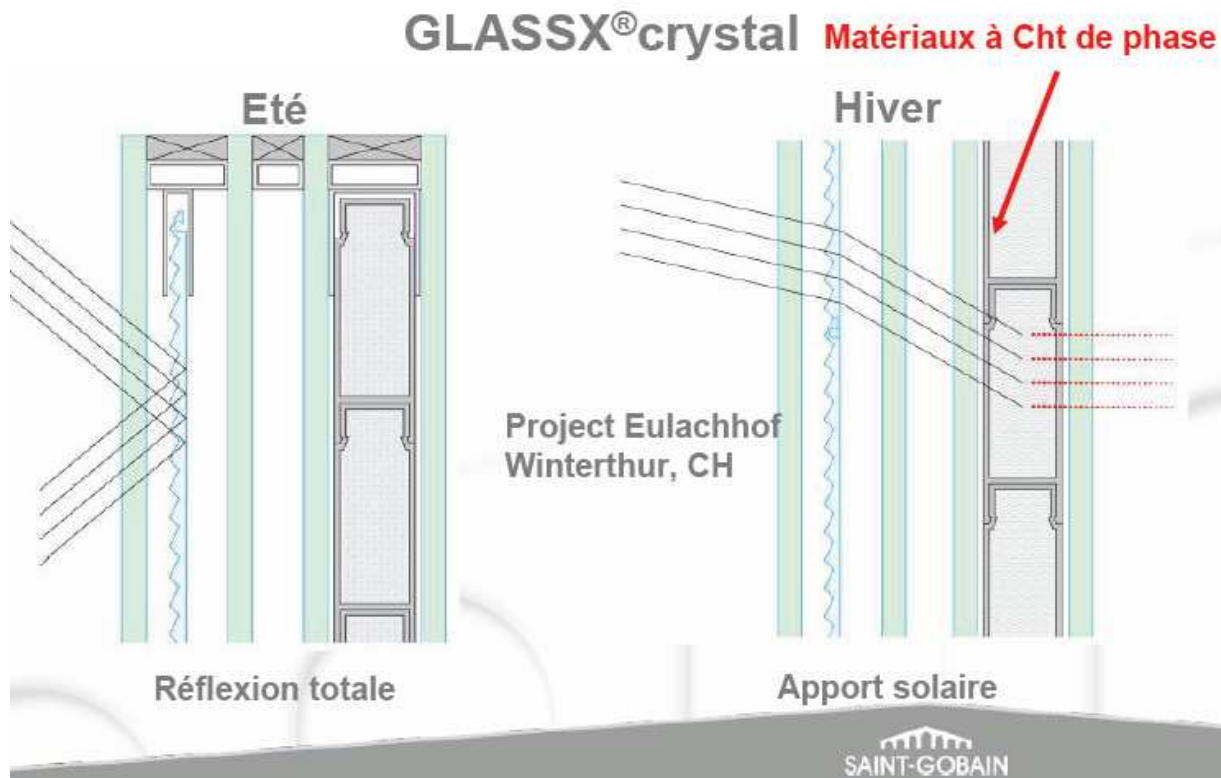


Figure 30 : GLASSX®crystal

-Le panneau DUPONT ENERGAIN

Le panneau ENERGAIN est un panneau absorbant et relâchant de la chaleur du fait de son changement de phase interne, régulant les températures de la pièce et réduisant les émissions de CO₂. Il est laminé par deux feuilles d'aluminium encapsulant de la paraffine dans un

copolymère assurant que la paraffine est bien maintenue même à l'état liquide. De 1,2 m x 1m, il s'installe sur des structures à faible inertie, dans les murs, plafonds ou derrière une plaque de plâtre. Les besoins en chauffage et air conditionné sont réduits.



Figure 31: Panneau Dupont Energain®

On a pu voir que de nombreux industriels ont développé des matériaux de construction intégrant des MCP. Cependant cette technologie est encore très peu répandue sur le marché et demande des investissements plus lourds qu'une solution traditionnelle. De plus, ces MCP ont encore besoin d'être étudiés en ce qui concerne la sécurité car la plupart d'entre eux sont inflammables.

5. Recommandations générales

Lors de cette étude nous avons pu identifier de nombreux fabricants de matériaux à changement de phase, ainsi que leurs différentes mises en œuvre. De nombreux MCP sont compris dans la gamme de température s'appliquant à la notion de confort thermique dans l'habitat, et se combinent bien aux systèmes de chauffage/refroidissement passifs par stockage de chaleur. Pour des applications industrielles, le domaine des températures inférieures à 100°C limite leur application, les rejets d'énergie à basse température étant moins fréquents. Pour des applications industrielles, le cahier n°5 destiné au stockage d'énergie pour les rejets à plus haute température est mieux approprié, parce que ces rejets sont plus fréquents et plus facilement valorisables dans ce domaine.

Le stockage thermique à 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 possibles, il a aujourd'hui un a priori favorable dans différents secteurs.

En conclusion, on peut dire que le choix d'un stockage de chaleur avec des MCP aujourd'hui n'est pas toujours facile, parce qu'il est dépendant de paramètres à prendre en compte qui sont les suivants :

- La température de fusion et le comportement thermique du MCP qui doit correspondre aux niveaux de températures dans lesquels il doit travailler,

-
- les problèmes liés à la surfusion/sous-refroidissement, comportement au nombre de cycles thermiques (hystérésis et vieillissement ...etc).

Sur différents points dont les précédents, cette étude sur les MCP a permis d'identifier qu'une amélioration des géométries des nodules et autres confinement des MCP, pourrait être porteuses d'augmentation des performances de tels systèmes par l'étude de la cinétique de charge et de décharge. En effet les développements effectués se réduisent à des formes simples sans aucune intensification des transferts de chaleur et des capacités de stockage.

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.

5. 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] **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.

[3] **Thomas Hasenöhrl**. Project Report 2009 MVK 160 Heat and Mass Transport May 09, 2009, Lund, Sweden. An Introduction to Phase Change Materials as Heat Storage Mediums.

[4] **S. Citherlet, J. Bony et J. Morel**. Projet POWER PCM -Rapport final. Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD/LESBAT)

[5] **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.Capzo.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.com

http://energain.fr/Energain/fr_FR/index.html

ANNEXE 5



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°5 : les matériaux de stockage par chaleur latente
et leur mise en œuvre pour les applications à haute
température**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. CRITERES DE CHOIX D'UN MATERIAU A CHANGEMENT DE PHASE (MCP) POUR LE STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE A HAUTE TEMPERATURE	4
2.1 Terminologie	4
2.2 Propriétés thermo-physiques	4
3. MATERIAUX ET MISE EN ŒUVRE.....	5
3.1 Classification.....	5
3.2 Les MCP existants.....	8
3.2.1 Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température	10
3.3 Les MCP commercialisés.....	13
3.3.1 Les produits de EPS Ltd.....	13
3.3.2 Les produits de RUBITHERM®.....	15
3.3.3 Les produits de Mitsubishi Chemical.....	16
3.3.4 Les produits PURETEMP	17
3.3.5 Les produits Astorstat® (by Honeywell)	18
4. LA MISE EN ŒUVRE DES MCP DANS UN SYSTEME DE STOCKAGE.....	19
4.1 Les échangeurs de chaleurs tubulaires avec MCP intégrés.....	19
4.2 Les systèmes de stockage avec MCP intégrés	30
4.2.1-Le stockage « pebble bed ».....	30
4.2.2-Le stockage latent en simple réservoir (LHS) et en cascade	30
4.2.3-Le système RHTS	33
4.3 Les prototypes développés par le DLR.....	35
4. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	41
5. BIBLIOGRAPHIE	42

1. Elément de contexte

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 critique 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. 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 (cf. cahier introductif) mais dans ce cahier nous aborderons le thème du stockage par chaleur latente *pour des applications à haute température ($100^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$)*.

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 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 (cf. figure 1)) et mettent en jeux des chaleurs latentes intéressantes ($> 150 \text{ kJ/kg}$). 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.

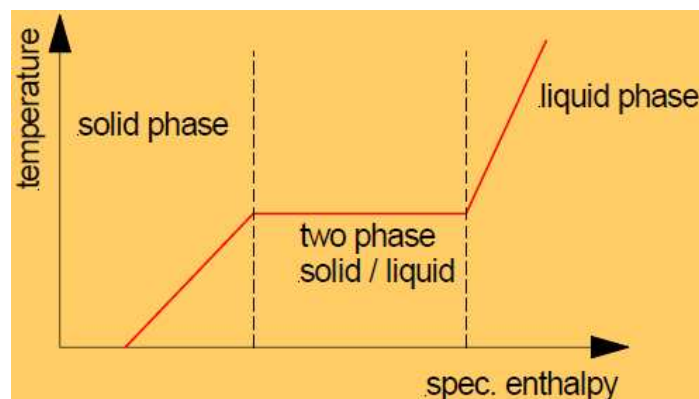


Figure 1 : Représentation du changement de phase

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 température très faibles. Par exemple, comparons l'énergie stockée pour un $\Delta T = 10\text{K}$ ($80^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$) pour 1kg d'un MCP ayant une enthalpie de changement d'état de $\Delta H = 150\text{kJ/kg}$ et une capacité thermique massique de 2kJ/kg.K , et pour 1kg d'eau ($C_{p_{\text{eau}}} = 4.18\text{kJ/kg.K}$) (Source Cadet/GRETh) :

Avec le MCP (sensible+ latent) :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot \Delta H = 1 \cdot 2 \cdot 10 + 1 \cdot 150 = 170 \text{ kJ} = 47.2 \text{ Wh}$$

Avec l'eau (sensible) :

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 1 \cdot 4.18 \cdot 10 = 41.8 \text{ kJ} = 11.6 \text{ Wh}$$

} Facteur 4

2. 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))

GS : Graphite synthétique. Le GS présente des propriétés structurales similaires à celles du graphite naturel. Il se présente sous forme de lamelles micrométriques (6, 15, 44, 75, 150 μm).

GNE : Graphite Naturel Expansé (GNE). Le GNE s'obtient par expansion thermique du Graphite Naturel. Il se présente sous la forme de « vermicules » dont la longueur est entre 15 et 20 fois plus grande que le diamètre. Il possède une faible densité ($< 15 \text{ Kg/m}^3$), une grande porosité ($\sim 99\%$) et des surfaces spécifiques très importantes ($\sim 40\text{-}60 \text{ m}^2/\text{g}$).

HTF : Heat Transfer Fluid (fluide caloporteur, fluide de transfert).

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 résumées dans les tableaux suivants :

Propriété thermique	Propriété physique	Propriété chimique	Propriété économique
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 Non toxique, non inflammable et non polluant	

Tableau 1 : Paramètre de choix d'un MCP [Cadet/GRETh]

Propriétés thermo-physiques de stockage	Paramètres et performances	Impact sur la conception et le dimensionnement du dispositif de stockage
Température de congélation, vaporisation et liquéfaction (à P atmosphérique)	Température minimal et maximal de stockage (haute température entre 100°C et 400°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 des briques élémentaires de stockage pour répondre à la dynamique de la source.
Liquide : -Conductivité thermique λ [W/m.K] -viscosité cinématique ν [m ² /s]	Temps de charge	

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 nous avons pu le voir dans le cahier introductif, se réalise sous différentes formes qui sont résumées dans la figure 2 suivante :

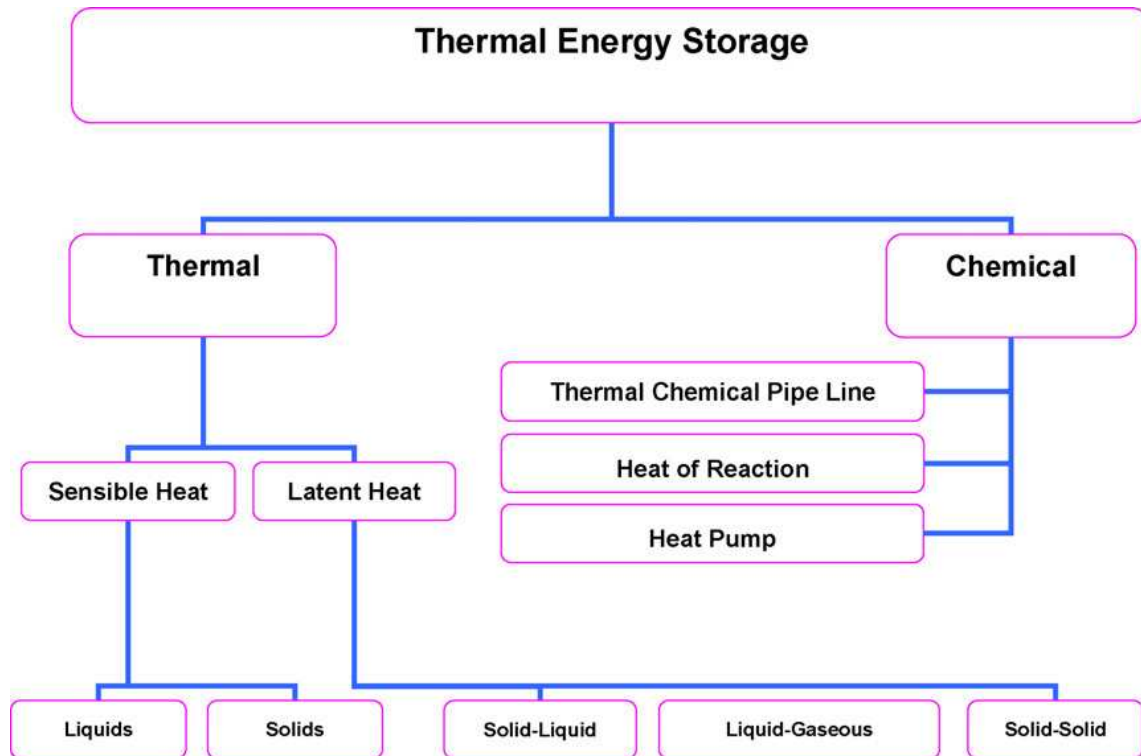


Figure 2 : Classification des techniques de stockage de chaleur [4]

Parmi les différents modes de stockage en chaleur latente (solide/liquide ; liquide/gaz ; solide/solide), il existe plusieurs catégories de MCP suivant leur type, elles sont les suivantes:

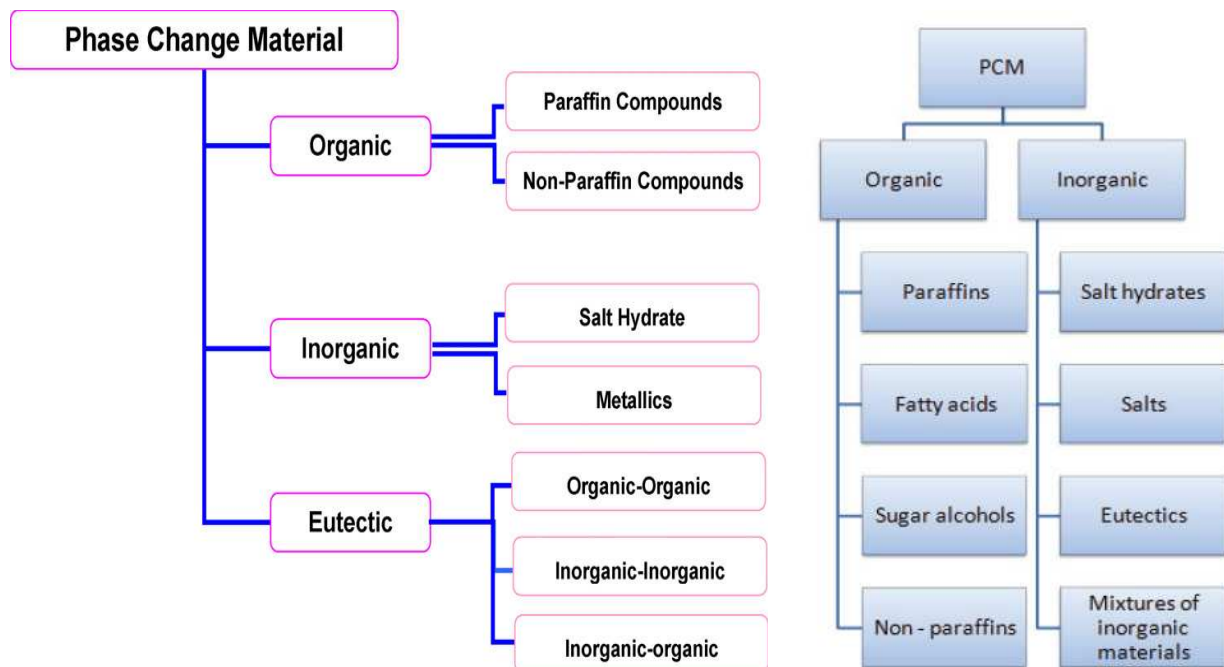


Figure 3 : Identification des types de MCP pour le stockage de chaleur [4]

-**Les sels hydratés** (hydrates) sont des composés de sel et d'eau et ont l'avantage d'avoir une forte chaleur latente de fusion en raison de leur forte teneur en eau, mais ces sels ont également des inconvénients majeurs pour le cycle de vie car une ségrégation de phases se

produit pendant les modes de Charge/Décharge, qui se traduit par une décantation du sel au fond de la solution et, par conséquent, la capacité thermique de stockage de la solution change. 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

-**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 4 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 et souffrent de la perte de l'hydrate - 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 4 : 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 :

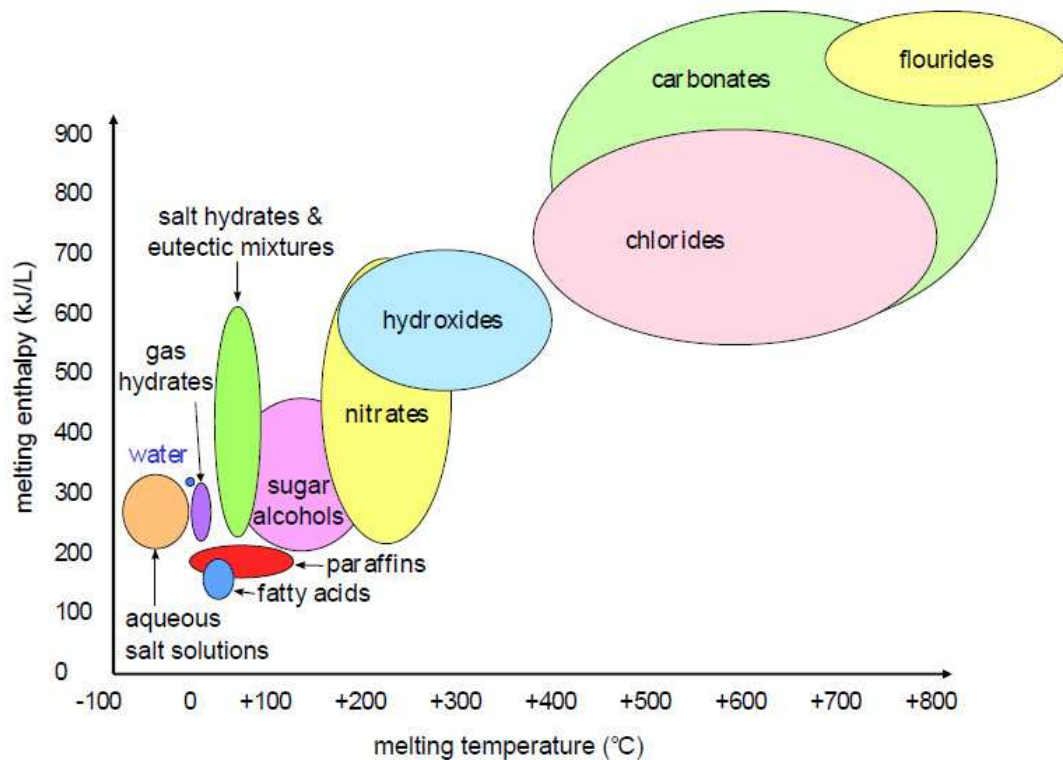


Figure 4 : Répartition des différents MCP en fonction de leur gamme de température d'utilisation

3.2 Les MCP existants

De nombreux MCP ont été développés pour des travaux de recherche en voici une liste exhaustive dans le tableau suivant:

Type	Nom	Composition	Melting point [°C]	Density [kg/m ³]	Latent heat [kJ/kg]	Conductivity [w/m.K]
Non Parrafin	p-Xylene dichloride		100		138.7	
Non Parrafin	Methyl Fumarate		102	1045	242	
Non Parrafin	Catechol		104.3	1370	207	
Non Parrafin	Quinone		115	1318	171	
Non Parrafin	Acetanilide		115	1210	142	
Non Parrafin	Succinic anhydride		119	1104	204	
Non Parrafin	Benzoic acid		121.7	1266	142.8	
Non Parrafin	Stibene		124	1164	167	
Non Parrafin	Benzamide		127.2	1341	169.4	
Non	Phenacetin		137		136.7	

Parrafin						
Non Parrafin	Alpha glucose		141	1544	174	
Non Parrafin	Acetyl – p-toluidene		146		180	
Non Parrafin	Phenylhdrazone benzaldehyde		155		134.8	
Non Parrafin	Salicylic acid		159	1443	199	
Non Parrafin	Benzanilide		161		162	
Non Parrafin	O-Mannitol		166	1489	294	
Non Parrafin	Hydroquinone		172.4	1358	258	
Non Parrafin	p-Aminobenzoic acid		187		153	
Fatty acids	Valporic acid		120			
Fatty acids	Methyl fumarate	(CHCO ₂ NH ₃) ₂	102		242	
Salt hydrates	CaBr ₂ .4H ₂ O		110			
Salt hydrates	Al ₂ (SO ₄) ₂ .16H ₂ O		112			
Salt hydrates	MgCl ₂ . 6H ₂ O		115-117	1450	165-169	0.570
Salt hydrates	NaC ₂ H ₃ O ₂ .3H ₂ O		137	1450	172	
Salt hydrates	Hitec	KNO ₃ – NaNO ₂ – NaNO ₃	120			
Inorganic		LiNO ₃ – NaNO ₃	195		252	
Inorganic		40%KNO ₃ – 60%NaNO ₃	220			
Inorganic		54% KNO ₃ – 46%NaNO ₃	220			
Inorganic		NaNO ₃	307	2260	172	0.5
Inorganic		KNO ₃ /KCl	320	2100	74	0.5
Inorganic		KNO ₃	333	2110	266	
Inorganic		MgCl ₂ /KCl/N aCl	380	1800	400	
Solid/solid PCMs	Cross-linked polyethylene		110-115		125-146	
Solid/solid PCMs	Tris(Hydroxymethyl)acetic acid		124		205	
Solid/solid	2-Amino-2-		131		285	

PCMs	hydroxymethyl-1, 3 - propanediol					
Solid/solid PCMs	Cross-linked HDPE		125-146		167-201	
Solid/solid PCMs	2,2-Bis(Hydroxymethyl) Propionic acid		152		289	
Solid/solid PCMs	38.2%NPG/61.8 %PE		170		147	
Solid/solid PCMs	Penterythritol (PE)		185		303	
Eutectics	NaNO ₂ +NaNO ₃ +KNO ₃	40+7+53	142			

Tableau 4: Melting Point and Latent Heat of Fusion of different MCP [Cadet/GRETh]

Parmi ces MCP ayant une température de fusion comprise entre 100°C et 400°C, seule une minorité d'entre eux sont à ce jour au stade de la commercialisation. (cf. chapitre des MCP commercialisés).

3.2.1 Matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température

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. 6).

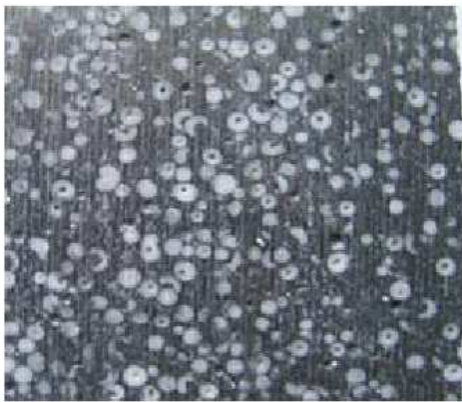


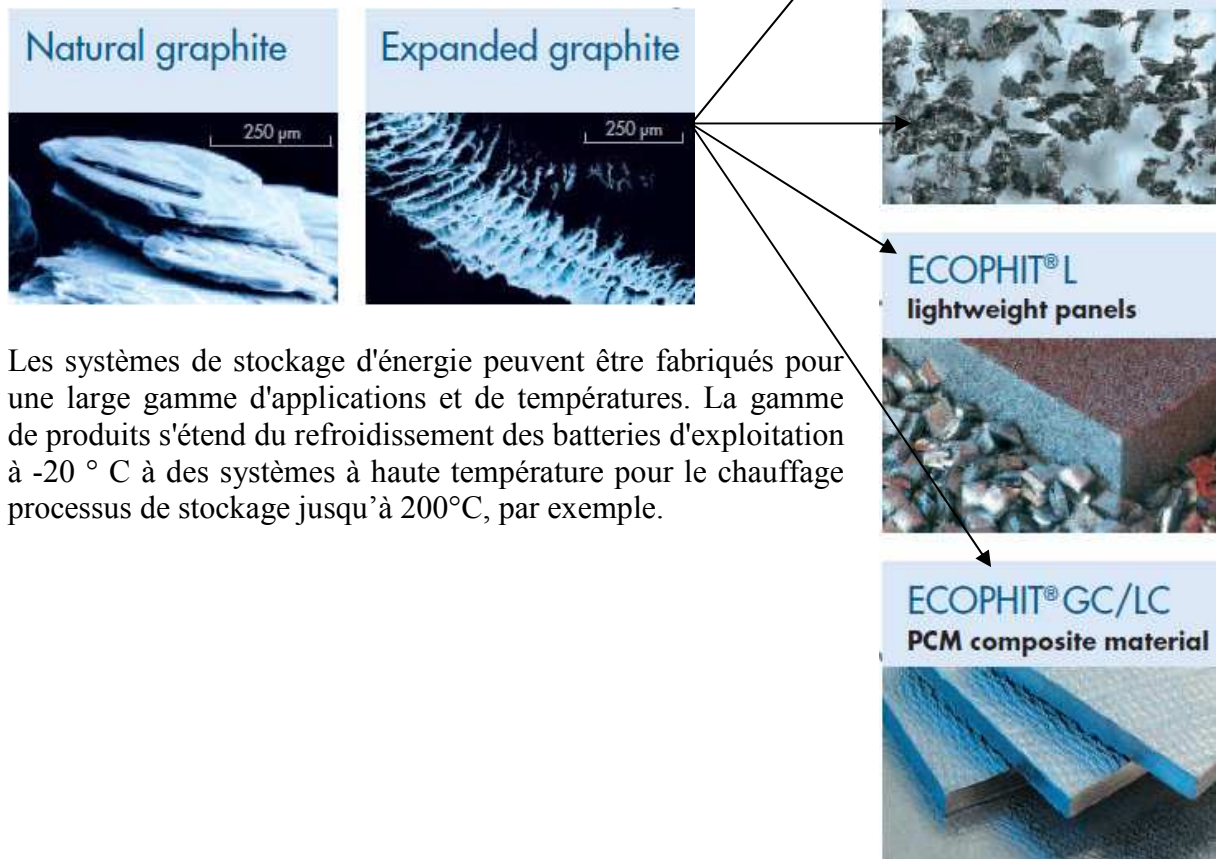
Figure 6 : Coupe transversale d'un matériau élaboré par le SGL (Allemagne) [6]



Figure 7 : matrice PCM/graphite (haut) et composé PCM/graphite (bas) [SGL]

En effet, à 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, compacte 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°C à des systèmes à haute température pour le chauffage processus de stockage jusqu'à 200°C , par exemple.

Sur la figure suivante, on peut voir une représentation comparative des performances entre différents systèmes de stockage :

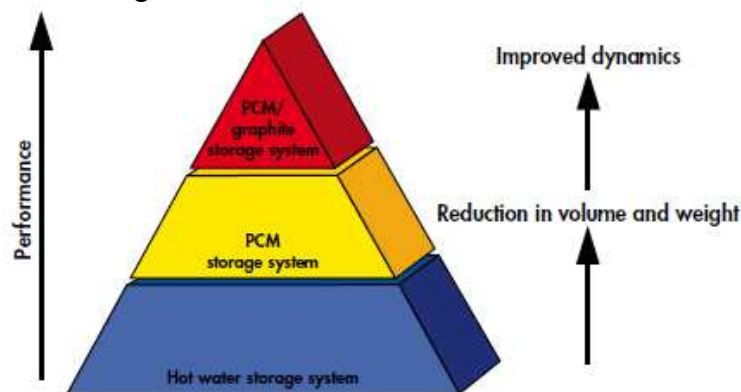


Figure 8 : représentation comparative entre un système de stockage d'eau chaude, de MCP et d'un composé MCP/Graphite [SGL]

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 9).



Figure 9 : Système de stockage compact [SGL]

Toutefois, la plupart des indications qu'elle donne concerne des applications liées aux bâtiments et donc aux basses températures (On pourra retrouver dans le chapitre 4.3 des applications du DLR utilisant des matériaux graphite de SGL).

3.3 Les MCP commercialisés

Actuellement, il existe peu de fabricant de MCP pour des hautes températures, mais celui qui possède la plus grande gamme en termes de température d'application et de variété de composition est l'entreprise EPS Ltd (Environmental Process System Limited).

3.3.1 Les produits de EPS Ltd

L'entreprise EPS Ltd., est une des entreprises fabriquant ces matériaux à changement de phase, elle réalise des MCP de différents types (hydrates de sels, solutions salines, organique, MCP solide/solide).

Voici une liste de ses produits pour des températures de changement d'état comprise entre 100°C et 400°C :

PlusICE PCM RANGE (Salt Based Solution)				
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m³] – [kWh/m³]
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
H284	284	2200	171	376-104.4

H290	290	2200	170	374-103.8
H306	306	2250	173	389-108
H320	320	2110	264	557-154.7
H333	333	2110	266	561-155.8
H346	346	2080	281	584-162.2
H361	361	2060	-	-
H385	385	2050	410	841-233.6
H400	400	2290	408	934-259.4
H435	435	2160	328	708-196
H468	468	2310	435	1005-279.1
H485	485	2310	445	1028-285.5
H499	499	2210	393	869-241.4
H505	505	2230	342	763-211.9
H514	514	2350	413	971-269.7
H635	635	2380	338	804-223.3
H662	662	2450	-	-
H700	700	2360	-	-
H714	714	2040	452	922-256.1
H723	723	2110	602	1270-352.7
H800	800	2160	466	1007-279.7
H854	854	2530	276	698-193.8
H897	897	2290	236	540-150
H1010	1010	2850	-	-

Conductivité thermique d'environ 0.5 W/m.K pour la phase solide et de 1 W/m.K pour la phase liquide.

Tableau 5 : Salt based PCM solution (EPS Ltd)

PlusICE PCM RANGE (HYDRATED SALT)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m³]-[kWh/m³]	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]
S117	117	1450	169	245-68	2.61	0.7

Tableau 6 : hydrated salt based PCM solution (EPS Ltd)

PlusICE PCM RANGE (ORGANIC)						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]	Chaleur Latente [kJ/kg]	Chaleur latente volumétrique [MJ/m³]-[kWh/m³]	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

Tableau 7 : organic PCM solution (EPS Ltd)

PlusICE SOLID-SOLID SOLUTIONS						
Nom	Temp. de fusion [°C]	Densité [kg/m³]		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

Tableau 8 : solid-solid PCM solution (EPS Ltd)

Cette dernière catégorie des MCP SOLID/SOLID est encore en cours de développement et la gamme devrait s'élargir. Ce type de MCP dit « solide/solide » indique un changement de structure cristalline « transition cristalline », sa chaleur latente est comparable au plus efficace des MCP solide/liquide.

En outre, parce que c'est une transition solide/solide, il n'y a pas de changement d'aspect visible du MCP (autre qu'une légère expansion / contraction), et il n'y a pas de problème lié à la manipulation de liquides, à savoir le confinement, le potentiel de fuite, etc...

On constate que l'entreprise EPS Ltd développe de nombreux MCP pour des applications à hautes températures mais elle propose aussi un système global d'encapsulation du MCP sous forme de barreaux (PlusICE beam, cf. Figure 11), de tubes (TubeICE Concept pour les hydrates de sels, cf Figure 10) ainsi ces « emballages de MCP » sont intégrés directement dans les réservoirs de stockage.



Figure 10 : TubeICE concept



Figure 11 : PlusICE beam

3.3.2 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 10 : Principales propriétés physiques du MCP RT100 de RUBITHERM

Ce MCP peut être confiné dans un module de stockage compact développé par RubiTherm appelé CSM-Panels. On pourra se reporter au cahier n°4 pour plus d'information concernant ce confinement et ce stockage.

3.3.3 Les produits de Mitsubishi Chemical

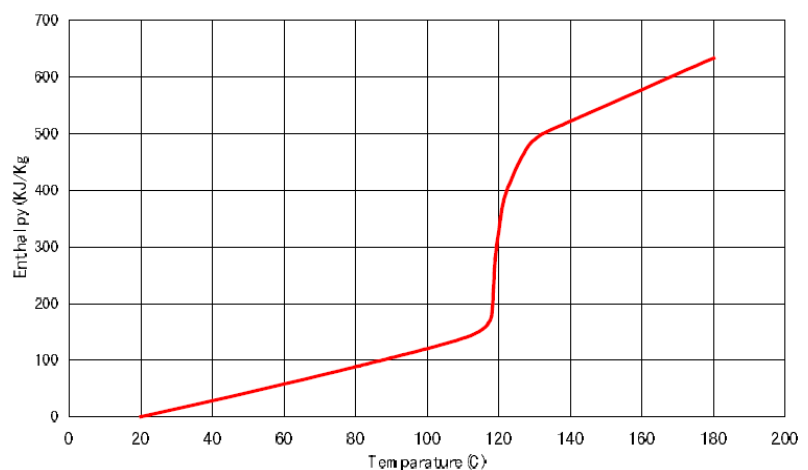
Mitsubishi Chemical propose des MCP pour une gamme de température de 10°C à 118°C. Néanmoins, il est très difficile de trouver, aussi bien dans les ouvrages et articles, que sur leur site internet, les noms associés à ses PCM ainsi que leur caractéristiques. Voici tout de même une liste de ses PCM pour des températures de fusion supérieure à 100°C :

Produit	Composant	Temp de changement d'état [°C]	Chaleur latente [kJ/kg]
STL 120	erythritol	120	320
?	Meso-erythritol	118	339.8

Tableau 11 : 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.

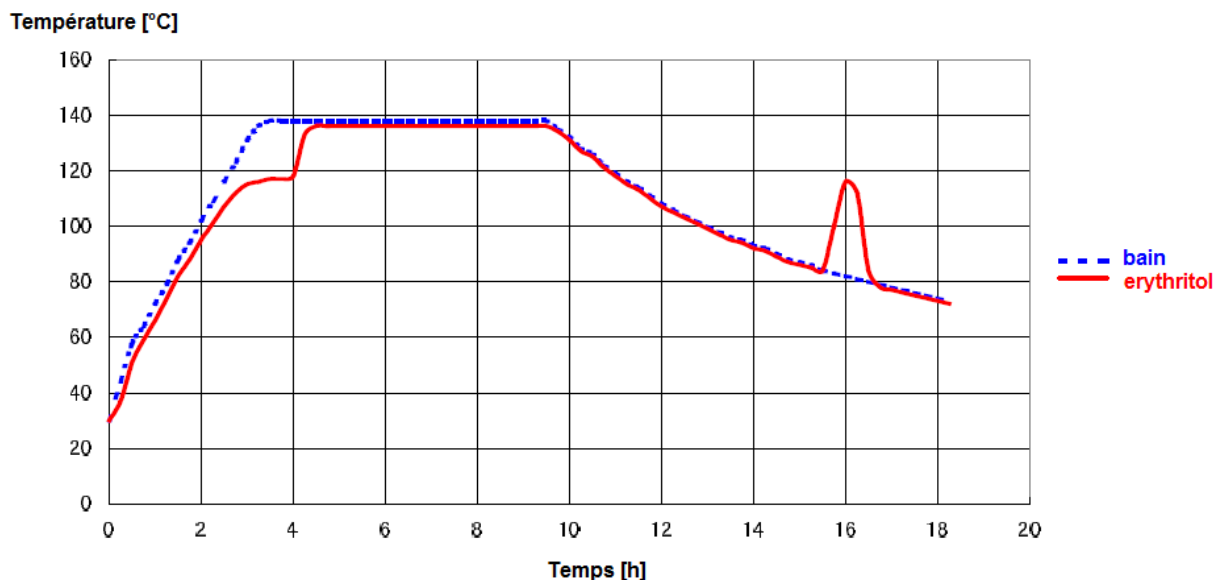


Figure 12 : évolution de la température de l'erythritol (fusion et solidification)[13]

L'erythritol a 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 (cf. Chap 4.1).

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 :

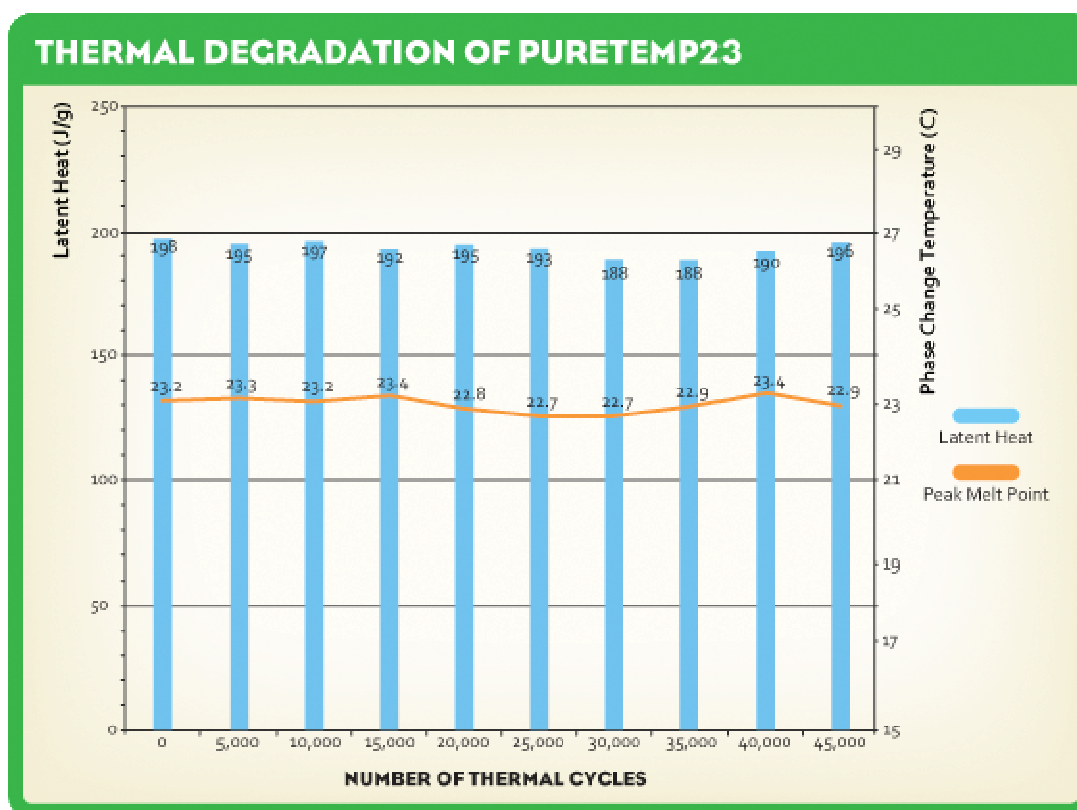


Figure 13 : Analyse des performances thermiques d'un MCP PURETEMP en fonction du nombre de cycles thermiques

Dans leur gamme de MCP, nous avons pu identifier 4 MCP ayant une température de changement de phase de plus de 100°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 12 : Les MCP de PureTemp ayant une Température de fusion supérieure à 100°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.

3.3.5 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	Expansion de volume
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 13 : Astorstat products

Néanmoins, les applications développées par PCM Thermal Solutions, en ce qui concerne le stockage de chaleur avec des procédés d'encapsulation de ces MCP, reste dans une gamme de température comprise entre -23°C et 89°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 14).

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.

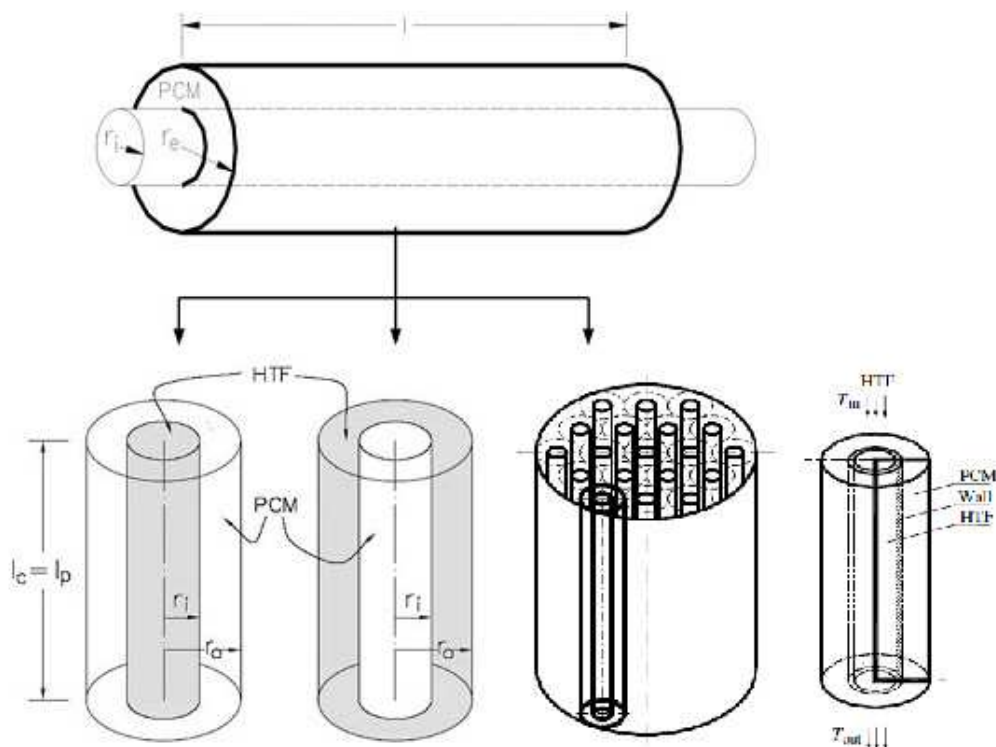


Figure 14 : échangeurs coaxiaux et multi-tubes intégrant des MCP [10]

La figure qui suit montre les différentes techniques communes étudiées pour améliorer le transfert de chaleur avec des MCP.

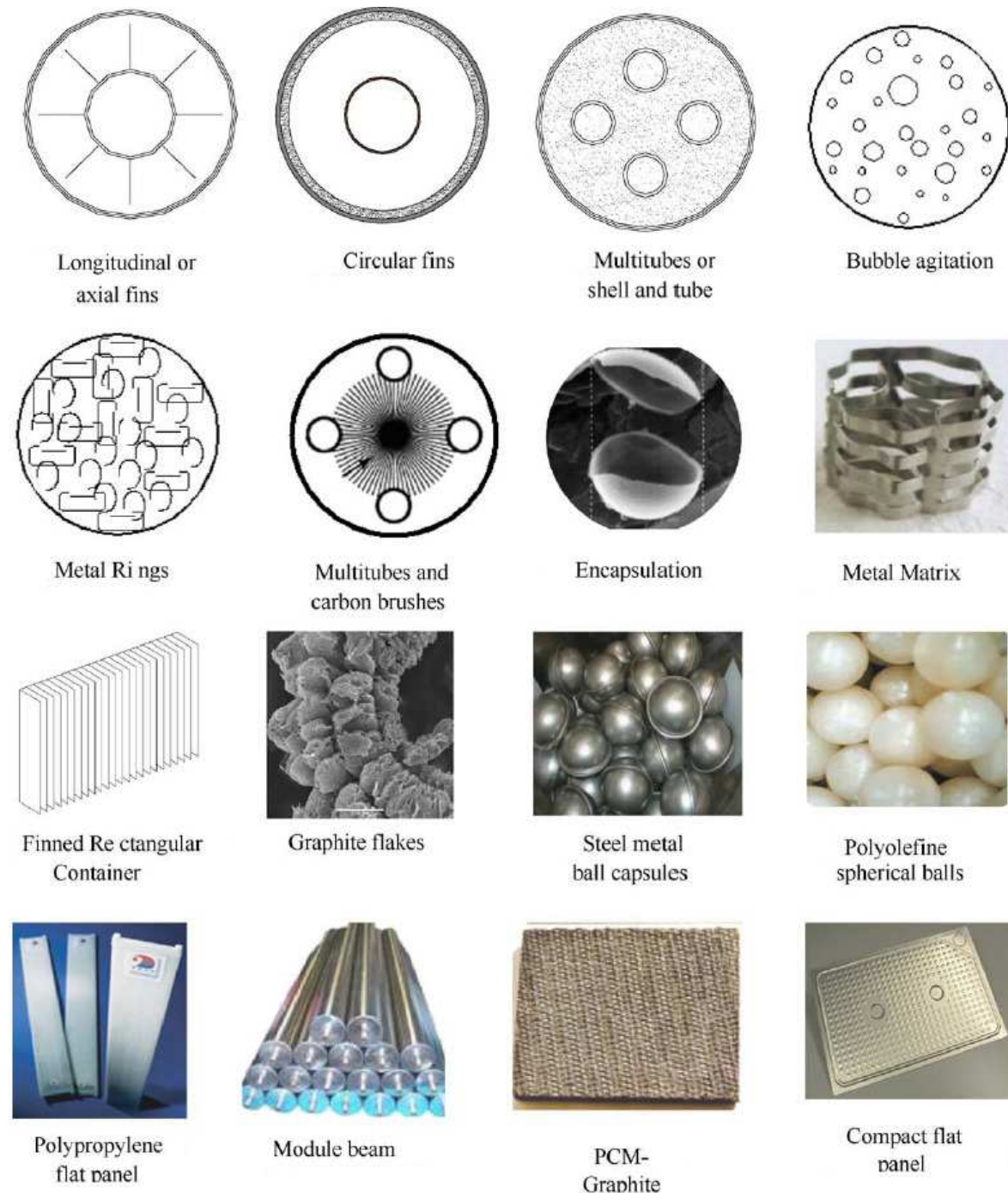
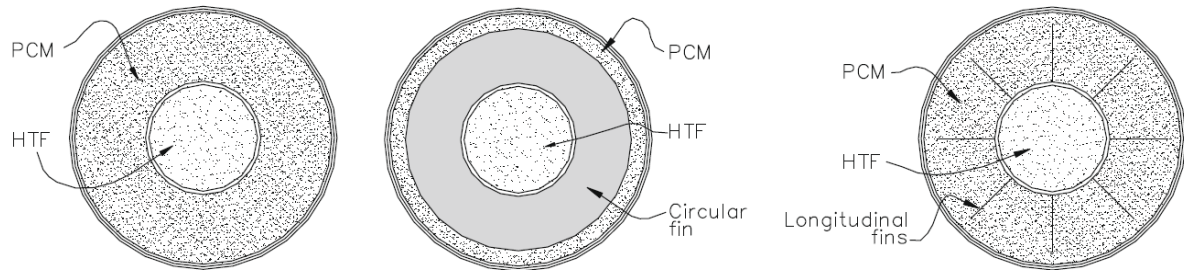


Figure 15: Heat transfer enhancement methods employed in phase change material research.[10]

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 15.1 : 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 $m=60\text{kg}/\text{min}$) 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 :

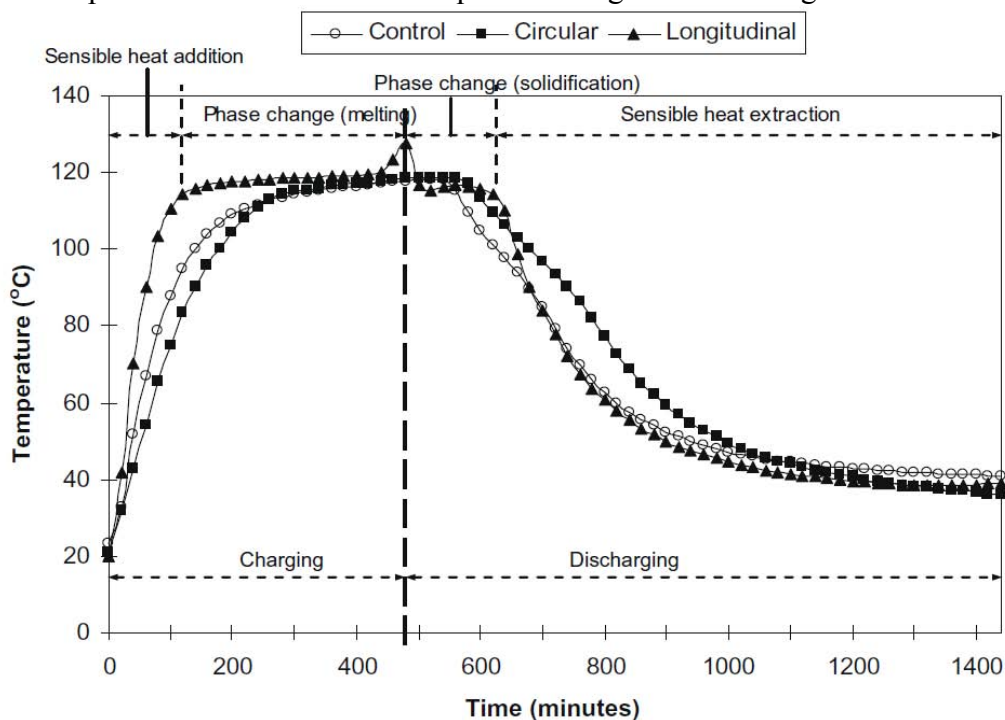


Figure 15.2 : Comparaison de la température moyenne dans le MCP (charge à 140°C et $m = 30$ kg/min et décharge) [11]

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)

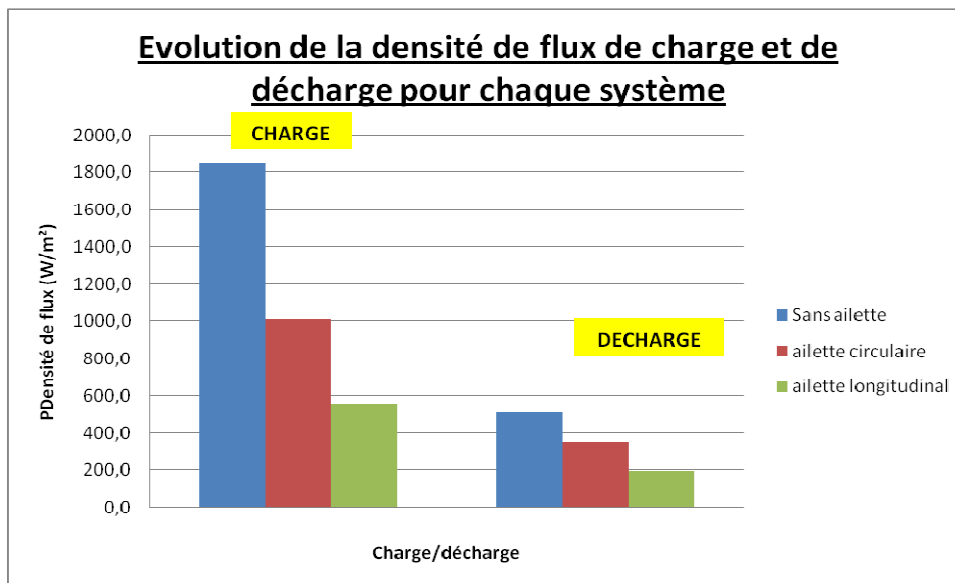


Figure 15.3 : Evolution de la densité de flux entre les différents systèmes ([11] et [Cadet/GRETh])

Néanmoins, lorsque l'on calcule la puissance délivrée ou absorbée par chaque système, on constate une nette augmentation de la puissance :

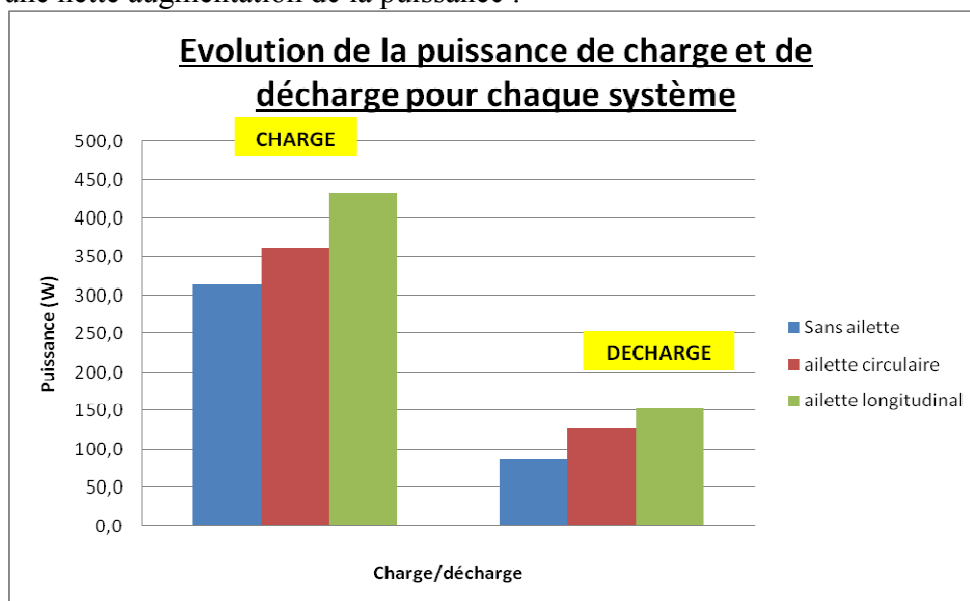
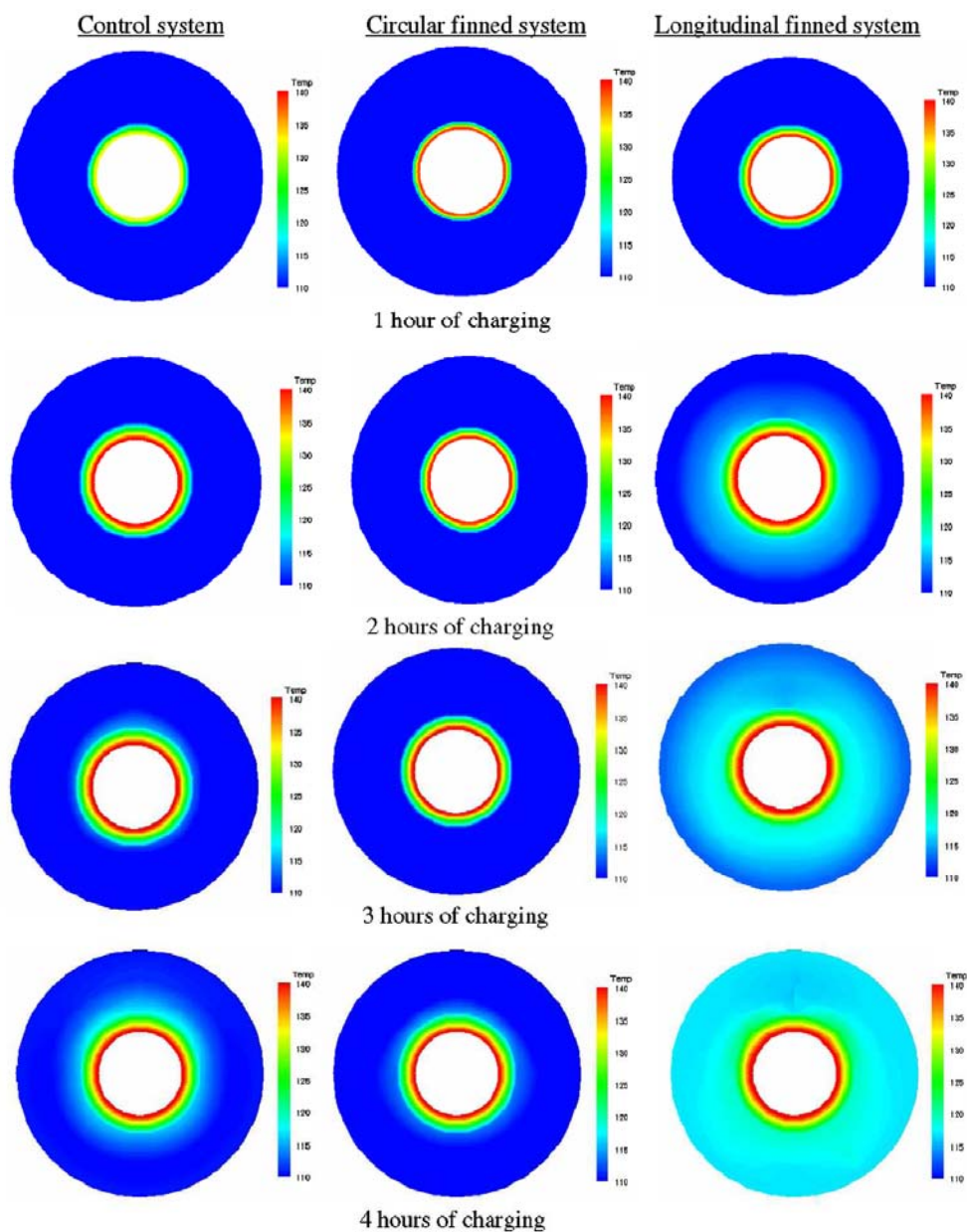


Figure 15.4 : Evolution de la puissance entre les différents systèmes ([11] et [Cadet/GRETh])

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 :



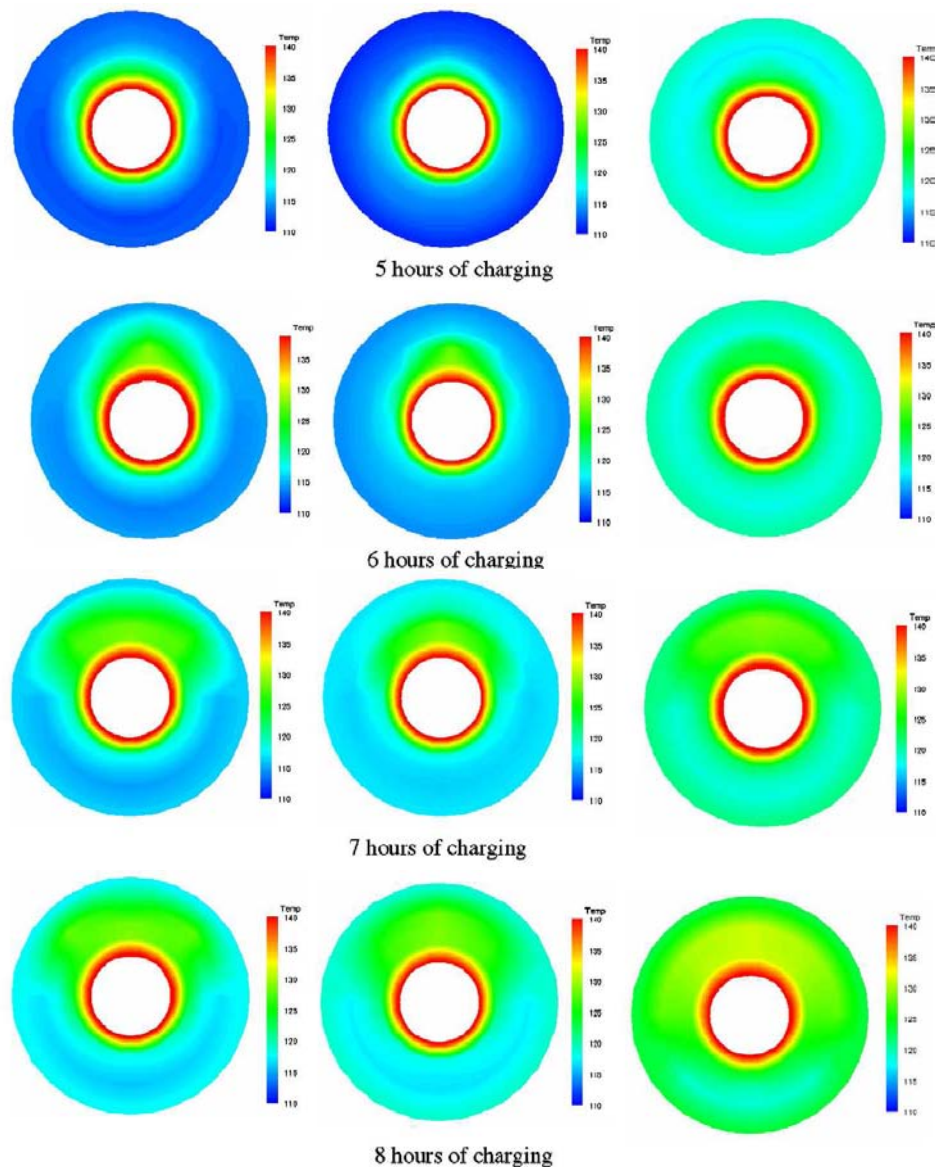


Figure 15.4 : Evolution des températures du MCP pour les 3 systèmes au milieu de l'échangeur (500mm) [11]

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. Cette étude n'est pas transposable avec tous les types de mis en œuvre et de transfert entre MCP et fluide caloporteur, ainsi une autre étude sur un nodule sphérique encapsulant un MCP vous est présentée dans le chapitre 4.2 du cahier n°4.

Une des meilleures solutions envisageable pour améliorer le transfert est l'intégration de matrices graphite/MCP aux seins de l'échangeur (cf. Figure 16). 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.

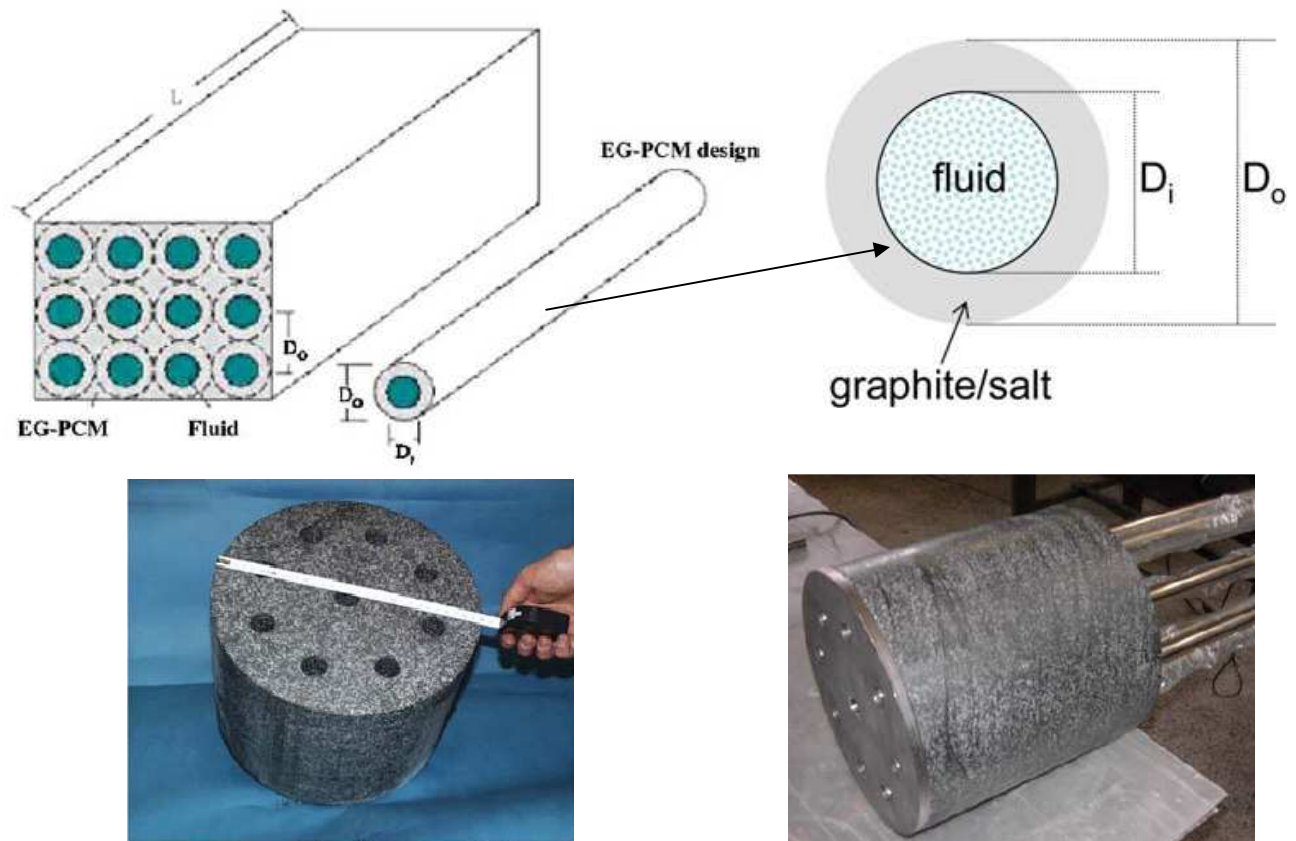


Figure 16 :échangeurs avec matrice Graphite/MCP intégrés [7]

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 14 : 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.

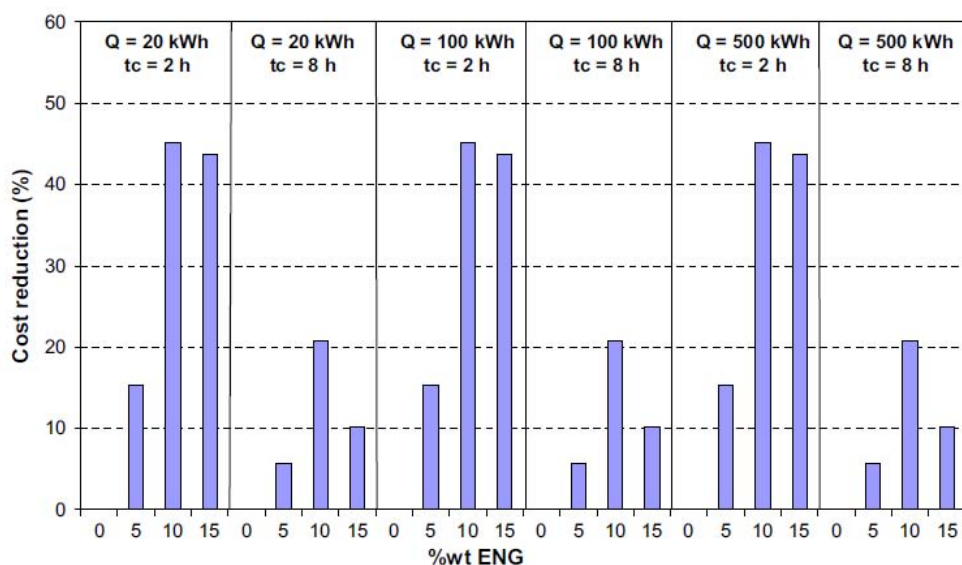


Figure 17 : Réduction des coûts d'investissement induits par l'amélioration de conductivité thermique (basé sur les prix de 0.6€/kg de sel ; 6€/kg de GNE et 25€/m d'acier 316L)[7]

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 17 et 18)

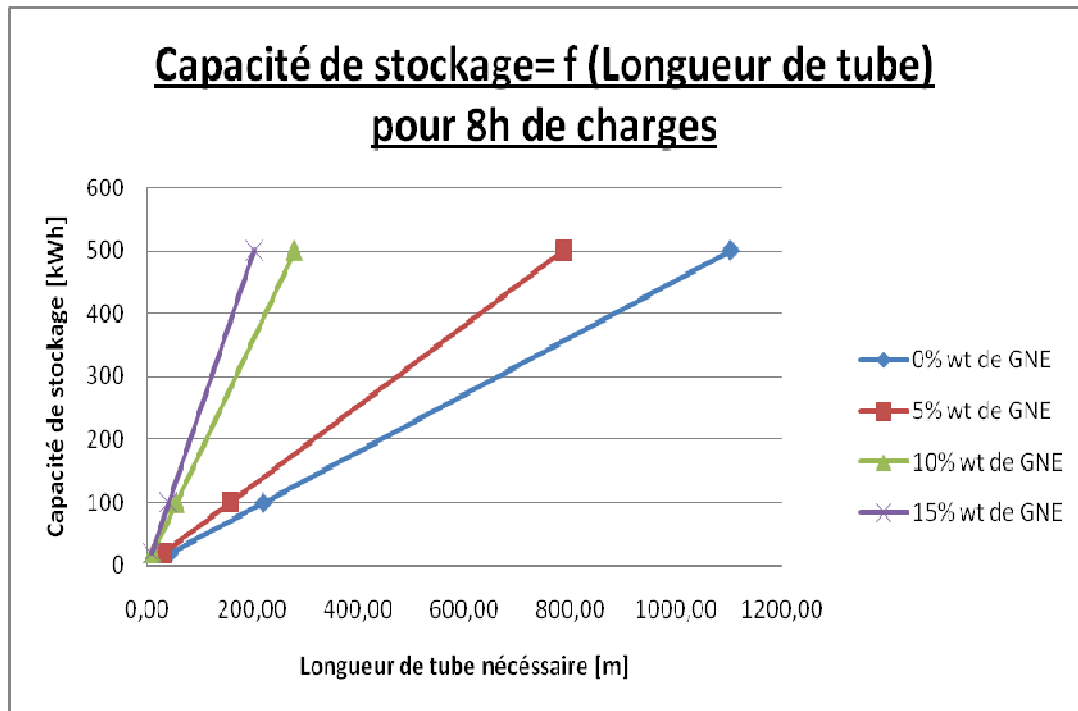


Figure 18 : Evolution de la capacité de stockage en fonction de la longueur de tube pour différentes compositions en GNE ([7] et [Cadet/GRETh])

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).

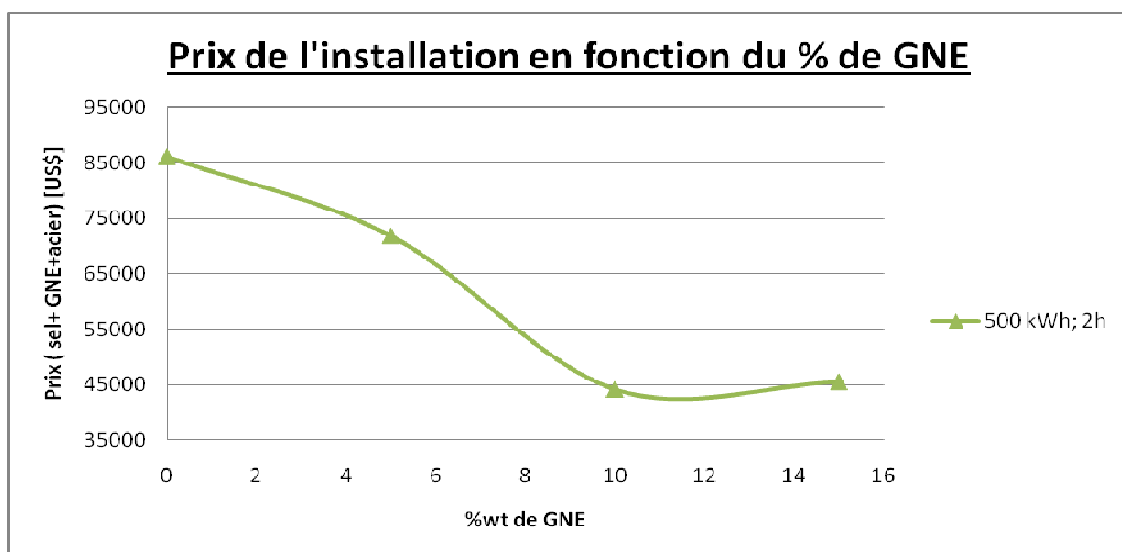


Figure 19 : Evolution du prix total (sel+GNE+acier) en fonction du pourcentage de GNE ([7] et [Cadet/GRETh])

4.2 Les systèmes de stockage avec MCP intégrés

4.2.1-Le stockage « pebble bed »

Comme pour les stockages solides par chaleur sensible, on trouve des réservoirs en lit à garnissage ou « pebble bed ». 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. On pourra donc se référer au cahier n°3 avec les recommandations générales pour ce type de réservoirs (stratification, remplissage, arrangement, taux de vide...etc.). 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 en stockage sensible,
- soit un gain significatif de capacité de stockage thermique pour un même volume de garnissage (remplacement des garnissages solides par des garnissages à base MCP).

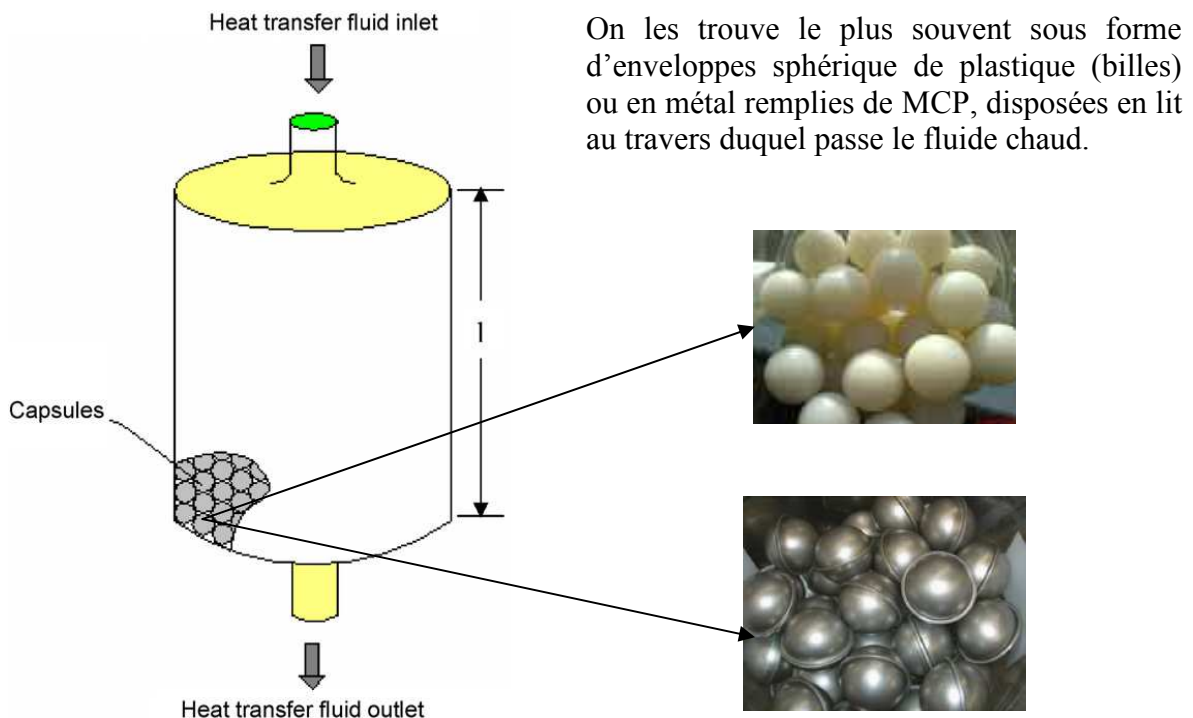


Figure 20 : Réservoir cylindrique avec garnissage en billes de MCP

Ces types de réservoirs à garnissage sont déjà utilisés dans les récupérateurs des fours de verrerie pour des températures nettement supérieures ($>1000^{\circ}\text{C}$) avec des briques de stockage solide.

4.2.2-Le stockage latent en simple réservoir (LHS) et en cascade

On peut aussi trouver (comme les produits de EPS Ltd) des tubes ou barreaux (cf. Figure 10 et 11) directement arrangés dans un volume de stockage, ce sont donc des réservoirs de stockage cylindriques ou rectangulaires, en position horizontale ou verticale dans lesquels un MCP est directement intégré. Il existe aussi d'autres réservoirs dans lesquels l'échangeur de chaleur est noyé dans un MCP (contact direct paroi de l'échangeur/MCP), mais comme dit plus haut ce type de stockage pose des problèmes lors des phases de solidification du MCP pour les

mêmes raisons (fortes résistances thermiques par croissance graduelle de la couche solidifiée au déstockage).

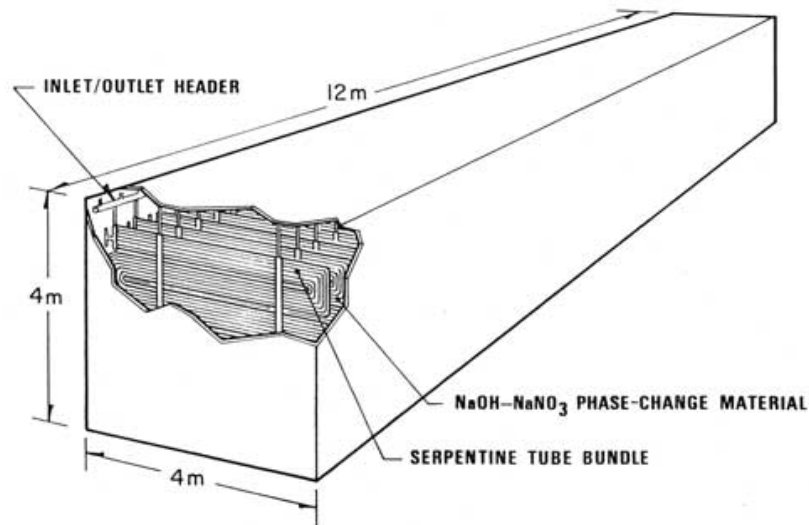


Figure 21 : Réservoir horizontal avec barre de MCP intégrés

D'autres configurations systèmes sont possibles comme par exemple les réservoirs en cascade (CLHS = Cascade Latent Heat Storage). Une étude avec un système comprenant 5 réservoirs en cascade avec 5 différents MCP à été réalisée (cf. Figure 22).

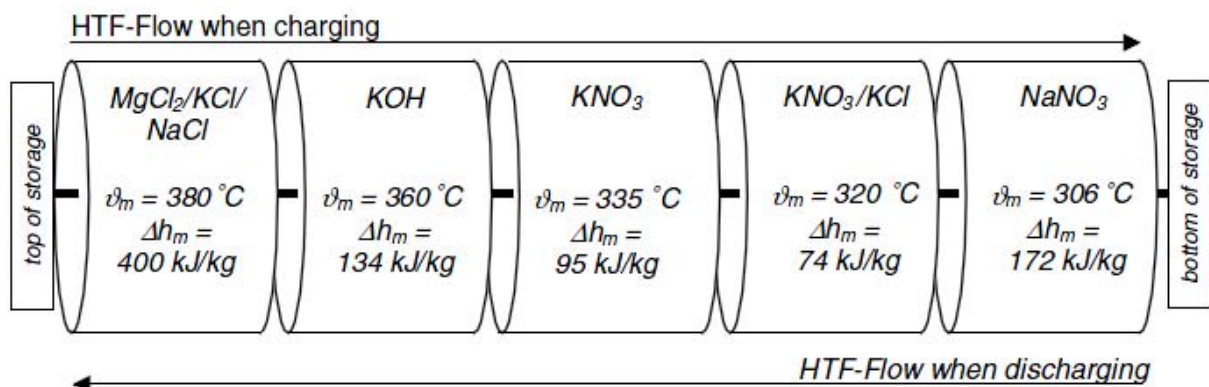


Figure 22 : Système de stockage par chaleur latente en cascade (CLHS) (avec 5 MCP)[14]

On peut voir que ces 5 réservoirs de MCP ont chacun une température de fusion différente qui décroît de haut en bas du stockage. Cet agencement des MCP privilégie une distribution uniforme de température entre le fluide de transfert et les MCP.

La charge se réalise par le haut du stockage et la décharge par le bas. Si la température d'entrée, le débit du fluide de transfert, ou l'apport de chaleur est désavantageusement ajusté la performance d'un CLHS peut se révéler plus mauvaise qu'un stockage LHS simple (Latent Heat Storage). Le module test est composé d'échangeur tubes et calandre positionné verticalement avec de l'huile comme fluide de transfert circulant à l'intérieur du tube. Le MCP est placé dans la calandre autour des tubes où circule l'huile.

Sur la figure 23 qui suit, on montre les courbes de température du HTF pour différents LHS en mode de charge et décharge. La droite en pointillé représente la température d'entrée maximale (charge) et respectivement la température de sortie (décharge) minimum.

On peut voir que le système LHS avec le NaNO3 offre la meilleure capacité de stockage alors

qu'une très petite portion de la masse de PCM a subi un changement de phase (cf. Tableau 15). On devra néanmoins prendre en compte que sa température de fin de décharge dépasse fortement la température maximale de stockage.

Le système KNO₃ en revanche, offre une capacité de stockage et une proportion raisonnable de MCP qui subit un changement de phase, mais toutefois dépasse la température maximale (charge) et minimale (décharge).

Le système avec MgCl₂/KCl/NaCl montre lui, des caractéristiques physiques inappropriées. En effet sa faible conductivité solide impose pour atteindre une fusion complète de l'eutectique dans un délai raisonnable, un écart de température élevé entre le fluide caloporteur (huile) et le point de fusion de l'eutectique (380°C), en moyenne 96% de la masse du MCP reste solide. Le système de CLHS (avec les 5 MCP cf. Figure 22) montre la meilleure proportion de changement de phase, une capacité de stockage acceptable et une température de sortie la plus uniforme dans le temps.

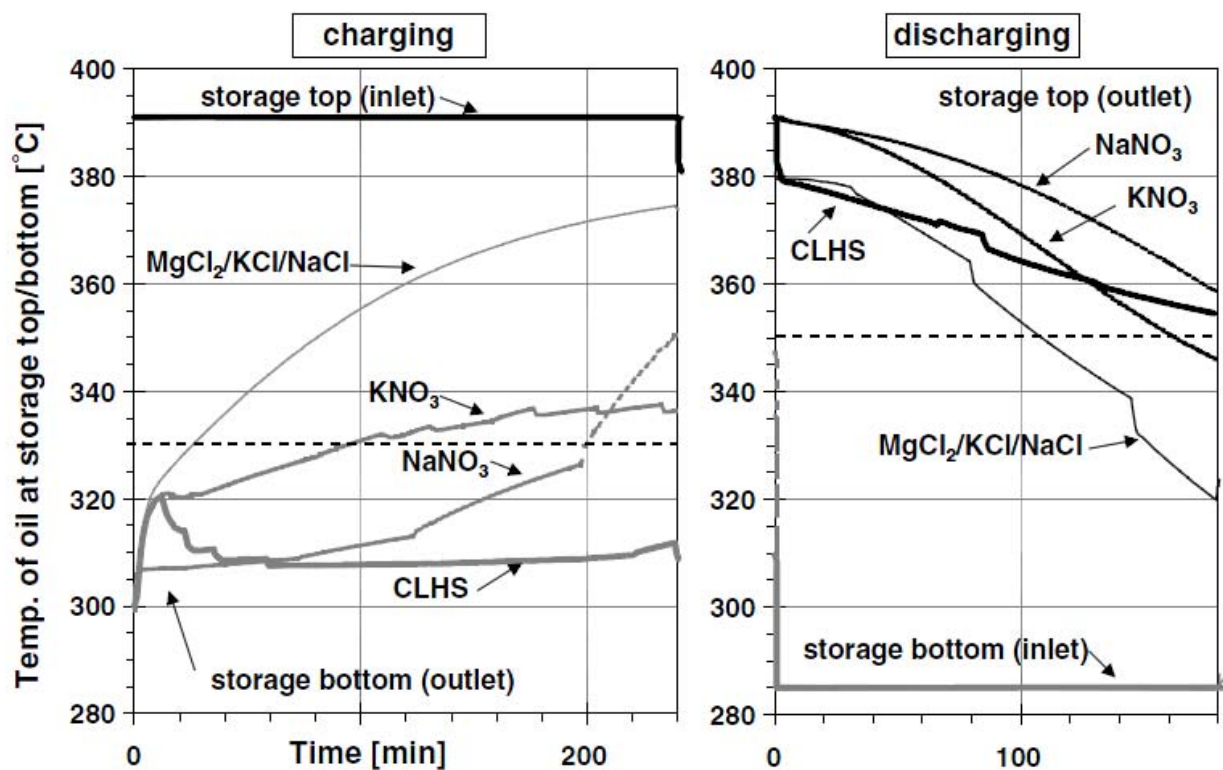


Figure 23 : Température de l'huile de transfert pour 4 LHS différents. Un CLHS (5 MCP différent) et 3 non CLHS (NaNO₃ seul ; KNO₃ seul ; MgCl₂/KCl/NaCl seul) [14]

	CLHS	All NaNO ₃	All KNO ₃	MgCl ₂ /KCl/NaCl
Q [MJ]	64.5	74	67.7	56
m _(total) / m _(MCP) [%]	47	8	30	4

Tableau 15: capacité de stockage et proportion de MCP pour les différents systèmes de stockage [14]

Par rapport à un système LHS simple (sans cascade), un système de stockage en cascade (CLHS) fait travailler une plus grande partie du produit par changement de phase au cours d'un cycle de charge-décharge. De plus, un CLHS permet, pendant la décharge, d'obtenir une température d'huile de sortie plus uniforme qu'un système de LHS simple.

Les différents travaux de recherche concernant l'amélioration de la conductivité thermique des MCP (notamment les travaux sur les matrices graphites/sels (cf. chap. 3.2.1 et 4.1) et les

techniques d'amélioration de transfert de chaleur (cf. figure 15 chap. 4.1)) vont permettre d'accroître les performances de ces systèmes.

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 24).

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.

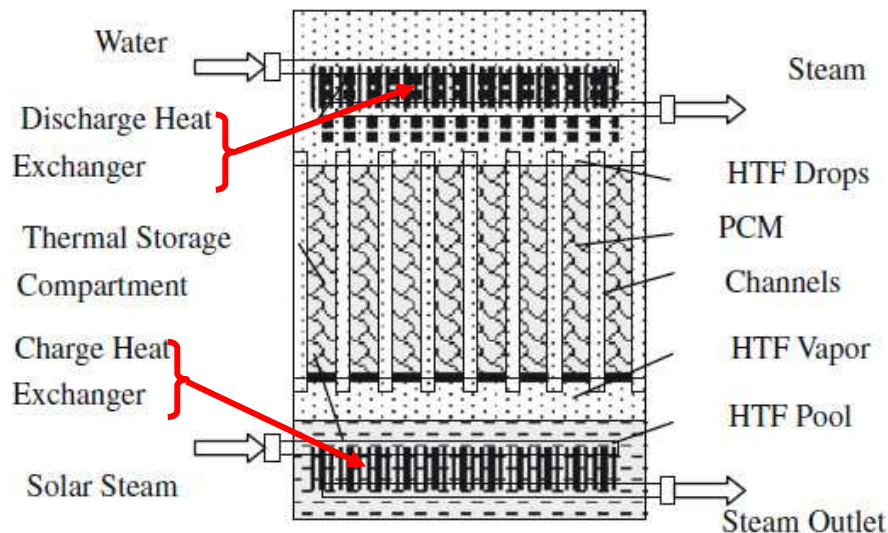


Figure 24 : Schéma du concept RHTS [9]

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 biphenyle / diphenyle) 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.

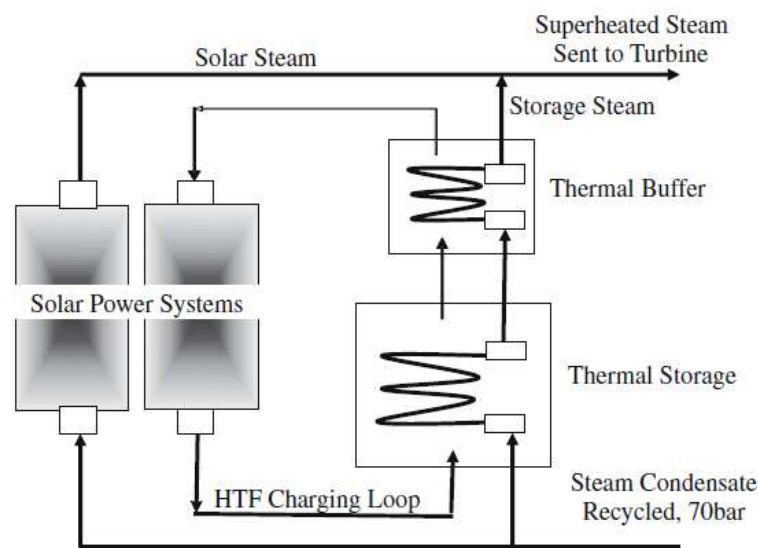


Figure 25: système à deux RHTS intégré en parallèle dans une centrale solaire (stockage + tampon) [9]

Sur la figure 25, 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.

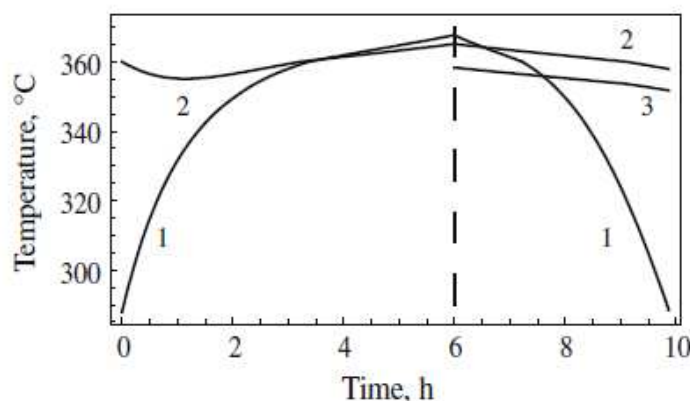


Figure 26 : profil de température pour le branchement en // (1- stockage principale MCP; 2- stockage tampon MCP ; 3- sortie vapeur surchauffé)[9]

Sur la figure 26 suivante, on peut observer les cinétiques de charge et décharge fournies 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 coût de l'installation.

Malgré le surcoût financier par rapport à un 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 thermophysiques 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 a lancé plusieurs projets :

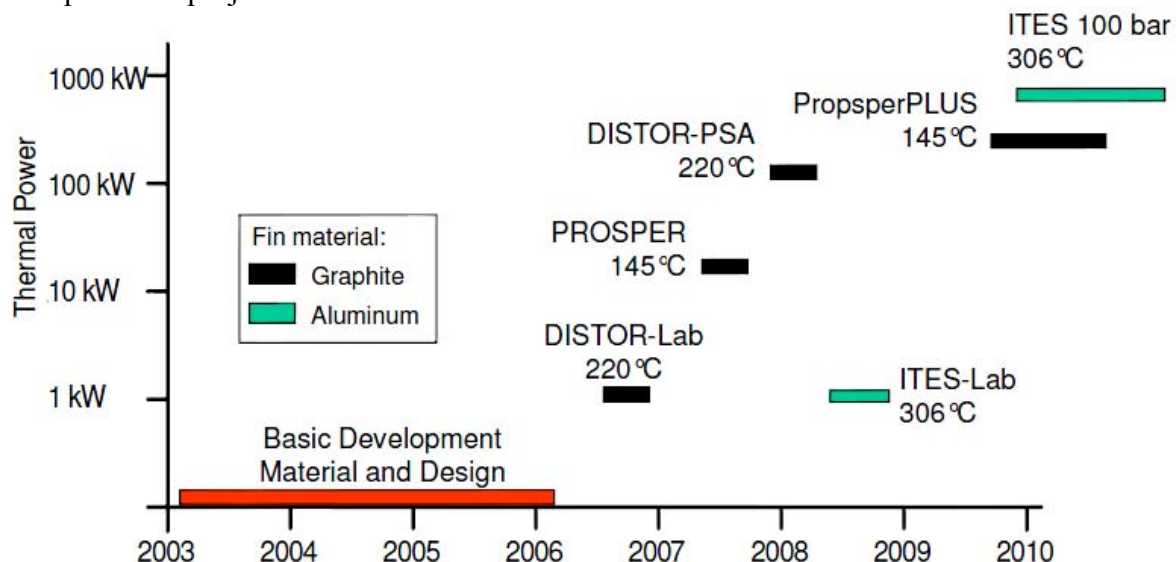


Figure 27 : historique du développement de système de stockage par le DLR [DLR]

Voici les principales propriétés des MCP utilisées 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 16: MCP utilisés par le DLR pour du stockage par chaleur latente [DLR]

Parmi de nombreux concepts basiques, celui du sandwich a été retenu comme ayant le plus grand potentiel de commercialisation d'un stockage par MCP. Ce système consiste en l'assemblage en parallèle de fines 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 28*). 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.

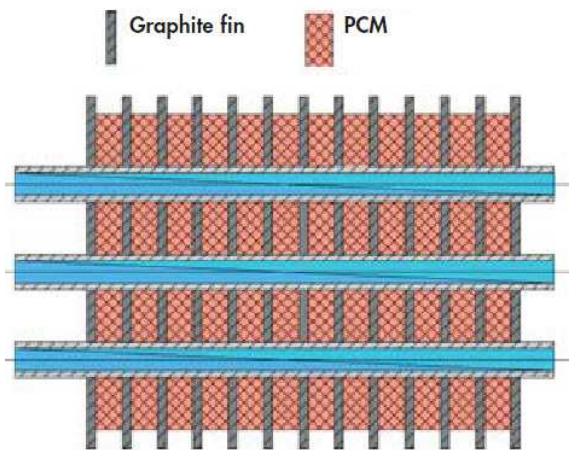


Figure 28 : Schéma du concept « sandwich »

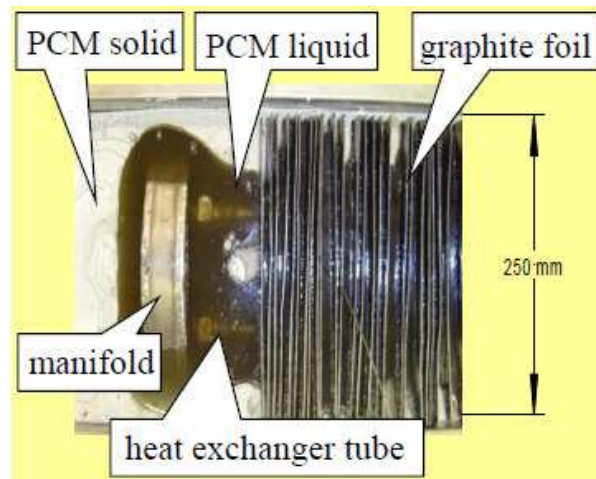


Figure 29 : maquette développée par le DLR

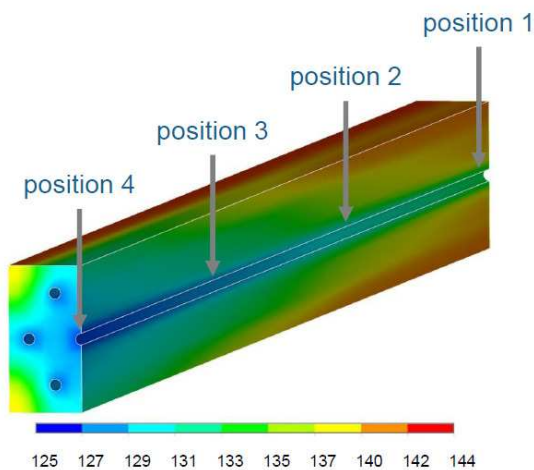


Figure 30 : Simulation du profil de distribution de température du MCP (t=30min)

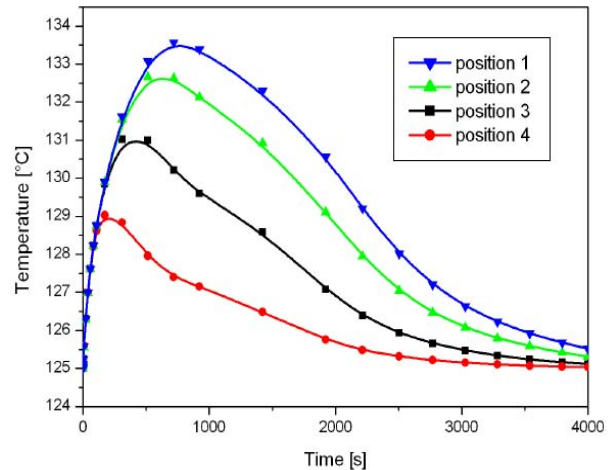


Figure 31 : profil de température du fluide de transfert en fonction du temps (température initiale du MCP=155°C ; Température d'entrée d'eau=125°C ; vitesse d'eau =2.3m/s)

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 30). 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 à les caractéristiques suivantes :

- type de PCM : KNO₃-NaNO₃- NaNO₂
- Melting Point=142°C
- Masse de PCM : 5.7 t
- Volume totale : 4.4 m³
- 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 32 : 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) à été développé. Une fois les tests et simulations réalisés, le DLR à testé des prototypes sur la plateforme Solar de Almeria (Espagne).



Figure 33 : 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 34 : Vue avant l'assemblage complet[8]

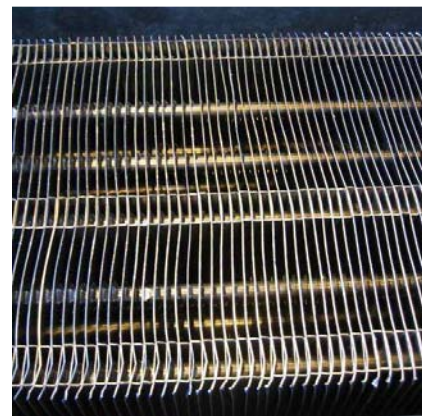


Figure 35 : assemblage des ailettes en aluminium[8]



Figure 36 : 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 37). 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.

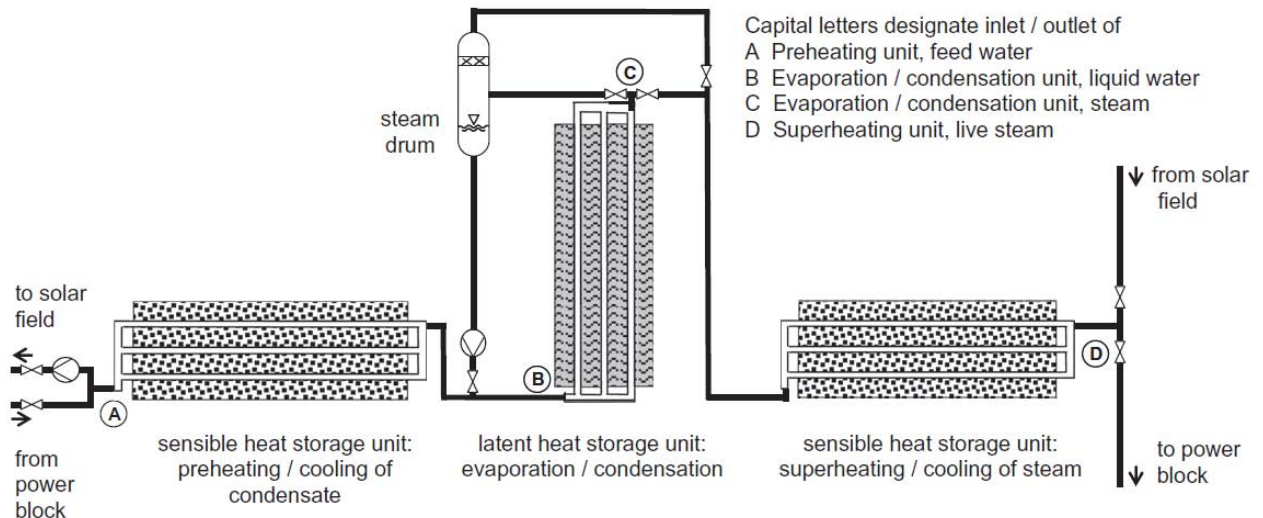


Figure 37: Thermal Energy storage system for DSG combining latent and sensible storage [8]

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).

4. Recommandations générales

Lors de cette étude nous avons pu identifier de nombreux fabricants de matériaux à changement de phase, ainsi que leur différente mise en œuvre. Quelques MCP commercialisés rentrent dans la gamme des hautes températures ($>100^{\circ}C$).

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 ($100^{\circ}C-400^{\circ}C$), les applications industrielles sont quasi inexistantes et restent au point de pilotes de recherche (prototype de recherche). En effet, pour des températures supérieures à $100^{\circ}C$, 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 CO_2 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 CO_2 .

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.

5. 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. Zeraouli (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

Site web:

www.Rubitherm.com

www.PureTemp.com

www.Capzo.com

www.SGLgroup.com

www.zae-bayern.de

www.thermal-design.com/synthetic.html

www.epsltd.co.uk/pcm.htm

ANNEXE 6



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

**Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage
thermique**

Cahier n°6 : les milieux diphasiques liquide-solide

1. Elément de contexte

L'industrie de la réfrigération a été touchée par les directives consécutives au protocole de Montréal (1987) et aux accords de Kyoto (1997) sur l'utilisation des fluides frigorigènes. En effet, l'utilisation des CFC a été interdite ainsi que celle des HCFC. Les frigorigènes du type HFC ont eux aussi été incriminés du fait de leur contribution à l'effet de serre et doivent être utilisés avec parcimonie. C'est dans ce contexte général que se sont développées des recherches de solutions alternatives notamment sur l'usage de fluide frigoporteurs à haute efficacité qui permettraient de limiter les quantités de frigorigène dans les systèmes. Cette évolution traduit la transition engagée depuis de la solution dite du « froid direct » (frigorigène à proximité des produits à refroidir) au « froid indirect » (frigorigène confiné et refroidissant un fluide intermédiaire dit frigoporteur).

Ces recherches se sont orientées ainsi vers le développement de nouveaux fluides frigoporteur possédant une efficacité énergétique intéressante tout en restant neutres vis à- vis de l'environnement. L'adoption de la technique des fluides frigoporteurs présente des avantages: elle simplifie la distribution de froid à de nombreux postes utilisateurs, à partir d'une machine frigorifique unique, les postes d'utilisation en froid peuvent être éloignés de la machine frigorifique. Cependant ce type de refroidissement, qui requiert un circuit secondaire à fluide frigoporteur mono ou diphasique, présente aussi des inconvénients : il peut entraîner l'abaissement de la température de vaporisation du fluide frigorigène de part le fait que le système est équipé d'un échangeur supplémentaire et donc réduire l'efficacité thermodynamique du dispositif. Par ailleurs, il faut compter un prix d'installation supérieur de 10 à 15 % à cause du circuit du frigoporteur, des réservoirs, des pompes et du frigoporteur lui-même. Afin de limiter ces surcoûts, il est judicieux de sélectionner de manière pertinente les fluides frigoporteurs. Le choix repose sur plusieurs critères parmi lesquels :

- adaptation à la température désirée ;
- bonnes propriétés thermo-physiques qui permettent une capacité volumique de transport élevée
- coefficients de transfert de chaleur élevés (permettant un faible écart de température entre les fluides) ;
- faibles pertes de charge pour limiter la consommation d'énergie des pompes ;
- non corrosif non toxique, ininflammable, sûr à l'emploi ;
- coût unitaire raisonnable.

2. Matériaux et mise en oeuvre

2.1 Terminologie

On rappelle dans les lignes qui suivent quelques éléments de terminologie utilisés dans ce cahier :

- *Particule*: regroupe l'ensemble des structures en suspension dans le fluide porteur (émulsions, cristaux de glace, gels organiques ou minéraux et microcapsules).
- *MCP (Matériau à Changement de Phase)*: ce matériau est contenu dans les particules. Il est choisi pour sa température de fusion et sa chaleur latente. Il change de phase au cours des cycles thermiques
- *Gels*; ces particules sont constituées d'une matrice poreuse où le MCP est retenu dans les pores par des forces de capillarité. Ces particules sont mises en suspension dans un fluide non-miscible avec le MCP
- *Microcapsules*: le MCP est encapsulé dans une coque. Il y a donc une paroi étanche qui sépare le MCP du fluide porteur.
- *Coulis de glace*: ce fluide diphasique se compose de cristaux de glace en suspension dans une solution aqueuse. Les cristaux sont formés en général sur les parois d'un échangeur à surface raclée ou brossée
- *Coulis de glace stabilisé*: ce terme a été donné par le L. B. H. P. (Laboratoire de Biorhéologie et d'Hydrodynamique Physico-chimique Paris Jussieu) au fluide diphasique qu'il a mis au point. Ce sont des particules de gels organiques contenant de l'eau et qui sont en suspension dans une phase organique

2.2 – Propriétés thermo-physiques

Suivant les mises en œuvre des milieux diphasiques (encapsulation, émulsions, gels,...) le fluide MCP retenu est généralement distinct. Toutefois on retrouve les fluides MCP identifiés dans le cahier de cette étude (cahier 1 : stockage par chaleur latente à basse et moyenne température) en faisant toutefois le constat que – compte tenu des applications visées par ces fluides frigoporteurs – les usages visés sont essentiellement à basse température.

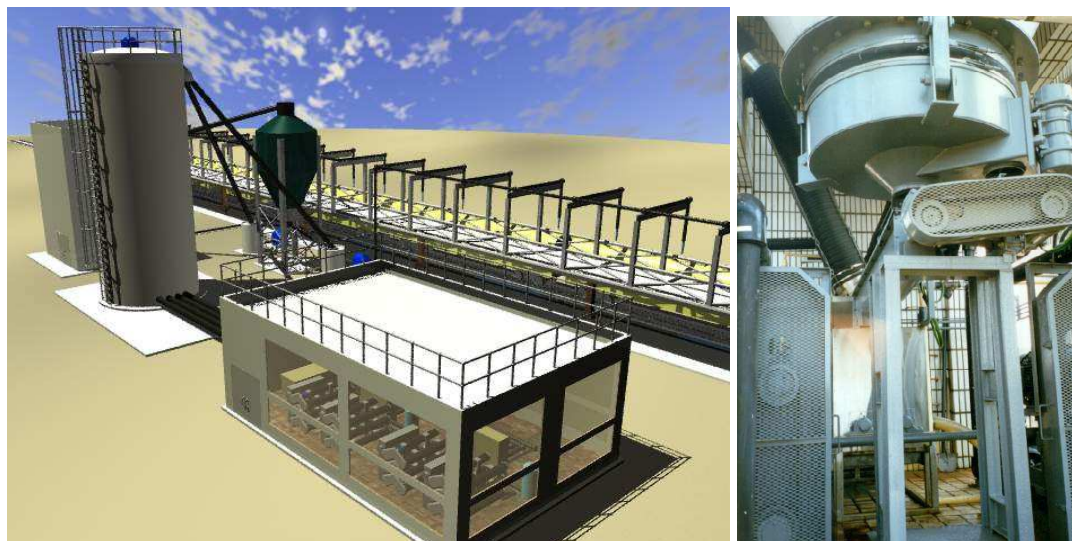
On renverra le lecteur au Cahier n°1 pour des données complètes des propriétés thermo-physiques des MCP à basse température.

2.3 – Mise en oeuvre et procédés de fabrication

Il existe de nombreux procédés pour mettre en suspension un fluide à changement de phase dans un fluide porteur.

Pour la formation de coulis de glace (suspension de cristaux de glace d'eau de 1-10 microns dans une solution aqueuse saline ou alcoolisée), un des moyens, relativement traditionnel, est l'utilisation d'échangeurs à surface raclée ou brossée pour former des cristaux de glace en suspension dans cette solution aqueuse. Ce milieu diphasique ainsi produit désigné par « ice slurry » (coulis de glace) peut également être obtenu par injection de gaz neutre (CO₂, O₃) à basse température en contact direct avec la solution aqueuse (généralement une solution saline ou un mélange eau-alcool pour abaisser le point de congélation du milieu et l'ajuster à l'usage). La figure 1 illustre les deux procédés de production de ces « ice slurry ».

Une alternative technique – portée notamment par des recherches au Cemagref consiste à réaliser sous pression (> 20 bar) au sein d'une solution aqueuse des hydrates avec des fluides divers (CO₂, ...) (figure 2) : cette alternative qui pourrait permettre de gagner en performances énergétiques et surtout d'être applicable à la climatisation de bâtiment grâce à une température d'équilibre qui peut évoluer de 0°C à 10°C (et dans ces conditions à la pression de 50 bar) reste au stade du laboratoire et n'a pas été appliquée à des processus industriels.



Procédé SUNWELL : vue d'une usine de production et de l'évaporateur à surface raclée

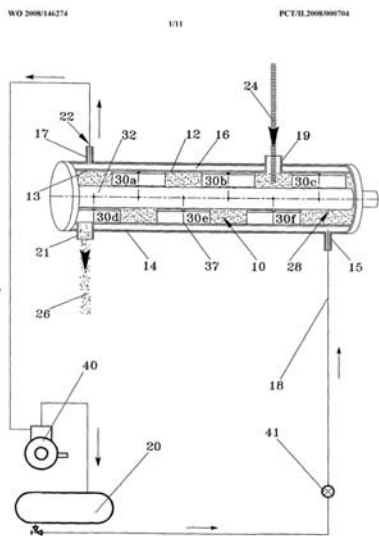


Fig 1

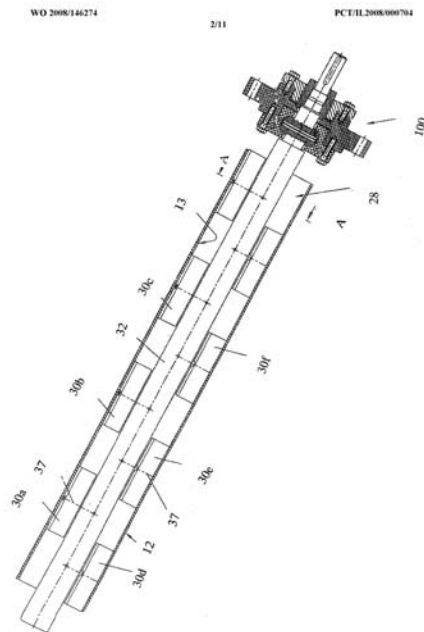
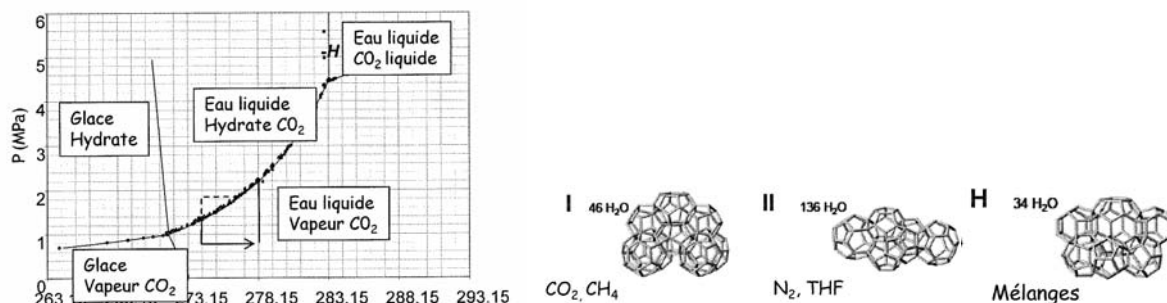


Fig 2

SUBSTITUTE SHEET (RULE 26)

Procédé CRYTEC : schéma du procédé « ice slurry with bubble » et dessin du production du milieu diphasique

Figure 1 : Les différents procédés de fabrication de « ice slurry »



Courbe d'équilibre des hydrates CO2 e représentation des structure moléculaires des clathrat es hydrates

Figure 2 : Les hydrates comme structure d'un milieu diphasique

Depuis une dizaine d'années, on a proposé d'autres solutions que celles des « ice slurry » : les fluides organiques, dont les molécules sont de taille importante, peuvent être facilement encapsulés par une membrane étanche. Par contre, il est délicat d'obtenir des microcapsules chargées avec une phase aqueuse sans être confronté à des phénomènes d'exsudation. En effet, les molécules d'eau qui sont de petite taille, arrivent à franchir le réseau polymérique de la membrane.

Ainsi lorsque les deux phases sont non miscibles, le choix de procédés de fabrication est large. Ainsi, la suspension peut être réalisée à partir :

- d'une émulsion stabilisée par des tensio-actifs ;
- d'un gel organique constitué d'une matrice polymère ;

- d'un gel minéral préparé par un procédé sol-gel ;
- d'une micro-encapsulation.

Les émulsions

Les émulsions sont réalisées à partir de deux fluides non miscibles. Le fluide à émulsionner est versé sous agitation dans le fluide porteur et forme une dispersion de micro-gouttelettes. Les émulsions sont intéressantes thermiquement car les deux fluides sont en contact direct. Par contre elles doivent être soumises à une agitation permanente pour éviter la coalescence des micro-gouttelettes entre elles. Généralement des tensio-actifs sont ajoutés pour les stabiliser : ils enrobent les gouttelettes sous forme de micelles. En fonction de la quantité de tensio-actifs, les micelles s'arrangent sous forme de sphères ou sous forme de plaquettes. Les plaquettes sont intéressantes par leur stabilité et lorsqu'elles sont soumises à des forces de cisaillement, elles se disposent entre elles pour former des microvésicules multi-lamellaires (sphérulites), représentées sur la Figure 1. Leur agencement est comparable aux "pelures d'oignon".

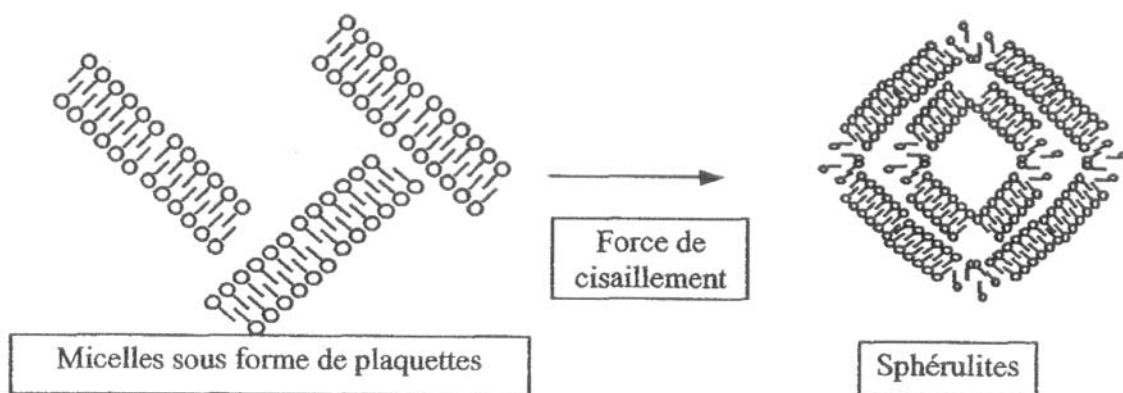


Figure 1 :Fabrication des sphérulites

Sous cette forme, l'émulsion est très stable, mais 40 à 60 % de la gouttelette est composée de tensio-actifs. La taille des gouttes obtenues est de l'ordre du micromètre. Le fluide à changement de phase est ainsi emprisonné sous forme de couches successives séparées par des tensioactifs ce qui favorise le phénomène de surfusion.

Les gels organiques

Les gels d'origine minérale ou organique présentent une forte affinité avec les solutions aqueuses. Leur structure poreuse " ouverte " vers le fluide porteur doit présenter une forte affinité envers le fluide à changement de phase et, au contraire, une faible affinité envers le fluide porteur. Par ailleurs, le fluide à changement de phase ne doit pas être soluble dans le fluide porteur. Ces contraintes limitent les choix des couples fluides à changement de phase et fluides porteurs.

Les gels organiques, sous forme de dispersion, se présentent sous la forme d'un réseau polymère, composé à 90% d'eau obtenu par un processus de polymérisation en solution. Ils ne nécessitent pas du fait de la matrice polymère, d'enrobage préalable à leur utilisation. Le processus de polymérisation est une réaction radicalaire entre un monomère et un radical libre qui comprend trois étapes : une étape d'amorçage (l'amorceur se décompose sous l'action de la chaleur ou du pH en un radical libre), une réaction avec un monomère en lui transférant son électron non-apparié (la molécule activée se combine avec un monomère voisin, lequel devient à son tour activé et la polymérisation développe ainsi un réseau plus ou moins complexe de boucles et de branches interconnectées), une étape de terminaison (l'extrémité de chaque ramification de la chaîne macromoléculaire est désactivée par une réaction de recombinaison (union de deux macro-radicaux par leurs liaisons terminales) ou par une réaction de dismutation (transfert d'un atome d'hydrogène d'une macromolécule à l'autre)-

Les gels minéraux

Les solides "hyper poreux" permettent l'immobilisation de fluides sous forme de gels. De tels matériaux sont peu nombreux et la famille des aérogels de silice présentent des porosités de l'ordre de 97%. La préparation des aérogels de silice est basée sur une méthode de chimie douce (qui n'exige ni hautes températures, ni fortes pressions) appelée sol-gel. Un sol de silice est préparé en milieu alcoolique par hydrolyse d'un précurseur de silice en présence d'un catalyseur et condensé (prise en masse) en gel grâce au développement de réactions de polymérisation-condensation de telle sorte que la phase liquide est maintenue "piégée" dans les pores du gel comme indiqué Figure 2. L'opération suivante est plus physique que chimique. Elle consiste à sécher dans des conditions hypercritiques le gel sans détruire sa porosité de façon à récupérer un matériau sec aussi poreux que le gel qui lui a donné naissance. Le séchage supercritique se fait dans un autoclave à une température légèrement supérieure à la température critique. Ainsi, le passage de la phase liquide à la phase vapeur se produit sans apparition d'une interface. L'existence d'une interface dans un milieu poreux lors du séchage du gel par évaporation classique, développe des forces de tension superficielle importantes sur la paroi des pores qui entraînent l'effondrement de la structure.

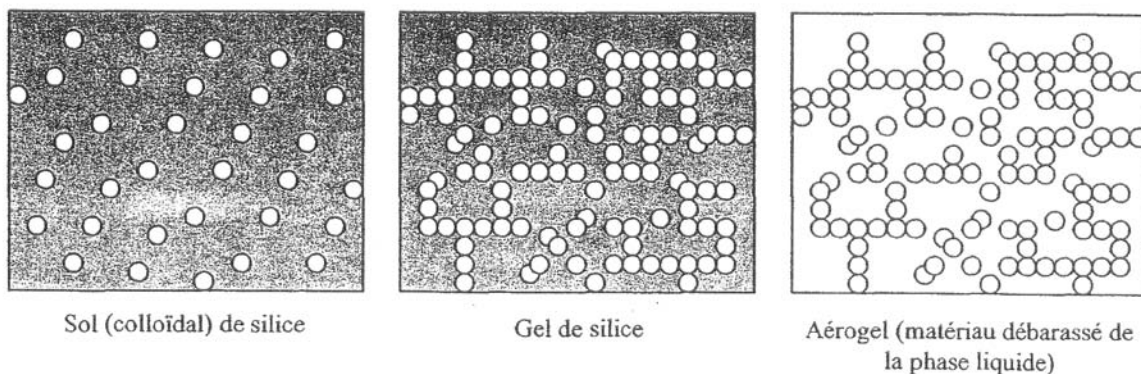


Figure 2: le principe de la méthode sol-gel

Les forces de capillarité dans les pores de 20 nanomètre sont très importantes et permettent de stocker par rétention de nombreux fluides. Cependant, l'eau réagit avec les atomes d'oxygène de la silice (SiO_2) : les solutions aqueuses solubilisent la structure poreuse empêchant leur stockage dans un aérogel de silice. Pour les mêmes raisons, le fluide porteur ne peut être aqueux. Il est donc impératif que le fluide à changement de phase et le fluide porteur soient de nature organique et que ces deux fluides ne soient pas miscibles entre eux (ex : dodécane en suspension dans de l'éthanol). Ces contraintes limitent l'application de l'aérogel de silice comme matrice de transport pour les frigoporteurs.

La micro-encapsulation

La micro-encapsulation est une méthode de conditionnement d'un liquide dans une membrane continue dans le but de disperser la matière encapsulée dans un fluide porteur quelconque. La micro-encapsulation laisse donc un large éventail de choix sur le couple (matériel à encapsuler (MCP) / fluide porteur) permettant de favoriser des critères thermiques et hydrauliques pour leur sélection.

Il existe de nombreuses méthodes pour produire des microcapsules qui se différencient les unes des autres par des détails comme la solubilité du polymère formant la paroi, la taille des particules, l'épaisseur et la perméabilité de la paroi, les propriétés physiques... Pour la réalisation de frigoporteur, trois principaux types de procédés peuvent être utilisés :

- les procédés physico-chimiques : coacervation (séparation de phases), évaporation d'un solvant dans une émulsion;
- les procédés chimiques : polymérisation interfaciale, réticulation ou polymérisation d'une émulsion;
- les procédés mécaniques : pressage * enrobage, séchage d'une pulvérisation.

La figure 3 récapitule les différentes méthodes d'encapsulation et le domaine de tailles obtenues.

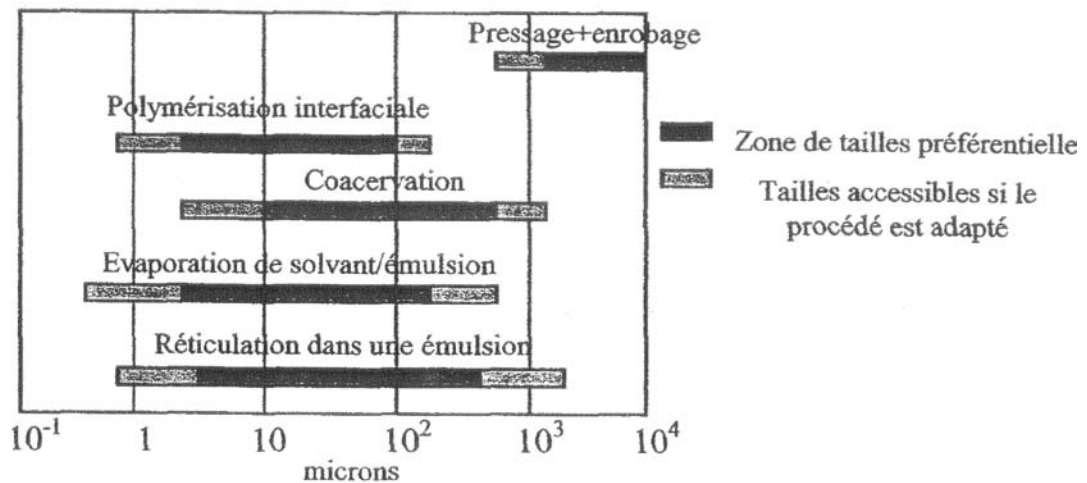


Figure 3 : Tailles des particules obtenues en utilisant différents procédés d'encapsulation

Dans le procédé de fabrication, plusieurs facteurs influent sur la taille et la qualité des microcapsules. Leur taille dépend :

- du taux de cisaillement lors de la fabrication de l'émulsion;
- des viscosités des phases de l'émulsion;
- des proportions de chaque phase;
- de la concentration et de la nature des différents composés ;
- du profil de température durant la production.

Leur qualité dépend :

- du choix du solvant;
- du mélange de solvants utilisés ;
- de la solubilité dans l'eau des agents actifs ;
- du taux d'extraction du solvant ;
- du type et de la masse moléculaire du polymère ;

Le procédé de coacervation ou séparation de phases consiste en l'enrobage d'une émulsion par un film polymère précipité à partir d'une solution colloïdale de ce polymère déstabilisée par un changement physique ou chimique du milieu : variations de composition, de pH ou de température, ajout d'un produit non-solvant pour le polymère... Initialement, ce précipité se présente au sein de la solution colloïdale, sous la forme de microgouttelettes de 1 nm à 0,5 microns, appelées "coacervats", riches en polymères et visqueuses. Puis les coacervats tendent à coalescer ou à s'adsorber sur les gouttelettes de l'émulsion à enrober. Pour éviter leur coalescence et favoriser au contraire l'enrobage, un colloïde protecteur a dû être préalablement dissous dans la solution colloïdale. Les coacervats adsorbés coalescent en un film continu. Enfin, la solidification de l'enrobage est obtenue de diverses manières : refroidissement, désolvation plus prononcée ou réticulation par irradiation. Les microcapsules obtenues font, en général, moins de 1,25 mm, avec une épaisseur de paroi élastique de 1 à 50 microns et une teneur en produit encapsulé supérieure à 60 %.

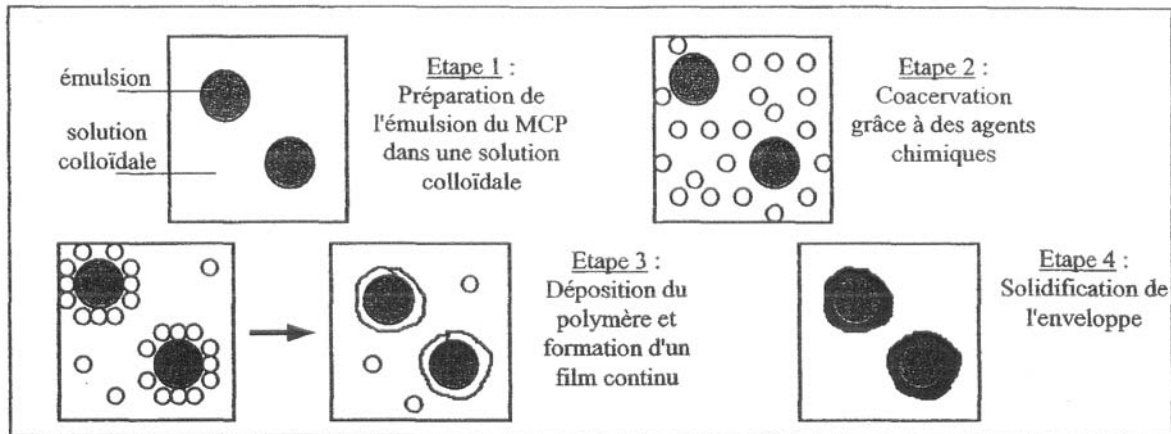


Figure 4 : Les différentes étapes de la micro-encapsulation par coacervation

L'encapsulation d'une émulsion par évaporation du solvant est expliquée sur la Figure 5. Ce procédé permet d'obtenir des sphères de quelques microns à quelques centaines de microns- L'étape d'évaporation doit être étudiée de façon à éviter, ou du moins limiter, la cristallisation du MCP pendant la solidification du film polymère.

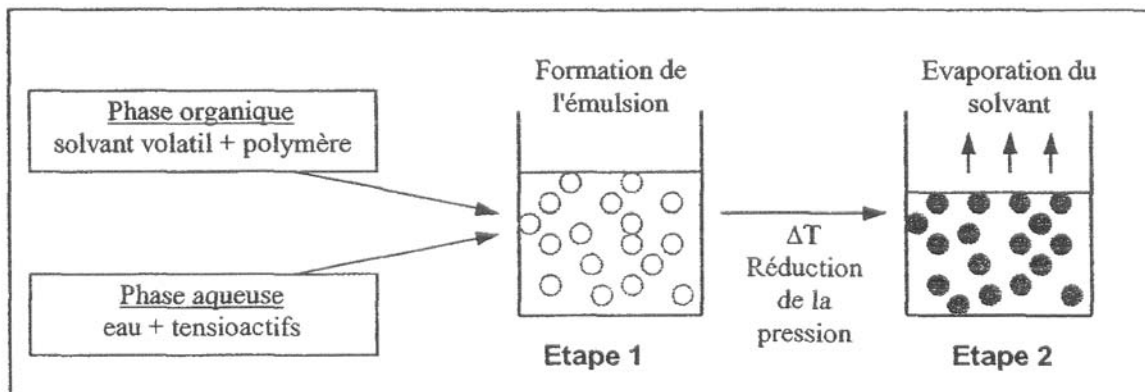


Figure 5 : Procédé d'encapsulation par évaporation du solvant

La polymérisation interfaciale est le principal procédé chimique utilisé pour l'encapsulation. La membrane prend naissance à l'interface d'une émulsion par condensation de deux monomères précurseurs, respectivement dissous dans chaque phase liquide, la nature de la membrane polymérisée dépendant du choix de chaque monomère précurseur- Typiquement la réaction de polymérisation se fait entre un chlorure de diacide (monomère précurseur de la phase organique) et un amine ou un alcool (monomères précurseurs de la phase aqueuse). La membrane formée est un polyamide, un polyester, un polyuréthane, un polycarbonate ou un polyurée. Le procédé d'encapsulation se fait en deux étapes- Dans un premier temps, le MCP et son monomère précurseur sont dispersés sous forme d'émulsion. Ils ne doivent pas réagir entre eux. Cette étape rapide est la plus délicate du procédé. Ensuite, l'émulsion est introduite lentement, pendant environ 4 h, dans une phase organique, si le MCP est hydrophile, ou dans une phase aqueuse, si le MCP est hydrophobe. La vitesse de polymérisation étant supérieure à la vitesse de diffusion du précurseur dissout dans la phase continue qui contient l'autre monomère, le polymère se forme presque exclusivement à l'interface et croît du côté organique de l'interface. Les microcapsules obtenues ont une taille d'environ 15 microns et une épaisseur de paroi variable de 1 à 3 microns représentant 10 à 15 % de la masse totale.

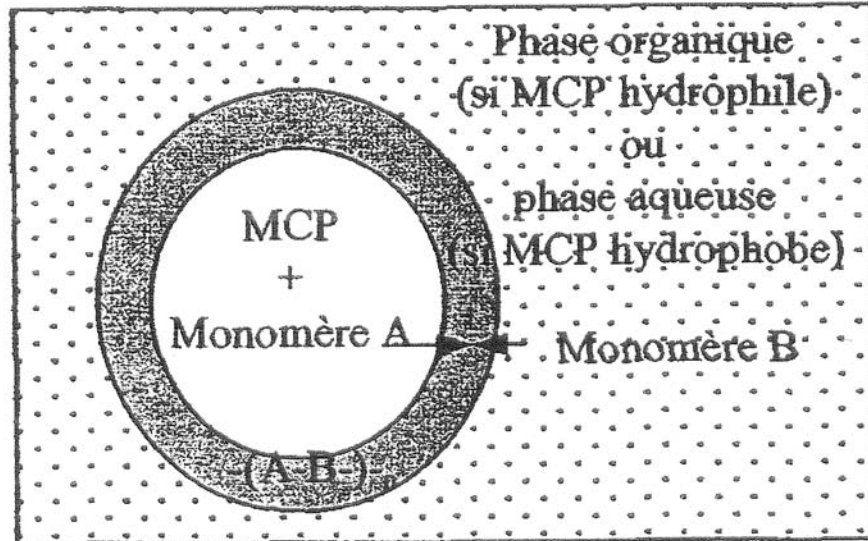


Figure 6 : Encapsulation par polymérisation interfaciale

Le procédé de fabrication par réticulation se divise en trois étapes : formation d'une émulsion stable du polymère + MCP dans un liquide non miscible, réticulation par réaction chimique ou par chauffage du polymère dans l'émulsion, récupération des micro-particules par filtration, décantation ou centrifugation. Les micro-particules sont ensuite mises en suspension dans un fluide porteur qui présente des caractéristiques hydrauliques et thermique intéressantes pour former le frigoporteur. La réaction de réticulation ne doit pas s'accompagner d'agglomération de particules entre elles. Ceci implique une agitation permanente durant la fabrication et l'utilisation de stabilisateurs. Des polymères d'origine naturelle sont largement utilisés dans ce procédé, comme des polysaccharides (agarose, alginate...) ou des protéines (gélatine, albumine...). Les particules obtenues font quelques micromètres-

La polymérisation d'une émulsion diffère de la polymérisation interfaciale par le fait qu'un seul monomère est utilisé- L'initiation de la réaction de polymérisation se fait en ajustant le pH. Le principal désavantage de ce procédé réside dans la nature toxique du monomère résiduel.

De nombreuses technologies mécaniques ont été développées pour l'encapsulation. Les deux plus intéressantes sont :

- le séchage d'un jet pulvérisé : le MCP est mélangé dans une solution organique ou aqueuse de polymère. Le mélange est atomisé par une buse d'injection dans un courant d'air chaud (150-200 °C). Le solvant du polymère s'évapore entraînant la solidification du polymère autour du MCP

- le compactage d'une poudre de MCP à l'état solide puis enrobage : les différentes étapes de ce procédé de fabrication se font en dessous de la température de fusion du MCP afin qu'il soit à l'état solide. Par broyage, le MCP est mis sous forme de poudre, puis compacté pour former des pilules. L'étape d'enrobage peut se faire par pulvérisation d'une solution de polymère dans un lit fluidisé. Les particules solides de MCP sont fluidisées dans un écoulement d'air; la solution de polymère est pulvérisée dans le lit fluidisé et se dépose sur les particules mouvantes. Le solvant s'évapore et se solidifie autour de la particule.

3- Les points critiques dans l'usage potentiel de milieux diphasiques liquide-solide

Nous avons identifié plusieurs points critiques – lors d'un usage potentiel de fluides diphasiques - qui nécessitent d'être prise en compte lors de l'étude d'un dispositif de stockage et transport.

Ces points critiques se résument aux trois points suivants :

- le spectre de température d'utilisation

-
- la stabilité du fluide et les risques de vieillissement prématuré
 - les risques de colmatage des canalisations de transport de fluides

Les températures d'usage des fluides diphasiques sont fortement conditionné par les « structures » et les procédés d'encapsulation retenues. Il est clair que les choix réalisés jusqu'à maintenant ont privilégié l'application des basses températures justifiée dans le chapitre « contexte industriel » et la plupart des procédés et structures ne peuvent accepter des températures élevées d'usage. ***En l'état actuel des connaissances et après recherche sur les bases de données de publications : (science direct, IIR/IIF) et brevets (espacenet) il n'apparaît pas de propositions techniques – même au stade du concept – visant des températures supérieures à 60°C. Il est donc clair que ces technologies de fluides diphasiques liquide-solide avec changement de phase reste d'un usage limité aux basses températures (-30°C/20°C) pour le stockage et le transport thermique.***

La stabilité de la structure des particules en suspension dans le milieu fluide est indispensable pour préconiser l'usage de ces solutions. Lors du transport, la suspension est soumise à des cisaillements mécaniques issus du pompage et des cisaillements hydrauliques. Les particules sont alors étirées et subissent des distorsions importantes- De plus, lors des cycles thermiques, leur volume varie (environ de 10%) ce qui est susceptible de détériorer la paroi permettant l'encapsulation du MCP.

- effet des forces de cisaillement : plusieurs auteurs ont soumis à des cycles de pompage un mélange contenant 20% en volume de paraffine encapsulés dans une double enveloppe de polymères en suspension dans de l'eau. Ils ont observé que le taux de microcapsules détériorées décroît avec leur taille. Celles de petites tailles sont plus résistantes et supportent mieux les contraintes de cisaillement dues à l'écoulement. Les microcapsules de 5 à 10 microns conservent leur structure sur plusieurs centaines de cycles de pompage. Le Greth a réalisé différentes études sur le comportement de gels organiques sur de longue durée de fonctionnement dans un circuit de transport fluide comprenant une pompe centrifuge. La figure 7 montre une évolution très significative de la granulométrie des particules après 150 et 400h de fonctionnement qui prouve les risques graves de détériorations de ces fluides avec MCP encapsulés
- Roy et Sengupta (1991) ont étudié la tenue thermique et mécanique de microcapsules sous 100 cycles thermiques- Deux types de microcapsules ont été testés. Le premier contient du n-icosane comme fluide à changement de phase et sa paroi occupe 30 % du volume. Le second est rempli d'acide stérique et sa paroi n'occupe plus que 15% du volume. Dans les deux cas les parois sont en PVA (polymère) et trois tailles de microcapsules sont étudiées : 50, 100 et 250 microns. Leurs résultats montrent que le deuxième type de microcapsules ne résiste pas à des cycles thermiques répétés alors que le premier présente une structure stable avec des propriétés thermiques non altérées. Ces observations corroborent bien les calculs théoriques : la structure des microcapsules s'effondre lorsque la pression externe devient supérieure à la pression interne. La tenue mécanique de la structure dépend ainsi de sa pression interne, donc du rapport entre l'épaisseur de la paroi et du diamètre des particules : plus les particules sont grosses, plus leur paroi doit être épaisse pour qu'elles aient une structure solide. Yamagishi et al. (1996) ont soumis également leurs particules à 5000 cycles thermiques. Ils confirment que des particules de 5 microns ne se cassent pas au cours des cycles et que leurs propriétés thermiques restent inchangées. Le problème de l'expansion volumique lors du changement de phase pourrait par contre être évité en choisissant une paroi flexible.

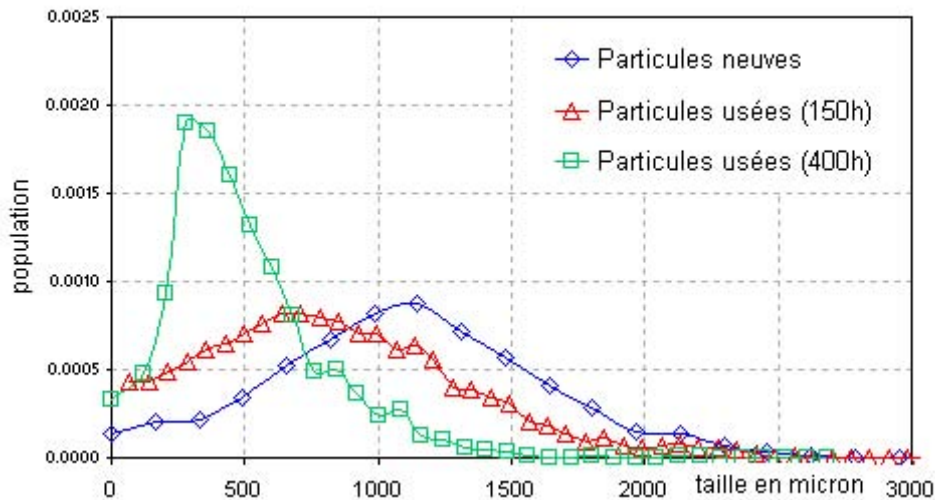


Figure 7 : Evolution de la granulométrie des particules constituant le gel organique (données GRETh 2004)

Ce problème de tenue thermique et mécanique sous cyclage pour des microcapsules d'une certaine taille, diminue évidemment leur intérêt pour des applications industrielles : en effet si les parois doivent être épaisses, le volume de MCP est alors réduit et l'intérêt énergétique de la solution annulée. Par ailleurs, lorsque les particules sont petites (< 300 microns) le phénomène de surfusion devient dominant et limite l'intérêt énergétique de ces solutions. .

*La ségrégation des phases dans les tuyauteries et les dispositifs recevant le milieu diphasique (séparation par gravité des phases liquides et solides) est susceptible de dégrader le fonctionnement de ces dispositifs (échangeurs, pompes, ballon de stockage) voire d'amener au bouchage partiel ou total des canalisations de transport et une séparation irréversible des phases dans les ballons de stockage. Pour pallier à ces problèmes, l'étude du GRETh (figure 8) a permis d'identifier des critères de vitesse pour assurer les conditions d'un écoulement homogène et éviter les situations à risque que sont les écoulements hétérogènes voire plus grave les lits mouvant et stationnaires. **Ces données – d'une grande utilité pour le dimensionnement des canalisations – ne peuvent pas être extrapolées à tout type de milieux diphasiques et doivent être établis pour chaque type de ces fluides qui se distinguent par les densités des phases et les paramètres physiques qui conditionnent les forces d'interaction entre phase : viscosité, densité, tension superficielle.***

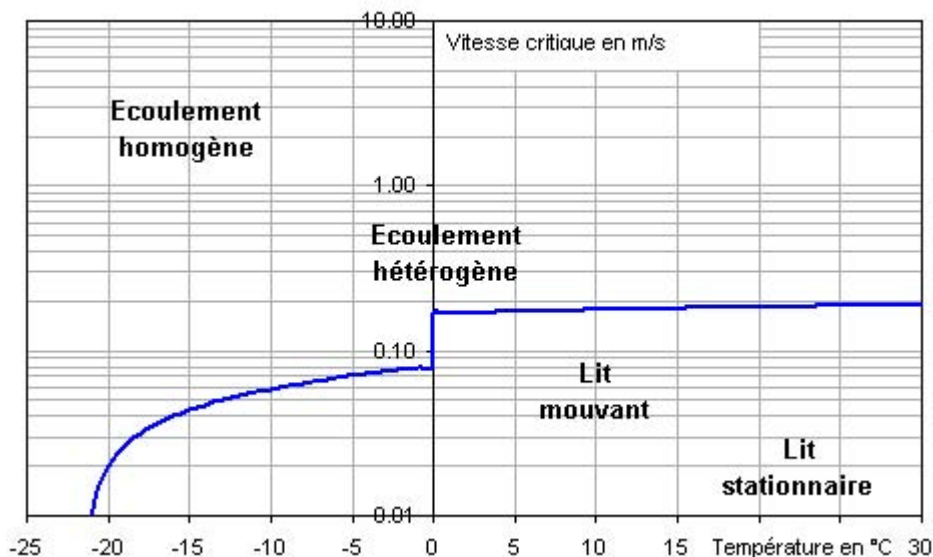


Figure 8 : Carte des régimes d'écoulement pour un fluide diphasique (donnée GRETh 2004)

4-Les critères de choix d'un fluide diphasique

Le choix d'un fluide frigoporteur est le résultat d'un compromis entre des critères de natures fort diverses :

- performances énergétiques élevées, conditionnées par les propriétés thermo-physiques du fluide ;
- sécurité élevée, conditionnée par des caractéristiques d'inflammabilité, d'explosivité et de toxicité ;
- impacts environnementaux limités, conditionnés par de nombreux paramètres suivant que la pollution des eaux, des sols ou de l'air est prise en compte ;
- critères techniques variés qui incluent la compatibilité avec les matériaux, les effets du vieillissement, la facilité de mise en oeuvre du produit ;
- critères économiques : prix du produit disponibilité...

Le Tableau 1 rassemble les principaux paramètres qu'il serait nécessaire de connaître pour assurer une caractérisation complète du fluide.

En l'état actuel des connaissances, il est difficile et souvent impossible de documenter un tel tableau pour les fluides diphasiques évoqués dans ce document.

Les principaux critères pour les fluides frigoporteurs	Critères secondaires	Propriétés caractéristiques
1/ Critères énergétiques	1a/ Pompabilité et réduction de la puissance de pompage 1b/ Transfert de chaleur et réduction des écarts de température entre fluide frigoporteur et frigorigène	-point de congélation -point d'ébullition -relation température/pression de saturation -masse volumique -capacité thermique -conductivité thermique -viscosité dynamique -coefficient de dilatation -tension superficielle
2/ Critères de sécurité	2a/ Inflammabilité 2b/ Dangers pour l'homme 2c/ Dangers pour les biens	-point éclair (liquide) -point d'inflammation (liquide) -LIE et LES (vapeur) -produits de séparation ou de décomposition en cas d'inflammation -contact avec la peau et les yeux -ingestion -inhalation -danger pour les produits alimentaires (contact direct ou indirect possible) -incompatibilité avec certains milieux à refroidir -incompatibilité avec certains frigorigènes
3/ Critères environnementaux	3a/ Pollutions des eaux et des sols 3b/ Pollutions atmosphérique (par les vapeurs ou les produits de décomposition)	-mobilité et dispersabilité -persistance dans le milieu -bioaccumulation -écotoxicité
4/ Critères techniques	4a/ Compatibilité avec les métaux 4b/ Compatibilité avec les matières plastiques et les élastomères 4c/ Aptitude à favoriser la corrosion 4d/ Comportement avec l'eau 4 e/ Vieillessement du liquide 4f/ Mise en œuvre 4g/ Précautions d'emploi 4h/ Maintenance 4i/ Conditions de transport	-suivi recommandé (mesure de PH, densité...) -prélèvement et analyse -réglementation -type d'emballage
5/ Critères économiques	5a/ Prix du produit 5b/ Disponibilité	
6/ Autres critères	6a/ Réglementation spécifique 6b/ Références et niveau des expériences acquises avec ce fluide	

Tableau 1 : critères de performances des fluides frigo/caloporteurs

5-Eléments de dimensionnement des dispositifs utilisant des fluides diphasiques

De nombreux éléments doivent être pris en compte pour le dimensionnement des équipements susceptibles de recevoir les fluides diphasiques évoqués dans ce document. Nous avons choisi de synthétiser dans le tableau 2 ces différents éléments, composants par composant.

Composants des circuits hydrauliques	Eléments de dimensionnement	Commentaires
Tuyauteries	<ul style="list-style-type: none"> - conditions de ségrégation des phases (carte d'écoulement telle que figure 8) - lois de perte de pression par frottement 	Données spécifiques du fluide, des composants de ces fluides et de leur concentrations voire de leur température (effet de la température sur la densité et la viscosité) On notera (figure 9) la très grande variation de perte de pression avec la concentration en particules
Vannes	<ul style="list-style-type: none"> - loi de perte de pression - conditions de vitesse minimale pour éviter tout risque de colmatage 	
Pompes de circulation	<ul style="list-style-type: none"> - typologie de pompes évitant une détérioration significative des particules - 	
Echangeur	<ul style="list-style-type: none"> - loi de transfert de chaleur fluide-paroi - structure de la surface d'échange à privilégier (corrugation, lisse, ailette...) - loi de perte de pression par frottement 	Même remarque que précédemment : lois tributaires du fluide, des propriétés des phases liquides et solides, des concentrations et des températures d'usage
Ballon de stockage	<ul style="list-style-type: none"> - loi de ségrégation dans le volume de stockage - vitesse de rotation d'un éventuel mélangeur pour limiter les risques de ségrégation 	

Tableau 2 : Eléments de dimensionnement pour chacun des composants du circuit hydraulique avec fluide diphasique

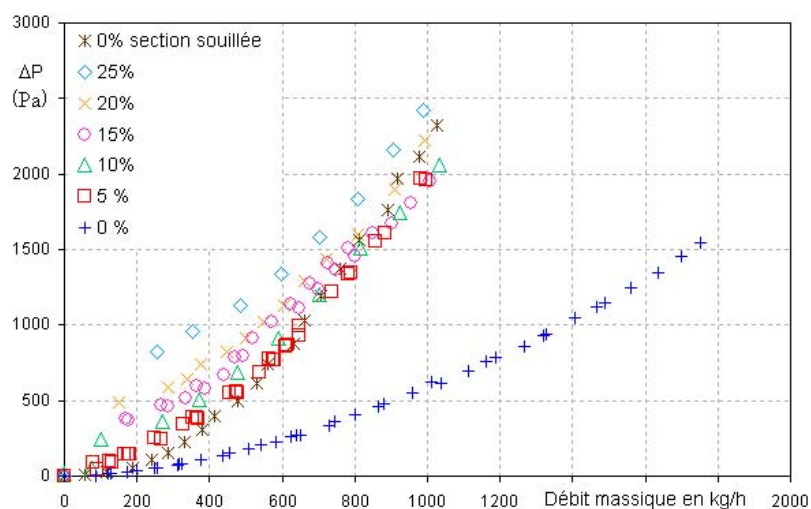


Figure 9 : Perte de pression par frottement dans une canalisation droite pour différentes concentration de particules solides (données GRETh 2004)

De nombreuses données techniques sont nécessaires pour le dimensionnement d'un dispositif complet ainsi que de ces composants : ces données sont par ailleurs spécifiques à chaque type de milieu diphasique retenu et il est évident que ces données sont -pour la plupart des cas - inexistantes et resteraient à élaborer.

6- Exemples de réalisation au stade de démonstrateur ou de pilotes industriels

Les technologies mises en œuvre au stade de pilotes ou de démonstrateurs sont celles basées sur les « ice slurry » c'est-à-dire des fluides aqueux avec cristaux de glace d'eau produits par différents mécanismes tels que : évaporateurs raclés ou brossés, refroidissement d'eau ou de solution aqueuses en état métastable en dessous du point de congélation et production de cristaux en sortie du refroidisseur.

A notre connaissance aucun pilote de grande taille voire de démonstrateur utilisant des fluides avec MCP encapsulés ou sous forme de gel ou d'émulsions n'a été mis en œuvre.

Compte tenu des températures atteintes avec les dispositifs « ice slurry » (<0°C), les cibles d'applications privilégiés sont la conservation de produits alimentaires dans les usines de stockage ou de préparation ou dans les grandes surfaces de distribution. L'application « climatisation de bâtiment » n'est pas citée du fait probablement des faibles biveaux de température à l'évaporateur (ce qui induit des consommations spécifiques élevées des groupes de froid) requis par ces « ice slurry » et de la concurrence sur ce créneau des stockages « traditionnels » de glace et des stockages en cuve de nodules de MCP

Nous synthétisons dans le tableau 3, les principaux fournisseurs de ces technologies de fabrication de « ice slurry » en y indiquant :

- le principe de production de « ice slurry »
- la solution aqueuse retenue
- les gammes de puissances frigorifiques pour une machine
- les gammes de températures proposées par le fournisseur

Fournisseur	Principe de production de ice slurry »	Fluide	Gamme de température/puissance du « ice slurry » produit	Applications Capacité spécifique de stockage
SUNWELL (Canada)	Evaporateur à surface raclée/ Refroidissement du fluide (état métastable de surfusion)	Eau ou saumure (sel dissous non précisé)	-3°C/3°C Puissance unitaire < 250 kW	Conservation produits frais/ Climatisation 46 kWh/m ³
OPTIMAR (Islande)	Evaporateur à surface raclée	Eau de mer	< 107 kW	Conservation des produits de la pêche
Slurry Ice System (USA)				
Crytec (Israël)	Injection de CO ₂ ou O ₃ préalablement refroidi	Eau/Eau de mer		
AXIMA réfrigération	Système SUNWELL			

	En démonstrateur système à hydrate de CO2			
HK refrigeration	Evaporateur à surface brossée			Arrêt de la fourniture de ce produit par HK

Tableau 3 : les différents fournisseurs de dispositifs de fabrication de « ice slurry »

7-Recommandations générales

L'usage de fluide diphasique comme fluide de stockage et de transport – bien qu'ayant donné lieu à de nombreuses recherches et de nombreuses mise en application en laboratoire avec procédés variés de production – reste à quelques exceptions inenvisageable à court et moyen terme pour un démonstrateur industriel. Par ailleurs, si un procédé émergeait en terme de performance à moyen terme, il est fort probable que :

- *le champ de température d'usage resterait extrêmement limité notamment à des basses températures*
- *la durabilité de cette solution aurait besoin d'être validée compte tenu des dégradations constatées sur plusieurs fluides diphasiques du fait des cyclages thermiques et des frottements générés dans les conduites et la pompe*
- *des règles de dimensionnement précises des équipements seraient nécessaires, en particulier pour le dimensionnement des échangeurs et du stockage ainsi que des conduites (risque de ségrégation)*

L'exception que nous pouvons relever en terme de fluide diphasique est le « ice slurry » dont l'application est essentiellement ciblée vers la conservation de produit à des températures proches de 0°C (produit de la pêche, par exemple) et éventuellement à des applications du bâtiment pour les besoins de climatisation. Pour cette dernière application qui réclame des températures de fluide entre 7 et 18°C, , l'intérêt énergétique risque d'être fortement compromis de part le faible niveau de température de production et de stockage (proche de 0°C) du « ice slurry ».

8-Bibliographie

D.Jaquet, Distribution du froid par coulis de glace stabilisée. Etude du comportement sous cyclage thermique (Rapport GRETh 2004)

H.Desmales, Etude des transferts de chaleur d'un fluide frigoporteur diphasique à changement de phase liquide-solide, (Thèse GRETh 2003)

Yamagishi Y., Sugeno T., Ishige T., Takeuchi H. & Fyatenko A.T. An evaluation of microencapsulated PCM for use in cold energy transportation medium- Proceedings of the 31st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference - IECEC 96, 1996, Vol. 3, pp.2077-2083.

Roy S. K. & Sengupta, S. An evaluation of phase change microcapsules for use in enhanced heat transfer fluids. Int. Comm. Heat Mass transfer, 1991, Vol- 18, pp. 495-507

ANNEXE 7



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
 SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Cahier n°7 : Techniques de stockage par sorption et
 méthode thermochimique**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE.....	3
2. ELEMENTS DE TERMINOLOGIE.....	4
3- VALORISATION DES CONNAISSANCES ACQUISES SUR LES POMPES A CHALEUR A SORPTION ET POMPES A CHALEUR CHIMIQUES.....	5
4- LES CRITERES DE CHOIX DES MATERIAUX POUR LE STOCKAGE PAR PROCEDES A SORPTION	8
5- MATERIAUX ET MISE EN ŒUVRE POUR LE STOCKAGE PAR SORPTION	9
6. STOCKAGE PAR REACTIONS CHIMIQUES	13
6. RECOMMANDATIONS GENERALES.....	15
7. BIBLIOGRAPHIE	16

1. Elément de contexte

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 critique pour réduire la consommation de carburants fossiles mais aussi pour la valorisation énergétique des rejets industriels comme les déchets et la biomasse qui représente une grande part d'énergie perdue dans notre société.

Une piste prometteuse consiste à utiliser des transformations réversibles fortement exo ou endo thermique pour stocker l'énergie non pas sous forme de chaleur, pour la restituer ensuite en fonction des besoins mais sous forme d'espèces chimiques ou physiques. Ce type de stockage modifie fondamentalement la problématique du stockage et de transport de chaleur. En effet :

- il pourrait autoriser des volumes réduits de stockage et de matière à transporter de part la forte valeur de leur capacité énergétique qui peut présenter des valeurs approchant 1000 kWh/m³ (3600 MJ/m³) c'est à dire beaucoup plus que les valeurs escomptés avec les PCM proches des 50 kWh/m³ (180 MJ/m³) comme le montre la figure 1.
- il permet de s'affranchir des pertes thermiques – notamment à haute température - qui limitent l'usage économique du stockage thermique à des périodes réduites (heures, journées,...)

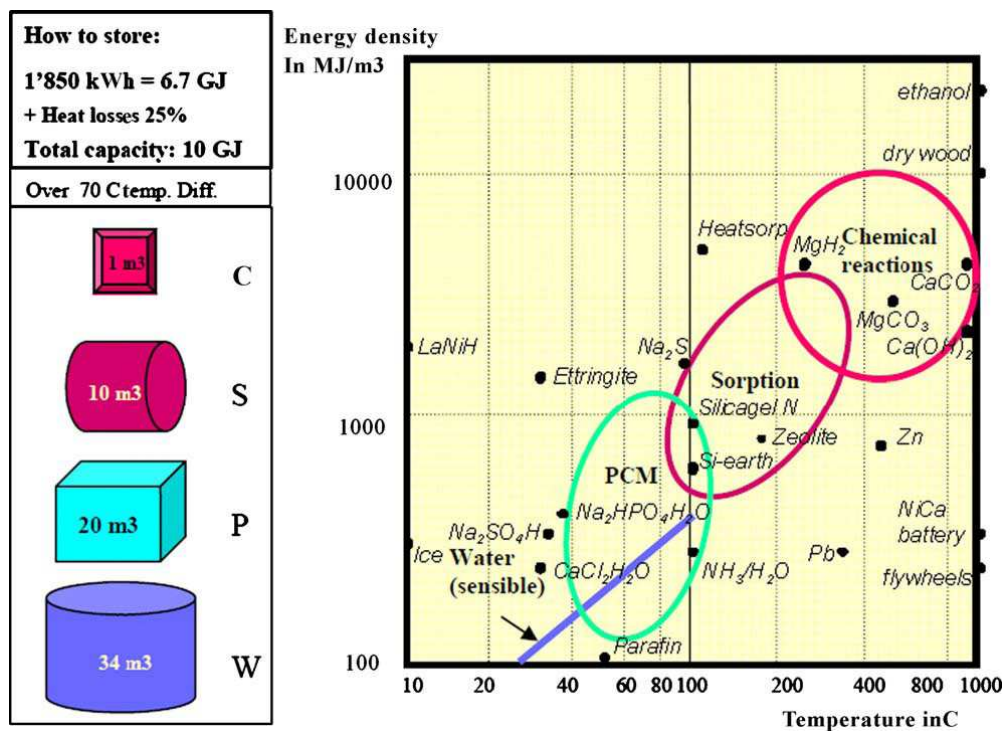


Figure 1 : Capacité de stockage d'énergie des différentes technologies

2. Éléments de terminologie

La signification des termes « stockage thermochimique » ou « stockage chimique » ou « stockage par sorption » diffère d'un auteur à l'autre et il est parfois difficile de définir les frontières entre ces différentes expressions. Toutefois nous pouvons préciser que :

- Le stockage d'énergie chimique fait appel à des réactions chimiques réversibles : ainsi l'énergie thermique assure l'apport nécessaire à la rupture de liaisons chimiques entre deux (ou plusieurs) corps. La recombinaison de ces corps assure une réaction exothermique qui est productrice d'énergie thermique

- la sorption est un phénomène de fixation de molécules gazeuse ou vapeur sur une substance à l'état liquide ou solide. Ainsi le mécanisme de sorption peut présenter des spécificités thermo-physique ou thermochimique suivant le mode de liaison entre le sorbat et le sorbant. Plus précisément l'absorption est un phénomène dans lequel un gaz ou un liquide est introduit au cœur d'un liquide ou d'un solide. L'adsorption désigne un phénomène de liaison entre un gaz (voir un liquide) et la surface d'un solide : la liaison peut être de type physique (physisorption) et met en jeu des forces de Van der Waals, la liaison peut être chimique (chimisorption) et met alors en jeu des forces associées aux valences des atomes des constituants. Les procédés par chimisorption présente des chaleurs de sorption beaucoup plus importantes que les procédés de physisorption mais peuvent par contre présenter un caractère irréversible plus rare pour les procédés par chimisorption.

On peut également utiliser le concept de variance thermodynamique pour distinguer les deux phénomènes : la variance est de 2 en physisorption alors qu'elle est égale à 1 en chimisorption. Ainsi, les systèmes impliquant des mécanismes de chimisorption ne nécessitent qu'une variable d'état pour leur description (pression ou température) alors que deux variables d'état sont nécessaires pour les phénomènes de physisorption (température, pression ou concentration de sorbant).

Le stockage par voie thermochimique ou sorption utilise un phénomène réversible :



A/B sont appelés les couples de sorption. Ainsi, avec l'apport de chaleur, le composé AB est dissocié en deux composants A et B qui peuvent être stockés indépendamment (réaction endothermique). Lorsque A et B sont mis en contact, le composé AB se forme avec un dégagement de chaleur (réaction exothermique).

Les procédés de stockage par sorption peuvent être utilisés sous deux formes :

- en système ouvert : dans ces conditions, le système fonctionne à la pression atmosphérique et le fluide actif est renvoyé à l'atmosphère : c'est essentiellement le cas des systèmes fonctionnant avec l'eau comme sorbat.
- en système fermé : ils peuvent permettre un fonctionnement à plus hautes températures. Ils fonctionnent souvent sous des pressions inférieures à l'atmosphère et sont donc très sensibles à la présence d'incondensables.

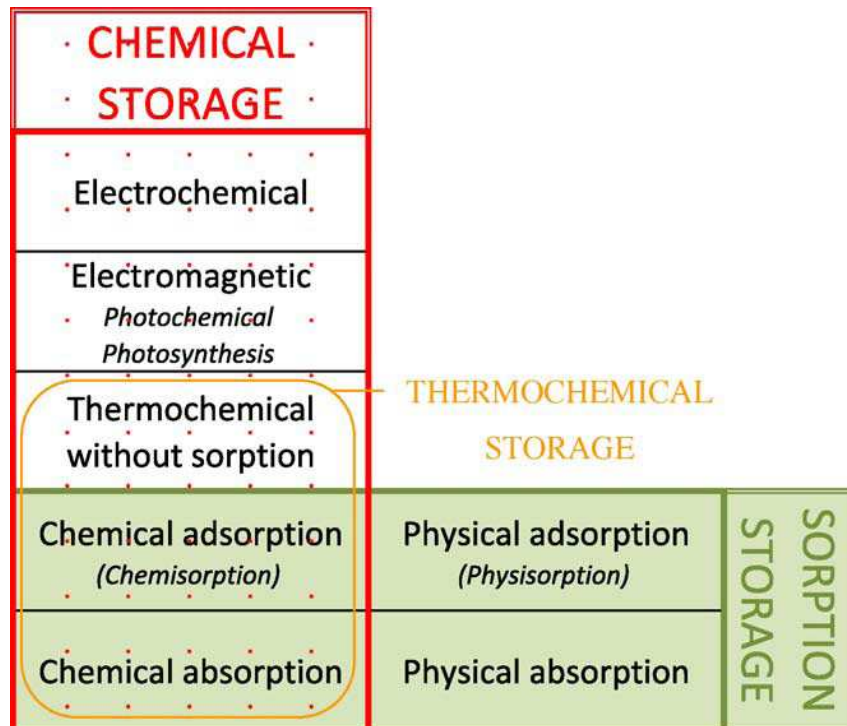


Figure 2 : Stockage chimique et à sorption : classification

3- Valorisation des connaissances acquises sur les Pompes à chaleur à sorption et Pompes à chaleur chimiques

La littérature publique sur le stockage de chaleur par voie chimique ou par sorption reste relativement modeste. Par contre les résultats acquis sur les pompes à chaleur à sorption ou chimique sont excessivement riches et constituent une base de données irremplaçable pour identifier les solutions potentielles pour un stockage de chaleur valorisant les mêmes mécanismes physiques.

Le principe de la pompe à chaleur est schématisé en figure 3 et l'on peut aisément comprendre la proximité entre le fonctionnement d'une pompe à chaleur et celle d'un dispositif de stockage valorisant les même phénomènes physiques et chimiques. Comme le montre la figure 3, la pompe à chaleur peut être constituée en un seul réacteur et un seul échangeur ce qui impose un fonctionnement discontinu du dispositif et une double fonctionnalité à l'échangeur : en période de recharge ou apport thermique au réacteur (et donc dans la phase $AB > A+B$), la phase vapeur libérée du corps B (par exemple) par les matériaux inclus ans le réacteur est condensée dans l'échangeur et la chaleur transmise dans cet échangeur est généralement rejetée à l'environnement extérieur à la plus basse température possible pour obtenir un COP de bon niveau (rejets thermiques sur l'air grâce à un aéroréfrigérant sec ou une tour de refroidissement humide, rejets thermiques sur l'eau si une ressource en eau est proche –rivière, nappes phréatiques,...- rejets thermiques dans le sol grâce à des échangeurs enterrés).

La charge thermique terminée et la transformation $AB > A+B$ achevée (réactifs AB consommés, matériau d'adsorption régénéré...) le cycle suivant peut débuter. Ce nouveau cycle consiste à vaporiser le fluide B dans l'échangeur et de le mettre en contact avec le

corps A et réaliser ainsi la transformation inverse de la précédente : $A+B \rightarrow AB$. Ce cycle aboutit à :

- à une production de chaleur au niveau du réacteur valorisable (c'est le principe d'une pompe à chaleur)
- à une production de froid au niveau de l'échangeur fonctionnant en évaporateur (c'est le principe d'un groupe de réfrigération)
- à la complète transformation des constituants A et B en un complexe AB ou à la « saturation » du milieu adsorbant.

A la fin de cette phase de production de chaleur et de froid, succède la phase de régénération du lit adsorbant ou de dissociation du complexe AB comme décrit précédemment.

L'inconvénient du dispositif avec un seul réacteur est l'intermittence de la production utile (chaleur, froid...) et l'usage de deux réacteurs et deux échangeurs permet d'assurer une production quasi continue de l'énergie utile.

Les dispositifs de stockage valorisant les mécanismes de sorption (bivariant) ou de réaction chimique (monovariant) sont basés sur strictement les mêmes composants et mêmes processus que la pompe à chaleur à un seul réacteur.

A la différence d'une pompe à chaleur, pour un dispositif de stockage, le réacteur est dimensionné en fonction de la capacité de stockage thermique requis et non pas seulement en fonction de la puissance thermique requise comme cela est le cas d'une pompe à chaleur. Par ailleurs, on peut également envisager le transport du réacteur ou du matériau contenu dans le réacteur entre la zone de production thermique (phase de régénération du lit d'adsorbant ou de dissociation du complexe AB) vers la zone d'usage thermique ou frigorifique (phase de saturation du lit ou de production du complexe AB).

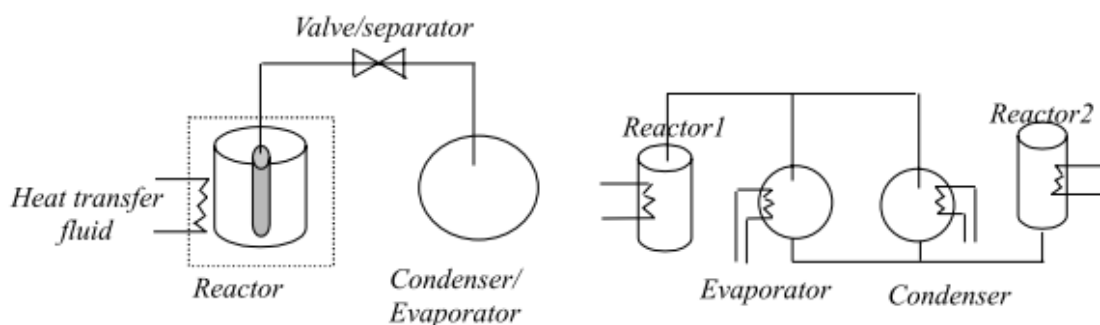


Figure 3 : Schéma d'une pompe à chaleur à sorption ou chimique

Les matériaux mis en œuvre dans les pompes à chaleur à sorption ou chimique (souvent restées au stade expérimentale) sont très nombreux et sont rappelés dans la figure 4. 2 groupes distincts de mécanismes (mono et bivariant) sont identifiés.

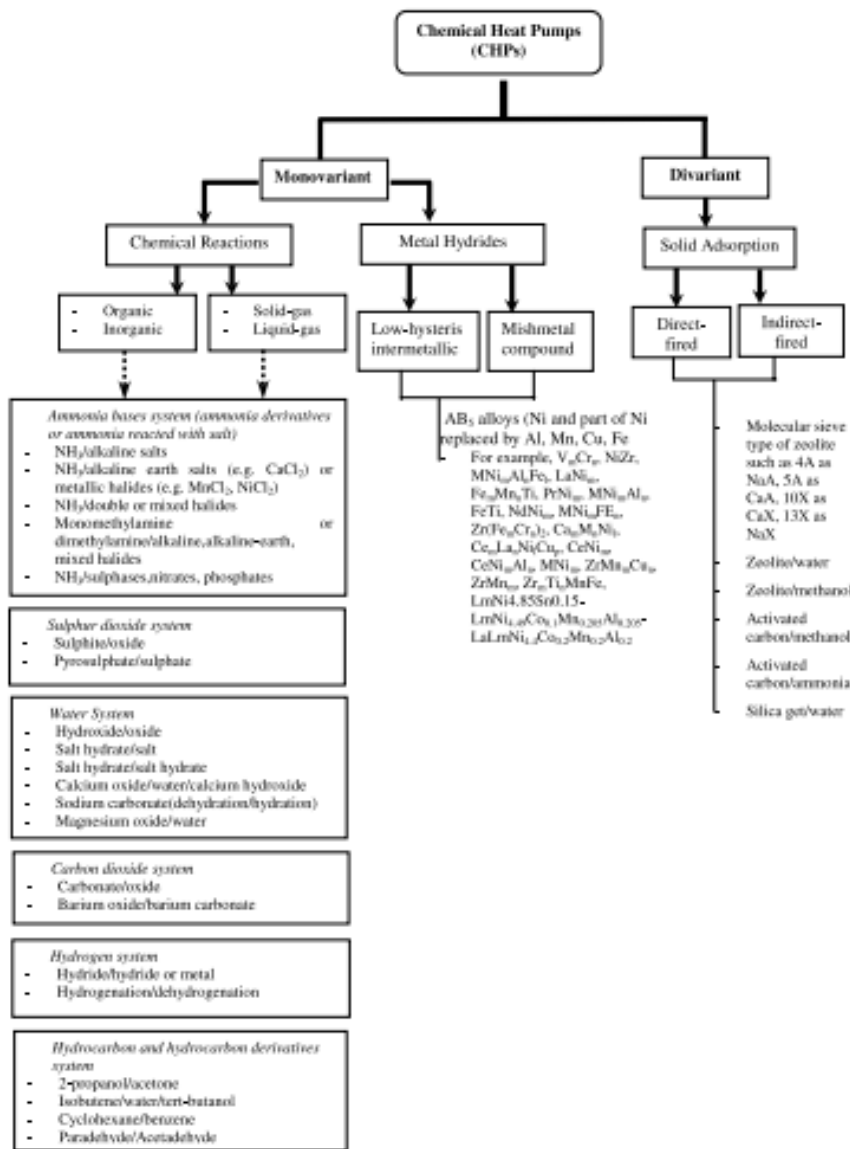


Figure 4 : Les principaux matériaux pour PAC à sorption ou PAC chimique (d'après Wongsuwan et autres)

A la différence des pompes à chaleur, le stockage en grande quantité voire le transport des composants A et B peut apporter des contraintes majeures en termes de sécurité des personnes et des impacts environnementaux. Pour les usages de stockage thermique et de transport, il est donc légitime de rester très sélectif par rapport à cette grande diversité de solutions offertes par les développements des PAC. Nous retiendrons donc comme solution potentielle – sans préjuger de leurs pertinences techniques et économiques – les propositions suivantes :

- pour les transformations monovariantes, les solutions avec l'eau comme un des constituants : hydrates salins et hydroxydes compte tenu de la disponibilité de l'eau et de son absence de risque sécurité et environnemental. Par contre, on retiendra la nécessité de fonctionner sous faible pression (sub-atmosphérique) ce qui complique nécessairement la conception des réacteurs et des dispositifs

- pour les transformations monovariantes, les solutions avec le CO2 car le fluide reste également sans grand risque sécurité et limité sur l'environnement (notamment si un couplage avec la captation et stockage de CO2 y est associé). Le fonctionnement en pression que permet ce fluide autoriserait une conception plus compacte et plus fiable du dispositif.

- pour les transformations bivariantes, les solutions zéolithes-eau ou gel de silice-eau restent les plus aisées à mettre en œuvre car à faibles risques sécurité et environnemental.

Nous noterons par la suite que ces conclusions sont très cohérentes avec les démarches entreprises par les centres de recherche quant aux choix des matériaux adaptés au dispositif de stockage.

4- Les critères de choix des matériaux pour le stockage par procédés à sorption

Les matériaux jouent un rôle déterminant dans les performances des dispositifs de stockage. Les critères courants permettant de caractériser les matériaux sont les suivants :

- forte affinité entre l'ad/absorbant et l' ad/absorbat. : Celui-ci a un effet important sur la cinétique de sorption critère important pour assurer une densité de puissance importante,
- plus grande volatilité de l'ad/absorbat que pour le ad/absorbant (en particulier en absorption),
- haute capacité énergétique de stockage,
- haute conductivité thermique (en particulier en adsorption) pour l' ad/absorbant et pour l'ad/absorbat pour permettre des coefficients de transferts élevés dans les échangeurs,
- température de régénération les plus basses possible,
- source de chaleur utile en évaporation pendant la phase de décharge la plus basse possible,
- faible impact environnemental : non toxique, faible effet de serre et sur l'ozone (non corrosif),
- bonne stabilité thermique et chimique dans les conditions normales d'usage,
- coût acceptable,
- ...

Un autre aspect important dans la conception des systèmes est associé aux réacteurs. On peut en effet suggérer (figure 5) :

- un dispositif à réacteurs séparés
- un dispositif à réacteurs intégrés

Ainsi les réacteurs intégrés sont ils privilégiés quand il n'est pas question de réaliser le transport des matériaux. Dans le cas de grandes capacités de stockage, il est préférable de réaliser plusieurs réacteurs pour une meilleure gestion du dispositif.

Enfin, un des composants importants dans les performances énergétiques des systèmes est l'échangeur de chaleur : par exemple, sur la boucle de chauffage il est important de disposer de la température la plus basse possible, lors de la phase de déchargement grâce à un échangeur très performant entre cette boucle et les réactifs.

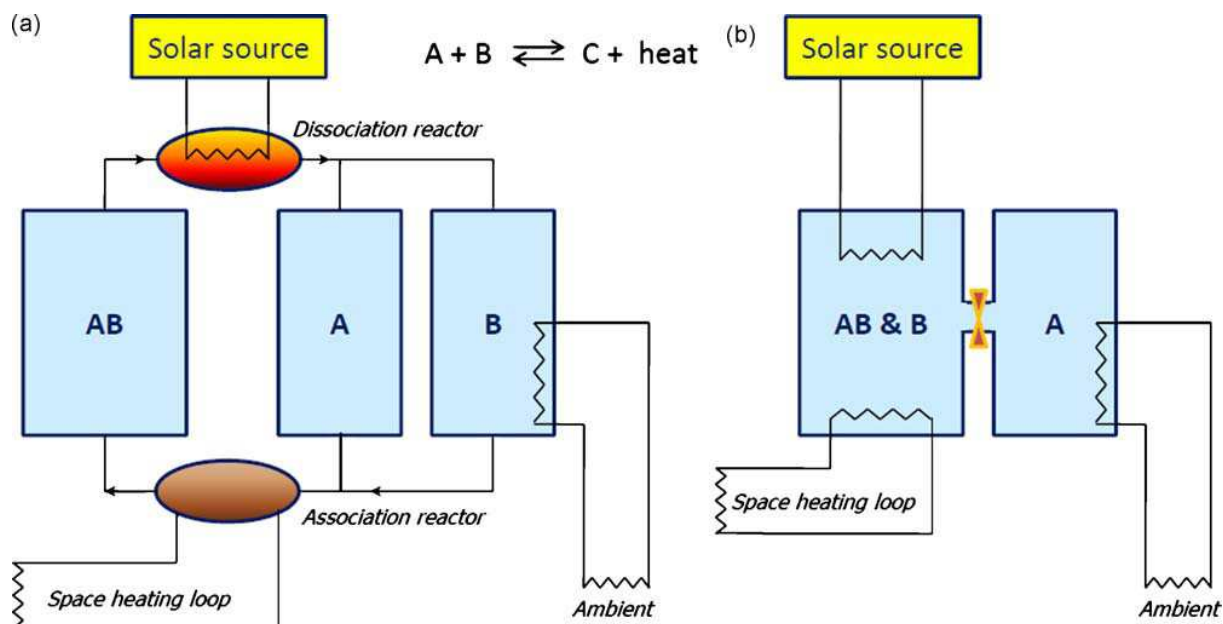


Figure 5 : Différentes architectures de systèmes

5- Matériaux et mise en œuvre pour le stockage par sorption

Différentes paires de réactifs ont été étudiées. Ainsi (tableau 1) :

- ECN (Energy Research Center au Pays-bas) a évalué plus de 90 matériaux potentiels pour le stockage thermique. Leurs conclusions ont amené à privilégier le hepta hydrate sulfate de magnésium ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) et l'hydroxyde de fer ($Fe(OH)_2$) comme les matériaux qui présentaient le plus fort potentiel.

- le SPF (Institut Suisse de recherche sur l'énergie solaire) a étudié des zéolites et le gel de silice. Leurs conclusions ne sont pas relatives à l'intérêt de ces matériaux pour le stockage de long terme. Ils estiment que les procédés par sorption avec phase liquide seraient plus appropriés de part la facilité de transfert des solutions liquides (contrairement aux dispositifs à sorption sur solide)

- une nouvelle génération de matériaux désignés par Selective Water Sorbents (SWS) qui présentent des comportements compris entre les adsorbants solides et les absorbants liquides : c'est un mélange de deux composants avec une matrice poreuse contenant un sel inorganique tel qu'un alumino phosphate ou des zéolites. L'avantage d'une telle solution réside dans le contrôle des propriétés de sorption du matériau vis-à-vis de l'eau.

Material name	Dissociation reaction		
	AB ⇌	B +	A
Magnesium sulphate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	$MgSO_4$	H_2O
Silicon oxide	SiO_2	Si	O_2
Iron carbonate	$FeCO_3$	FeO	CO_2
Iron hydroxide	$Fe(OH)_2$	FeO	H_2O
Calcium sulphate	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaSO_4$	H_2O

Material name	Energy storage density of AB GJ/m ³	Turnover temperature °C	Realisation potential %
Magnesium sulphate	2.8	122	9.5
Silicon oxide	37.9	4065 + HF: 150	9.0
Iron carbonate	2.6	180	6.3
Iron hydroxide	2.2	150	4.8
Calcium sulphate	1.4	89	4.3

Tableau 1 : Caractéristiques thermodynamiques des matériaux les plus prometteurs étudiés à ECN

Nous résumons dans le tableau 2, les principaux couples étudiés récemment et les performances techniques associés que ce soit avec des mécanismes d'absorption, de physisorption et de chimi-sorption.

Les valeurs de capacités spécifiques de stockage en kWh/m³ prennent en compte pour le calcul des volumes, celles de l'absorbant et du sorbat lorsque le cycle est un cycle fermé.

Absorption

Couples	Etudié par	Performances relevées	Commentaires
NaOH/H ₂ O	EMPA Suisse		Problème de corrosion avec les matériaux courants
LiCl/H ₂ O	Climatewell Suède	253 kWh/m ³ LiCl à basse température (<35°C)	Coût élevé du sel retenu (3600€/m ³)
LiBr/H ₂ O	LOCIE France	180 à 310 kWh/m ³ à basse température	

Physisorption

Couples	Etudié par	Performances relevées	Commentaires
Zéolithe/H ₂ O Zéolithe : silicate d'alumine	Nombreuses études réalisées avec différents structures de zéolithes	De 124 kWh/m ³ en mode chauffage à 100 kWh/m ³ en mode rafraichissement relevés avec une zeolite 13X (température de stockage < 100°C)	
Silicagel/H ₂ O	Etude réalisée par AAE Intec (Autriche)	Une valeur de 50 kWh/m ³ a été atteinte avec ce couple :	Performance atteinte médiocre et très dégradée par rapport aux valeurs théoriques

Chimisorption

Couples	Etudié par	Performances relevées	Commentaires
Na ₂ S/H ₂ O	ECN-programme SWEAT	780 kWh/m ³ pour le chauffage et 580 kWh/m ³ pour le rafraichissement	Produit très corrosif et nécessitant des pressions d'équilibre très faibles
MgSO ₄ 7H ₂ O	EDF France	780 kWh/m ³ à 122°C	Non corrosif et non toxique mais produit couteux

Tableau 2 : Caractéristiques des couples étudiés

Les études menées depuis plusieurs années en particulier dans le cadre de l'annexe IAE 32 sont synthétisées dans le tableau 3. La plupart mettent en jeu des cycles fermés dont le principe est schématisé en figure 6.

Ces expériences qui n'ont pas dépassé le stade du prototype permettent de formuler les conclusions suivantes :

- les capacités théoriques de stockage que laissent espérer cette méthode de stockage sont fortement réduites lorsque l'ensemble des auxiliaires du procédé est prise en compte : la prise en compte du stockage des deux composants et des échangeurs auxiliaires (volumineux car fonctionnant généralement sous vide) amène à des valeurs peu différentes des méthodes de stockage de type MCP, par exemple
- Le coût des installations - valorisant cette méthode de stockage - est très fortement conditionné par les auxiliaires tels que les échangeurs (voir figure 4) et ne permet pas d'escompter à ce jour des dispositifs économiquement compétitif.
- Un des éléments limitant de ces dispositifs est la qualité du transfert de chaleur entre le matériau ab/adsorbant et les fluides secondaires dans les boucles thermiques. Cette limitation est particulièrement importante pour des adsorbants solides. Cette contrainte réduit généralement les puissances thermiques des dispositifs.
- Ces dispositifs qui font appel à des cycles tri-thermes lors des phases de charge ou décharge thermique font appel à une source à basse température (<20°C) pour conserver une efficacité satisfaisante, source dont il est parfois difficile de disposer (puits géothermiques, eau de rivière...).
- La stabilité des matériaux ad/absorbant ne sont pas suffisantes pour des processus impliquant plusieurs milliers de cycles.

Parameter	TCA, 80–100 °C	NaOH, 95 °C test, 150 °C calculated
Type of technology	Closed three phase absorption	Closed two phase absorption
Cost of material	3600 €/m ³	250 €/m ³
Storage materials weight	LiCl salt 54 kg Water 117 kg Steel 47 kg	NaOH 160 kg Water 160 kg
Storage capacity for heat	35 kWh	8.9 kWh
Floor space required for prototype	0.46 m ²	2 m ²
Energy density of material (NRJ4.1) (ratio to water 25/85 °C)	253 kWh/m ³ (3.6)	250 kWh/m ³ (3.6)
Energy density of prototype (NRJ4.1) (ratio to water 25/85 °C)	85 kWh/m ³ (1.2)	5 kWh/m ³ (0.07)
Energy density of prototype – cold (ratio to water 7/17 °C)	54 kWh/m ³ (4.7)	–
Charge rate	15 kW	1 kW
Discharge rate	8 kW	1 kW
Estimated size for 70 kWh (ratio to water 25/85 °C)	0.64 m ³ (1.6)	1.3 m ³ (0.75)
Estimated size for 1000 kWh (ratio to water 25/85 °C)	5.3 m ³ (2.7)	5 m ³ (2.9)

Parameter	Modestore, 88 °C	SPF, 180 °C	Monosorp, 180 °C	ECN, 150 °C
Type of technology	Closed adsorption	Closed adsorption	Open adsorption	Closed thermo-chemical
Cost of material	4300 €/m ³	2–3000 €/m ³	2500–3500 €/m ³	4870 €/m ³
Storage materials weight	Silica gel 200 kg Water 30 kg Steel 100 kg Copper 50 kg	Zeolite 13X 7 kg	Zeolite 4A 70 kg Steel 10 kg	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Storage capacity for heat	13 kWh	1 kWh	12 kWh	–
Floor space required for prototype	0.4 m ²	0.09 m ²	0.4 m ²	–
Energy density of material (NRJ4.1) (ratio to water 25/85 °C)	50 kWh/m ³ (0.71)	180 kWh/m ³ (~3)	160 kWh/m ³ (2.3)	420 kWh/m ³ (6.1)
Energy density of prototype (NRJ4.1) (ratio to water 25/85 °C)	33.3 kWh/m ³ (0.48)	57.8 kWh/m ³ (~1)	120 kWh/m ³ (1.7)	–
Energy density of prototype – cold (ratio to water 7/17 °C)	–	–	–	–
Charge rate	1.0–1.5 kW	–	2.0–2.5 kW	–
Discharge rate	0.5–1.0 kW	0.8/1.8 kW	1.0–1.5 kW	–
Estimated size for 70 kWh (ratio to water 25/85 °C)	1.7 m ³ (0.59)	1.2 m ³ (~1)	0.54 m ³ (1.9)	^b 0.4 m ³ (2.5)
Estimated size for 1000 kWh (ratio to water 25/85 °C)	23 m ³ (0.62)	17 m ³ (~1)	7.7 m ³ (1.9)	^b 5.6 m ³ (2.5)

Tableau 3 : Synthèse des études menées dans le cadre de l'annexe 32 de l'IAE

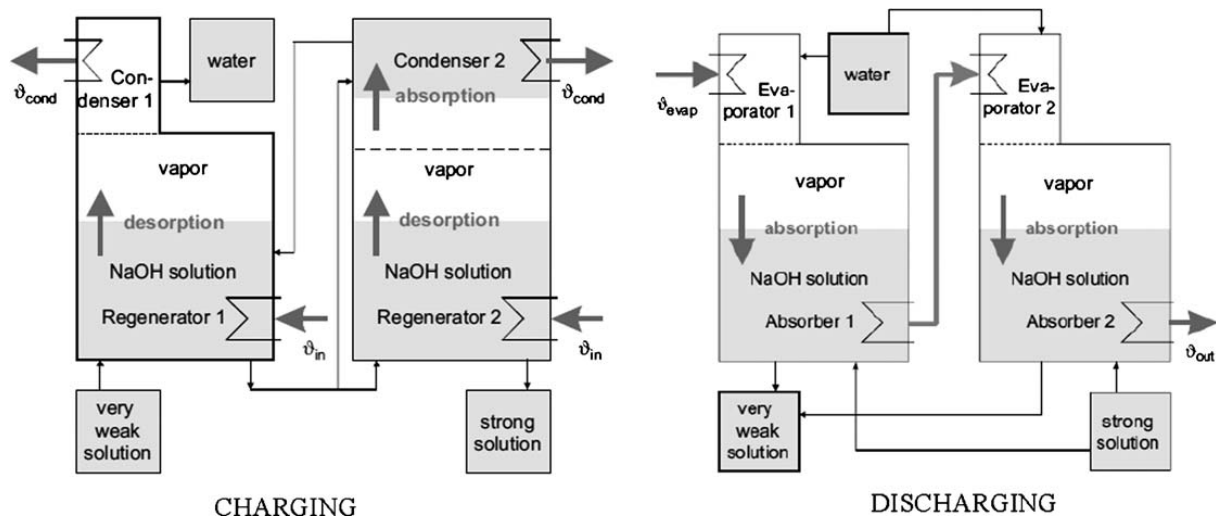


Figure 6 : Principe de fonctionnement

Les limites et contraintes associées à ce processus de stockage – en attendant des couples éventuels de matériaux mieux adaptés à ces procédés- expliquent le peu d'opérations de démonstration valorisant ce processus à un stade pré industriel.

On peut toutefois signaler les opérations suivantes :

- Le ZAE Munich a développé (figure 7) un réacteur pouvant recevoir un lit de zéolithe 13X pouvant être régénéré à 180°C et utilisé en phase utile jusqu'à 150°C. Le réacteur qui autorise un stockage de 3.5 MWh serait utilisé pour des procédés de séchage (sorption de vapeur d'eau) et déplacé par véhicule routier entre la zone de régénération et la zone d'usage.
- Moins avancées, les sociétés suédoises Setterwall Konsult et Ecostorage Sweden ont évalué le potentiel associé à la valorisation des rejets thermiques d'usines sidérurgiques l'utilisation de zéolithe avec transport routier. Dans les deux études, le réacteur contenant les zéolites serait intégré à un cycle de production de chaleur ou de froid avec de l'eau comme soluté.

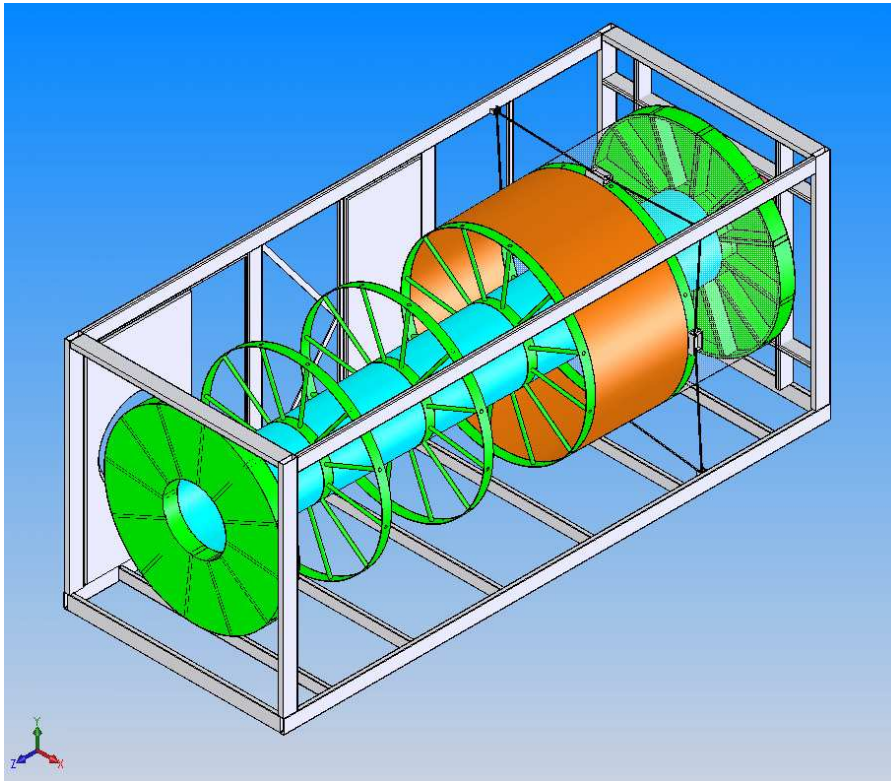


Figure 7 : Schéma du réacteur à zéolithe déplaçable développé par ZAE Munich

6. Stockage par réactions chimiques

Une étude complète des potentiels des procédés par réaction chimique a été faite par L.Luo : cette étude montre une diversité de réactions et de réactifs adaptés à des températures variées et présentant des enthalpies de réaction importantes.

Dans ce rapport, nous ne retiendrons toutefois comme réaction chimique que les seules réactions de type solvatation de sel organiques ou inorganiques et excluons toutes les réactions impliquant la production d'H₂ qui constituent des solutions certes très performantes en terme énergétique mais d'une mise en œuvre lourde et coûteuse et non validée par l'expérience (ces solutions relèvent des démarches associées à la production d'H₂ qui sont menées depuis de nombreuses années sur des programmes de recherche spécifiques)

Nous représentons en figure 8 les principales caractéristiques des procédés de stockage dans un diagramme température-capacité volumique de stockage en positionnant les matériaux adaptés aux principaux procédés : sorption, MCP, réaction chimique.

Il apparaît clairement que le procédé par réaction chimique présente – a priori – certains avantages :

- à des températures inférieures à 100°C, il présente des capacités élevées notamment par rapport aux solutions MCP et surtout un potentiel de stockage à longue durée de part l'absence de pertes thermiques
- à haute température (>200°C), il présente de plus l'avantage a priori de ne rencontrer comme concurrent que les sels fondus dont on connaît les

comportements corrosifs avec les matériaux courants des enceintes de stockage.

Reprenant les conclusions de Kato, les réactions que nous pouvons privilégier sont :

- pour les températures comprises entre 60-80°C, la réaction $\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ est à privilégier
- pour les températures proches de 100°C, la réaction $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ est à privilégier
- pour les températures supérieures à 200°C, la réaction $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$ est à privilégier
-

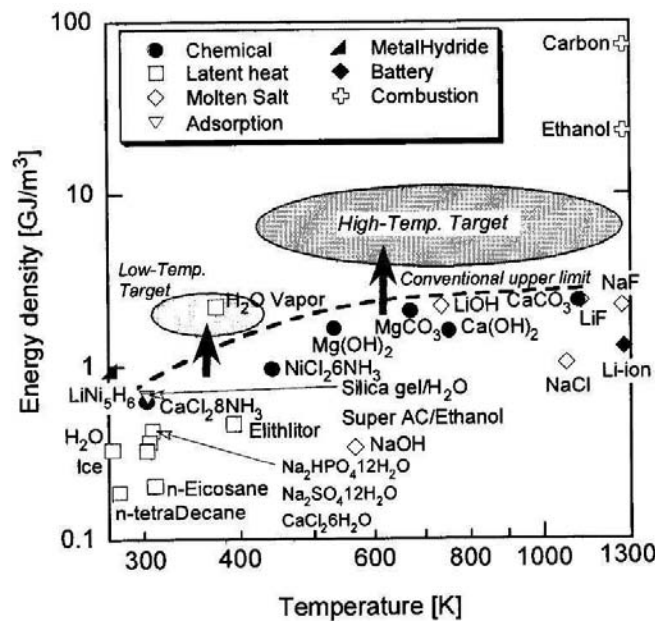


Figure 8 : Positionnement des réactifs pour le stockage thermique par rapport aux solutions MCP et à sorption

La mise en œuvre technique effective de ces propositions est peu documentée. Nous relevons toutefois dans des publications récentes les résultats suivants :

- Stockage thermique par hydroxyde de calcium : Azpiazu et al ont mis en œuvre les réactions d'hydratation d'oxyde de calcium à un stade laboratoire suivant le cycle représenté en figure 9. Ce cycle a semble t il été valorisé sur des applications très spécifiques de préchauffage d'enceintes « alimentaires ».

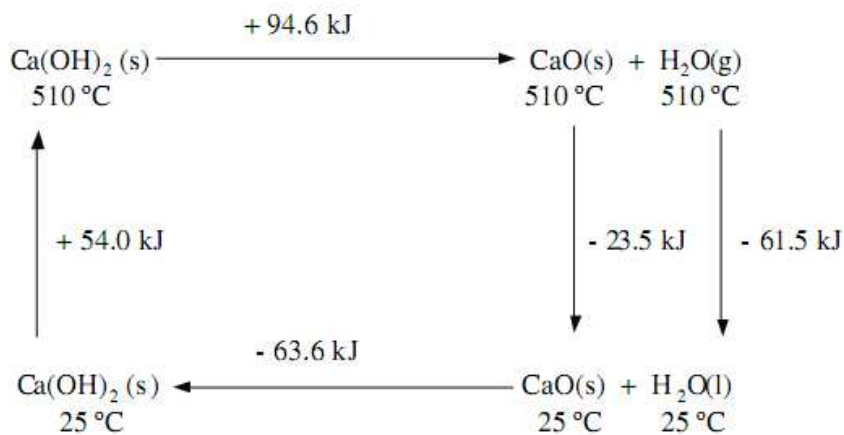


Figure 9 : Cycle hydratation/déshydratation du CaO

Le cycle présenté montre un faible taux de conversion de l'énergie récupérée en stockage de $63.6 / (54 + 94.6) = 42\%$, l'énergie résiduelle (58%) étant perdue lors de la condensation de l'eau et le refroidissement du CaO. Par ailleurs, le processus de déshydratation ne présente pas une réversibilité complète ce qui limite le nombre de cycles à 20 si on n'envisage pas une régénération périodique à près de 1000°C .

- Sadek et al ont évalué les potentiels de stockage thermique d'argiles Na-M (montmorillonite de sodium) ainsi que de Ca-M (montmorillonite de Calcium) toutes deux de la famille des phillo-silicates et ont montré que l'adjonction d'eau sur des argiles préalablement déshydratées (200°C pour la première et 230°C pour la seconde) permettait d'escompter un stockage thermique de 3600 kJ/kg d'argile et de 2030 kJ/kg (soit 7.2 MJ/m^3 et 4.1 MJ/m^3 pour positionnement) pour chacune d'entre elles. Ces résultats intéressants restent à confirmer et des technologies de mise en œuvre de ces solutions restent à développer

6. Recommandations générales

Les travaux portant sur les méthodes de stockage par sorption ou thermochimie se sont développés depuis plusieurs années notamment issus des recherches sur les Pompes à Chaleur à sorption et chimique. Ces travaux n'ont pas abouti à ce jour à des démonstrateurs industriels. Les difficultés expliquant ce manque de résultats concrets sont :

- le choix de matériaux adaptés
- la conception des réacteurs
- le coût des dispositifs complets

Il est donc prématuré d'envisager ces solutions dans des démonstrateurs industriels de taille significative.

7. Bibliographie

Kato Y, IEA, ECES IA Annex 18, Transportation of Energy utilizing Thermal Energy Storage Technology. 1st Workshop, 13-15 November 2006, Tokyo, Japan

Luo L, Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1532–1540

Wongsuvan et al, A review of chemical heat pumps technology, Applied Thermal Engineering, 21 (2001), 1489-1519

Azpiazu M N et al, Heat recovery from a thermal energy storage based on Ca(OH)₂/CaO cycle, Applied Thermal Engineering, 23 (2003), 733-741

Sadek et al, Ca-montmorillonite as thermal storage material, thermochimica acta 363 (2000), 47-54

Sadek et al, Na-montmorillonite as thermal storage material, thermochimica acta 370 (2001), 47-54

ANNEXE 8



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Les matériaux, équipements et systèmes pour le stockage thermique

**Fiche annexe : Technologie de stockage de froid
CRISTOPIA**

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. LE STL	3
2.1 Les nœuds de CRISTOPIA.....	3
2.2 Les cuves.....	5
3 LES SCHEMAS POSSIBLES	6
3.1 Schéma série amont.....	6
3.2 Schéma série aval	7
3.3 Schéma parallèle avec 1 point de consigne.....	7
3.4 Schéma parallèle avec 2 points de consigne	8
4. EXEMPLES D'INSTALLATION	8
4.1 Le MM 21 à Yokohama (Japon)	8
4.2 Climatisation urbaine (DCS) BANGSAR - Malaisie	9
5. CONCLUSION	10

1. Elément de contexte

Dans le cadre des études de cas, nous nous sommes intéressés à la technologie de stockage de froid développée par l'entreprise CRISTOPIA (CIAT GROUP).

En effet, pour l'étude de cas Habitat, il serait intéressant d'étudier un système comprenant un stockage chaud qui alimentera un système à absorption, qui lui produirait du froid afin de le stocker (stockage froid) consommable durant la journée. Le réseau de chaleur de l'UIOM permettrait d'utiliser la chaleur excédentaire de production nocturne afin de charger ce stockage.

Nous allons donc présenter la technologie STL (stockage thermique latent) développée par CRISTOPIA.

2. Le STL

Le STL est composé d'une cuve remplie de nodules et d'un fluide caloporteur. Approximativement 60 % du volume de la cuve est occupé par les nodules et les 40 % restants par le fluide caloporteur (mono-éthylène glycol ou mono-propylène glycol ou chlorure de calcium, ...). Le nombre de nodules dans un système détermine à la fois l'énergie totale stockée dans le STL mais aussi les puissances d'échanges entre les nodules et le fluide caloporteur en mode de charge et de décharge.



Figure 1 : Un STL de CRISTOPIA

2.1 Les nodules de CRISTOPIA

Les nodules sont des sphères fabriquées avec un mélange de polyoléfines obtenues par extrusion soufflage. Ils sont remplis avec des matériaux à changement de phase (PCM à transition solide-liquide). Les produits CRISTOPIA recouvrent une gamme dont les températures de fusion vont de -33°C à $+27^{\circ}\text{C}$ (voir le tableau 1).

Ils sont fabriqués en 2 diamètres : 77 mm (nodules SN) pour des applications industrielles à très basses températures (-18 à -33°C) ; et 98 mm (nodules AC et AN) pour des applications à basses températures (-3 à -15°C) et pour les systèmes de climatisation tertiaire à 0°C et +27°C.

Les caractéristiques mécaniques et chimiques de l'enveloppe du nodule sont parfaitement adaptées aux conditions de vie du nodule. La durée de vie du nodule est supérieure à "l'équivalent de 20 ans d'utilisation normale". Effectivement, les nodules résistent à 10 000 cycles sans rupture mécanique. De plus, le matériau utilisé est complètement neutre vis-à-vis des matériaux à changement de phase (sels eutectiques) et des fluides caloporteurs les plus courants. Une fois rempli de PCM, un bouchon est soudé par une machine à ultrasons afin de garantir une étanchéité parfaite.

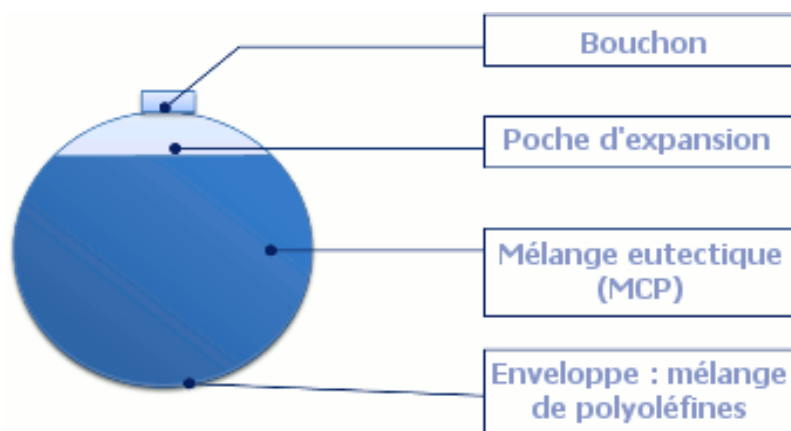
Le nodule est le résultat d'un long travail de recherche et développement et beaucoup de tests ont été effectués afin de déterminer les caractéristiques du nodule (diamètre, épaisseur de l'enveloppe, régularité de l'épaisseur de l'enveloppe, matériaux de l'enveloppe, etc...) :

- Essais de traction
- Essais de cyclage
- Mesure de la pression d'éclatement
- Détermination du comportement visco-élastique (test de fluage et test de relaxation)
- Vieillessement chimique dans des glycols commerciaux et les PCM
- Mesure de la pression interne durant la cristallisation
- Microscopie optique en lumière polarisée
- Tenue au choc

Le résultat est une durée de vie supérieure à 10 000 cycles (l'équivalent de plus de 27 ans d'utilisation normale).

-Caractéristiques du Nodule

Matière : mélange de polyoléfinés
Neutralité chimique vis-à-vis des eutectiques et des fluides caloporteurs
Epaisseur 10/10 : pas de migration du caloporteur
Sphère obtenue par soufflage : pas de fuite
Soudure du bouchon par ultrasons
Réserve d'expansion : diminution des contraintes de l'enveloppe



Type de nodule	Température de changement d'état	Chaleur latente	Capacité thermique spécifique		Conductivité thermique		Poids des nodules	Température limite d'emploi
			Solide kWh/K	Liquide kWh/K	Solidification kW/K	Fusion kW/K		
	°C	kWh					kg	°C
SN.33	-33	44,6	0,7	1,08	1,6	2,2	724	-40
SN.29	-28,9	39,3	0,8	1,15	1,6	2,2	681	à
SN.26	-26,2	47,6	0,85	1,2	1,6	2,2	704	
SN.21	-21,3	39,4	0,7	1,09	1,6	2,2	653	+60
SN.18	-18,3	47,5	0,9	1,24	1,6	2,2	706	
AN.15	-15,4	46,4	0,7	1,12	1,15	1,85	602	-25
AN.12	-11,7	47,7	0,75	1,09	1,15	1,85	620	
AN.10	-10,4	49,9	0,7	1,07	1,15	1,85	617	à
AN.06	-5,5	44,6	0,75	1,1	1,15	1,85	625	
AN.03	-2,6	48,3	0,8	1,2	1,15	1,85	592	+60
AC.00	0	48,4	0,7	1,1	1,15	1,85	560	
AC.27	+27	44,5	0,86	1,04	1,15	1,85	867	

Tableau 1 : Données pour un STL de 1 m³ de cuve

2.2 Les cuves

L'échange thermique entre les nodules et le système se fait par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur circulant dans la cuve.

La cuve peut être cylindrique (en acier noir) pour des pressions de service jusqu'à 10 bars, ou parallélépipédique (en béton ou en acier) pour une pression de service atmosphérique. Les cuves cylindriques peuvent être horizontales, verticales, installées à l'intérieur, à l'extérieur, ou enterrées.

Les cuves sont équipées de trous d'hommes supérieurs pour le remplissage en nodules et d'un trou d'homme inférieur pour une vidange éventuelle. Deux diffuseurs inférieurs et supérieurs répartissent le fluide caloporteur dans la cuve pour un rendement optimum. Les dimensions de la cuve sont calculées en fonction du site et de la capacité du STL. Voici dans le tableau 2 suivant les principales caractéristiques d'une cuve STL :

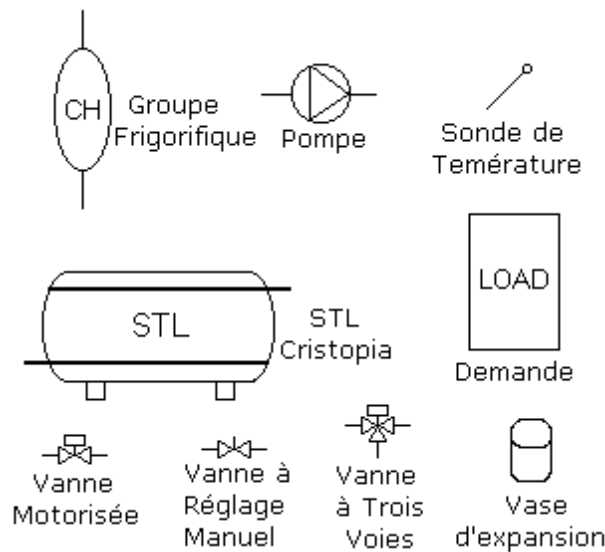
Volume	Diamètre extérieur	Longueur totale	Surface extérieure à isoler	Brides entrée/sortie	Nombre de berceaux	Poids à vide	Volume du caloporteur
m ³	mm	mm	m ²	mm		kg	m ³
2	950	2980	10	40	2	850	0,77
5	1250	4280	18	50	2	1250	1,94
10	1600	5240	29	80	2	1990	3,88
15	1900	5610	37	100	2	2900	5,82
20	1900	7400	47	125	3	3700	7,77
30	2200	8285	61	150	3	4700	11,64
50	2500	10640	89	175	4	6900	19,40
70	3000	10425	106	200	4	7300	27,16
100	3000	14770	147	250	6	12700	38,80

Tableau 2 : Exemples de caractéristiques des cuves

Prévoir un volume d'expansion utile de 1 % à 5 % en tenant compte de la pression (c.à.d. 10 à 50 L pour un réservoir d'1m³).

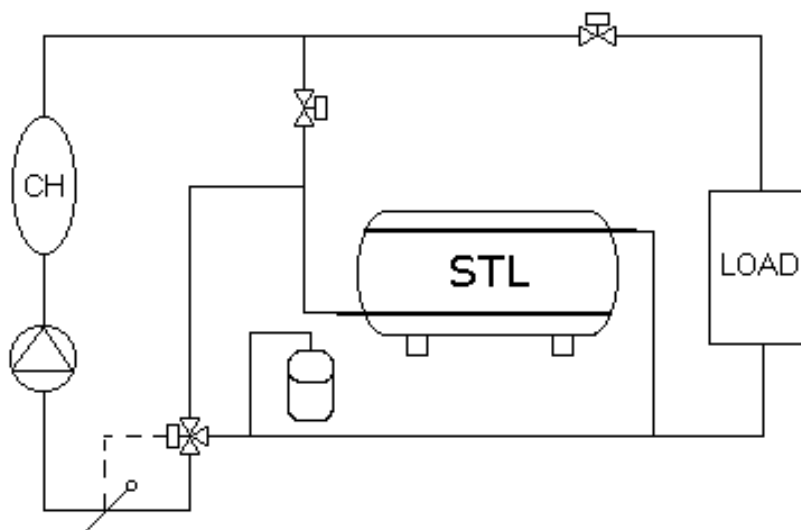
3 Les schémas possibles

Il y a 4 différents types de systèmes, voici la légende employée dans les schémas qui suivent :



Légende des schémas

3.1 Schéma série amont

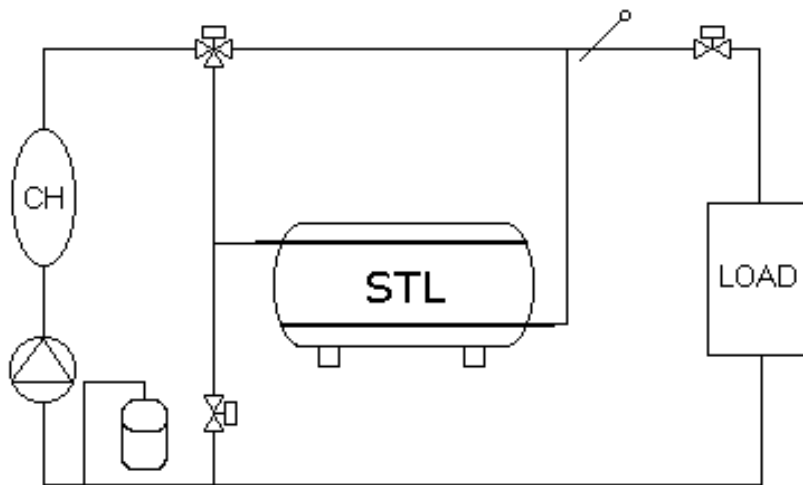


Ce schéma peut être utilisé pour tout système de climatisation ou de réfrigération industrielle. Il est très utilisé pour les systèmes importants tels que les District Cooling Systems.

Ce dispositif conduit au plus faible coût d'installation.

Ce dispositif est intéressant lorsque la différence ($\Delta T = T_{\text{retour}} - T_{\text{départ}}$) est supérieure à 8°C . Le groupe frigorifique et le STL sont en série, le ΔT est partagé respectivement entre le STL et le groupe frigorifique. Le schéma hydraulique et la régulation sont simples. L'avantage du schéma amont est que le STL fonctionne avec des températures entrée/sortie plus élevées, ce qui augmente la capacité du STL. Les débits en mode de charge et de décharge à travers le STL doivent être inversés en utilisant une vanne-3-voies en division.

3.2 Schéma série aval

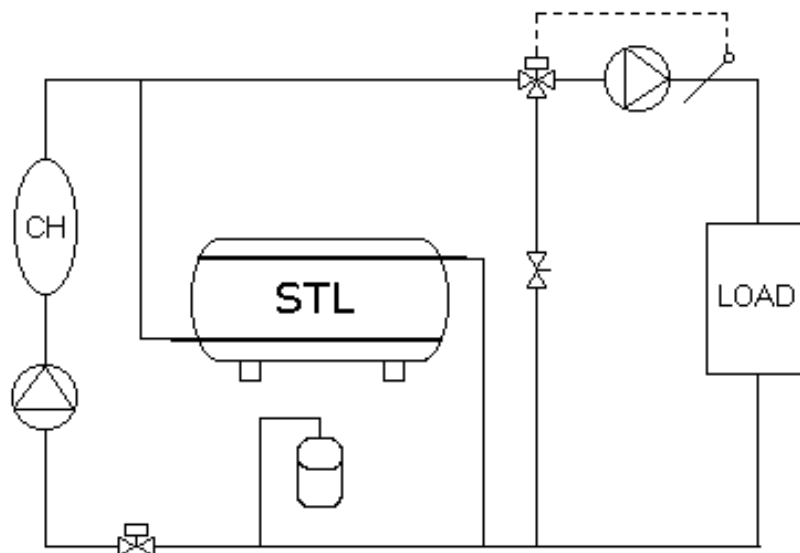


Ce schéma peut être utilisé pour tout système de climatisation ou de réfrigération industrielle.

Ce dispositif permet au système d'atteindre une efficacité optimale.

Ce dispositif est intéressant aussi lorsque la différence ($\Delta T = T_{\text{retour}} - T_{\text{départ}}$) est supérieure à 8°C . Le groupe frigorifique et le STL sont en série, le ΔT est partagé respectivement entre le groupe frigorifique et le STL. Le schéma hydraulique et la régulation sont simples. L'avantage du schéma aval est que le groupe frigorifique fonctionne avec des températures d'entrée plus élevées mais le volume du STL est légèrement supérieur, de manière à faire face à une plus basse température d'entrée. Les débits en mode de charge et de décharge à travers le STL doivent également être inversés.

3.3 Schéma parallèle avec 1 point de consigne

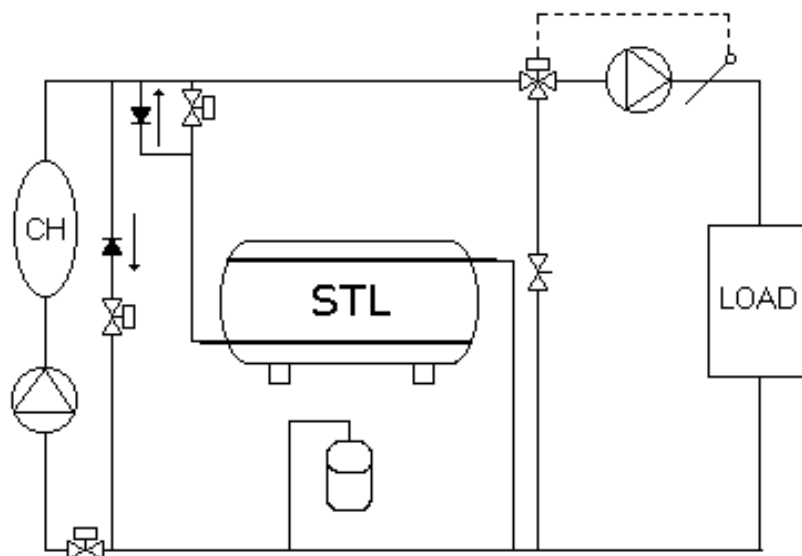


Ce schéma peut être utilisé pour tout système de climatisation ou de réfrigération industrielle fonctionnant avec la stratégie d'écrêtage, c'est-à-dire lorsque la demande est toujours plus élevée que la puissance du groupe frigorifique.

Ce dispositif a un coût d'installation très faible.

Le groupe frigorifique et le STL sont en parallèle. Le point de consigne du groupe frigorifique correspond à la fin du stockage. Le jour, lorsqu'il y a de la demande, la température de sortie du groupe frigorifique est très supérieure au point de consigne car la température d'entrée du groupe est élevée (habituellement 12°C lors de la pointe frigorifique).

3.4 Schéma parallèle avec 2 points de consigne



Ce schéma peut être utilisé pour tout système de climatisation ou de réfrigération industrielle fonctionnant selon diverses stratégies.

Ce schéma permet d'optimiser la gestion de l'énergie et d'obtenir une efficacité énergétique élevée.

Le groupe frigorifique et le STL sont en parallèle. Le groupe frigorifique a 2 points de consigne. L'un correspond au mode de charge et l'autre au mode de décharge. La distinction entre ces deux modes permet de faire fonctionner le groupe frigorifique avec une température d'évaporation la plus élevée, et ainsi d'avoir la meilleure efficacité. La régulation effectuée par une vanne-3-voies est très simple.

3.5

Pendant la nuit l'énergie est stockée en utilisant le groupe à sorption(ou groupe frigorifique) qui refroidit le fluide caloporteur. Celui-ci circule dans le STL à une température inférieure à la température de fusion du matériau à changement de phase (MCP) contenu dans les nodules, provoquant sa cristallisation. L'énergie est ainsi stockée en utilisant la chaleur latente de cristallisation des MCP. Lorsque la demande appelée est inférieure à la puissance du groupe frigorifique, la production de froid est assurée en direct par le groupe seul.

4. Exemples d'installation

4.1 Le MM 21 à Yokohama (Japon)

Un des plus gros stockages d'énergie thermique au monde.

Le projet Minato Mirai 21 (MM 21) est un nouveau développement urbain à Yokohama. Le bureau d'étude japonais a choisi un système de climatisation et chauffage urbain (DHC) pour assurer la climatisation et le chauffage à tous les bâtiments du quartier. Le développement des DHC est la nouvelle politique japonaise pour protéger l'environnement. Le DHC de MM 21 inclut un système d'énergie thermique STL de CRISTOPIA, construit par Mitsubishi sous licence CRISTOPIA. Ce STL - l'un des plus grands stockages d'énergie thermique dans le monde - est le composant de base du système permettant de gérer l'énergie avec efficacité. CRISTOPIA et son partenaire Mitsubishi ont démontré, avec cette installation, que le STL a de nombreuses applications dans le domaine des DHC dans le monde.

-Données Techniques

Energie stockée : 120 000 kWh
Volume de stockage STL : 2 200 m³
Température de stockage : 0°C
Type de Nodules : S-00
Nombre de cuves : 2 (verticales)
Hauteur des cuves : 28 m
Diamètre des cuves : 7,3 m
Volume des cuves : 1 100 m³

-Caractéristiques

Le stockage thermique est un CRISTOPIA STL-00-2 200 utilisant des nodules S-00. Les nodules sont remplis de MCP (Matériau à Changement de Phase) permettant le stockage d'énergie thermique à 0°C.

Le STL stocke quotidiennement une énergie de 120 000 KWh dans 2 cuves verticales de 1100 m³ chacune. L'énergie frigorifique est produite par 2 groupes frigorifiques centrifuges. La taille des cuves STL est équivalente à un bâtiment de 9 étages.

-Références du Projet

Client : Minato Mirai 21
Bureau d'étude: Mitsubishi Petrochemical Engineering Co.
Installateur: Petrochemical Engineering Co.

-Avantages Techniques

Diminution de la puissance frigorifique installée
Diminution de la taille des tours de refroidissement
Maintenance réduite
Efficacité et fiabilité accrues
Diminution de la taille de l'installation électrique
Possibilité de bien gérer l'énergie
Technologie verte pour un développement durable.

4.2 Climatisation urbaine (DCS) BANGSAR - Malaisie

Le DCS de Bangsar incorpore un STL - AC.00 – 1900. Ce système de climatisation urbaine assure la climatisation d'un quartier comprenant :

- l'hôtel Cygal et les tours Cygal A & B
- Les tours Atlas A à F
- Menara Telekom et Wisma Telekom
- Tenaga (TNB)

-Objectif

Pour tirer avantage des tarifs électriques de nuit, le système de stockage d'énergie thermique Cristopia (STL) est chargé la nuit pour être utilisé le jour.

-Données Techniques

Consommation d'énergie journalière : 450 000 kWh
Demande maximale : 40 000 kW
Energie stockée : 110 000 kWh
Volume du STL : 1 900 m³
Nombre de cuves : 5

-Caractéristiques

Le système consiste en 5 groupes frigorifiques centrifuges (3500 kW chacun) en série avec 5 STL (cuves cylindriques de 380 m³, 3,80 m de diamètre et 35 m de long). Deux groupes frigorifiques placés sur le circuit secondaire fournissent la demande de base. Chaque groupe frigorifique fonctionne avec un STL et un échangeur de chaleur pour produire de l'eau glacée à 3,3°C au primaire de l'échangeur. Chaque boucle (5 au total) fonctionne indépendamment des autres.

Le schéma hydraulique utilisé permet de choisir la stratégie la mieux adaptée pour satisfaire la demande frigorifique. Le choix quotidien de la meilleure stratégie est basé sur la minimisation de l'utilisation des groupes frigorifiques et sur l'utilisation maximale de l'énergie stockée dans le STL.

-Avantages Techniques

Diminution de la puissance frigorifique installée
Diminution de la taille des tours de refroidissement
Maintenance réduite
Système efficace et fiable
Augmentation de la durée de vie de la centrale frigorifique
Système flexible permettant de gérer l'énergie efficacement

-Avantages Financiers

Economies sur les coûts de fonctionnement, l'abonnement électrique, la maintenance
Diminution de l'investissement initial

-Références du Projet

Client : Bangsar Energy Systems SDN BHD (filiale de TNEC)
Consultant: KJ Engineering
Installateur: KJ Engineering

5. Conclusion

L'entreprise CRISTOPIA et son expérience dans le domaine du stockage de froid lui permet d'afficher de nombreux projets réalisés (ou en cours de réalisation) et se place donc en tant que véritable référence en la matière. Néanmoins on pourra noter que CRISTOPIA ne fournit que des solutions très génériques en termes de plages de température.

ANNEXE 9
« Unités de valorisation énergétique des déchets : caractéristiques des fours et des chaudières »

UVE	Puissance thermique four (PCI moy 220 kcal/kg)	Caractéristiques chaudières							
		Caractéristiques chaleur produite		Tonnes-heure de chaque chaudière				Tonnes-heure total des chaudières	Puissance totale chaudière en MW
		T (°C)	P (bar)	Chaudière 1	Chaudière 2	Chaudière 3	Chaudière 4		
1. Centre de Valorisation énergétique de Maubeuge : VALNOR (Usine de MAUBEUGE)	28,2	360,0	36	16,5	16,5			33,0	23,7
2. Centre de Valorisation énergétique de Saint Saulve : VALENCIENNES (Nord, Saint Saulve)	42,4	360,0	40						
3. Cve Antares : CVE ANTARES (Usine de HALLUIN)	111,7	370,0	42	48,5	48,5	48,5		145,5	104,8
4. Cve de Douchy-les-mines : DOUCHY LES MINES (Nord, Douchy les Mines)	28,2	360,0	40	15,0	15,0			30,0	21,4
5. Cve Dunkerque									
6. Incinération Sirac Colombelles : SIRAC (Centre Ouest, Calvados, Colombelles)	40,0	190	24						
7. Traitement des Dsri Par Incinération Bassens : PROCINER (Usine de BASSENS)	7,2	200	16	5	5			10,0	6,2
8. uve Argenteuil : ARGENTEUIL (Ile-de-France, Val-d'Oise)	61,6	380	36	25	25	54		104,0	65,2
9. uve Bourgoin Jailleu : RONAVAL (Usine de BOURGOIN JALLIEU)	28,2	240	18	13	16			28,5	18,5
10. uve Carrières-sous-poissy : AZALYS (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sous Poissy)	38,5	360	46	26	26			52,0	32,5
11. uve Carrières-sur-seine : CARRIERES SUR SEINE (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sur seine)	51,3	275	22	28	18			46,0	28,8
12. uve d'Agen : SOGAD (Sud Ouest, Lot et Garonne, AGEN)	10,8	230	22	8				8,2	5,2
13. uve d'Angers : GEVAL (Usine d'ANGERS)	38,5	202	16	19	19	19		55,5	34,6
14. uve d'Aurillac : RONAVAL (Usine d'AURILLAC)	2,6								
15. uve d'Avignon : VEDENE (Méditerranée, Vaucluse, Avignon)	46,2	350	35	16	16	16		46,5	33,1
16. uve d'Haguenau : SCHWEIGHOUSE (Nord Est, Bas Rhin, Haguenau)	25,7	320	30	13	13			26,0	16,3
17. uve d'Orléans : ORVADE (Usine de SARAN)	35,9	355	40	17	17			34,0	24,2
18. uve d'Ouarville : VALORYELE OUARVILLE (Ile-de-France, Eure et Loire, Ouarville)	41,1	360	46	27	27			54,0	38,4
19. uve de Bayet : RONAVAL (Usine de BAYET)	23,1	209	18	8	12			20,4	12,8

20. uve de Bellegarde-sur-Valserine : SET FAUCIGNY GENEVOIS (Centre Est, Ain, Bellegarde)	41,1	385	40	25	25			50,0	36,6
21. uve de Besançon : SNC BIVAL (Centre Est, Doubs, Besançon)	18,0			8	13			21,3	
22. uve de Bessières : ECONOTRE (Sud Ouest, Haute Garonne, Bessières)	58,5	360	46	39	39			77,0	54,8
23. uve de Blois : ARCANTE (Centre Ouest, Loir-et-Cher, Blois)	28,2	360	36	17	17			34,0	24,4
24. uve de Bordeaux Begles : ASTRIA (Sud Ouest, Gironde, Bègles)	84,7	360	46	35	35	35		106,2	75,5
25. uve de Bordeaux Cenon : CENON (Sud Ouest, Gironde, Cenon)	41,1	265	24	18	18			36,0	
26. uve de Bourgogne : BOUROGNE BELFORT (Territoire de Belfort)	31,8								
27. uve de Brest : GEVAL (Usine de BREST)	46,2	290	32	22	22			44,0	25,6
28. uve de Briec de l'Odet : GEVAL (Usine de BRIEC)	20,5	350	40	10	10			20,0	12,5
29. uve de Brive la Gaillarde : Brive Saint Pantaleon de larche (Région Limousin)	27,0	180	16	11	11	11		31,5	0,0
30. uve de Calce : CALCE (Usine de Perpignan)	56,5	380	40	34	34			68,0	49,5
31. uve de Carhaix : CARHAIX (Centre Ouest, Finistère, Carhaix)	10,3	340	28	9				9,2	6,5
32. uve de Chambéry									
33. uve de Chartres : ORISANE (Centre Ouest, Eure et Loire, CHARTRES)	38,5	360	45	24	24			48,8	30,5
34. uve de Chaumont : SHMVD (Usine de CHAUMONT)	25,7	350	35	13	13			26,0	16,3
35. uve de Chavanod : ANNECY (Usine d'Annecy)	41,6								
36. uve de Colmar : Colmar (Usine de COLMAR)	30,8								
37. uve de Concarneau : GEVAL (Usine de CONCARNEAU)	20,5	220	22	10	10			20,0	12,6
38. uve de Créteil : C.I.E Creteil (Ile-de-France, Val de Marne, Créteil)	82,1	360	46	45	45	12		102,0	63,8
39. uve de Dieppe : DIEPPE (Région Normandie- Dieppe-Rouxmesnil Bouteilles)	12,8		15						
40. uve de Dijon : DIJON (Usine d'Incineration de la Communauté d'Agglomération Dijonnaise)	59,5			17	17			34,0	
41. uve de Fort-de-France : MARTINQUAISE DE VALORISATION (Usine de FORT de FRANCE)	35,9	350	40	19				19,4	13,7

42. uve de Fourchambault : SONIRVAL (Usine de NEVERS)	16,9	350	38	19				19,4	13,8
43. uve de Gien : GIEN (Loiret, Gien)	25,7	350	36	14	14			27,0	19,2
44. uve de Guichainville : Usine d'EVREUX (sud de l'Eure)	28,7	385	40	17	17			34,0	24,9
45. uve de la Rochelle : SETRAD (Usine de LA ROCHELLE)	20,5	220	24	13	13			26,4	16,5
46. uve de Labeuvriere : La Beuvrière (Pas de Calais)									
47. uve de Lasse : LASSE - SALAMANDRE (LASSE)	32,1	400	60	43				43,0	31,5
48. uve de Limoges : STVL (Usine de LIMOGES)	38,5	280	25	12	12	12		34,5	21,6
49. uve de Lons le Saunier : JURATROM Lons le Saunier (Centre Est, Jura, Lons le saunier)	12,8			15				15,0	
50. uve de Ludres (nancy) : NANCY ENERGIE (Usine de LUDRES)	41,1	400	40	19	19			38,0	23,8
51. uve de Lunel-viel : OCREAL (Méditerranée, Hérault, Lunel Viel)	41,1	360	46	18	18			35,0	24,9
52. uve de Marignier : RONAVAL (Usine de MARIGNIER CLUSES)	12,8	330	27	15				15,1	9,5
53. uve de Montauban : MONTAUBAN (Sud Ouest, Tarn et Garonne, Montauban)	12,8	195	18	12				12,0	7,4
54. uve de Montbéliard : MONTVALOR (Usine de MONTBELIARD)	20,5	240	13,5	10	10			20,6	13,5
55. uve de Mourenx : Lacq Mourenx (Usine de Lacq Mourenx)									
56. uve de Mulhouse : SAUSHEIM/UIRU de Mulhouse (Sausheim, Nord-Est, Haut Rhin)	51,3	310	33	20	20			40,0	25,1
57. uve de Nantes Arc en Ciel : ARC EN CIEL (Usine de NANTES)	35,9	350	35	19	19			37,6	23,6
58. uve de Nantes Valorena : VALORENA (Centre Ouest, Loire Atlantique, Nantes)	48,8	200	29						
59. uve de Nice : SONITHERM (Usine de NICE)	138,6	350	31	30	30	50		110,0	68,9
60. uve de Nîmes : EVOLIA (Usine de NIMES)	35,9	400	46	45				44,8	33,1
61. uve de Passy : SET MONT BLANC, Passy (Centre Est, Haute Savoie, Passy)	19,3	350	39	19	19			37,0	23,2
62. uve de Pau : PAU (Sud Ouest, Pyrénées atlantique, Lescar)	28,2	370	40	14	14			27,5	19,8
63. uve de Pithiviers : PITHIVIERS (Région Centre)	28,2	370	40	8				7,8	5,6
64. uve de Planguenoual : LAMBALLE (Centre Ouest, Cotes d'Armor, Planguenoual)	14,4	350	35	12				12,0	7,5

65. uve de Pluzunet : VEOLIA PROPRETE VAL D'ARMOR (Usine de PLUZUNET)	18,0	350	40	20				19,5	31,4
66. uve DE POITIERS : SETRAD (Usine de POITIERS)	16,9	180	18						
67. uve de Pontarlier : PONTARLIER (Centre Est, Doubs, Pontarlier)	12,8	180	16	7				7,2	4,4
68. uve de Pontenx-les-forges : PONTENX (Landes, Pontenx les Forges)	13,6	355	34	14				14,0	8,8
69. uve de Pontivy : PONTIVY (Morbihan, Pontivy)	10,3	220	23	12				12,0	7,5
70. uve de Pontmain : CVED de Pontmain - SMECO (Centre Ouest, Mayenne, Pontmain)	18,5	350	40	8	13			21,0	14,9
71. uve de Rambervillers : SOVVAD, RAMBERVILLIERS (Nord Est, Vosges)	30,8	360	36	5	5	18		28,0	20,1
72. uve de Reims : REMIVAL (Usine de Reims)	33,4	290	25	15	15			30,0	20,3
73. uve de Rennes : SOBREC (Usine de RENNES)	46,2	228	27	16	16	21		53,0	33,2
74. uve de Rouen : SNVE-VESTA (Usine de ROUEN)	111,7	395	36	46	46	46		138,0	102,1
75. uve de Rozières d'Egletons : CORREZE INCINERATION (Sud Ouest, Corrèze, Rosiers d'Egletons)	13,6	360	38	14				13,5	9,7
76. uve de Saint Barthelemy : Saint Barthélémy (Usine de Saint Barthélémy)	3,9		15	5				5,0	3,0
77. uve de Saint Benoit la Foret : CHINON (Région Touraine - Chinon - St benoit la Foret)	7,2			6				6,3	
78. uve de Saint Jean de Folleville: OREADE (Centre Ouest, Seine Maritime, Le Havre)	61,6	400	45	38	38			76,0	56,2
79. uve de Salaise-sur-sanne									
80. uve de Sens : VALEST (Usine de SENS)	7,7	200	16	8				8,2	5,1
81. uve de Sete : SETOM (Usine de SETE)	14,4	230	34	13				13,2	
82. uve de Strasbourg : STRASBOURG (Bas- Rhin, Strasbourg)	116,0	330	30	35	35	35	35	140,0	98,1
83. uve de Taden : IDEX FASSA ENVIRONNEMENT (Ille et Vilaine - Côte d'Armor)	35,9	350	35	17	17			34,0	24,2
84. uve de Thonon-les-bains : THONON LES BAINS (Rhônes Alpes)	12,8	298	14	14				14,1	9,8
85. uve de Toulon : CCUAT Toulon (Méditerranée, Var, Toulon)	97,5	380	42	33	36			68,9	50,1
86. uve de Toulouse : SETMI (Usine de TOULOUSE)	112,9	250	17	34	22	47		102,5	64,0
87. uve de Tronche (la) : ATHANOR (Agglomération GRENOBLOISE)	61,6	285	29	28	28	28		84,0	56,2

88. uve de Tronville en Barrois : MEUSE ENERGIE (Tronville en Barrois, Meuse, Nord Est)	10,3	225	25	10	8	16		33,5	21,0
89. uve de Vernou-en-sologne : Vernou en Sologne (Loir et Cher)									
90. uve de Villefranche sur Saone : VILLEFRANCHE SUR SAÔNE (Rhône-Alpes, Villefranche sur Saône)	28,2	360	44	14	21			35,0	21,9
91. uve de Villers Saint Paul : ESIANE (Ile-de-France, Villers Saint Paul, Oise)	51,3	400	45	32	32			64,0	47,3
92. uve de Vitre : VITRE (Centre Ouest, Ile et Vilaine, Vitré)	10,3	310	35	8				7,5	5,1
93. uve du Mans 1 : SEC (Usine du MANS)	53,9	350	25,1	28	28			56,0	40,2
94. uve ECOPOLE D'ECHILLAIS : SETRAD (Usine de ROCHEFORT)	16,9	180	18						
95. uve Fos-sur-mer									
96. uve Guerville : VALENE (Usine de GUERVILLE)	25,4	390	40	10	10	10		30,0	22,0
97. uve Issy-les-moulineaux - Isseane : Isséane (Hauts de Seine, Issy les Moulineaux)	313,1								
98. uve Ivry-sur-seine : IVRY (Ivry sur Seine, Val de Marne)	256,7	475	75	134	134			268,0	208,2
99. uve la Veuve : AUREADE (Usine de CHALONS sur MARNE)	32,1	400	60	44				43,5	31,8
100. uve Massy 1 : Massy (Usine de MASSY Essonne)									
101. uve Monthyon : SOMOVAL (Usine de MONTHYON)	46,2	390	40	20	20	12		52,6	38,7
102. uve Noidans le Ferroux									
103. uve Rillieux la Pape : VALORLY, Lyon Nord (Centre Est, Rhone, LYON)	61,6	380	40	26	26			52,0	32,6
104. uve Rungis : SOTRIS (Usine de RUNGIS)	43,6	180	20						
105. uve Saint-ouen : SAINT OUEN (Seine Saint Denis, Saint Ouen)	215,6	380	40	72	72	72		216,0	135,2
106. uve Saint-ouen-l'aumone : CGECP AUROR'ENVIRONNEMENT (Usine de CERGY PONTOISE)	53,9	390	41	30	30	30		90,0	56,3
107. uve Saint-thibault-les-vignes : ST THIBAULT DES VIGNES (Ile-de-France, Seine et Marne, Lagny)	51,3	290	21	27	35			62,0	42,2
108. uve Sarcelles : SAREN (Val d'Oise)	51,3	310	33	20	20			40,0	25,1
109. uve Thiverval Grignon : CVD THIVERVAL-GRIGNON (Ile de France / Plaisir / Thiverval-Grignon)	87,3	210	35	260	260	35		555,0	331,3

110. uve Vaux le Penil : GENERIS (Usine de VAUX le PENIL)	8,2								
111. uve Vert le Grand : Vert le Grand (Essonne)									
112. uve Villejust 1 : VILLEJUST (Ile de France Essonne Villejust)	28,2	180		200				200,0	120,0

Caractéristiques chaudières									
	Puissance thermique four (PCI moy 220 kcal/kg)	Caractéristiques chaleur		Tonnes-heure de chaque chaudière				Tonnes- heure total des chaudière	Puissance totale chaudière en MW
		T (°C)	P (bar)	Chaudière 1	Chaudière 2	Chaudière 3	Chaudière 4		
MAX	313	475	75	260	260	72	35	555	331
MIN	3	180	14	5	5	10	35	5	0
Moyenne	43,9	315,4	33,2	26,2	27,3	29,8	35,0	53,6	37,3
Somme	4479,6	28382,0	3020,6	2334,6	1775,9	625,7	35,0	4771,2	3098,8

UVE	FOURS						Tonnages des déchets incinérés par an	
	Tonnes-heure de chaque four					Puissance thermique four (PCI moy 220 kcal/kg)	Tonnages (t/an)	Tonnages (kt/an)
	Four 1	Four 2	Four 3	Four 4	Tonnes-heure total des fours			
1. Centre de Valorisation énergétique de Maubeuge : VALNOR (Usine de MAUBEUGE)	5,5	5,5			11,0	28,2	83 092	83
2. Centre de Valorisation énergétique de Saint Saulve : VALENCIENNES (Nord, Saint Saulve)	5,5	5,5	5,5		16,5	42,4	116 353	116
3. Cve Antarés : CVE ANTARES (Usine de HALLUIN)	14,5	14,5	14,5		43,5	111,7	344 993	345
4. Cve de Douchy-les-mines : DOUCHY LES MINES (Nord, Douchy les Mines)	5,5	5,5			11,0	28,2	90 526	91
5. Cve Dunkerque								
6. Incinération Sirac Colombelles : SIRAC (Centre Ouest, Calvados, Colombelles)	7,8	7,8			15,6	40,0	98 768	99
7. Traitement des Dasri Par Incinération Bassens : PROCINER (Usine de BASSENS)	1,5	1,3			2,8	7,2	12 528	13
8. UVE Argenteuil : ARGENTEUIL (Ile-de-France, Val-d'Oise)	7,5	7,5	9,0		24,0	61,6	189 068	189
9. UVE Bourgoin Jailleu : RONAVAL (Usine de BOURGOIN JALLIEU)	5,0	6,0			11,0	28,2	80 256	80
10. UVE Carrières-sous-poissy : AZALYS (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sous Poissy)	7,5	7,5			15,0	38,5	115 258	115
11. UVE Carrières-sur-seine : CARRIERES SUR SEINE (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sur seine)	10,0	10,0			20,0	51,3	83 692	84
12. UVE d'Agen : SOGAD (Sud Ouest, Lot et Garonne, AGEN)	4,2				4,2	10,8	30 882	31
13. UVE d'Angers : GEVAL (Usine d'ANGERS)	5,0	5,0	5,0		15,0	38,5	77 738	78
14. UVE d'Aurillac : RONAVAL (Usine d'AURILLAC)	1,0				1,0	2,6	4 666	5
15. UVE d'Avignon : VEDENE (Méditerranée, Vaucluse, Avignon)	6,0	6,0	6,0		18,0	46,2	136 733	137
16. UVE d'Haguenau :SCHWEIGHOUSE (Nord Est, Bas Rhin, Haguenau)	5,0	5,0			10,0	25,7	76 483	76

17. UVE d'Orléans : ORVADE (Usine de SARAN)	7,0	7,0			14,0	35,9	98 470	98
18. UVE d'Ouarville : VALORYELE OUARVILLE (Ile-de- France, Eure et Loire, Ouarville)	8,0	8,0			16,0	41,1	114 161	114
19. UVE de Bayet : RONAVAL (Usine de BAYET)	4,0	5,0			9,0	23,1	50 056	50
20. UVE de Bellegarde-sur-valseri ne : SET FAUCIGNY GENEVOIS (Centre Est, Ain, Bellegarde)	8,0	8,0			16,0	41,1	113 944	114
21. UVE de Besançon : SNC BIVAL (Centre Est, Doubs, Besançon)	3,0	4,0			7,0	18,0	50 000	50
22. UVE de Bessieres : ECONOTRE (Sud Ouest, Haute Garonne, Bessières)	11,4	11,4			22,8	58,5	158 497	158
23. UVE de Blois : ARCANTE (Centre Ouest, Loir-et-Cher, Blois)	5,5	5,5			11,0	28,2	91 157	91
24. UVE de Bordeaux Begles : ASTRIA (Sud Ouest, Gironde, Bègles)	11,0	11,0	11,0		33,0	84,7	245 181	245
25. UVE de Bordeaux Cenon : CENON (Sud Ouest, Gironde, Cenon)	8,0	8,0			16,0	41,1	123 063	123
26. UVE de Bourgogne : BOUROGNE BELFORT (Territoire de Belfort)	6,2	6,2			12,4	31,8		
27. UVE de Brest : GEVAL (Usine de BREST)	9,0	9,0			18,0	46,2	124 699	125
28. UVE de Briec de l'Odet : GEVAL (Usine de BRIEC)	4,0	4,0			8,0	20,5	61 777	62
29. UVE de Brive la Gaillarde : Brive Saint Pantaleon de larche (Région Limousin)	3,5	3,5	3,5		10,5	27,0	62 000	62
30. UVE de Calce : CALCE (Usine de Perpignan)	11,0	11,0			22,0	56,5	180 644	181
31. UVE de Carhaix : CARHAIX (Centre Ouest, Finistère, Carhaix)	4,0				4,0	10,3	29 153	29
32. UVE de Chambéry								
33. UVE de Chartres : ORISANE (Centre Ouest, Eure et Loire, CHARTRES)	7,5	7,5			15,0	38,5	118 390	118
34. UVE de Chaumont : SHMVD (Usine de CHAUMONT)	5,0	5,0			10,0	25,7	76 599	77
35. UVE de Chavanod : ANNECY (Usine d'Annecy)	4,2	6,0	6,0		16,2	41,6		
36. UVE de Colmar : Colmar (Usine de COLMAR)	6,0	6,0			12,0	30,8		

37. UVE de Concarneau : GEVAL (Usine de CONCARNEAU)	4,0	4,0			8,0	20,5	45 773	46
38. UVE de Créteil : C.I.E Creteil (Ile-de-France, Val de Marne, Créteil)	15,0	15,0	2,0		32,0	82,1	227 337	227
39. UVE de Dieppe : DIEPPE (Région Normandie- Dieppe-Rouxmesnil Bouteilles)	2,5	2,5			5,0	12,8	20 000	20
40. UVE de Dijon : DIJON (Usine d'Incinération de la Communauté d'Agglomération Dijonnaise)	11,6	11,6			23,2	59,5		
41. UVE de Fort-de-France : MARTINICAISE DE VALORISATION (Usine de FORT de FRANCE)	7,0	7,0			14,0	35,9	113 026	113
42. UVE de Fourchambault : SONIRVAL (Usine de NEVERS)	6,6				6,6	16,9	38 106	38
43. UVE de Gien : GIEN (Loiret, Gien)	5,0	5,0			10,0	25,7	26 443	26
44. UVE de Guichainville : Usine d'EVREUX (sud de l'Eure)	5,6	5,6			11,2	28,7	90 101	90
45. UVE de la Rochelle : SETRAD (Usine de LA ROCHELLE)	4,0	4,0			8,0	20,5	57 573	58
46. UVE de Labeuvriere : La Beuvrière (Pas de Calais)								
47. UVE de Lasse : LASSE - SALAMANDRE (LASSE)	12,5				12,5	32,1	100 496	100
48. UVE de Limoges : STVL (Usine de LIMOGES)	5,0	5,0	5,0		15,0	38,5	90 680	91
49. UVE de Lons le Saunier : JURATROM Lons le Saunier (Centre Est, Jura, Lons le saunier)	5,0				5,0	12,8	36 563	37
50. UVE de Ludres (nancy) : NANCY ENERGIE (Usine de LUDRES)	8,0	8,0			16,0	41,1	97 810	98
51. UVE de Lunel-viel : OCREAL (Méditerranée, Hérault, Lunel Viel)	8,0	8,0			16,0	41,1	127 434	127
52. UVE de Marignier : RONAVAL (Usine de MARIGNIER CLUSES)	5,0				5,0	12,8	44 557	45
53. UVE de Montauban : MONTAUBAN (Sud Ouest, Tarn et Garonne, Montauban)	5,0				5,0	12,8	29 119	29

54. UVE de Montbéliard : MONTVALOR (Usine de MONTBELIARD)	4,0	4,0			8,0	20,5	43 849	44
55. UVE de Mourenx : Lacq Mourenx (Usine de Lacq Mourenx)								
56. UVE de Mulhouse : SAUSHEIM/UIRU de Mulhouse (Sausheim, Nord-Est, Haut Rhin)	10,0	10,0			20,0	51,3	121 062	121
57. UVE de Nantes Arc en Ciel : ARC EN CIEL (Usine de NANTES)	7,0	7,0			14,0	35,9	89 284	89
58. UVE de Nantes Valorena : VALORENA (Centre Ouest, Loire Atlantique, Nantes)	9,5	9,5			19,0	48,8	129 374	129
59. UVE de Nice : SONITHERM (Usine de NICE)	12,0	12,0	12,0	18,0	54,0	138,6	309 091	309
60. UVE de Nîmes : EVOLIA (Usine de NIMES)	14,0				14,0	35,9	101 026	101
61. UVE de Passy : SET MONT BLANC, Passy (Centre Est, Haute Savoie, Passy)	7,5				7,5	19,3	44 129	44
62. UVE de Pau : PAU (Sud Ouest, Pyrénées atlantique, Lescar)	5,0	6,0			11,0	28,2	79 440	79
63. UVE de Pithiviers : PITHIVIERS (Région Centre)	5,0	6,0			11,0	28,2	23 800	24
64. UVE de Planguenoual : LAMBALLE (Centre Ouest, Cotes d'Armor, Planguenoual)	5,6				5,6	14,4	40 665	41
65. UVE de Pluzunet : VEOLIA PROPLETE VAL D'ARMOR (Usine de PLUZUNET)	7,0				7,0	18,0	22 424	22
66. UVE DE POITIERS : SETRAD (Usine de POITIERS)	3,3	3,3			6,6	16,9	44 962	45
67. UVE de Pontarlier : PONTARLIER (Centre Est, Doubs, Pontarlier)	5,0				5,0	12,8	34 408	34
68. UVE de Pontenx-les-forges : PONTENX (Landes, Pontenx les Forges)	5,3				5,3	13,6	40 148	40
69. UVE de Pontivy : PONTIVY (Morbihan, Pontivy)	4,0				4,0	10,3	30 503	31
70. UVE de Pontmain : CVED de Pontmain - SMECO (Centre Ouest, Mayenne, Pontmain)	3,2	4,0			7,2	18,5	61 298	61
71. UVE de Rambervillers : SOVVAD, RAMBERVILLIERS (Nord Est, Vosges)	3,0	3,0	6,0		12,0	30,8	90 493	90
72. UVE de Reims : REMIVAL (Usine de Reims)	6,5	6,5			13,0	33,4	67 069	67
73. UVE de Rennes : SOBREC (Usine de RENNES)	5,0	5,0	8,0		18,0	46,2	124 913	125

74. UVE de Rouen : SNVE-VESTA (Usine de ROUEN)	14,5	14,5	14,5		43,5	111,7	296 922	297
75. UVE de Roziers d'Egletons : CORREZE INCINERATION (Sud Ouest, Corrèze, Rosiers d'Egletons)	5,3				5,3	13,6	40 697	41
76. UVE de Saint Barthelemy : Saint Barthélémy (Usine de Saint Barthélémy)	1,5				1,5	3,9	9 501	10
77. UVE de Saint Benoit la Foret : CHINON (Région Touraine - Chinon - St benoit la Foret)	2,8				2,8	7,2	19 000	19
78. UVE de Saint Jean de Folleville: OREADE (Centre Ouest, Seine Maritime, Le Havre)	12,0	12,0			24,0	61,6	172 760	173
79. UVE de Salaise-sur-sanne								
80. UVE de Sens : VALEST (Usine de SENS)	3,0				3,0	7,7	16 927	17
81. UVE de Sete : SETOM (Usine de SETE)	5,6				5,6	14,4	40 435	40
82. UVE de Strasbourg : STRASBOURG (Bas- Rhin, Strasbourg)	11,3	11,3	11,3	11,3	45,2	116,0	267 718	268
83. UVE de Taden : IDEX FASSA ENVIRONNEMENT (Ille et Vilaine - Côte d'Armor)	7,0	7,0			14,0	35,9	86 468	86
84. UVE de Thonon-les-bains : THONON LES BAINS (Rhônes Alpes)	5,0				5,0	12,8	39 000	39
85. UVE de Toulon : CCUAT Toulon (Méditerranée, Var, Toulon)	12,0	12,0	14,0		38,0	97,5	250 931	251
86. UVE de Toulouse : SETMI (Usine de TOULOUSE)	10,0	10,0	10,0	14,0	44,0	112,9	250 995	251
87. UVE de Tronche (la) : ATHANOR (Agglomération GRENOBLOISE)	8,0	8,0	8,0		24,0	61,6	68 972	69
88. UVE de Tronville en Barrois : MEUSE ENERGIE (Tronville en Barrois, Meuse, Nord Est)	4,0				4,0	10,3	23 488	23
89. UVE de Vernou-en-sologne : Vernou en Sologne (Loir et Cher)								
90. UVE de Villefranche sur Saone : VILLEFRANCHE SUR SAÔNE (Rhône-Alpes, Villefranche sur Saône)	6,5	4,5			11,0	28,2	79 751	80
91. UVE de Villers Saint Paul : ESIANE (Ile-de- France, Villers Saint Paul, Oise)	10,0	10,0			20,0	51,3	160 764	161

92. UVE de Vitre : VITRE (Centre Ouest, Ile et Vilaine, Vitré)	4,0				4,0	10,3	24 594	25
93. UVE du Mans 1 : SEC (Usine du MANS)	9,0	12,0			21,0	53,9	120 954	121
94. UVE ECOPOLE D'ECHILLAIS : SETRAD (Usine de ROCHEFORT)	3,3	3,3			6,6	16,9	33 953	34
95. UVE Fos-sur-mer								
96. UVE Guerville : VALENE (Usine de GUERVILLE)	3,3	3,3	3,3		9,9	25,4	59 881	60
97. UVE Issy-les-moulineaux – Isseane : Isséane (Hauts de Seine, Issy les Moulineaux)	61,0	61,0			122,0	313,1	460 000	460
98. UVE Ivry-sur-seine : IVRY (Ivry sur Seine, Val de Marne)	50,0	50,0			100,0	256,7	669 939	670
99. UVE la Veuve : AUREADE (Usine de CHALONS sur MARNE)	12,5				12,5	32,1	86 952	87
100. UVE Massy 1 : Massy (Usine de MASSY-Essonne)								
101. UVE Monthyon : SOMOVAL (Usine de MONTHYON)	7,0	7,0	4,0		18,0	46,2	117 760	118
102. UVE Noidans le Ferroux								
103. UVE Rillieux la Pape : VALORLY, Lyon Nord (Centre Est, Rhône, LYON)	12,0	12,0			24,0	61,6	141 519	142
104. UVE Rungis : SOTRIS (Usine de RUNGIS)	8,5	8,5			17,0	43,6	121 476	121
105. UVE Saint-ouen : SAINT OUEN (Seine Saint Denis, Saint Ouen)	28,0	28,0	28,0		84,0	215,6	607 819	608
106. UVE Saint-ouen-l'aumone : CGECP AUROR'ENVIRONNEME NT (Usine de CERGY PONTOISE)	10,5	10,5			21,0	53,9	149 062	149
107. UVE Saint-thibault-les-vign es : ST THIBAUT DES VIGNES (Ile-de-France, Seine et Marne, Lagny)	8,0	12,0			20,0	51,3	150 086	150
108. UVE Sarcelles : SAREN (Val d'Oise)	10,0	10,0			20,0	51,3	121 062	121
109. UVE Thiverval Grignon : CVD THIVERVAL-GRIGNON (Ile de France / Plaisir / Thiverval-Grignon)	10,0	10,0	14,0		34,0	87,3	188 113	188
110. UVE Vaux le Penil : GENERIS (Usine de VAUX le PENIL)	3,2				3,2	8,2	24 553	25
111. UVE Vert le Grand : Vert le Grand (Essonne)								

112. UVE Villejust 1 : VILLEJUST (Ile de France Essonne Villejust)	5,0	6,0			11,0	28,2	35 246	35
---	-----	-----	--	--	------	------	--------	----

	FOURS						Tonnages des déchets incinérés par an	
	Tonnes-heure de chaque four					Puissance thermique four (PCI moy 220 kcal/kg)	Tonnages (t/an)	Tonnages (kt/an)
	Four 1	Four 2	Four 3	Four 4	Tonnes-heure total des fours			
MAX	61	61	28		122	313		670
MIN	1	1	2		1	3		5
Moyenne	8,0	8,9	9,1		17,1	43,9		110,4
Somme	813,3	688,1	200,6		1745,3	4479,6		10819,1

ANNEXE 10

« Unités de valorisation énergétique des déchets : vente d'électricité et de chaleur »

UVE	Type de valorisation						
	Thermique						
	Réseau de chaleur	P° Etherm (MWh/an)	P° Etherm (kWh/an)	Vente énergie thermique quelconque	Vente Etherm (kWh/an)	Nombre de foyers en chauffage	Vente Vapeur
1. Centre de Valorisation énergétique de Maubeuge : VALNOR (Usine de MAUBEUGE)		206 058	206				
2. Centre de Valorisation énergétique de Saint Saulve : VALENCIENNES (Nord, Saint Saulve)		250 598	251				
3. Cve Antarés : CVE ANTARES (Usine de HALLUIN)		665 651	666				
4. Cve de Douchy-les-mines : DOUCHY LES MINES (Nord, Douchy les Mines)		196 315	196				
5. Cve Dunkerque							
6. Incinération Sirac Colombelles : SIRAC (Centre Ouest, Calvados, Colombelles)	Réseau urbain de 24 km desservant 10 500 équivalent logements (piscines, théâtre, cinéma, centre commercial, logements...). 2 x 230 tonnes / heure eau surchauffée sous 24 bars, 190 °C	181 915	182	96 876	97	6 055	
7. Traitement des Darsi Par Incinération Bassens : PROCINER (Usine de BASSENS)	1	22 184	22	1	1		
8. uve Argenteuil : ARGENTEUIL (Ile-de-France, Val-d'Oise)	Réseau de chaleur d'Argenteuil (5 500 logements) et d'un réseau de vapeur industriel. 1 chaudière de 25 tonnes / heure de vapeur à 360 °C/36b et 1 chaudière de 54 tonnes / heure de vapeur 380 °C/45b	439 647	440	58 482	58	3 655	

9. uve Bourgoin Jailleu : RONAVAL (Usine de BOURGOIN JALLIEU)	Réseau vapeur+ eau chaude BT - Industriel + Logements	14 407	14	14 407	14	900	
10. uve Carrières-sous-poissy : AZALYS (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sous Poissy)		253 753	254				
11. uve Carrières-sur-seine : CARRIERES SUR SEINE (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sur seine)	Alimentation d'un réseau de chaleur équivalent à la consommation en chauffage de 3 500 logements, réseau de chaleur. 1 x 28 tonnes / heure de vapeur 1 x 18 tonnes / heure de vapeur surchauffées à 20 bars	164 536	165	36 311	36	2 269	
12. uve d'Agen : SOGAD (Sud Ouest, Lot et Garonne, AGEN)	Réseau de chaleur. Chaudière 1 x 8,2 tonnes / heure vapeur. Vapeur livrée sur réseau industriel Équivalent de 1 600 foyers chauffés	62 039	62	26 384	26	1 649	
13. uve d'Angers : GEVAL (Usine d'ANGERS)	Réseau eau surchauffée – Logements	135 591	136	55 394	55	3 462	
14. uve d'Aurillac : RONAVAL (Usine d'AURILLAC)	Réseau Eau chaude – Hôpital	8 237	8	7 098	7	444	
15. uve d'Avignon : VEDENE (Méditerranée, Vaucluse, Avignon)		275 634	276				
16. uve d'Haguenau :SCHWEIGHOUSE (Nord Est, Bas Rhin, Haguenau)	Réseau de chaleur : production de vapeur et d'eau chaude pour une papeterie. Cogénération avec production d'électricité, de vapeur et de chauffage	164 085	164	62 629	63	3 914	
17. uve d'Orléans : ORVADE (Usine de SARAN)		180 515	181				

18. uve d'Ouarville : VALORYELE OUARVILLE (Ile-de-France, Eure et Loire, Ouarville)		240 002	240				
19. uve de Bayet : RONAVAL (Usine de BAYET)	Réseau vapeur – Industriel	124 646	125	75 785	76	4 737	
20. uve de Bellegarde-sur-valserine : SET FAUCIGNY GENEVOIS (Centre Est, Ain, Bellegarde)	2 chaudières de récupération de chaleur permettant de produire chacune en moyenne 27 tonnes / heure de vapeur surchauffée à 40 bars et 385 °C	248 772	249				
21. uve de Besançon : SNC BIVAL (Centre Est, Doubs, Besançon)	Réseau de chaleur : ville de Besançon	50 000	50				
22. uve de Bessieres : ECONOTRE (Sud Ouest, Haute Garonne, Bessières)		339 260	339				
23. uve de Blois : ARCANTE (Centre Ouest, Loir-et-Cher, Blois)	alimentation d'un réseau de chaleur	208 853	209	16 997	17	1 062	
24. uve de Bordeaux Begles : ASTRIA (Sud Ouest, Gironde, Bègles)		517 132	517				
25. uve de Bordeaux Cenon : CENON (Sud Ouest, Gironde, Cenon)		198 264	198	92 781	93	5 799	
26. uve de Bourogne : BOUROGNE BELFORT (Territoire de Belfort)							
27. uve de Brest : GEVAL (Usine de BREST)	Réseau eau surchauffée – Logements	251 783	252	101 779	102	6 361	
28. uve de Briec de l'Odet : GEVAL (Usine de BRIEC)		104 139	104				
29. uve de Brive la Gaillarde : Brive Saint Pantaleon de larche (Région Limousin)	Production de vapeur 15 bars 200°C (chaleur seule), envoyée à un industriel (Blédina)	201 300	201	51 800	52	3 238	
30. uve de Calce : CALCE (Usine de Perpignan)		457 924	458				
31. uve de Carhaix : CARHAIX (Centre Ouest, Finistère, Carhaix)		50 922	51				
32. uve de Chambéry							
33. uve de Chartres : ORISANE (Centre Ouest, Eure et Loire, CHARTRES)		284 968	285				

34. uve de Chaumont : SHMVD (Usine de CHAUMONT)		161 747	162				
35. uve de Chavanod : ANNECY (Usine d'Annecy)							
36. uve de Colmar : Colmar (Usine de COLMAR)		1	1	1			
37. uve de Concarneau : GEVAL (Usine de CONCARNEAU)	Réseau vapeur – Industriel	136 292	136	12 102	12	756	
38. uve de Créteil : C.I.E Creteil (Ile-de-France, Val de Marne, Créteil)		515 760	516	Production thermique livrée sur le réseau de chauffage de créteil			
39. uve de Dieppe : DIEPPE (Région Normandie- Dieppe-Rouxmesnil Bouteilles)							
40. uve de Dijon : DIJON (Usine d'Incinération de la Communauté d'Agglomération Dijonnaise)							
41. uve de Fort-de-France : MARTINQUAISE DE VALORISATION (Usine de FORT de FRANCE)		243 282	243				
42. uve de Fourchambault : SONIRVAL (Usine de NEVERS)		83 085	83				
43. uve de Gien : GIEN (Loiret, Gien)		49 162	49				
44. uve de Guichainville : Usine d'EVREUX (sud de l'Eure)		200 309	200				
45. uve de la Rochelle : SETRAD (Usine de LA ROCHELLE)	Réseau vapeur + eau 105°// Rhodia + Logements	107 671	108	50 314	50	3 145	
46. uve de Labeuvriere : La Beuvrière (Pas de Calais)		1	1	1	1		
47. uve de Lasse : LASSE - SALAMANDRE (LASSE)		182 656	183				
48. uve de Limoges : STVL (Usine de LIMOGES)	Réseau de chaleur	158 126	158	33 790	34	2 112	
49. uve de Lons le Saunier : JURATROM Lons le Saunier (Centre Est, Jura, Lons le saunier)	Réseau de chaleur	73 999	74	21 792	22	1 362	
50. uve de Ludres (nancy) : NANCY ENERGIE (Usine de LUDRES)	Réseau Eau surchauffée-Logements	248 410	248	81 313	81	5 082	

51. uve de Lunel-viel : OCREAL (Méditerranée, Hérault, Lunel Viel)		280 639	281				
52. uve de Marignier : RONAVAL (Usine de MARIGNIER CLUSES)		7 864	8				
53. uve de Montauban : MONTAUBAN (Sud Ouest, Tarn et Garonne, Montauban)	réseau de chaleur (abattoir, DDE, maison de retraite...) Production thermique 22 000 MWh / an, équivalent de 1 400 foyers chauffés• Chaleur livrée sur un réseau de chaleur urbain Abattoir Maison de retraite Centre hospitalier Collège Saint-Théodard DDE I	48 212	48	21 697	22	1 356	
54. uve de Montbéliard : MONTVALOR (Usine de MONTBELIARD)	Réseau vapeur - Logements	72 359	72	38 722	39	2 420	
55. uve de Mourenx : Lacq Mourenx (Usine de Lacq Mourenx)							
56. uve de Mulhouse : SAUSHEIM/UIRU de Mulhouse (Sausheim, Nord-Est, Haut Rhin)	Réseau vapeur Chauffage Urbain	178 712	179	71 341	71	4 459	
57. uve de Nantes Arc en Ciel : ARC EN CIEL (Usine de NANTES)	Réseau vapeur - Industriel	170 402	170	50 167	50	3 135	
58. uve de Nantes Valorena : VALORENA (Centre Ouest, Loire Atlantique, Nantes)	réseau de chaleur : 20 km desservant tout l'Est nantais. Production thermique 136 000 MWh / an, production d'eau surchauffée à 29 bars, 175 °C • Réseau de chaleur : Réseau urbain de 22 km desservant 16 000 équivalent logements (cité des Congrès, piscin	250 048	250				
59. uve de Nice : SONITHERM (Usine de NICE)	Réseau en vapeur - Logements + Industries	603 994	604	92 797	93	5 800	

60. uve de Nimes : EVOLIA (Usine de NIMES)		215 737	216				
61. uve de Passy : SET MONT BLANC, Passy (Centre Est, Haute Savoie, Passy)		81 680	82				
62. uve de Pau : PAU (Sud Ouest, Pyrénées atlantique, Lescar)		136 889	137				
63. uve de Pithiviers : PITHIVIERS (Région Centre)		11 728	12	19 990	20	1 249	
64. uve de Planguenoual : LAMBALLE (Centre Ouest, Cotes d'Armor, Planguenoual)		65 172	65				
65. uve de Pluzunet : VEOLIA PROPRETE VAL D'ARMOR (Usine de PLUZUNET)	Réseau eau chaude - Serriste	6 974	7				
66. uve DE POITIERS : SETRAD (Usine de POITIERS)	Réseau eau surchauffée 180° - Logements	74 915	75	56 127	56	3 508	
67. uve de Pontarlier : PONTARLIER (Centre Est, Doubs, Pontarlier)	Réseau de chaleur	69 290	69	30 980	31	1 936	
68. uve de Pontenx-les-forges : PONTENX (Landes, Pontenx les Forges)		87 039	87				
69. uve de Pontivy : PONTIVY (Morbihan, Pontivy)	Vente de vapeur à France GRAS et à SLP	52 277	52	44 538	45	2 784	Vente de vapeur à France GRAS et à SLP
70. uve de Pontmain : CVED de Pontmain - SMECO (Centre Ouest, Mayenne, Pontmain)	vente de vapeur à un industriel (SOFIVO)	105 367	105	80 556	81	5 035	vente de vapeur à un industriel (SOFIVO)
71. uve de Rambervillers : SOVVAD, RAMBERVILLIERS (Nord Est, Vosges)		162 282	162				
72. uve de Reims : REMOVAL (Usine de Reims)	Réseau Eau surchauffée - Logements	126 919	127	61 521	62	3 845	
73. uve de Rennes : SOBREC (Usine de RENNES)	Réseau eau surchauffée + eau BT - Logements	242 390	242	80 882	81	5 055	
74. uve de Rouen : SNVE-VESTA (Usine de ROUEN)		646 244	646				
75. uve de Rozières d'Egletons : CORREZE INCINERATION (Sud Ouest, Corrèze, Rosiers d'Egletons)		71 643	72				
76. uve de Saint Barthelemy : Saint Barthélémy (Usine de Saint Barthélémy)	Vente de vapeur (12 bars)	23 356	23	18 732	19	1 171	Vente de vapeur (12 bars)

77. uve de Saint Benoit la Foret : CHINON (Région Touraine - Chinon - St benoit la Foret)	Production de vapeur 12,5 bars (chaleur seule), envoyée au C.H.R	57 700	58	7 045	7	440	
78. uve de Saint Jean de Folleville: OREADE (Centre Ouest, Seine Maritime, Le Havre)		380 365	380				
79. uve de Salaise-sur-sanne							
80. uve de Sens : VALEST (Usine de SENS)		36 988	37	17432	17	1 090	
81. uve de Sete : SETOM (Usine de SETE)	Réseau vapeur – Industriel	61 724	62	23 428	23	1 464	
82. uve de Strasbourg : STRASBOURG (Bas-Rhin, Strasbourg)	réseau de vapeur à 13,5 bar, 280°C	751 596	752	186 182	186	11 636	
83. uve de Taden : IDEX FASSA ENVIRONNEMENT (Ile et Vilaine - Côte d'Armor)		212900	213				
84. uve de Thonon-les-bains : THONON LES BAINS (Rhônes Alpes)	Réseau vapeur – Industriel- Vente de vapeur à des industriels	88 550	89	53 050	53	3 316	
85. uve de Toulon : CCUAT Toulon (Méditerranée, Var, Toulon)	Réseau de chaleur : eau chaude et chauffage pour l'équivalent de 1 500 logements	524 588	525	11 963	12	748	
86. uve de Toulouse : SETMI (Usine de TOULOUSE)	Réseau eau surchauffée + vapeur - Logements + Industries	531 044	531	165 373	165	10 336	
87. uve de Tronche (la) : ATHANOR (Agglomération GRENOBLOISE)		347 693	348	300 971	301	18 811	
88. uve de Tronville en Barrois : MEUSE ENERGIE (Tronville en Barrois, Meuse, Nord Est)	réseau de vapeur saturée destinée à l'industrie	55 001	55	7 364	7	460	
89. uve de Vernou-en-sologne : Vernou en Sologne (Loir et Cher)							
90. uve de Villefranche sur Saone : VILLEFRANCHE SUR SAÔNE (Rhône-Alpes, Villefranche sur Saône)	réseau de chaleur à 16 bars	204 818	205	25 645	26	1 603	
91. uve de Villers Saint Paul : ESIANE (Ile-de-France, Villers Saint Paul, Oise)	Réseau de chaleur	362 184	362	13 890	14	868	

92. uve de Vitre : VITRE (Centre Ouest, Ile et Vilaine, Vitré)	réseau de chaleur : 2 réseaux fournissant 2 sociétés	36 674	37	23 805	24	1 488	
93. uve du Mans 1 : SEC (Usine du MANS)	Réseau eau surchauffée – Logements	266 120	266	24 043	24	1 503	
94. uve ECOPOLE D'ECHILLAIS : SETRAD (Usine de ROCHEFORT)	Réseau eau surchauffée – Logements	84 070	84	20 817	21	1 301	
95. uve Fos-sur-mer							
96. uve Guerville : VALENE (Usine de GUERVILLE)		131 983	132				
97. uve Issy-les-moulineaux – Isseane : Isséane (Hauts de Seine, Issy les Moulineaux)	1 réseau de chaleur vers la Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain (CPCU) absorbant 160 t/h de vapeur	185 000	185	115 000	115	7 188	
98. uve Ivry-sur-seine : IVRY (Ivry sur Seine, Val de Marne)	Réseau de chaleur	604 638	605	853 189	853	53 324	
99. uve la Veuve : AUREADE (Usine de CHALONS sur MARNE)		249 220	249				
100. uve Massy 1 : Massy (Usine de MASSY-Essonne)							
101. uve Monthyon : SOMOVAL (Usine de MONTHYON)		220 739	221				
102. uve Noidans le Ferroux							
103. uve Rillieux la Pape : VALORLY, Lyon Nord (Centre Est, Rhone, LYON)	Réseau de chaleur : alimentation de la ville de Rillieux la pape	251 158	251	92 911	93	5 807	
104. uve Rungis : SOTRIS (Usine de RUNGIS)	Réseau Eau Surchauffée – Industriels	238 920	239	125 735	126	7 858	
105. uve Saint-ouen : SAINT OUEN (Seine Saint Denis, Saint Ouen)	réseau de chaleur 200 t/h de vapeur vers le chauffage urbain de CPCU	450 985	451	1 172 053	1 172	73 253	
106. uve Saint-ouen-l'aumone : CGECP AUROR'ENVIRONNEMENT (Usine de CERGY PONTOISE)	Réseau Eau Surchauffée - Chauffage Urbain	346 248	346	170 162	170	10 635	
107. uve Saint-thibault-les-vignes : ST THIBAUT DES VIGNES (Ile-de-France, Seine et Marne, Lagny)		302 650	303				
108. uve Sarcelles : SAREN (Val d'Oise)	Réseau vapeur Chauffage Urbain	178 712	179	71 341	71	4 459	

109. uve Thiverval Grignon : CVD THIVERVAL-GRIGNON (Ile de France / Plaisir / Thiverval-Grignon)	réseau de chauffage urbain pour chaudières n°1 et n°2	165 564	166	66 216	66	4 139	
110. uve Vaux le Penil : GENERIS (Usine de VAUX le PENIL)							
111. uve Vert le Grand : Vert le Grand (Essonne)							
112. uve Villejust 1 : VILLEJUST (Ile de France Essonne Villejust)	Chaleur seule	31 587	32				

Type de valorisation							
Thermique							
	Réseau de chaleur quelconque	P° Etherm (MWh/an)	P° Etherm (kWh/an)	Vente énergie thermique quelconque	Vente Etherm (kWh/an)	Nombre de foyers en chauffage	Vente Vapeur
MAX	1	751 596	752	1 172 053	1 172	73 253	-
MIN	1	1	1	1	1	440	-
Moyenne	1,0	202154,9	202,2	91280,4	93,0	6027,9	-
							-
Somme	1,0	19811182,0	19813,2	5111702,0	5113,7	319481,2	-

UVE	Résultats obtenus avec les caractéristiques de la chaleur produite			Caractéristiques électricité produite par l'UVE		Hypothèses sur la base de 35%	Type de valorisation		
	Puissance électrique réelle en MW	Puissance réelle à évacuer en MW	Rendement réel	P_turbine MW	Puissance réelle à évacuer en MW		P° Eélec (MWh/an)	Vente Eélec (MWh/an)	Vente Eélec (kWh/an)
1. Centre de Valorisation énergétique de Maubeuge : VALNOR (Usine de MAUBEUGE)	6,337	18,944	0,335	7	21	20	37 320	30 634	31
2. Centre de Valorisation énergétique de Saint Saulve : VALENCIENNES (Nord, Saint Saulve)				12		34	41 204	31 984	32
3. Cve Antarés : CVE ANTARES (Usine de HALLUIN)	29,563	85,988	0,344	32	93	91	185 798	147 995	148
4. Cve de Douchy-les-mines : DOUCHY LES MINES (Nord, Douchy les Mines)	5,823	17,004	0,342	6	18	17	42 023	36 140	36
5. Cve Dunkerque				x			48000	35000	35
6. Incinération Sirac Colombelles : SIRAC (Centre Ouest, Calvados, Colombelles)									
7. Traitement des Dasri Par Incinération Bassens : PROCINER (Usine de BASSENS)									
8. uve Argenteuil : ARGENTEUIL (Ile-de-France, Val-d'Oise)	17,431	55,306	0,315	15,6	49	45	89 400	72 348	72
9. uve Bourgoin Jailleu : RONAVAL (Usine de BOURGOIN JALLIEU)	4,289	15,574	0,275	0,9	3	3	10 260	6 109	6
10. uve Carrières-sous-poissy : AZALYS (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sous Poissy)	8,924	26,898	0,332	9,3	28	27	56 783	40 294	40
11. uve Carrières-sur-seine : CARRIERES SUR SEINE (Ile-de-France, Yvelines, Carrières sur seine)	6,973	24,627	0,283	3	11	9	12 082	6 166	6
12. uve d'Agen : SOGAD (Sud Ouest, Lot et Garonne, AGEN)									
13. uve d'Angers : GEVAL (Usine d'ANGERS)									
14. uve d'Aurillac : RONAVAL (Usine d'AURILLAC)									
15. uve d'Avignon : VEDENE (Méditerranée, Vaucluse, Avignon)	8,875	26,905	0,330	8,5	26	24	61 542	43 164	43
16. uve d'Hagenau : SCHWEIGHOUSE (Nord Est, Bas Rhin, Hagenau)	4,109	13,377	0,307	3	10	9	16 318	10 991	11
17. uve d'Orléans : ORVADE (Usine de SARAN)	6,582	19,313	0,341	6,77	20	19	28 500	22 764	23

18. uve d'Ouarville : VALORYELE OUARVILLE (Ile-de-France, Eure et Loire, Ouarville)	10,769	30,939	0,348	10	29	29	35 460	27 535	28
19. uve de Bayet : RONAVAL (Usine de BAYET)									
20. uve de Bellegarde-sur-valserine : SET FAUCIGNY GENEVOIS (Centre Est, Ain, Bellegarde)	10,128	29,412	0,344	10,9	32	31	55 492	41 113	41
21. uve de Besançon : SNC BIVAL (Centre Est, Doubs, Besançon)				0,75		2	5 000		
22. uve de Bessières : ECONOTRE (Sud Ouest, Haute Garonne, Bessières)	15,448	44,468	0,347	17	49	49	47 126	38 839	39
23. uve de Blois : ARCANTE (Centre Ouest, Loir-et-Cher, Blois)	6,535	19,544	0,334	6	18	17	48 502	38 453	38
24. uve de Bordeaux Begles : ASTRIA (Sud Ouest, Gironde, Bègles)	21,415	61,643	0,347	22,3	64	64	124 260	98 452	98
25. uve de Bordeaux Cenon : CENON (Sud Ouest, Gironde, Cenon)							6 309		
26. uve de Bourogne : BOUROGNE BELFORT (Territoire de Belfort)									
27. uve de Brest : GEVAL (Usine de BREST)	7,124	23,099	0,308	3,28	11	9	22 312	12 655	13
28. uve de Briec de l'Odet : GEVAL (Usine de BRIEC)	3,274	9,963	0,329	3,5	11	10	23 224	17 388	17
29. uve de Brive la Gaillarde : Brive Saint Pantaleon de larche (Région Limousin)									
30. uve de Calce : CALCE (Usine de Perpignan)	13,767	40,164	0,343	19	55	54	86 182	73 645	74
31. uve de Carhaix : CARHAIX (Centre Ouest, Finistère, Carhaix)	1,562	4,694	0,333	1,53	5	4	9 451	7 106	7
32. uve de Chambéry									
33. uve de Chartres : ORISANE (Centre Ouest, Eure et Loire, CHARTRES)	8,337	25,232	0,330	8,5	26	24	68 060	59 878	60
34. uve de Chaumont : SHMVD (Usine de CHAUMONT)	4,207	13,282	0,317	4,2	13	12	29 034	21 571	22
35. uve de Chavanod : ANNECY (Usine d'Annecy)									
36. uve de Colmar : Colmar (Usine de COLMAR)									
37. uve de Concarneau : GEVAL (Usine de CONCARNEAU)							144 956		
38. uve de Créteil : C.I.E Creteil (Ile-de-France, Val de Marne, Créteil)	17,707	53,418	0,331	19,2	58	55	136 435	105 065	105
39. uve de Dieppe : DIEPPE (Région Normandie- Dieppe-Rouxmesnil Bouteilles)									

40. uve de Dijon : DIJON (Usine d'Incinération de la Communauté d'Agglomération Dijonnaise)							1	1	1
41. uve de Fort-de-France : MARTINQUAISE DE VALORISATION (Usine de FORT de FRANCE)	3,666	10,626	0,345	7,2	21	21	43 713	31 598	32
42. uve de Fourchambault : SONIRVAL (Usine de NEVERS)	3,642	10,671	0,341	3,4	10	10	15 661	12 314	12
43. uve de Gien : GIEN (Loiret, Gien)	5,095	15,24	0,334	5,5	16	16	6 830	1 916	2
44. uve de Guichainville : Usine d'EVREUX (sud de l'Eure)	6,82	19,729	0,346	7	20	20	47 315	37 112	37
45. uve de la Rochelle : SETRAD (Usine de LA ROCHELLE)									
46. uve de Labeuvriere : La Beuvrière (Pas de Calais)							1	1	1
47. uve de Lasse : LASSE - SALAMANDRE (LASSE)	9,184	24,676	0,372	9,38	25	27	55 934	46 005	46
48. uve de Limoges : STVL (Usine de LIMOGES)	5,309	18,181	0,292	1,5	5	4	10 403	2 772	3
49. uve de Lons le Saunier : JURATROM Lons le Saunier (Centre Est, Jura, Lons le saunier)				1		3	7 940	4 596	5
50. uve de Ludres (nancy) : NANCY ENERGIE (Usine de LUDRES)	6,352	19,604	0,324	5,8	18	17	29 844	19 497	19
51. uve de Lunel-viel : OCREAL (Méditerranée, Hérault, Lunel Viel)	6,909	19,764	0,350	10	29	29	68 228	56 752	57
52. uve de Marignier : RONAVAl (Usine de MARGNIER CLUSES)	2,274	7,494	0,303	1,4	5	4	8 379	5 447	5
53. uve de Montauban : MONTAUBAN (Sud Ouest, Tarn et Garonne, Montauban)									
54. uve de Montbeliard : MONTVALOR (Usine de MONTBELIARD)									
55. uve de Mourenx : Lacq Mourenx (Usine de Lacq Mourenx)									
56. uve de Mulhouse : SAUSHEIM/UIRU de Mulhouse (Sausheim, Nord-Est, Haut Rhin)	6,491	20,9	0,311	12	39	34	13 720	5 034	5
57. uve de Nantes Arc en Ciel : ARC EN CIEL (Usine de NANTES)	6,148	19,544	0,315	6,29	20	18	18 837	6 245	6
58. uve de Nantes Valorena : VALORENA (Centre Ouest, Loire Atlantique, Nantes)									
59. uve de Nice : SONITHERM (Usine de NICE)	18,042	58,972	0,306	14	46	40	22 870	27 564	28
60. uve de Nimes : EVOLIA (Usine de NIMES)	9,343	26,281	0,356	9,5	27	27	56 857	50 146	50

61. uve de Passy : SET MONT BLANC, Passy (Centre Est, Haute Savoie, Passy)	6,154	19,099	0,322	3,6	11	10	15 959	12 624	13
62. uve de Pau : PAU (Sud Ouest, Pyrénées atlantique, Lescar)	5,388	15,629	0,345	5,5	16	16	28 565	20 617	21
63. uve de Pithiviers : PITHIVIERS (Région Centre)									
64. uve de Planguenoual : LAMBALLE (Centre Ouest, Cotes d'Armor, Planguenoual)	1,866	5,723	0,326	2	6	6	12 528	12 528	13
65. uve de Pluzunet : VEOLIA PROPRETE VAL D'ARMOR (Usine de PLUZUNET)	8,431	26,085	0,32321257	3,6	11,1381805	10		4 548	5
66. uve DE POITIERS : SETRAD (Usine de POITIERS)									
67. uve de Pontarlier : PONTARLIER (Centre Est, Doubs, Pontarlier)									
68. uve de Pontenx-les-forges : PONTENX (Landes, Pontenx les Forges)	2,188	6,813	0,32115074	2,4	7,47312614	7	14 812	14 812	15
69. uve de Pontivy : PONTIVY (Morbihan, Pontivy)									
70. uve de Pontmain : CVED de Pontmain - SMECO (Centre Ouest, Mayenne, Pontmain)									
71. uve de Rambervillers : SOVVAD, RAMBERVILLIERS (Nord Est, Vosges)	5,352	15,947	0,33561171	6	17,8778027	17	155 439	25 952	26
72. uve de Reims : REMIVAL (Usine de Reims)	5,021	16,73	0,30011955	0,6	1,99920335	2	3 504		
73. uve de Rennes : SOBREC (Usine de RENNES)	8,362	28,225	0,29626218	7,8	26,3280316	22	27 493	12 994	13
74. uve de Rouen : SNVE-VESTA (Usine de ROUEN)	28,36	83,873	0,33813027	32	94,6380818	91	174 964	134 510	135
75. uve de Roziers d'Egletons : CORREZE INCINERATION (Sud Ouest, Corrèze, Rosiers d'Egletons)	2,517	7,224	0,34842193	4,5	12,9153754	13	13 891	9 933	10
76. uve de Saint Barthelemy : Saint Barthélémy (Usine de Saint Barthélémy)									
77. uve de Saint Benoit la Foret : CHINON (Région Touraine - Chinon - St benoit la Foret)									
78. uve de Saint Jean de Folleville : OREADE (Centre Ouest, Seine Maritime, Le Havre)	15,965	45,246	0,35284887	17	48,1792671	49	52 283	52 283	52
79. uve de Salaise-sur-sanne									
80. uve de Sens : VALEST (Usine de SENS)									
81. uve de Sete : SETOM (Usine de SETE)									
82. uve de Strasbourg : STRASBOURG (Bas-Rhin, Strasbourg)	26,107	82,355	0,31700565	22	69,3993948	63	80 219	55 292	55

83. uve de Taden : IDEX FASSA ENVIRONNEMENT (Ile et Vilaine - Côte d'Armor)	6,436	19,448	0,33093377	6,4	19,3392169	18	39 341	30 920	31
84. uve de Thonon-les-bains : THONON LES BAINS (Rhônes Alpes)									
85. uve de Toulon : CCUAT Toulon (Méditerranée, Var, Toulon)	14,014	40,568	0,34544469	19,9	57,6069074	57	93 442	74 052	74
86. uve de Toulouse : SETMI (Usine de TOULOUSE)	15,036	56,446	0,26637849	9	33,7865124	26	34 762	13 345	13
87. uve de Tronche (la) : ATHANOR (Agglomération GRENOBLOISE)							33 602	16 814	17
88. uve de Tronville en Barrois : MEUSE ENERGIE (Tronville en Barrois, Meuse, Nord Est)									
89. uve de Vernou-en-sologne : Vernou en Sologne (Loir et Cher)									
90. uve de Villefranche sur Saone : VILLEFRANCHE SUR SAÔNE (Rhône-Alpes, Villefranche sur Saône)	5,912	17,908	0,33013178	5,6	16,9629229	16	28 265	21 391	21
91. uve de Villers Saint Paul : ESIANE (Ile-de-France, Villers Saint Paul, Oise)	13,405	37,968	0,35306047	14,3	40,5029765	41	32 083	27 811	28
92. uve de Vitre : VITRE (Centre Ouest, Ile et Vilaine, Vitré)	1,231	3,529	0,34882403	0,16	0,458684	0,45714286	1 498		
93. uve du Mans 1 : SEC (Usine du MANS)	10,286	33,351	0,30841654	11,7	37,9357087	33	65 694	54 344	54
94. uve ECOPOLE D'ECHILLAIS : SETRAD (Usine de ROCHEFORT)									
95. uve Fos-sur-mer									
96. uve Guerville : VALENE (Usine de GUERVILLE)	6,033	17,369	0,34734297	7,8	22,4561909	22	22 299	11 428	11
97. uve Issy-les-moulineaux - Isseane : Isséane (Hauts de Seine, Issy les Moulineaux)				25		71	20 000	1 100	1
98. uve Ivry-sur-seine : IVRY (Ivry sur Seine, Val de Marne)							132 042	78 781	79
99. uve la Veuve : AUREADE (Usine de CHALONS sur MARNE)	9,293	24,973	0,37212189	63	169,299365	180	47 265	39 521	40
100. uve Massy 1 : Massy (Usine de MASSY-Essonne)				8,82		25			
101. uve Monthyon : SOMOVAL (Usine de MONTHYON)	10,726	31,095	0,34494292	10,4	30,1499161	30	52 427	36 670	37
102. uve Noidans le Ferroux									
103. uve Rillieux la Pape : VALORLY, Lyon Nord (Centre Est, Rhone, LYON)	8,759	27,103	0,32317456	8	24,754424	23	36 216	20 080	20
104. uve Rungis : SOTRIS (Usine de RUNGIS)									

105. uve Saint-ouen : SAINT OUEN (Seine Saint Denis, Saint Ouen)	37,132	114,945	0,32304145	10	30,9557794	29	60 949	9 676	10
106. uve Saint-ouen-l'aumone : CGECP AUROR'ENVIRONNEMENT (Usine de CERGY PONTOISE)	15,355	47,398	0,32395882	7,5	23,1510908	21	34 841	23 102	23
107. uve Saint-thibault-les-vignes : ST THIBAUT DES VIGNES (Ile-de-France, Seine et Marne, Lagny)	10,348	35,9	0,28824513	11,5	39,8965984	33	70 151	58 467	58
108. uve Sarcelles : SAREN (Val d'Oise)	6,491	20,9	0,31057416	4,7	15,1332614	13	13 720	5 034	5
109. uve Thiverval Grignon : CVD THIVERVAL-GRIGNON (Ile de France / Plaisir / Thiverval-Grignon)	162,246	287,132	0,56505719	60	106,183943	171	704	22 994	23
110. uve Vaux le Penil : GENERIS (Usine de VAUX le PENIL)									
111. uve Vert le Grand : Vert le Grand (Essonne)									
112. uve Villejust 1 : VILLEJUST (Ile de France Essonne Villejust)									

	Résultats obtenus avec les caractéristiques de la chaleur produite			Caractéristiques électricité produite par		Hypthèses sur la base	Type de valorisation		
	Puissance électrique réelle en MW	Puissance réelle à évacuer en MW	Rendement réel	P_turbine MW	Puissance réelle à évacuer en MW		Electrique		
P° Eélec (MWh/an)						Vente Eélec (MWh/an)	Vente Eélec (kWh/an)		
MAX	162	287	1	63	169	180	185 798	147 995	148
MIN	1	4	0	0	0	0	1	1	1
Moyenne	12,0	33,3	0,3	10,5	30,5	30,0	44883,9	32375,5	32,4
Somme	756,9	2100,5	20,9	715,0	1919,9	2042,8	3276524,0	2233912,0	2235,9

ANNEXE 11

ANNEXE 11

Fiche : Degrés Bleu

La Lyonnaise des Eaux propose une solution baptisée « Degrés Bleus » qui permet de récupérer la chaleur des eaux usées pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments.

La gamme Degrés Bleus comprend deux produits :

- Degrés Bleus® Chaleur & Rafraîchissement vous permet de réaliser des opérations avec pompe à chaleur à partir des réseaux d'assainissement pour chauffer et/ou rafraîchir vos bâtiments collectifs.
- Degrés Bleus® Eau Chaude permet de récupérer la chaleur des eaux usées pour préchauffer l'eau de vos douches et de vos bassins (dans vos piscines, etc.).

Degrés Bleus permet de diminuer durablement les dépenses énergétiques en valorisant les ressources locales d'énergie renouvelable, avec une seule installation pour le chauffage et le rafraîchissement.

Le système de récupération de chaleur des eaux usées permet de récupérer les calories dans les canalisations et de les transférer aux bâtiments via une pompe à chaleur.

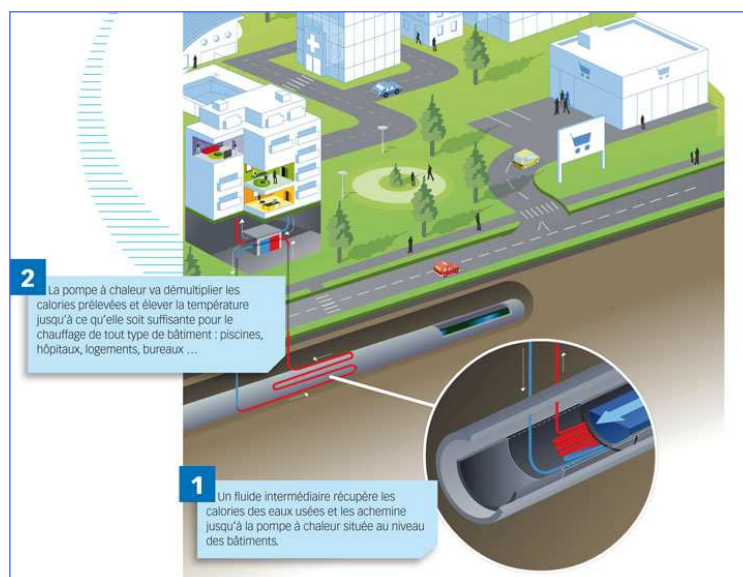
Cette technologie associe un échangeur de chaleur avec une pompe à chaleur et permet de chauffer plusieurs milliers de mètres carrés.

• Origines du projet Degrés Bleus ?

Le procédé repose sur un brevet d'une dizaine d'années déposé par la société Suisse Rabtherm qui. A l'époque, une vingtaine de réalisations ont été menées à Bâle, Zurich ou dans le canton de Vaud. Degrés Bleus a été lancé en France fin 2007 ; il s'agissait de réveiller une technologie qui combine écologie et économie au moment où le prix du brut grimpait.

• Principe

Fonctionnant sur le même principe qu'une vmc double flux pour l'air, un échangeur thermique permet de récupérer les calories dans les canalisations des réseaux d'assainissement et de les transférer grâce à un circuit de canalisation en boucle fermée aux bâtiments via une pompe à chaleur (PAC) qui va permettre d'élever la température d'eau à un niveau exploitable (entre 50 et 70° C). Elle s'achemine ensuite vers une chaufferie centrale qui alimente un réseau de plusieurs bâtiments.



ANNEXE 11

Le système est réversible, il permet de rafraîchir les bâtiments (maisons de retraite, hôpitaux...) en été lorsque la température des eaux usées est inférieure à la température intérieure des bâtiments.

Le système comprend aussi un instrument permettant le suivi des performances de tous les appareils de la chaîne : la PAC, l'échangeur, le débit, la température extérieure et la température intérieure.

- **Conditions pour une bonne utilisation**

- Le débit minimum doit être de 15 litres par seconde, ce qui correspond à la production de 8000 à 10 000 habitants.
- Les installations doivent évidemment être installées en tenant compte des conditions du lieu: température des eaux, débit.
- Il faut aussi disposer d'une utilisation assez proche, car l'eau réchauffée « voyage » mal car elle perd de son énergie. Les installations raccordées ne doivent pas être éloignées de plus de 300 mètres. Il peut s'agir de chauffage ou de production d'eau chaude sanitaire.
- Il faut au moins installer une puissance de 150 kilowatt, soit les besoins en eau chaude de 50 appartements, pour réaliser un équipement dont le temps de retour sur investissement est réaliste.
- Il faut aussi veiller à ne pas trop abaisser la température des eaux usées qui arrivent dans les stations d'épuration.

De manière très prudente la Lyonnaise des Eaux estime que le potentiel pour une agglomération de 300 000 habitants se situe entre 5 et 10 mégawatt. L'économie financière est intéressante, comme l'économie d'énergie fossile et le bilan carbone. Le retour sur investissement est assez rapide et peut être réduit par l'apport de subventions. Degrés Bleus s'inscrit dans les objectifs de l'Union Européenne d'une réduction de la consommation d'énergie d'ici à 2020.

- **Centre aquatique Levallois**

La Ville de Levallois est la première collectivité de France à s'équiper de Degrés Bleus, système de récupération de chaleur des eaux usées, proposé par Lyonnaise des Eaux, filiale de Suez Environnement. Ce système innovant et écologique permettra de maintenir en température l'eau des bassins du nouveau Centre Aquatique de la ville.

La chaleur des eaux usées (eaux des salles de bains, des machines à laver...) est récupérée grâce à un échangeur de chaleur de 80 mètres de long installé à la base du réseau d'eaux usées jouxtant le Centre Aquatique. Les calories sont alors transportées grâce à un fluide caloporteur jusqu'à une pompe à chaleur installée dans la chaufferie du Centre Aquatique. Les calories captées par le fluide caloporteur permettent de chauffer la piscine.

Grâce à Degrés Bleus, la ville de Levallois diminue de 24 % la consommation d'énergie et de 66% les émissions de gaz à effet de serre pour le maintien en température des bassins du Centre Aquatique. En cours d'installation, Degrés Bleus sera entretenu pour une durée de 10 ans par Lyonnaise des Eaux, en groupement avec les sociétés BPR Europe et BPR Technologies.

ANNEXE 11

o Suisse	
Winterthur (Suisse) La ville de Winterthur, 6e plus grande ville de Suisse (100 000 habitants) s'est engagée depuis plusieurs années dans une politique d'efficacité énergétique. Le recours aux énergies renouvelables est une priorité de la collectivité, notamment à travers tous les nouveaux projets de construction. Solutions Identification de la chaleur des eaux usées comme potentiel important d'énergie renouvelable. Choix technique d'installer les échangeurs de chaleur dans un by-pass de 78 m parallèle au collecteur des eaux usées. Cette mise en oeuvre permet de limiter l'impact du chantier et d'optimiser l'économie du projet*. Résultats Un ensemble de 400 appartements chauffés à partir du réseau d'assainissement. 12 % d'économies sur les coûts annuels par rapport à un chauffage au gaz conventionnel. 70 % du chauffage de l'eau et des locaux sont assurés par une pompe à chaleur, alimentée par la chaleur des eaux usées.	Zurich (Suisse) Chaque année, la ville de Zurich applique un plan de renouvellement des canalisations d'assainissement. Par ailleurs, le quartier de Wipkingen à Zurich est équipé d'un réseau de chauffage urbain. Solutions Équipement de 200 mètres d'échangeur de chaleur dans un collecteur inscrit dans le plan de renouvellement*. Récupération de 850 kW d'énergie thermique. Résultats Un ensemble de 940 appartements chauffés à partir du réseau d'assainissement. Économie annuelle en chauffage de 540 000 litres de fioul domestique de chauffage. Réduction des émissions de CO2 de 1 400 tonnes/an.
* Ces installations suisses ont été réalisées grâce à la solution technique Rabtherm® dont Lyonnaise des Eaux est le détenteur exclusif en France avec son service Degrés Bleus®.	

ANNEXE 12

ANNEXE 12

Fiche : STEP Stream

Chalon-sur-Saône

Une station d'épuration transformée en source de chaleur écologique avec Step Stream®

Contexte et problématique

Réhabilitation des bureaux de la station d'épuration (350 m²).

Volonté de remplacer la chaudière au fioul par une solution alimentée en énergie renouvelable avec pour objectifs la diminution des gaz à effets de serre et des coûts d'énergie.

Solution

Mise en place du procédé STEP Stream® : récupération d'une partie de la chaleur des effluents dépollués de la station d'épuration grâce à une pompe à chaleur.

Résultats

Satisfaction de 100 % des besoins en chauffage et rafraîchissement des bureaux de la station d'épuration.

Amélioration du Bilan Carbone®.

Baisse de la facture d'énergie.

Temps de retour sur investissement de 3 ans

ANNEXE 13

ANNEXE 13

Fiche : Biofluides Environnement

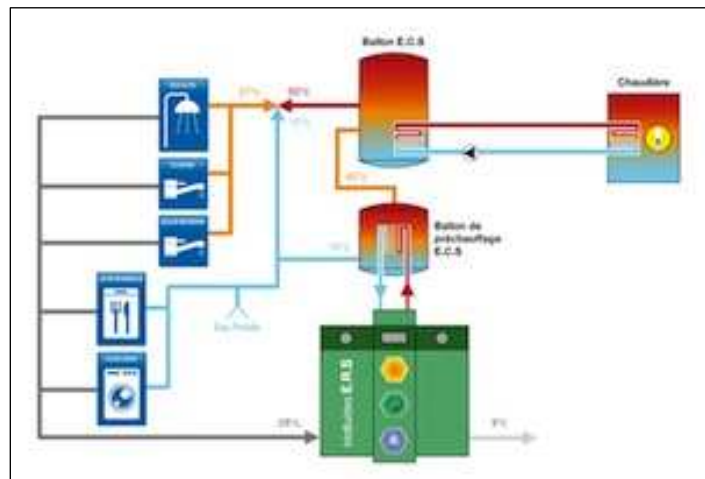
Créée en 2005, Biofluides Environnement compte 9 salariés. Son siège social se trouve à Courcouronnes dans le 91 et son chiffre d'affaires de 1,2 millions d'euros en 2008 est passé à 1,4 millions en 2009.



A l'instar de la technologie mise au point par Degrés Bleus, la PME française Biofluides Environnement a développé un nouveau système de récupération de la chaleur contenue dans les eaux usées. Très compact, celui-ci s'intègre directement dans les bâtiments résidentiels et industriels, dans le prolongement de l'écoulement des eaux usées.

La technologie proposée par Biofluides Environnement, l'Energy Recycling System (ERS), fonctionne selon le même principe, mais contrairement à Degrés Bleus, l'ERS ne va pas chercher les calories dans les égouts publics, mais directement dans les bâtiments, en prolongement de l'écoulement des eaux usées. Et donc sans toucher aux canalisations souterraines. Il offre ainsi un plus grand potentiel d'application, aussi bien dans le bâtiment neuf qu'existant. Mais aussi dans l'industrie qui produit beaucoup de rejets d'eau chaude non valorisée.

Echangeur, PAC et ballon de préchauffage



Le système ERS s'installe dans un local inférieur à 20 m² (pour une centaine de logements). Il comprend, outre un ballon de préchauffage d'eau chaude sanitaire classique, une cuve dotée d'un échangeur à forte inertie et faibles pertes, une pompe à chaleur à puissance variable et un ballon de stockage évaporateur. Les eaux usées des cuisines, des salles de bain, des lave-linge et lave-vaisselle sont ainsi acheminées vers l'échangeur de chaleur. Un système breveté de filtration automatique et d'auto-nettoyage de la cuve permet d'améliorer le rendement de l'échangeur.

ANNEXE 13

L'ensemble est revêtu d'un isolant thermique de 40 mm d'épaisseur à très faible coefficient de conductivité et protégé par une enveloppe en tôle d'acier inoxydable. L'ERS est conçu pour ne pas interrompre l'écoulement des eaux usées. Elles y entrent à une température moyenne de 28°C et ressortent à 9°C. Les calories récupérées sont ensuite stockées dans un ballon évaporateur puis dirigées vers la pompe à chaleur spécialement développée pour l'application. Celle-ci comprend trois éléments: un échangeur évaporateur, un compresseur et un circuit condenseur d'eau chaude. L'eau provenant du ballon de préchauffage passe, via le circuit condenseur de la PAC (dont le COP moyen est de 4,7) de 8°C à 45°C. Une chaudière se charge ensuite de la faire monter à 55°C. Cette chaleur recyclée peut alors alimenter des installations de chauffage, d'eau chaude sanitaire ou de traitement d'air. Précisons que le système est doté d'une régulation par automate programmable chargé d'optimiser la récupération de chaleur mais aussi d'assurer la sécurité. En option, une fonction de télémessures permet via une interface de consultation sécurisée un suivi en temps réel du fonctionnement. La première installation mise en service en France, dans un logement social collectif (36 logements), montre un COP global du système de 4,28. La production y est de l'ordre de 246 kW/h par jour pour les 36 logements, soit une économie de près de 50 % sur la facture de production d'eau chaude.

A ce jour, une quinzaine d'installations sont en cours et dix fois plus de projets à l'étude, pour tous les usages: hôpitaux, restaurant et même site industriel où la technologie trouve un intérêt pour valoriser les procédés à forte consommation d'eau chaude ou de vapeur à condensats non recyclés.

ANNEXE 14

ANNEXE 14

Fiche : La géothermie à partir des eaux usées

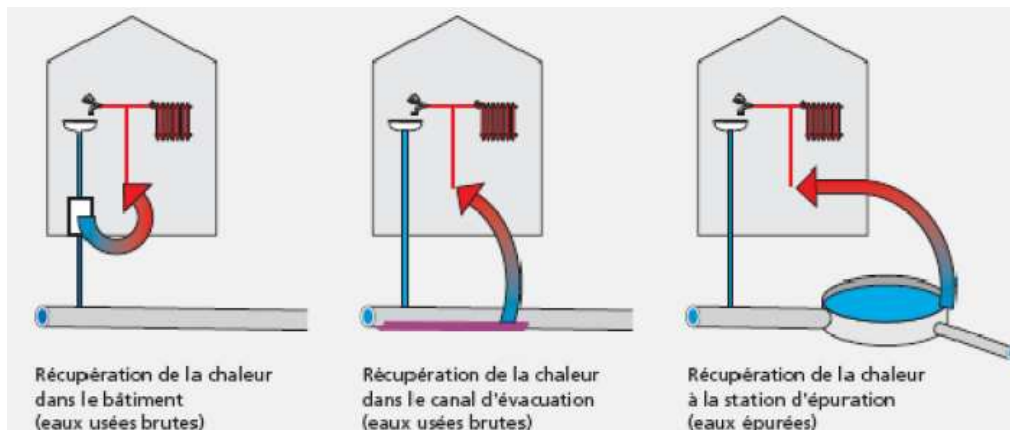
La température des eaux usées qui circulent dans les réseaux urbains est comprise entre 13 et 20°C. En hiver, elles sont donc nettement plus chaudes que l'air extérieur et la chaleur peut être ainsi récupérée. En été, cette différence de température peut par contre apporter un surcroît de fraîcheur.

Le système, mis au point par l'ingénieur zurichois Urs Studer, de la société Rabtherm, se compose d'un échangeur installé dans les canalisations, d'une pompe à chaleur et éventuellement d'un réseau de chaleur. Il connaît un développement déjà important en Suisse, en Allemagne, en Autriche et aux USA. Il a également séduit la fondation de Bill Gates et les organisateurs des 21e Jeux Olympiques d'hiver qui se dérouleront au Canada, à Vancouver et Whistler en 2010.

En France, l'entreprise Saunier et Associés souhaite pouvoir réaliser en 2008 de 5 à 10 projets. Cet objectif semble possible puisque l'investissement permet d'obtenir au moins 30% de baisse sur la facture de chauffage, et que le retour sur investissement est compris entre 2 et 10 ans, selon la configuration des canalisations, la durée d'utilisation et le montant des aides accordées.

Une étude du potentiel de récupération d'énergie thermique sur les réseaux d'assainissement de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur en France a été réalisée par ANTEA en partenariat avec PLANAIR.

Cette étude a révélée que les sites possibles de récupération d'énergie thermique sur les eaux usées sont les suivants :



La configuration des échangeurs de chaleur en sortie de bâtiments, STEP et autres est la suivante :

Echangeurs en sortie de STEP :
A plaques / Tubulaire



Echangeurs en sortie de bâtiments:



Echangeurs intégrés à des collecteurs neufs



Echangeurs rattachés sur des collecteurs existant:



ANNEXE 15

De quoi s'agit-il ?

Aujourd'hui la valorisation énergétique du biogaz produit dans des installations appartenant aux collectivités locales (Station d'épurations, Centre d'enfouissement technique...) via la production d'électricité et/ou de chaleur. Les déchets peuvent ensuite être réutilisés comme amendement organique en agriculture.

La production d'électricité à partir de biogaz est une solution très répandue en Europe. En Allemagne, par exemple, près de 4 000 installations (représentant environ 1 300 MWe) étaient en service en 2007.

Ce qu'apporte PREMIO

Dans une telle installation, le biogaz est produit en continu. L'objet de l'expérimentation est d'étudier en pratique la pertinence technico-économique de l'ajout d'une unité de stockage de biogaz permettant ainsi de concentrer la production d'électricité lors des pointes journalières de consommation.

Une telle réflexion est actuellement en cours en Allemagne où des tarifs de rachats spécifiques pour l'électricité produite est à l'étude.

L'expérimentation en résumé...

Promoteur dans PREMIO :



Secteur cible : **Collectivité locale**

Client cible : **Exploitant**

Installation cible : **Unité de production de biogaz**

Principal objectif : **Renforcer la production en heure de pointe**

Stocker du biogaz

L'ajout d'une unité de stockage biogaz (gazomètre) à une installation classique ne pose pas de problème technique particulier. Le stockage est réalisé à faible pression ce qui augmente le volume de stockage mais évite les procédures de déclaration (procédures ICPE).

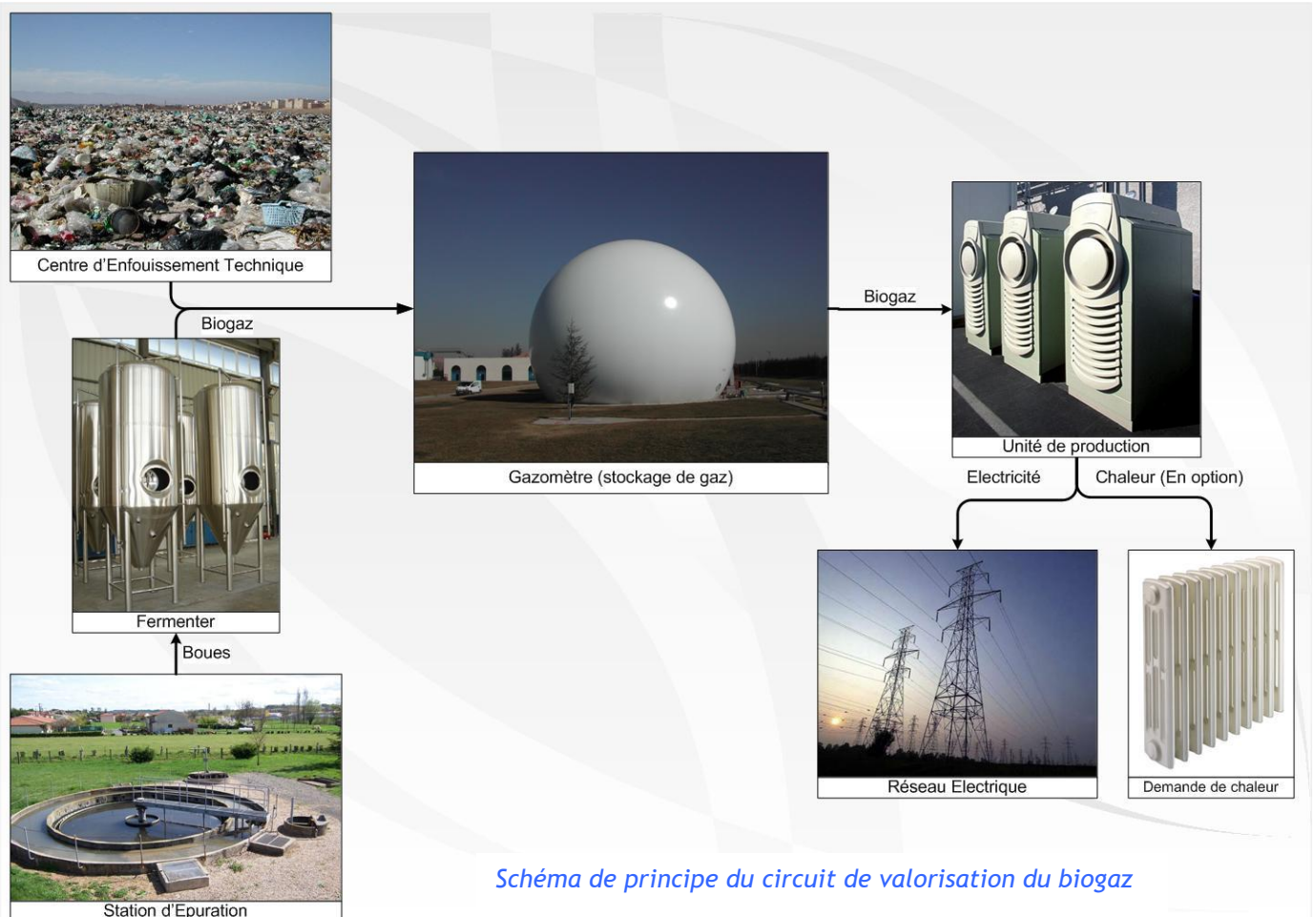


Schéma de principe du circuit de valorisation du biogaz

Installation à la Ciotat : l'une des références VERDESIS en France

L'installation de traitement et valorisation du biogaz de décharge à la Ciotat (Communauté d'agglomération du pays d'Aubagne et de l'Etoile) permet de produire 1,3 MW d'électricité (18 microturbines Capstone C65) et 1,6 MW à terme. Le débit de méthane est compris entre 800 et 1200 Nm³/h.



Aperçu de l'installation biogaz à la CIOTAT

Mise en œuvre de l'expérimentation sur la plate-forme PREMIO

La cible idéale ...

Une collectivité locale disposant d'un site approprié : Centre d'enfouissement technique (CET), Station de Traitement et d'épuration des eaux usées, dont le potentiel de dégagement en biogaz permettrait le fonctionnement d'une centrale à partir de quelques dizaines de kW.

A titre indicatif, un CET d'une commune de 20 000 hab. peut produire jusqu'à 300 000 m³/an de biogaz ce qui correspond à une installation d'environ 50 kW.

Puissance cible et nombre d'installation déployée

Une seule installation est prévue. La puissance installée sera adaptée au contexte.

Les éléments à fournir dans la réponse à l'appel à candidature

- S'il s'agit d'une installation existante ou d'un projet.
- Le type et la taille de l'installation biogaz.
- La quantité et la qualité du biogaz produit, si connues.
- Les infrastructures existantes (photos si possible) ou en projet.
- L'utilisation du biogaz par défaut (torchère, production d'électricité, ...).

Ce qui est pris en charge par le projet PREMIO

Au besoin, l'étude de diagnostic pour l'évaluation du potentiel biogaz, après étude du dossier.

Les équipements additionnels par rapport à une centrale classique :

- Unité de stockage du biogaz
- Modification des unités de production
- Pilotage
- Eventuelles pertes économiques liées à la baisse du tarif de revente de l'électricité (induite par l'augmentation de la puissance installée pour expérimentation).

Ce qui reste à la charge du client

Le financement et l'exploitation de la centrale biogaz est pris en charge par VERDESIS dans le cadre de son activité commerciale classique.

Ce qui reste à la charge de la commune :

- Mise à disposition d'un terrain
- Mise à disposition du biogaz produit sur le site
- Appui administratif.

ANNEXE 16

De quoi s'agit-il ?

La courbe de consommation en électricité sur une période de 24 heures est très variable. Chacun comprend que c'est la conséquence d'un développement non maîtrisé de l'augmentation des climatisations mises en œuvre, mais il nous faut aussi considérer que paradoxalement c'est aussi une des premières conséquences du réchauffement climatique.

Le stockage d'énergie thermique (STL) proposé dans cette expérimentation permet une réduction de 30 à 70 % de la puissance de la machine frigorifique installée, il fournit l'énergie nécessaire en cas de demandes supérieures à la puissance du groupe frigorifique. Le fonctionnement est alors continu et le rendement de la machine frigorifique est optimum. Le stockage permet une réelle gestion de l'énergie frigorifique en fonction des besoins. Des économies très importantes sont réalisées sur les coûts d'exploitation en utilisant l'électricité durant les tranches horaires à tarifs réduits et en réduisant le coût de l'abonnement électrique (puissance électrique réduite de 40 à 80 %).

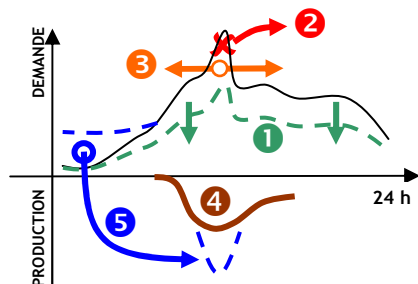
La réduction de la taille de la machine frigorifique diminue de façon sensible la quantité de fluide frigorigène utilisée dans l'installation, ce point devient de plus en plus sensible avec les nouvelles législations très restrictives pour la protection de l'environnement.

Ce qu'apporte PREMIO

Dans le cadre du projet PREMIO, CRISTOPIA propose d'adapter sa gamme de produits Cristo'Control2 (système de régulation et de télé suivi) pour que ces systèmes puissent être pilotés par des commandes extérieures. Il s'agira de permettre une commande de déstockage par un signal de MDE délivré par le gestionnaire du réseau électrique.

Ce projet a pour but de lisser la courbe de consommation d'électricité, en recherchant des applications généralisables et qui vont se développer de manière importante dans ces prochaines années (Résidences pour personnes âgées, petit tertiaire type professions libérales, etc.).

Le bâtiment retenu a des besoins frigorifiques de 350 kW, la puissance du groupe frigorifuge sera de 190 kW soit une réduction de plus de 45 % de la puissance électrique.



L'expérimentation en résumé...



Promoteur dans PREMIO :

Secteur cible :

Petit tertiaire
privé/public

Client cible :

Propriétaire
occupant/locataire

Installations cibles :

Climatisation

Principal objectif :

Effacer la
consommation
électrique à la demande
de l'opérateur
électrique, tout en
garantissant le même
confort à l'utilisateur

La technologie CRISTOPIA

La technologie développée par CRISTOPIA est celle du stockage d'énergie thermique par matériaux à changement de phase (MCP) qui a de nombreux avantages (température de stockage constante, densité de stockage très élevées, etc...). L'installation est pilotée par un système de régulation « Cristo'Control2 » avec télé suivi à distance.

Le principe de stockage de froid par chaleur latente liquide/solide est ici privilégié afin de permettre une très forte densité de stockage thermique (réduction maximale du volume de stockage) et une efficacité énergétique maximale de la machine frigorifique grâce à une température constante d'accumulation d'énergie.



Exemple d'installation packagée

Mise en œuvre de l'expérimentation sur la plate-forme PREMIO

La cible idéale ...

Une maison de retraite, ou tout autre bâtiment public (Mairie, etc.) devant être climatisé.

A titre indicatif, une surface à climatiser supérieure à 3 000 m² (> 300 kW_{thermique}) est une bonne cible.

Ce pourrait être aussi ...

Tout bâtiment tertiaire en usage en été (salle de spectacle, immeuble de bureaux, musée, etc.) devant être climatisé en installation centralisée.

Puissance cible et nombre d'installation déployée

Une seule installation est prévue.

Nous prévoyons d'installer une puissance frigorifique de 190 kWf pour fournir 350 kWf de besoins, et ce grâce à un stockage de frigories par changement de phase.

Le volume de stockage sera de 20 m³ environ dans cette configuration.

Les éléments à fournir dans le dossier de réponse à l'appel à candidature

- Caractéristiques du bâtiment en terme de surface à climatiser,
- Description du lieu pour études d'implantation.

Caractéristiques techniques

Groupe de froid,

Cuve de stockage d'énergie thermique STL,

Système packagé de transfert de frigories,

Armoire électrique avec Cristo'Control2 pour la régulation et le télé suivi.

Ce qui est pris en charge par le projet PREMIO

- Dimensionnement à réaliser, nouveau concept pour prendre en compte la taille et les applications visées, intégration maximale du système en un produit pour garantir les performances au maximum, régulation et télé suivi à définir,
- Etude de faisabilité, puis étude de détail, la fourniture et l'installation de ce système,
- Le suivi de l'expérimentation.

Ce qui reste à la charge du client

- Le client aura seulement à payer ce qu'il aurait payé pour une installation de climatisation traditionnelle,
- Les économies sur sa facture d'électricité lui seront acquises.

ANNEXE 17

De quoi s'agit-il ?

L'expérimentation s'adresse à des résidences principales déjà équipées de pompes à chaleur (PAC) électriques. L'objectif est de proposer un mode de pilotage permettant de lisser la courbe de consommation d'électricité. Le principe consiste à utiliser un ballon tampon de stockage d'eau chaude comme moyen de régulation de l'équilibre offre-demande. Le dimensionnement de ce stockage thermique doit permettre de couper la pompe à chaleur pendant les périodes d'extrême pointe en hiver, sans dégradation du confort. Le potentiel d'effacement (2 fois 1 à 2h/jour) est de l'ordre de 3 à 4 kWel par maison individuelle, d'où un gisement d'environ 70 kWel pour une expérimentation portant chez une vingtaine de clients particuliers.

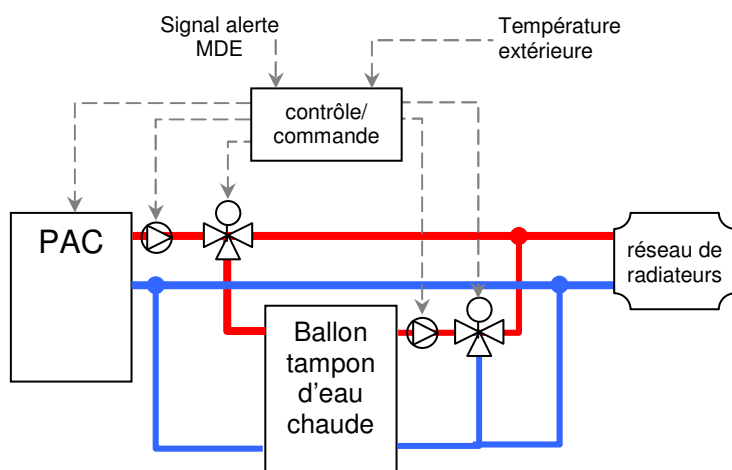


Schéma de principe

Une solution mature

Ce principe est testé grandeur nature dans les laboratoires d'EDF Recherches et Développement. Par ailleurs il existe déjà des offres commerciales de ce type proposées par des énergéticiens en Allemagne et en Suisse. Elles s'accompagnent généralement d'un comptage spécifique pour la PAC associé à un tarif préférentiel.

L'expérimentation en résumé...

Promoteur dans PREMIO :



Secteur cible :

Résidentiel diffus

Client cible :

Propriétaires occupants

Installation cible :

Pompes à chaleur

Principal objectif :

Bénéficier d'un fonctionnement en heures creuses

Comment ça marche ?

Il s'agit de charger le ballon pendant les périodes creuses (par exemple entre 3h-5h et 14h30-16h30) et de le décharger pendant les pointes de consommation (typiquement entre 9h-11h et 18h-20h). Il suffit pour cela de reprogrammer le système de contrôle/commande existant de la PAC s'il dispose des fonctionnalités ad hoc et s'il est possible d'accéder au protocole propriétaire du fabricant ou d'ajouter un automate permettant de transmettre à distance les ordres de marche/arrêt.

Vue d'une installation de pompe à chaleur (à gauche) équipée d'un ballon de stockage tampon (à droite).



Source VISSMAN

Mise en œuvre de l'expérimentation sur la plate-forme PREMIO

La cible idéale ...

Un panel de maisons individuelles, en propriétaire occupant, équipées d'une PAC électrique air/eau ou à défaut d'une PAC eau/eau alimentant un réseau de chauffage central (radiateurs ou plancher chauffant) et disposant du double tarif EDF heure pleine/heure creuse.

Pour cette expérimentation, privilégier des bâtis avec des performances énergétiques standards (par exemple construction observant la réglementation thermique de 2000).

Informations à fournir dans le dossier de candidature

La présélection des sites sera facilitée par la connaissance des informations suivantes, vraisemblablement disponibles auprès des professionnels chauffagistes agréés AFPAC :

- année de construction
- surface habitable
- réalisation de travaux de rénovation type isolation (oui/non)
- type de PAC et puissance électrique installée
- présence d'une résistance d'appoint (oui/non).

Puissance cible et nombre d'installations déployées

Une vingtaine d'installations, pour une puissance effaçable cumulée d'environ 70 kWel.

Contraintes particulières

Dimensions

Disposer de place pour l'installation d'un ballon de 500 à 750 l, du circulateur, des vannes modulantes et du coffret de contrôle/commande.

Exemple des caractéristiques d'un ballon tampon de 750 l :

- diamètre : 1m
- hauteur : 2.1 m
- poids : 250 kg à vide.

Contrôle-commande

Deux options possibles :

1. reprogrammation du régulateur existant sous réserve de la compatibilité de ses fonctionnalités avec l'application, de l'obtention de l'autorisation du propriétaire et du mot de passe de l'installateur
2. installation d'un automate indépendant.

Installation électrique

Respecter la norme NF C15-100 en vigueur.

Ce qui est pris en charge par le projet PREMIO

- Le diagnostic de l'installation PAC existante.
- Tous les équipements pour l'expérimentation (ballon complémentaire, régulation, monitoring et accessoires) et leur installation.
- Le suivi des consommations et leur communication au client.
- Le retour à l'installation de départ en fin d'expérimentation (possibilité de reprise par le participant de l'équipement en fin d'installation).

Ce qui reste à la charge par le participant

- L'installation préexistante.
- Les factures eau et énergie.

A noter que l'installation d'un stockage de chaleur peut engendrer une légère (<5%) surconsommation d'électricité pour compenser les pertes thermiques du ballon. Cependant, il ne devrait pas y avoir de surcoût pour le client du fait d'une meilleure répartition Heures Pleines/Heures Creuses.

Par ailleurs des recommandations personnalisées d'économie d'énergie accompagneront cette expérimentation.

ANNEXE 18
Fiche PREMIO : SAED

De quoi s'agit-il ?

Il s'agit de mettre en place un moyen de production d'électricité innovant à base d'énergie solaire, mais qui peut être sollicité à la demande grâce à une fonction stockage thermique. Il est ainsi possible produire de l'électricité de manière continue (lissage 24h/24) ou rapidement avec de fortes amplitudes (écrêtage), de la même manière qu'une centrale thermique classique.

Ce qu'apporte PREMIO

Dans le cadre du projet PREMIO, SAED propose de faire une expérimentation pour démontrer que le couplage d'une production électrique à partir d'énergie solaire au réseau peut se faire en milieu urbain c'est-à-dire proche des grandes consommations. Ceci permettra d'atténuer la problématique à venir de la garantie et de la sécurité de l'approvisionnement de la région PACA.

Tout l'intérêt est de plus dans le fait que cette production électrique solaire sera commandée en fonction des besoins électrique du réseau (et non de l'ensoleillement), le tout en recherchant un coût du kWh en phase avec les marchés.

L'expérimentation en résumé...

**SOPHIA ANTIPOLIS ENERGIE
DEVELOPPEMENT**

Promoteur dans PREMIO:

Secteur cible : approvisionnement du réseau mode lissage ou écrêtage

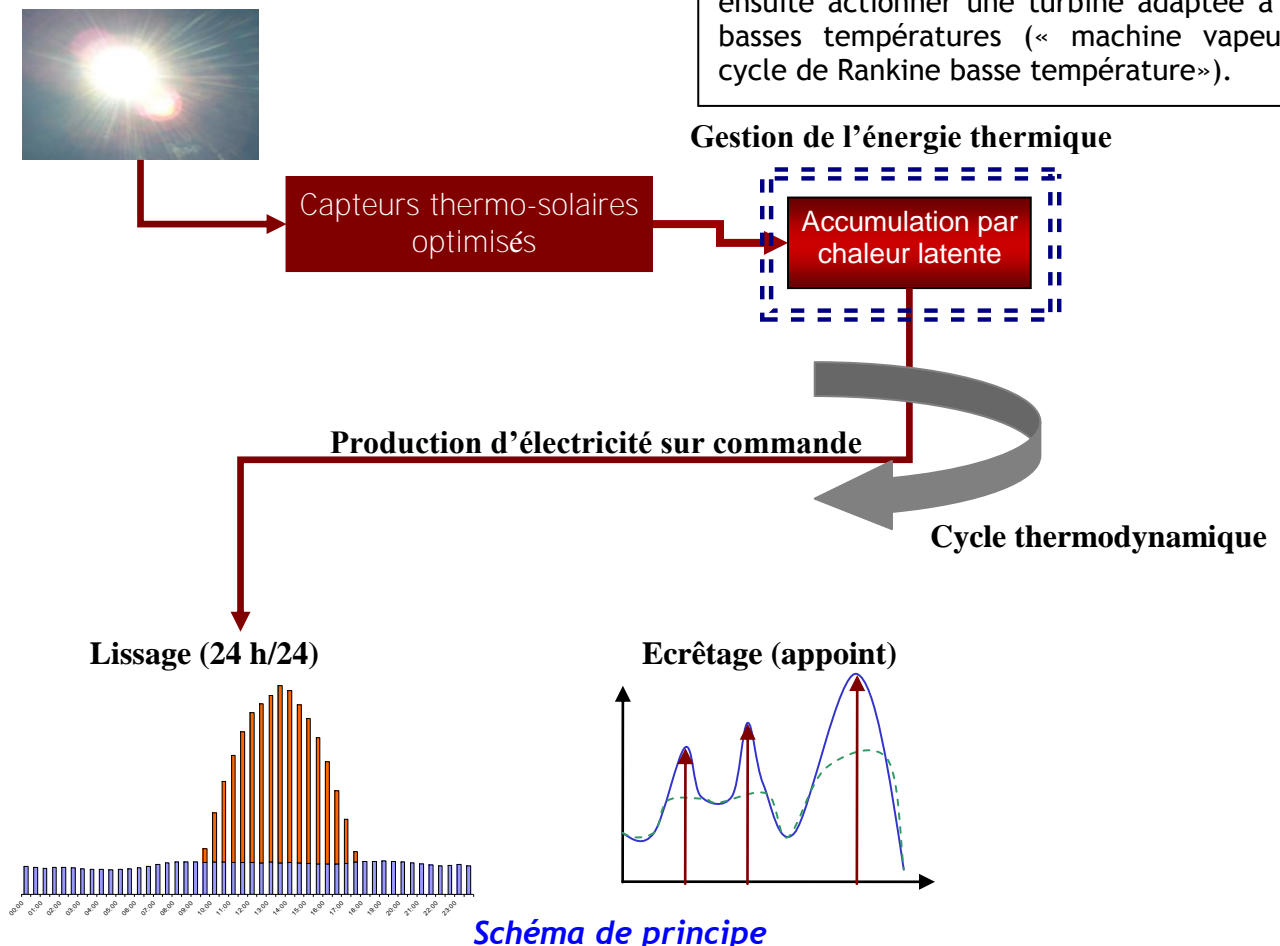
Client cible : collectivités territoriales et investisseurs privés

Installations cibles : centres commerciaux, zones industrielles, bâtiments publics, terrains inconstructibles

Principal objectif : constituer une réserve énergétique et produire de l'électricité sur demande

La technologie SAED

Nous mettons en œuvre un parc de capteurs solaire thermique pour chauffer un fluide de l'ordre de 100-150°C. Cette énergie sera ensuite stockée avec un système basé sur des matériaux à changement de phase, pour ensuite actionner une turbine adaptée à ces basses températures (« machine vapeur à cycle de Rankine basse température »).



Mise en œuvre de l'expérimentation sur la plate-forme PREMIO

La cible idéale ...

Une collectivité locale disposant d'un toit terrasse (bâtiment public par exemple) de quelques centaines de m² de surface ensoleillée, ou à défaut un terrain inconstructible.

A titre indicatif une production électrique de ~ 12 kW nécessiterait une surface à utiliser de 400 m² environ pour héberger les capteurs solaires, le stockage thermique et la turbine électrique.

A noter que dans ce bâtiment, tout type de chauffage est accepté.

Ce pourrait être aussi ...

Une zone extra urbaine proche d'un moyen de raccordement basse tension.

Les éléments à fournir dans le dossier de réponse à l'appel à candidature

- Le nombre de m² de surface disponible.
- Une description du lieu pouvant accueillir le module de stockage et de production d'électricité.

Puissance cible et nombre d'installation déployée

Une seule installation est prévue. Nous prévoyons d'installer une puissance électrique de l'ordre de 5 à 10 kWe, pour une superficie de capteurs de l'ordre de 100 à 200 m², avec un volume de stockage de l'ordre de 3 à 6 m³.

Caractéristiques techniques

A définir en fonction de la surface disponible.

Ce qui est pris en charge par le projet PREMIO

- L'étude de faisabilité technique et économique.
- Les études de détails.
- Tous les équipements pour l'expérimentation et leur installation.

Ce qui reste à la charge du client

- Appui administratif pour les dossiers de demandes de raccordement au réseau électrique, le contrat de rachat d'électricité ainsi que pour les autorisations à obtenir (permis de construire, etc.).
- Le suivi de la production électrique et la communication.
- Une participation financière avec un temps de retour de 3 ans.

ANNEXE 19

ANNEXE 19

Fiche : Usine IBM Bromont au Canada : stockage d'énergie à changement de phase

L'usine IBM Bromont au Canada utilise le stockage d'énergie thermique à changement de phase.

Le système de stockage d'énergie thermique à changement de phase (SET-CP) appelé Novanergy emmagasine la chaleur ou le froid dans des matériaux à changement de phase (MCP) synthétiques à l'intérieur de réservoirs de stockage thermique hermétiquement scellés. Quand les MCP fondent ou gèlent, de grandes quantités d'énergie thermique sont absorbées ou libérées à température constante. Les MCP sont spécifiquement formulés pour changer de phase à des températures optimales pour le processus.

Le transfert de l'énergie thermique qui entre dans les réservoirs de stockage thermique et qui en sort est réalisé par un fluide thermique (eau glycolée) qui circule dans des serpentins d'échange de chaleur contenus dans les réservoirs de stockage thermique. Le fluide thermique apporte aussi l'énergie thermique à d'autres composants du système.

Les avantages

Il est plus simple d'exploiter et de maintenir le système Novanergy qu'un système frigorifique standard parce que :

- un seul fluide thermique est nécessaire pour charger et décharger (stocker et déstocker) l'énergie thermique;
- la majeure partie du processus est automatisée, ce qui dispense les opérateurs de prendre des décisions de conduite du système;
- le système est exploité de façon stable, ce qui réduit l'usure et la détérioration de l'équipement;
- le stockage thermique peut réagir rapidement à la demande.

Grâce à une pompe de circulation, à un échangeur de chaleur et à une vanne modulante, l'énergie « utile » est prélevée dans les réservoirs de stockage thermique et amenée à la boucle d'eau de refroidissement, ce qui procure au système intégré une capacité instantanée de 8,8 MW (2 500 tonnes), laquelle peut descendre aussi bas que 350 kW (100 tonnes). Vu que les MCP sont dans une enceinte hermétique et que le système de SET marche de façon stable, le SET exige une maintenance minimale.

Économies d'énergie = moins de gaz à effet de serre

Avant la mise en œuvre, l'apport d'énergie électrique par tonne de capacité de refroidissement était supérieur à 0,89 kW/tonne. Après la mise en œuvre, il était inférieur à 0,5 kW/tonne. Cela constitue une réduction de 47 % de l'énergie consacrée à la production d'eau glacée, et une économie d'énergie électrique de 5 312 MWh par an. En supposant le taux d'émission moyen à 232 g CO₂/ kWh pour l'énergie électrique au Canada, les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'eau glacée ont été réduites de 35 % ou de l'ordre de 1 200 tonnes par an.

Le projet d'IBM Bromont démontre clairement les avantages environnementaux du système de SET. Le fait d'utiliser un plus petit réfrigérant le jour signifie qu'une plus faible demande d'énergie électrique est facturée au tarif de pointe et que, grâce à la récupération de chaleur opérée sur le côté condenseur du réfrigérant, moins de gaz naturel est brûlé pour chauffer l'eau désionisée.

Une période de récupération inférieure à 5 ans

Le coût total du projet d'IBM Bromont a été de 2,6 millions de dollars, incluant le coût du démantèlement des deux réfrigérants fonctionnant au R-12. Le système de stockage thermique proprement dit a coûté moins de 1,6 million de dollars. Pour IBM, l'économie totale en coûts énergétiques s'est chiffrée aux environs de 351 000 \$/an, incluant des économies sur l'électricité consommée de 145 500 \$/an (5 312 MWh/an à 0,0274 \$/kWh en moyenne) et des économies par réduction de demande d'électricité de 205 500 \$/an (demande de 11,96 \$/kW par mois). Il en découle une période de récupération d'environ 4,5 ans, sans compter les économies de coûts associées à l'équipement, au pompage, au maintien en température de l'eau durant les fluctuations électriques, à la maintenance réduite (cyclique) exigée par les réfrigérants, et à l'allègement de la consommation de gaz naturel.

ANNEXE 20



**GROUPEMENT POUR LA RECHERCHE
SUR LES ECHANGEURS THERMIQUES**

Méthode de calcul

Fiche annexe : ETUDE DE CAS HABITAT

Sommaire

1. ELEMENT DE CONTEXTE	3
2. METHODE.....	3
3. CALCULS INTERMEDIAIRES	3
3.1 Les DJU	3
3.2 L'intermittence (ou facteur d'intermittence).....	3
3.3 Les pertes fatales	4
3.4 Les Apports thermiques.....	4
4. CALCUL DES BESOINS EN CHAUFFAGE ET CLIMATISATION.....	4
5. CALCUL DES BESOINS EN ECS (EAU CHAUDE SANITAIRE).....	5
6. ARCHITECTURE SYSTEME	5
7. COMPARAISON	7
8. CONCLUSIONS	7
9. REFERENCES	8

1. Elément de contexte

Dans le cadre de l'étude RECORD, « stockage de chaleur et transport longue distance, en lien avec des procédés de valorisation énergétiques des déchets », nous réalisons une étude de cas sur le secteur de l'habitat.

Cette fiche décrit les différents calculs réalisés.

2. Méthode

Afin de calculer les besoins pour le secteur de l'Habitat, nous avons décidé de nous baser sur une méthode de calcul par les DJU (Degré Jour Unifié). Nous allons donc calculer les besoins moyen par jour /mois puis exprimer les quantités d'énergie de stockage nécessaire. Pour cela, nous avons sélectionné 3 villes (Marseille, Lyon, Lille) et évalué les besoins en chauffage et ECS, ainsi que pour la climatisation.

3. Calculs intermédiaires

Le calcul des besoins en chauffage nécessite plusieurs calculs intermédiaires :

3.1 Les DJU

Les DJU (Degré jours Unifiés) sont calculés à partir d'une base couramment utilisée, qui est la base 18 c'est à dire 18 °C de température intérieure corrigée donc, sans prise en compte des apports gratuits qui est aussi la température extérieure de non chauffage (T_{nc}). Les DJU sont calculés de la manière suivante :

$$DJU = 18^{\circ}\text{C} - (\text{moyenne journalière des températures mini/maxi})$$

Toutes ces températures sont ensuite ajoutées pour avoir les valeurs par mois.

Ainsi, nous avons récupéré sur des fichiers météorologique, les relevés de températures dans les 3 villes précédemment citées, puis nous avons calculé les DJU pour chaque jour.

Grâce au DJU, nous pourrions ainsi calculer les besoins en chauffage et en climatisation pour l'habitat en kWh/m²/jour (pour la climatisation base de 22°C pour calculer les DJU), puis nous réaliserons un calcul pour un équivalent logement de 70 m²/3 pers. Ce logement équivalent consomme en moyenne 10 MWh/an pour le chauffage et l'ECS, mais ce chiffre dépend de la région et des années.

3.2 L'intermittence (ou facteur d'intermittence)

Sur une période suffisamment longue, l'énergie thermique nécessaire au chauffage d'un local donné est, en première approximation, proportionnelle à l'aire comprise entre la courbe représentant l'évolution de la température intérieure, en fonction du temps, et celle représentant l'évolution de la température extérieure.

Lorsque le maintien du niveau thermique de confort devient inutile, essentiellement en période d'inoccupation (nuit, fin de semaine, période de congés), tout abaissement de la température intérieure se traduit par une diminution de l'énergie consommée par l'installation de chauffage.

Plus l'abaissement de la température est prononcé, plus celui-ci est maintenu longtemps à l'intérieur de la période d'inoccupation et plus les économies d'énergie qui en résultent sont grandes.

La valeur du facteur d'intermittence est fonction de plusieurs paramètres, comme l'inertie du bâtiment, les plages d'abaissement de la régulation, la température choisie pour les plages d'abaissement, etc...Le coefficient (I) souvent utilisé par défaut est de 0,85.

3.3 Les pertes fatales

Comme pour l'intermittence, il est assez difficile d'estimer ces pertes. Une partie d'entre elles, sont les pertes par les fumées et leur pourcentage est fonction du rendement de la chaudière. Les autres pertes sont assez diverses comme les déperditions de la chaudière qui sont fonction de son isolation. Il est difficile d'estimer ces pertes car on ne connaît pas dans quelle mesure est contribuent au chauffage du logement. Par exemple, si la chaudière se trouve dans la cuisine, ses déperditions participent au chauffage du logement par contre si elle est à la cave et que celle-ci est non isolée, une partie de ses déperditions est cédée à l'extérieur et une partie contribue au chauffage du logement en réduisant légèrement le DeltaT entre la pièce où se trouve la chaudière et celle du dessus. Il en est de même pour les conduites alimentant les émetteurs. On va donc estimer un pourcentage de pertes fatales d'environ 20% donc un coefficient (Ptes) de 0,80.

3.4 Les Apports thermiques

En dernier lieu, si le logement est très bien situé, la prise en compte des apports thermiques externes (solaires). Il est assez difficile de définir le coefficient qui permet de prendre en compte ces apports car ces derniers sont fonction de bien trop de paramètres. Il est possible de prendre en première approximation une valeur de coefficient d'apport thermique (A) de 0,9.

4. Calcul des besoins en chauffage et climatisation

Maintenant que toutes ces valeurs sont obtenues, il suffit d'utiliser le procédé de calcul ci-dessous :

$$\text{Besoins_Ch} = (24 \times \text{DJU} \times \text{H} \times \text{I} \times \text{A}) / \text{Ptes}$$

Avec :

-24 = 24 heures (coefficient de transformation des degrés jour en degrés heure)

-DJU = Degrés jour unifiés

-I = Intermittence

-Ptes = Pertes fatales

-H = Coefficient de déperditions du logement en kW/K

A des fins de simplifications, H peut être obtenu de la manière suivante :

$$\text{H} = \text{V} \times \text{U}_{\text{bât}} / 1000$$

V = Volume du logement en m³ (pris pour 1m² et 2.5m de hauteur)

U_{bât} = Coefficient d'isolation

U_{bât} est le coefficient (ici détourné puisque normalement en W/(m².K)) des déperditions en W/(m³/K). Nous retiendrons la valeur suivante pour le parc habitat français :

U_{bât} = 0,75 W/(m³.K) habitation conforme à la RT 2000 (construit après le 2 juin 2001 mais bon nombre de logements antérieurs à cette date étaient déjà conformes à la RT 2000).

Ainsi nous obtenons les besoins en kWh/m²/jour pour chaque mois.

Le calcul des besoins en climatisation s'effectue de la même manière sauf que nous retiendrons les valeurs des DJU négative (avec une base à 22°C) en tant que besoin de

climatisation. En effet, les besoins de chauffage sont normalement effectués sur une période allant du 15 Octobre au 15 Mai, mais celle-ci varie selon les régions. La période de climatisation s'effectue entre l'intersaison et l'été, c'est-à-dire à partir du mois d'avril (en général) et jusqu'au mois d'Octobre. On voit donc bien que la période d'intersaison est une période critique pour l'efficacité thermique des bâtiments, qui nécessite parfois du chauffage et de la climatisation sur une même journée.

5. Calcul des besoins en ECS (Eau Chaude Sanitaire)

Pour pouvoir estimer les besoins annuels en ECS, il faut connaître la consommation journalière par personne. Ces valeurs sont obtenues de manière empirique et elles varient de 30 à 60 litres. Un volume de 50 litres par jour et par personne peut être utilisé pour obtenir des résultats suffisamment exacts. La valeur généralement utilisée pour la température de stockage de l'ECS se situe entre 50 et 60°C (nous retiendrons une température de 55°C). Il faut aussi connaître la température moyenne annuelle de l'eau froide. Cette valeur se situe en général aux alentours de 10°C. Comme pour les besoins en chauffage, les pertes fatales sont aussi à prendre en considération. Ces pertes comprennent les déperditions du ballon d'ECS, qui sont fonction de la qualité de son isolation, du DeltaT entre la température de stockage et celle de l'air ambiant. Ces pertes sont aussi dues aux déperditions des conduites d'ECS, du refroidissement de l'eau à l'intérieur de celles-ci après un soutirage, eau qui a été chauffée et qui sera envoyée à l'égout au prochain soutirage. Il est difficile d'estimer avec exactitude le pourcentage de pertes fatales donc, pour cette raison, on retient en général une valeur de 25% ce qui donne un coefficient de 0,75. Néanmoins, dans le cas de notre étude, nous ne ferons pas intervenir ce coefficient car nous retiendrons des valeurs de rendement de stockage qui intègrent ces pertes (voir explications de l'architecture système au paragraphe suivant). Ces valeurs une fois obtenues, la formule à utiliser est la suivante :

$$\text{Besoins_ECS} = (m * C_p * \Delta_T) / 3600$$

- $m = (V/\rho) = \text{Volume en litre par personne et par jour (valeur retenue = 50/jour/personne)}$ divisé par la densité de l'eau (1000kg/m^3)
- $C_p = \text{Chaleur spécifique de l'eau} = 4,185 \text{ kJ/kg.K}$
- $\Delta_T = 55 - 10 = 45 \text{ K}$
- Divisé par 3600 pour avoir le résultat en kWh ($1\text{kWh} = 3600 \text{ kJ}$)

Ainsi, nous obtenons une valeur moyenne de 2.615 kWh/personne/jour en besoins pour l'ECS.

6. Architecture système

Pour ces études de cas, nous avons retenu l'architecture système suivante :

En sortie d'UIOM, l'énergie est transportée jusqu'au lieu d'usage ou elle rencontre un (ou plusieurs) échangeur de chaleur afin d'adapter les niveaux de température et la nature du fluide entre l'usage et la production. Puis, le fluide secondaire sert à alimenter le stockage « chaud » pendant la nuit (et éventuellement directement le réseau de chauffage par un by-pass). Ce stockage chaud doit être capable de fournir la totalité des besoins en chauffage et ECS, mais aussi les besoins en climatisation lorsque que cette demande est nécessaire. En effet, le stockage chaud alimente un groupe à sorption simple effet (ammoniac/eau ou LiBr/eau) qui lui même alimente un stockage froid de technologie type CRISTOPIA (voir

fiche annexe : « technologie de stockage froid CRISTOPIA ») afin de lisser la demande de froid.

Plusieurs jeux de V3V (vanne 3 voies) et de by-pass permettent une régulation et une alimentation des différents circuits.

Ainsi, le système est capable de fournir la totalité des besoins durant toute l'année.

Voici ci-dessous un schéma simplifié de l'installation :

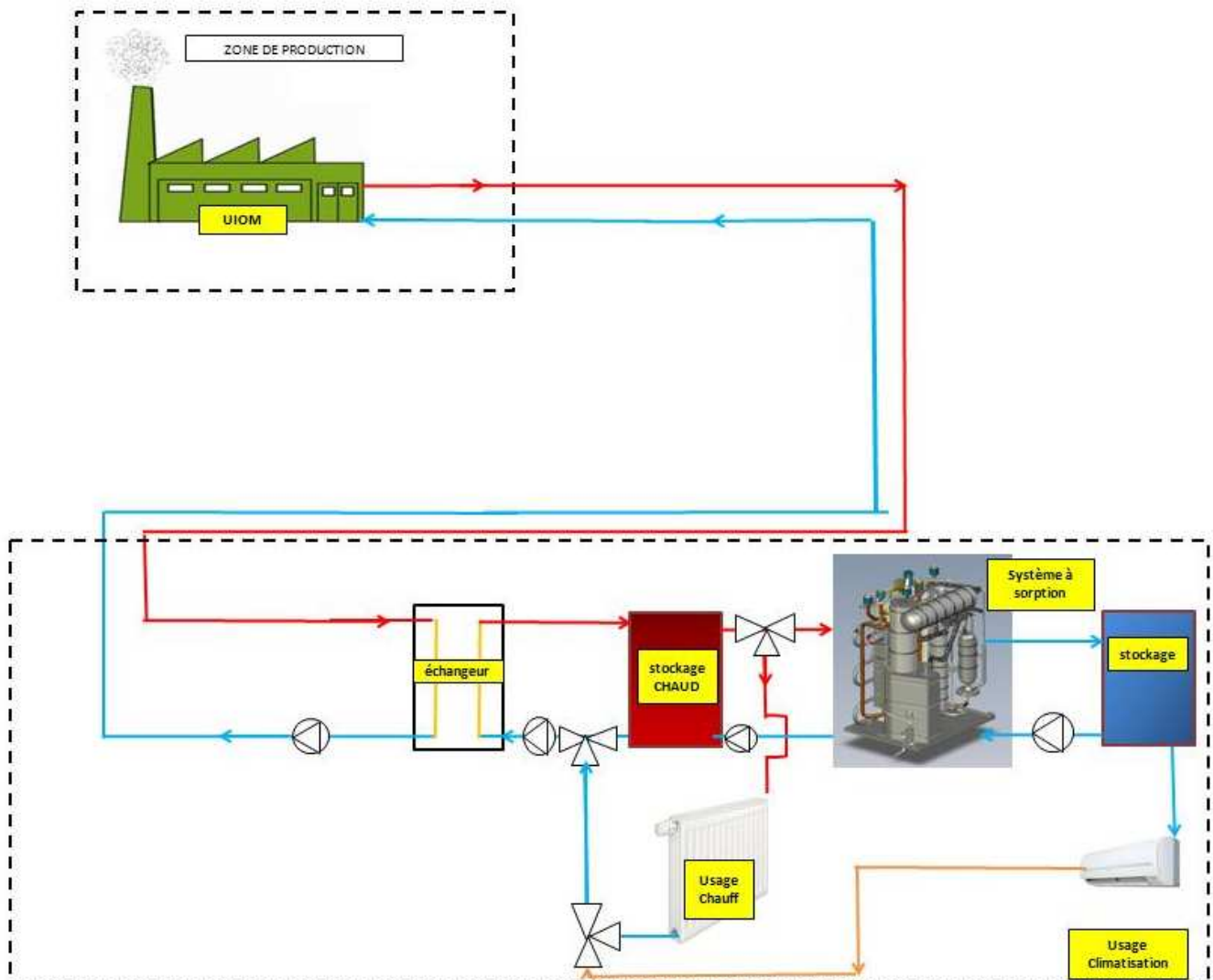


Schéma de l'architecture système

De plus, afin de calculer la quantité d'énergie réellement nécessaire, il nous faut prendre en compte les différents rendements des systèmes de stockage et de conversion. Pour les deux stockages (chaud et froid) nous prenons des valeurs de 80% de rendement. En ce qui concerne le rendement du groupe à absorption simple effet, nous retenons une valeur courante dans la littérature de 70%. A cela, et dans le but de savoir quel besoin doit être émis par le site de production, il faudra bien sûr ajouter un rendement dû aux pertes par transport.

Une chaudière d'appoint (gaz ou bois) doit être installée afin de supporter les pics de demande.

Remarque : Nous avons choisi une technologie de groupe à absorption simple effet dans le but de limiter les températures de stockage. En effet, un groupe simple effet (contrairement au groupe double ou triple effet) ne nécessite pas des températures d'alimentation supérieures à 100-120°C et nous permettra donc de limiter la température du stock, mais aussi de limiter les pertes du stockage.

7. Comparaison

Afin de pouvoir comparer notre système en termes de performances et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (CO₂), il nous faut prendre une solution de référence couramment utilisé. Pour cela, nous avons choisi la solution de production de chaleur par une chaudière gaz classique. Nous effectuerons donc, à partir des mêmes besoins calculés précédemment, la différence entre les deux systèmes. Il nous faut donc calculer la consommation nécessaire en combustible, ainsi que l'émission de CO₂ de cette solution de référence.

Pour cela, nous prendrons une valeur du PCI du gaz naturel de 10.53 kWh/m³ avec un rendement moyen de la chaudière de 90%. Ainsi nous pourrons calculer les besoins en volume de gaz puis le prix de la consommation en prenant une valeur de 0.616€/m³ de gaz.

Enfin, pour le calcul des émissions de CO₂, nous retiendrons une valeur moyenne de 234 g CO₂/kWh pour le gaz naturel.

La comparaison du système de référence avec le nouveau système permettra d'évaluer l'impact en termes de rejets de CO₂, sachant pertinemment que l'impact financier mise en jeu sera bien plus important pour la solution du nouveau système avec stockage, que pour le choix d'une solution classique.

En ce qui concerne l'impact CO₂ dû à la fabrication de MCP ou d'autres matériaux de stockage, ses valeurs d'émission sont très difficiles à trouver dans les différentes littératures et cette analyse devra faire l'objet de recherches plus poussées lors de la faisabilité d'un projet.

8. Conclusions

Nous avons donc décrit la méthode de calcul pour l'étude de cas bâtiment. Cette étude réalisée sur 3 villes se situant dans quelques régions de France nous permettra d'avoir une diversité en termes de besoins en chaud et en froid (grande demande en froid pour Marseille-grande demande en chaud pour Lille ; pour Lyon, les valeurs seront intermédiaires).

Vous retrouverez dans le rapport final les différentes fiches de synthèse des études de cas, qui intègrent les points suivants :

- le choix d'une solution de stockage et de transport adapté aux cas d'études (réalisé grâce aux tableaux de synthèse des techniques de stockages et de transport)
- les principaux paramètres de comparaison et de performance
- différents graphiques afin d'avoir une visualisation plus rapide des besoins.

9. Références

Fichiers météo :

Ville de Marseille :

http://www.wunderground.com/history/airport/LFML/2010/1/1/CustomHistory.html?dayend=31&monthend=12&yearend=2010&req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA

Ville de Lyon :

http://www.wunderground.com/history/airport/LFLY/2010/1/1/CustomHistory.html?dayend=31&monthend=12&yearend=2010&req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA

Ville de Lille :

http://www.wunderground.com/history/airport/LFQQ/2010/1/1/CustomHistory.html?dayend=31&monthend=12&yearend=2010&req_city=NA&req_state=NA&req_statename=NA

10. Annexe

10.1 Etude de cas Habitat- ville de Marseille

10.1.1 Tableaux de données météorologiques et de calcul des DJU

2010	Température (°C)			DJU chauffage (base 18°C)	DJU clim (base 22°C)	Besoin en chauffage en kWh/m ²	besoin en ECS/par personne (50l/jr) à Tstock=55°C	Besoin en clim en kWh/m ² (valeur négative)
	high	avg	low					
Jan								
1	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
2	7	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
3	7	2	-3	16	20	0,574	2,615625	0,717
4	8	7	5	11	15	0,394	2,615625	0,538
5	10	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
6	6	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
7	7	2	-3	16	20	0,574	2,615625	0,717
8	5	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
9	2	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
10	3	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
11	4	0	-4	18	22	0,645	2,615625	0,789
12	9	2	-5	16	20	0,574	2,615625	0,717
13	9	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
14	11	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
15	11	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
16	12	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
17	11	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
18	12	6	0	12	16	0,430	2,615625	0,574
19	11	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
20	8	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
21	12	7	2	11	15	0,394	2,615625	0,538

22	13	7	0	11	15	0,394	2,615625	0,538
23	13	7	1	11	15	0,394	2,615625	0,538
24	9	7	5	11	15	0,394	2,615625	0,538
25	11	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
26	8	4	2	14	18	0,502	2,615625	0,645
27	7	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
28	8	4	0	14	18	0,502	2,615625	0,645
29	10	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
30	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
31	6	2	-2	16	20	0,574	2,615625	0,717
somme				407	531	14,595	81,084375	19,041
fév	high	avg	low					
1	8	1	-6	17	21	0,610	2,615625	0,753
2	9	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
3	12	4	-2	14	18	0,502	2,615625	0,645
4	14	8	3	10	14	0,359	2,615625	0,502
5	12	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
6	13	8	3	10	14	0,359	2,615625	0,502
7	11	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
8	13	6	-1	12	16	0,430	2,615625	0,574
9	13	9	4	9	13	0,323	2,615625	0,466
10	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
11	0	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
12	4	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
13	4	0	-4	18	22	0,645	2,615625	0,789
14	6	2	-3	16	20	0,574	2,615625	0,717
15	8	2	-4	16	20	0,574	2,615625	0,717
16	11	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
17	13	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
18	16	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
19	12	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
20	11	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
21	13	7	1	11	15	0,394	2,615625	0,538
22	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
23	16	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
24	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
25	16	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
26	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
27	14	8	3	10	14	0,359	2,615625	0,502
28	16	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
somme				315	427	11,296	73,2375	15,312
Mar	high	avg	low					
1	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
2	17	10	3	8	12	0,287	2,615625	0,430
3	12	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
4	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
5	10	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
6	12	4	-3	14	18	0,502	2,615625	0,645
7	10	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
8	10	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
9	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
10	8	4	0	14	18	0,502	2,615625	0,645
11	8	4	0	14	18	0,502	2,615625	0,645
12	10	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574

13	12	6	-1	12	16	0,430	2,615625	0,574
14	13	6	-1	12	16	0,430	2,615625	0,574
15	15	10	5	8	12	0,287	2,615625	0,430
16	18	9	1	9	13	0,323	2,615625	0,466
17	18	11	4	7	11	0,251	2,615625	0,394
18	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
19	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
21	18	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
22	15	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
23	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
24	18	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
25	18	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
26	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
27	17	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
28	18	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
29	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
30	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
31	16	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
somme				253	377	9,072	81,084375	13,519
avr	high	avg	low					
1	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
2	15	9	4	9	13	0,323	2,615625	0,466
3	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
4	17	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
5	17	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
6	18	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
7	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
8	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
9	20	13	6	5	9	0,179	2,615625	0,323
10	23	14	7	4	8	0,143	2,615625	0,287
11	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
12	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
13	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
14	18	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
15	18	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
16	19	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
17	19	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
18	19	14	9	4	8	0,143	2,615625	0,287
19	21	14	8	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	23	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
21	23	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
22	22	17	12	1	5	0,036	2,615625	0,179
23	19	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
24	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
25	25	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
26	26	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
27	24	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
28	25	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
29	24	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
30	21	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
somme				114	230	4,088	78,46875	8,248
mai	high	avg	low					
1	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179

2	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
3	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
4	18	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
5	13	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
6	16	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
7	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
8	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
9	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
10	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
11	20	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
12	20	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
13	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
14	18	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
15	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
16	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
17	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
18	22	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
19	21	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
20	24	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
21	26	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
22	26	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
23	25	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
24	28	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
25	24	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
26	24	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
27	26	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
28	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
29	28	21	14	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
30	26	22	18	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
31	24	21	19	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
somme				33	157	1,183	81,084375	5,630
juin	high	avg	low					
1	24	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
2	25	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
3	29	21	13	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
4	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
5	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
6	26	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
7	27	23	19	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
8	26	22	18	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
9	29	24	19	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
10	30	26	22	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
11	25	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
12	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
13	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
14	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
15	22	19	17	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
16	23	19	16	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
17	24	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
18	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
19	24	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
20	19	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
21	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
22	26	20	14	-2	2	-0,072	2,615625	0,072

23	28	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
24	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
25	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
26	29	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
27	29	23	18	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
28	33	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
29	33	27	20	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
30	32	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
somme				-103	17	-3,694	78,46875	0,610
juil	high	avg	low					
1	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
2	31	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
3	32	26	20	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
4	34	27	21	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
5	33	29	25	-11	-7	-0,394	2,615625	-0,251
6	32	28	24	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
7	33	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
8	33	27	20	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
9	32	27	23	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
10	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
11	33	27	21	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
12	33	28	23	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
13	31	26	22	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
14	33	28	24	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
15	34	29	24	-11	-7	-0,394	2,615625	-0,251
16	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
17	33	28	23	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
18	32	26	20	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
19	32	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
20	33	27	20	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
21	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
22	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
23	30	25	20	-7	-3	-0,251	2,615625	-0,108
24	28	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
25	28	23	19	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
26	30	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
27	30	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
28	33	26	18	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
29	31	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
30	29	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
31	29	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
somme				-260	-136	-9,323	81,084375	-4,877
août	high	avg	low					
1	30	23	17	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
2	29	24	21	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
3	29	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
4	31	24	19	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
5	27	23	20	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
6	28	23	18	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
7	31	22	14	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
8	32	24	17	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
9	31	24	19	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
10	30	25	20	-7	-3	-0,251	2,615625	-0,108
11	32	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072

12	30	25	20	-7	-3	-0,251	2,615625	-0,108
13	29	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
14	24	21	19	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
15	26	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
16	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
17	29	23	18	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
18	30	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
19	29	24	21	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
20	29	24	21	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
21	34	27	20	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
22	32	26	20	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
23	29	27	24	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
24	34	28	22	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
25	32	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
26	32	26	20	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
27	32	28	25	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
28	27	23	21	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
29	27	22	17	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
30	23	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
31	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
somme				-182	-58	-6,526	81,084375	-2,080
Sep	high	avg	low					
1	28	19	11	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
2	26	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
3	28	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
4	30	23	17	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
5	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
6	28	22	17	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
7	26	23	21	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
8	25	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
9	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
10	27	22	17	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
11	27	20	14	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
12	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
13	24	21	18	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
14	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
15	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
16	28	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
17	23	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
18	23	19	16	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
19	23	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
20	25	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
21	23	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
22	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
23	27	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
24	24	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
25	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
26	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
27	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
28	20	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
29	23	16	8	2	6	0,072	2,615625	0,215
30	24	17	10	1	5	0,036	2,615625	0,179
somme				-45	75	-1,614	78,46875	2,689
Oct	high	avg	low					

1	23	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
2	26	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
3	27	23	19	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
4	23	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
5	22	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
6	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
7	26	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
8	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
9	26	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
10	20	18	17	0	4	0,000	2,615625	0,143
11	20	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
12	25	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
13	22	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
14	20	15	10	3	7	0,108	2,615625	0,251
15	19	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
16	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
17	13	11	10	7	11	0,251	2,615625	0,394
18	16	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
19	18	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
20	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
21	19	11	4	7	11	0,251	2,615625	0,394
22	20	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
23	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
24	19	16	10	2	6	0,072	2,615625	0,215
25	11	10	9	8	12	0,287	2,615625	0,430
26	14	10	5	8	12	0,287	2,615625	0,430
27	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
28	18	11	5	7	11	0,251	2,615625	0,394
29	20	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
30	18	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
31	18	17	15	1	5	0,036	2,615625	0,179
somme				77	201	2,761	81,084375	7,208
Nov	high	avg	low					
1	15	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
2	17	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
3	21	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
4	22	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
5	19	14	9	4	8	0,143	2,615625	0,287
6	14	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
7	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
8	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
9	9	7	6	11	15	0,394	2,615625	0,538
10	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
11	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
12	20	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
13	21	14	8	4	8	0,143	2,615625	0,287
14	19	17	16	1	5	0,036	2,615625	0,179
15	18	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
16	13	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
17	16	10	4	8	12	0,287	2,615625	0,430
18	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
19	15	9	4	9	13	0,323	2,615625	0,466
20	14	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
21	15	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359

22	13	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
23	11	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
24	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
25	10	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
26	7	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
27	7	2	-2	16	20	0,574	2,615625	0,717
28	9	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
29	8	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
30	12	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
somme				229	349	8,212	78,46875	12,515
déc	high	avg	low					
1	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
2	7	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
3	7	2	-2	16	20	0,574	2,615625	0,717
4	6	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
5	13	6	-1	12	16	0,430	2,615625	0,574
6	16	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
7	18	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
8	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
9	11	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
10	8	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
11	10	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
12	9	4	0	14	18	0,502	2,615625	0,645
13	9	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
14	7	2	-2	16	20	0,574	2,615625	0,717
15	2	0	-2	18	22	0,645	2,615625	0,789
16	4	-1	-6	19	23	0,681	2,615625	0,825
17	9	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
18	6	1	-3	17	21	0,610	2,615625	0,753
19	10	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
20	11	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
21	14	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
22	17	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
23	15	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
24	8	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
25	3	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717
26	4	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
27	9	3	-3	15	19	0,538	2,615625	0,681
28	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
29	10	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
30	12	10	9	8	12	0,287	2,615625	0,430
31	11	9	8	9	13	0,323	2,615625	0,466
somme				358	478	12,838	81,084375	17,141

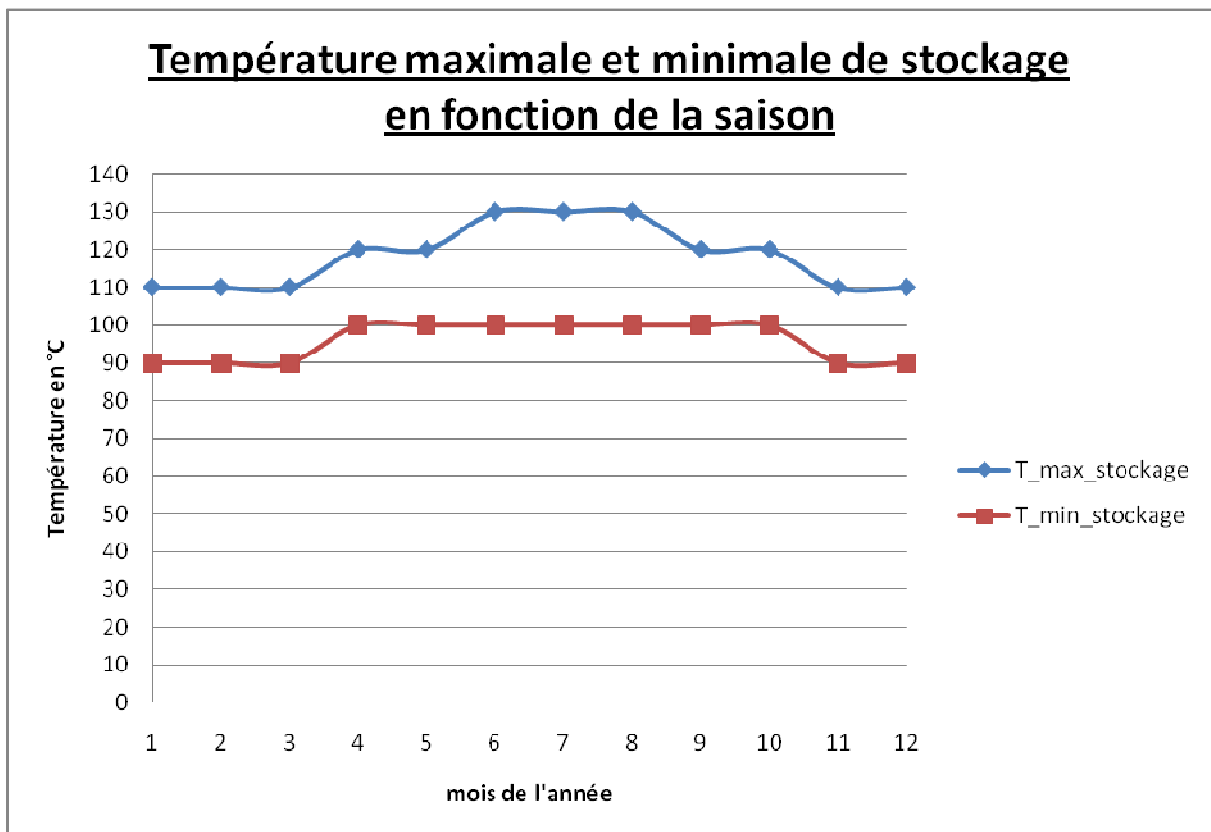
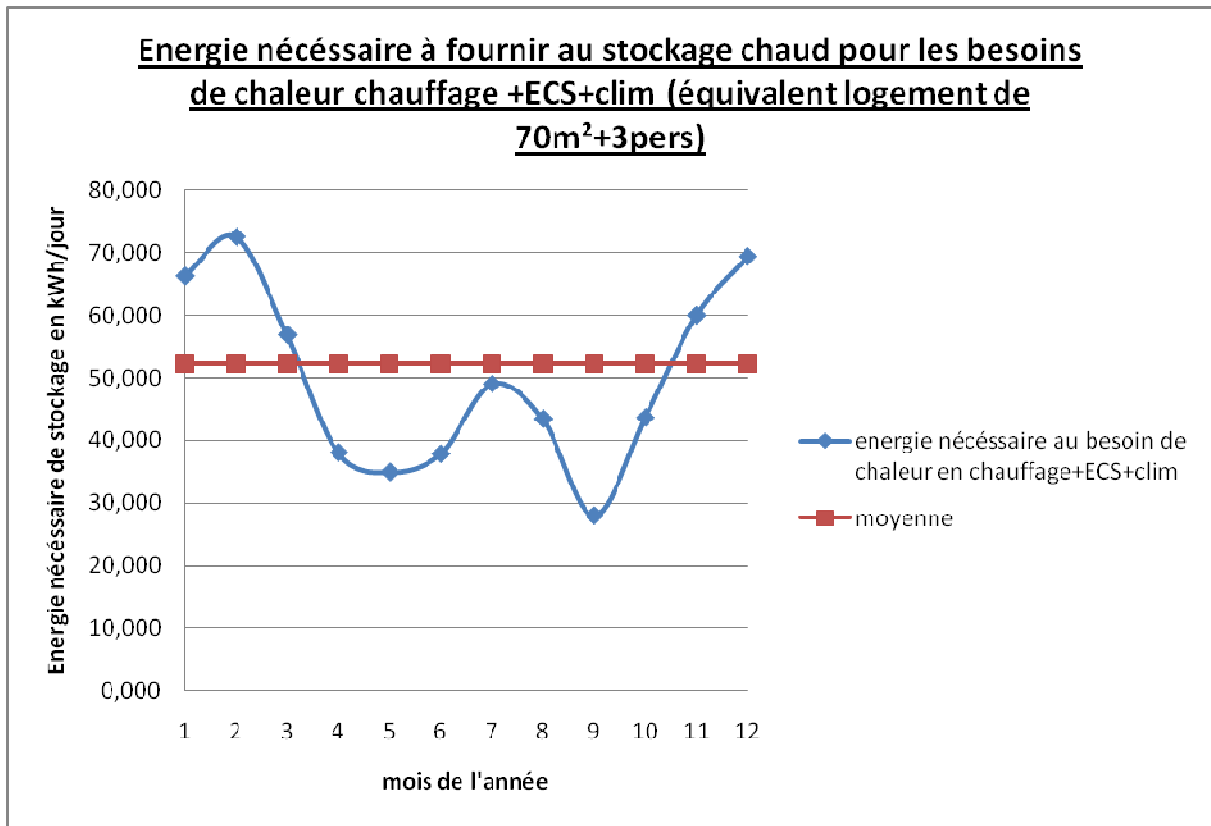
10.1.2 Calcul des besoins pour la solution avec stockage et la solution de référence

Etude de cas n°1: Habitat		MARSEILLE									
Besoins utilisateur		Courbes DJU (afin de calculer les moyennes journalière/mois des besoins)									
Chauffage+ECS-FROID											
Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage chaud(°C)		Température d'utilisation(°C)	Pic maximum de besoin moyen de chauffage d'un jour dans le mois(KWh/m²/jour)	Pic maximum de besoin moyen de clim d'un jour dans le mois(KWh/m²/jour)	Besoin en ECS/personne (kWh/jour/pers)	Besoin max par jour que le stock chaud doit fournir kWh/jour (pour 70m²*3pers) en chauffage+clim (COP)	Besoin max par jour que le stock froid doit fournir kWh/jour (pour 70m²)	Besoin de stockage nécessaire (rendement de stockage= 0,8)	
		Minimale	Maximale								
Hiver	Janvier	90	110	70/90	0,645	0,00	2,613	53,020	0,000	66,275	
Hiver	Février	90	110	70/90	0,717	0,00	2,613	58,041	0,000	72,551	
intersaison	Mars	90	110	70/90	0,538	0,00	2,613	45,490	0,000	56,862	
intersaison	Avril	100	120	100/120	0,323	0,00	2,613	30,429	0,000	38,036	
intersaison/été	Mai	100	120	100/120	0,287	0,00	2,613	27,919	0,000	34,898	
été	Juin	100	130	100/120	0,000	-0,18	2,613	30,250	-12,551	37,812	
été	juillet	100	130	100/120	0,000	-0,25	2,613	39,214	-17,571	49,018	
été	Aout	100	130	100/120	0,000	-0,22	2,613	34,732	-15,061	43,415	
intersaison	Septembre	100	120	100/120	0,143	-0,04	2,613	22,361	-2,510	27,951	
intersaison/Hiver	Octobre	100	120	100/120	0,323	-0,04	2,613	34,911	-2,510	43,639	
Hiver	Novembre	90	110	70/90	0,574	0,00	2,613	48,000	0,000	60,000	
Hiver	Décembre	90	110	70/90	0,681	0,00	2,613	55,530	0,000	69,413	
70°C/90°C pour le chauffage uniquement l'hiver										max	72,551
100°C mini intersaison et été pour alimenter le groupe à absorption										min	27,951
										moyenne	52,181
										Emoy à retenir(kWh/jr pour 70m²*3pers	52,181
										Puissance du stockage 12 h de charge (kW)	4,348

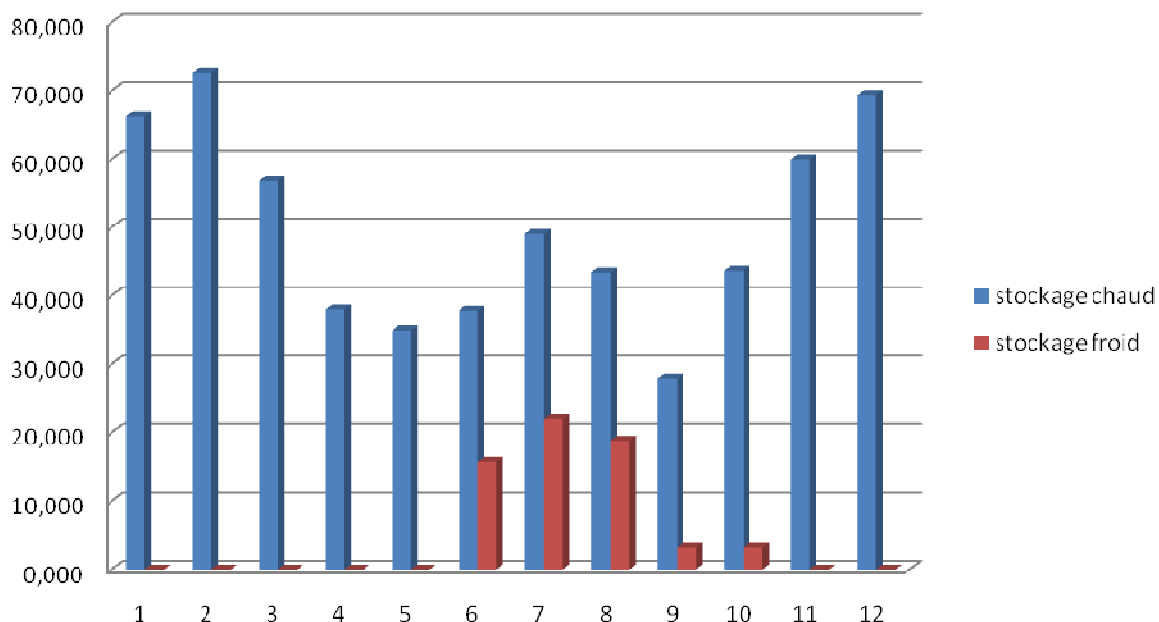
Source de chaleur solution chaudière gaz

Période de l'année	Mois de l'année	Besoins chauffage+clim (kWh/70m²/jour) +3 pers ECS	besoin en comb (m³/jour)chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kWh/m³) avec ECS pour 70m² 3pers	besoin en comb (m³/mois)chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kWh/m³)	Emission de CO2 kgCO2/mois(gaz=234g/kWh)	Coût en gaz par mois (0,616 euros/m³)	Coût en gaz par jour/mois(0,616 euros/m³)
Hiver	Janvier	53,020	5,870297826	181,9792326	12,40675313	112,099	3,616
Hiver	Février	58,041	6,400034294	179,2009602	13,58150625	110,388	3,942
intersaison	Mars	45,490	5,075693125	157,3464869	10,64462344	96,925	3,127
intersaison	Avril	30,429	3,486483724	104,5945117	7,120364063	64,430	2,148
intersaison/été	Mai	27,919	3,22161549	99,87008019	6,5329875	61,520	1,985
été	Juin	30,250	3,467564564	104,0269369	7,078408594	64,081	2,136
été	juillet	39,214	4,413522541	136,8191988	9,176182031	84,281	2,719
été	Aout	34,732	3,940543553	122,1568501	8,127295313	75,249	2,427
intersaison	Septembre	22,361	2,635121544	79,05364633	5,232367969	48,697	1,623
intersaison/Hiver	Octobre	34,911	3,959462712	122,7433441	8,169250781	75,610	2,439
Hiver	Novembre	48,000	5,340561353	160,2168408	11,232	98,694	3,290
Hiver	Décembre	55,530	6,13516806	190,1901479	12,99412969	117,157	3,779
TOTAL AN		14571,64219	-	1638,198237	112,2958688	1009,130	
Puissance de la chaudière(kW)		4,837					

10.1.3 Analyse Graphique



Energie (kWh/jour) nécessaire au stockage chaud et froid pour les besoins d'un équivalent logement de 70m²/3pers en chauffage+ECS+Clim



10.2 Etude de cas Habitat- ville de Lyon

10.2.1 Tableaux de données météorologiques et de calcul des DJU

2010	Température (°C)			DJU chauffage (base 18°C)	DJU clim (base 22°C)	Besoin en chauffage en kWh/m ²	besoin en ECS/par personne (50l/jr) à Tstock=55°C	Besoin en clim en kWh/m ² (valeur négative)
	high	avg	low					
Jan								
1	7	4	2	14	18	0,502	2,615625	0,645
2	3	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
3	1	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
4	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
5	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
6	2	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
7	1	-4	-8	22	26	0,789	2,615625	0,932
8	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
9	-2	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
10	-1	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
11	-1	-3	-6	21	25	0,753	2,615625	0,896
12	4	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
13	7	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
14	5	2	0	16	20	0,574	2,615625	0,717
15	5	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
16	9	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
17	10	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574

18	9	4	0	14	18	0,502	2,615625	0,645
19	1	-1	-3	19	23	0,681	2,615625	0,825
20	4	1	-2	17	21	0,610	2,615625	0,753
21	8	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
22	3	0	-2	18	22	0,645	2,615625	0,789
23	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
24	7	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
25	5	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
26	3	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
27	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
28	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
29	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
30	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
31	2	-1	-4	19	23	0,681	2,615625	0,825
somme				537	661	19,256	81,084375	23,703
fév	high	avg	low					
1	4	-1	-6	19	23	0,681	2,615625	0,825
2	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
3	10	5	-1	13	17	0,466	2,615625	0,610
4	11	3	-3	15	19	0,538	2,615625	0,681
5	8	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
6	9	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
7	6	4	4	14	18	0,502	2,615625	0,645
8	6	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
9	2	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
10	1	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
11	-3	-4	-6	22	26	0,789	2,615625	0,932
12	0	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
13	-1	-3	-5	21	25	0,753	2,615625	0,896
14	-1	-2	-2	20	24	0,717	2,615625	0,861
15	1	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
16	3	-2	-6	20	24	0,717	2,615625	0,861
17	9	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
18	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
19	7	6	4	12	16	0,430	2,615625	0,574
20	9	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
21	11	6	0	12	16	0,430	2,615625	0,574
22	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
23	12	10	9	8	12	0,287	2,615625	0,430
24	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
25	13	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
26	14	9	4	9	13	0,323	2,615625	0,466
27	13	7	1	11	15	0,394	2,615625	0,538
28	17	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
somme				395	507	14,164	73,2375	18,181
Mar	high	avg	low					
1	13	7	0	11	15	0,394	2,615625	0,538
2	15	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
3	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
4	6	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
5	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
6	6	1	-3	17	21	0,610	2,615625	0,753
7	1	-1	-3	19	23	0,681	2,615625	0,825
8	7	2	-3	16	20	0,574	2,615625	0,717

9	3	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
10	1	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
11	2	0	-2	18	22	0,645	2,615625	0,789
12	7	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
13	9	2	-4	16	20	0,574	2,615625	0,717
14	8	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
15	12	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
16	13	6	-1	12	16	0,430	2,615625	0,574
17	19	9	0	9	13	0,323	2,615625	0,466
18	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
19	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	16	13	12	5	9	0,179	2,615625	0,323
21	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
22	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
23	18	10	3	8	12	0,287	2,615625	0,430
24	20	15	10	3	7	0,108	2,615625	0,251
25	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
26	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
27	12	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
28	15	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
29	19	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
30	14	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
31	14	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
somme				330	454	11,834	81,084375	16,280
avr	high	avg	low					
1	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
2	15	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
3	14	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
4	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
5	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
6	20	11	2	7	11	0,251	2,615625	0,394
7	17	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
8	11	9	8	9	13	0,323	2,615625	0,466
9	16	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
10	18	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
11	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
12	11	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
13	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
14	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
15	16	11	6	7	11	0,251	2,615625	0,394
16	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
17	19	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
18	21	13	6	5	9	0,179	2,615625	0,323
19	22	14	7	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	21	14	9	4	8	0,143	2,615625	0,287
21	23	14	7	4	8	0,143	2,615625	0,287
22	22	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
23	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
24	24	16	8	2	6	0,072	2,615625	0,215
25	25	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
26	22	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
27	23	17	12	1	5	0,036	2,615625	0,179
28	26	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
29	25	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108

30	20	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
somme				153	269	5,486	78,46875	9,646
mai	high	avg	low					
1	16	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
2	15	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
3	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
4	12	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
5	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
6	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
7	16	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
8	18	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
9	17	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
10	21	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
11	17	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
12	15	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
13	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
14	13	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
15	13	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
16	16	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
17	17	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
18	19	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
19	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
21	22	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
22	24	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
23	26	18	11	0	4	0,000	2,615625	0,143
24	29	21	13	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
25	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
26	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
27	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
28	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
29	24	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
30	23	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
31	20	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
somme				119	243	4,267	81,084375	8,714
juin	high	avg	low					
1	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
2	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
3	23	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
4	26	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
5	30	23	16	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
6	28	22	17	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
7	25	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
8	24	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
9	25	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
10	29	24	19	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
11	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
12	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
13	24	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
14	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
15	19	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
16	20	18	16	0	4	0,000	2,615625	0,143
17	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
18	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143

19	17	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	17	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
21	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
22	21	16	10	2	6	0,072	2,615625	0,215
23	25	18	11	0	4	0,000	2,615625	0,143
24	27	20	14	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
25	29	21	14	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
26	30	22	15	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
27	30	23	17	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
28	31	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
29	30	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
30	30	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
somme				-41	79	-1,470	78,46875	2,833
juil	high	avg	low					
1	33	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
2	34	28	22	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
3	32	26	20	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
4	29	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
5	29	26	22	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
6	27	23	20	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
7	30	23	17	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
8	35	26	17	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
9	34	28	22	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
10	34	28	22	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
11	34	27	21	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
12	34	27	20	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
13	32	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
14	35	28	22	-10	-6	-0,359	2,615625	-0,215
15	29	24	21	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
16	32	24	17	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
17	24	21	19	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
18	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
19	30	22	15	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
20	35	27	18	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
21	32	26	21	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
22	22	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
23	23	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
24	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
25	25	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
26	25	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
27	24	21	18	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
28	29	22	15	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
29	23	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
30	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
31	28	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
somme				-172	-48	-6,168	81,084375	-1,721
août	high	avg	low					
1	32	24	17	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
2	22	20	18	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
3	25	21	18	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
4	26	20	14	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
5	22	19	16	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
6	23	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
7	26	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108

8	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
9	30	22	15	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
10	29	24	19	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
11	28	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
12	25	22	19	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
13	25	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
14	23	19	16	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
15	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
16	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
17	25	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
18	24	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
19	29	21	14	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
20	29	24	20	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
21	32	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
22	33	24	17	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
23	32	27	22	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
24	27	22	18	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
25	29	21	13	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
26	35	26	17	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
27	30	25	20	-7	-3	-0,251	2,615625	-0,108
28	23	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
29	23	17	10	1	5	0,036	2,615625	0,179
30	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
31	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
somme				-89	35	-3,191	81,084375	1,255
Sep	high	avg	low					
1	24	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
2	27	18	10	0	4	0,000	2,615625	0,143
3	27	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
4	27	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
5	26	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
6	29	21	14	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
7	23	19	16	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
8	23	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
9	21	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
10	23	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
11	25	18	11	0	4	0,000	2,615625	0,143
12	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
13	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
14	22	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
15	26	18	10	0	4	0,000	2,615625	0,143
16	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
17	20	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
18	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
19	19	14	9	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	25	17	8	1	5	0,036	2,615625	0,179
21	25	18	10	0	4	0,000	2,615625	0,143
22	26	18	11	0	4	0,000	2,615625	0,143
23	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
24	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
25	16	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
26	13	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
27	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
28	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430

29	18	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
30	16	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
somme				46	166	1,650	78,46875	5,953
Oct	high	avg	low					
1	20	14	8	4	8	0,143	2,615625	0,287
2	24	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
3	25	21	18	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
4	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
5	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
6	23	17	10	1	5	0,036	2,615625	0,179
7	24	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
8	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
9	24	19	14	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
10	19	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
11	16	13	12	5	9	0,179	2,615625	0,323
12	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
13	14	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
14	13	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
15	11	9	8	9	13	0,323	2,615625	0,466
16	11	10	9	8	12	0,287	2,615625	0,430
17	10	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
18	10	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
19	11	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
20	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
21	11	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
22	18	9	1	9	13	0,323	2,615625	0,466
23	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
24	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
25	9	7	6	11	15	0,394	2,615625	0,538
26	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
27	13	7	1	11	15	0,394	2,615625	0,538
28	16	9	2	9	13	0,323	2,615625	0,466
29	19	10	2	8	12	0,287	2,615625	0,430
30	16	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
31	13	11	10	7	11	0,251	2,615625	0,394
somme				180	304	6,455	81,084375	10,901
Nov	high	avg	low					
1	17	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
2	13	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
3	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
4	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
5	17	16	14	2	6	0,072	2,615625	0,215
6	17	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
7	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
8	9	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
9	11	9	8	9	13	0,323	2,615625	0,466
10	12	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
11	11	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
12	16	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
13	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
14	19	17	16	1	5	0,036	2,615625	0,179
15	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
16	9	8	7	10	14	0,359	2,615625	0,502
17	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502

18	11	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
19	13	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
20	11	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
21	10	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
22	7	6	5	12	16	0,430	2,615625	0,574
23	6	4	4	14	18	0,502	2,615625	0,645
24	7	4	2	14	18	0,502	2,615625	0,645
25	5	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
26	3	0	-2	18	22	0,645	2,615625	0,789
27	5	1	-3	17	21	0,610	2,615625	0,753
28	4	2	0	16	20	0,574	2,615625	0,717
29	7	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
30	-1	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
somme				297	417	10,650	78,46875	14,953
déc	high	avg	low					
1	0	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
2	2	-3	-8	21	25	0,753	2,615625	0,896
3	0	-4	-8	22	26	0,789	2,615625	0,932
4	2	-3	-7	21	25	0,753	2,615625	0,896
5	6	0	-5	18	22	0,645	2,615625	0,789
6	14	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
7	15	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
8	18	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
9	12	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
10	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
11	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
12	5	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
13	3	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
14	-1	-3	-5	21	25	0,753	2,615625	0,896
15	-2	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
16	0	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
17	3	-1	-5	19	23	0,681	2,615625	0,825
18	2	-3	-8	21	25	0,753	2,615625	0,896
19	8	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
20	10	8	7	10	14	0,359	2,615625	0,502
21	10	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
22	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
23	11	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
24	4	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
25	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
26	0	-3	-6	21	25	0,753	2,615625	0,896
27	-2	-4	-6	22	26	0,789	2,615625	0,932
28	8	3	-2	15	19	0,538	2,615625	0,681
29	6	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
30	10	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
31	6	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
somme				470	590	16,854	81,084375	21,157

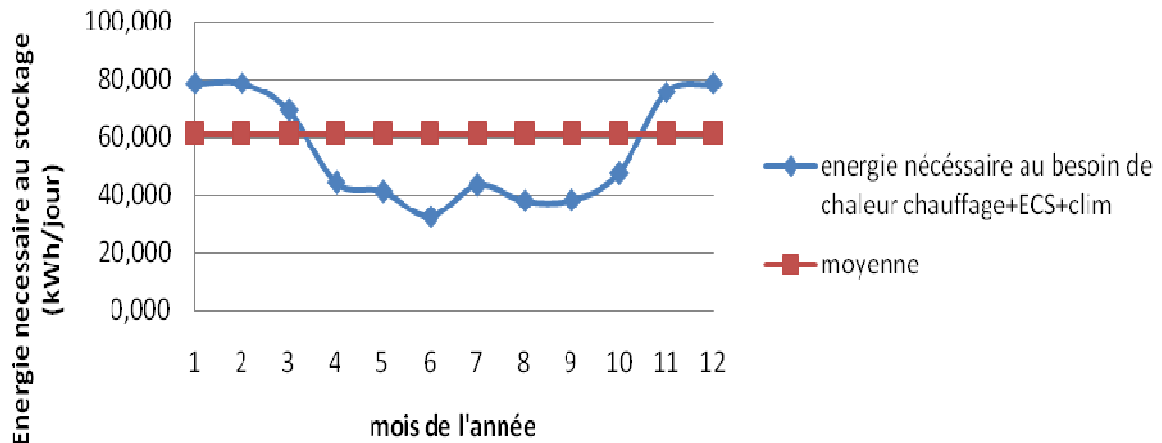
10.2.2 Calcul des besoins pour la solution avec stockage et la solution de référence

Etude de cas n°1: Habitat		LYON									
Besoins utilisateur		Courbes DJU (afin de calculer les moyennes journalière/mois des besoins)									
Chauffage+ECS+FROID											
Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage chaud(°C)		Température d'utilisation(°C)	Pic maximum de besoin moyen de chauffage d'un jour dans le mois(KWh/m²/jour)	Pic maximum de besoin moyen de clim d'un jour dans le mois(KWh/m²/jour)	Besoin en ECS/personne (kWh/jour/pers)	Besoin max par jour que le stock chaud doit fournir kWh/jour (pour 70m²*3pers) en chauffage	Besoin max par jour que le stock froid doit fournir kWh/jour (pour 70m²)	Besoin de stockage nécessaire (rendement de stockage= 0,8)	
		Minimale	Maximale								
Hiver	Janvier	90	110	70/90	0,789	0,00	2,613	63,061	0,000	78,826	
Hiver	Février	90	110	70/90	0,789	0,00	2,613	63,061	0,000	78,826	
intersaison	Mars	90	110	70/90	0,681	0,00	2,613	55,530	0,000	69,413	
intersaison	Avril	100	120	100/120	0,394	0,00	2,613	35,449	0,000	44,312	
intersaison/été	Mai	100	120	100/120	0,359	0,00	2,613	32,939	0,000	41,174	
été	Juin	100	130	100/120	0,000	-0,14	2,613	25,767	-10,041	32,209	
été	juillet	100	130	100/120	0,000	-0,22	2,613	34,732	-15,061	43,415	
été	Aout	100	130	100/120	0,000	-0,18	2,613	30,250	-12,551	37,812	
intersaison	Septembre	100	120	100/120	0,323	0,00	2,613	30,429	0,000	38,036	
intersaison/Hiver	Octobre	100	120	100/120	0,430	0,00	2,613	37,959	0,000	47,449	
Hiver	Novembre	90	110	70/90	0,753	0,00	2,613	60,551	0,000	75,688	
Hiver	Décembre	90	110	70/90	0,789	0,00	2,613	63,061	0,000	78,826	
70°C/90°C pour le chauffage uniquement l'hiver										max	78,826
100°C mini intersaison et été pour alimenter le groupe à absorption										min	38,036
										moyenne	61,395
										Emog A retenir(kWh/jr) pour 70m²/3pers	61,395
										Puissance du stockage 12 h de charge (kW)	5,116

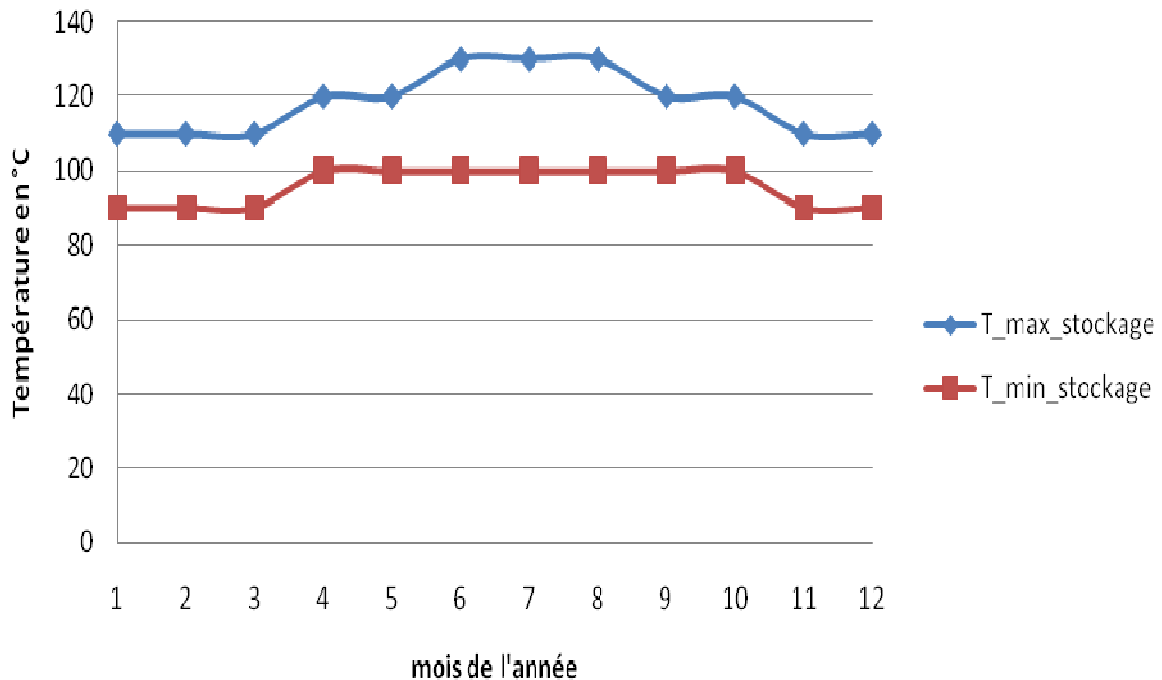
Source de chaleur solution chaudière gaz								
Période de l'année	Mois de l'année	Besoins chauffage+clim (kWh/70m²/jour) +3 pers ECS	besoin en comb (m³/jour/chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kWh/m³) avec ECS pour 70m² 3pers	besoin en comb (m³/mois)chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kWh/m³)	Emission de CO2 kgCO2 (gaz=234g/kWh)	Coût en gaz par mois (0,616 euros/m³)	Coût en gaz par jour/mois(0,616 euros/m³)	
Hiver	Janvier	63,061	6,929770761	214,8228936	14,75625938	132,331	4,269	
Hiver	Février	63,061	6,929770761	194,0335813	14,75625938	119,525	4,269	
intersaison	Mars	55,530	6,13516606	190,1901479	12,99412969	117,157	3,779	
intersaison	Avril	35,449	4,016220191	120,4866057	8,295117188	74,220	2,474	
intersaison/été	Mai	32,939	3,751351957	116,2919107	7,707740625	71,636	2,311	
été	Juin	25,767	2,994585576	89,83756727	6,029521875	55,340	1,845	
été	juillet	34,732	3,940543553	122,1568501	8,127295313	75,249	2,427	
été	Aout	30,250	3,467564564	107,4945015	7,078408594	66,217	2,136	
intersaison	Septembre	30,429	3,486483724	104,5945117	7,120364063	64,430	2,148	
intersaison/Hiver	Octobre	37,959	4,281088425	132,7137412	8,88249375	81,752	2,637	
Hiver	Novembre	60,551	6,664902527	199,9470758	14,16888281	123,167	4,106	
Hiver	Décembre	63,061	6,929770761	214,8228936	14,75625938	132,331	4,269	
TOTAL AN		16175,09414	-	1807,39228	124,672732	1113,354		
Puissance max de la chaudière(kW)		5,255						

10.2.3 Analyse Graphique

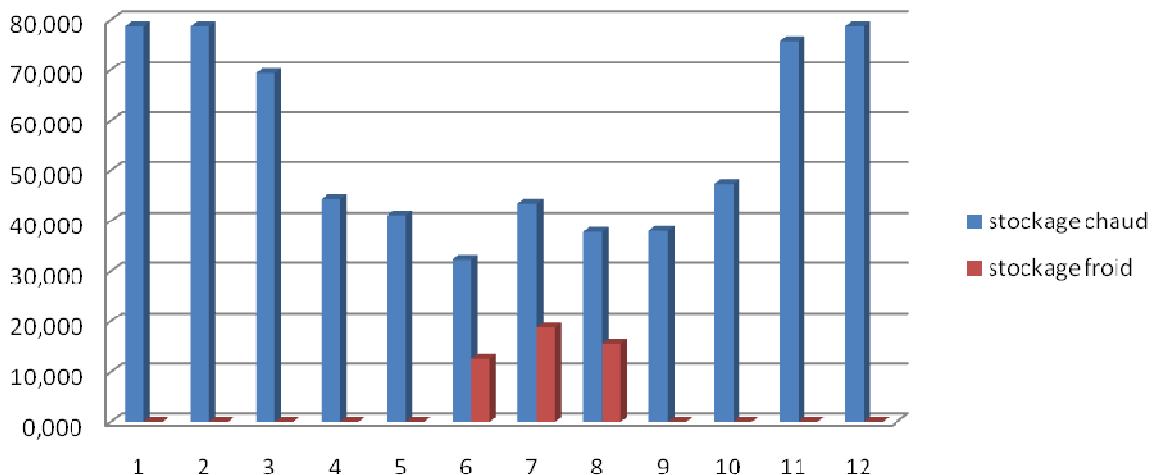
energie nécessaire à fournir au stockage chaud pour les besoins de chaleur chauffage+ECS+clim (équivalent logement de 70m²+3 pers)



Température maximale et minimale de stockage en fonction de la saison



Energie necessaire au stockage chaud et froid pour les besoins d'un équivalent logement de 70m²/3pers en chauffage+ECS+Clim



10.3 Etude de cas Habitat- ville de Lille

10.3.1 Tableaux de données météorologiques et de calcul des DJU

2010	Température (°C)			DJU chauffage (base 18°C)	DJU clim (base 22°C)	Besoin en chauffage en kWh/m²	besoin en ECS/par personne (50l/jr) à Tstock=55°C	Besoin en clim en kWh/m² (valeur négative)
	high	avg	low					
Jan								
1	2	-1	-3	19	23	0,681	2,615625	0,825
2	2	-1	-4	19	23	0,681	2,615625	0,825
3	1	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
4	-1	-4	-8	22	26	0,789	2,615625	0,932
5	3	-2	-7	20	24	0,717	2,615625	0,861
6	-3	-6	-7	24	28	0,861	2,615625	1,004
7	-3	-6	-8	24	28	0,861	2,615625	1,004
8	-3	-6	-7	24	28	0,861	2,615625	1,004
9	-1	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
10	0	-1	-1	19	23	0,681	2,615625	0,825
11	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
12	0	-1	-1	19	23	0,681	2,615625	0,825
13	1	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
14	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
15	2	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
16	4	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717
17	9	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
18	9	6	3	12	16	0,430	2,615625	0,574
19	5	4	2	14	18	0,502	2,615625	0,645
20	3	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717

21	4	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
22	5	2	0	16	20	0,574	2,615625	0,717
23	4	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
24	5	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
25	3	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
26	0	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
27	4	-2	-7	20	24	0,717	2,615625	0,861
28	5	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
29	4	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717
30	3	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
31	4	0	-4	18	22	0,645	2,615625	0,789
somme				556	680	19,938	81,084375	24,384
fév	high	avg	low					
1	4	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
2	8	3	-1	15	19	0,538	2,615625	0,681
3	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
4	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
5	9	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
6	8	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
7	4	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
8	4	1	-2	17	21	0,610	2,615625	0,753
9	-1	-3	-4	21	25	0,753	2,615625	0,896
10	0	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
11	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
12	1	-3	-6	21	25	0,753	2,615625	0,896
13	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
14	3	-2	-6	20	24	0,717	2,615625	0,861
15	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
16	3	0	-2	18	22	0,645	2,615625	0,789
17	2	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
18	7	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
19	5	2	0	16	20	0,574	2,615625	0,717
20	6	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
21	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
22	10	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
23	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
24	11	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
25	10	9	8	9	13	0,323	2,615625	0,466
26	10	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
27	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
28	10	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
somme				431	543	15,455	73,2375	19,472
Mar	high	avg	low					
1	10	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
2	10	4	-1	14	18	0,502	2,615625	0,645
3	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
4	6	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
5	6	1	-3	17	21	0,610	2,615625	0,753
6	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
7	3	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
8	3	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
9	4	0	-3	18	22	0,645	2,615625	0,789
10	7	2	-2	16	20	0,574	2,615625	0,717
11	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717

12	6	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
13	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
14	9	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
15	12	7	2	11	15	0,394	2,615625	0,538
16	12	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
17	15	8	2	10	14	0,359	2,615625	0,502
18	19	11	4	7	11	0,251	2,615625	0,394
19	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
20	17	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
21	12	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
22	13	7	2	11	15	0,394	2,615625	0,538
23	15	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
24	19	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
25	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
26	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
27	12	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
28	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
29	16	12	9	6	10	0,215	2,615625	0,359
30	14	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
31	9	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
somme				347	471	12,443	81,084375	16,890
avr	high	avg	low					
1	11	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
2	10	6	2	12	16	0,430	2,615625	0,574
3	12	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
4	11	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
5	13	8	3	10	14	0,359	2,615625	0,502
6	17	10	4	8	12	0,287	2,615625	0,430
7	18	12	6	6	10	0,215	2,615625	0,359
8	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
9	16	9	2	9	13	0,323	2,615625	0,466
10	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
11	12	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
12	14	9	4	9	13	0,323	2,615625	0,466
13	16	11	6	7	11	0,251	2,615625	0,394
14	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
15	16	10	5	8	12	0,287	2,615625	0,430
16	12	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
17	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
18	19	10	2	8	12	0,287	2,615625	0,430
19	16	10	4	8	12	0,287	2,615625	0,430
20	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
21	12	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
22	12	6	1	12	16	0,430	2,615625	0,574
23	16	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
24	22	12	3	6	10	0,215	2,615625	0,359
25	21	14	8	4	8	0,143	2,615625	0,287
26	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
27	20	12	5	6	10	0,215	2,615625	0,359
28	24	16	8	2	6	0,072	2,615625	0,215
29	27	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
30	16	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
somme				238	354	8,535	78,46875	12,694
mai	high	avg	low					

1	16	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
2	14	11	7	7	11	0,251	2,615625	0,394
3	8	7	6	11	15	0,394	2,615625	0,538
4	11	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
5	12	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
6	13	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
7	11	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
8	13	8	3	10	14	0,359	2,615625	0,502
9	14	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
10	12	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
11	9	7	5	11	15	0,394	2,615625	0,538
12	9	7	5	11	15	0,394	2,615625	0,538
13	11	8	6	10	14	0,359	2,615625	0,502
14	14	8	2	10	14	0,359	2,615625	0,502
15	15	9	3	9	13	0,323	2,615625	0,466
16	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
17	17	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
18	18	11	5	7	11	0,251	2,615625	0,394
19	19	11	3	7	11	0,251	2,615625	0,394
20	22	13	5	5	9	0,179	2,615625	0,323
21	22	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
22	22	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
23	26	18	10	0	4	0,000	2,615625	0,143
24	27	19	11	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
25	24	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
26	17	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323
27	17	13	10	5	9	0,179	2,615625	0,323
28	19	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
29	20	13	7	5	9	0,179	2,615625	0,323
30	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
31	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
somme				207	331	7,423	81,084375	11,869
juin	high	avg	low					
1	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
2	20	15	10	3	7	0,108	2,615625	0,251
3	23	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
4	26	19	12	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
5	28	20	12	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
6	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
7	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
8	22	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
9	19	17	15	1	5	0,036	2,615625	0,179
10	20	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
11	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
12	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
13	18	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
14	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
15	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
16	22	16	9	2	6	0,072	2,615625	0,215
17	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
18	18	14	12	4	8	0,143	2,615625	0,287
19	15	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
20	14	11	9	7	11	0,251	2,615625	0,394
21	18	13	9	5	9	0,179	2,615625	0,323

22	23	16	8	2	6	0,072	2,615625	0,215
23	27	19	11	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
24	27	20	13	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
25	26	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
26	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
27	30	22	15	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
28	29	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
29	26	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
30	28	21	15	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
somme				32	152	1,148	78,46875	5,451
juil	high	avg	low					
1	31	23	15	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
2	34	27	19	-9	-5	-0,323	2,615625	-0,179
3	23	21	19	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
4	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
5	24	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
6	23	17	12	1	5	0,036	2,615625	0,179
7	28	19	11	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
8	32	23	15	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
9	33	26	19	-8	-4	-0,287	2,615625	-0,143
10	31	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
11	30	24	18	-6	-2	-0,215	2,615625	-0,072
12	24	21	18	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
13	28	22	16	-4	0	-0,143	2,615625	0,000
14	26	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
15	24	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
16	22	19	17	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
17	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
18	25	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
19	29	21	13	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
20	31	23	16	-5	-1	-0,179	2,615625	-0,036
21	25	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
22	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
23	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
24	23	17	11	1	5	0,036	2,615625	0,179
25	21	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
26	21	19	17	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
27	23	19	15	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
28	24	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
29	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
30	25	19	13	-1	3	-0,036	2,615625	0,108
31	25	20	16	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
somme				-71	53	-2,546	81,084375	1,901
août	high	avg	low					
1	22	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
2	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
3	24	18	12	0	4	0,000	2,615625	0,143
4	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
5	20	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
6	23	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
7	25	20	15	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
8	21	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
9	24	17	10	1	5	0,036	2,615625	0,179
10	22	17	12	1	5	0,036	2,615625	0,179

11	23	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
12	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
13	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
14	21	16	10	2	6	0,072	2,615625	0,215
15	18	17	16	1	5	0,036	2,615625	0,179
16	16	16	15	2	6	0,072	2,615625	0,215
17	17	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
18	20	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
19	22	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
20	29	21	14	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
21	27	21	16	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
22	25	21	17	-3	1	-0,108	2,615625	0,036
23	23	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
24	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
25	20	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
26	23	20	17	-2	2	-0,072	2,615625	0,072
27	19	17	15	1	5	0,036	2,615625	0,179
28	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
29	18	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
30	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
31	20	14	8	4	8	0,143	2,615625	0,287
somme				21	145	0,753	81,084375	5,200
Sep	high	avg	low					
1	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
2	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
3	20	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
4	19	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
5	21	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
6	21	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
7	22	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
8	16	14	14	4	8	0,143	2,615625	0,287
9	21	17	14	1	5	0,036	2,615625	0,179
10	20	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
11	24	18	13	0	4	0,000	2,615625	0,143
12	19	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
13	19	14	9	4	8	0,143	2,615625	0,287
14	19	17	16	1	5	0,036	2,615625	0,179
15	18	14	11	4	8	0,143	2,615625	0,287
16	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
17	16	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
18	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
19	19	13	8	5	9	0,179	2,615625	0,323
20	21	16	10	2	6	0,072	2,615625	0,215
21	22	16	10	2	6	0,072	2,615625	0,215
22	24	17	9	1	5	0,036	2,615625	0,179
23	20	17	13	1	5	0,036	2,615625	0,179
24	18	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
25	14	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
26	14	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
27	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
28	15	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
29	17	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
30	17	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
somme				98	218	3,514	78,46875	7,817

Oct	high	avg	low					
1	17	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
2	18	16	13	2	6	0,072	2,615625	0,215
3	23	18	14	0	4	0,000	2,615625	0,143
4	22	18	15	0	4	0,000	2,615625	0,143
5	18	16	14	2	6	0,072	2,615625	0,215
6	17	16	14	2	6	0,072	2,615625	0,215
7	18	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
8	21	16	12	2	6	0,072	2,615625	0,215
9	22	16	11	2	6	0,072	2,615625	0,215
10	19	14	10	4	8	0,143	2,615625	0,287
11	17	12	7	6	10	0,215	2,615625	0,359
12	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
13	12	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
14	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
15	13	11	10	7	11	0,251	2,615625	0,394
16	13	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
17	11	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
18	14	7	0	11	15	0,394	2,615625	0,538
19	13	10	8	8	12	0,287	2,615625	0,430
20	10	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
21	11	6	0	12	16	0,430	2,615625	0,574
22	11	8	5	10	14	0,359	2,615625	0,502
23	9	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
24	11	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
25	11	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
26	10	5	0	13	17	0,466	2,615625	0,610
27	12	9	7	9	13	0,323	2,615625	0,466
28	14	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
29	16	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
30	15	12	8	6	10	0,215	2,615625	0,359
31	15	11	8	7	11	0,251	2,615625	0,394
somme				214	338	7,674	81,084375	12,120
Nov	high	avg	low					
1	13	9	6	9	13	0,323	2,615625	0,466
2	14	9	5	9	13	0,323	2,615625	0,466
3	16	13	11	5	9	0,179	2,615625	0,323
4	16	16	14	2	6	0,072	2,615625	0,215
5	15	14	13	4	8	0,143	2,615625	0,287
6	15	10	6	8	12	0,287	2,615625	0,430
7	10	7	3	11	15	0,394	2,615625	0,538
8	7	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
9	9	7	5	11	15	0,394	2,615625	0,538
10	9	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538
11	14	7	1	11	15	0,394	2,615625	0,538
12	14	12	10	6	10	0,215	2,615625	0,359
13	14	12	11	6	10	0,215	2,615625	0,359
14	14	10	7	8	12	0,287	2,615625	0,430
15	12	8	4	10	14	0,359	2,615625	0,502
16	5	2	0	16	20	0,574	2,615625	0,717
17	6	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
18	7	6	4	12	16	0,430	2,615625	0,574
19	8	7	6	11	15	0,394	2,615625	0,538
20	9	7	4	11	15	0,394	2,615625	0,538

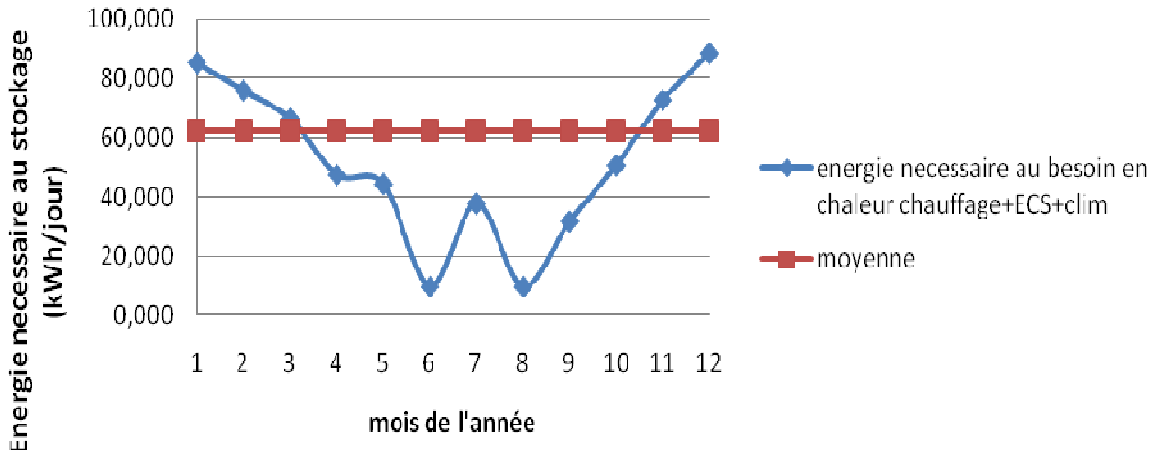
21	5	4	3	14	18	0,502	2,615625	0,645
22	5	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
23	6	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
24	6	3	1	15	19	0,538	2,615625	0,681
25	5	2	-1	16	20	0,574	2,615625	0,717
26	3	1	-1	17	21	0,610	2,615625	0,753
27	2	-1	-4	19	23	0,681	2,615625	0,825
28	2	-1	-4	19	23	0,681	2,615625	0,825
29	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
30	0	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
somme				360	480	12,909	78,46875	17,213
déc	high	avg	low					
1	-2	-3	-5	21	25	0,753	2,615625	0,896
2	-4	-6	-6	24	28	0,861	2,615625	1,004
3	-5	-7	-8	25	29	0,896	2,615625	1,040
4	2	-2	-6	20	24	0,717	2,615625	0,861
5	3	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717
6	0	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
7	-1	-2	-3	20	24	0,717	2,615625	0,861
8	1	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
9	3	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
10	6	3	2	15	19	0,538	2,615625	0,681
11	7	6	5	12	16	0,430	2,615625	0,574
12	8	4	1	14	18	0,502	2,615625	0,645
13	1	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
14	2	-1	-3	19	23	0,681	2,615625	0,825
15	4	-1	-5	19	23	0,681	2,615625	0,825
16	6	3	0	15	19	0,538	2,615625	0,681
17	0	-4	-8	22	26	0,789	2,615625	0,932
18	0	-5	-10	23	27	0,825	2,615625	0,968
19	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
20	0	-2	-5	20	24	0,717	2,615625	0,861
21	2	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
22	1	0	0	18	22	0,645	2,615625	0,789
23	1	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
24	0	-1	-1	19	23	0,681	2,615625	0,825
25	1	-2	-4	20	24	0,717	2,615625	0,861
26	1	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
27	0	-1	-2	19	23	0,681	2,615625	0,825
28	1	0	-1	18	22	0,645	2,615625	0,789
29	3	2	1	16	20	0,574	2,615625	0,717
30	2	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
31	3	1	0	17	21	0,610	2,615625	0,753
somme				561	681	20,117	81,084375	24,420

10.3.2 Calcul des besoins pour la solution avec stockage et la solution de référence

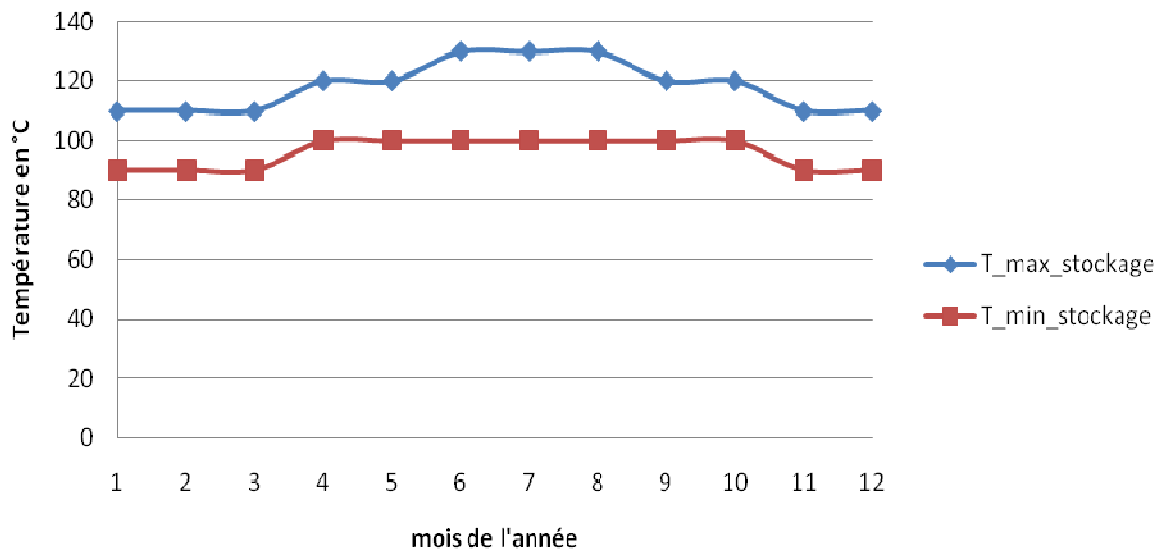
Etude de cas n°1: Habitat		LILLE									
Besoins utilisateur		Courbes DJU (afin de calculer les moyennes journalière/mois des besoins)									
Chauffage+ECS-FROID											
Période de l'année	Mois de l'année	Température du stockage		Température d'utilisation(°C)	Pic maximum de besoin moyen de chauffage d'un jour dans le mois(KVh/m²)	Pic maximum de besoin moyen de clim d'un jour dans le mois(KVh/m²)	Besoin en ECS/personne (kVhjour/pers)	Besoin max par jour que le stock chaud doit fournir kVhjour (pour 70m²*3pers) en chauffage ou Jet clim	Besoin max par jour que le stock froid doit fournir kVhjour (pour 70m²)	Besoin de stockage nécessaire (rendement de stockage= 0,8)	
		Minimale	Maximale								
Hiver	Janvier	90	110	70/90	0,861	0,00	2,613	68,081	0,000	85,102	
Hiver	Février	90	110	70/90	0,753	0,00	2,613	60,551	0,000	75,688	
intersaison	Mars	90	110	70/90	0,645	0,000	2,613	53,020	0,000	66,275	
intersaison	Avril	100	120	100/120	0,430	0,000	2,613	37,959	0,000	47,449	
intersaison/été	Mai	100	120	100/120	0,394	0,000	2,613	35,449	0,000	44,312	
été	Juin	100	130	100/120	0,000	0,000	2,613	7,838	0,000	9,797	
été	juillet	100	130	100/120	0,000	-0,179	2,613	30,250	-12,551	37,812	
été	Aout	100	130	100/120	0,000	0,000	2,613	7,838	0,000	9,797	
intersaison	Septembre	100	120	100/120	0,251	0,000	2,613	25,409	0,000	31,761	
intersaison/Hiver	Octobre	100	120	100/120	0,466	0,000	2,613	40,470	0,000	50,587	
Hiver	Novembre	90	110	70/90	0,717	0,00	2,613	58,041	0,000	72,551	
Hiver	Décembre	90	110	70/90	0,896	0,00	2,613	70,591	0,000	88,239	
70°C/90°C pour le chauffage uniquement l'hiver										max	88,239
100°C mini intersaison et été pour alimenter le groupe à absorption										min	31,761
										moyenne	62,440
										Emog A retenir(kVh/jr) pour 70m²/pers	62,440
										Puissance du stockage 12 h de charge (kW)	5,203
Source de chaleur solution chaudière gaz											
Période de l'année	Mois de l'année	Besoins chauffage+clim (kVh/70m²/jour) *3 pers ECS	besoin en comb (m³3/jour/m²)chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kVh/m³3) avec ECS pour 70m² 3pers		besoin en comb (m³3/mois/m²)chaudière gaz (η=90%;PCI=10,53 kVh/m³3)	Emission de CO2 kgCO2 (gaz=234g/kVh)	Coût en gaz par mois (0,616 euros/m³3)	Coût en gaz par jour/mois(0,616 euros/m³3)			
Hiver	Janvier	68,081	7,460		231,245	15,931	142,447	4,595			
Hiver	Février	60,551	6,665		186,617	14,169	114,956	4,106			
intersaison	Mars	53,020	5,870		181,979	12,407	112,099	3,616			
intersaison	Avril	37,959	4,281		128,433	8,882	79,115	2,637			
intersaison/été	Mai	35,449	4,016		124,503	8,295	76,694	2,474			
été	Juin	7,838	1,103		33,080	1,834	20,377	0,679			
été	juillet	30,250	3,468		107,495	7,078	66,217	2,136			
été	Aout	7,838	1,103		34,183	1,834	21,057	0,679			
intersaison	Septembre	25,409	2,957		88,702	5,946	54,641	1,821			
intersaison/Hiver	Octobre	40,470	4,546		140,925	9,470	86,810	2,800			
Hiver	Novembre	58,041	6,400		192,001	13,582	118,273	3,942			
Hiver	Décembre	70,591	7,724		239,456	16,518	147,505	4,758			
TOTAL AN		15049,46836	-		1688,617797	115,94599	1040,189				
Puissance de la chaudière(kW)		5,883									

10.3.3 Analyse Graphique

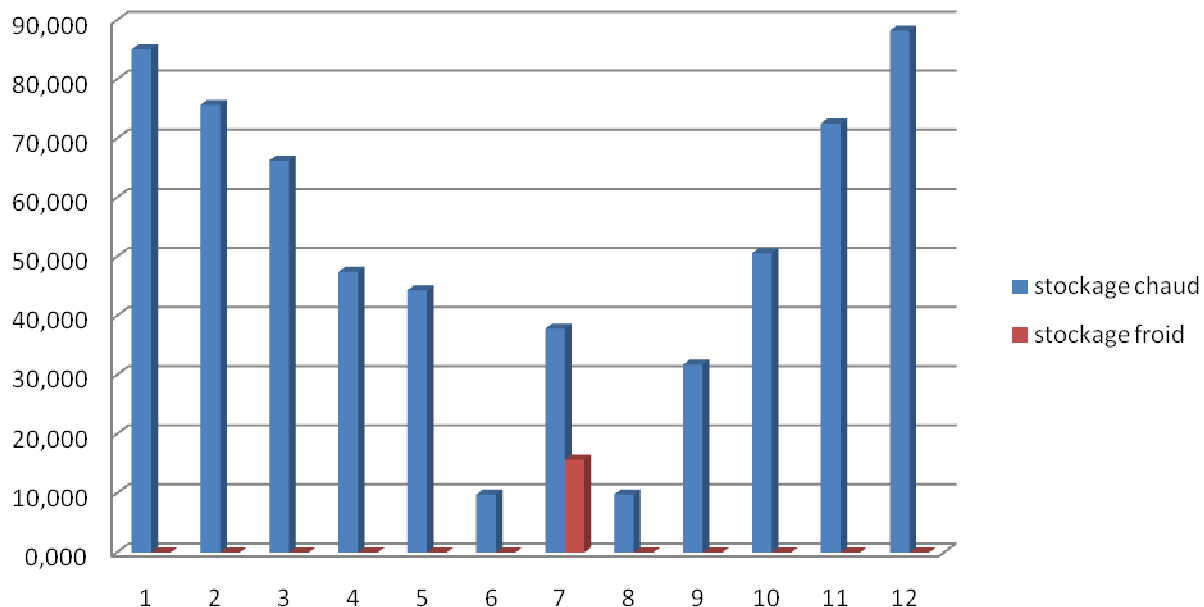
energie nécessaire à fournir au stockage chaud pour les besoins de chaleur chauffage+ECS+clim (équivalent logement de 70m²+3 pers)



Température maximale et minimale de stockage en fonction de la saison



Energie necessaire au stockage chaud et froid pour les besoins d'un équivalent logement de 70m²/3pers en chauffage+ECS+Clim



ANNEXE 21

« Tableaux des technologies de stockage thermique par type (sensible, latent et thermochimique/thermophysique) et par secteur (habitat/tertiaire, blanchisserie, sidérurgie) »

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	Type de stockage par chaleur...	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	conductivité thermique (W/m.K)	inconvénients technologique, environnemental et sécurité	avantages technologique, environnemental et sécurité	Coût (élevé/moyen/faible)	Niveau de développement	Durée de vie moyen du système (*classement de 0 à 4)	Mode de transport associés
Habitat/Tertiaire 90°C	Réservoir d'eau (WTES)	T<100°C	sensible liquide	1,16	0,6	limité à 100°C, pertes thermique du stock = cout d' isolation élevé	mise en œuvre et maîtrise de la technologie	faible	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Réservoir d'huile thermiques	50°C<T<400°C	sensible liquide	0,55	Environ 0,1	ICPE, recyclabilité, durée de vie, pertes thermique du stock = cout d'isolation élevé	Sous Pression atmosphérique, large spectre de température	moyen	mure mais peu utilisé	3	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Aquifer TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	sensible liquide	1,16	0,6	non pollution des aquiferes d'eau potable, forage	création d'une bulle thermique chaude et froide, pas d'isolation à réaliser	élevé (sonde+forage+page)	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Cavern TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	sensible liquide	1,16	0,6	caverne existante rare	peu de travail de construction, pas d'isolation à réaliser	faible (caverne existante)	mure mais peu utilisé	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Borehole TES	T<100°C	sensible solide	De 0,3 à 1 (suivant le type sol voir tableau matériau solide)	suivant la nature du sol (voir tableau matériau solide)	construction, pertes thermiques	création d'une bulle thermique	élevé (sonde+forage+page)	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	lit à garnissage solide (fluide de transfert eau ou huile)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de garnissage)	sensible solide	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	suivant le type de garnissage solide (voir tableau matériau solide)	recyclabilité (huile) et nettoyage du garnissage	large spectre de température	faible si solide=roche	mure	3	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	lit à garnissage avec MCP paraffine	T<100°C	latent	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	Environ 0,2	recyclabilité, durée de vie des paraffines, conductivité thermique faible	capacité thermique de stockage, stockage possible pour de faible différentiel de température	élevé	matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	2	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	lit à garnissage avec autres MCP (hydrates de sels, eutectiques)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de MCP)	latent	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	Environ 0,1	recyclabilité, durée de vie, conductivité thermique faible	capacité thermique de stockage, stockage possible pour de faible différentiel de température	élevé	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	2	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Stockage avec Matrice graphite/paraffine	T<100°C	latent	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	De 1 à 10 suivant le pourcentage de MCP/graphite	dégradations des propriétés des paraffines	conductivité thermique élevé, pas de problème de fuite du MCP	élevé	Prototype (DLR)-matériaux commercialisés	-	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Stockage avec MCP à transition solide/solide	40°C<T<180°C	latent	De 37 à 107 (DT de changement d'état)	De 0,2 à 0,9 (suivant la structure cristalline)	recyclabilité, mise en œuvre des matériaux	Bonne capacité thermique, faible dilatation volumique, pas de problème de confinement ou de fuite	élevé	Prototype-matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	-	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	CaCl ₂ +H ₂ O	60 à 80°C	reaction chimique endo/exo thermique	jusqu' plusieurs milliers kWh/m ³ suivant les réactions voir onglet propriétés d'e stockage thermochimique	-	matériaux	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	Prototype de recherche	-	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	CaSO ₄ +H ₂ O	100°C	reaction chimique endo/exo thermique	jusqu' plusieurs milliers kWh/m ³ suivant les réactions voir onglet propriétés d'e stockage thermochimique	-	matériaux	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	Prototype de recherche	-	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction
	Zéolithe/H ₂ OZéolithe silicate d'alumine (physisorption)	<100°C	physisorption	De 124 kWh/m ³ en mode chauffage à 100 kWh/m ³ en mode rafraichissement relevés avec une zeolite 13X (température de stockage<100°C)	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (Nombreuses études réalisées avec différents structures de zéolithes)	-	réaction catalytique reversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP

IAA , Blanchisserie 200°C	Réservoir d'eau sous Pression	<250°C	sensible	1,16	0,6	DESP, pertes thermiques du stock= cout d'isolation élevé	mise en œuvre et maîtrise de la technologie	moyen	mure	4	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Réservoir d'huile thermiques	<400°C	sensible liquide	0,55	Environ 0,1	ICPE, recyclabilité, durée de vie, pertes thermique du stock = cout d'isolation élevé	Sous Pression atmosphérique, large spectre de température	moyen	mure mais peu utilisé	3	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	lit à garnissage solide (fluide transfert: huile)	50°C<T< 400°C	sensible solide	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau materiau solide)	suivant le type de garnissage solide (voir tableau materiau solide)	recyclabilité (huile), durée de vie (huile), nettoyage des garnissage	prix des roches, mise en œuvre, large spectre de température	faible	mure	3	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Réservoirs à Sels fondus	150°C<T<400°C	sensible liqui de	Environ 0,7(suivant le type de sels)	0,1	ICPE, corrosions, mise en œuvre d'acier austénitiques ou chrome, conductivité thermique faible	large spectre de température, technologie maîtrisée	moyen	Mure	3	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage en Béton Haute température	100°C<T<400°C	sensible solide	0,7	1	risque de fissure, faible flux transférable	inertie, cout du béton	faible	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	-	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage en céramique	100°C<T<400°C	sensible solide	0, 84	1,35	risque de fissure, procédés de fabrication des céramiques techniques très énergivores	inertie, cout des céramiques (recyclage amiante)	faible	Prototype (DLR)	-	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	lit à garnissage avec MCP HT (eutectiques, sels)	110°C<T<400°C	latent	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	0,1	ICPE, corrosions, conductivité thermique faible	HT, compacité des réservoirs, stockage à faible différentiel de température	-	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	-	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage avec matrice graphite/sels	110°C<T<400°C	latent	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	De 1 à 15 suivant le pourcentage de MCP/graphite		conductivité thermique élevé, faible différentiel de température de stockage possible	élevé	Prototype (DLR)	-	réaction catalytique réversible, canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	adsorption avec des zéolithes (prototype du ZAE Bayern)	150°C à 180°C (prototype du ZAE Bayern)	adsorption	-	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	réaction endo/exo thermique	1000°C >T>200°C	thermochimique	Plusieurs millier de kWh/m^3 suivant la réaction (MgO+H2O T>200°C)	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	Prototype de recherche	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Réservoir d'huile thermiques	<400°C	sensible liquide	0,55	Environ 0,1	ICPE, recyclabilité, durée de vie, pertes thermique du stock = cout d'isolation élevé	Sous Pression atmosphérique, large spectre de température	moyen	mure mais peu utilisé	3	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	lit à garnissage solide HT	50°C<T< 400°C	sensible so lide	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau materiau solide)	suivant le type de garnissage solide (voir tableau materiau solide)	recyclabilité (huile), durée de vie (huile), nettoyage des garnissage	prix des roches, mise en œuvre, large spectre de température	faible	mure	3	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP

Sidérurgie 350°C	Réservoirs à Sels fondus	150°C<T<400°C	sensible liqui de	Environ 0,7(suivant le type de sels)	0,1	ICPE, corrosions, mise en œuvre d'acier austénitiques ou chrome, conductivité thermique faible	large spectre de température, technologie maîtrisée	moyen	Mure	3	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage en Béton Haute température	100°C<T<400°C	sensible solide	0,7	1	risque de fissure, faible flux transférable	inertie, cout du béton	faible	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage en céramique	100°C<T<400°C	sensible solide	0, 84	1,35	risque de fissure, procédés de fabrication des céramiques techniques très énergivores	inertie, cout des céramiques (recyclage amiante)	faible	Prototype (DLR)	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Stockage en réservoir avec MCP HT (eutectiques, sels)	110°C<T<400°C	latent	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	0,1	ICPE, corrosions, conductivité thermique faible	HT, compacité des réservoirs	-	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Reflux Heat Transfert Storage (avec alliage Zn70Sn30 (MCP))	270°C<T<400°C	latent	176 (DT de changement d'état)	-	-	-	moyen	prototype de recherche	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	Cascad LHST	300°C<T<400°C	latent	-	-	Cout	distribution homogène de température	élevé	Prototype de recherche	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP
	réaction endo/exo thermique	1000°C >T>200°C	thermochimique	Plusieurs millier de kWh/m ³ suivant la réaction (MgO+H ₂ O T>200°C)	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	Prototype de recherche	-	réaction catalytique réversible (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP

Secteur d'applications/ Température	Techniques de stockages associés aux secteurs d'applications	Température de stockage possible	état du matériel de stockage	Capacité thermique volumétrique de stockage (kWh/m ³ .K)	conductivité thermique (W/m.K)	inconvenients technologique, environnemental et sécurité	avantages technologique, environnemental et sécurité	Coût (élevé/moyen/faible)	Niveau de développement	Durée de vie moyen du système (*classement de 0 à 4)	Mode de transport associés	Secteur d'applicabilité possible
Stockage par chaleur sensible	Réservoir d'eau (WTES)	T<100°C	liquide	1,16	0,6	limité à 100°C, pertes thermique du stock = cout d'isolation élevé	mise en œuvre et maîtrise de la technologie	faible	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat
	Réservoir d'eau sous pression	110°C < T < 210°C	liquide	1,16	-	Coût d'isolation élevé, mise en pression du système	capacité volumétrique (kWh/m3) plus élevée qu'un stockage sous pression atmosphérique	moyen	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat, IAA
	Réservoir d'huile thermiques	50°C<T<400°C	liquide	0,55	0,1	ICPE, recyclabilité, durée de vie, pertes thermique du stock = cout d'isolation élevé	Sous Pression atmosphérique, large spectre de température	moyen	mure mais peu utilisé	3	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat, IAA, Sidérurgie
	Aquifer TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	liquide	1,16	0,6	non pollution des aquifères d'eau potable, forage	création d'une bulle thermique chaude et froide, pas d'isolation à réaliser	élevé (sonde+forage+page)	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat
	Cavern TES (fluide de stockage = eau)	T<100°C	liquide	1,16	0,6	caverne existante rare	peu de travail de construction, pas d'isolation à réaliser	faible (caverne existante)	mure mais peu utilisé	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat
	Borehole TES (fluide de transfert eau)	T<100°C	solide	De 0,3 à 1 (suivant le type sol voir tableau matériau solide)	suivant la nature du sol (voir tableau matériau solide)	construction, pertes thermiques	création d'une bulle thermique	élevé (sonde+forage+page)	mure	4	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat
	lit à garnissage solide (fluide de transfert eau ou huile)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de garnissage)	liquide et solide	De 0,3 à 0,8 (suivant le type de garnissage solide voir tableau matériau solide)	suivant le type de garnissage solide (voir tableau matériau solide)	recyclabilité (huile) et nettoyage du garnissage	large spectre de température	faible si solide=roche	mure	3	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat, IAA, Sidérurgie
	Stockage en Béton Haute température	100°C<T<400°C	solide	0,7	1	risque de fissure, faible flux transférable	inertie, cout du béton	faible	Prototype (DLR) - béton HT commercialisé	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	IAA, sidérurgie
	Stockage en céramique	100°C<T<400°C	solide	0,84	1,35	risque de fissure, procédés de fabrication des céramiques techniques très énergivores	inertie, cout des céramiques (recyclage amiante)	faible	Prototype (DLR)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	IAA, sidérurgie
stockage par chaleur latente	lit à garnissage avec MCP paraffine	T<100°C	liquide/solide	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	Environ 0,2	recyclabilité, durée de vie des paraffines, conductivité thermique faible	capacité thermique de stockage, stockage possible pour de faible différentiel de température	élevé	matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	2	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat
	lit à garnissage avec autres MCP (hydrates de sels, eutectiques)	50°C à 400°C (suivant le fluide transfert: eau, huile et le type de MCP)	liquide/solide	De 50 à 80 (DT de changement de phase)	Environ 0,1	recyclabilité, durée de vie, conductivité thermique faible	capacité thermique de stockage, stockage possible pour de faible différentiel de température	élevé	technologie et matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	2	canalisations et réseaux de chauffage, système à sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	habitat, IAA, Sidérurgie
	Stockage avec MCP à transition solide/solide	40°C<T<180°C	solide/solide	De 37 à 107 (DT de changement d'état)	De 0,2 à 0,9 (suivant la structure cristalline)	recyclabilité, mise en œuvre des matériaux	Bonne capacité thermique, faible dilatation volumique, pas de problème de confinement ou de fuite	élevé	Prototype-matériaux commercialisés mais technologie relativement jeune	-	canalisations et réseaux de chauffage, système à sorption , containers MCP, chemical reaction, reaction catalytique renversable	habitat, IAA
	Stockage avec Matrice graphite/paraffine	T<100°C	liquide /solide	De 40 à 80 (DT de changement de phase)	De 1 à 10 suivant le pourcentage de MCP/graphite	recyclabilité, mise en œuvre des matériaux, dégradations des propriétés des paraffines	conductivité thermique élevé, pas de problème de fuite du MCP	élevé	Prototype (DLR)-matériaux commercialisés	-	canalisations et réseaux de chauffage, sorption (ab ou ad) , containers MCP, chemical reaction	Habitat

	Stockage avec matrice graphite/sels	110°C<T<400°C	liquide/solde	De 60 à 150 (DT de changement de phase)	De 1 à 15 suivant le pourcentage de MCP/graphite	-	conductivité thermique élevé, faible différentiel de température de stockage possible	élevé	Prototype Industriel (DLR)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie
	Reflux Heat Transfert Storage (avec alliage Zn70Sn30 (MCP))	270°C<T<400°C	liquide/solide	176 (DT de changement d'état)	-	-	-	-	Prototype de recherche	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie
	Cascad LHTS	300°C<T<400°C	liquide/solide	-	-	-	distribution homogène de température	élevé	Prototype de recherche	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	Sidérurgie
stockage thermochimique et thermophysique	réaction chimique endo/exo thermique	35°C>T>1000°C suivant la réaction (CaCl2+H2O pour 60°C/80°C; CaSO4+H2O pour 100°C; MgO+H2O pour T>200°C)	-	jusqu' plusieurs milliers kWh/m ³ suivant les réactions	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie
	Zéolithe/H2O Zéolithe silicate d'alumine (physisorption)	<100°C	-	De 124 kWh/m3 en mode chauffage à 100 kWh/m3 en mode rafraichissement relevés avec une zeolite 13X (température de stockage<100°C)	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (Nombreuses études réalisées avec différents structures de zéolithes)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	Habitat
	Silicagel/H2O (physisorption)	-	-	Une valeur de 50 kWh/m3 a été atteinte avec ce couple	-	-	Performance atteinte médiocre et très dégradée par rapport aux valeurs théoriques		Etude réalisée par AAE Intec (Autriche)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	-
	Na2S/H2O (chimisorption)	-	-	780 kWh/m3 pou le chauffage et 580 kWh/m3 pour le rafraichissement	-	Produit très corrosif et nécessitant des pressions d'équilibre très faibles	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (ECN-programme SWEAT)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	-
	MgSO4 7H2O (chimisorption)	122°C	-	780 kWh/m3	-	Non corrosif et non toxique mais produit couteux	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (EDF France)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	-
	adsorption avec des zéolithes (prototype du ZAE Bayern)	150°C à 180°C (prototype du ZAE Bayern)	-	-	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	IAA, Sidérurgie
	absorption	<35°C	LiCl/H2O	253 kWh/m3 LiCl à basse température (<35°C)	-	Coût élevé du sel retenu (3600€/m3)	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (Climatewell Suède)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers MCP	Habitat, IAA, Sidérurgie
	absorption	basse température	LiBrH2O	180 à 310 kWh/m3 à basse température	-	-	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (LOCIE)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers	Habitat, IAA, Sidérurgie
	absorption	-	NaOH/H2O	-	-	Problème de corrosion avec les matériaux courants	très forte capacité volumétrique de stockage, peu de pertes thermiques	élevé	prototype de recherche seulement (LOCIE)	-	réaction catalytique renversable (réformage), canalisations et réseaux de chauffage HT, système à adsorption, chemical, containers	Habitat, IAA, Sidérurgie

ANNEXE 22

« Tableaux de propriétés physiques des huiles et matériaux solides pour le stockage de chaleur »

Tableaux de propriétés physiques des huiles et matériaux solides pour le stockage de chaleur

Sur ce tableaux, vous trouverez les principales propriétés thermo-physiques de quelques huiles thermiques commercialisés.

Propriété	Dowtherm RP	Dowtherm G	Dowtherm Q	Therminol 55	Therminol 66
Temperature range	-	-6°C à 360°C	-35°C à 330°C	-25°C-290°C	0°C à 345°C
Boiling point	353°C	289°C	267°C	340°C	359°C
Flash point	194°C	137°C	120°C	177°C	184°C
Fire point	206°C	-	124°C	218°C	212°C
Autoignition temperature	385°C	432°C	412°C	343°C	374°C
Density [kg/m ³]	908.3 (190°C)	911.3 (195°C)	829.3 (200°C)	745 (204°C)	882 (25°C)
Critical temperature	575°C	548°C	489°C	512°C	569°C
Critical pressure [atm.]	20.4	27.56	23.7	13.2	24.3
Specific Heat [J/kg.K]	2126 (190°C)	2158 (195°C)	2208 (200°C)	2560 (204°C)	2210 (204°C)
Thermal conductivity [W/m.K]	0.1093 (190°C)	0.1061 (195°C)	0.0967 (200°C)	0.1069 (204°C)	0.1051 (204°C)
Viscosity dynamique [mPa.s]	0.87 (190°C)	0.62 (195°C)	0.31 (200°C)	0.718 (204°C)	0.825 (204°C)
Vapor pressure[bar]	0.01 (190°C)	0.1 (195°C)	0.17 (200°C)	0.0249 (204°C)	0.0255 (204°C)

Sur ce tableau, vous trouverez les principales propriétés thermo-physiques des matériaux solides pouvant être utilisés pour du stockage de chaleur.

Matériaux solides	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Conductivité thermique [W/m.K]	Masse volumique [kg/m ³]	Diffusivité thermique x10 ⁶ [m ² /s]	Capacité thermique volumétrique [kWh/m ³ .K]
Alumina	765	30	3900	10.05	0.828
Brick	840	0.69	1698	0.484	0.396
Brick magnesia	1130	5.07	3000	1.496	0.941
Concrete	1130	0.9-1.3	2240	0.356-0.514	0.703
Cast Iron	837	29.3	7900	4.431	1.836
Copper	383	385	8954	112.3	0.952
Earth (wet)	2093	2.5	1700	3.558	0.988
Earth (dry)	795	0.25	1260	1.002	0.278
Fused silica	745	0.93	2600	0.48	0.538
Stone, granite	820	1.73-3.98	2640	0.799-1.840	0.601
Stone, limestone	900	1.26-1.33	2500	0.560-0.591	0.625
Stone, marble	800	2.07-2.94	2600	0.995-1.413	0.577
Stone, sandstone	710	1.83	2200	1.172	0.434
Stainless Steel	480	16	7900	4.22	1.053