

# Prétraitements avant valorisations matière et énergie des déchets solides



**PRETRAITEMENTS AVANT VALORISATIONS MATIERE  
ET ENERGIE DES DECHETS SOLIDES**

**RAPPORT FINAL**

août 2017

**E. VERNUS, C. DUBUISSON – PROVADEMSE INSAVALOR  
M. COMBE, J. HOULET, N. EL BARHAOUI – SETEC**



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**, Prétraitements avant valorisation matière et énergie des déchets solides, 2017, 168 p, n°15-0247/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

© RECORD, 2017

**Comité de suivi de l'étude :**

Gérard ANTONINI – UT COMPIEGNE / RECORD, Coryse COUDRAY-DECOCK – EDF, Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Hélène GUY – SECHE ENVIRONNEMENT, Guillaume LOUCHEZ – SUEZ, Elisabeth PONCELET – ADEME

## **RESUME**

La présente étude s'inscrit dans le cadre de la perspective d'un recours accru aux matières premières issues de déchets dans les processus de production de matière et d'énergie.

A partir d'une liste de problématiques identifiées et sélectionnées comme présentant un enjeu significatif, l'étude dresse une revue de procédés, disponibles ou en développement, permettant de prétraiter certains déchets solides en vue de lever certains verrous techniques qui limitent leurs possibilités de valorisation.

L'objectif de tels prétraitements consiste à extraire le ou les composés considérés comme polluants ou non valorisables, afin que le déchet puisse être transformé en une matière première secondaire, utilisable dans un processus industriel de production de matière ou d'énergie.

Ainsi, 31 procédés ont été identifiés comme permettant de répondre aux problématiques sélectionnées. Ils sont décrits sous la forme de fiches. Ces procédés ont été classés sous forme d'un tableau selon la nature des déchets concernés et la finalité recherchée pour leur valorisation.

L'étude a conduit également à proposer 3 fiches descriptives de procédés dont l'application peut permettre le prétraitement de déchets variés ainsi que 4 fiches génériques dressant un panorama des solutions techniques répondant à une même problématique générale.

## **MOTS CLES**

Déchets solides, prétraitements, valorisation matière, valorisation énergétique, polluants, matière première secondaire, ressources alternatives

---

## **SUMMARY**

The present study constitutes a part of a prospect addressing the increased use of waste materials in the production of matter and energy.

Based on a list of problems identified and selected as containing a significant challenge, the study reviews the available processes, as well as those under development to pretreat a number of solid waste types in order to remove the technical obstacles that limit their potential for recovery.

The objective of such pretreatments is to extract the compounds considered as polluting or non-recoverable, so that the waste can be transformed into a secondary raw material, which can be used in the industrial process of matter and energy production.

Thus, 31 processes have been identified as enabling to address the selected issues. They are described in the form of information sheets. These processes have been classified and arranged into tables according to the nature of the concerned waste and the final destination for its recovery.

The study also led to propose 3 descriptive sheets of processes, the application of which can allow the pre-treatment of various waste types, as well as 4 generic sheets giving an overview of the technical solutions answering the same general problem.

## **KEY WORDS**

Solid waste, pretreatment, matter recovery, energy recovery, pollutants, secondary raw material, alternative resource

## **SOMMAIRE**

PARTIE 1 : PRESENTATION DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE .....	6
1 Présentation de l'étude .....	7
1.1 Contexte et objectifs .....	7
1.2 Programme de travail .....	8
1.2.1 Cadrage de l'étude.....	8
1.2.2 Construction d'un modèle de fiche .....	8
1.2.3 Elaboration de fiches sommaires pour une liste de problématiques sélectionnées .....	8
1.2.4 Rédaction de fiches procédés et de fiches génériques.....	9
2 Identification et analyse des problématiques .....	9
2.1 Présentation de la démarche globale.....	9
2.2 Méthodologie de recensement.....	10
2.3 Analyse des problématiques.....	13
2.4 Identification de thématiques génériques.....	14
3 Présentation des fiches sommaires et des fiches « procédé » .....	15
3.1 Contenu des fiches sommaires .....	15
3.2 Méthodologie de recherche d'information /sources bibliographiques .....	16
3.2.1 Approche par problématique .....	16
3.2.2 Approche procédé .....	16
3.3 Liste des fiches sommaires .....	17
3.4 Liste des fiches « procédé » .....	22
4 Présentation des fiches génériques .....	22
PARTIE 2 : FICHES.....	23
FICHES SOMMAIRES .....	24
FICHES PROCÉDÉ .....	109
FICHES GÉNÉRIQUES.....	116
5 Conclusion .....	157
PARTIE 3 : ANNEXES.....	158
ANNEXE 1 - CLASSIFICATION DES FILIERES DE TRAITEMENT DES DECHETS D'APRES ALAIN NAVARRO (1994) 159	
ANNEXE 2 - LISTE EUROPEENNE DES DECHETS (LED) .....	160
ANNEXE 3 - MATRICE FILIERE-PROCEDES.....	161
ANNEXE 4 – TRAME DE FICHE SOMMAIRE.....	166

## **Liste des figures**

Figure 1 : Phases du programme de travail .....	8
Figure 2 : Démarche globale .....	9

## **Liste des tableaux**

Tableau 1: Liste des problématiques proposées au Conseil scientifique .....	10
Tableau 2 : Identification des thématiques des fiches génériques à partir de problématiques.....	14
Tableau 3 : Liste des fiches sommaires par déchet et problématique.....	17
Tableau 4 : Liste des fiches sommaires classées par déchet et par finalité de valorisation comme ressources matières.....	20
Tableau 5 : Liste des fiches sommaires classées par déchet et par finalité de valorisation comme ressources énergétiques.....	21
Tableau 6 : Liste des fiches procédé classées par déchet et par problématique.....	22

# PARTIE 1 : PRESENTATION DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

# 1 Présentation de l'étude

## 1.1 Contexte et objectifs

La Loi de transition énergétique pour la croissance verte a fixé comme objectif le découplage progressif entre la croissance économique et la consommation de matières premières. A ce titre, en matière de recyclage, elle fixe le cap d'un recyclage de 55% des déchets non dangereux à l'horizon 2020 et de 65% en 2025. Un certain nombre de mesures sont prévues par la loi comme l'obligation de contractualiser avec un éco-organisme pour la gestion des DEEE, la reprise des déchets du BTP par les distributeurs, l'obligation de recyclage des navires, la mise en œuvre du tri en 5 flux des déchets, l'incitation au tri à la source des biodéchets ou encore l'encadrement technique et réglementaire de la préparation et de l'utilisation de CSR. De la même manière des objectifs ambitieux sont fixés pour le développement des énergies renouvelables et notamment de la méthanisation.

De telles mesures sont bien sûr favorables à l'augmentation des taux de recyclage de déchets mais insuffisantes si elles ne sont pas accompagnées d'une évolution des processus industriels permettant la valorisation des déchets à la hauteur des objectifs fixés.

En effet, le recours à des matières premières dites secondaires ou alternatives, c'est à dire issues de déchets, dans les processus de production de matière ou d'énergie nécessite, dans bon nombre de cas, une préparation ou transformation du déchet à valoriser pour le rendre conforme au cahier des charges du processus industriel.

L'augmentation des objectifs de valorisation impose alors de compléter les opérations de tri réalisées dans le cadre de la collecte, par des opérations de préparation adaptées.

Cette étape préalable ou prétraitement peut consister à retirer du déchet ses fractions non valorisables (ou valorisables dans d'autres filières), en augmenter la siccité ou en retirer ou supprimer des éléments, substances ou composés organiques dont la présence n'est pas conforme au cahier des charges de production.

La valorisation matière ou énergie des déchets solides connaît actuellement certaines limites, liées à plusieurs facteurs tels que la présence de polluants ou d'indésirables qui vont nuire au taux de valorisation, la présence de molécules ou constituants dans le déchet qui vont nuire à l'intégrité des installations de traitement (type acide ou chlore etc.), ou encore la présence de substances pouvant induire des risques sanitaires ou l'émission de gaz à effet de serre.

Cette problématique se pose pour des déchets produits de longue date mais dont la valorisation reste plafonnée (déchets de construction et démolition, mâchefers, sables de fonderie, pneus usagés, câbles sous gaine plastique), des déchets dont la production est en développement (déchets plastiques de DEEE contenant des retardateurs de flamme bromés, déchets polymères composites, lampes fluocompacts, ...) ou encore des déchets susceptibles de constituer des combustibles solides, liquides ou gazeux.

Cette étude permet de donner des pistes et des recommandations à suivre, afin de lever certains verrous bloquant le développement de la valorisation de tels déchets solides.

Les objectifs de l'étude sont d'établir une revue des procédés et technologies permettant une réduction de la charge polluante de déchets solides pour rendre possible ou favoriser leur valorisation matière ou énergie, et d'évaluer les coûts associés sur la base des informations disponibles.



## 1.2 Programme de travail

Les différentes phases du programme de travail sont présentées dans le schéma ci-dessous :

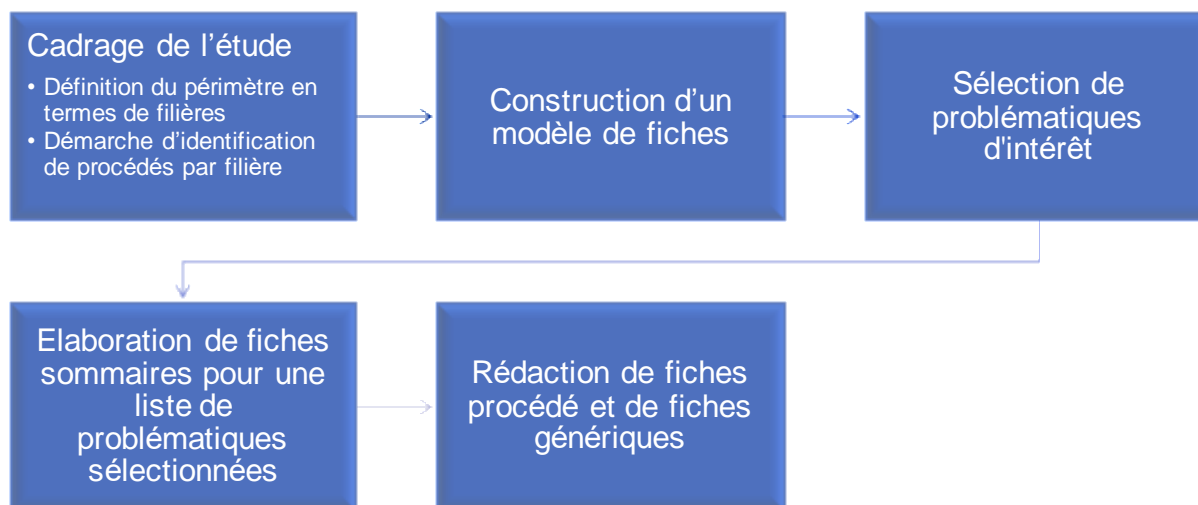


Figure 1 : Phases du programme de travail

### 1.2.1 Cadrage de l'étude

Les procédés de prétraitement sont fondés sur des concepts qui relèvent des principes suivants :

- physiques (broyage, criblage, centrifugation, extrusion, séparation magnétique, etc.),
- chimiques (neutralisation, conversion réactionnelle, inertage, etc.),
- physico-chimiques (lavage, adsorption, floculation, extraction par solvant, complexation, précipitation, etc.),
- thermiques (oxydation, désorption, extraction à la vapeur, fusion, etc.),
- thermochimiques (conversion, pyrolyse, gazéification, hydrotraitement, etc.),
- biologiques (métabolisation des phénols, etc.).

Afin de couvrir de la manière la plus complète possible le spectre des procédés de prétraitement, disponibles ou en développement, appropriés pour la préparation de déchets en vue de leur valorisation, un cadre général est proposé sous la forme d'une matrice filière / procédé.

L'objectif de cette phase est d'identifier une liste de problématiques dans laquelle la présence d'un polluant limite la valorisation matière ou énergie d'un déchet (couple polluant/déchet).

L'étude concerne les déchets solides uniquement, avec une problématique d'abattement de la charge polluante en amont d'une valorisation matière ou énergie. Le polluant est défini comme l'élément qui empêche la valorisation. La priorité doit être donnée aux polluants au sens environnemental, mais les conditionnements (type séchage) ne sont pas exclus de l'étude (en particulier s'ils permettent de valoriser un déchet à fort enjeu économique et environnemental).

### 1.2.2 Construction d'un modèle de fiche

Les informations concernant les procédés de prétraitement identifiés sont recueillies et présentées sous la forme de fiches dites sommaires mais présentant un niveau d'information suffisant pour en apprécier les modalités d'application.

### 1.2.3 Elaboration de fiches sommaires pour une liste de problématiques sélectionnées

Une recherche bibliographique de l'offre technologique correspondant aux couples polluants/déchets sélectionnés à l'issue de la première phase est menée afin d'aboutir à une fiche sommaire descriptive du procédé.

Les objectifs en termes de nombre de fiches sommaires fixés lors de la réunion de lancement étaient les suivants :

- Procédés commercialement disponibles : 25
- Procédés en développement : 15

#### 1.2.4 Rédaction de fiches procédés et de fiches génériques

A l'issue de la phase de recueil d'informations et de rédaction des fiches sommaires, le programme de travail a été réorienté en considérant que l'essentiel de l'information utile était présenté dans les fiches sommaires mais que certains sujets méritaient une approche plus transversale comme la possibilité d'employer un même procédé pour différentes applications de prétraitement ou encore la possibilité de recours à différents types de procédés pour parvenir à un prétraitement adapté.

Il a donc été convenu, avec le Comité de suivi, de rédiger des fiches procédés et des fiches génériques en remplacement des fiches détaillées initialement prévues.

## 2 Identification et analyse des problématiques

### 2.1 Présentation de la démarche globale

La figure 2 présente la démarche globale suivie, de l'identification de problématiques jusqu'à la sélection de problématiques qui seront approfondies sous forme de fiches sommaires, de fiches procédés et de fiches génériques.

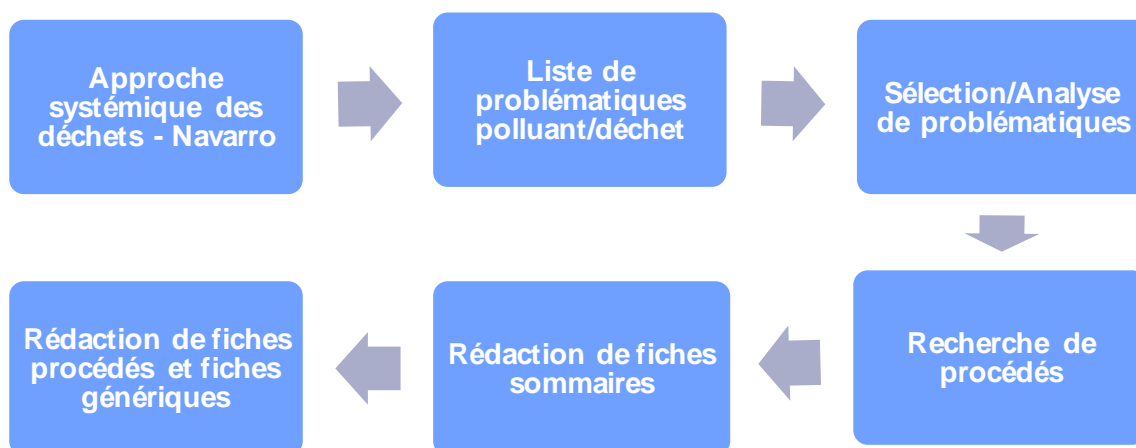


Figure 2 : Démarche globale

## 2.2 Méthodologie de recensement

Une matrice « filière-procédé » a été présentée lors de la réunion de lancement de l'étude. Cette matrice a été développée de manière à couvrir le spectre des procédés de traitements disponibles ou en développement, et est directement inspiré de « La classification des filières de traitement des déchets » d'Alain Navarro (1994). Cette classification des filières à plusieurs niveaux fait apparaître les objectifs du traitement et la nature du déchet visé. La classification des filières de traitement des déchets par Alain Navarro (1994) est présentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. De plus la matrice s'est inspirée de la classification des catégories issues de la Liste Européenne des Déchets (LED), cette liste est présentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Cette matrice sous Excel comporte plus de 70 entrées avec les informations suivantes :

- Nature du déchet
- Filière (valorisation matière ou valorisation énergie)
- Sous filières (amendement organique, biocarburant, combustible solide, matériaux minéraux en technique routière, matières plastiques, métaux ...)
- Problématique
- Nature du polluant
- Procédé
- Type de procédé (physique, chimique, physicochimique, thermique, thermochimique, biologique...)

La matrice filière-procédés est présentée en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Une liste de déchets, extraite de cette matrice, a ensuite été envoyée au Comité de suivi pour qu'une liste de déchets prioritaires soit établie pour la suite de l'étude. Cette liste comporte 42 problématiques sous forme de couple « déchet/problématique ».

L'analyse de ces problématiques par le Conseil scientifique a permis d'identifier :

- 5 problématiques à abandonner (peu réalistes ou hors sujet)
- 2 problématiques peu intéressantes d'un point de vue technologique
- 6 problématiques spécifiques avec un gisement limité
- 15 problématiques à traiter dans des fiches « génériques » (voir paragraphe 2.4)

Le tableau ci-dessous présente les 42 problématiques ainsi que les commentaires du Conseil scientifique en italique.

**Tableau 1: Liste des problématiques proposées au Conseil scientifique**

DÉCHET	PROBLEMATIQUE
RESIDUS DE PROCEDES THERMIQUES	
Mâchefers (MIDND)	Présence de métaux lixiviables à des concentrations supérieures aux seuils de valorisation en technique routière ou autre scénario de valorisation en construction
Cendres de boues de station d'épuration	Présence de phosphates en quantités supérieures aux spécifications de la cimenterie
Désulfogypse (Gypses du traitement des fumées des centrales au charbon)	Impuretés, métaux pour valorisation du Gypse en construction
Chaux résiduaires	Impuretés, métaux pour valorisation en neutralisation d'effluents
Sables de fonderie	Présence de résidus de liants organiques limitant leur valorisation en construction (technique routière ou autre) - <i>Un procédé plus intéressant que l'utilisation des Ultrasons serait l'oxydation par combustion en lit fluidisé.</i>
Cendres sèches riches en COT	La séparation électrostatique du COT pour rendre des cendres sèches (charbon) trop riches en COT conformes au critère de l'EN450 et rebrûler la fraction enrichie en COT. <i>Une possibilité serait aussi l'incinération des cendres pour en oxyder la fraction combustible restante, si celle-ci est significative.</i>
Cendres de stock	Séchage des cendres de stock (trop humides) pour les rendre valorisables en cimenterie (réalisé par Surschiste), <i>Cette</i>

DÉCHET	PROBLEMATIQUE
	<i>problématique est à intégrer dans une fiche « Transverse » sur le séchage / extraction d'eau</i>
REFUS DE TRI MECANO BIOLOGIQUE	
Refus de Tri Mécano Biologique	Présence de composés inorganiques, composés générateurs de goudrons lors de la production thermochimique de gaz combustible – <i>Il n'est pas réaliste de rechercher la réduction de génération de goudrons par ce type de traitement</i>
Refus de Tri Mécano Biologique	Risque d'émission de polluants atmosphériques dangereux (produits chlorés, dioxines et métaux lourds) lors de la combustion de CSR préparés à partir de ces refus – <i>Sujet prioritaire très important, à placer en correspondance avec les évolutions réglementaires et les seuils permettant la valorisation CSR</i>
VEHICULES HORS D'USAGE ET RESIDUS DE BROYAGE AUTOMOBILES	
RBA	Tri et séparation des polluants (retardateurs de flamme, CFC, plomb, mercure, ...) avant préparation de combustibles – <i>Peu d'intérêt par rapport à la valorisation des métaux</i>
RBA	Tri et séparation des polluants (retardateurs de flamme, CFC, plomb, mercure, ...) avant valorisation énergétique – <i>Sujet prioritaire intéressant les constructeurs automobiles, ajouter l'objectif de la valorisation des métaux</i>
RBA	Tri et séparation des polluants (retardateurs de flamme, CFC, plomb, mercure, ...) avant valorisation des matières plastiques - <i>Peu d'intérêt à valoriser les plastiques par rapport aux métaux</i>
VHU	Présence de fluides dangereux pour l'environnement (huile de moteur, antigel, liquide de freins, CFC, PCB ...) à séparer avant valorisation des métaux – <i>Sujet peu intéressant d'un point de vue technologique</i>
PNEUMATIQUES NON REUTILISABLES <i>Problématique importante et prioritaire. Les deux forment 1 même sujet</i>	
Pneumatiques usagés	Présence de soufre générant des émissions de SOx lors de l'utilisation du combustible qui serait produit par pyrolyse
Pneumatiques usagés	Présence de soufre générant des émissions de SOx lors de la combustion
LAMPES USAGEES - <i>Problématique importante et prioritaire concernant les métaux (plus que le verre)</i>	
Tubes fluorescents	Séparation du mercure avant récupération des métaux Séparation du mercure avant recyclage du verre
DEEE	
Déchets imprimante (encre, toner)	Présence d'encres (métaux), solvants et retardateurs de flamme bromés à éliminer pour la valorisation des plastiques – <i>Concerne un gisement très limité, peu d'intérêt pour la valorisation des plastiques</i>
Déchets imprimante (encre, toner)	Présence d'encres (métaux), solvants et retardateurs de flamme bromés à éliminer pour la valorisation énergétique – <i>Concerne un gisement très limité, cf. fiches génériques « Tri optique » et « Extraction métaux »</i>
DEEE	Séparation des fractions bromées avant recyclage - <i>cf. fiches génériques « Tri optique »</i>
DECHETS DE PLASTIQUE	
Déchets matières plastiques	Séparation du brome et des retardateurs de flamme pour valorisation thermique des huiles - <i>cf. fiches génériques « Tri optique »</i>
Déchets plastique	Déchloration du PVC pour valorisation de plastiques comme combustibles liquides - <i>cf. fiches génériques « Tri optique »</i>
Emballages Vides de Produits Phytopharmaceutiques (EVPP)	Séparation des plastiques d'emballages (PEBD, PEHD, PP) avec les restes de produit phytopharmaceutique – <i>Problématique spécifique, faible gisement</i>

DÉCHET	PROBLEMATIQUE
DECHETS DE PAPIER ET CARTONS	
PCR	Séparation des indésirables (colles, adhésifs, métaux, agrafes, ficelle, encre, reliure,...)
Les boues de STEU, de traitement des eaux de refroidissement ou de papèteries	Contiennent des indésirables, plastiques, traces métalliques, bois etc. nuisible à leur valorisation (agronomique ou minérale) - <i>Voir les technologies de tri des boues de papeterie avant valorisation comme CSR</i>
DECHETS DE LA CHIMIE MINERALE	
Phosphogypse (provenant de la fabrication d'acide phosphorique)	Impuretés (métaux), acidité pour valorisation dans la filière plâtre – <i>problématique très spécifique</i>
DECHETS DE DECONSTRUCTION ET DE DEMOLITION	
Bétons, briques, tuiles, céramiques en mélange	Présence de sulfates en teneur supérieure aux limites d'acceptabilité technique et environnementale pour une valorisation dans des matériaux à base de liants hydrauliques. - <i>Sujet prioritaire important</i>
Granulats routiers (fraisats)	Détection et séparation des granulats contenant de l'amiante empêchant toute valorisation - <i>Sujet prioritaire important</i>
Granulats routiers (fraisats)	Détection et séparation des granulats contenant des goudrons limitant la valorisation - <i>Sujet prioritaire important</i>
Granulats de béton	Détection et séparation des granulats de béton revêtus de peinture au plomb limitant la valorisation comme granulats – <i>Problématique spécifique (gisement ?)</i>
Granulats de béton	Présence de PCB (mastics, sols à base de résine, double vitrage, condensateurs ...) limitant la valorisation comme granulats - <i>Problématique spécifique (gisement ?)</i>
Plâtre (plaques et carreaux)	Présence d'indésirables (isolants, résidus) à séparer pour valoriser le plâtre
Matériaux revêtus de type bétons/métaux	Décapage mécanique ou chimique
Sable de décapage contaminé	L'extraction dans le sable de décapage des revêtements DD type plomb ou amiante pour valoriser ou recycler le sable
Terres excavées polluées (qu'il soit in-situ ou hors site pour une réutilisation ultérieure)	Polluants spécifiques : HCT, HAP, PCB, métaux lourds pour les principaux)
DECHETS DE BOIS	
Déchets de Bois B	Faiblement traités (colle urée-formole, phéno-formole, vernis) à dépolluer pour produire des combustibles propres par torréfaction ou des gaz combustibles ou des substances à haute valeur ajoutée - <i>Problématique prioritaire, gisement très important (y compris palette de Bois B) : objectif déclassement B -&gt; A</i>
Déchets de Bois C	Fortement traité (créosotes, Cr Cu As, chlorophénols) à dépolluer pour produire des combustibles propres par torréfaction ou des gaz combustibles ou des substances à haute valeur ajoutée – <i>Moindre importance</i>
BOUES DE STEP	
Boues de STEP	Teneur en métaux lourds et en POP limitant la valorisation comme amendement organique - <i>Problématique prioritaire à élargir aux digestats de méthanisation et lixiviats de décharge</i>
Boues de STEP	Quantité importante de matière organique limitant la valorisation comme matériau de remblai, technique routière – <i>Sujet à abandonner, trop peu réaliste</i>
BIODECHETS	
Fraction Fermentescible des déchets ménagers	Présence de composés soufrés et siliciés générant de l'H <sub>2</sub> S et une corrosion précoce des équipements - <i>Problématique prioritaire à élargir aux charges organiques de la méthanisation et du compostage</i>

DÉCHET	PROBLEMATIQUE
Fraction Fermentescible des déchets ménagers	Présence d'indésirables, matières plastiques notamment, limitant la valorisation en amendement – <i>Sujet à abandonner (cette problématique doit être traitée plus en amont par le tri et le déconditionnement)</i>
Sous-produits de l'industrie de la viande	contiennent des micro-organismes pathogènes --> traitement par hygiénisation (pasteurisation ou stérilisation) avant méthanisation <i>cf. fiche générique « Hygiénisation », élargir la problématique à toutes charges organiques (y compris Déchets d'activités de soins non dangereux).</i>
AUTRES	
Mélanges eau/hydrocarbure	Extraction de l'eau - <i>cf. fiches génériques « Sèchage – Extraction d'eau »</i>
Boues fines ou de sédiments	Colmatage lors du séchage par des procédés membranaires – <i>Problématique de choix de technologie (cf. membranes oscillantes type VSEP) hors cadre de l'étude.</i>
Refus de TMB et OMr	Elaboration des CSR

### 2.3 Analyse des problématiques

Un certain nombre de problématiques identifiées n'ont pas abouti à la rédaction d'une fiche car aucun procédé n'a été trouvé, ou parce que les solutions proposées ont un intérêt technologique ou méthodologique limité :

- Biodéchets: Présence de composés silicés générant une corrosion précoce des équipements – Un pré-traitement n'est pas envisageable du fait du caractère diffus des composés silicés dans le gisement de déchets à traiter (les silicones sont présents dans des joints, composants électroniques, papiers d'emballage, pansements, vêtements imperméables, ustensiles de cuisine, cosmétiques, détergents, peintures, vernis, etc...)
- DASRI : Présence d'agents biologiques potentiellement pathogènes conférant un caractère dangereux aux déchets ce qui en limite les possibilités de valorisation énergétique – Des solutions techniques de désinfection des DASRI sont déjà largement mises en œuvre. Cette problématique sera toutefois traitée dans le cadre des fiches génériques (cf. 2.4)
- Emballages vides de produits phytosanitaires ou de produits fertilisants : l'éco-organisme ADIVALOR prend en charge la collecte des contenants après qu'ils aient été rincés par leur producteur, l'eau de rinçage étant réutilisée par le producteur du déchet. Les solutions identifiées ne présentent pas de caractère technologique.
- Refus de tri mécano-biologique : extraction des indésirables (produit chlorés, métaux lourds...) responsables de l'émission de polluants atmosphériques dangereux lors de la combustion de CSR préparés à partir de ces refus. Solution identifiée pour les produits chlorés (extraction des PVC à l'aide de machine de tri optique dans le process de tri/affinage des refus de TMB.) Cette technique bien maîtrisée est devenue classique. Néanmoins il est apparu nécessaire de présenter les différentes techniques de tri optique dans le cadre des fiches génériques (cf. 2.4)
- Papiers et cartons à recycler : le recyclage du papier et des cartons à recycler nécessite la séparation des indésirables (colles, adhésifs, métaux, agrafes, ficelle, encre, reliure...). Les solutions identifiées ne présentent pas de caractère technologique.
- Extraction de phtalates de produits plastifiés : l'extraction peut être réalisée par lavage à chaud ou à froid. Le lavage à froid purifie les matières plastiques mais présente quelques limites. Ainsi, certains indésirables comme les liquides résiduels ou les colles restent présents après cette opération. Le lavage à chaud est préconisé car il élimine en grande partie ces indésirables et résout ainsi les problèmes liés à leur présence : changement de propriétés physico-mécaniques des polymères, odeurs persistantes, etc. Ce lavage est souvent couplé à l'introduction d'additifs (soude par exemple) pour améliorer encore la régénération des produits.

## 2.4 Identification de thématiques génériques

Compte tenu du caractère transversal de certains prétraitements, il est apparu intéressant de rédiger un certain nombre de fiches « génériques » lors de la phase de sélection des problématiques parmi celles recensées.

Tableau 2 : Identification des thématiques des fiches génériques à partir de problématiques

DECHET	PROBLEMATIQUE	FICHE GENERIQUE
Cendres de stock	Séchage des cendres de stock (trop humides) pour les rendre valorisables en cimenterie (réalisé par Surschiste),	Séchage/extraction d'eau
Mélanges eau/hydrocarbure	Colmatage lors du séchage par des procédés membranaires	
Déchets imprimante (encre, toner)	Présence d'encres (métaux), solvants et retardateurs de flamme bromés à éliminer pour la valorisation énergétique	Tri optique des déchets
DEEE	Séparation des fractions bromées avant recyclage	
Déchets matières plastiques	Séparation du brome et des retardateurs de flamme pour valorisation thermique des huiles	
Déchets plastique	Déchloration du PVC pour valorisation de plastiques comme combustibles liquides	Extraction des métaux lourds
Déchets imprimante (encre, toner)	Présence d'encres (métaux), solvants et retardateurs de flamme bromés à éliminer pour la valorisation énergétique	
Chaux résiduaire	Impuretés, métaux pour valorisation en neutralisation d'effluents	
Terres excavés	Séparation des polluants spécifiques : HCT, HAP, PCB, métaux lourds pour les principaux) limitant la valorisation en remblais ?	
Boues de STEP	Teneur en métaux lourds et en POP limitant la valorisation comme amendement organique	
Déchet de construction et démolition	Présence de métaux lourds et autres substance mêlés limitant la valorisation des matériaux minéraux	
VHU	Teneur en métaux lourds dans les retardateurs de flamme	
Sous-produits de l'industrie de la viande	Présence de micro-organismes pathogènes	Hygiénisation
Charges organiques (y compris déchets d'activités de soins non dangereux)	Présence de micro-organismes pathogènes	

Ces fiches sont présentées au paragraphe 4.

### 3 Présentation des fiches sommaires et des fiches « procédé »

#### 3.1 Contenu des fiches sommaires

Les informations recueillies sur chaque procédé sont présentées sous forme de fiches sommaires. Les fiches sommaires contiennent les rubriques suivantes :

- Objectif du procédé de traitement

Cette rubrique permet de présenter la cible du prétraitement, le rôle joué par le prétraitement dans la valorisation du déchet.

- Bases scientifiques du procédé et problématique

Cette rubrique a pour objectif de décrire de manière succincte les caractéristiques scientifiques sur lesquelles est basée la technologie de prétraitement. De plus, la problématique ainsi qu'une introduction à la notion de gisement relatif au déchet traité par le prétraitement sont présentées.

- Type de procédé

Cette rubrique permet de renseigner sur quels concepts la technologie de prétraitement est basée. Dans cette étude, nous distinguons 6 catégories : physique, chimique, physico-chimique, thermique, thermo-chimique et biologique.

- Nature du polluant

Cette rubrique permet de nommer le(s) polluant(s) spécifique(s) qui, en relation avec la problématique, empêche(nt) la valorisation du déchet.

- Maturité du procédé

Cette rubrique permet de renseigner si la technologie de prétraitement est mature ou encore en développement. Elle s'appuie sur une approche type échelle TRL (de l'anglais « Technology Readiness Level », qui peut se traduire par le niveau de maturité technologique) simplifiée en 3 niveaux :

- En développement (lorsque le procédé est au stade dit « laboratoire ») ;
- Emergent (lorsque le procédé est au stade dit « pilote » avec au moins une application au niveau prototype ou semi-industriel) ;
- Disponible sur le marché (lorsque le procédé est commercialisé et disponible)

- Technologie ou solution de référence

En corrélation avec la problématique identifiée, la ou les solution(s) de référence de traitement du déchet est (sont) présentée(s).

- Schéma bloc du process

Cette rubrique permet une représentation graphique simplifiée du procédé, permettant de visualiser les principaux flux mis en jeux lors de l'opération de prétraitement. De plus, une représentation du flux initial (entrant dans l'unité de prétraitement) et du flux sortant est indiquée.

- Etapes de traitement

Les étapes du traitement sont listées permettant une rapide compréhension de chacune des phases du prétraitement précédemment schématisées.

- Avantage/intérêt

Cette rubrique permet de mettre en évidence les atouts relatifs au prétraitement présenté par rapport à la solution de référence de traitement du déchet.

- Inconvénient/limite

Cette rubrique permet de mettre en évidence les obstacles relatifs au prétraitement présenté par rapport à la solution de référence de traitement du déchet.

- Règlementation applicable

La rubrique règlementation permet de présenter le cadre législatif et réglementaire concernant la gestion du déchet et sa valorisation ainsi qu'un volet spécifique, le cas échéant, de la gestion du polluant identifié.

- Exemples d'installations commerciales

Dans le cas de prétraitements émergents ou disponibles sur le marché, il est indiqué les caractéristiques relatives à l'installation existante (date de mise en marche, localisation, capacité de traitement ...)

- Potentiel d'émergence

Cette rubrique présente les limites d'application du procédé ou de sa mise en œuvre, ainsi que son potentiel d'utilisation dans le contexte normatif et réglementaire actuel.



- Champ de commentaires

Cette rubrique permet l'ajout de commentaires et de précisions concernant certains éléments de la fiche.

- Bibliographie

Les principales sources ayant servi à la rédaction de la fiche sont citées dans cette rubrique.

### 3.2 Méthodologie de recherche d'information /sources bibliographiques

Des recherches bibliographiques ont été menées afin d'identifier le ou les procédés permettant de résoudre les problématiques recensées dans la première phase de l'étude. Une approche par procédé a également été menée, mais dans une moindre mesure.

#### 3.2.1 *Approche par problématique*

Recherche bibliographique

- Brevets Espace net et Google Patents
- Encyclopédies : Techniques de l'Ingénieur
- Ouvrages : Guide du traitement des déchets – Réglementation et choix des procédés, Alain Damien – 7<sup>e</sup> édition - 2016
- Revues via Science direct
- Thèses
- Proceedings de conférences (WASTE Eng, Conférences spécialisées)
- Portail INNOV'R
- Normes et réglementations : Eur-LEX ; Legifrance, ISO, CEN, AFNOR
- Site WEB des financeurs de la recherche (ANR, ADEME ..., H2020 et Life FEDER...)
- Site WEB de la Commission Européenne (rapports)
- Sites WEB de fournisseurs de procédés
- Sites WEB de gestionnaires de déchets
- Contacts de partenaires socio-économiques (COLAS, Eiffage, CEREMA, MTB Recycling)

La liste des principales sources consultées pour l'élaboration de chaque fiche figure dans la rubrique « bibliographie » des fiches sommaires.

#### 3.2.2 *Approche procédé*

Au cours des recherches menées pour répondre aux problématiques polluants/déchets recensées à travers la bibliographie ou via des contacts avec nos partenaires socio-économiques, des procédés intéressants, bien que ne répondant pas directement à ces problématiques, ont été identifiés.

Ces procédés sont applicables à différents polluants et peuvent répondre à diverses problématiques.

Il nous a donc semblé intéressant de rédiger une fiche descriptive pour les procédés suivants :

- Extraction des polluants par fluide supercritique (rédigée en partenariat avec l'IFS, Innovation Fluides Supercritiques)
- Procédé de lavage hydrocyclonage (réalisée en partenariat avec la société TPMG, spécialiste des procédés de traitement par voie humide des déchets, sols et sédiments)
- Procédés de décapage cryogénique

### 3.3 Liste des fiches sommaires

Le tableau ci-dessous donne la liste des fiches sommaires classées par déchet et problématique. Celles-ci sont regroupées dans la seconde partie de ce travail.

Tableau 3 : Liste des fiches sommaires par déchet et problématique

DECHET	PROBLEMATIQUE	TITRE	MATURITE
Cendres sèches riches en COT	La séparation électrostatique du COT pour rendre des cendres sèches (charbon) trop riches en COT conformes au critère de l'EN450 et rebrûler la fraction enrichie en COT	Séparation électrostatique / Cendres sèches	DISPONIBLE
Cendres sèches riches en COT	Incinération des cendres pour en oxyder la fraction combustible restante, si celle-ci est significative.	Combustion/ Cendres sèches	DISPONIBLE
Déchets de construction et de démolition	Séparation du plâtre des matériaux de construction et démolition (SERFIM – NANTET)	Chaine de tri et broyage / Plâtre issu des matériaux de construction et de démolition	DISPONIBLE
Déchets de chantiers de construction et de démolition	Présence de sulfates en teneur supérieure aux limites d'acceptabilité technique et environnementale pour une valorisation dans des matériaux à base de liants hydrauliques	Elimination des sulfates / Déchets contenant des résidus de plâtre	EN DEVELOPPEMENT
Plaques et carreaux de plâtre	Présence d'indésirables (isolants, résidus) à séparer pour valoriser le plâtre	Extraction des indésirables / Déchets de plâtre	DISPONIBLE
Granulats routiers	Présence de goudrons limitant la valorisation	Encapsulation / Granulats routiers pollués aux HAP	DISPONIBLE
MIDND	Présence de métaux lixiviables à des concentrations supérieures aux seuils de valorisation en technique routière ou autre scénario de valorisation en construction	Extraction par lavage chimique/MIDND	DISPONIBLE
Sables de fonderie	Présence de résidus de liants organiques limitant leur valorisation en construction (technique routière ou autre)	Combustion en lit fluidisé/Sables de fonderie	DISPONIBLE

DECHET	PROBLEMATIQUE	TITRE	MATURITE
Sables de fonderie	Présence de résidus de liants organiques limitant leur valorisation en construction (technique routière ou autre)	Dégangage thermique/Sables de fonderie	EN DEVELOPPEMENT
Sables de fonderie	Présence de résidus de liants organiques limitant leur valorisation en construction (technique routière ou autre)	Ultrasons haute fréquence/Sables de fonderie	EN DEVELOPPEMENT
Déchets matières plastiques, DEEE	Séparation des retardateurs de flamme pour valorisation matière	Extraction sélective de polymères/DEEE	EN DEVELOPPEMENT
Déchets composites	Séparation des différents éléments des composites afin de les valoriser	Solvolyse / Déchets composites	EN DEVELOPPEMENT
Pneumatiques usagés	Présence de soufre générant des émissions de SOx lors de la combustion	Dévilcanisation par micro-onde/ Déchets de pneumatiques usagés	DISPONIBLE
Pneumatiques usagés	Présence de soufre générant des émissions de SOx lors de la combustion	Dévilcanisation par oxydation contrôlée / Pneumatiques usagés	DISPONIBLE
Pneumatiques usagés	Présence de soufre générant des émissions de SOx lors de la combustion	Dévilcanisation biologique / Pneumatiques usagés	DISPONIBLE
Câbles	Elimination des indésirables pour valorisation des métaux présents dans les câbles électriques	Séparation automatisée des constituants / Câbles	DISPONIBLE
VHU	Présence de fluides dangereux pour l'environnement (huile de moteur, antigel, liquide de freins, CFC, PCB ...) à séparer avant valorisation des métaux	Extraction des fluides / VHU	DISPONIBLE
Lampes usagées	Séparation du mercure avant recyclage des métaux	Broyage et tamisage / Lampes fluocompactes	DISPONIBLE
Lampes usagées	Séparation du mercure avant recyclage des métaux	Coupage soufflage / t Tube fluorescent	DISPONIBLE
Tubes fluorescents et écrans plats	Séparation du mercure avant recyclage des métaux	Séparation automatisée des constituants/lampes, tubes fluorescents et écrans plats	DISPONIBLE
Déchets pâteux	Récupération des solvants dans les déchets pâteux	Désorption par vide poussé/déchet pâteux	DISPONIBLE
Déchets de bois B	Bois faiblement traités à dépolluer pour produire des combustibles propres	Hydrolyse et fermentation séparées / Bois B	EN DEVELOPPEMENT
Déchets agro-alimentaires	Elimination des sucres complexes pour augmentation de la production de combustibles propres	Hydrolyse acide / Déchets agroalimentaires de conserveries végétales	EN DEVELOPPEMENT

DECHET	PROBLEMATIQUE	TITRE	MATURITE
Déchets plastiques	Déchloration du PVC pour valorisation de plastiques comme combustibles liquides	Déchloration catalytique / PVC	EN DEVELOPPEMENT
Déchets plastiques	Déchloration du PVC pour valorisation de plastiques comme combustibles liquides	Pyrolyse par étapes / mélanges de polymères (dont PVC)	DISPONIBLE
Déchets de bois C - fortement traité	Bois fortement traités à dépolluer pour produire des combustibles propres	Lixiviation chimique acide sulfurique / Déchet bois CCA	EN DEVELOPPEMENT
Déchets de bois C - fortement traité	Bois fortement traités à dépolluer pour produire des combustibles propres	Extraction biologique / Bois traités CCA	EN DEVELOPPEMENT
Combustible solide de récupération	Amélioration de la qualité des CSR à partir des refus de TMB et des OM	Amélioration de la qualité des CSR	DISPONIBLE
Boues de STEP	Amélioration de la production de méthane et la dégradation des matières organiques en amont d'une digestion anaérobie	Prétraitement ultrasonique en vue d'améliorer la digestion anaérobie / Boues de STEP	DISPONIBLE
Déchets agro-alimentaires	La digestion anaérobie nécessite un temps de rétention du processus non négligeable. Des prétraitements permettent de réduire ce temps de réaction et d'améliorer la production de méthane	Ozonation/ Déchets agroalimentaires	DISPONIBLE
Déchets agro-alimentaires	Réduction des polymères gras en vue de produire du méthane	Saponification/ Déchets agroalimentaires d'abattoir	DISPONIBLE
Déchets organiques	Abattement du soufre des déchets organiques avant méthanisation	Réactif de désulfuration / Déchets organique soufrés	DISPONIBLE

Au total, 31 fiches sommaires décrivant 21 procédés de prétraitement commercialement disponibles et 10 procédés en cours de développement, ont été rédigées. Les procédés permettant d'améliorer la qualité des CSR font l'objet d'une fiche spécifique rédigée sur la base de la trame des fiches sommaires.

Certaines problématiques ont fait l'objet de plus d'une fiche car, pour un même polluant, diverses technologies de prétraitement peuvent être identifiées (exemple de la dévulcanisation de pneumatiques usagés).

Les tableaux ci-dessous présentent un autre classement des fiches en fonction de la finalité du prétraitement, (valorisation matière ou valorisation ressources énergétiques).

Tableau 4 : Liste des fiches sommaires classées par déchet et par finalité de valorisation comme ressources matières

	Valorisation matériaux minéraux	Valorisation matières plastiques et caoutchoutiques	Valorisation métaux non ferreux	Valorisation métaux stratégiques
<b>RESIDUS DE PROCEDES THERMIQUES</b>				
MIDND	Extraction par lavage chimique			
Sables de fonderie	Combustion en lit fluidisé Dégangage thermique Ultrasons haute fréquence			
Cendres sèches riches en COT	Combustion du carbone Séparation triboélectrostatique			
<b>DECHETS AUTOMOBILES</b>				
VHU			Extraction des fluides	
Pneumatique usagés		Dévilcanisation par micro-onde Dévilcanisation par oxydation contrôlée Dévilcanisation biologique		
<b>MATIERES PLASTIQUES ET DEEE</b>				
Déchets matières plastiques, DEEE		Extraction sélective de polymères Solvolyse Pyrolyse par étapes		
Lampes usagées				Broyage et tamisage Découpage et soufflage
Tubes fluorescents et écrans plats				Séparation automatisée des constituants
Câbles			Séparation automatisée des constituants	
<b>DECHETS DE DECONSTRUCTION ET DEMOLITION</b>				
Plâtre	Chaîne de tri et broyage (Nantet) Extraction des indésirables			
Déchets de construction et démolition	Elimination des sulfates			

	Valorisation matériaux minéraux	Valorisation matières plastiques et caoutchoutiques	Valorisation métaux non ferreux	Valorisation métaux stratégiques
Granulats routiers (fraisats)	Encapsulage			
AUTRE				
Déchets pâteux	Désorption par vide poussé			

Tableau 5 : Liste des fiches sommaires classées par déchet et par finalité de valorisation comme ressources énergétiques

	Combustible liquide	Combustible solide	Combustible gazeux
DECHETS AUTOMOBILES			
Pneumatique usagés	Dévilcanisation par micro-onde		
MATIERES PLASTIQUES ET DEEE			
Déchets plastiques	Déchloration catalytique Pyrolyse par étapes		
DECHET DE BOIS			
Déchet de Bois C (CCA)		Lixiviation chimique acide sulfurique Extraction biologique	
Déchet de BOIS B	Hydrolyse et fermentation séparées		
DECHETS ORGANIQUES			
Déchets agroalimentaires	Hydrolyse acide		Ozonation Saponification
Boues de step			Prétraitement ultrasonique
Déchets organiques			Réactif de désulfuration
AUTRE			
Refus de TMB et OMr		Amélioration de la qualité des CSR	

Les fiches sommaires sont présentées dans la seconde partie de ce travail – FICHES SOMMAIRES.

### 3.4 Liste des fiches « procédé »

Le tableau ci-dessous donne la liste des fiches décrivant des procédés pouvant être utilisés pour répondre à diverses problématiques. Ces fiches contiennent les mêmes rubriques que les fiches sommaires.

Tableau 6 : Liste des fiches procédé classées par déchet et par problématique

DECHET	PROBLEMATIQUE	TITRE	MATURITE
Matériaux revêtus de type bétons/ métaux	Présence de revêtements	Décapage cryogénique	EN DEVELOPPEMENT
Déchets solides	Polluants dans déchets solides	Extraction des polluants par fluide supercritique	EN DEVELOPPEMENT
Sols et sédiments	Extraction de polluant et sols et revalorisation sur site	Lavage et hydrocyclonage	DISPONIBLE

Les fiches procédé sont présentées dans la seconde partie de ce travail – FICHES PROCEDES.

## 4 Présentation des fiches génériques

Les 4 thématiques génériques identifiées lors de la phase de sélection des problématiques sont les suivantes:

- Hygiénisation
- Séchage/extraction d'eau
- Tri optique
- Extraction des métaux lourds

Les fiches génériques, après une brève description de la problématique traitée, décrivent différents procédés selon les rubriques suivantes :

- Type de procédé
- Maturité (TRL)
- Descriptif
- Schéma de principe
- Applications et potentiel d'émergence
- Limites

Un tableau de synthèse en fin de fiche permet d'identifier les principales applications des différentes technologies recensées.

Les fiches génériques sont présentées dans la seconde partie de ce travail – FICHES GENERIQUES.

## PARTIE 2 : FICHES



# FICHES SOMMAIRES

## VALORISATION MATIERE

### Valorisation matériaux minéraux

---

#### Cendres sèches riches en COT

- 1- Combustion/ Cendres sèches 26
- 2- Séparation triboélectrostatique / Cendres sèches 29

#### Déchets de construction et de démolition (DCD)

- 3- Chaîne de tri et broyage / Plâtre issu des matériaux de construction et de démolition 31
- 4- Elimination des sulfates / Déchets contenant des résidus de plâtre 34
- 5- Extraction des indésirables / Déchets de plâtre 37

#### Granulats routiers (fraisats)

- 6- Encapsulage / Granulats routiers pollués aux HAP 39

#### MIDND

- 7 -Extraction par lavage chimique / MIDND 41

#### Sables de fonderie

- 8- Combustion en lit fluidisé / Sables de fonderie 45
- 9- Dégangage thermique / Sables de fonderie 47
- 10- Ultrasons haute fréquence /Sables de fonderie 49

### Valorisation matières plastiques et caoutchoutiques

---

#### Déchets matières plastiques, DEEE

- 11- Extraction sélective de polymères / DEEE 51
- 12- Solvolyse / Déchets composites 53

#### Pneumatique usagés

- 13- Dévulcanisation par micro-onde/ Déchets de pneumatiques usagés 56
- 14- Dévulcanisation par oxydation contrôlée / Pneumatiques usagés 58
- 15 -Dévulcanisation biologique / Pneumatiques usagés 60

### Valorisation métaux non ferreux

---

#### Câbles

- 16- Séparation automatisée des constituants/ Câbles 62

#### VHU

- 17- Extraction des fluides / VHU 64

### Valorisation métaux stratégiques

---

#### Lampes usagées

- 18- Broyage et tamisage / Lampes fluocompactes 66
- 19- Découpage et soufflage / Tube fluorescent 68

#### Tubes fluorescents et écrans plats

- 20- Séparation automatisée des constituants / Lampes, tubes fluorescents et écrans plats 70

## Autre

---

### Déchets Pâteux

21- Désorption par vide poussé/ Déchets pâteux	72
--	----

## VALORISATION RESSOURCE ENERGETIQUE

### Combustibles liquides

---

#### Déchet de BOIS B

22- Hydrolyse et fermentation séparées / Bois B	75
---	----

#### Déchets agroalimentaire

23- Hydrolyse acide / Déchets agroalimentaires de conserveries végétales	78
--	----

#### Déchets plastiques

24- Déchloration catalytique / PVC	81
25- Pyrolyse par étapes / Mélange de polymères (dont PVC)	83

### Combustibles solides

---

#### Déchet de Bois

26- Lixiviation chimique acide sulfurique / Déchet bois CCA	85
27- Lixiviation biologique chitine et chitosane / Bois traités CCA	88

#### OMr et refus de TMB

28- Amélioration de la qualité des CSR	91
--	----

### Combustible gazeux

---

#### Boues de step

29- Prétraitement ultrasonique en vue d'améliorer la digestion anaérobie/ Boues de STEP	96
---	----

#### Déchets agroalimentaire

30- Ozonation/ Déchets agroalimentaires	100
31- Saponification/ Déchets agroalimentaires d'abattoir	103

#### Déchets organiques

32- Réactif de désulfuration / Déchets organique soufrés	106
--	-----



FICHE SOMMAIRE 1  
**COMBUSTION / CARBONE DANS CENDRES  
SECHES**

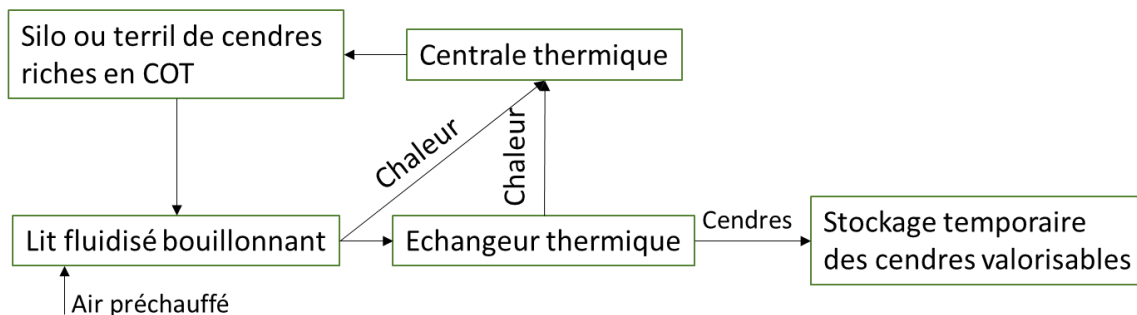
## CARBON BURN OUT PROCESS

L'objectif du procédé est de brûler le carbone résiduel présent dans les cendres sèches produites dans les centrales thermiques à charbon afin de les rendre conformes à la norme EN 450 et les valoriser comme produit d'addition des bétons

Le carbone résiduel contenu dans les cendres est brûlé dans un four à lit fluidisé bouillonnant. Les cendres non commercialisées sous forme sèche sont humidifiées pour simplifier leur manutention et éviter leur envol, puis stockées dans des parcs de stockage en terril ou en bassin de décantation. Cet entreposage des surplus depuis des décennies conduit à un volume important de cendres potentiellement valorisables (plusieurs millions de tonnes). Le référentiel EN 450 impose un taux maximum de 5 % en carbone imbrûlé pour une valorisation des cendres volantes dans des bétons.<sup>1, 2</sup>

<b>Type de procédé</b>	Thermique
<b>Nature du polluant</b>	Carbone imbrûlé (COT)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9) –traitement sur site possible
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Stockage (ISDND)

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Flux entrant**  
Cendres volantes, Air chaud

**Flux sortant**  
Cendres conformes pour valorisation, chaleur

### ETAPES DE TRAITEMENT

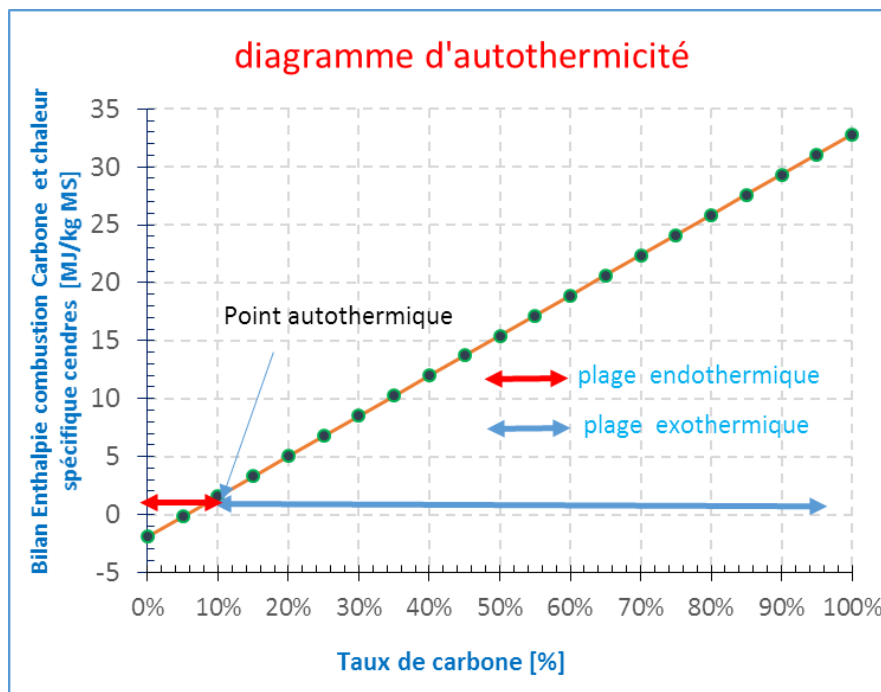
Acheminement des cendres du silo ou du terril vers le four par un camion automatisé  
Combustion dans un four à lit fluidisé bouillonnant dédié au traitement  
Refroidissement des cendres dans un échangeur thermique et récupération de la chaleur  
Récupération des cendres appauvries en carbone pour valorisation

### AVANTAGE/ INTERET

Procédé continu et automatisé  
Récupération de la chaleur émise lors de la combustion et lors du refroidissement des cendres vers la centrale thermique  
Obtention de cendres de qualité (granulométrie plus faible que les cendres d'alimentation)  
Procédé applicable sans transformation de la centrale thermique

### INCONVENIENT/ LIMITE

Le procédé est plus intéressant d'un point de vue économique si la teneur en carbone des cendres permet son fonctionnement sans apport d'énergie. En effet, pour que le procédé soit autothermique, il faut que la seule enthalpie de combustion du carbone résiduel des cendres puisse couvrir les besoins en chaleur spécifique de maintien en température de combustions de la fraction minérale non combustible ainsi que l'inertie thermique du réacteur et les pertes pariétales. Une telle simulation nous donne le graphe ci-dessous où nous pouvons voir que le procédé ne peut être autotherme qu'à partir de **10% de taux de carbone** dans les cendres.



En deçà de 10% de taux de carbone, il faut impérativement prévoir une source d'énergie supplémentaire pour assurer la combustion. Par ailleurs, la chaleur du four pourrait être utilisée pour le séchage des cendres stockées, ce que ne prévoit pas le procédé actuel.

### REGLEMENTATION APPLICABLE

Les normes européennes EN450-1 et NF EN 206 fixent les conditions d'emploi des cendres volantes comme composants dans diverses catégories de béton.

Le référentiel EN 450 impose un taux maximum de 5 % en carbone imbrûlé pour une valorisation dans des bétons.<sup>1, 2</sup>

Rubrique ICPE 2771 Traitement thermique de déchets non dangereux (soumis à autorisation)

### EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES

La société « Progress Material Inc. (PMI) » a développé cette technologie.

La première installation (Wateree Station, South Carolina Electric and Gas, 1999) traite 180000 tonnes de cendres par an. Une seconde installation a été mise en service en 2002 pour la centrale de Santee Cooper (Caroline du Sud).

**COMBUSTION / CARBONE DANS CENDRES  
SECHES****POTENTIEL D'EMERGENCE**

Les cendres de charbon sont des produits d'addition très courants des bétons. Cette filière constitue la voie principale de valorisation des cendres (45% entre 2002 et 2011 selon l'UFCC). L'évolution à la baisse des capacités de production énergétique par combustion de charbon, en conduisant à la baisse de production des cendres de fraîche production, peut rendre ce type de procédé intéressant pour l'industrie du béton permettant ainsi de reprendre des stocks de cendres dont la valorisation n'était pas envisageable jusqu'à présent.

S'agissant du traitement d'un gisement limité, l'optimisation économique et/ou la diversité des applications possibles sont des facteurs essentiels à l'émergence du procédé

Le procédé permet également de traiter l'ammoniaque présente provenant des technologies qui visent à réduire la production de NOx.

Certains sites sont déjà pourvus d'installations de séchage de cendres en vue de leur valorisation.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le design et les paramètres de fonctionnement sont optimisés à l'échelle pilote chez PMI afin de concevoir l'unité industrielle.

Des procédés basés sur la combustion par four microonde ou conventionnel, par oxydation par eau supercritique, ou par flottation n'ont été développés qu'à l'échelle pilote.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] NF EN 450-1 d'octobre 2012 : « *Cendres volantes pour béton Partie 1 : Définition, spécifications et critères de conformité* ».

[2] NF EN 450 d'octobre 2005 « *Cendres volantes pour béton Partie 2 : Evaluation de la conformité* »  
*Fly ash beneficiation by carbon burnout in a dry bubbling fluid bed, US Patent n° WO 1992017415A1*  
*Carbon Burn Out, A state of the art in commercial ash beneficiation*, Lisa Cooper, Progress Materials, Inc., World of Coal Ash Conference, Mai 2007

<http://www.pmiash.com/carbonburnout.asp>



FICHE SOMMAIRE 2  
**SEPARATION TRIBO ELECTROSTATIQUES /  
CARBONE DANS CENDRES SECHES**

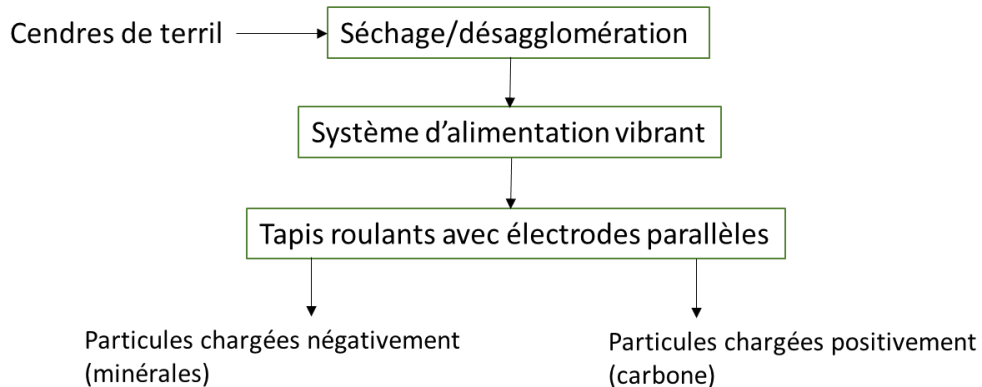
**SEPARATION TRIBO ELECTROSTATIQUE®**

L'objectif du procédé est de séparer le carbone imbrûlé des cendres volantes des centrales thermiques à charbon afin de les rendre conformes à la norme EN 450 et les valoriser comme produit d'addition des bétons.

Le procédé repose sur la séparation du carbone et des cendres après les avoir chargées par frottement entre deux électrodes.  
Les cendres non commercialisées sous forme sèche sont humidifiées pour simplifier leur manutention et éviter leur envol, puis stockées dans des parcs de stockage en terril ou en bassin de décantation. Cet entreposage des surplus depuis des décennies conduit à un volume important de cendres potentiellement valorisables.  
Le référentiel EN 450 impose un taux maximum de 5 % en carbone imbrûlé pour une valorisation des cendres volantes dans des bétons.<sup>1, 2</sup>

<b>Type de procédé</b>	Physicochimique
<b>Nature du polluant</b>	Carbone imbrûlé
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9)- traitement sur site possible
<b>Technologies de référence</b>	Stockage (ISDND)

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**Flux entrant**  
Cendres volantes

**Flux sortant**  
Cendres conformes pour valorisation et résidu riche en carbone

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Introduction du flux de cendres de terril entre deux électrodes planes parallèles  
Les particules se chargent électrostatiquement par frottement  
Transport des particules chargées positivement et négativement par un tapis roulant dans des directions opposées  
Récupération des cendres appauvries en carbone valorisables dans des bétons et d'un résidu enrichi en carbone qui peut être valorisé thermiquement.



## FICHE SOMMAIRE 2

# SEPARATION TRIBO ELECTROSTATIQUES / CARBONE DANS CENDRES SECHES

### AVANTAGE/ INTERET

Récupération de cendres contenant de moins de 1.5 à 4.5 % de carbone imbrûlé, selon les paramètres utilisés (vitesse du tapis roulant, vitesse d'alimentation,  
Fonctionne avec un débit élevé de cendres, jusqu'à 40 tonnes/heure  
Processus sec qui ne nécessite aucun réactif et ne produit aucune émission  
Système compact (environ 9 m longueur\*1.5m largeur \*2.75 m hauteur)  
Valorisation thermique du résidu enrichi en carbone possible

### INCONVENIENT/LIMITE

S'applique à un gisement limité.

### REGLEMENTATION APPLICABLE

Les normes européennes EN450-1 et NF EN 206 fixent les conditions d'emploi des cendres volantes comme composants dans diverses catégories de béton.  
Le référentiel EN 450 impose un taux maximum de 5 % en carbone imbrûlé pour une valorisation dans des bétons.<sup>1, 2</sup>  
Rubrique ICPE 2791 (soumis à autorisation si > 10 t/j)

### EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES

La société « ST Equipement and Technologies LCC (STET) » commercialise le procédé depuis 1995 aux Etats Unis, en Angleterre (EDF, West Burton Power Station) et en Pologne.

### POTENTIEL D'EMERGENCE

Les cendres de charbon sont des produits d'addition très courants des bétons. Cette filière constitue la voie principale de valorisation des cendres (45% entre 2002 et 2011 selon l'UFCC). L'évolution à la baisse des capacités de production énergétique par combustion de charbon, en conduisant à la baisse de production des cendres de fraîche production, peut rendre ce type de procédé intéressant pour l'industrie du béton permettant ainsi de reprendre des stocks de cendres dont la valorisation n'était pas envisageable jusqu'à présent.  
S'agissant du traitement d'un gisement limité, l'optimisation économique et/ou la diversité des applications possibles sont des facteurs essentiels à l'émergence du procédé.  
Le séchage des cendres est déjà en place en France pour la reprise de cendres de terril. Ce procédé de pré-traitement apparaît relativement peu coûteux tant en fonctionnement qu'en investissement.

### CHAMP DE COMMENTAIRES

La consommation énergétique du procédé (hors séchage et désagglomération) est estimée à 1 kWh par tonne de produit traité. La majeure partie de l'énergie est consommée par les deux moteurs du tapis roulant.  
Le procédé de séparation électrostatique reste le plus répandu. Des procédés basés sur la combustion par four microonde ou conventionnel, par oxydation par eau supercritique, ou par flottation n'ont été développés qu'à l'échelle pilote.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF EN 450-1 d'octobre 2012 : « Cendres volantes pour béton Partie 1 : Définition, spécifications et critères de conformité ».  
[2] NF EN 450 d'octobre 2005 « Cendres volantes pour béton Partie 2 : Evaluation de la conformité »  
« 20 Years of commercial Experience in Dry Triboelectrostatic Beneficiation of Fly Ash », F. Hrach, S. Gasiorowski, H. Guicherd, conférence Vietbuild Ho Chi Minh City (juin 2015)

**PROCEDE NANTET**

L'objectif de l'unité de prétraitement est de valoriser le gypse et les matériaux isolants à partir de déchets de plâtre en mélange associé ou non à des complexes isolants. Pur à 90%, le gypse repart dans le cycle de production de nouvelles plaques de plâtre.

Bien que les gisements exploitables de gypse soient estimés à 350 millions de tonnes en France, l'essentiel de ces réserves est néanmoins rendu inaccessible compte-tenu de l'urbanisation et des grandes infrastructures. Face à cette difficulté et dans une perspective d'approvisionnement durable, les réserves doivent continuer à être gérées de manière raisonnée. Ainsi, une augmentation de l'utilisation de matière première secondaire est particulièrement encouragée par les pouvoirs publics, d'autant que les déchets de plâtre, non dangereux, bénéficient de la recyclabilité naturelle et infinie du gypse.

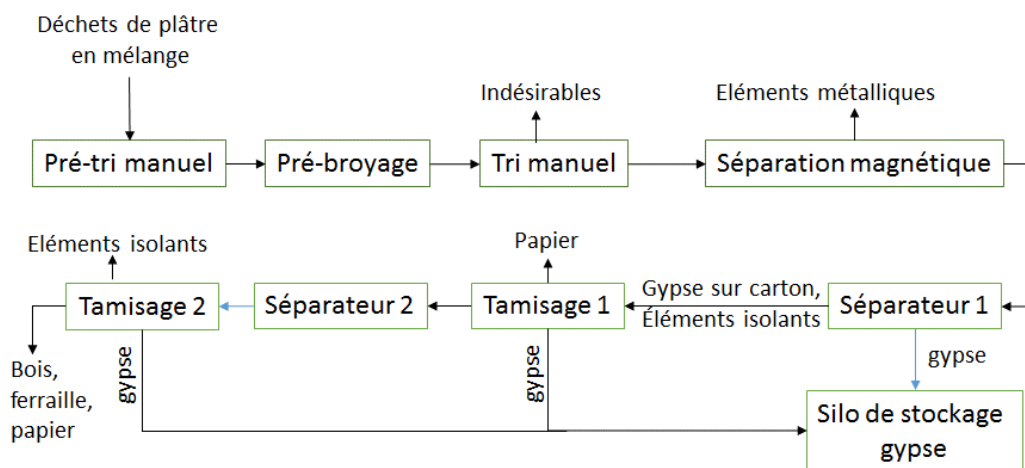
Le gisement des déchets de plâtre issus de produits de construction, estimé entre 350000 et 400000 tonnes, est principalement constitué de déchets issus de la découpe de plaques de plâtre neuves sur les chantiers de construction et de déchets de démolition. Le premier gisement est à l'origine de la plus grande partie des déchets recyclés à ce jour, le second gisement comprenant des éléments indésirables (enduits, isolant, peintures...) est le plus souvent enfoui en centre de stockage (alvéole spécifique) car plus difficilement valorisable.

A ce jour, seules les plaques de plâtre cartonnées sans complexe isolant, soit moins de 50 % du gisement global des déchets de plâtre, sont traitées, le reste part à l'enfouissement.

L'unité de prétraitement développée, par une succession d'étapes de tri et de broyage, permet de valoriser les déchets de plâtres en mélange, qu'ils soient associés ou non à des éléments indésirables.

<b>Type de procédé</b>	Mécanique
<b>Nature du polluant</b>	Enduits, isolants, peintures ...
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL 9) – traitement en unité centralisée
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Stockage en alvéole dédiée (ISDND)

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**Flux entrant**  
 Déchets de plâtre en mélange

**Flux sortant**  
 Gypse valorisable, papier-carton, éléments isolants, bois, éléments métalliques, indésirables





### FICHE SOMMAIRE 3

## CHAÎNE DE TRI ET BROYAGE/PLÂTRE ISSU DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ET DEMOLITION

### ETAPES DE TRAITEMENT

Réception et contrôle qualité des gisements avec tri manuel  
Prébroyage  
Tri manuel pour enlever les indésirables  
Séparation magnétique des produits métalliques  
Trituration  
Tri par criblage, tamisage, aspiration et soufflerie  
Récupération du gypse dans un silo de stockage

### AVANTAGE/ INTERET

Produit conforme aux CDC des fabricants de plaques de plâtre  
Filière sur circuit court  
Valorisation papier, valorisation matériaux isolants, valorisation ferreux et bois  
Installation reliée à des systèmes d'aspiration et de filtration des poussières

### INCONVENIENT/LIMITE

L'installation ne permet pas de prétraiter les plaques renforcées dans la masse avec des fibres synthétiques.  
Le produit doit être exempt de produits amiantés et de peinture au plomb.  
Le produit doit être sec ou légèrement humide pour être valorisé, les déchets doivent donc être collectés et stockés à l'abri dans les déchetteries.

### REGLEMENTATION APPLICABLE

La réglementation interdit d'enfouir les déchets de plâtre mélangés à d'autres déchets, pour éviter les nuisances dues à la production D'H<sub>2</sub>S. L'arrêté du 19 janvier 2006 relatif aux ISDND conduit l'exploitant de décharge à mettre en place une alvéole spécifiquement réservée au plâtre.

### EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES

La société NANTET (groupe SERFIM) a conçu une installation pour la métropole de Chambéry à Francin en Savoie. Le gypse recyclé alimente le fabricant Placoplatre à Chambéry.  
Le taux de valorisation est de 94% de gypse pour les déchets de plâtre sans complexes isolants, de 80% de gypse pour les déchets de plâtre avec isolants, et de 77% de gypse pour les déchets de plâtre en mélange. La capacité de valorisation de l'installation est de 20 tonnes/heure, 25000 tonnes de plâtre ont été recyclés en 2012.  
Le retour sur investissement est estimé entre 3 et 5 ans.

### POTENTIEL D'EMERGENCE

Les industriels du plâtre se sont engagés volontairement dès 2008 à développer une filière de recyclage des produits à base de plâtre en fin de vie. La charte nationale de gestion des déchets de plâtre a ainsi abouti à la mise en place d'un maillage national de collecteurs sur le territoire et à une augmentation significative des tonnages recyclés de déchets externes de plâtre, de 10 000 tonnes en 2008 à 66 000 tonnes en 2014.  
Le Syndicat national des industries du plâtre (SNIP) a signé avec le Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer un « Engagement pour la croissance verte relatif au recyclage des déchets de plâtre » le 27 avril 2016. Le SNIP et ses adhérents signataires s'engagent à valoriser sous forme de matière 70% des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics en 2020 et à réduire de 30 % les quantités de déchets non dangereux non inertes admis en installation de stockage en 2020 par rapport à 2010, et de 50 % en 2025. À cette fin, les porteurs de projet ambitionnent de recycler 250 000 tonnes de déchets de plâtre à l'horizon 2020.  
Le système de collecte dans les déchetteries est en pleine expansion, avec plus de 250 points de collecte en France.



### FICHE SOMMAIRE 3

## CHAÎNE DE TRI ET BROYAGE/PLÂTRE ISSU DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION ET DEMOLITION

### CHAMP DE COMMENTAIRES

L'unité de prétraitement a été développée avec la cellule innovation du groupe SERFIM en collaboration avec le Centre Terre et Pierre en Wallonie, et sa fabrication a été confiée à la société RMIS. Le procédé a été mis au point en deux ans après de nombreux essais (laboratoire et pilotes) et un brevet a été déposé en 2010 (n° WO 2011/027255).

Les produits admis dans l'installation sont les plaques de plâtre cartonnées standards, les dalles de plafond en plâtre, les cloisons alvéolaires et les carreaux de plâtre, les plaques avec complexes de doublage (laine de verre, laine de roche, polystyrène, mousse de polyuréthane, etc.)

### BIBLIOGRAPHIE

<https://vimeo.com/99320205>

*Engagement pour la croissance verte relatif au recyclage des déchets de plâtre* signé le 27 avril 2016,  
NOR : DEVD1618981X

*Tri et valorisation des déchets BTP avec procédé innovant pour le plâtre à Francin (73)*, ADEME,  
Déchets 35, mai 2012.

<http://www.serfim.com/entreprise/nantet/>

**Elimination des sulfates dans les déchets contenant des résidus  
de plâtres**

L'objectif du prétraitement est l'extraction des sulfates présents dans les déchets de construction et démolition par lixiviation et élimination des sulfates.

Le plâtre étant susceptible de libérer des sulfates par lessivage, la réutilisation et la valorisation des déchets de construction et de démolition riches en plâtre engendrent un risque de pollution du milieu environnant, notamment, des nappes phréatiques. En effet, la solubilité du gypse dans une eau pure à 25°C s'élève à 2400mg/l, ce qui est équivalent à une concentration en sulfate de 1170mg/l. Cette valeur représente plus que 4 fois la concentration maximale en sulfate (250mg/l), au-delà de laquelle l'eau potable risque de causer des effets physiologiques nocifs.

Au regard de ces risques, le procédé d'élimination des sulfates présents dans les DCD peut permettre d'accroître leur valorisation. Une enquête statistique nationale menée par le ministère en charge de l'écologie montre que le gisement de déchets du BTP, provenant majoritairement de la démolition (environ 93%), s'est élevé à 260 Mt en 2010, dont 39,4Mt pour les bâtiments. Sa répartition est la suivante : déchets inertes : 28,2 Mt, déchets non dangereux (bois, cartons, plastiques, métaux, plâtre...) : 10,2 Mt, déchets dangereux : 0,6 Mt.

Les déchets de démolition riches en plâtre, quoique stockés en milieu sec, peuvent subir une décomposition anaérobie par l'attaque de bactéries sulfato-réductrices ce qui induit la génération de sulfure d'hydrogène selon l'équation suivante :

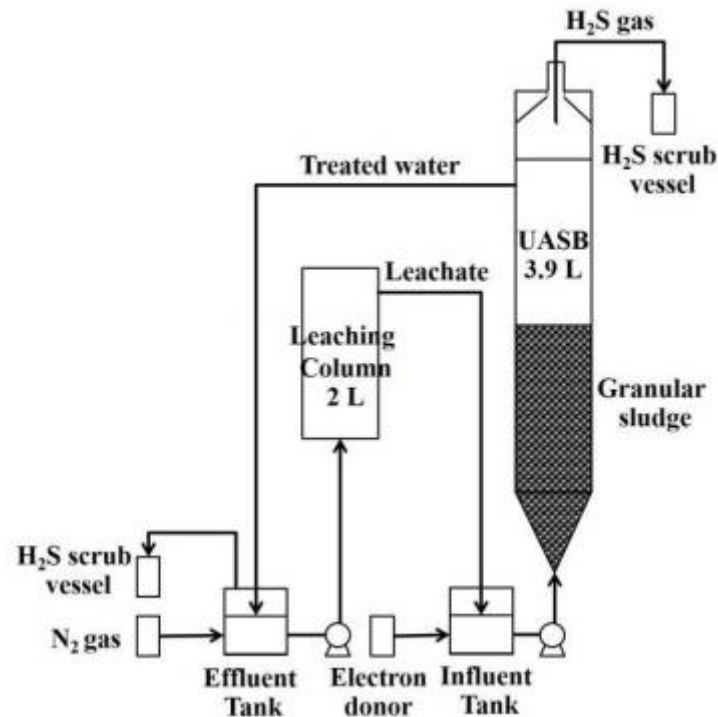


Dans certaines conditions, 4 tonnes de placôplâtre peuvent générer approximativement de 1 à 1,4 tonnes de H<sub>2</sub>S ou sulfure d'hydrogène sous forme gazeuse. Le H<sub>2</sub>S est un gaz corrosif, potentiellement toxique à forte concentration mais surtout extrêmement odorant.

Ainsi, les coûts d'élimination de ces déchets contenant du gypse sont élevés et leur recyclage comme fertilisant de sol ou leur réutilisation comme matériaux de construction (dans les remblais routiers) nécessitent un contrôle rigoureux de la quantité des sulfates solubles dans les granulats recyclés pour réduire le risque de pollution et garantir la stabilité des ouvrages.

D'une part, la porosité des granulats recyclés est deux fois supérieure à celle des granulats naturels ce qui augmente le risque de relargage dans l'eau d'espèces solubles. Et d'autre part, la réaction chimique entre les granulats à base de béton et les sulfates engendre des gonflements différés qui peuvent altérer l'ouvrage. D'où l'intérêt de la maîtrise de la composition des granulats recyclés, notamment de la teneur en sulfates solubles.

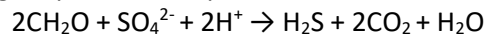
<b>Type de procédé</b>	Traitement des DCD par lixiviation à l'eau et élimination des sulfates dans les lixiviats par traitement biologique.
<b>Nature du polluant</b>	Sulfates provenant du gypse (sulfates de calcium CaSO <sub>4</sub> ) ou des inclusions de sulfures métalliques contenues dans les matériaux naturels de construction (roches granitiques ou schistes)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	1-3 (En développement)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Lixiviation

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**

**Flux entrant**  
**Déchets de chantier et démolition**

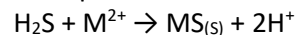
**Flux sortant**  
**Sulfures métalliques solides**
**ETAPES DE TRAITEMENT**

Les DCD sont traités par lixiviation à l'eau (colonne de lixiviation). Les sulfates contenus dans les lixiviats sont ensuite éliminés à l'aide d'un traitement biologique qui est la réduction biologique des sulfates au sein de bioréacteurs de conception différente (réacteur UASB, réacteur à lit fluidisé inverse (IFB) ou d'un réacteur anaérobie gas lift). L'efficacité d'élimination des sulfates la plus élevée atteinte par ces trois systèmes varie de 75 à 95%.

Des bactéries sulfato-réductrices sont utilisées pour réduire les sulfates en sulfures à travers l'oxydation d'un composé organique selon l'équation suivante :



Les sulfures générés réagissent avec les métaux présents sous forme d'ions dissous pour former des précipités de sulfures métalliques selon l'équation suivante :



Où M est un métal (fer, zinc, nickel, cuivre ou plomb).

L'eau traitée provenant du bioréacteur peut alors ensuite être réutilisée dans la colonne de lixiviation. Notons que les DCD sont généralement pauvres en matière organique. Donc, un composé organique électro-donneur devrait être approvisionné.

**AVANTAGE/ INTERET**

Le traitement biologique est moins coûteux que les traitements physico-chimiques utilisés actuellement pour éliminer les sulfates tels les traitements par échange d'ions, l'absorption et la filtration par membrane. Ces derniers consomment beaucoup d'énergie et leurs coûts d'opération et de maintenance sont élevés.

**ELIMINATION DES SULFATES / DECHETS  
CONTENANT DES RESIDUS DE PLATRES****INCONVENIENTS / LIMITES**

L'élimination des effluents et du sulfure accumulé dans le système et d'autres paramètres clés du prétraitement doivent encore être optimisés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

La directive 99/31/CE considère que les déchets de plâtre sont des déchets non dangereux mais qui doivent être stockés dans des alvéoles spécifiques afin d'éviter la formation d'H<sub>2</sub>S à partir des sulfates (SO<sub>4</sub>) du gypse.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Pas d'installations commerciales connues.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'application de ce procédé de traitement à échelle réelle où le taux de sulfate en amont est important présente des complications en relation avec l'élimination des effluents et du sulfure accumulé dans le système qui risque de se ré-oxyder en sulfate une fois déchargé dans l'environnement. Un système de récupération doit être donc connecté au système de réduction biologique. La récupération du calcium au cours du procédé pour empêcher l'accumulation des carbonates de calcium qui précipitent dans les conduites et dans la boue est une autre amélioration à creuser.

Par ailleurs, les déchets de démolition à forte concentration en gypse sont très riches en impuretés toxiques (présence de fluorine et de métaux lourds) qui entravent la croissance des bactéries sulfato-réductrices. Une réflexion doit être menée sur comment réduire la toxicité de ces métaux. Enfin, le procédé peut être amélioré davantage en contrôlant mieux l'excès en sulfures afin de réduire le besoin d'un post-traitement et donc le coût opérationnel.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Prétraitement présenté à l'état de pilote. La poursuite des travaux de recherche permettant d'optimiser les paramètres et le passage à l'étape de démonstrateur industriel, sont des étapes nécessaires pour le développement de la technologie.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Pimluck Kijjanapanich. Sulfate reduction for remediation of gypsiferous soils and solid wastes. Geophysics [physics.geo-ph]. Université Paris-Est, 2013.

[2] Jang, Yong-Chul, and Timothy Townsend. "Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines." *Advances in Environmental Research* 5.3 (2001): 203-217.

[3] Paulus, Hélène, et al. "Dosage rapide sur site des sulfates dans les granulats recyclés issus du BTP."

[4] TRINEL, Benjamin. "Problématique des sulfates dans la valorisation des déchets du BTP." *Environnement & technique* 302 (2010): 50-53.

### Gypsum Recycling Mill

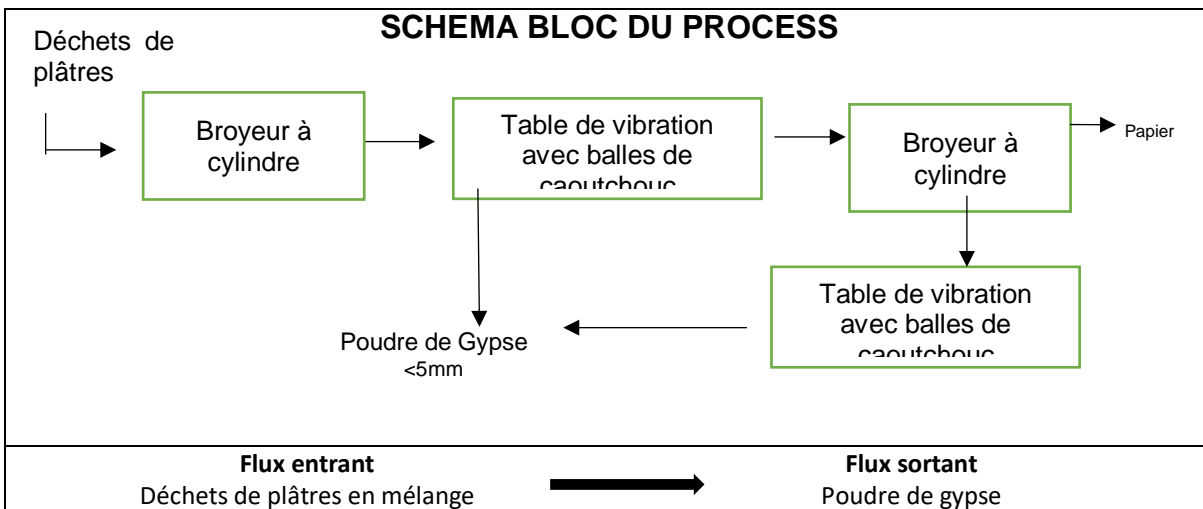
Le présent prétraitement permet la séparation des indésirables des déchets de plâtre en vue d'un recyclage matière.

L'objectif du prétraitement est de permettre la séparation des indésirables (papiers, vis, bois, sacs plastiques) du plâtre, jusqu'à 2% de contaminants en entrée, afin de produire une poudre de plâtre ayant un taux d'impureté très faible permettant de produire des plaques de plâtre recyclés.

La problématique identifiée était d'assurer une séparation optimale des différents constituants des déchets de plâtres mêlés.

Le chiffre de 400 à 450 000 tonnes de déchets de plâtre par an en France, est annoncé comme le gisement global. Mais ce chiffre concerne les gisements facilement ségrégeables et recyclables, il ne concerne pas le plâtre en mélange dans les opérations de démolition. Le gisement de déchets de plâtre en mélange dans les opérations de déconstruction est difficilement estimable mais représente de très grand volume et donc engendre un fort intérêt.

<b>Type de procédé</b>	Mécanique
<b>Nature du polluant</b>	Papiers, bois et autres contaminants du plâtre
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	9 (Disponible)- traitement sur site possible
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Stockage ISDND



#### ETAPES DE TRAITEMENT

La première étape consiste en une réduction granulométrique (<50mm)

Une première étape de criblage mécanique au moyen d'une table vibrante contenant des balles de caoutchouc permet la séparation d'une fraction de poudre de gypse.

S'en suit un broyage mécanique à l'aide d'un ou plusieurs broyeurs à cylindres. La pression est appliquée par un principe mécanique simple et fiable de ressorts. Cette étape va efficacement moudre/broyer le gypse du papier sans découper le papier en éléments fins, qui seraient, par la suite, difficiles à tamiser.

La dernière étape consiste en une seconde étape de criblage, reprenant le même process que l'étape n°2.

A la suite, on récupère une fraction de poudre de gypse ayant un très faible taux d'impureté (<1% annoncé par le constructeur) ainsi qu'une fraction de papier ne contenant que très peu de gypse.



**FICHE SOMMAIRE 5**  
**EXTRACTION DES INDESIRABLES/DECHETS DE PLATRE**

**AVANTAGES/ INTERETS**

Le principal intérêt du prétraitement développé par ReTec réside dans les taux de séparation élevés des différents constituants des déchets de plâtres (fraction de poudre de gypse pure à 99%).

**INCONVENIENTS / LIMITES**

La limite du prétraitement réside dans la restriction des intrants. Les constructeurs indiquent pouvoir traiter différents flux de déchets et d'en extraire différents contaminants. Il semble que ce prétraitement s'adresse principalement aux déchets de plaques de plâtres faiblement contaminés (environ 2% de fractions de bois, plastiques, papiers).

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Arrêté du 28 octobre 2010 relatif aux Installations de Stockage de Déchets Inertes : Il interdit implicitement l'admission de déchets à base de plâtre sauf lorsqu'ils sont contenus en faible quantité dans des déchets de démolition, comme par exemple de l'enduit sur brique. Il est strictement interdit de procéder à des opérations de dilution afin d'en permettre le stockage

Arrêté du 19 janvier 2006 relatif aux Installations de Stockage de Déchets non Dangereux  
« Les déchets à base de plâtre sont stockés, sauf impossibilité pratique, dans des casiers dans lesquels aucun déchet biodégradable n'est admis. »

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Pas d'installation Française identifiée.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Potentiel d'émergence à nuancer avec la plage de déchets acceptés en entrant.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Il est couramment accepté d'incorporer 20-25% de poudre de plâtre recyclé dans la formulation finale des plaques de plâtre (Placoplatre). Objectif chez Siniat (anciennement Lafarge Plâtres) 30% d'intégration des déchets dans le processus de fabrication.

Coût total annoncé par ReTec pour une unité de 20 t/h alimentée en déchet de C&D : 17-20 €/t

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] [http://retec.dk/wp-content/uploads/2016/06/Gips\\_A4folder\\_0516.pdf](http://retec.dk/wp-content/uploads/2016/06/Gips_A4folder_0516.pdf)



FICHE SOMMAIRE 6  
**ENCAPSULAGE / GRANULATS ROUTIERS  
POLLUES AUX HAP**

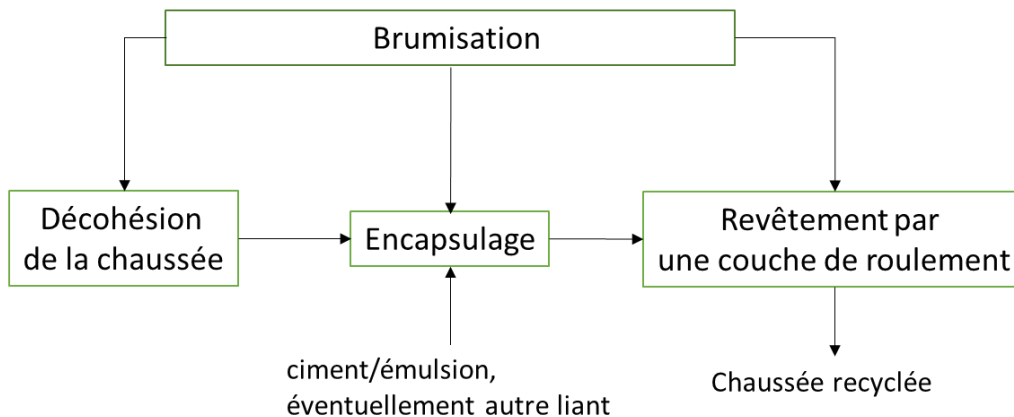
**RECYCLEAN® traitement en place de granulats routiers  
contaminés par des HAP**

L'objectif du procédé est de fixer les polluants présents (HAP principalement) dans des matériaux routiers pour permettre leur réemploi directement sur site.

Le procédé repose sur une méthode d'encapsulation des polluants par liant hydraulique ou hydrocarboné à froid et sous protection humide (brumisation d'eau).  
Les goudrons et leurs dérivés ont largement été utilisés dans les revêtements routiers jusqu'à la fin des années 1990. Ils peuvent contenir de 10 à 50 % en poids de composés hydrocarbonés aromatiques polycycliques (HAP). Plusieurs d'entre eux, comme le benzo(a)pyrène, sont cancérogènes.

Type de procédé	Physicochimique
Nature du polluant	HAP
Maturité du procédé (échelle TRL)	Disponible (TRL9) – traitement sur site
Technologies ou solution de référence	Mise en décharge de classe 1 (ISDD)

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**Flux entrant**  
Fraisat/matériau routier contenant des HAP

**Flux sortant**  
Revêtement routier

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Décohésion de la chaussée sur 5 à 35 cm selon la nature et l'étendue de la pollution, le mode de traitement et les performances mécaniques recherchées.

Mélange des matériaux avec un liant hydraulique ou hydrocarboné qui induit la fixation des polluants.

Revêtement par une couche de roulement en fonction du mode de traitement et du trafic considéré.  
Abattement des poussières et émanations gazeuses par brumisation d'eau.



**ENCAPSULAGE / GRANULATS ROUTIERS  
POLLUES AUX HAP****AVANTAGE/ INTERET**

Procédé de traitement en place : réemploi des matériaux directement sur site, qui évite le transport et la mise en installation de stockage.

Procédé « à froid ».

Exposition des travailleurs et des riverains aux HAP limitée grâce à la protection par brumisation d'eau.

Réouverture rapide de la chaussée à la circulation.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Les HAP sont toujours présents dans les matériaux et la problématique de la gestion des déchets de réfection de route peut se poser de nouveau, à l'occasion d'interventions à venir sur ce chantier, s'il n'est pas envisagé de réemployer de nouveau les matériaux au moyen du même procédé.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les fraisats routiers contenant des HAP sont, lorsqu'ils sont évacués de leur site de production, considérés comme des déchets dangereux et doivent être envoyés dans des installations de stockage de déchets dangereux (conformément à l'annexe 2 de l'article R. 541-8 du code de l'environnement).

Les fraisats réemployés directement sur le site de leur production ne sont pas considérés comme des déchets par le code de l'environnement (Article L. 541-1-1 du code de l'environnement).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Le procédé, mis en œuvre via des ateliers de retraitement mobiles mis au point par EIFFAGE Route (type ARC700®, ARC1000® ou ARM2500®) a été utilisé sur plusieurs chantiers.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le procédé répond aux préoccupations économiques, sanitaires et environnementales actuelles dans le domaine du traitement des chaussées polluées.

L'application du procédé nécessite une étude spécifique au cas par cas basée sur une caractérisation des polluants, des études de formulation et des essais environnementaux permettant de vérifier l'absence de relargage de polluants à partir des matériaux traités.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le procédé a été lauréat en 2015 des Trophées des TP et du Comité Innovation Routes et Rues du CEREMA.

3000 m<sup>2</sup> peuvent être traités par jour (2.5 km linéaire maximum).

Les coûts des solutions mettant en œuvre le procédé RECYCLEAN® sont inférieurs à ceux des techniques classiquement utilisées (rabotage + évacuation en ISDD ou ISDND). L'économie est estimée entre 200 et 400 Euros/tonne de déchet.

Le procédé peut également être appliqué pour fixer l'amiante.

**BIBLIOGRAPHIE**

*Recyclean® Traitement des chaussées polluées*, Notice Technique, EIFFAGE Branche Infrastructures, novembre 2015.

*Le recyclage routier « antipollution »*, Le Moniteur, N°5869, mai 2016.

*Retraitement en place : une première « anti-pollution » à Rouen*, Routes actualités N°135, mars 2016.

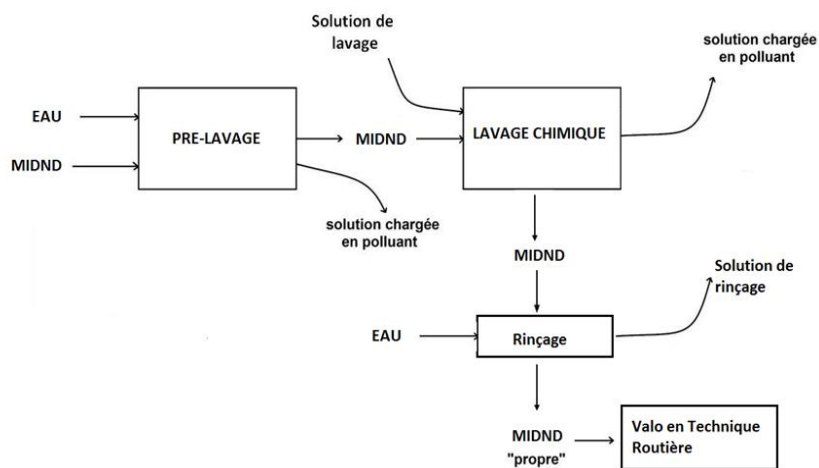
## EXTRACTION PAR LAVAGE CHIMIQUE

L'objectif du procédé est d'améliorer la qualité technique et environnementale des MIDND pour les valoriser dans des matériaux de construction

Le procédé permet l'extraction de la fraction soluble et des éléments traces métalliques lixiviables pour rendre la charge polluante des mâchefers compatible avec une valorisation dans l'élaboration de matériaux de construction

<b>Type de procédé</b>	physico-chimique
<b>Nature du polluant</b>	sels (chlorures) et éléments trace métalliques
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9) – traitement sur site possible
<b>Technologies de référence</b>	Maturation en IME

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Flux entrant**  
MIDND, eau, acide

**Flux sortant**  
MIDND valorisable, effluent liquide

### ETAPES DE TRAITEMENT

**Pré- Lavage** : Cette étape permet l'extraction par dissolution des chlorures facilement extractibles à l'eau.

**Lavage acide** : Les acides inorganiques forts comme le HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sont fréquemment employés dans les procédés de lavage en raison de leur (relatif) faible coût et de leur efficacité dans l'extraction des éléments traces métalliques.

L'extraction de ces éléments avec des acides organiques complexants est une solution alternative.

**Rinçage** : L'étape de rinçage dynamique à l'eau est mise en place dans le procédé pour avoir une extraction plus complète de la fraction de la matrice rendue plus soluble par le lavage.



**FICHE SOMMAIRE 7**  
**EXTRACTION PAR LAVAGE CHIMIQUE /**  
**MIDND**

**AVANTAGE/ INTERET**

Cette technologie est intéressante du point de vue de la diminution de teneur en chlorures et d'extraction de la fraction mobilisable des métaux (principaux paramètres susceptibles de restreindre fortement les possibilités de valorisation directe des MIDND sans prétraitements autres que le criblage, le déferraillage et la maturation en plateforme).

La méthode d'extraction présente l'avantage de concentrer les espèces solubles dans la solution de lavage tout en limitant le relargage vers l'environnement.

Cette méthode permet également de produire une matière première secondaire de bonne qualité environnementale pour une utilisation dans des matériaux de construction (hors route)

**INCONVENIENTS / LIMITES**

L'emploi de ce procédé de pré-traitement, implanté en Belgique et en Allemagne, plus coûteux en investissement qu'une installation de maturation et fortement consommateur d'eau, ne peut être envisagé que dans le cadre d'une valorisation à forte valeur ajoutée. Le procédé nécessiterait une optimisation des volumes d'eau utilisés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Arrêté du 18/11/11 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux.

Guide d'application - Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière – Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND), SETRA 2012.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

INDAVER-Belgique : (<http://www.indaver.be/fr/installations-processes/recuperation-des-materiaux/traitement-des-cendres/>) : lavage à l'eau

Hambourg (Allemagne) : lavage acide (HCl)

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

La comparaison des seuils flamands, allemands et français pour la valorisation des mâchefers en technique routière est présentée ci-dessous.

Paramètres	Seuils Flamands	Seuils Allemands	France CEREMA	France CEREMA
	(VLAREA)	Guide LAGA (2003) - Z2	Usage V1	Usage V2
	TS 14405 - LS10	EN 12457-4 (LS10)	EN 12457-2 (LS10)	EN 12457-2 (LS10)
As (mg/kg MS)	0,88	0,6	0,6	0,6
Ba (mg/kg MS)			56	28
Cd (mg/kg MS)	0,03	0,06	0,05	0,05
Cr (mg/kg MS)	0,5	0,6	<b>2</b>	<b>1</b>
Cu (mg/kg MS)	0,5	1	<b>50</b>	<b>50</b>
Hg (mg/kg MS)	0,02	0,02	0,01	0,01
Mo (mg/kg MS)			5,6	2,8
Ni (mg/kg MS)	0,75	0,7	0,5	0,5
Pb (mg/kg MS)	1,3	2	1,6	1
Sb (mg/kg MS)			0,7	0,6
Se (mg/kg MS)			0,1	0,1
Zn (mg/kg MS)	2,8	6	<b>50</b>	<b>50</b>
Sulfates (mg/kg MS)		2000	10000	5000
Chlorures (mg/kg MS)		1000	10000	5000
Fluorures (mg/kg MS)			60	30
Cyanures (mg/kg MS)		0,2		
Indice phénol (mg/kg MS)		1		

On constate que les seuils français sont beaucoup plus permissifs que les flamands et allemands en ce qui concerne la fraction lixiviable en cuivre et en zinc. Les autres seuils sont du même ordre de grandeur.

On notera également que seule la France fixe des seuils pour les éléments Ba, Mo, Sb, Se et les fluorures.

Les allemands fixent également des seuils en fraction lixiviable pour les cyanures et l'indice phénol ainsi que des seuils en contenu total en métaux, cyanures et composés organiques.

Le procédé INDAVER permettant la valorisation de granulats issus de mâchefers conformément aux seuils néerlandais et allemands, il est donc attendu qu'il permette également la valorisation de granulats issus de mâchefers en conformité avec le guide français, sous réserve de conformité pour les éléments Ba, Mo, Sb, Se et les fluorures qui ne font pas l'objet d'une vérification de la fraction lixiviable en Flandres et en Allemagne.

Concernant le coût du traitement, l'amélioration du rendement du lavage aux acides organiques peut permettre de limiter les coûts d'exploitation.



**EXTRACTION PAR LAVAGE CHIMIQUE /  
MIDND**

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Les eaux chargées en sels peuvent être traitées par évaporation voire réinjectées dans le four après vérification du transfert des sels vers les gaz lors de l'incinération des déchets.

Ce procédé peut avantageusement être employé en complément d'opérations de séparation des métaux ferreux et non ferreux par des techniques de tri magnétique et par courant de Foucault.

D'autres procédés de pré-traitement par carbonatation accélérée sont à l'étude pour limiter la fraction lixiviable en métaux.

**BIBLIOGRAPHIE**

INDAVER. Waste treatment / Ash treatment installation. [En ligne] [Citation : 22 Janvier 2013.]  
<http://www.indaver.be/index.php?id=1733&L=0&cHash=1f70f49e5c>.

## REGENERATION DES SABLES DE FONDERIE PAR COMBUSTION EN LIT FLUIDISE

L'objectif du procédé est de régénérer les sables de fonderie usagés par décomposition thermique des liants.

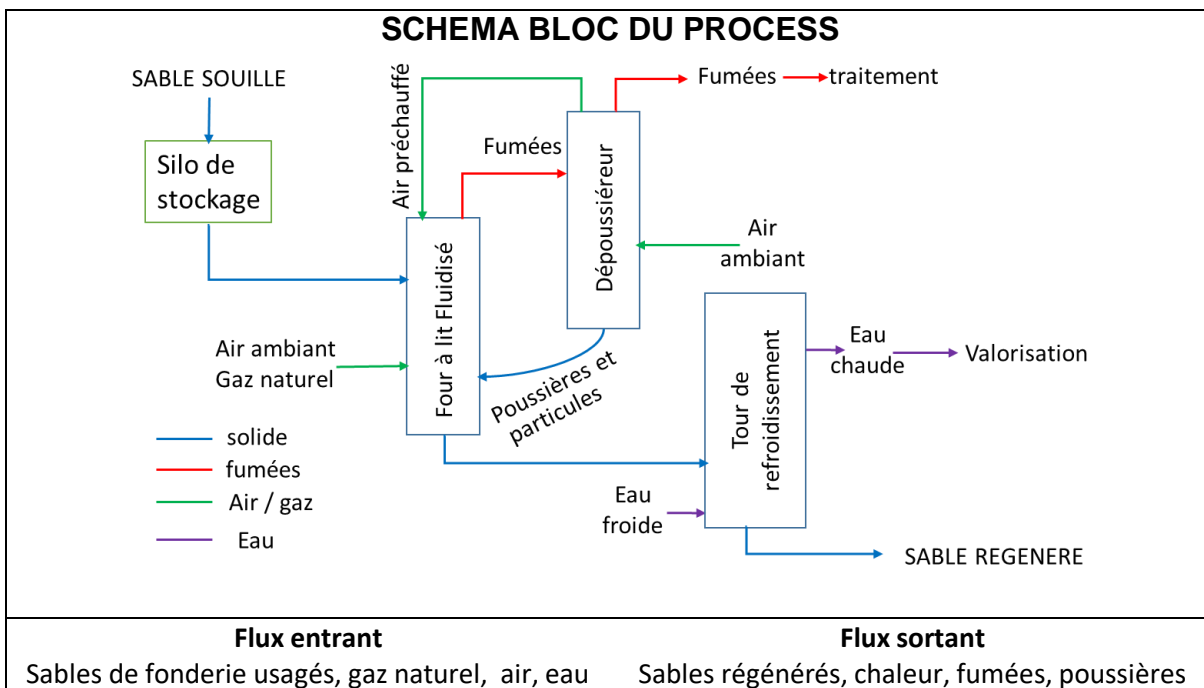
Le procédé de régénération repose sur l'oxydation des composants organiques dans une chambre à lit fluidisé.

Le gisement national de sables de fonderies a été estimé à 800 000 tonnes par an, dont seulement 50 000 tonnes sont valorisées.<sup>1</sup>

Les sables de fonderie dont la fraction lixiviable en phénols est inférieure à 50 mg/kgMS sont des déchets non dangereux assimilables à des déchets ménagers. A l'inverse, les sables de fonderie dont la fraction lixiviable en phénols est supérieure à 50 mg/kgMS sont des déchets dangereux.<sup>2</sup>

Les déchets de sable de fonderie peuvent être valorisés pour certains usages industriels selon leur teneur en phénols.

<b>Type de procédé</b>	Thermique
<b>Nature du polluant</b>	Liants organiques, résines
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9)- traitement sur site possible
<b>Technologies de référence</b>	Stockage de déchets non dangereux (voire ISDD)



### ETAPES DE TRAITEMENT

**Introduction du sable** dans le bac de stockage du four par écoulement gravitaire à partir d'un silo d'alimentation

**Acheminement du sable par une vis sans fin** vers le lit de chauffage

**Oxydation des composants organiques dans une chambre à lit fluidisé** maintenue à 680 °C au moyen de brûleurs à tubes submergés qui permettent un mélange homogène des produits de combustion et du sable, ce qui assure un excellent transfert thermique

**FICHE SOMMAIRE 8****COMBUSTION EN LIT FLUIDISE / SABLES DE FONDERIE****AVANTAGE/ INTERET**

Recyclage de plus de 90 % de la quantité de sable traité  
Importante réduction des rejets industriels  
Diminution des frais d'exploitation (par rapport à l'achat de sable neuf et à l'élimination du sable rejeté)  
La combustion du liant contribue à diminuer la consommation de combustible  
Meilleure qualité du produit fini

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Il n'a pas pu être vérifié ici que ce procédé permet d'obtenir d'aussi bons résultats pour tous types de liants.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les conditions d'élimination des sables de fonderies contenant des liants organiques de synthèse sont régies par l'arrêté ministériel du 16 juillet 1991. Cet arrêté a été modifié par l'arrêté ministériel du 31 décembre 2004 relatif aux installations de stockage de déchets industriels inertes provenant d'une installation classée.  
Il prévoit que l'élimination en décharge de ces sables doit se faire dans un site réglementé au titre de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.  
L'arrêté du 16 juillet 1991 prévoit par ailleurs la valorisation de ces sables de fonderies, sous réserve de respecter un certain nombre de conditions.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Fonderie Montupet (Rivière-Beaudette, Québec)  
Constructeur : GTI Gudgeon Thermfire International (ex Gudgeon Brothers Limited) (Québec)

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Ce système de régénération des sables de fonderie est une technologie qui permet à la fois de diminuer substantiellement les rejets de sable souillé et d'accroître la performance de l'entreprise. Chez Montupet, il a permis un accroissement de la compétitivité et la résolution d'un important problème environnemental.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Frais d'exploitation fonderie Montupet (\$/tonne de sable traité, 1996) :

SANS REGENERATION		AVEC REGENERATION	
Achat du sable	73\$	Energie	6\$
		Exploitation et entretien	4.5\$
Elimination du sable	36\$	Elimination du sable	1.6\$
TOTAL	109\$	TOTAL	12.1\$

L'investissement de deux fours ayant chacun une capacité de recyclage de 2.7 tonnes métriques à l'heure a été amorti en moins de deux ans

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Fédération Nationale des Travaux Publics, Novembre 2001  
[2] *Les déchets de fonderie – Stockage*, Bernard Duquet, Techniques de l'ingénieur, mars 2007.  
[http://www.grandeentreprise.gazmetro.com/publicationsressources/informatech/archives/pdf/informatech\\_v12\\_n2\\_c.pdf](http://www.grandeentreprise.gazmetro.com/publicationsressources/informatech/archives/pdf/informatech_v12_n2_c.pdf)

## DEGANGAGE THERMIQUE

L'objectif du procédé est de fragiliser les gangues constituées de liants organiques ou de résines autour des grains de sables de fonderie usagés pour les séparer ensuite par action mécanique et valoriser les sables.

Le procédé de régénération de sables de fonderie repose sur le dégangage thermique des grains après un enrobage par une substance inflammable.

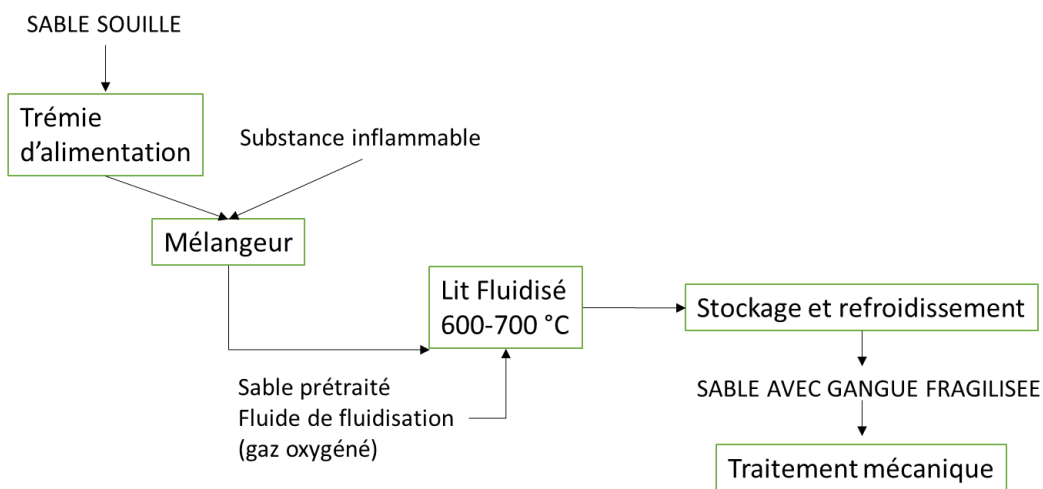
Le gisement national de sables de fonderies a été estimé à 800 000 tonnes par an, dont seulement 50 000 tonnes sont valorisées. <sup>1</sup>

Les sables de fonderie dont la fraction lixiviable en phénols est inférieure à 50 mg/kgMS sont des déchets non dangereux assimilables à des déchets ménagers. A l'inverse, les sables de fonderie dont la fraction lixiviable en phénols est supérieure à 50 mg/kgMS sont des déchets dangereux. <sup>2</sup>

Les déchets de sable de fonderie peuvent être valorisés pour certains usages industriels selon leur teneur en phénols.

<b>Type de procédé</b>	Thermique
<b>Nature du polluant</b>	Liants organiques, résines
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	En développement (TRL4)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Régénération mécanique ou par calcination

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Flux entrant**  
Sables de fonderie usagés, substance inflammable, gaz oxygéné

**Flux sortant**  
Sables avec gangues fragilisées, gaz chauds

### ETAPES DE TRAITEMENT

**Enrobages des grains** avec une substance inflammable imprégnant la gangue des grains.

**Introduction des grains à traiter** en partie basse d'un four de calcination à lit fluidisé (sable prétraité)

**Fragilisation de la gangue par choc thermique** au sein du lit.

**Oxydation des parties organiques** de la gangue durant la migration ascendante au sein du lit.

**Traitement mécanique** pour détacher la gangue des grains



**DEGANGAGE THERMIQUE / SABLES DE FONDERIE****AVANTAGE/ INTERET**

Cette technologie permet de régénérer des sables de fonderie de nature hétérogène, et fournit un sable régénéré de très bonne qualité, exempt de gangue, de pellicule, de film ou d'enrobage. Le procédé est efficace quelle que soit le rapport d'hétérogénéité dû à la proportion et au nombre de différents produits liants enrobant les grains de sable à traiter.

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Aucune installation commerciale basée sur le procédé de dégangage n'a pu être recensée. En absence de connaissances sur la composition des gaz produits, des études complémentaires doivent être conduites pour connaître la nature précise des équipements de traitement des fumées.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les conditions d'élimination des sables de fonderies contenant des liants organiques de synthèse sont régies par l'arrêté ministériel du 16 juillet 1991.

Rubrique ICPE 2771 Traitement thermique de déchets non dangereux (soumis à autorisation)

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

A notre connaissance il n'y a pas, à l'heure actuelle, d'application industrielle de ce procédé

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le potentiel d'émergence va dépendre des évolutions des coûts du sable neuf et du stockage, voire du traitement et de l'élimination des sables usagés.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

On compte de nombreux fournisseurs d'installations de régénération thermique (lit fluidisé) de sables de fonderie :

FAT (Allemagne) <http://www.f-a-t.de/fr/accueil/>

Euskatfund <http://www.euskatfund.com>

General Kinematics (US) <https://www.generalkinematics.com/>

SOGEMI (Italie) [www.sogemieng.it](http://www.sogemieng.it)

FMI process (France)

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Fédération Nationale des Travaux Publics, Novembre 2001

[2] *Les déchets de fonderie – Stockage*, Bernard Duquet, Techniques de l'ingénieur, mars 2007.

Brevet d'invention n° 95 02014 *Procédé de régénération par dégangage thermique des sables de fonderie usagés* (1995)

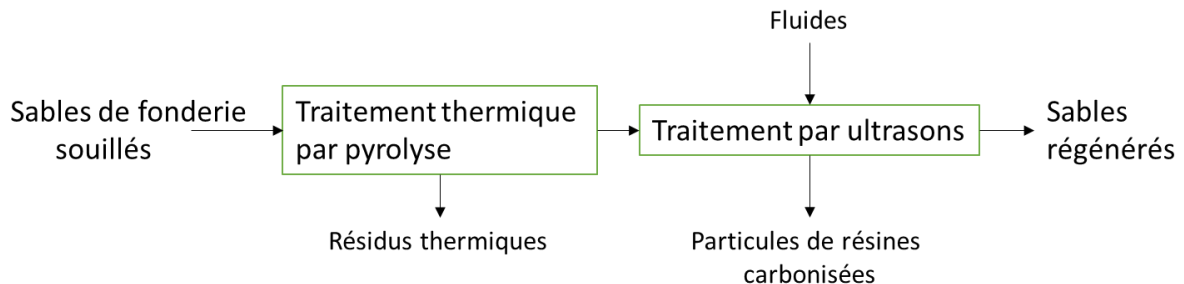
## ULTRASAND régénération des sables de fonderie

L'objectif du procédé est de séparer les résines des grains de sable en vue de la valorisation des sables de fonderie (sables furaniques et sables à vert)

Le procédé, développé dans le cadre projet FUI Ultrasand (2014-2017), repose sur une action combinée de la pyrolyse et des ultrasons pour une régénération optimale des sables de fonderie. L'objectif de ce projet est d'aboutir à la mise sur le marché d'un équipement en adéquation avec les besoins en terme de volumes et de traitements des sables (machines de régénération acquises en propre ou mutualisé pour répartir les frais de fonctionnement).

<b>Type de procédé</b>	Thermique et physico-chimique
<b>Nature du polluant</b>	Résines, liants organiques
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Emergent (TRL5)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	stockage et enfouissement en ISDD

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



<b>Flux entrant</b>	<b>Flux sortant</b>
Sables de fonderie avec résines, fluides	Sables régénérés, résidus de résines carbonisées

### ETAPES DE TRAITEMENT

- Traitement thermique par pyrolyse basse température  
Cette étape permet de carboniser la résine  
Deux procédés de traitement thermique par pyrolyse basse température (en lit fixe et en lit fluidisé) ont été testés.
- Traitement par ultrasons (20kHz)  
Cette étape permet de faciliter le détachement du grain des particules de résines carbonisées.



FICHE SOMMAIRE 10  
**ULTRASONS HAUTE FREQUENCE / SABLES  
DE FONDERIE**

**AVANTAGE/ INTERET**

Valorisation sur site d'un déchet dangereux (moins de stockage sur place et pas de transport)  
Technologie adaptée aux sables à vert et/ou aux sables à prise chimique  
Production de sables régénérés utilisables dans le process de fonderie pour moules et noyaux  
Anticipation des évolutions réglementaires

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Des essais complémentaires doivent être réalisés pour optimiser les paramètres du procédé afin de répondre aux critères de qualité nécessaires à la réutilisation des sables dans le circuit.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les conditions d'élimination des sables de fonderies contenant des liants organiques de synthèse sont régies par l'arrêté ministériel du 16 juillet 1991 modifié par l'arrêté ministériel du 31 décembre 2004 relatif aux installations de stockage de déchets industriels inertes provenant d'une installation classée.

Il prévoit que l'élimination en décharge de ces sables doit se faire dans un site réglementé au titre de la législation sur les installations classées pour la protection de l'environnement.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Cette technologie fait encore l'objet de développements qui devraient conduire à la construction d'une installation industrielle.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Les 1ers résultats confirment que le procédé par ultrasons permet de faciliter le détachement du grain des particules de résines carbonisées préalablement par traitement thermique (pyrolyse). Le traitement complet s'oriente vers une combinaison des deux technologies (pyrolyse et ultrasons) pour une régénération optimale des grains de sable.

Une prochaine étape du projet est le développement d'un démonstrateur économiquement viable  
Les perspectives économiques du développement de ce procédé de régénération des sables ont été estimées à :

- La génération de près de 1,5M d'économies cumulées sur 5 ans pour 4 fonderies PME et ETI avec l'utilisation d'équipements adaptés
- Un chiffre d'affaire direct de 13M€ pour le fabricant JML sur les 5 premières années de commercialisation des équipements de régénération des sables

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Cette technologie est développée dans le cadre du projet FUI Ultrasand 2014-2017, labellisé Viameca et Materlia, porté par les Fonderies Giroud, Il regroupe 9 partenaires dont 4 Fonderies PME/ETI (Fonderies de Brousseval et Montreuil, Fonderie Tabourin et Bezile, Rhonalu, Fonderies Giroud), 1 fabricant de machines de fonderie (JML), 3 laboratoires (Université Joseph Fourier, Grenoble INP, ARTS ENSAM) et le CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie).

**BIBLIOGRAPHIE**

Présentation, Valorisation des projets collaboratifs – Projet ULTRASAND FUI N°16, ViaMéca Pôle de compétitivité mécanique, 4 novembre 2014  
Communiqué de presse, Projet ULTRASAND – Des premiers résultats encourageants, ViaMéca Pôle de compétitivité mécanique, 4 novembre 2014.

**CREASOLV®**

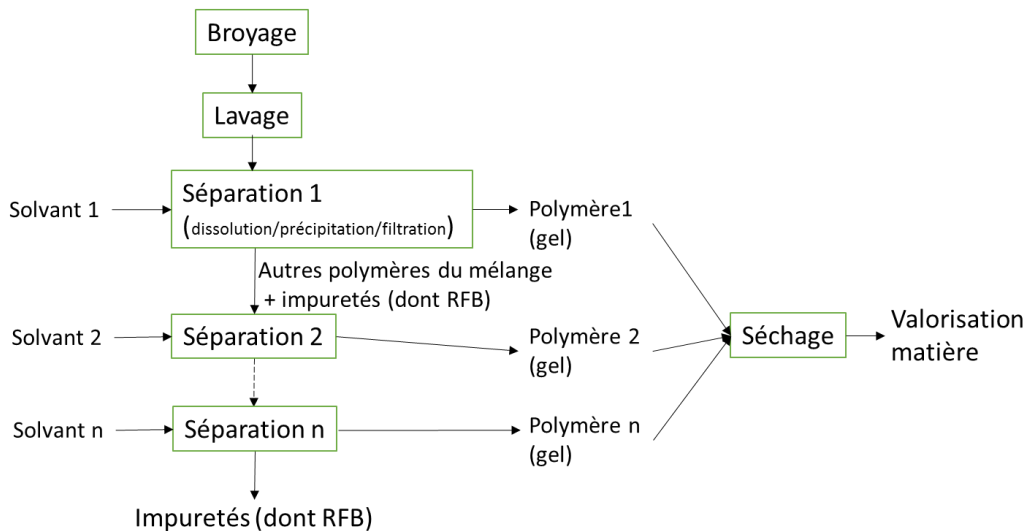
L'objectif du procédé est d'éliminer les impuretés (dont les retardateurs de flamme bromés (RFB)) des DEEE en vue d'une valorisation matière des polymères.

Les plastiques des DEEE contiennent, pour certains d'entre eux, des retardateurs de flamme bromés de type PBDE, TBPE, PBB, EBP, TBBPA et HBCDD. Ces substances présentent différentes propriétés de danger (cancérogène, irritantes, écotoxiques, voire reprotoxiques). Certains RFB sont classés comme Polluants Organiques Persistants.

Pour faire l'objet d'une valorisation matière, les déchets de plastique issus des DEEE ne doivent pas contenir de RFB énumérées à l'annexe IV du règlement POP.

<b>Type de procédé</b>	Physicochimique
<b>Nature du polluant</b>	Retardateur de flamme bromé (RFB)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Emergent (TRL6)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Incineration de déchets dangereux ou ISDD

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**Flux entrant**  
Mélange de polymères/DEEE, solvant

**Flux sortant**  
Polymères purifiés valorisables  
Solution avec impuretés (dont RFB)

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Broyage, pré-lavage (tri démantèlement préalable si nécessaire)  
Dissolution sélective d'un des polymères du mélange dans un solvant, « formation d'un gel ». Les impuretés dont les RFB restent en solution, ainsi que les autres polymères présents.  
Précipitation du polymère  
Séparation par filtration  
Séchage du polymère

**EXTRACTION SELECTIVE DE  
POLYMERES/DEEE****AVANTAGE/ INTERET**

Fonctionnement en circuit fermé qui permet d'utiliser peu de solvants et de concentrer les impuretés dans un faible volume

Cout énergétique faible (comparé aux procédés thermiques) et conservation de propriétés similaires aux plastiques vierges sans dégradation thermique des polymères

Des tests en batch de 150 kg montrent un abattement de plus de 99.5% pour différents RFB.

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Le procédé utilise un solvant spécifique pour chaque polymère développé par un seul fournisseur.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

La circulaire du 30 novembre 2012 relative à la gestion des plastiques issus des DEEE présente les différents cas de gestion de déchets de plastique issus des DEEE contenant des retardateurs de flammes bromés (RFB).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Le procédé a été développé à l'échelle pilote par l'Institut Fraunhofer et CreaCycle GmbH.

L'institut Fraunhofer réalise des tests pilote pour extraire les RFB de déchets de l'industrie électronique et automobile pour passer à une échelle industrielle (pilote fourni par Lömi en 2012).

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

La quantité de DEEE ne cesse d'augmenter, il pourrait atteindre 50 Mt en 2018 (<http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>) et les objectifs européens de collecte visent 85% du gisement de DEEE à l'horizon 2019. Les plastiques bromés des DEEE représentaient 27 645 t en 2010, soit 6,76% des flux traités par la filière. Ce procédé permet d'accroître la part valorisable des plastiques des DEEE mais aussi des produits d'isolation en polystyrène expansé, des matières plastiques de VHU et des déchets d'emballage. Le coût croissant de l'énergie et du pétrole brut améliore l'attractivité des recyclats de polymères, car ils peuvent être fabriqués à moindre coût et avec une consommation d'énergie plus faible que les polymères vierges.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

L'extraction de retardateurs de flamme bromé a aussi été réalisée en laboratoire par fluide supercritique et par solvothermolyse (*Extraction of brominated flame retardants from polymeric waste material using different solvents and supercritical carbon dioxide*, Analytica Chimica Acta, 491 (2003) 111 ; *Removal of flame retardant from electrical and electronic waste plastic by solvothermal technique*, Journal of hazardous Materials, 221-221 (2012) 193 ).

Un procédé d'extraction à base de soude et d'éthylène glycol est également décrit dans la littérature (*A novel process for the removal of bromine from styrene polymers containing brominated flame retardants*, Polymer degradation and stability, 112 (2015) 86).

**BIBLIOGRAPHIE**

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Dechets-d-equipements-electriques,12039.html>

Creasolv process : <http://www.ivv.fraunhofer.de/en/forschung/verfahrensentwicklung-polymer-recycling/hochwertiges-kunststoffrecycling.html>

Polyressource project : <http://www.creacycle.de/en/projects/electro-nic-waste-recycling/poly-ressource-project-2010.html>

*Developp a process to separate brominated flame retardants from WEE polymers*. Final Report. WRAP (2006).

### Solvolyse par eau supercritique

L'objectif du prétraitement est la séparation, par un procédé mettant en œuvre l'utilisation d'eau sous pression, des différents éléments de matériaux composites contenant des fibres de carbone (constituants de la résine, charges et fibres) afin de de les valoriser.

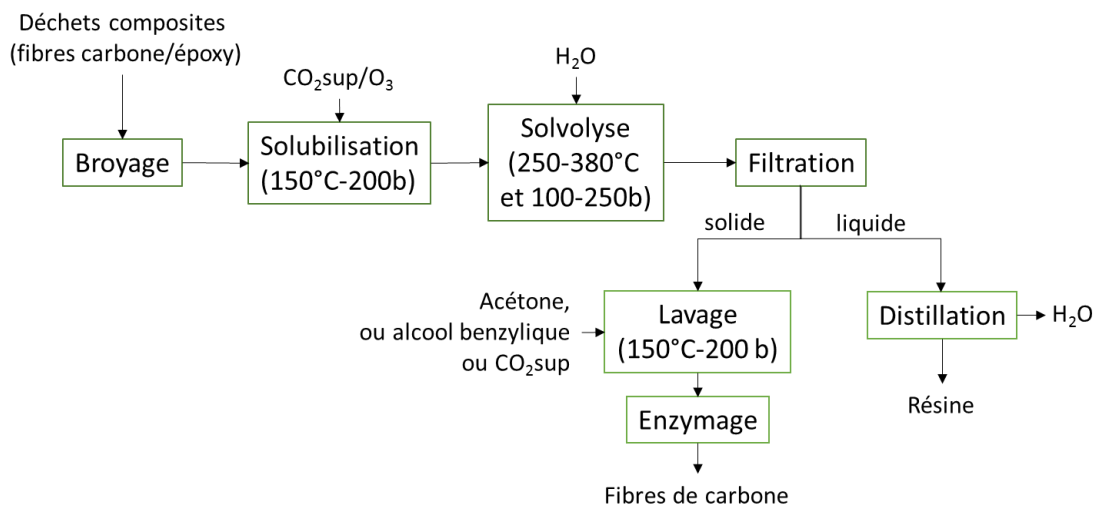
L'utilisation des matériaux composites est en pleine expansion, notamment dans l'aéronautique et le spatial, mais également dans l'automobile. La production mondiale de composites a été estimée à 8,7 millions de tonnes en 2013. En France, près de 300 000 tonnes de matériaux composites sont produites annuellement, et le gisement de déchets de production et de fin de vie de ces matériaux est estimé à 30000 tonnes par an. Leur recyclabilité est encore perçue comme délicate et difficile, du fait de leur hétérogénéité et du recours encore fréquent à des matrices thermodurcissables, donc infusibles.

La solvolyse est un procédé de recyclage par dépolymérisation chimique en milieu aqueux. Ce procédé consiste à mettre dans une enceinte close des morceaux de composites avec de l'eau. Cette enceinte est alors portée à 400°C et 200 bar pendant 1 heure. Sous l'effet de la température et la pression, l'eau devient supercritique et dispose de propriétés physico chimiques intermédiaires entre les phases gazeuse et liquide.

La finalité est l'obtention de fibres sèches et exemptes de résine qui se retrouve dissoute dans l'eau.

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	Séparation des différents constituants
<b>Maturité du procédé</b>	Emergent (TRL 5-7)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Procédés mécaniques (broyage, micronisation), Procédés thermiques (incinération, co-incinération en cimenterie...) Stockage ISDND (90% des déchets de production)

#### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Flux entrant**  
Déchets composites

**Flux sortant**  
Fibres sèches, résine



FICHE SOMMAIRE 12  
**SOLVOLYSE / DECHETS COMPOSITES**

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Broyage ou découpage permettant une réduction granulométrique du matériel.  
Prétraitement en phase supercritique (CO<sub>2</sub>/O<sub>3</sub>) permettant de gonfler le polymère et d'améliorer l'efficacité de la solvolyse.  
Solvolyse par eau supercritique ((250-380°C et 100-250b) dans un réacteur agité.  
Filtration liquide/solide : séparation des fibres (phase solide) et de la résine (phase liquide)  
Lavage de la fraction solide (acétone, alcool benzylique, ou CO<sub>2</sub> supercritique), puis enzymage pour obtenir des fibres de qualité.  
Distillation de la phase liquide pour extraire la résine valorisable.

**AVANTAGE/ INTERET**

Recyclage intégral du composite associant une valorisation de tous les composants (fibre de carbone et résine).  
Caractéristiques mécaniques des fibres recyclées très proches de celles des fibres de départ  
Réutilisation directe de la résine possible.

**INCONVENIENT/ LIMITATION**

Le procédé est plus particulièrement adapté au recyclage de matériaux composites du type époxy/fibres de carbone (thermodurcissables).  
Plus généralement, le choix du procédé de traitement des matériaux composites (mécanique, thermique, chimique ou biologique) dépend du type de fibre et du gisement.  
La viabilité économique du procédé reste à démontrer et valider à l'échelle industrielle.

**DOMAINES D'APPLICATION**

Le procédé vise dans un premier temps les composés à base de matrices thermodurcissables (polyester, époxyde) renforcées par des fibres de carbone. 70 % des composites ont une matrice en polymère thermodurcissable.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Il n'y a aucune réglementation spécifique pour les déchets des matériaux composites. La réglementation en vigueur dans les différents domaines d'application s'applique donc à ces matériaux (par exemple la directive VHU 2000/53/CE du 18 septembre 2000 dans le secteur automobile).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Des réacteurs au stade pré-industriel sont à l'étude notamment celui du projet PARCCA (Procédés Avancés de Recyclage des Composites fibres de Carbone), en cours de réalisation, dont l'installation d'un réacteur de solvolyse de grande capacité. Ces réacteurs sont développés par la PME SACMO (Brevet « Procédé de récupération de fibres par solvolyse » de 2016).



### **POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'entrée en vigueur des réglementations sur les déchets ultimes et sur la valorisation des produits en fin de vie (VHU, DEEE), ainsi que l'attente des industriels donneurs d'ordre (dans le secteur automobile notamment) imposent aux entreprises du composite de mettre en place des filières techniques de valorisation de leurs produits économiques viables.

Le projet « Green FRP Label » piloté par l'ECRC (European Composite Recycling service Company) a pour vocation d'organiser la profession au niveau européen pour financer les filières industrielles de recyclage, avec la mise en place d'un label garantissant la conformité des produits avec les dernières directives européennes.

### **CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le projet PARCCA (Procédés Avancés de Recyclage des Composites fibres de Carbone), à la suite des travaux initiés par les projets AERDECO(FUI) et EURECOMP, sous l'impulsion de l'ICAM (Institut Catholique d'Arts et Métiers) de Nantes et SACMO (PME spécialisée dans la conception de machines spéciales) associés à plusieurs industriels (Dassault Aviation, Plastic Omnium), vise à évaluer et développer la technologie à une échelle pré-industrielle.

Ces projets ont débouché sur la création et la fabrication de deux réacteurs de solvolyse par eau. Le premier réacteur (de capacité 20L) a permis d'effectuer plus de 900 essais pour recycler des échantillons de composites fournis par Airbus. Le deuxième réacteur a permis d'étudier un système d'étanchéité différent qui a montré ses limites dans le temps.

SACMO, fabriquera un réacteur de 400 litre capable de traiter 70 kg de matière par cycle.

### **BIBLIOGRAPHIE**

*Composite et recyclage : état de l'art et perspectives*, Cetim Cermat, Journée promotion procédés produits du 24 novembre 2015.

*Recyclage des composites*, Techniques de l'Ingénieur, juillet 2010

*Procédé de récupération de fibres par solvolyse*, WO 2016/198781 A1

<http://www.pole-emc2.fr/recyclage-des-composites.html>

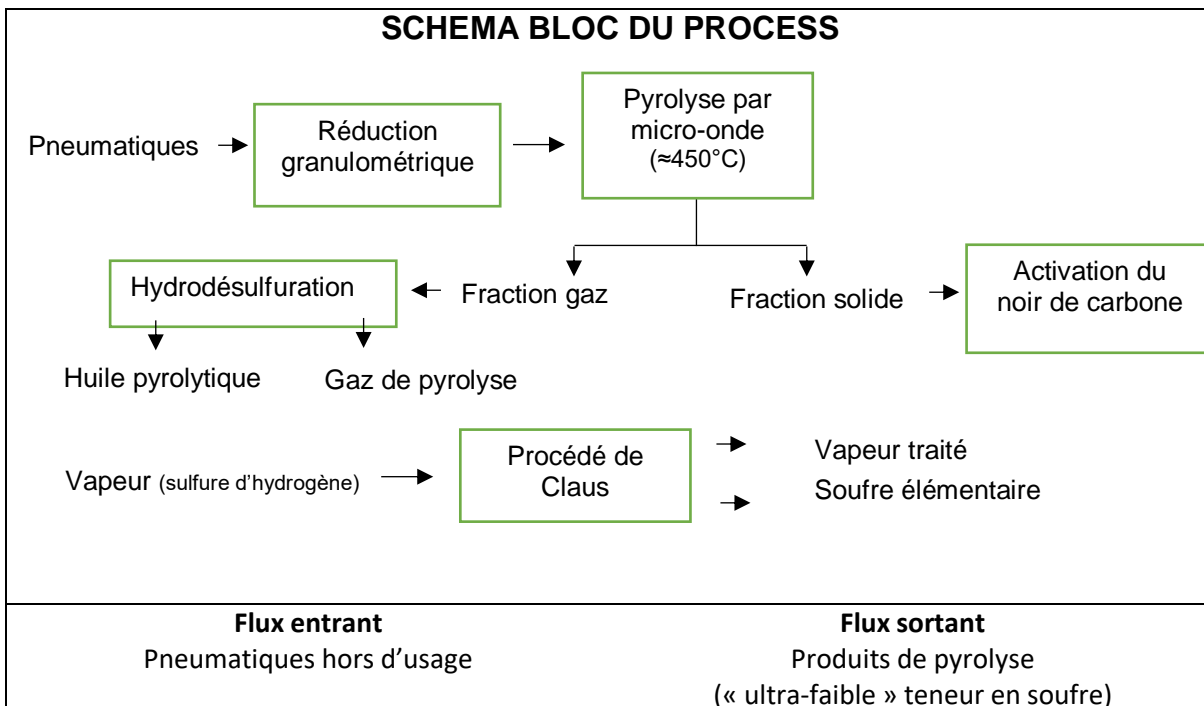


## DEVULCANISATION PAR PYROLYSE ASSISTEE PAR MICRO ONDE

L'objectif du prétraitement est l'extraction du soufre contenu dans le caoutchouc des déchets de pneumatique. Le traitement par pyrolyse micro-onde repose sur la dégradation des liaisons soufrées.

On estime à près de 6 millions de tonnes, la quantité de pneumatiques usagés déposés illégalement ou mis en décharge. Une des voies de valorisation des pneumatiques hors d'usages est la valorisation en matériaux et l'élaboration de combustibles à forte valeur ajoutée. Le projet européen SULFREE, achevé fin février 2016, a développé un procédé innovant de pyrolyse assistée par micro-onde, permettant de produire des produits de pyrolyse avec de très faible teneur (<0.2%) en soufre. Ce projet a permis de valider la technologie de pyrolyse micro-onde et de passer à une étape de commercialisation du procédé. Les résultats de ce projet permettent d'envisager la valorisation des produits de la pyrolyse.

<b>Type de procédé</b>	Pyrolyse par micro-onde (Thermochimique)
<b>Nature du polluant</b>	Soufre
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	5-6 (Emergent)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Dévilcanisation chimique, biologique



### ETAPES DE TRAITEMENT

La première étape est une réduction granulométrique permettant de transformer le pneumatique usagé en fragments. Ensuite ces fragments sont introduits dans l'installation de pyrolyse à micro-onde. Le système de mélange interne (basé sur une configuration innovante de disques et barres) permet un mélange interne complet et une pyrolyse totale des fragments de caoutchouc. La température optimale est de 450°C.



FICHE SOMMAIRE 13  
**DEVULCANISATION PAR MICRO ONDE /  
PNEUMATIQUE USAGES**

A la suite de cette étape, on obtient des gaz chauds et du noir de carbone (tous deux présentes à cette étape, des teneurs élevées en soufre).

Le noir de carbone est activé par la vapeur issus de la chambre de pyrolyse.

Concernant les gaz chauds, extraits de la chambre de pyrolyse, ils sont mis en contact dans une unité de d'hydrodésulfuration (un réacteur à lit fixe) avec la vapeur chaude qui a été préalablement refroidie, comprimée et injectée sous pression.

Cette opération permet de produire une huile de pyrolyse, un gaz combustible, ayant des teneurs en soufre qualifiées « d'ultra-faible ».

Un système de condensation de la vapeur permet la récupération d'huiles condensées et riches en soufre ce qui réduit considérablement les coûts et la complexité du système.

Le procédé de Claus est utilisé pour extraire le soufre contenu dans la vapeur et de récupérer une fraction de soufre élémentaire.

#### **AVANTAGE/ INTERET**

Un des intérêts du projet SULFREE est la mise en place d'un échangeur de chaleur de type coquille-tube sur le condensateur. Ce système facilite la récupération de la chaleur et de la vapeur pour satisfaire les critères énergétiques du système et pour activer le noir de carbone.

#### **INCONVENIENT / LIMITE**

Non identifiés.

#### **REGLEMENTATION APPLICABLE**

Code de l'environnement : articles R543-137 à R543-152 (concernant les opérations de gestion des déchets de pneumatiques)

#### **EXEMPLES D'INSTALLATIONS**

Le procédé décrit est issu d'un démonstrateur construit dans le cadre du projet de recherche européen SULFREE.

#### **POTENTIEL D'EMERGENCE**

Les coûts associés au traitement et la valeur des produits (huile pyrolytique haute valeur, le carbone activé imprégné de soufre, le soufre élémentaire et les gaz de combustion) permettent d'entrevoir un fort potentiel d'émergence.

#### **CHAMP DE COMMENTAIRES**

Dans [2], les résultats de l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) ont montrés clairement le phénomène de rupture des liaisons C-S et S-S [2]. L'étude du taux de variation de masse (test de gonflement dans le toluène) à montrer que le traitement par micro-onde conduit à un degré de devulcanisation significatif (allant jusqu'à 85%).

Les participants au projet de recherche européens sont : Autico Ltd (Royaume-Uni), CRUMB RUBBER IRELAND LIMITED (Irlande), Fricke Und Mallah Technology GMBH (Allemagne), WLB Limited (Chypre), The UK HEALTH & ENVIRONMENT RESEARCH INSTITUE (Royaume-Uni), AZIENDA SPECIALE INNOVHUB (Italie), MATERIAL Y EQUIPOS DE VIDRIO DE LABORATORIO SA (Espagne).

Le coordinateur de l'étude était : INNORA PROIGMENA TECHNOLOGIKA (Grèce).

#### **BIBLIOGRAPHIE**

[1] Aoudia Karima « Recyclage et revalorisation des élastomères usagés » 2013-2014

[2] X.Colom Fajula, A . Faliq Bin Musidin « Microwave devulcanisation of Ground Tyre Rubber (GTR) 2015

[3] <http://www.sulfree.eu/>

## Dévulcanisation par oxydation contrôlée

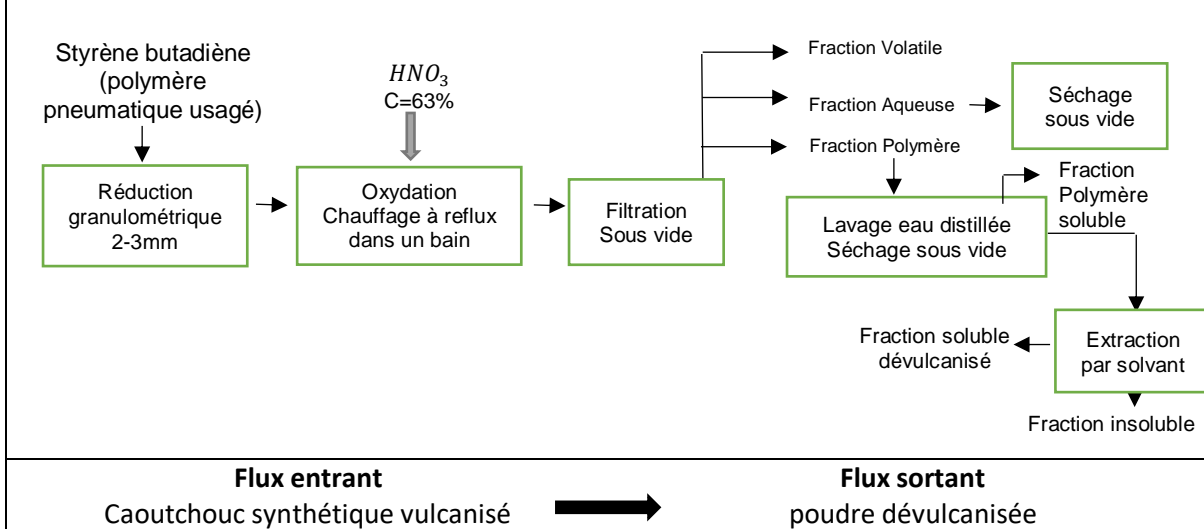
L'objectif du prétraitement est de permettre la dévulcanisation du caoutchouc synthétique (styrène-butadiène, SBR) de pneumatiques usagés permettant le recyclage.

Le caoutchouc synthétique (SBR), se substitue au caoutchouc naturel pour la fabrication des pneumatiques, il représente 35% des 18 Mt de caoutchouc consommées par an dans le monde (6,3 Mt/an). En France, les deux principaux organismes collectifs de collecte et de traitement de pneumatiques, ALIAPUR et GIE FRP, ont déclarés, en 2015, avoir collecté 383 533 tonnes. On peut répartir les filières de valorisation selon 3 voies : la valorisation énergétique, la valorisation matière, le réemploi. En 2015, ces voies de valorisation ont représenté respectivement 44,5% pour la valorisation énergétique (utilisation combustible), 40,2% pour la valorisation matière (granulats, poudrette, recyclage carbone, géotechnique...) et 15,3% pour la réutilisation (vente d'occasion, rechapage...)

Le procédé est basé sur l'oxydation des liaisons soufre des pneumatiques avec, comme agent oxydant, l'acide nitrique  $HNO_3$ . L'oxydation des liaisons sulfure du caoutchouc permet la production d'un polymère dévulcanisé possédant des caractéristiques uniques.

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	Soufre
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	1-3 (En développement)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Dévulcanisation biologique, ultrasonique

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**DEVULCANISATION PAR OXYDATION  
CONTROLEE/ PNEUMATIQUE USAGES****ETAPES DE TRAITEMENT**

L'étape n°1 consiste en une réduction granulométrique du pneumatique usagé (2-3mm)

L'étape n°2 correspond à la réaction de dévulcanisation effectuée en présence d'acide nitrique concentré (63%), de caoutchouc (10g), dans un système à reflux (100mL) avec un bain d'huile à 110°C.

L'étape n°3 consiste en une filtration sous vide permettant la séparation de la fraction aqueuse et la fraction polymère utilisant un filtre fritté. La fraction polymère est ensuite lavée à l'eau distillée jusqu'à ce que l'eau atteigne un pH neutre (1L) puis séchée sous vide (80°C - 4h).

L'étape n°4 va permettre d'extraire la fraction soluble et la fraction non soluble du polymère, à l'aide d'un extracteur de Soxhlet.

**AVANTAGE/ INTERET**

Les avantages principaux de la dévulcanisation par oxydation contrôlée sont : le coût relativement faible de l'acide nitrique comme agent oxydant, l'utilisation de l'eau comme solvant et une bonne efficacité annoncée.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Le procédé de dévulcanisation à l'acide nitrique, même dans des conditions optimisées, a produit une phase aqueuse fortement acide ainsi qu'une quantité significative de gaz NO<sub>2</sub> (issue du processus d'oxydation et de la décomposition du HNO<sub>3</sub>).

D'après [1], cette fraction aqueuse contient une forte concentration en matière organique, en sulfate et en métaux (particulièrement du zinc).

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Code de l'environnement : articles R543-137 à R543-152 (concernant les opérations de gestion des déchets de pneumatiques).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Pas d'installations commerciales connues.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

La dévulcanisation de pneumatique usagé par oxydation contrôlée à l'acide semble avoir un certain potentiel d'émergence, au vu du faible coût de l'oxydant mais des études plus poussées semblent nécessaires, plus particulièrement sur l'étude des deux réactions concurrentielles (nitration et oxydation qui forment NO<sub>2</sub> et des groupes COOH).

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Lors de l'élaboration de cette fiche, le comité scientifique a décidé que l'étude de ce procédé ne sera pas approfondie.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Devulcanization of Styrenebutadiene (SBR) Waste Tire by Controlled Oxidation, R.Rios et al. (2006)

**Procédé TYRE RECYCLING SOLUTIONS®**

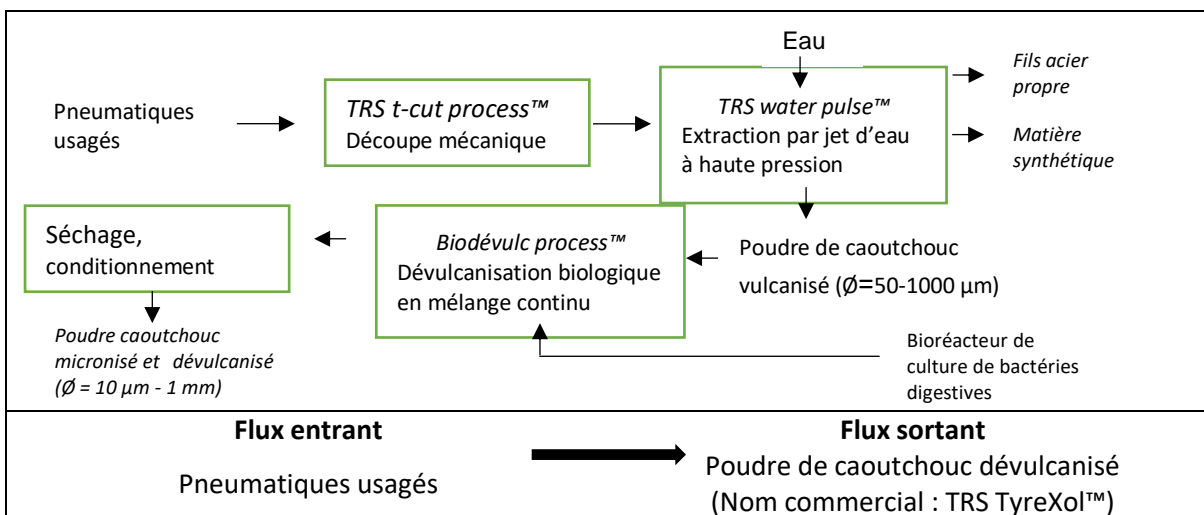
L'objectif du prétraitement est l'extraction du soufre contenu dans le caoutchouc des déchets de pneumatique. La dévulcanisation biologique repose sur la dégradation des liaisons soufrées par l'utilisation de bactéries digestives.

En France, les deux principaux organismes collectifs de collecte et de traitement de pneumatiques, ALIAPUR et GIE FRP, ont déclarés, en 2015, avoir collecté 383 533 tonnes. On peut répartir les filières de valorisation des pneumatiques usagés selon 3 voies : la valorisation énergétique, la valorisation matière, le réemploi. En 2015, ces voies de valorisation ont représenté respectivement 44,5% pour la valorisation énergétique (utilisation en combustible), 40,2% pour la valorisation matière (granulats, poudrette, recyclage carbone, géotechnique...) et 15,3% pour la réutilisation (vente d'occasion, rechapage...)

Le procédé de prétraitement développé par Tyre Recycling Solutions (TRS) a pour objectif d'extraire le part soufré du caoutchouc extrait des pneumatiques usagés. Il repose sur la dévulcanisation biologique de pneumatiques usagés, c'est-à-dire la dégradation des liaisons soufrées à l'aide de bactéries digestives. La finalité du prétraitement permet la transformation de pneumatiques usagés en une poudre de caoutchouc dévulcanisée (exempt de soufre).

<b>Type de procédé</b>	Mécanique et biologique
<b>Nature du polluant</b>	Soufre
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (9) – traitement en unité centralisée
<b>Technologies de référence</b>	Dévulcanisation chimique, ultrasonique

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**ETAPES DE TRAITEMENT**

Le prétraitement *TRS t-cut process™* est une étape de découpe mécanique du pneu en 3 parties plates. Ce prétraitement permet, en 30 secondes, de séparer la bande de roulement et les 2 parois latérales du pneu.

L'étape suivante, consiste à extraire les parties métalliques, synthétiques et le caoutchouc de la structure du pneu. Le prétraitement *TRS Water Pulse™* permet la séparation des différents constituants du pneu à l'aide d'un jet d'eau pulsé à haute pression. La taille des grains de poudre de caoutchouc obtenue peut varier de 10 à 1000 µm.

**DEVULCANISATION BIOLOGIQUE /  
PNEUMATIQUE USAGES**

Le Procédé *Biodevulc process*™ de digestion biologique est effectué dans des récipients en mélange continu avec la solution de bactérie et la poudre de caoutchouc obtenue à l'étape précédente. L'action des bactéries va dégrader les liaisons soufre à la surface de la poudre  
A la suite de cette étape de dévulcanisation biologique, on obtient une poudre de caoutchouc dévulcanisé exempt de soufre nommé TRS TyreXol™, permettant une nouvelle valorisation de cette poudre dévulcanisée. (industrie du moulage, automobile, pneu, cosmétique...)

**AVANTAGES / INTERETS**

Le premier avantage du TRS system, est le prétraitement de découpe mécanique initial. La découpe en 3 parties permet de réduire le volume des pneus par 3 et donc d'augmenter les capacités d'une même zone de stockage. Il permet un transport plus rentable comparé au transport des pneus bruts (65 % de réduction des coûts de transports annoncé par TRS). L'étape de séparation par jet d'eau pulsé est réalisée sans ajout de produits abrasifs ou chimiques, à température ambiante.  
Les différents constituants peuvent être valorisés sous forme de matière première secondaire : l'acier, la matière synthétique (6% masse total pneu, composé de cellulose, PBT, PET et PA 6-6).  
Le produit fini est une poudre essorée, séchée et conditionnée tel une matière première secondaire prête à l'emploi.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Non identifiés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Code de l'environnement : articles R543-137 à R543-152 (concernant les opérations de gestion des déchets de pneumatiques).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

La ligne préindustrielle développée par TRS (financé par Innovaud) est opérationnelle en Suisse à Tolochenaz capacité 240 t/an et emploie 5 personnes. TRS prévoit d'implanter une usine en Suisse d'une capacité de 1 000 000 de pneus/an (≈7 000 t/an) début 2017, soit 20 fois plus grande qu'aujourd'hui.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'intégration de la poudre dévulcanisée, issue du procédé, peut servir de substitut à différentes matières. L'exemple, mis en avant par TRS, qui semble prometteur, est l'intégration de la poudre TyreXol dans la formulation du polyuréthane (composé coûtant aujourd'hui entre 4670 et 5600 €/t).

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

La société TRS a réalisé, en fin d'année 2015, sa troisième levée de fonds, ce qui lui a permis de passer d'une étape de pré-industrialisation à l'industrialisation. Le prix de vente annoncé du produit fini (2300€/t) est annoncé moins cher que les matériaux qu'elle pourrait concurrencer (2 fois moins cher que le coût du polyuréthane).  
Nommé en 2014 parmi les 25 meilleures start-ups de l'année lors du European Venture Contest de Düsseldorf, TRS a notamment reçu des crédits de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).  
On trouve dans la littérature [X], le nom de la bactérie *thiobacillus ferrooxidans* comme agents de dégradation. Ces bactéries digestives sont en effet capables d'extraire le soufre contenu dans les caoutchoucs et de l'oxyder en sulfates (oxyde de soufre).

**BIBLIOGRAPHIE**

Anaerobic desulfurization of ground rubber with the thermophilic, Bredberg et al. (2001)  
Microencapsulation of sulfur in poly(urea-formaldehyde), Li et al. (2011)

## CABLE BOX

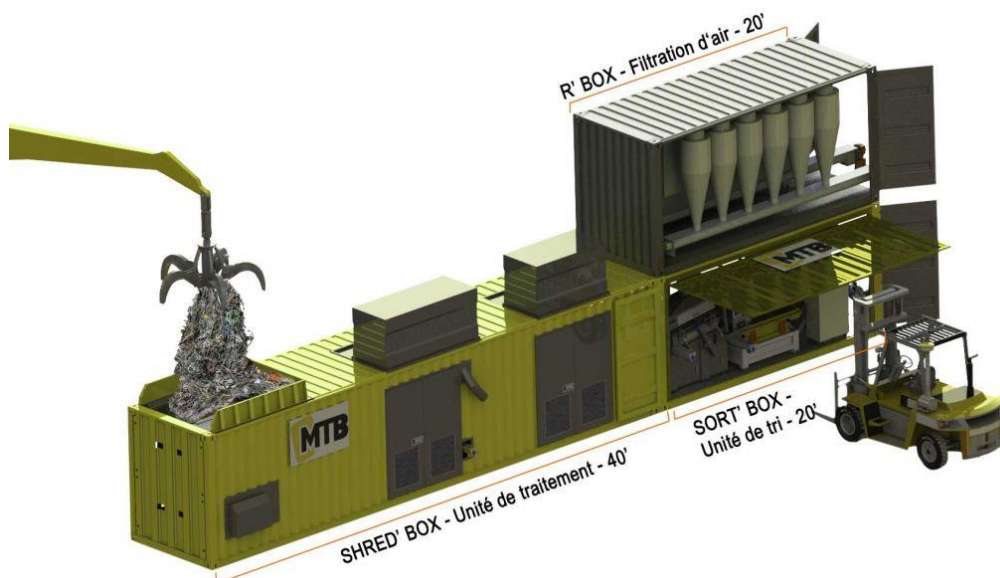
L'objectif du procédé est de séparer les différents constituants des câbles gainés usagés.

Le procédé entièrement automatisé et clos repose sur une succession d'opérations conduisant à la récupération des différents constituants des câbles usagés, en vue de leur valorisation. La CABLE BOX est une ligne complète de recyclage intégrée dans 2 containers.

Le gisement de câbles industriels usagés et gainés est estimé à environ 175kt/an en France. Ils contiennent en moyenne 50% de plastique et 50 % de métaux en poids.<sup>1</sup>

<b>Type de procédé</b>	Physique
<b>Nature du polluant</b>	Matières plastiques
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9) – traitement sur site
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Tri manuel et recyclage par différentes unités

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



Source : <http://www.mtb-recycling.fr/fr/actualites-289/innovation-la-cable-box.html>

**Flux entrant**  
Câbles usagés

**Flux sortant**  
ferraille, grenaille, de cuivre gros, grenaille de cuivre fin, connecteurs (aluminium, laiton, étain), plastique

### ETAPES DE TRAITEMENT

Introduction des câbles  
Broyage des câbles  
Séparation granulométrique des éléments broyés  
Tri des différents éléments par tables densimétriques, tamis et poulies  
Récupération des différentes fractions pour valorisation : ferraille, grenaille, de cuivre gros, grenaille de cuivre fin, connecteurs (aluminium, laiton, étain), plastique  
Filtration de l'air





FICHE SOMMAIRE 16  
**SEPARATION AUTOMATISEE DES  
CONSTITUANTS/ CABLES**

**AVANTAGE/ INTERET**

Unité compacte (2 containers pour le broyage et le tri, un container optionnel pour la filtration d'air) et mobile  
Procédé intégré prêt à l'emploi  
Sécurité des opérateurs  
Application possible à une large gamme de câbles

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Non identifiés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les câbles électriques usagés entrent dans le champ de la Directive 201/19/UE relative aux déchets d'équipements électrique et électroniques (DEEE) (refonte de la directive 2002/96/CE).

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

MTB Recycling a présenté ce produit courant 2016. Des négociations sont en cours avec plusieurs entreprises internationales pour l'installation de la CABLE BOX. La première unité a été installée chez Scrap Central (Omaha, Nebraska).

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Ce procédé permet de produire des fractions valorisables à haute valeur ajoutée avec des coûts de main d'œuvre minimisés et des conditions de sécurité optimisées.  
Le recyclage du cuivre des câbles répond à la fois à la valorisation des DEEE et aux besoins en matière première.  
Le coût de la tonne de cuivre augmente fortement (2000 €/t en 2004 à 7000 €/t en 2013), notamment à cause de la demande chinoise.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le procédé permet de traiter jusqu'à 2 tonnes de câbles par heure (en fonction du type de câbles broyé).  
Une déclinaison de ce procédé pour la valorisation d'autres types de déchets (DEEE, RBA) est à l'étude.  
MTB est également engagé dans le développement de procédés permettant d'augmenter la valeur ajoutée à travers le surtri de la grenaille (séparation du plomb, notamment).

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Etude ADEME « *Positionnement et compétitivité des industries de recyclage en France* » (juin 2014)  
<http://www.mtb-recycling.fr/fr/actualites-289/innovation-la-cable-box.html>



## UNITE DE DEPOLLUTION VEHICULES

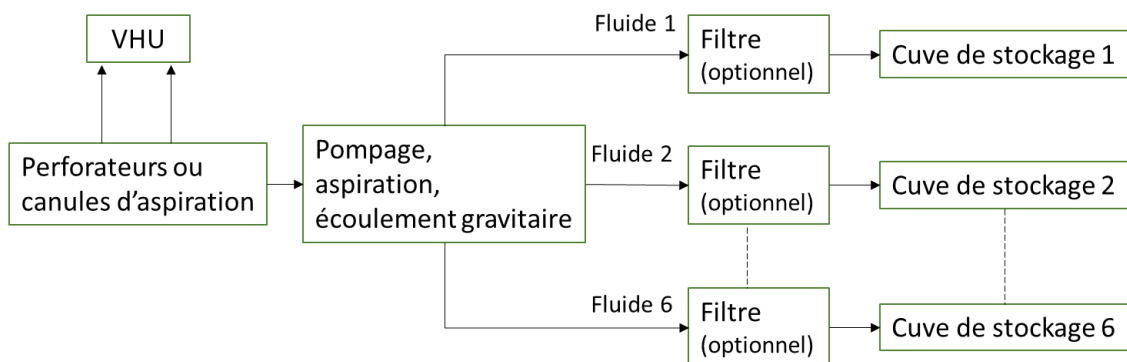
L'objectif est d'extraire très rapidement (en moins de 10 minutes) l'ensemble des fluides d'un véhicule usagé.

Environ 1,5 millions de véhicules deviennent hors d'usage chaque année en France. Ils génèrent près de 1,5 millions de tonnes de déchets.<sup>1</sup>

La Directive européenne 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux VHU fixe l'objectif de 95% de réutilisation et de valorisation en poids moyen par véhicule et par an, et 85% de réutilisation et recyclage en poids moyen par véhicule et par an.

Type de procédé	Mécanique
Nature du polluant	Fluides
Maturité du procédé (échelle TRL)	Disponible (TRL9)- traitement sur site possible
Technologies ou solution de référence	Dépollution manuelle

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Flux entrant**  
VHU

**Flux sortant**  
VHU sans fluide, fluides stockés  
individuellement

### ETAPES DE TRAITEMENT

Mise en place de perforateurs dans les réservoirs de carburant et dans la durite en point bas du radiateur, d'une canule d'aspiration dans le réservoir du lave glace et ouverture des vis des réservoirs d'huile.

Aspiration simultanée par pompe à vide ou écoulement gravitaire des différents fluides (carburant, liquide de frein, huile moteur, lave glace, refroidissement moteur, liquide de climatisation)

Contrôle du carburant (optionnel)

Evacuation vers des cuves de stockage après filtration (filtration optionnelle)



FICHE SOMMAIRE 17  
**EXTRACTION DES FLUIDES / VHU**

**AVANTAGE/ INTERET**

Rapidité (Extraction de 98 % des liquides en moins de 20 minutes contre 45 minutes estimés pour une dépollution manuelle)  
Sécurité de l'opérateur (contact avec les fluides minimisés, certification ATEX)  
Installation compacte et modulable, large gamme de produits (unités fixes ou mobiles)  
Récupération de certains fluides pour valorisation ultérieure

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Non identifiés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

La Directive européenne 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage fixe l'objectif de 95% de réutilisation et de valorisation en poids moyen par véhicule et par an et 85% de réutilisation et recyclage en poids moyen par véhicule et par an.  
L'arrêté du 2 mai 2012 relatif aux agréments des exploitants des centres VHU et aux agréments des exploitants des installations de broyage de véhicules hors d'usage impose et organise la reprise des VHU, leur dépollution, leur démolition et leur broyage, en vue de faciliter la récupération des pièces détachées ou fluides présents dans le véhicule.<sup>2</sup>

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

La société SEDA (Autriche) commercialise des unités de dépollution modulables fixes ou mobiles. Ces systèmes sont commercialisés par Re-Resources en France et distribués par Indra SAS.<sup>3</sup>  
Les unités SEDA sont très répandues au Pays-Bas.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le dispositif est bien implanté en France dans les installations de traitement de taille importante (supérieurs à 1500 VHU par an et par recycleur).  
En France, environ 50 broyeurs et 1 400 démolisseurs sont désormais agréés pour traiter l'ensemble des VHU au sein de la filière.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Des systèmes similaires sont commercialisés en Allemagne (unité amplirolls, Big Bennes) et en Angleterre (Autodrain).

**BIBLIOGRAPHIE**

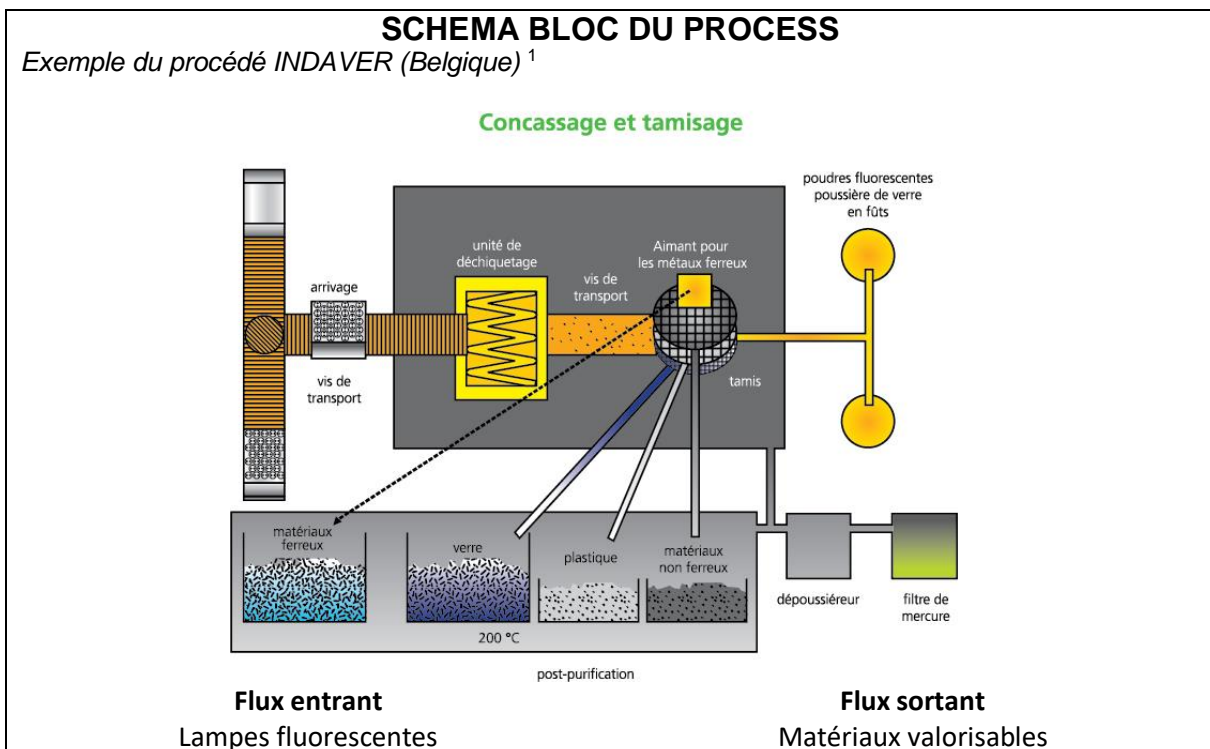
- [1] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Vehicules-Hors-d-Usage-VHU,12759.html>  
[2] <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000025835110>  
[3] [http://www.indra.fr/vente\\_d-equipements.html](http://www.indra.fr/vente_d-equipements.html)

## CONCASSAGE ET TAMISAGE

L'objectif du traitement est de séparer les différentes fractions valorisables des lampes fluocompactes.

Le procédé consiste à concasser et tamiser les lampes fluocompactes dans des installations fermées afin d'en récupérer les différents constituants en vue de leur valorisation. Les lampes fluorescentes, classées comme déchets dangereux du fait qu'elles contiennent du mercure, font l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées. En 2014, Recylum a collecté 43 millions de lampes à économie d'énergie (lampes fluocompactes, tubes fluorescents, lampes à LED, lampes techniques ...).<sup>1</sup>

<b>Type de procédé</b>	Mécanique
<b>Nature du polluant</b>	Mercure
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9)- traitement en unité centralisée
<b>Technologies de référence</b>	Broyage



### ETAPES DE TRAITEMENT

**Broyage** des lampes

**Isolation du fer** par un tambour magnétique

Séparation des métaux non ferreux, plastiques verres et poudres fluorescentes par **tamisage**

<sup>1</sup> <http://www.indaver.be/fr/operational-excellence/recuperation-des-materiaux/lampes/>



FICHE SOMMAIRE 18  
**BROYAGE ET TAMISAGE/ LAMPES  
FLUOCOMPACTES**

**AVANTAGE/ INTERET**

Recyclage jusqu'à 95% des matériaux constituant les lampes  
Le verre et les métaux sont utilisés pour la production de nouvelle lampe ou en métallurgie  
Les installations de traitement sont fermées, l'air aspiré du processus est aspiré et purifié

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Séparation amont des lampes fluo compactes et des tubes fluorescents nécessaire.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les lampes fluorescentes sont classées comme déchets dangereux et doivent faire l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées (Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002)

Ils entrent dans le cadre d'application du décret 2005-829 du 20 juillet 2005 sur la gestion des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE).

La Directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003 fixait à 5 mg la quantité de mercure à ne pas dépasser dans les lampes fluorescentes compactes.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

INDAVER (Belgique) traite 30 millions de lampes fluocompactes annuellement via le procédé de « concassage tamisage ».

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

RECYLUM a un objectif de collecte de 65 % des lampes usagées pour 2019.

Des systèmes de broyage sont également utilisés en France (Artemise et COVED), avec des systèmes de séparation des différents constituants.

Les mesures d'incitation à l'économie d'énergie (interdiction à la vente d'ampoules incandescentes) ont permis le développement du marché des lampes fluocompactes.

Le procédé de pré-traitement permet le recyclage de métaux rares à caractère stratégique contenus dans ces ampoules (cérium, europium, gadoliniumlanthane, terbium, yttrium).

Solvay a abandonné son projet (Coléop'terre) de mettre en place une filière de recyclage de terres rares contenues dans les lampes fluo-compactes pour des raisons de rentabilité insuffisante compte tenu du prix des terres rares et de la substitution progressive des LED

Le marché du mercure tend en revanche à décliner du fait des restrictions de teneur en mercure dans les produits de consommation.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Les tubes fluorescents contenant du mercure sont traités par un autre procédé, dit « procédé de couplage soufflage », commercialisé sous le nom de « Inda Tube » par INDAVER (voir fiche « TECHNIQUE DE DECOUPAGE -SOUFLAGE / TUBES FLUORESCENTS »).

**BIBLIOGRAPHIE**

RECYLUM, <http://www.recyclum.com/communiqués-de-presse-recylum/recyclage-lampes-recylum-depasse-les-objectifs-reglementaires/>

Réunion logistique Recylum, 5 et 6 juin 2012

Rapport INRS "Document pour le médecin du travail" N°125-1er trimestre 2011

<http://www.indaver.be/fr/operational-excellence/recuperation-des-matériaux/lampes/>

Article « Solvay renonce au recyclage des terres rares », l'Usine Nouvelle, 26/01/2016,

<http://www.usinenouvelle.com/article/solvay-renonce-au-recyclage-des-terres-rares.N375935>



**FICHE SOMMAIRE 19**  
**DECOUPAGE -SOUFLAGE / TUBES**  
**FLUORESCENTS**

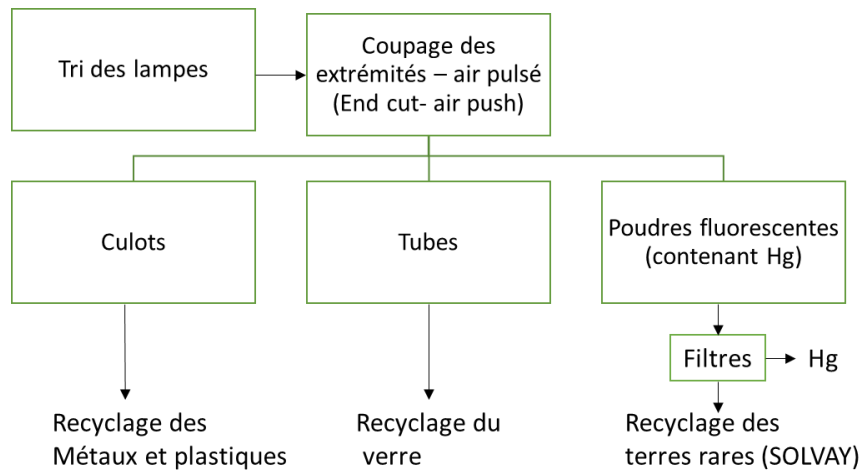
**COUPAGE- SOUFLAGE OU « END-CUT, AIR-PUSH »**

L'objectif du procédé est de séparer les différentes fractions valorisables des tubes fluorescents.

Le procédé consiste à découper les tubes fluorescents et à aspirer les poudres fluorescentes contenues à l'intérieur. Les différents constituants sont séparés en vue de leur valorisation. Les tubes fluorescents, classés comme déchets dangereux du fait qu'ils contiennent du mercure, font l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées. En 2014, Recylum a collecté 43 millions de lampes à économie d'énergie (lampes fluocompactes, tubes fluorescents, lampes à LED, lampes techniques ...).<sup>1</sup>

<b>Type de procédé</b>	Mécanique
<b>Nature du polluant</b>	Mercure
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9) – traitement en unité centralisée
<b>Technologies de référence</b>	Broyage puis aspiration des poussières et vapeurs

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**



**Flux entrant**  
Tubes fluorescents, air pulsé

**Flux sortant**  
Culots, tubes de verre et poudres fluorescentes, filtre souillé

**ETAPES DE TRAITEMENT**

- Tri des tubes
- Coupage des embouts par choc thermique
- Soufflage des poudres mercurisées dans des filtres à mercure
- Broyage et séparation du verre et des métaux



FICHE SOMMAIRE 19  
**DECOUPAGE -SOUFLAGE / TUBES  
FLUORESCENTS**

**AVANTAGE/ INTERET**

Bonne qualité du verre récupéré  
Moins d'émission de mercure  
Récupération des culots « entiers »

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Séparation amont des lampes fluo compactes et des tubes fluorescents nécessaire.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les lampes fluorescentes sont classées comme déchets dangereux et doivent faire l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées (Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002)  
Ils entrent dans le cadre d'application du décret 2005-829 du 20 juillet 2005 sur la gestion des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE).  
La Directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003 fixait à 5 mg la quantité de mercure à ne pas dépasser dans les lampes fluorescentes compactes

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Artemise, COVED, Lumiver Optim, Philips, SARP Industries (France)  
Indaver (Belgique)

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'inconvénient du procédé est qu'il nécessite le tri des tubes par longueur pour pouvoir couper les embouts au bon endroit.  
Le procédé de pré-traitement permet le recyclage de métaux rares à caractère stratégique contenus dans ces ampoules (cérium, europium, gadoliniumlanthane, terbium, yttrium).  
Le marché du mercure tend en revanche à décliner du fait des restrictions de teneur en mercure dans les produits de consommation. Le mercure doit donc être éliminé comme déchet dangereux

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le cout de traitement actuel (chaîne collecte/traitement/recyclage) est compris entre 1.4 et 1.9 €HT par tube fluorescent<sup>2</sup>  
D'après INDAVER (Belgique), ce procédé permet de traiter près de deux fois plus de tubes que leur précédent procédé (laminoir).<sup>3</sup>  
Les lampes fluocompactes contenant du mercure sont traitées par un autre procédé basé sur le broyage des lampes (voir fiche « BROYAGE ET TAMISAGE/LAMPES FLUOCOMPACTES »).

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] <http://www.recylum.com/communiqués-de-presse-recylum/recyclage-lampes-recylum-depasse-les-objectifs-reglementaires/>  
[2] Rapport INRS "Document pour le médecin du travail" N°125-1er trimestre 2011  
[3] <http://www.indaver.be/fr/operational-excellence/recuperation-des-materiaux/lampes/>

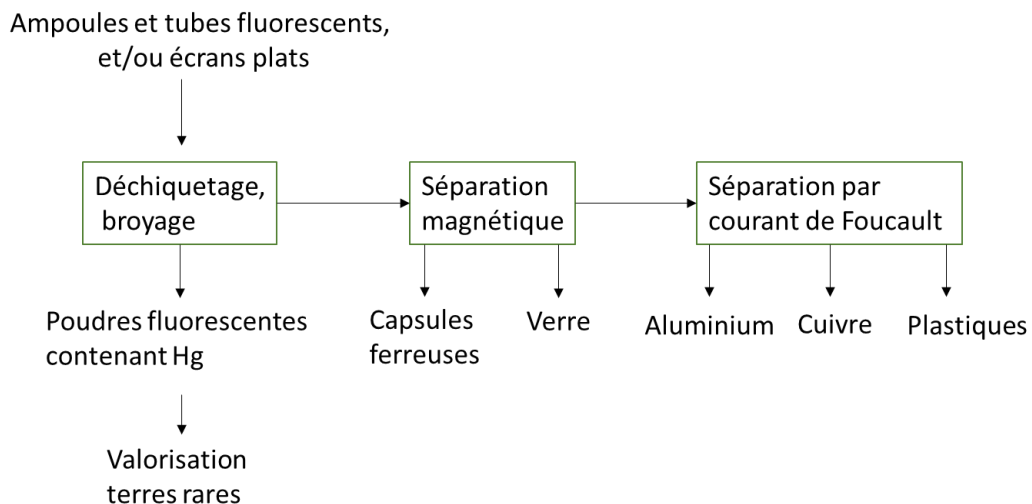
## BLUBOX

L'objectif du procédé est de séparer les différents constituants des lampes fluocompactes, tubes fluorescents et écrans plats usagés de façon automatisée et sécurisée.

Le procédé entièrement automatisé et clos repose sur une succession d'opérations conduisant à la récupération des différents constituants, notamment des terres rares, en vue de leur valorisation. Les lampes et tubes fluorescents, classés comme déchets dangereux du fait qu'ils contiennent du mercure, font l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées. En 2014, Recylum a collecté 43 millions de lampes à économie d'énergie (lampes fluocompactes, tubes fluorescents, lampes à LED, lampes techniques ...).<sup>1</sup>

<b>Type de procédé</b>	Physique
<b>Nature du polluant</b>	Mercure
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9) – traitement en unité centralisée
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Broyage, aspiration des poudres et tri

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



<b>Flux entrant</b>	<b>Flux sortant</b>
Lampes et tubes fluorescents, écrans plats	Verre, métaux ferreux, poudre fluorescente (mercure et terres rares), plastiques

### ETAPES DE TRAITEMENT

Introduction des tubes ou lampes fluorescents ou des écrans plats  
 Déchiquetage, broyage  
 Aspiration des poudres fluorescentes  
 Traitement et collecte des poudres aspirés dans des récipients clos.  
 Séparation magnétique des capsules ferreuses  
 Séparation de l'aluminium, du cuivre et des plastiques par courant de Foucault  
 Passage sur un tamis rotatif pour séparer les fractions de différentes tailles  
 Récupération des différentes fractions pour valorisation

**SEPARATION AUTOMATISEE DES  
CONSTITUANTS / LAMPES, TUBES  
FLUORESCENTS ET ECRANS PLATS****AVANTAGE/ INTERET**

Procédé automatisé  
Procédé modulable (lampes seules, écrans seuls ou système mixte)  
Procédé sec  
Installation dans un container  
Exposition des opérateurs aux émanations des poudres fluorescente réduite (procédé clos et en dépression)  
Application possible à une large gamme de lampes et d'écrans plats

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Non identifiés.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les lampes fluorescentes sont classées comme déchets dangereux et doivent faire l'objet d'une collecte sélective et d'un traitement dans des filières appropriées (Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002)  
Elles entrent dans le cadre d'application du décret 2005-829 du 20 juillet 2005 sur la gestion des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE).  
La Directive 2002/95/CE du 27 janvier 2003 fixait à 5 mg la quantité de mercure à ne pas dépasser dans les lampes fluorescentes compactes

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Le procédé, développé par Air Mercury et MTB Recycling, a été installé en Autriche (Saubermacher), en Suisse (Véolia) et aux USA (Creative Recycling).

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Ce procédé permet de produire des fractions valorisables à haute valeur ajoutée avec des coûts de main d'œuvre minimisés et des conditions de sécurité optimisées.  
Le même procédé permet de traiter les lampes fluocompactes, les tubes fluorescents ainsi que les écrans plats.  
Il est entièrement automatisé de l'étape d'alimentation jusqu'à la récupération des éléments valorisables dans des bacs, et répond entièrement aux préoccupations liées à la sécurité des opérateurs.  
La société Creative Recycling en Floride s'est équipée de 12 Blubox car la valorisation des terres rares est un enjeu stratégique important aux USA.  
Le PMMA (Polyméthyle Métacrylate), présent dans les écrans plats, est également un composant valorisable à haute valeur ajoutée.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

La capacité du procédé dépend de la nature des déchets à traiter et de l'expérience des opérateurs. En général, 500 kg d'écran plats par heure et 500 kg de lampes usagée par heure peuvent être traités dans les systèmes mixtes. Deux opérateurs conduisent le procédé.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] <http://www.recylum.com/communiqués-de-presse-recylum/recyclage-lampes-recylum-depasse-les-objectifs-reglementaires/>  
*BLUBOX of tricks*, Recycling International, march 2012.  
*Une BLUBOX pour écrans plats*, Recyclage et Valorisation, N°45, juin 2014.  
<http://www.blubox.ch/>



## DESORPTION PAR VIDE POUSSE / DECHETS PATEUX

### Désorption par vide poussé

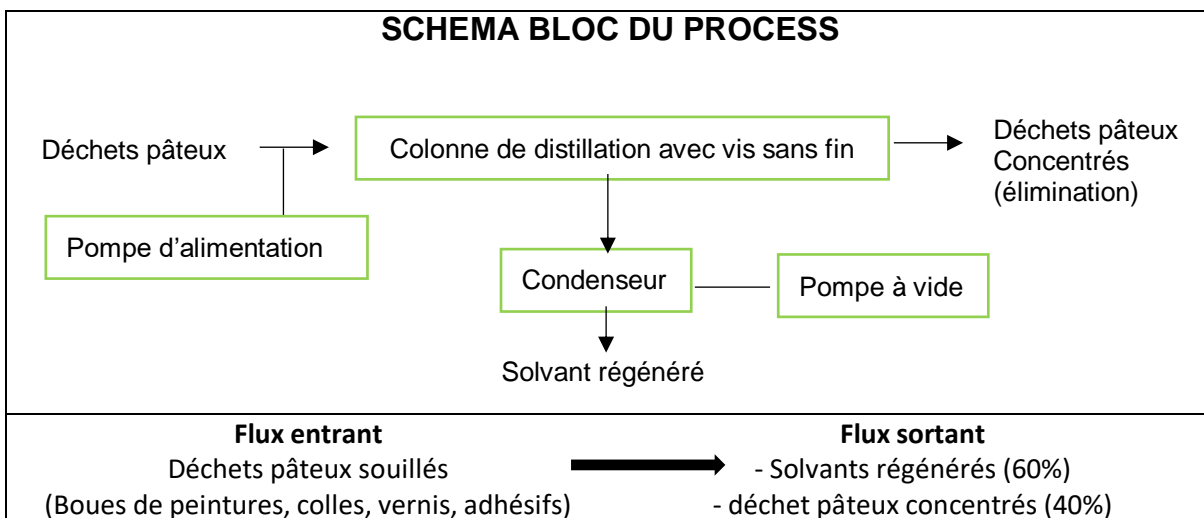
L'objectif du prétraitement est d'extraire des solvants organiques de déchets pâteux (boues de peintures, colles, vernis, adhésifs, culots de distillation...) afin de les régénérer. Ce procédé permet d'envisager une valorisation de ces solvants, au lieu de les traiter dans des unités d'incinération de déchets dangereux.

Les boues de peintures, les mastiques, les encres et autres vernis sont des déchets pâteux classés comme dangereux. En France, les déchets pâteux représentent un gisement de 200 000 tonnes. Un solvant est un liquide qui a la capacité de dissoudre un liquide, un gaz ou un solide. Il existe deux types de solvants : les solvants halogénés, contenant du chlore (perchloréthylène, chlorure de méthylène...), les solvants non halogénés, ne contenant pas de chlore (white spirit, essence de térébenthine, acétone...). Afin de répondre à la problématique du traitement des déchets pâteux (au-delà de certaine viscosité ou teneur en impuretés, certains solvants ne sont traités que par incinération) CHIMIREC a adapté son procédé de « vide poussé » avec lequel il traite déjà les transformateurs électriques pour traiter les déchets pâteux.

Le principe du procédé vise à récupérer des solvants des déchets pâteux en optimisant leur évaporation dans des conditions de vide poussé. Le procédé repose sur l'utilisation de colonnes de distillation composées de vis sans fin, dans lesquels les conditions de pression et de températures sont ajustées afin de concentrer et d'extraire les solvants contenus dans les déchets de pâteux. Ce procédé permet la récupération de deux flux : un solvant régénéré (60%) et un résidu pâteux (40%) destiné à l'élimination.

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	Impuretés contenues dans les solvants
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (9) - traitement en unité centralisée
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Evapo-incinération, Incinération

#### SCHEMA BLOC DU PROCESS



#### ETAPES DE TRAITEMENT

Le déchet est introduit dans une colonne de distillation à l'aide d'une pompe d'alimentation. La colonne de distillation horizontales de 7 m de long, équipées de vis sans fin va permettre, à l'aide d'une pompe à vide, d'abaisser la pression à quelques mbar et d'évaporer les solvants un à un.

**DESORPTION PAR VIDE POUSSE / DECHETS PATEUX**

Les déchets entraînés sont chauffés sous-vide et un condensateur permet de récupérer les solvants régénérés à l'aide de pompes de transfert. Le "vide" est appliqué progressivement pour ne pas saturer les pompes.

Selon le produit à traiter, le meilleur couple pression/température est défini pour optimiser l'extraction des solvants. Une pression d'une dizaine de mbar et une température de 40 à 50°C sont les seules conditions de traitement dévoilées. Dans ces conditions, les solvants s'évaporent. Les différents solvants sont ainsi séparés, puis condensés pour être revendus.

On récupère en fin de traitement un résidu pâteux concentré (40%) et une part de solvant régénéré.

**AVANTAGES/ INTERETS**

L'avantage de ce prétraitement est qu'il permet d'extraire et régénéré 60% des solvants contenus dans les déchets pâteux issus d'activités industrielles. Il permet de détourner une partie du gisement de l'élimination et minimise la partie restante à traiter.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Le présent procédé ne permet pas de sortir les déchets pâteux du traitement par élimination, en effet 40% de l'entrant se retrouve concentré dans un résidu pâteux qu'il est nécessaire d'éliminer.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Les solvants sont soumis à la réglementation en vigueur pour les déchets dangereux et ils doivent respecter le plan d'élimination dédié aux déchets industriels dangereux (DID). Les déchets en question s'inscrivent dans la rubrique "Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation et du décapage de peintures et vernis" 08 01 00 (déchets non dangereux ou dangereux) issus de l'article R 541-7 à R 541-11 du Code de l'environnement.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

CHIMIREC PPM, filiale du Groupe CHIMIREC implantée à La Roche Clermault (37), a développé un procédé fonctionnant 24h/24 et permettant de traiter 1 t/h, environ 4000 t/an. CHIMIREC revend les solvants régénérés.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'attrait de ce prétraitement réside dans la capacité à limiter la quantité de déchets pâteux envoyé en incinération. Ce procédé permet la production et l'utilisation de matières premières régénérées. De plus, il permet après traitement, de revendre le produit en tant que solvant régénéré à un coût inférieure qu'un produit neuf (entre 300 et 1500 €/t).

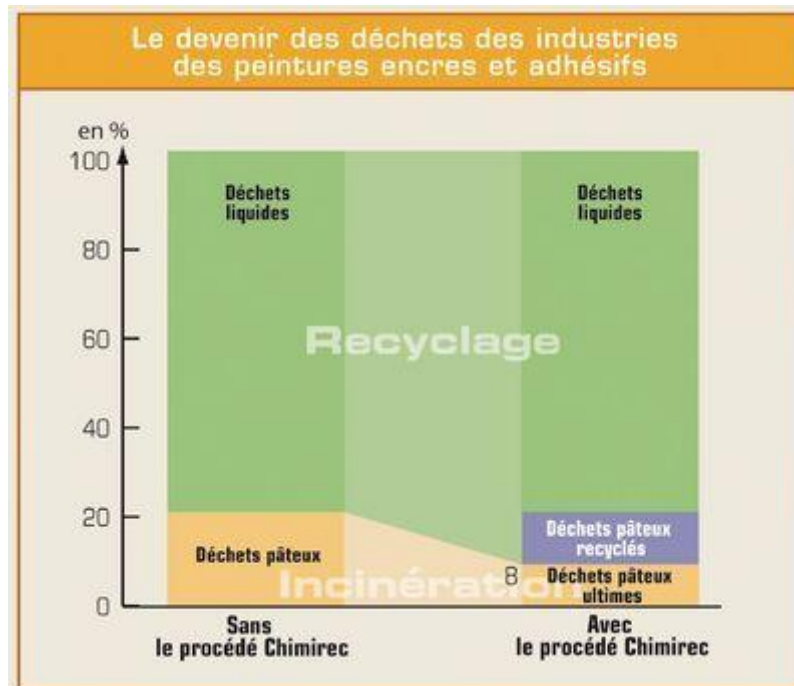
**CHAMP DE COMMENTAIRES**

La technologie d'extraction de polluant par vide poussé a été présentée, dans un premier temps, dans le contexte des transformateurs électrique et la captation du PCB contenu dans le fluide diélectrique de ces transformateurs. Ce procédé, développé par Aprochim, vise un gisement de déchet de transformateur restreint et qui tend à disparaître (cf plan national de décontamination et élimination des PCB). Il a été proposé d'identifier les cas dans lequel un transfert technologique de la désorption sous vide était possible.

D'après [2], Chimirec a présenté en 2012, un nouveau procédé de valorisation des solvants contenus dans les déchets pâteux basé sur le procédé d'extraction par vide poussé. Afin de valoriser certains solvants qui, au-delà d'une certaine viscosité ou teneur en impuretés, ne sont traités actuellement qu'en incinération, Chimirec annonce récupérer 60 % des solvants avec un système fonctionnant en

## DESORPTION PAR VIDE POUSSE / DECHETS PATEUX

continu 24h/24. Avec ce procédé, Chimirec cible une centaine de solvants dont : les cétones, hydrocarbures aliphatiques (white spirit...), méthylbenzène, esters, glycols et solvants chlorés (trichloroéthane) issus d'activités industrielles légères (ateliers de réparation automobile) ou lourdes (métallurgie, construction automobile...).



### BIBLIOGRAPHIE

[1] <http://aprochim.fr>

[2] <http://www.industrie.com/chimie/chimirec-s-attaque-aux-dechets-pateux,38576>

[3] [http://www.encyclo-ecolo.com/Recyclage\\_d%C3%A9chets\\_p%C3%A2teux](http://www.encyclo-ecolo.com/Recyclage_d%C3%A9chets_p%C3%A2teux)

## Prétraitement du bois B par hydrolyse et fermentation séparées avant valorisation bioéthanol

Le but du prétraitement est de modifier la structure lignocellulosique et d'augmenter la vitesse d'hydrolyse enzymatique principalement de la cellulose.

En moyenne européenne, environ 1,7 tonnes de déchet lignocellulosique sont produites durant la construction d'une maison de 180 m<sup>2</sup>. Aussi, au moins 30 % des déchets lignocellulosiques proviennent de produits de charpente en bois d'ingénierie.

Environ 10 % des produits de charpente en bois d'ingénierie contiennent différents types de colles y compris de l'urée formaldéhydes (UF), mélamine urée phénol formaldéhyde (MUPF) et du diisocyanate de diphenyl méthane (PMDI).

Pour convertir les matières lignocellulose en éthanol il faut :

1. Un prétraitement
2. Une hydrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose aux sucres monomères
3. Fermentation des sucres à l'éthanol
4. Distillation et épuration de l'éthanol « brute ».

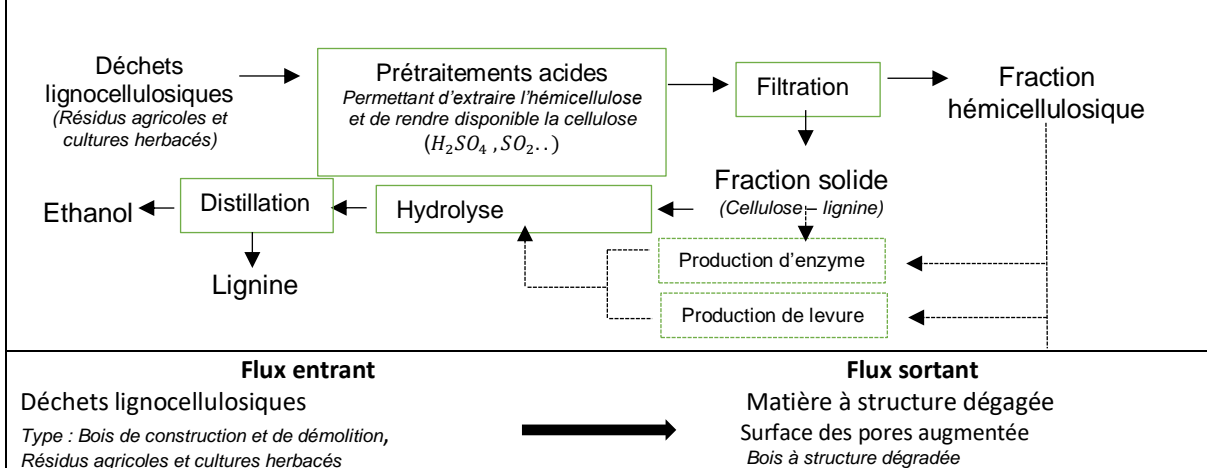
Le prétraitement des déchets est très important pour le procédé de bioconversion qui consiste à séparer la lignine et l'hémicellulose de la cellulose.

Dans le bois, seule une petite fraction des capillaires des parois cellulaires est accessible aux enzymes. Le prétraitement augmente donc la superficie disponible de plusieurs façons : la fraction hémicellulosique est hydrolysée, ce qui diminue les effets de blindage, la lignine subit également des changements structurels, le bois est délignifié à divers degrés.

Ainsi, le blindage des microfibrilles et l'occlusion des pores, causés par la lignine, peuvent être éliminés. Les autres facteurs qui influencent la digestibilité dans les procédés SFS (saccharification et fermentation simultanées), sont la cristallinité du substrat et le degré de polymérisation.

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	La structure lignocellulosique
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	En développement (4-6)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Hydrolyse, hydroxyde de sodium, acide phosphorique concentré et du NMMO

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**HYDROLYSE ET FERMENTATION SEPARÉES /  
BOIS B****ETAPES DU PRETRAITEMENT**

La dégradation est faite avec une formation minimale de composés, qui inhibent les micro-organismes de fermentation. La surface accessible est considérée comme l'un des facteurs les plus importants qui affectent l'efficacité de la dégradation enzymatique de la cellulose.

L'hydrolyse est un procédé dans lequel les polymères glucidiques sont transformés en sucres fermentescibles simples. Ceci est facilité par le procédé de prétraitement (à la chaux, à base d'hydroxyde, explosion à la vapeur, AFEX) qui modifie la structure de la biomasse (pores plus gros et surface plus élevée), permettant ainsi aux enzymes d'entrer dans la fibre. Le prétraitement catalysé par l'acide améliore l'élimination de l'hémicellulose. L'hydrolyse est essentielle avant la fermentation pour libérer les sucres fermentescibles. Dans le procédé, la cellulose est clivée en glucose, tandis que l'hémicellulose résulte en plusieurs pentoses et hexoses.

Ensuite, les micro-organismes de fermentation sont utilisés pour la conversion de sucres monomères en éthanol. Différents organismes comme les bactéries, les levures et les champignons peuvent être utilisés pour la conversion, mais l'organisme le plus utilisé dans les procédés industriels est la levure *Saccharomyces cerevisiae*.

L'étape d'hydrolyse enzymatique est souvent en étroite collaboration avec l'étape de fermentation suivante dans la production d'éthanol.

La disposition de ce processus peut être conçue de plusieurs façons ; soit par hydrolyse séparée et étape de fermentation (hydrolyse et fermentation séparées, HFS) soit par combinaison de ces deux en une seule étape (saccharification et fermentation simultanées, SFS). Chaque processus a ses propres avantages et inconvénients. Cette fiche se concentrera sur la configuration HFS, mais quand il est question de HFS il est inévitable de le comparer à SFS. Plusieurs autres procédés d'hydrolyse enzymatique et de fermentation sont également disponibles, bien que HFS et SFS soient les plus courants.

Le concept de procédé HFS implique une séparation de l'hydrolyse et de la fermentation en exécutant les réactions en unités séparées.

Le matériau lignocellulosique prétraité est dans une première unité dégradée en sucres monomères par des cellulases et ensuite fermenté en éthanol dans une deuxième unité séparée.

**AVANTAGES / INTERETS**

Le principal avantage de cette méthode est que les deux procédés (hydrolyse et fermentation) peuvent être réalisés à leurs propres conditions optimales. Les cellulases se sont révélées les plus efficaces à une température comprise entre 45 et 50 ° C, alors que l'organisme de fermentation utilisé couramment a une température optimale de 30 à 37 ° C.

Un autre avantage de la HFS est la possibilité d'exécuter le processus de fermentation en mode continu avec recyclage cellulaire. Ceci est possible parce que l'élimination des résidus de lignine peut se produire avant la fermentation (cette élimination est beaucoup plus problématique si la lignine est mélangée avec la levure).

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Le type de matière lignocellulosique entrante va impacter fortement les paramètres du prétraitement [3].

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Directive 2009 /28/CE (Renewable Energy Directive dite RED) et Directive 2009/30/CE.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Research Center for Chemistry, Indonesian Institute of Sciences (LIPI), Kawasan Indonésie.  
SP, Boras, Suède. Technopolis de PathumThani, Thaïlande



**HYDROLYSE ET FERMENTATION SEPARÉES /  
BOIS B**

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Des exemples d'autres méthodes sont : la saccharification et la fermentation simultanée non isotherme (NSSF), la saccharification et la co-fermentation simultanées (SSCF) et le bio-processage consolidé (CBP). En raison du temps de séjour relativement long pour le processus d'hydrolyse, un à quatre jours, il y a un risque de contamination microbienne de la solution de sucre.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Comparison of SHF and SSF Processes for Ethanol Production from Alkali-Acid Pretreated Sugarcane trash, S. Suttikul (2016)
- [2] Construction and demolition lignocellulosic wastes to bioethanol, V.Jafari et al. (2012)
- [3] A short review on SSF – an interesting process option for ethanol production from lignocellulosic feedstocks, K.Olofsson (2008)

## HYDROLYSE ACIDE / DECHETS DE CONSERVERIE VEGETALE

### Prétraitement de déchets de transformation de fruits et légumes par hydrolyse acide diluée pour la production de bioéthanol

L'objectif du prétraitement est la décomposition des monosaccharides pour ramollir le matériau et le rendre plus susceptible à une attaque enzymatique avant la fermentation.

En France, les déchets agroalimentaires représentent un gisement de 3 millions de tonnes par an. Ces déchets représentent un fort potentiel de valorisation énergétique. Beaucoup ont été testés pour la production de bioéthanol, mais la production commerciale à grande échelle n'a pas encore été mise en œuvre en raison du coût élevé de production basé sur les technologies actuelles. Ceci est dû au fait que la vitesse et le rendement de la conversion de la lignocellulose, présente dans les déchets agroalimentaires, en sucres fermentescibles sont faibles, en raison de la structure cristalline résistante de la cellulose et de la barrière physique formée par la lignine entourant la cellulose.

Ce prétraitement ne vise donc pas à l'abattage d'un polluant spécifique mais permet de favoriser l'étape de fermentation, ce qui conduit à augmenter la production de bioéthanol. Ce prétraitement est potentiellement applicable aux déchets de bois A, faiblement traités.

Pour convertir les matières lignocellulose en éthanol il faut :

1. Un prétraitement
2. Une hydrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose aux sucres monomères
3. Fermentation des sucres à l'éthanol
4. Distillation et épuration de l'éthanol « brute ».

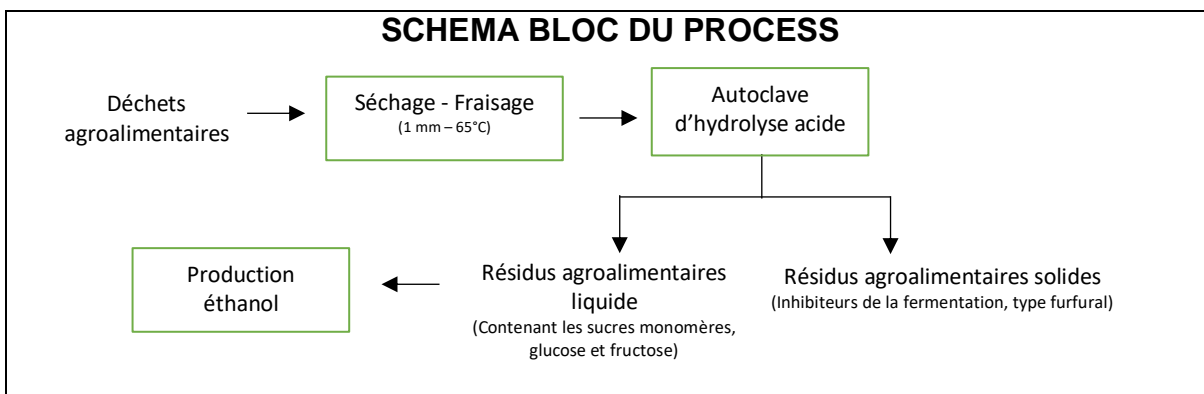
L'hydrolyse acide diluée a été développée pour le prétraitement de différents matériaux lignocellulosiques, pour convertir l'hémicellulose en sucres fermentescibles.

Spécifiquement, les résidus de l'industrie de la conserve de fruits et légumes sont composés de polymères glucidiques (amidon, cellulose, hémicellulose et inuline), de lignine et de traces de protéines.

La majorité des glucides peuvent être hydrolysés en sucres simples et fermentés en éthanol. Cependant, dans le cas de la cellulose et de l'hémicellulose, la technologie nécessaire à ce procédé diffère de celle qui est utilisée par l'industrie classique de l'amidon en éthanol en raison de la structure chimique complexe de ces composés.

L'état optimal d'hydrolyse acide est défini comme les rendements de sucres libres totaux libérés.

<b>Type de procédé</b>	Physico-chimique
<b>Nature du polluant</b>	Monosaccharides
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	1-3 (En développement)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Hydrolyse



**HYDROLYSE ACIDE / DECHETS DE  
CONSERVERIE VEGETALE****Flux entrant**

Déchets de transformation de légumes, fruits et  
grains

**Flux sortant**

Fraction solide  
Fraction liquide chargée

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Parmi les acides hydrolysants, l'acide sulfurique, l'acide phosphorique et l'acide chlorhydrique sont les plus favorisés pour l'hydrolyse de la cellulose.

Sous différentes conditions de température, de temps de réaction et de teneur en  $H_2SO_4$ , dépendamment de la nature de l'intrant et de son état de décomposition, le prétraitement commence par la préparation du déchet, via séchage et fraisage. Les déchets sont d'abord homogénéisés, séchés au four à 45°C et broyés avant la caractérisation et les opérations de prétraitement. Les résidus sont ensuite stockés à 45°C pour éviter la contamination spontanée.

L'hydrolyse acide est opérée en autoclave avec une concentration en acide sulfurique de 0,5 et 1,0% (p / p). De l'eau déionisée est ajoutée pour ajuster le rapport solide/liquide à 5%.

Les températures de 100 à 130°C et des temps de réaction de 5 à 30 minutes sont adaptés à chaque typologie de déchet.

Une variante, en l'absence d'acide sulfurique, peut être opérée : il s'agit du prétraitement hydrothermal doux. Après le prétraitement, le déchet est filtré et neutralisé avec  $CaCO_3$  en ajustant le pH entre 6,5 et 7. Le précipité solide est éliminé par centrifugation.

L'hydrolyse en série, par acide phosphorique puis par acide sulfurique, permet d'obtenir les rendements de conversion les plus importants.

Dans [1], les conditions optimales, ont été observé, lors de l'ajout d'une faible quantité d'acide (1% du poids) ajoutée aux résidus d'aliment.

**AVANTAGE/ INTERET**

Le prétraitement pourrait permettre d'éviter la nécessité de réduire la taille des particules de biomasse, de préserver les fractions de pentose (hémicellulose), de limiter la formation de composés de dégradation qui inhibent la croissance des microorganismes fermentatifs, minimise les besoins en énergie et réduit les coûts.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Prétraitement d'hydrolyse acide semble sensible aux à la composition des intrants.

D'après [1], selon le type de déchets, la quantité de sucre (glucose et fructose) ne varie pas après le prétraitement. C'est le cas des résidus de tomates et de poivrons rouges, dont la présence d'acide n'a pas affecté la récupération du sucre dans la fraction liquide.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Loi n°2010-788 Grenelle II portant engagement national pour l'environnement du 12 juillet 2010.

Circulaire du 10 janvier 2012.

Article L 541-21-1 du Code de l'environnement.

Articles R 543-225 et suivants du Code de l'environnement.

Circulaire du 10 avril 2001 sur les déchets de bois, non publiée au JORF

Circulaire du 12 mai 2005 relative aux installations de combustion de bois – cas particulier des panneaux de particules – Inspection des installations classées

Arrêté du 29 juillet 2014 fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les broyats d'emballages en bois pour un usage comme combustibles de type biomasse dans une installation de combustion, JORF du 8 août 2014

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

CENER-National Renewable Energy Centre, Navarre (Espagne)



**HYDROLYSE ACIDE / DECHETS DE  
CONSERVERIE VEGETALE**

Démonstrateur : Renewable Acid-hydrolysis Condensation Hydrotreating (REACH) Pilot Plant, Purdue (Etats unis)

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Compte tenu de la fluctuation des coûts du pétrole et de la dépendance vis-à-vis des ressources en combustibles fossiles, une attention considérable est accordée aux ressources énergétiques de remplacement dans le cadre de la loi de transition énergétique, avec un objectif de 15% d'énergie renouvelable dans les transports en 2030.

En tant que première puissance agricole de la communauté européenne, la France est particulièrement concernée par le développement d'une filière bioéthanol compétitive.

Le traitement par hydrolyse acide conduit à une diminution de la concentration en sucre dans le bioéthanol, les extrapolations obtenues sur les démonstrateurs prévoient la diminution de 15% à 20% des coûts de production de l'éthanol à partir de charges lignocellulosiques.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Comme alternative, les procédés biologiques de prétraitement des déchets agroalimentaires ont des résultats prometteurs supplémentaires ; Ces procédés sont opérés en utilisant des microorganismes tels que les champignons blancs et bruns ainsi que de la pourriture molle bactérienne pour dégrader les matériaux lignocellulosiques dans des cultures submergées ou solides. Toutefois, bien que le processus de prétraitement biologique nécessite une faible énergie et impacte faiblement l'environnement, il nécessite 30 à 45 fois plus de temps, ce qui impacte le coût des infrastructures. D'autres solutions comme l'explosion de vapeur ou l'oxydation humide sont disponibles.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Diluted acid hydrolysis pretreatment of agri-food wastes for bioethanol production, I. Del Campo et al. (2006)

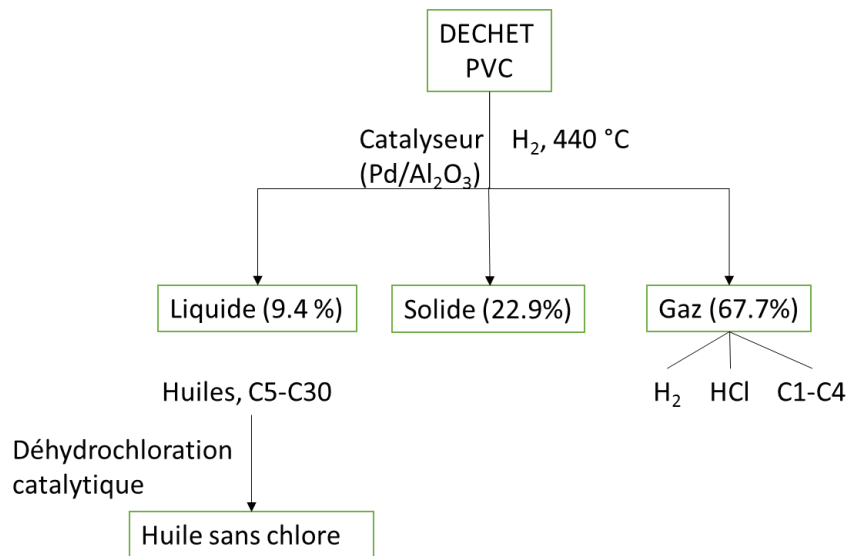
[2] Effect of acid hydrolysis and fungal biotreatment on agro-industrial wastes for obtainment of free sugars for bioethanol production, T.S Tayeb et al.(2012)

**DECHLORATION CATALYTIQUE / PVC**
**CONVERSION CATALYTIQUE DU PVC**

L'objectif du prétraitement est d'éliminer le chlore pour une valorisation matière d'une huile déchlorée comme combustible.

Le procédé catalytique permet d'extraire le chlore à 440 °C.  
 La production mondiale annuelle de PVC est estimée à 35 millions de tonnes par an [1].  
 L'apport en chlore dans les incinérateurs dus à la présence de PVC est estimé à 50%.  
 Les coûts supplémentaires dus à l'incinération du PVC par rapport aux déchets municipaux solides vont de 20 € la tonne (cas des PVC souples contenant 25 % de chlore, traitement par un procédé d'épuration humide) à près de 300 € par tonne (cas des PVC rigides contenant 53 % de chlore, traitement par un procédé d'épuration des gaz de combustion à sec) [2].

<b>Type de procédé</b>	Thermique
<b>Nature du polluant</b>	Cl
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	En développement (TRL 4)
<b>Technologies de référence</b>	Incinération de déchets non dangereux

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**


Source : [3]

**Flux entrant**  
PVC

**Flux sortant**  
Huile sans chlore

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Dépolymérisation puis déchloration catalytique à 440°C sous argon: production d'une phase solide, d'une phase liquide appauvrie en Cl et d'une phase gazeuse  
 Déhydrochloration catalytique de la phase liquide : obtention d'une huile sans chlore pour valorisation matière

**DECHLORATION CATALYTIQUE / PVC****AVANTAGE/ INTERET**

Température plus basse que l'incinération  
Pas d'émission de NOx ou SOx  
Moins de formation de radicaux libres par rapport à l'incinération, qui peuvent conduire à la formation d'intermédiaires toxiques  
Séparation aisée du HCl formé  
Système clos

**INCONVENIENT/ LIMITE**

Le bilan massique du procédé montre que, en l'état actuel, le procédé ne permet pas de produire plus de 10% d'huile à 0,02% de chlore.  
Le résidu solide représente encore 20% de la masse initiale avec une teneur de 0,3% de chlore. Les hydrocarbures gazeux produits sont encore chargés en chlore (alcane C1-C4 à 8% de chlore, alcènes C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> à 21% de chlore). Il faut donc bien traiter et valoriser les gaz incondensables qui contiennent du chlore (près de 70 % du flux entrant)  
La technique nécessite donc d'être perfectionnée avant de faire l'objet de développements industriels d'intérêt.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets.  
Limite de rejets : HCl 10 mg/Nm<sup>3</sup> (et Dioxines : 0.1ng/Nm<sup>3</sup>)  
Rubrique ICPE 2771 "installation de traitement thermique de déchets non dangereux"

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

A notre connaissance, ce procédé est encore en développement, à l'échelle pilote de laboratoire.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le développement de ce type de procédé est dépendant des conditions (réglementaires) de gestion des déchets de PVC, de l'évolution de la part de PVC dans les déchets et de la demande en matières premières secondaires produites par le procédé :

- Il n'existe pas d'objectifs spécifiques concernant le recyclage des déchets de PVC en France à l'heure actuelle mais l'incinération du PVC en mélange dans les déchets non dangereux impose des traitements de neutralisation conséquents.
- Le PVC est encore très présent dans les produits de consommation et en particulier les matériaux du bâtiment (menuiseries PVC) et les équipements électriques et électroniques ;
- L'huile déchlorée peut constituer un carburant alternatif dont l'intérêt pourrait croître avec une augmentation du prix du Pétrole et/ou la raréfaction des ressources fossiles accessibles. La valorisation de plastiques comme combustibles n'est envisageable qu'après déchloration du PVC pour éviter les phénomènes de corrosion

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Ce type de valorisation nécessite la réalisation d'études de faisabilité préalables.

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] *Chlorures de polyvinyle (PVC) : transformation, façonnage, recyclage*. Techniques de l'Ingénieur (mars 2012)
- [2] Bertin Technologies, « The influence of PVC on quantity and hazardousness of flue gas residues from incineration », étude réalisée pour la DG XI, avril 2000.
- [3] *Catalytic conversion of waste plastic: focus on waste PVC*, M.A. Keane, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 82 (2007) 787-795

## PYROLYSE PAR ETAPES / MELANGE DE POLYMERES (DONT PVC)

### PYROLYSE PAR ETAPES

Le procédé permet de réduire la quantité de chlore dans les huiles de pyrolyse produites à partir d'un mélange de polymères.

Ce procédé de pyrolyse par étapes est un processus de pyrolyse rapide qui permet de séparer un mélange de polymères (dont PVC) et d'éliminer le chlore afin de valoriser l'huile comme combustible en minimisant les risques de corrosion.

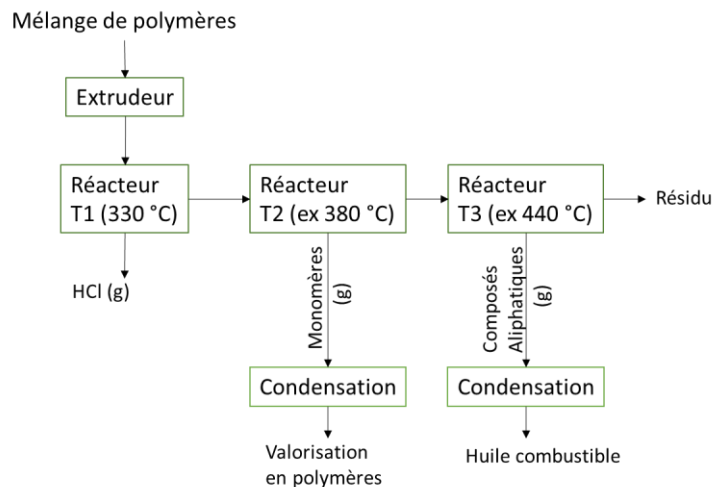
La production mondiale annuelle de PVC est estimée à 35 millions de tonnes par an [1].

L'apport en chlore dans les incinérateurs dus à la présence de PVC est estimé à 50%.

Les coûts supplémentaires dus à l'incinération du PVC par rapport aux déchets municipaux solides vont de 20 € la tonne (cas des PVC souples contenant 25 % de chlore, traitement par un procédé d'épuration humide) à près de 300 € par tonne (cas des PVC rigides contenant 53 % de chlore, traitement par un procédé d'épuration des gaz de combustion à sec) [2].

<b>Type de procédé</b>	thermique
<b>Nature du polluant</b>	Cl
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Emergent (TRL6 à 7)
<b>Technologies de référence</b>	Incinération de déchets non dangereux

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



**Source :** [3]

<b>Flux entrant</b> Mélange de polymères solides	<b>Flux sortant</b> HCl gazeux, monomères, composés aliphatiques sous forme d'huiles, résidu solide
---	--

### ETAPES DE TRAITEMENT

Extrusion du mélange de polymères

Déhydrochloration à 330 °C aboutissant à une extraction sous forme gazeuse de 99,6% du chlore des polymères entrant à partir d'un mélange de polymères contenant 10% de PVC

Récupération des différents polymères sous forme gazeuse en appliquant des paliers de température selon la nature des composés présents

Le procédé peut être réalisé soit avec plusieurs réacteurs en série, soit dans un même réacteur porté à différentes températures

Les composés gazeux organiques sont ensuite condensés pour être valorisés comme combustibles

Le résidu solide obtenu à partir d'un mélange de polymères à 10% de PVC contient 0,2% de chlore

**PYROLYSE PAR ETAPES / MELANGE DE  
POLYMERES (DONT PVC)****AVANTAGE/ INTERET**

Séparation des différents polymères sous forme d'huile de pyrolyse combustible présentant un risque de corrosion minimisé

Pas d'émission toxique de composés chlorés (hormis HCl dont la gestion est maîtrisée)

**INCONVENIENT/ LIMITE**

L'application du procédé est limitée à une teneur en PVC de 10 à 15%.

Les données manquantes sur le bilan matière ne nous permettent pas de nous prononcer sur un potentiel d'émergence du procédé à un stade industriel.

Le traitement du HCl dans les gaz incondensables doit être bien maîtrisé.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets (limites de rejets HCl 10 mg/Nm<sup>3</sup> et Dioxines : 0.1ng/Nm<sup>3</sup>).

Rubrique ICPE 2771 Traitement thermique de déchets non dangereux (soumis à autorisation)

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

La société PLas2Fuel a déposé un brevet décrivant un dispositif de recyclage des plastiques basé sur la pyrolyse par étapes en 2010 [4]. Agilyx Technology commercialise un système dérivé mais son application concerne les déchets plastiques sans mention spécifique du PVC.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le développement de ce type de procédé est dépendant des conditions (réglementaires) de gestion des déchets de matières plastiques, de l'évolution de la part de PVC dans les déchets et de la demande en matières premières secondaires produites par le procédé :

- Il n'existe pas d'objectifs spécifiques concernant le recyclage des déchets de PVC en France à l'heure actuelle mais l'incinération du PVC en mélange dans les déchets non dangereux impose des traitements de neutralisation conséquents.
- Le PVC est encore très présent dans les produits de consommation et en particulier les matériaux du bâtiment (menuiseries PVC) et les équipements électriques et électroniques ;
- L'huile déchlorée peut constituer un carburant alternatif dont l'intérêt pourrait croître avec une augmentation du prix du Pétrole et/ou la raréfaction des ressources fossiles accessibles. La valorisation de plastiques comme combustibles n'est envisageable qu'après déchloration du PVC pour éviter les phénomènes de corrosion

Le brevet déposé par Plast2Fuel précise que le procédé permet également de prétraiter des mélanges de plastique souillés (résidus alimentaire, étiquettes, sol...)

Ce procédé serait également efficace pour éliminer les composés bromés provenant des retardateurs de flamme.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Ce type de valorisation nécessite la réalisation d'études de faisabilité préalables

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] *Chlorures de polyvinyle (PVC) : transformation, façonnage, recyclage*. Techniques de l'ingénieur (mars 2012)

[2] Bertin Technologies, « The influence of PVC on quantity and hazardousness of flue gas residues from incineration », étude réalisée pour la DG XI, avril 2000.

[3] *Stepwise pyrolysis for raw material recovery from plastic waste*, H. Bockhorn \*, A. Hornung, U. Hornung, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 46(1998) 1-13

[4] *System for recycling plastics*, Patent n° US 7758729 B1 (2010)

**LIXIVIATION CHIMIQUE / DECHET BOIS ACC**
**Lixiviation (l'acide sulfurique) des déchets de bois traités à l'ACC**

Extraction chimique des agents de conservation du bois traité à l'arséniate de cuivre chromaté (ACC) pour valorisation matière ou énergie des déchets de bois.

L'imprégnation du bois à l'aide de substances chimiques est utilisée par l'industrie de préservation du bois afin de retarder ou d'empêcher la dégradation du bois. Exposé aux conditions extérieures, le bois subit de nombreuses altérations en raison des attaques menées par les insectes, les champignons ainsi que les rayons UV du soleil. L'arséniate de cuivre chromaté (ACC) est l'un des agents de préservation du bois les plus répandus à travers le monde. Depuis son interdiction de commercialisation, de nouveaux agents de préservation de nature orga-métallique ont vu le jour tels que le cuivre alcalin quaternaire (CAQ), l'azote de cuivre (AC) et le cuivre micronisé (MiCu). Les déchets de bois traité à l'ACC comprennent : du cuivre (fongicide) qui donne une couleur verte au bois, de l'arsenic (insecticide) et du chrome (fixateur du cuivre et de l'arsenic délayables en milieu humide).

Le gisement estimé en 2005, en Allemagne et en France, s'élève au total pour les déchets de bois traités à l'ACC autour de 3,4 millions de tonnes.

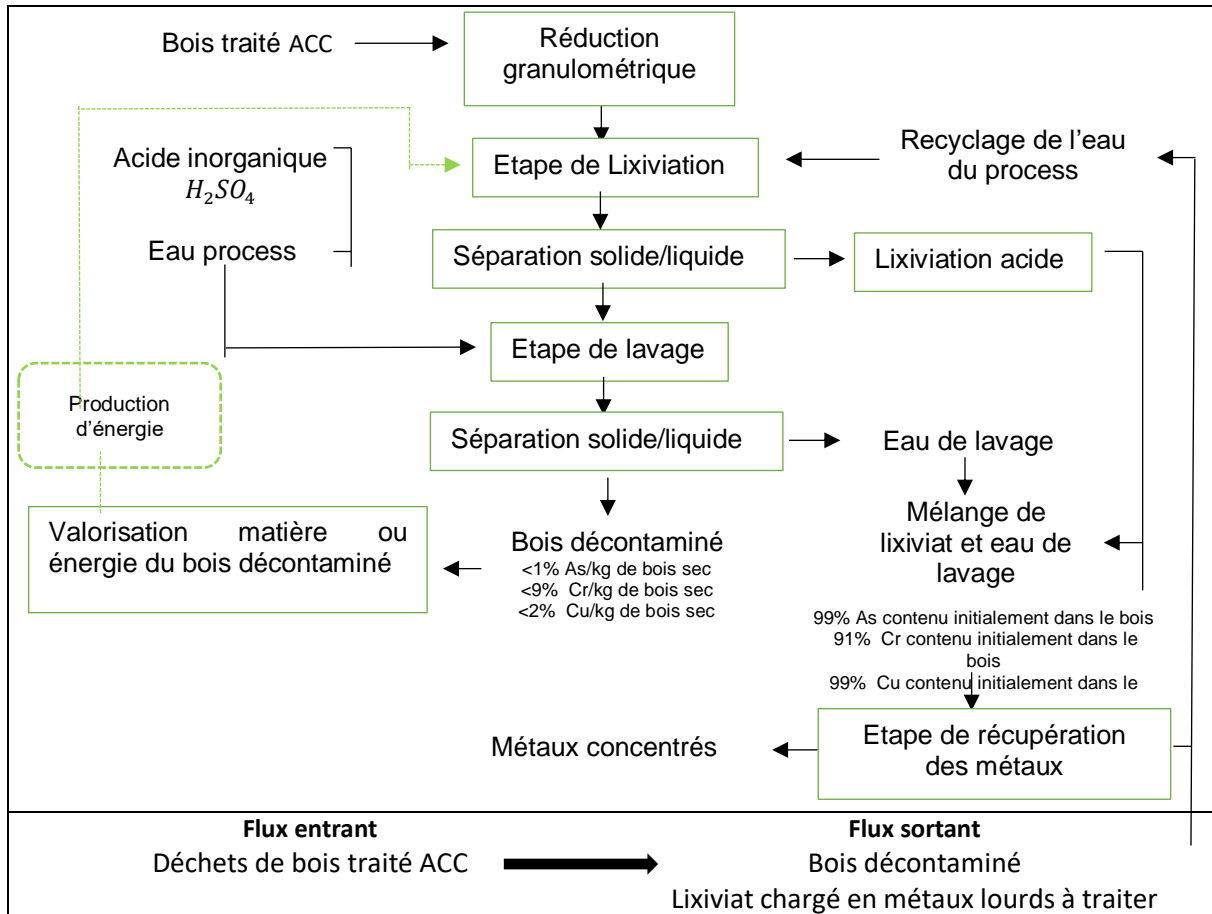
L'objectif du prétraitement est l'extraction chimique par lixiviation (à l'acide sulfurique) permettant d'extraire les métaux lourds, contenus dans les déchets de bois traité à ACC. La finalité est de valoriser les déchets de bois décontaminés en combustibles (pour chauffer le réacteur de lixiviation) ou comme source de carbone et d'agent de structuration dans la fabrication de compost.

Le présent prétraitement peut être divisé en deux étapes : le procédé de remédiation chimique (qui permet d'extraire les métaux lourds du déchets) et la récupération des métaux après solubilisation (à partir du lixiviât produit durant l'étape de remédiation chimique).

Le procédé de remédiation chimique présenté est issu d'une étude menée par l'INRS. Selon ses auteurs, l'acide sulfurique, utilisé comme réactif de lixiviation, semble être le meilleur compromis en termes d'efficacité et de coût en réactif chimique.

Ce procédé consiste en trois étapes de lixiviation et permet d'extraire plus de 99% de l'As et du Cu et 91 % du Cr, ce qui permettrait une valorisation énergétique des bois traités, en limitant la production d'éléments polluants.

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	Métaux lourds (Cuivre, Chrome, Arsenic)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	4-6 (Emergent)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	biorémédiation, électrodialyse, traitement thermique

**LIXIVIATION CHIMIQUE / DECHET BOIS ACC**
**SCHEMA BLOC DU PROCESS**

**ETAPES DE TRAITEMENT**
**Procédé de remédiation chimique par lixiviation :**

Réduction granulométrique de bois traité à l'ACC afin d'obtenir de fines particules de bois (type sciures)

Trois étapes de lixiviation successives avec comme réactif de lixiviation de l'acide sulfurique dans les conditions suivante :  $T = 75^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 2 \text{ h}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 0,2 \text{ N}$ .

Etapes de lavages/rinçage successives effectuées à température ambiante.

Ces étapes de lixiviation permettent d'extraire plus de 99% de l'As et du Cu et 91 % du Cr.

L'Arsenic est solubilisé sous sa forme trivalente ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ ), le chrome sous sa forme trivalente ( $\text{CrSO}_4^+$  ;  $\text{Cr}^+$ ) et le cuivre sous sa forme Cu bivalente ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ).

Les étapes suivantes concernent la récupération des métaux. Les méthodes les plus répandues et efficaces pour traiter des effluents industriels contaminés par des métaux sont la précipitation-coagulation, l'électrodéposition ou d'absorption sur résines échangeuses d'ions (ces procédés permettent l'extraction sélective/ou non des métaux en vue de différente voie de valorisation/élimination, cf fiche générique « extraction des métaux lourds »).

**AVANTAGE/ INTERET**

L'attrait de ce procédé réside, entre autres, dans la possibilité d'extraire les agents de conservation du bois traité et donc de permettre le passage de la classe de bois C (déchet dangereux) à un bois classé B (déchet de bois faiblement traité). Cela permettrait de valoriser les bois sous forme d'énergie en limitant la quantité de polluant.

**LIXIVIATION CHIMIQUE / DECHET BOIS ACC**

Ce procédé permet de tirer profit des matériaux initialement destinés à l'enfouissement.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

La réduction granulométrique du bois en fines particules entraîne une augmentation des coûts directs d'opérations non négligeable et limite le potentiel de valorisation du bois après remédiation.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Articles R 541- 7 à R 541-11 du Code de l'environnement ;  
Articles L 133-5 à R 133-4 du Code de l'environnement.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Pas d'exemple d'installations connues.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Faibles coûts du réactif de lixiviation, la performance, la reproductibilité ainsi que la robustesse du procédé semblent être des atouts majeurs de ce procédé.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Ce procédé de remédiation a été appliqué aux agents de préservation du bois de remplacement, à savoir les bois traités au CAQ, à l'AC et au MCQ afin d'évaluer l'efficacité de solubilisation du cuivre. La lixiviation acide des bois traités au CAQ, à l'AC et au MCO pendant 2 h 40 min à 20°C en présence d'acide sulfurique (0,13 N) avec trois cycles de lixiviation permet la solubilisation de 90 à 93% du cuivre.

Dans [3], l'étude de la réutilisation en contre-courant des eaux de procédé (lixiviats de remédiation et eaux de rinçage) pour la décontamination des bois traités à l'ACC ; a montré que cette configuration permet l'amélioration des performances de solubilisation mais surtout qu'elle permet un fort gain économique (estimation du cout du procédé sans contre-courant 588€/tonne de bois traité contre 165€/tbt pour la configuration en contre-courant avec recirculation).

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Electrodialytic remediation of ACC-treated waste wood in pilot scale, Pederson et al. (2003)
- [2] Développement d'un procédé chimique de décontamination de bois usagé traité à l'arséniate de cuivre chromaté, A.Janin (2009)
- [3] Décontamination de déchets de bois traité à base de composés cuivrés en vue de leur revalorisation, Lucie COUDERT (2013)



## Extraction des agents de conservation du bois CCA par des polymères naturels

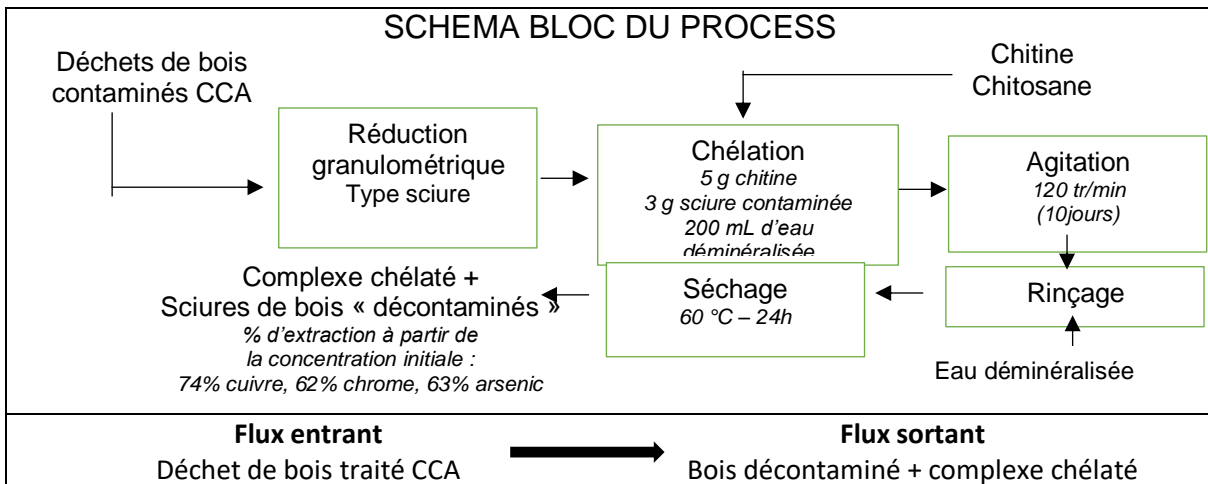
Chélation et adsorption des métaux lourds par des polymères naturels des agents de conservation du bois traité à l'CCA pour valorisation matière ou énergie des déchets de bois.

Les déchets de bois traité l'CCA comprennent : du cuivre (fongicide) qui donne une couleur verte au bois, de l'arsenic (insecticide) et du chrome (fixateur du cuivre et de l'arsenic en milieu humide). L'arséniate de cuivre chromé est l'un des pesticides du bois aux principes fongicide et insecticide, notamment utilisé en marine contre les tarets. Le gisement estimé en 2005, en Allemagne et en France, s'élève au total pour les déchets de bois traités à l'CCA autour de 3,4 millions de tonnes. Le présent prétraitement, met en œuvre le processus de chélation, ce procédé physico-chimique forme un complexe à partir d'un agent chélatant (ici la chitine et le chitosane) et un atome métallique. Le complexe formé est dit chélaté.

L'objectif du prétraitement est l'extraction par complexation (avec des polymères naturels) permettant d'extraire les métaux lourds, contenus dans les déchets de bois traité à CCA. Les polymères utilisés sont la chitine et le chitosane.

La finalité est de valoriser les déchets de bois décontaminés en combustibles, comme source de carbone ou encore pour la fabrication de bioéthanol.

<b>Type de procédé</b>	Biorémédiation (Chélation via des polymères naturels)
<b>Nature du polluant</b>	Métaux lourds (Cuivre, Chrome, Arsenic)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	En développement (1-3)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Lixiviation chimique, traitement thermique, électrodialyse.



### ETAPES DE TRAITEMENT

Après une réduction granulométrique, sous forme de sciure, le bois traité est mis en solution avec de l'eau déminéralisée (environ 70 ml/g de bois traité).

Ajout de 3g de sciure de bois traités dans des récipients contenant 200ml d'eau déminéralisé et 1 à 5g de Chitine et Chitosane.

Les récipients sont agités pendant 1,5 et 10 jours à 120 tr / min sur un agitateur rotatif à 27 °C.

Rinçage de la sciure 3 fois avec 300ml d'eau déionisée à 20°C ;

Séchage de la sciure au four 60°C pendant 24h.

**EXTRACTION BIOLOGIQUE / BOIS TRAITES  
CCA**

La chitine et le chitosane ont été jugés efficaces pour enlever le cuivre en raison de leur métal fort.

**AVANTAGES / INTERETS**

La chitine peut être un agent viable pour l'élimination du cuivre des déchets de bois : la rétention des métaux lourds toxiques, à un coût d'adsorption peu élevé grâce à l'utilisation d'un matériau synthétisé par de nombreuses espèces animales ou fongiques.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

A stade du laboratoire, ce prétraitement nécessite de poursuivre les études qui sont en cours.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Décret n°2002-540 du 18 avril 2002- codifie et fixe les filières d'élimination en fonction de la classe du déchets (bois traités CCA sont classé dangereux).

Directive 2001/90/CE de la Commission du 26 octobre 2001 portant septième adaptation au progrès technique (créosote) de l'annexe I de la directive 76/769/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres relatives à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi de certaines substances et préparations dangereuses.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Expérimentation réalisée sur un Pruche de l'Ouest, espèce d'arbre appartenant au genre Tsuga de la famille des Pinaceae, qui a été traité à l'arséniate de cuivre chromaté. (Process de lixiviation discontinuée via adjonction de Chitine et Chitosane).

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le chitosane est jugé moins efficace pour l'élimination de métaux lourds sur de la sciure de bois traité. Les résultats de [1], dans les conditions expérimentales suivantes : 5g de chitine, 3h de sciure traitée, pendant 10 jours ; montre que la concentration initiale en cuivre, chrome et arsenic de la sciure, à diminué respectivement de 74,62 et 63%.

De plus, dans [1], il a été constaté que si on augmente la concentration en chitine et le temps de rétention, le pourcentage d'extraction des éléments visé augmente.

Le CHR d'Orléans a mis en place un protocole de désintoxication des métaux lourds par chélation, traitement suspendu à ce jour. Actuellement lors d'une intoxication, l'utilisation d'antidotes, (par exemple du Zn-DTAPA ou Ca-DTAPA) qui forment un chélate éliminé lors de la miction, est d'ores et déjà commercialement disponible.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Utilisation de la Chitine et de le Chitosane :

Commercialement, la chitine est obtenue à partir de carapaces de crustacés (crevettes, crabes et autres mollusques). La chitine permet, par un procédé de déacétylation d'obtenir le chitosane.

1) La Chitine :

Ce composé organique est généralement bien supporté par les tissus biologiques et est donc utilisé en cosmétique ou dans le traitement des brûlures car il a des propriétés cicatrisantes. Il peut se présenter sous la forme d'une peau artificielle se présentant comme un tissu qui est appliqué sur la plaie et n'a pas besoin d'être renouvelé car il est biodégradable jusqu'à la formation d'un nouvel épiderme. Il peut être appliqué pour les pansements cornéens. En chirurgie, il est utilisé pour les fils chirurgicaux en raison de sa résistance et de sa flexibilité. Elle est aussi insérée dans l'alimentation industrielle en tant qu'auxiliaire technologique

2) Le Chitosane :

**EXTRACTION BIOLOGIQUE / BOIS TRAITES  
CCA**

Le chitosane est utilisé dans les produits cosmétiques et diététiques. Il est connu depuis fort longtemps au Japon pour sa remarquable capacité de développer un gel protecteur dans l'estomac. Le chitosane est actuellement étudié pour diverses applications dans le domaine des biomatériaux, notamment pour la régénération des tissus et l'ostéogénèse et la vectorisation de molécules biologiquement actives. Enfin, le chitosane a des propriétés antivirales, antibactériennes et antifongiques, qui ont été explorées pour de nombreuses utilisations agricoles. Il a été utilisé pour lutter contre les maladies des plantes ou réduire leur propagation, ou pour améliorer les défenses naturelles des plantes.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Removal of copper, chromium, and arsenic from CCA-treated wood onto chitin and chitosan, S.Nami et al.(2004)

[2] <http://espace.inrs.ca/1773/>

**AMELIORATION DE LA QUALITE DES CSR**

L'objectif de cette fiche est de donner des pistes de réflexions pour l'amélioration de la qualité des Combustible Solide de Récupération (CSR). Cette thématique était une attente forte du comité de pilotage de l'étude. L'amélioration de la qualité des CSR est un sujet vaste qui combine plusieurs problématiques, car différentes typologies de déchets sont utilisées pour l'élaboration de CSR et donc différents indésirables sont à extraire en vue d'upgrader la classe des CSR.

Cette fiche expose, dans un premier temps, les exigences minimales à respecter, définies par l'arrêté du 19 mai 2016, pour être qualifié de CSR. Dans une seconde partie, est abordé la notion de classification européenne des CSR et la norme AFNOR EN 15 359. Ensuite, l'exutoire principal des CSR étant actuellement, l'industrie cimentière, un exemple de cahier des charges de cimentier pour l'acceptation de CSR est présenté afin d'exposer les exigences de la filière. Un aperçu de la composition moyenne et des corrélations entre la composition et les caractéristiques du CSR produits, permet de mieux appréhender la formulation des CSR.

De plus, un focus sur l'élaboration de CSR à partir des refus de tri mécano-biologique (TMB), gisement à fort potentiel, est présenté. Cette fiche est donc une exception puisqu'elle ne présente pas un couple « prétraitement-polluant ».

**DEFINITION ET EXIGENCES REGLEMENTAIRES DES CSR**

Le décret n°2016-630 du 19 mai 2016, venant inscrire dans le droit français la nouvelle rubrique 2971, modifiant ainsi la nomenclature des installations classés pour la protection de l'environnement, a permis de définir la notion de CSR dans le droit français. Il est défini comme suivant : « un combustible solide de récupération est un déchet non dangereux solide, composé de déchets qui ont été triés de manière à en extraire la fraction valorisable sous forme de matière dans les conditions technico-économique du moment, préparé pour être utilisé comme combustible dans une installation relevant de la rubrique 2971. » Les caractéristiques relatives à ce combustible ont été définies par l'arrêté du 23 mai 2016, relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des ICPE.

Le CSR doit, à minima, respecter les exigences suivantes :

Paramètres de l'arrêté	Valeurs à respecter
PCI [kJ/kg de matière sèche]	≥ 12 000
Teneur en Mercure (Hg) [mg/kg de matière sèche]	≤ 3
Teneur en Chlore (Cl) [mg/kg de matière sèche]	≤ 15 000
Teneur en Brome (Br) [mg/kg de matière sèche]	≤ 15 000
Total des éléments halogénés (Brome, Chlore, Fluore et Iode) [mg/kg de matière sèche]	≤ 20 000

*Paramètres et valeurs à respecter, à minima, pour répondre aux exigences de l'arrêté du 19 mai 2016.*

Au niveau européen, le comité CENT/TC 343 à réaliser la normalisation des CSR, leurs travaux ont donné, au travers de la définition de la norme EN-15 359, un classement en fonction des différents paramètres impactant la qualité des CSR. La norme distingue 5 catégories de CSR, voir ci-dessous. Cette norme correspond en France à la norme AFNOR EN 15 359. Il est important d'introduire le fait,



## AMELIORATION DE LA QUALITE DES CSR

que la classification des CSR n'est pas unique, le code de classe dépend de plusieurs critères et engendre donc, pour un même CSR, plusieurs classes.

Critères de la norme EN 15359	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
PCI minimal [kJ/kg de matière sèche]	25 000	20 000	15 000	10 000	3 000
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Chlore maximal (Cl) [% sec]	0,2	0,6	1	1,5	2
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Mercuré maximal (Hg) [mg/MJ brut]	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06

Classification des CSR selon la norme EN 15357 :2011

*Exemple de classification* : la classe du CSR n'est pas unique. Le code de classe d'un CSR dont le PCI moyen est de 22 000 kJ/cal, la teneur moyenne en chlore est de 0,5% (sec) et la teneur moyenne en mercure est de 0,014 mg/MJ est désigné comme suit : Code de classe PCI 2, Cl 2, Hg 1.

### EXUTOIRE PRINCIPAL DES CSR : L'INDUSTRIE CIMENTIERE

L'industrie cimentière, très énergivore, a été une des premières à utiliser l'énergie issue de CSR en substitution du coke de pétrole ou autres énergies fossiles. Le cahier des charges d'acceptation des CSR des cimentiers est souvent exigeant, et tend vers la classe 1 de la norme.

Ce cahier des charges donne un bon aperçu de la qualité vers laquelle les CSR doivent tendre. [1]

Paramètres	Valeurs
Granulométrie	<20 mm (souvent 2D exigé pour tuyère)
Teneur en eau	<15 % (CSR stockés sous abri)
PCI sur matière sèche	>4 000 kcal/kg (>16 7450 kJ/kg), PCI stable +/- 20M max
Température à la livraison	<35 °C
Odeur	Aucune odeur gênante
Corps étrangers	Absence de corps étrangers (ferrailles, gravats, terre, verre, etc.)
Radioactivité	Absence de substances radioactives
Analyse sur matières sèches	
Taux de cendres	<15 %
Chlore total	<0,5 %
Soufre	<1 %
F+ Br + I	<1 %
Sb + As + Pb + Cr + Ci + Cu + Mn + Ni + V + Cd + Ti +Hg	< 10 000 mg/kg
Hg + Cd + Ti	< 100 mg/kg
Hg	< 10 mg/kg
Cu	< 500 mg/kg
Pb	< 500 mg/kg
Zn	< 500 mg/kg
Cr	< 250 mg/kg
PCB + PCT	< 50 mg/kg
PCB	< 50 mg/kg

**AMELIORATION DE LA QUALITE DES CSR**

Les contraintes majoritaires sont donc : granulométrie <20mm, PCI sur sec > 17 000 kJ/cal, chlore sur sec <0,5%, humidité <15%, Taux de cendres <15%.

Cela conduit à penser que les cimentiers sont à la recherche de CSR qui tendent vers la meilleure classe possible.

**FORMULATION DES CSR**

Afin d'introduire la formulation des CSR à partir d'OMr, nous présentons ici les conclusions de l'étude réalisée par FEDEREC et ATANOR [2], qui avait pour objectif d'acquérir une meilleure connaissance des CSR sur le plan physico-chimique, une caractérisation de 16 CSR, ayant des formulations différentes, a été effectuée. Cette étude permet de donner un bon aperçu de la composition moyenne des CSR, et principalement sur ces principaux polluants :

Critère	Humidité	Cendres	Carbone (C)	Hydrogène (H)	Azote (N)	Soufre (S)	Chlore (Cl)	Brome (Br)	Fluor (F)		Pci (sec)	Pci (brut)		Déformation des cendres (DT)	Écoulement (FT)
Unités	% PB	% MS	% MS	% MS	% MS	% MS	% MS	mg/kg MS	mg/kg MS		kJ/kg MS	kJ/kg PB		°C	°C
<b>Moyenne</b>	13,9	26,4	46,9	6,1	1,4	0,43	1,12	284	262		18 981	15 981		1194	1273
<b>Minimum</b>	1,2	9,8	19,9	2,2	0,8	0,19	0,48	68	51		8 007	7 205		1050	1110
<b>Maximum</b>	35,5	66,6	66,9	11	2,07	0,91	3,3	941	1010		27 668	24 605		1360	1420

Critère	Arsenic (As)	Cadmium (Cd)	Chrome (Cr)	Cuivre (Cu)	Nickel (Ni)	Plomb (Pb)	Zinc (Zn)	Mercur e (Hg)	Antimoine (Sb)	Cobalt (Co)	Manganè s (Mn)	Vanadium (V)	Thallium (Tl)		
Unités	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS	mg/kg MS		
<b>Moyenne</b>	5	4	134	4 675	74	299	3 067	1	83	38	219	6	0		
<b>Minimum</b>	1,1	0,48	8,3	52,6	4,74	9,55	213	0,11	2,73	2,24	31,6	1,7	0		
<b>Maximum</b>	13	18,5	830	23 800	390	1 330	22 700	5,8	747	124	763	18,1	0		

*Composition chimique des CSR, principaux résultats – Etude FEDEREC/ATANOR 2016.*

La corrélation entre la composition physique des CSR et l'influence sur leur formulation est donnée, ci-dessous :

<b>Corrélation Composition / Caractéristiques issus étude FEDEREC/ATANOR 2016</b>	
Taux de cendres	Métaux, Terre/gravats (inertes), charge minérale des polymères composites.
Taux d'humidité	Rétention d'eau dans les mousses ou les papiers/cartons
Chlore	PVC, Blanchiment des papiers à la fabrication, chlore salin (OM)
Soufre	Origines minérales et/ou organique, élastomères
Azote	Mousses de polyuréthane, papiers
Métaux & métaux lourds	Morceaux d'acier, d'aluminium, fils de cuivre, pigments de tissus, des plastiques, gaines électriques.

D'après ces résultats, les CSR représentent une famille de combustibles assez diverses en termes d'aspect, de formulation et de composition. Mais pour un même CSR, sa composition présente une bonne stabilité dans le temps. La diversité des CSR conduit à adapter la préparation au cas par cas en fonction des spécifications de l'utilisateur final. Pour cela nous considérons qu'il est important de se focaliser sur les paramètres influant la classification de la norme 15 359 et de venir impacter les paramètres suivant : le couple PCI et humidité, le taux de chlore et le mercure.

Concernant le mercure, les déchets qui sont susceptibles de rentrer dans la formulation de CSR sont : les amalgames dentaires, les piles et les accumulateurs (en particulier piles boutons usagées), lampes, produits phytosanitaires etc. L'étude MODECOM nous indique les teneurs moyennes en mercure pour les différentes catégories de déchets, ci-dessous, nous pouvons par conséquent en déduire une forte teneur de mercure dans les plastiques et les composites.

**AMELIORATION DE LA QUALITE DES CSR**

Déchets	Teneur en mercure issus de l'étude MODECOM
Papier	0,02 mg/kg sec ;
Composites	0,53 mg/kg sec
Textiles sanitaires	0,048 mg/kg sec
Plastiques	0,574 mg/kg sec
Combustibles NC	0,009 mg/kg sec
Métaux	0,027 mg/kg sec
Eléments fins	0,039 mg/kg sec

Concernant le chlore, il impacte directement l'installation qui utilise des CSR puisque sa combustion entraîne la production d'acide chlorhydrique à l'origine de problèmes techniques liés à une corrosion et un encrassement accélérés des installations. Les déchets contenant du chlore et qui sont susceptibles de rentrer dans la formulation de CSR sont : les plastiques (en particulier les PVC), certains papiers (blanchis) et les sels contenus dans les OM. Il est courant pour les cimentiers d'exiger des seuils inférieurs à 5 000 ppm (correspondant à la valeur limite de référence).

**PISTES ET AXES DE DEVELOPPEMENT DE L'ELABORATION DE CSR A PARTIR D'OMr**

Il nous paraît nécessaire de poursuivre le travail qui est réalisé dans le développement de prétraitements pour l'amélioration de la qualité des CSR et notamment au travers des axes suivants :

- Amélioration du paramètre PCI et d'humidité des produits constituant les CSR : mis en place de sècheurs adaptés aux produits constituant les CSR. On peut citer les deux grandes familles de technologies de sècheurs utilisés : thermique ou biologique. (Se référer à la fiches génériques « séchage/extraction d'eau ».) De plus, on peut citer les sècheurs haute température, type lit fluidisé utilisant des gaz neutres (azote ou CO<sub>2</sub>), tel que les procédés FGR (Flue Gaz recycling) qui permettent à la fois d'abaisser l'humidité et de désorber thermiquement le mercure.

- Traitement des fractions Mercuriales et Chlorées : utilisation de machine de tri optique (cf. fiches générique « technologies de tri optique – séparation chlorés et bromés ») permettant de détecter la fraction « la plus contaminée » afin de l'extraire du flux ou de la prétraiter (Se référer aux fiches déchloration du PVC « pyrolyse par étapes/mélange de polymères », « déchloration catalytique / PVC », fiches génériques « séparation des halogènes, « tri optique »).

**FOCUS SUR L'ELABORATION DE CSR A PARTIR DES REFUS DE TMB**

Au regard des récents avis de l'ADEME [4] et de l'appel à projet Energie CSR 2017, dans les prochaines années, la priorité sera d'accompagner l'émergence d'une filière de préparation de combustibles à partir de déchets non dangereux non recyclables, et notamment à partir de refus de tri de déchet d'activité économique ou d'emballages et papiers ménagers. C'est dans cette optique que le comité de pilotage de l'étude, c'est intéressé à l'amélioration de la qualité des CSR préparés à partir de refus de tri mécano-biologique.

On distingue principalement deux types de refus de tri mécano-biologique (TMB) qui rentrent actuellement dans la composition de CSR :

Les refus primaires issus de la préparation des déchets avant compostage (séparé à l'étape mécanique de criblage primaire) ;

Les refus d'affinage issus de la purification des composts après fermentation.



**AMELIORATION DE LA QUALITE DES CSR**

D'après les résultats des études [5] et [6], le constat est relativement clair, la qualité des CSR produits à partir de refus de TMB, en l'état actuel de leur production, ne sont pas conformes, pour la majorité, aux critères mesurés, mais les refus sont très divers et on peut distinguer les tendances suivantes, avec une très faible variation saisonnière :

Critères	Tendances de l'étude
PCI moyen	Refus de criblage : 21 500 kJ/kg Refus d'affinage : 15 700 kJ/kg
Humidités moyenne	Refus de criblage : 35,1% Refus d'affinage : 35,3 %
Taux de chlore	Refus TMB avec BRS : 0,7±0,1 % Refus TMB sans BRS : 0,37-0,56 ±0,28
Taux de mercure	Refus TMB avec BRS : <0,004 mg/MJ Refus TMB sans BRS : <0,008 mg/MJ

Afin d'améliorer la qualité des CSR préparés à partir de refus de tri mécano-biologique, il est nécessaire de continuer les travaux qui sont fait, notamment dans le but de :

- Optimiser la séparation des fractions organiques fines ;
- Limiter la présence de fibreux, papiers cartons ;
- Favoriser la présence de plastiques produisant moins de cendres et à haut PCI ;
- Limiter la présence d'incombustibles ;
- Abaisser l'humidité.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Décret du 19 mai 2016 modifiant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement ;

Arrêté du 23 mai 2016 relatif à la préparation des combustibles solides de récupération en vue de leur utilisation dans des installations relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement ;

Arrêté du 23 mai 2016 relatif aux installations de production de chaleur et/ou d'électricité à partir de déchets non dangereux préparés sous forme de combustibles solides de récupération dans des installations prévues à cet effet associés ou non à un autre combustible et relevant de la rubrique 2971 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] « Retour d'expérience sur les CSR dans les cimenteries du groupe VICAT », présentation AMORCE, mars 2017.

[2] « Produire de l'énergie à partir des CSR », ATANOR-ADEME-FEDEREC, 2016.

[3] « Le mercure dans les déchets et son devenir en incinération », Etude RECORD n°12-0238/1A, juin 2014.

[4] « Quel avenir pour le traitement des ordures ménagères résiduelles » - Les avis de l'ADEME, mars 2017.

[5] « Etude de faisabilité pour l'utilisation des refus des unités de tri-compostage des ordures ménagères comme combustibles solides de récupération », ADEME – FNCC, février 2014.

[6] « Combustibles solides de Récupération (CSR) : gisements et débouchés » European Recovered Fuel Organisation



## Prétraitement ultrasonique de boues de STEP

L'objectif du procédé de traitement ultrasonique de boues de station d'épuration a pour objectif d'améliorer la production de méthane et la dégradation des matières organiques en amont d'une digestion anaérobique (méthanisation).

Le procédé de prétraitement ultrasonique de boues de STEP est un prétraitement mécanique permettant d'améliorer la bio dégradation des boues, d'augmenté la proportion de méthane dans le biogaz produit par la digestion anaérobique sans ajout chimique.

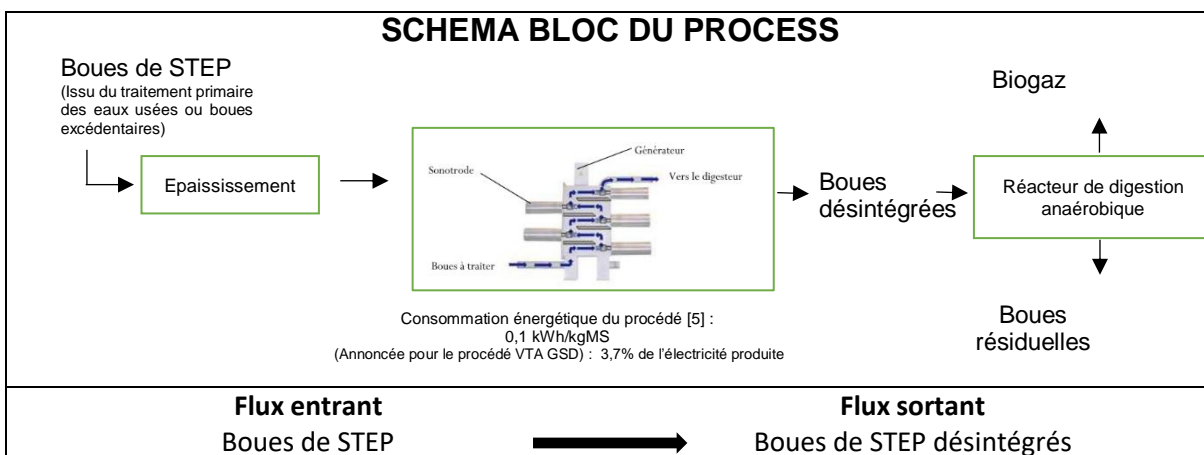
Les ultrasons engendrent la modification des propriétés physiques, chimiques et biologiques de la boue. Les deux mécanismes associés à l'utilisation des ultrasons sont : la cavitation, favorisée à basses fréquences (20 kHz) et les réactions chimiques liées à la formation de OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O, H<sup>+</sup>, à hautes fréquences.

Le prétraitement par ultrason conduit à la désintégration du floc des boues et permet une dissolution des microorganismes.

L'utilisation du prétraitement ultrasonique pour le traitement des boues de station d'épuration va permettre une rupture au niveau cellulaire ce qui entraine une réduction de la taille des particules et conduit à une réduction de la production de boues secondaire tout en améliorant la digestion anaérobique.

D'après la littérature [3], la production de biogaz est optimale, lors de l'apport de 7000 kJ/kg TS.

<b>Type de procédé</b>	Electro-Mécanique
<b>Nature du polluant</b>	Microorganisme pathogènes
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	9 (Disponible) – traitement sur site possible
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Hygiénisation, Dosage enzymatique



### ETAPES DE TRAITEMENT

Après l'étape d'épaississement des boues, les boues circulent dans une chambre de désintégration. Dans cette chambre les boues sont en contact avec la sonde à ultrasons qui délivre la fréquence choisie.

La cavitation permet la destruction des membranes cellulaires ce qui conduit à une augmentation du taux de dégradation de la matière organique. Il en résulte une hausse de la production de biogaz.

## PRETRAITEMENT ULTRASONIQUE / BOUES DE STEP

### AVANTAGE/ INTERET

L'un des avantages du procédé de prétraitement par ultrason est l'augmentation de la production de biogaz tout en diminuant la quantité de boues résiduelles générée lors de l'opération de digestion. De plus, le temps de séjour des boues dans le digesteur peut être réduit.

### INCONVENIENTS / LIMITES

Non identifiés

### REGLEMENTATION APPLICABLE

Les articles R211-25 à R211-47 du code de l'environnement, relatif à la définition des boues.  
 Directive européenne n°91/271/CEE du 21 mai 1991 (modifiée en 2008) relative au traitement des eaux urbaines résiduaires.  
 Directive européenne n°86/278/CEE du 12 juin 1986 (modifiée en 2009) concernant la valorisation des boues en épandage.

### EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES

Référence par constructeurs de réacteur à ultrasons :

- Ultraweves Gmbg (Sonotronic/Bellmer Desintegrator BD) : station d'épuration d'Ahrensbug (Allemagne) 50 000 Equivalent Population (EP), installation 2009, augmentation de la production de biogaz de 15%, station d'épuration de Schwesig (Allemagne) 60 000 EP, augmentation de la destruction VS de 25% - augmentation de la production de biogaz de 25%. Cherbourg (France), 230 000 EP installation en 2011.
- IKTS Fraunhofer et IWE.tec GmbH : station d'épuration de Helsingør (Danemark) 78 000 EP, station d'épuration de Mannheim (Allemagne) 725 000 EP installation en 2001 ;
- VTA Engineering und Umwelttechnik GmbH : station d'épuration d'Obersee (Suisse) 25 000 EP installation en 2006, station d'épuration d'Halle Nord (Allemagne) 300 000 EP installation en 2004.

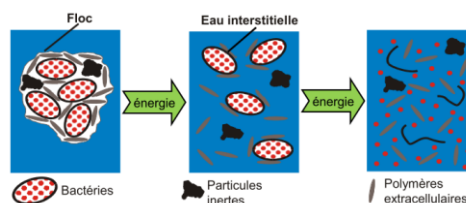
### POTENTIEL D'EMERGENCE

Ce prétraitement permet l'augmentation du potentiel méthanogène de boues de STEP. La loi de Transition énergétique fixe pour objectif que plus de 10% du gaz consommé en France soit d'origine renouvelable en 2030 (en 2016 la part du biogaz dans la consommation totale est de l'ordre de 0,02%).

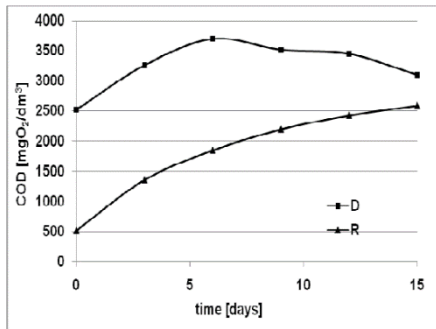
### CHAMP DE COMMENTAIRES

De nombreux fabricants (Hielsher, Doosan, Sonotronic...) proposent des systèmes de « désintégration ultrasonique », avec des plages de puissances variant de 1 kW à 48 kW en fonction des plages de débits à traiter. L'augmentation de rendement de production de biogaz, annoncées par les constructeurs sont de l'ordre de 25%.

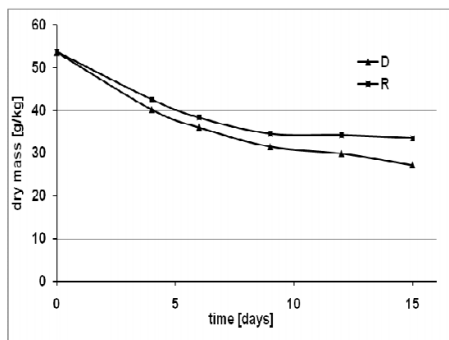
Schéma de la désintégration de boues au niveau cellulaire, montrant la destruction des membranes cellulaires:



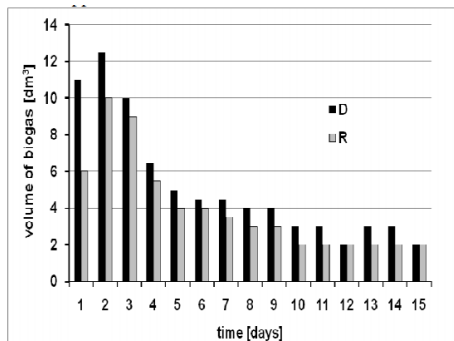
## PRETRAITEMENT ULTRASONIQUE / BOUES DE STEP



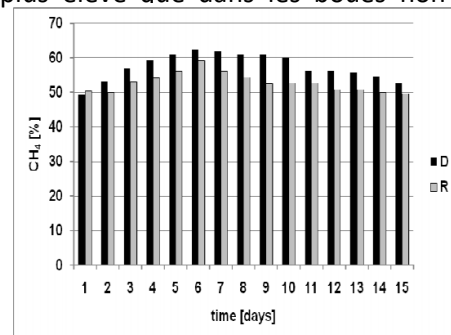
« vierge » ; D : boue ayant subi un prétraitement ultrasonique (5min, 24kHz, 200 W ultrasound generator UP 200S, Hielscher)



Graphique 2 : Réduction de la teneur en matière sèche pendant la digestion anaérobie observé sur R : boue « vierge » ; D : boue ayant subi un prétraitement ultrasonique.



Graphique 3 : Volume de biogaz généré durant le processus de digestion anaérobie observé sur R : boue « vierge » ; D : boue ayant subi un prétraitement ultrasonique.



Graphique 5 : Volume de méthane généré durant le processus de digestion anaérobie observé sur R : boue « vierge » ; D : boue ayant subi un prétraitement ultrasonique.

D'après [4], le traitement par ultrason permet d'augmenter la Demande Chimique en Oxygène (DCO) d'une boue traitée par désintégration (graphique n°1) ; le plus fort écart de DCO entre les deux boues est de l'ordre de 19%. De plus, le traitement ultrasonique permet une réduction de la masse sèche (dû à la décomposition de substances organiques pendant le processus de fermentation) de la boue (graphique n°2, ci-contre), la différence entre les boues étudiés est d'environ **12%**.)

L'étude permet enfin de comparer le volume de gaz produit pendant une digestion anaérobie de 15 jours. (Graphique n°3, ci-dessous

Le graphique n°3 montre que le biogaz a été généré de façon plus intensive dans le réacteur contenant des boues qui ont été prétraitées. Cela s'explique par une DCO plus importante et donc une plus forte teneur en substances biodégradables « accessibles ». Le résultat montre que le volume total de biogaz généré par les boues prétraitées est supérieur de **20%** aux boues « vierge ».

Le graphique n°4, montre que la teneur en méthane du biogaz issus des boues prétraitées est plus important que pour des boues vierges. Le volume de méthane produit à partir des boues désintégrées est d'environ **10%** plus élevé que dans les boues non traitées.

Dans le cadre de cette fiche, nous nous sommes intéressés au prétraitement Digelis Turbo développé par Degrémont et CAMBI. Le prétraitement correspond à une hydrolyse thermique (T=165°C, t=20-30°C) sous pression. Les boues ainsi prétraitées sont envoyées dans un réacteur de détente où la chute de pression occasionne la destruction des cellules. Ces différentes étapes vont produire un gaz qui est envoyé dans le digesteur. La production de biogaz, issue de la digestion anaérobie, se voit augmentée (Degrémont annonce une augmentation de l'ordre de 50%). De plus le prétraitement permet l'amélioration de la siccité des boues digérées déshydratées de 4 à 8% par rapport à une digestion classique.

**PRETRAITEMENT ULTRASONIQUE / BOUES  
DE STEP****BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Ph D A.MANI and S.SYNDARAMOORTHY, « Sonification studies of feed sludge to anaerobic digester » WJPPS Volume 4, issue 02 ;937-946, Research Article ISSN 2278-4357,2014
- [2] Asa Davidsson and Jes la Cour Jansen, « Pre-treatment of wastewater sludge before anaerobic distion – Hygienisation, Ultrasonic treatment and Enzyme dosing » VATTEN 62 :335-340, Lund 2006
- [3] Zhang Hanjie « SLUDGE TREATMENT TO INCREASE BIOGAS PRODUCTION » 2010
- [4] Vilnius Gediminas Technical University, 2011] « EFFECT OF DISINTEGRATION PRETREATMENT OF SEWAGE SLUDGE FOR ENHANCED ANAEROBIC DIGESTION »
- [5] Office fédéral de l'énergie Suisse « Comparaison des technologies de pré-traitement des boues d'épuration pour l'augmentation de la production de biogaz » 2007 .

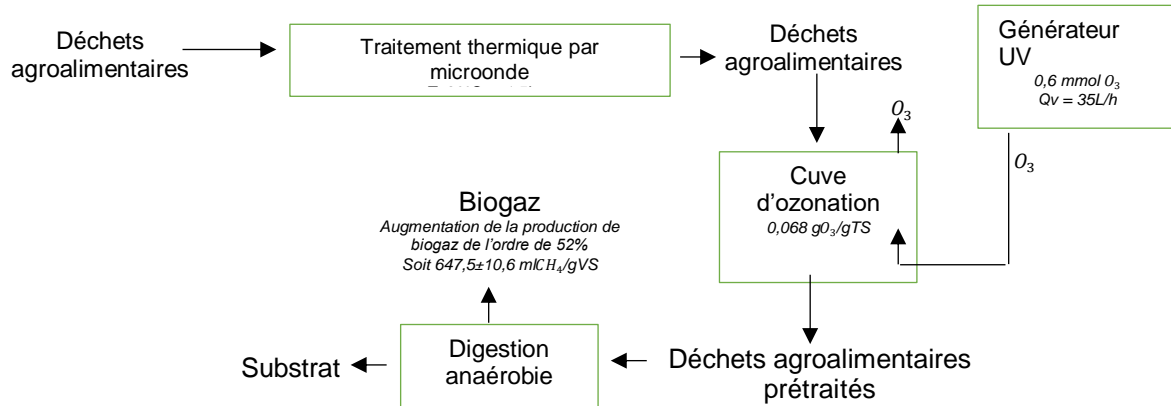
## Prétraitement des déchets agroalimentaires par ozonation et procédés thermiques avant valorisation anaérobie

Les caractéristiques très humides et fortement méthanogènes des déchets agroalimentaires font de leur valorisation par méthanisation une solution intéressante et pérenne, tant du point de vue environnemental (réduction des déchets et des émissions de GES) qu'économique (source d'énergie). Cependant, la cinétique relativement lente de ce procédé remet en question son efficacité. Afin de surmonter ce problème, de nombreux travaux ont été menés sur les prétraitements thermiques et chimiques des déchets avant de les introduire dans le digesteur. Nous traitons dans cette fiche de l'efficacité des prétraitements thermique et chimique par ozonation qui améliorent la transformation des composants lentement biodégradables et facilitent la solubilisation de la matière organique.

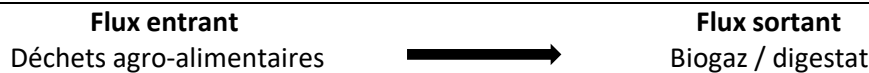
La France dispose d'un gisement de matière organique important : 15 millions de tonnes de déchets pour le secteur agroalimentaire, 50 millions de tonnes de déchets municipaux et environ 150 millions de tonnes de déjections animales. En 2017, le parc français compte 319 unités de méthanisation qui valorise le biogaz soit en valorisation thermique (chaudière), soit électrique (moteur de cogénération) soit par injection de biométhane. La méthanisation connaît un développement notable grâce aux encouragements du gouvernement français afin d'atteindre son objectif de production de 23 % d'énergies renouvelables dans sa consommation énergétique en 2020. Pour ceci, le tarif de rachat de l'électricité produite à partir de biogaz a été réévalué et l'injection du biogaz dans les réseaux de gaz naturel est désormais possible.

Toutefois, la cinétique des réactions d'hydrolyse mises en jeu dans la méthanisation est lente ce qui risque de renchérir le coût d'un tel investissement. D'où l'intérêt des prétraitements thermiques et chimiques pour améliorer l'efficacité de la digestion anaérobie. Par ailleurs, ces deux traitements permettent aussi la stérilisation des déchets et la destruction des germes pathogènes (la chaleur et l'ozone permettent la destruction d'un grand nombre de micropolluants) ce qui est en phase avec la réglementation concernant les déchets agroalimentaires.

<b>Type de procédé</b>	Thermo-chimique
<b>Nature du polluant</b>	Matière organique
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	En développement (1-4)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Technologie de micro-ondes, générateur de rayonnement ultraviolet ou un ozoneur.

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**


Paramètres et résultats optimaux issus de [1]


**ETAPES DE TRAITEMENT**
Prétraitement thermique :

Les déchets agroalimentaires (type déchets de cuisine) sont introduits dans un récipient en verre d'1 litre qu'on place à l'intérieur d'une micro-onde. D'après [1], la durée du prétraitement thermique, la plus efficace (conduisant à un volume de biogaz produit maximal) est de 1h50.

Prétraitement par ozonation :

Les déchets agroalimentaires sont mis dans un récipient équipé de tubes d'entrée et de sortie par où l'ozone injecté par un générateur UV est diffusé.

L'ozone est un oxydant très puissant, qui peut soit réagir directement avec le substrat organique ou se décomposer en radicaux avant même de réagir avec celui-ci. Cette décomposition de l'ozone résulte d'une réaction en chaîne initiée par le radical hydroxyle ( $^{\circ}\text{OH}$ ). Les radicaux hydroxyles issus de la décomposition sont très réactifs et peu sélectifs et réagissent avec la plupart des substrats organiques jusqu'à leur minéralisation complète en dioxyde de carbone et en eau.

La stabilité de l'ozone injecté dépend fortement du pH, de la lumière ultraviolette incidente, de la concentration en ozone et de la présence d'inhibiteurs ou d'initiateurs de radicaux libres dans le récipient. Le récipient est rincé avec du gaz de nitrogène après l'ozonation pour réduire le risque d'inhibition immédiate par l'ozone.

**AVANTAGE/ INTERET**

L'ozonation est un procédé intéressant dans la mesure où il n'augmente pas la concentration en sel dans le réacteur et n'engendre pas de résidus oxydants dans la matière organique suite à la dégradation de l'ozone. Le prétraitement thermique permet d'accélérer la cinétique des réactions mis en jeu par la méthanisation. D'après [1], le meilleur résultat a été obtenu par un prétraitement thermique à 80 °C pendant 1h50. Ce prétraitement a conduit à une augmentation de la production de biogaz de l'ordre de 52% par rapport à une matière première non prétraitée.

D'après les calculs du bilan énergétique de [1], le gain de production de biométhane pourrait couvrir les besoins en énergie du prétraitement thermique.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Dans [1], le prétraitement avec une forte dose d'ozone (0,034-0,202  $gO_3/gTS$ ) a entraîné une diminution des sucres fermentescibles. Par conséquent, le prétraitement qualifié d'agressif s'est

**OZONATION / DECHETS AGROALIMENTAIRES**

révélés inefficaces pour l'amélioration de la production de biogaz pour le traitement anaérobie. Le prétraitement par ozonation est jugé attrayant, au vu des résultats de [5] pour un substrat à fort contenu en composé organiques plus complexe et récalcitrant.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Le Règlement (CE) N°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) n°1774/2002, impose la stérilisation/pasteurisation des déchets alimentaires avant et après la méthanisation.

Il préconise de les pasteuriser à une température supérieure à 70°C pendant au moins une heure ou bien à une température supérieure à 133°C pendant 20 à 30 min. Cependant, aucune réglementation ne porte sur le prétraitement des déchets de cuisine par ozonation.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Pas d'installations commerciales identifiées.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'émergence de la solution de prétraitement de la matière organique par procédés thermique et chimique par ozonation nécessite plus de travaux de recherche afin d'améliorer notre compréhension des mécanismes physiques entrant en jeu lors de leur utilisation pour une meilleure maîtrise des doses d'ozone à injecter et des températures à choisir. Sinon, on risque d'arriver à l'effet inverse, une formation de composants complexes et moins biodégradables dans le substrat et une diminution considérable des sucres fermentescibles (Ariunbaatar et al. (2014)).

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Les traitements thermiques sont l'un des plus faciles à mettre en œuvre et les plus étudiés. Des applications à échelle industrielle existent déjà [4]. En ce qui est du prétraitement par ozonation, il est souvent utilisé dans le traitement des boues des eaux usées à échelle réelle. Des travaux de recherche (à échelle de laboratoire) pour tester son efficacité dans le prétraitement de la matière organique existent aussi. FW. Ma et al. (2011) ont obtenu par exemple, une augmentation de 24% dans la quantité de biogaz produite suite au déploiement de prétraitements thermique à 120 °C et chimique par ozonation. D'autres, tel que Liu et al. (2012), ont noté une diminution de 7.9% de la production en biogaz suite à la combinaison de traitements thermique à 170 °C et chimique par ozonation.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Ariunbaatar, Javkhlan, et al. "Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods." *Journal of environmental management* 146 (2014) : 142-149.

[2] Ma, J., Duong, T.H., Smits, M., Vestraete, W., Carballa, M., 2011. Enhanced biomethanation of kitchen waste by different pretreatments. *Bioresour. Technol.*102.

[3] Liu, X., Wang, W., Gao, X., Zhou, Y., Shen, R., 2012. Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. *Waste Manag.* 32 : 249-255.

[4] Carlsson et al., 2012; Carrere et al., 2010.

[5] Sonolysis and ozonation as pretreatment for anaerobic digestion of solid organic waste, 2012



## SAPONIFICATION / DECHETS D'ABATTOIR

### Prétraitement par saponification de déchets d'abattoir avant valorisation anaérobie

La méthanisation ou la digestion anaérobie des déchets gras provenant des industries agro-alimentaires, est une excellente alternative à la solution d'incinération. Cependant, elle est difficile à réaliser à cause de la faible solubilité des lipides animaux qui sont moins denses que l'eau et lentement bio-dégradable ce qui induit une accumulation dans le système des acides gras à longue chaîne (LCFA) générés par l'hydrolyse des lipides. L'objectif du prétraitement thermochimique par saponification est donc d'améliorer la dégradation de ces déchets gras.

La France dispose d'un gisement de matière organique important : 15 millions de tonnes de déchets pour le secteur agroalimentaire, 50 millions de tonnes de déchets municipaux et environ 150 millions de tonnes de déjections animales. En 2007, la France compte 200 sites de méthanisation pour une production de biogaz estimée à 310 ktep, la moitié provenant des décharges, l'autre des stations d'épuration (site de l'IRSTEA). La méthanisation connaît un développement notable grâce aux encouragements du gouvernement français afin d'atteindre son objectif de production de 23 % d'énergies renouvelables dans sa consommation énergétique en 2020. Pour ceci, le tarif de rachat de l'électricité produite à partir de biogaz a été réévalué (20 c€/kWh en 2011 contre 15 c€/kWh en 2006) et l'injection du biogaz dans les réseaux de gaz naturel est désormais possible. De plus, la méthanisation permet d'obtenir, en plus du biogaz, des résidus solides et liquides riches appelés digestats qui peuvent être utilisés sous la forme d'un amendement organique ou d'un fertilisant.

En ce qui concerne les déchets gras d'abattoir, leur méthanisation directe présente des complications. En effet, la digestion anaérobie passe par les quatre étapes suivantes :

- l'hydrolyse : le déchet solide est liquéfié, les macromolécules organiques sont décomposées en éléments plus simples tels que le glycérol et les acides gras à longue chaîne (LCFA).
- l'acidogénèse : les bactéries transforment les molécules simples en acides et alcools de faible poids moléculaire.
- l'acétogénèse : les produits non transformés lors de l'étape précédente subissent une transformation avant de pouvoir produire du méthane.
- la méthanogénèse : les bactéries méthanogènes réduisent les composés en méthane.

Les deux premières étapes sont les plus contraignantes vu la faible solubilité de la matière grasse et sa biodégradabilité très lente qui engendre l'accumulation des gras saturés dans le système. De plus, un autre phénomène peut se produire et nuire au bon déroulement de la méthanisation, il s'agit de l'inhibition par les LCFA de l'activité microbienne lors de la méthanogénèse.

Ainsi, pour assurer la conversion de ces déchets au méthane, un prétraitement s'avère nécessaire. Des recherches ont prouvé l'efficacité du procédé de saponification qui consiste à transformer les graisses en savons, pour améliorer par la suite, le rendement de la production de biogaz lors de la digestion anaérobie.

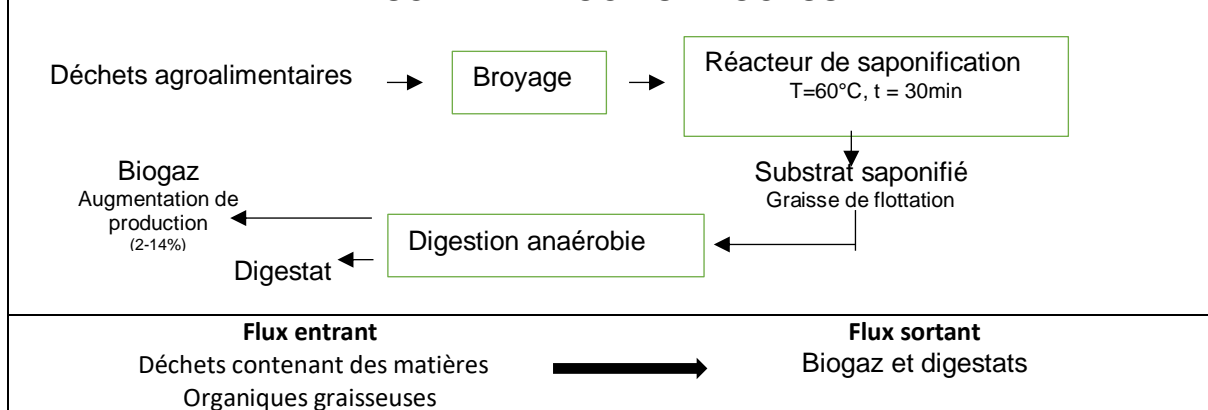
Le procédé de saponification a été expliqué, pour la première fois en 1823, par le chimiste français Michel-Eugène Chevreul, qui a démontré que les cors gras sont formés d'une combinaison entre le glycérol et des acides gras.

Le procédé de saponification transforme les graisses en savons sous l'action d'une base et de la température. Les savons sont des matières plus solubles que les graisses, ils entrent alors plus facilement en contact avec les microorganismes, augmentant leur potentiel de biodégradation.



**SAPONIFICATION / DECHETS D'ABATTOIR**

<b>Type de procédé</b>	Thermochimique
<b>Nature du polluant</b>	Lipides gras, acides gras à longue chaîne
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (9) – traitement sur site possible
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Utilisation d'une unité de pasteurisation pour transformer les déchets gras en savons en amont de l'unité biologique de méthanisation.

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**

**ETAPES DE TRAITEMENT**

Les expériences sont conduites dans un réacteur anaérobie dont la cuve est agitée en continu maintenue en conditions mésophiles (35 °C). On inocule le réacteur avec une boue granulaire mésophile prélevée dans un réacteur UASB (digesteur anaérobie à flux ascendant) d'une usine de sucre (Marseille, France). Un prétraitement par saponification (T=60°C, t=30 min) est appliqué au substrat, dans le but d'améliorer la biodégradabilité des lipides. Ensuite, le substrat saponifié (savon) subit une digestion anaérobie.

**AVANTAGE/ INTERET**

Le prétraitement par saponification va permettre d'améliorer la solubilité et l'homogénéité du produit en formant un d'acide gras (savon). D'après [3], le pouvoir méthanogène des graisses de flottation atteint souvent  $750 \text{ m}^3 \text{CH}_4/\text{T}$  de matières organiques. Le prétraitement permet de mieux homogénéiser et d'améliorer la cinétique de la réaction anaérobie.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

L'augmentation de production de biogaz et l'amélioration de cinétique de réaction dépend des conditions de saponification et des caractéristiques des intrants.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Règlement (CE) N°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine et abrogeant le règlement (CE) n°1774/2002.

Règlement (UE) N°142/2011 de la Commission du 25 février 2011 portant application du règlement (CE) n°1069/2009 du Parlement européen et du Conseil établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine.

Arrêté du 8 décembre 2011 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés en application du règlement (CE) n°1069/2009 et du règlement (UE) n°142/2011.

**SAPONIFICATION / DECHETS D'ABATTOIR**

Ces règlements sont très rigoureux et stricts concernant les conditions de collecte, de transport, d'entreposage, de manipulation, de traitement et de transformation, d'utilisation et d'élimination de l'ensemble de ces matières tout au long de la chaîne alimentaire humaine et animale. Ils sont à l'origine de projets proposant des filières de valorisation des rejets d'abattoir alternatives à l'incinération mais qui restent toujours difficiles à mettre en place économiquement et techniquement notamment pour les petits producteurs.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

L'entreprise SAPOVAL, a déjà installé ces premiers SAPO'FIX chez un agro-industriel (Barnier Olive producteur d'olives héraultais) afin de traiter ces déchets gras. L'entreprise annonce être en cours d'installation de son procédé à la station d'épuration de Graulhet (81).

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

La société française, SAPOVAL annonce des gains de l'ordre de 30 à 80€/t de déchet gras brut traité et des retours sur investissement inférieurs à 3 ans. Ces chiffres permettent d'entrevoir le potentiel d'émergence du prétraitement par saponification.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Il existe d'autres procédés pour contrôler l'adsorption des LCFA, entre autres on trouve l'utilisation d'adsorbants minéraux pour capturer les LCFA avant le processus de digestion anaérobie ou l'application séquentielle d'ultrasons de faible énergie afin de contrôler la cinétique d'adsorption-désorption. Ces deux méthodes donnent de bons résultats, toutefois, elles sont souvent écartées devant le procédé de saponification à cause de la méconnaissance de la proportion adsorbant inorganique/LCFA et de l'effet néfaste cumulatif que peut avoir le traitement par ultrasons sur la biomasse. D'après [1], l'augmentation de la cinétique de réaction aérobie, dépend fortement de la typologie des déchets traités. Dans leurs travaux, le prétraitement a permis, dans le cas du prétraitement de déchets de carcasse, d'améliorer la cinétique (production de biogaz augmentée de 7-9%, pour une même durée de traitement, de l'ordre de 15 jours).

Il existe une étude de faisabilité du procédé réalisée à l'INRA de Narbonne. Le dispositif comprend des réacteurs à l'échelle de laboratoire, atteignant une efficacité de transformation des matières organiques supérieure à 90%. La comparaison de cette configuration avec d'autres systèmes sans l'étape de saponification a été réalisée. Toutefois, il est encore nécessaire de poursuivre l'étude à l'échelle du laboratoire avant de passer à l'échelle réelle. Une étude économique de cette solution est aussi requise.

**BIBLIOGRAPHIE**

[1] Battimelli, Audrey, Hélène Carrère, and Jean-Philippe Delgenès. "Saponification of fatty slaughterhouse wastes for enhancing anaerobic biodegradability." *Bioresource technology* 100.15 (2009): 3695-3700.

[2] Affes Salah, Rim. "Study of methods for the improvement of the anaerobic digestion of lipids and long chain fatty acids." (2013).

[3] [sapoval.fr/saponifier-avant-de-methaniser](http://sapoval.fr/saponifier-avant-de-methaniser)

[4] <http://www.inra.fr/Entreprises-Monde-agricole/Resultats-innovation-transfert/Toutes-les-actualites/Dechets-d-abattoirs-transformer-les-graisses-en-savons-afin-d-ameliorer-la-production-de-biogaz>

**REACTIF DE DESULFURATION / DECHETS ORGANIQUES SOUFRES**
**Réactif de désulfuration en amont du digesteur**

L'objectif du prétraitement est l'abattement du sulfure d'hydrogène contenu dans les déchets organiques par précipitation à l'hydroxyde de fer en amont du digesteur de méthanisation.

Le traitement des déchets organiques par méthanisation est une voie répandue. Le traitement par méthanisation engendre, lors du séjour des intrants dans le digesteur, une production de sulfure d'hydrogène (20 à 5000 mg/m<sup>3</sup>).

Le sulfure d'hydrogène, à l'odeur caractéristique d'œuf pourri, est un gaz mortel. Ce gaz expose les opérateurs à des risques de toxicité aiguë, lorsqu'il est atteint des concentrations dans l'air de l'ordre de 500 ppm. De plus le sulfure d'hydrogène endommage les capteurs de type catalytique (souvent utilisés pour la détection de CH<sub>4</sub>).

Le biogaz produit avant épuration contient entre 0.005 et 2 % de H<sub>2</sub>S (sulfure d'hydrogène). Les risques se situent au niveau de la préfosse de stockage des substrats (émission de H<sub>2</sub>S en cas de mélange non contrôlé de certaines matières), du local technique et des canalisations. Cependant, l'H<sub>2</sub>S étant corrosif pour les moteurs, le biogaz doit faire l'objet d'une épuration qui permet de réduire la teneur en H<sub>2</sub>S de 90 à 99 %. La réglementation prévoit aussi des valeurs limites pour le H<sub>2</sub>S dans le biogaz en sortie d'installation, et des dispositifs de mesure de la quantité de polluants dans le gaz sont également installés.

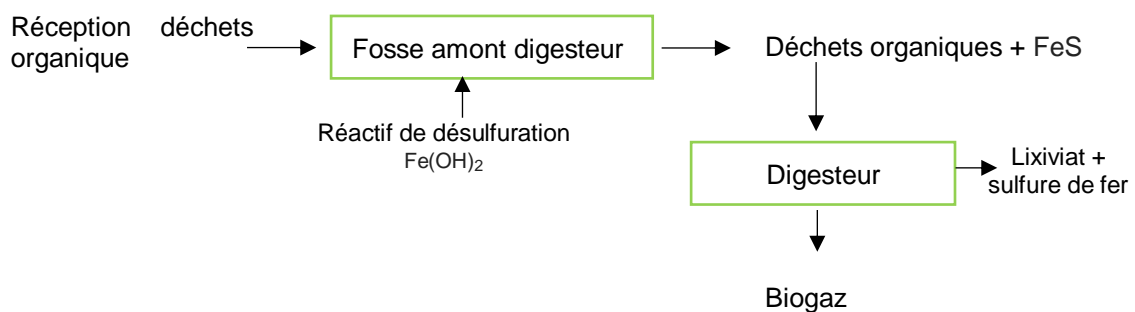
L'origine du sulfure d'hydrogène, s'explique par la présence simultanée de sulfate et de bactéries sulfato-réductrices. Ces dernières travaillent en compétition avec les bactéries méthanogènes.

Le présent prétraitement permet l'introduction d'une poudre micronisée à base d'oxyde de fer, dans la fosse préfosse de stockage des déchets. Le dosage de ce réactif, en milieu anaérobie, permet aux molécules de fer de former des complexes avec le soufre selon les équations suivantes :

Réduction du Fer(III)hydroxyde :  $2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{S} + 2 \text{H}_2\text{O}$

Précipitation du soufre :  $\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + 2 \text{H}_2\text{O}$

<b>Type de procédé</b>	Chimique
<b>Nature du polluant</b>	Composés soufrés des déchets organiques (H <sub>2</sub> S)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	9 (Disponible) –traitement sur site
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Désulfuration par injection d'air au sein du digesteur, ajout de chlorure ferrique.

**SCHEMA BLOC DU PROCESS**

**Flux entrant**

Déchets organiques soufrés

**Flux sortant**

Déchets organiques « dépollué »

**REACTIF DE DESULFURATION / DECHETS ORGANIQUES SOUFRES****ETAPES DE TRAITEMENT**

Le produit de réactif de désulfuration à base d'hydroxyde de fer est introduit directement dans la fosse amont du digesteur (fosse d'homogénéisation), cette fosse est brassée afin de permettre la diffusion du produit.

Le dosage du produit est fonction de la quantité d'H<sub>2</sub>S mesurer dans la fosse d'homogénéisation. Cela dépend notamment de la nature des intrants mais le ratio annoncé par le fabricant (OVIVE) est de l'ordre de 5,5 g Fe(OH)<sub>2</sub>/g H<sub>2</sub>S à abattre (ce ratio est à ajuster en fonction du mode de traitement). Le mélange est brassé, ce qui permet la diffusion du produit dans les déchets organiques. L'hydroxyde de fer va réagir et se complexer avec les molécules de soufre afin de produire du sulfure de fer (non nocif) qui se retrouve dans le digestat (ce qui créer une augmentation de la concentration de fer, qui n'engendre pas de problème même dans le cas d'un épandage direct car le seuil de tolérance est important).

**AVANTAGES / INTERETS**

L'avantage face à la technique de l'introduction d'oxygène dans le réacteur, est que ce prétraitement ne conduit pas à une dilution du biogaz.

Par rapport à l'utilisation d'un réactif à base de chlorure ferrique, l'hydroxyde de fer n'engendre pas d'acidification du milieu réactionnel et ne produit pas de chlorure. De plus, la manipulation et le stockage de l'hydroxyde de fer est plus simple que le chlorure ferrique.

**INCONVENIENTS / LIMITES**

Certains retours d'expériences précisent qu'un apport trop important en hydroxyde de fer va inhiber l'activité bactérienne (d'où l'importance du dosage). Formation d'un sulfure de fer non soluble dans le digestat du méthaniseur.

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

Pas de norme limitant la quantité d'H<sub>2</sub>S en sortie d'unité de production de biogaz. Il existe cependant en fonction du type de valorisation, certaines préconisations :

Pour l'injection du biogaz dans le réseau : Inférieure à 5 mgS/m<sup>3</sup>(n)

Pour la valorisation dans un moteur : chaque constructeur préconise une quantité maximale d'H<sub>2</sub>S à ne pas dépasser (200 – 250 ppmv)

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Ce produit est d'ores et déjà utilisé dans plusieurs unités de méthanisation :

- SYMEVAD – Henin Beaumont (62) :  
Débit de traitement : 5 kg/h en batch  
[H<sub>2</sub>S] entrée : **4 500 ppm** [H<sub>2</sub>S] sortie : **40 ppm**
- BIONERVAL – Etampes (91) :  
[H<sub>2</sub>S] entrant : **1 000 ppm** [H<sub>2</sub>S] sortie : **300 ppm**
- URBASYS – Varennes Jarcy (91) :  
[H<sub>2</sub>S] entrant : **Variable** [H<sub>2</sub>S] sortie : **300 ppm**

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Produit commercialement disponible à ce jour. Simple d'utilisation et économiquement viable.



**REACTIF DE DESULFURATION / DECHETS  
ORGANIQUES SOUFRES**

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Le fabricant OVIVE a développé 3 types de réactifs de désulfuration dont il précise l'utilisation en amont du réacteur de méthanisation (introduction dans la fosse d'homogénéisation). Ces trois réactifs, sous forme de poudre de différentes granulométries, ont des temps de réaction différents, selon le temps de rétention de la matière dans le digesteur (de 1 à 60 jours).  
Le tarif annoncé par le fabricant varie selon le type de réactif : de 0,76 – 0,9 €/kg.

**BIBLIOGRAPHIE**

<http://www.ovive.fr/process-produits/traitement-du-biogaz/abattement-a-la-source-dh2s-ovive-hf/>

## FICHES PROCÉDÉ

1- Lavage et hydrocyclonage	110
2- Nettoyage cryogénique	112
3- Extraction des polluants par fluide supercritique	114

## LAVAGE ET HYDROCYCLONAGE

L'objectif du procédé de traitement est de dépolluer un matériau par l'action combinée d'un lavage et d'une séparation par hydrocyclonage successif.

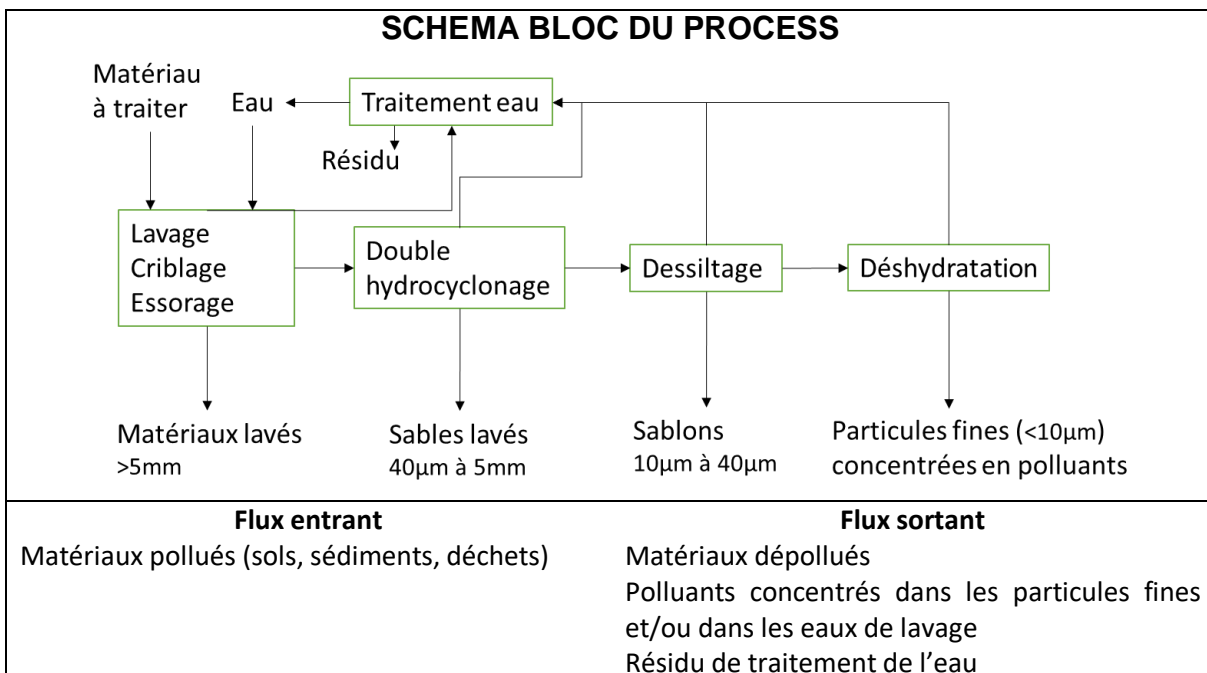
Le procédé repose sur des étapes successives d'hydrocyclonage avec séparation des différentes fractions granulométriques du matériau. Le lavage par double hydrocyclonage permet l'élimination des fines où sont concentrés naturellement les polluants présents dans le matériau.

Un traitement par déshydratation des eaux chargées en fines de granulométrie inférieure aux différents seuils de coupure des hydrocyclones, permet de concentrer les polluants dans ces fines et de traiter les eaux de lavage.

Le traitement est réalisé sur site et les matériaux issus du traitement sont ensuite valorisables directement sur site.

<b>Type de procédé</b>	Physique
<b>Nature du polluant</b>	HCT, PCB, HAP, Métaux, Fraction Soluble globale, COT
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9)- traitement sur site
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Lavage seul ou criblage seul

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



### ETAPES DE TRAITEMENT

Apport d'eau au matériau à traiter (75 à 80 %)

Lavage, criblage, essorage et récupération des matériaux lavés avec une taille de particules supérieure à 5mm

Double hydrocyclonage des particules de dimension inférieure à 5mm, récupération des sables lavés de dimension 40 µm à 5mm.

Dessiltage des particules inférieures à 40 µm, récupération des sablons lavés de 10 µm à 40µm

Déshydratation des boues obtenues, concentration des polluants dans les particules fines (inférieurs à 10 µm)

**LAVAGE ET HYDROCYCLONAGE****AVANTAGE/ INTERET**

Traitement du matériau sur site  
Réutilisation du matériau dépollué sur site possible  
Diminution de la quantité de déchets à stocker en décharge (pollution concentrée dans les particules fines)  
Réutilisation de l'eau de lavage en tête du procédé pour en diminuer la consommation  
Possibilité de rejet de l'eau de lavage dans le milieu naturel

**DOMAINES D'APPLICATION**

Le procédé a prouvé son efficacité dans les applications suivantes :

- Traitement de balayures de voirie
- Traitement des boues d'un aérateur de STEP
- Dépollution d'une aire d'épandage de STEP
- Traitement de sédiments de dragage de barrage
- Traitement de sols pollués aux hydrocarbures
- Traitement de sables de butte de tir pollués aux métaux
- Traitement de sédiments d'estuaire

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

La société TPMG (13330, Pelissanne) possède deux chaînes de traitement par double hydrocyclonage de capacités 15T/H et 60T/H.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Le procédé est utilisable lorsque le polluant est soluble dans l'eau ou lorsqu'il est majoritairement fixé dans les particules fines.

L'utilisation du procédé sur des granulats de démolition est envisageable, après un éventuel concassage, pour en extraire les polluants.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Répartition des polluants dans les différentes fractions granulométriques obtenues pour différentes applications :

<b>POLLUANTS</b>	<b>supérieur 5mm</b>	<b>5mm à 40µm</b>	<b>40µm à 10µm</b>	<b>10µm à 0µm</b>
HCT	≤ 2%	≤ 2%	≤ 5%	≥ 91%
PCB	≤ 2%	≤ 2%	≤ 2%	≥ 94%
HAP	≤ 2%	≤ 4%	≤ 11%	≥ 83%
Métaux sur Brut	≤ 3%	≤ 5%	≤ 13%	≥ 79%
Métaux sur Lixiviat	≤ 2%	≤ 10%	≤ 20%	≥ 68%
FS	≤ 2%	≤ 5%	≤ 10%	≥ 83%
COT	≤ 2%	≤ 2%	≤ 2%	≥ 94%

**BIBLIOGRAPHIE**

Conception/Réalisation et mise en œuvre de Process de traitement et valorisation des sols et des sédiments par lavage », Patrick Peytavin, société TPMG  
<http://www.tpmgvalo.fr/>



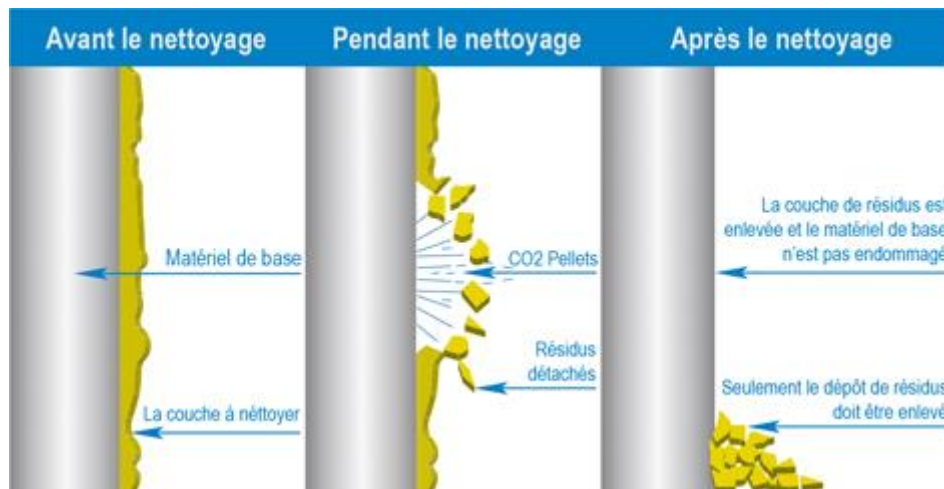
## NETTOYAGE CRYOGENIQUE

**OBJECTIF** : L'objectif du traitement est de décaper un matériau revêtu.

Le nettoyage cryogénique consiste à projeter à grande vitesse à l'aide d'air comprimé des pellets de glace carbonique formée en comprimant du CO<sub>2</sub> (à -78 ° C) sur les supports à nettoyer. Ce procédé, sans impact sur l'environnement, est une alternative aux équipements de nettoyage conventionnels qui utilisent de l'eau, du sable, des solvants ou du bicarbonate. Il permet d'éliminer par exemple le revêtement de plomb apporté par des peintures anciennes et qui rend les matériaux impropres à la valorisation.

<b>Type de procédé</b>	Physique
<b>Nature du polluant</b>	Revêtement (peintures, bitumes...)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Disponible (TRL9)- traitement sur site
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Décapage avec sable/ solvant/eau sous haute pression

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



Source : <http://www.addic.eu/>

**Flux entrant**  
Surface avec revêtement

**Flux sortant**  
Surface décapée, dépôt de résidu

### ETAPES DE TRAITEMENT

Génération d'une glace sèche par compression du CO<sub>2</sub>  
 Projection sur l'objet à traiter  
 Microexplosion au contact de la surface du matériau qui produit de la chaleur et retransformation du CO<sub>2</sub> en gaz  
 Apparition de microfissures sous le contaminant sous l'effet du choc thermique  
 Infiltration du CO<sub>2</sub> gazeux sous le contaminant  
 Décollage du contaminant

**NETTOYAGE CRYOGENIQUE****AVANTAGE/ INTERET**

Nettoyage sans résidus secondaires (autre que le contaminant)  
Nettoyage à sec  
Pas de solvants (sécurité de l'opérateur)  
Plus rapide que manuellement  
Limitation du volume de déchets produits par rapport au sablage : technique de choix dans les domaines où il est essentiel de limiter le volume de déchet produit (nucléaire par exemple)  
Pas d'endommagement du support

**INCONVENIENT/ LIMITATION**

Il est primordial de considérer la dureté du produit de base ainsi que la dureté du contaminant lui-même afin de bien ajuster l'équipement et de ne pas endommager le produit original, tout en atteignant des résultats optimaux.

**DOMAINES D'APPLICATION**

Le nettoyage cryogénique (CO<sub>2</sub>+additif) permet de décaper la rouille, les peintures, les façades, les bitumes  
Cette technique est idéale pour le bois, la pierre, l'acier, l'aluminium, le marbre, le fer, l'inox, le béton, le polyester et sur bien d'autres surfaces.  
Il peut également être utilisé sur des équipements électriques.

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Des dispositifs de nettoyage par cryogénie sont commercialisés par de nombreuses entreprises, parmi lesquelles : Sieberath International Consulting (Luxembourg), Messer (France), Decap'Oise, centre de décapage écologique (France), Kärcher, Cryoblaster, Cryonomic (Belgique)  
Différents équipements compacts et mobiles sont proposés en fonction de l'application.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

Ce procédé « à sec » est très répandu dans l'industrie (entretien général de machines et chaînes de production, automobile et aéronautique, plasturgie et fonderie, industrie agroalimentaire ...) pour des opérations de nettoyage.  
Un intérêt majeur en tant que technique de prétraitements, sur des chantiers de démolition par exemple, résiderait dans le fait qu'il n'utilise ni eau ni solvant, ce qui éviterait le transfert de la pollution vers un effluent à traiter ultérieurement. Les déchets seraient réduits et plus facile à récupérer.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

Cette technique est particulièrement mise en avant par le groupe ORTEC (salon Environord 2015 et POLLUTECH 2016) pour des applications de nettoyage industriel.

**BIBLIOGRAPHIE**

<http://www.decapoise.com/Nettoyage-cryogenique.html>  
<http://www.addic.eu>

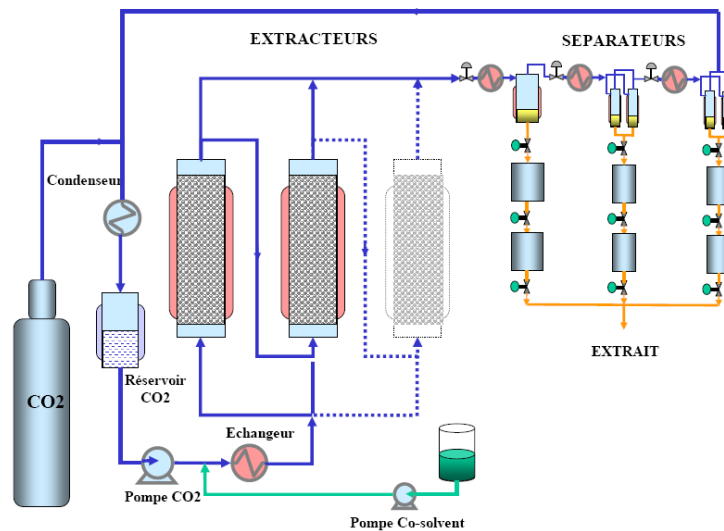
## EXTRACTION DE POLLUANTS PAR FLUIDE SUPERCRITIQUE

**OBJECTIFS :** L'extraction par fluide supercritique est une alternative à l'extraction par solvants organiques.

Les procédés mettant en œuvre les fluides supercritiques consistent à utiliser certains composés (principalement le CO<sub>2</sub> ou l'eau) dans des conditions de température et de pression au-delà de leur point critique. Ces fluides sont d'excellents solvants dans ces conditions dites « supercritiques ». Le CO<sub>2</sub> est intéressant car ses coordonnées supercritiques (T<sub>c</sub>=31 °C et P<sub>c</sub> = 74 bar) permettent son emploi dans des conditions de température voisine à celles de la température ambiante, et de pression acceptable.

<b>Type de procédé</b>	Physicochimique
<b>Nature du polluant</b>	Polluants organiques et inorganiques (surfactants)
<b>Maturité du procédé (échelle TRL)</b>	Emergent (4 à 9 selon les applications)
<b>Technologies ou solution de référence</b>	Extraction par solvant organique chloré ou fluoré

### SCHEMA BLOC DU PROCESS



Source : <http://www.separex.fr/>

**Flux entrant**  
Matériau pollué

**Flux sortant**  
Matériau, polluant(s) extrait(s)

### ETAPES DE TRAITEMENT

Introduction de la matière à traiter dans un ou plusieurs autoclaves à haute pression  
 Introduction du CO<sub>2</sub> dans les autoclaves, éventuellement d'un co-solvant afin d'extraire un polluant polaire  
 Séparation du matériau et du polluant dans des séparateurs

**EXTRACTION DE POLLUANTS PAR FLUIDE SUPERCRITIQUE****AVANTAGE/ INTERET**

Impact environnemental limité comparé aux solvants organiques fluorés ou chlorés  
Rendement d'extraction important  
Procédé opérant à faible température compatible avec les composés thermosensibles  
Coût attractif (abondance du CO<sub>2</sub>, indépendance vis à vis du pétrole)

**INCONVENIENT/LIMITE**

Coût d'investissement important.  
Une mise au point expérimentale est nécessaire pour chaque application.

**DOMAINES D'APPLICATION**

Extraction de polluants dans les plastiques (phtalates, retardateurs de flamme bromés<sup>3</sup> ...)  
Extraction de pesticides dans les produits agricoles  
Valorisation de copeaux de bois  
Sols pollués

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

Les sociétés SEPAREX (54250, France) et Top Industrie (77000, France) commercialisent et développent des systèmes d'extraction par fluide supercritique de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle. De nombreuses installations industrielles sont présentes en Europe notamment en Allemagne (Uhde High Pressure Technologies), Autriche, Espagne.

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

L'extraction par fluide supercritique est maintenant largement utilisée pour l'extraction des produits naturels, dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique ou textile.  
Des études ont montré que le CO<sub>2</sub> supercritique peut être utilisé pour le nettoyage des plastiques souillés en vue d'en retirer les impuretés et polluants (solvants, additifs, monomères résiduels...)  
Des applications se développent dans le domaine des déchets, notamment pour la destruction des déchets dangereux (PCB, déchets radioactifs) par oxydation hydrothermale.  
Le coût d'investissement est important mais le retour sur investissement est rapide et les coûts opératoires sont compétitifs.

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

L'IFS (Innovation Fluides Supercritiques) rassemble les acteurs français de la recherche, de l'industrie et de la formation pour le développement des technologies utilisant des fluides supercritiques et subcritiques. Le laboratoire de l'IFS à Valence propose un accompagnement des entreprises dans leurs projets de développement des procédés en phase supercritique.

**BIBLIOGRAPHIE**

*Extraction de polluants dans les plastiques par les fluides supercritiques*, Karima Benaissi, IFS, Jeudi de Team 2, mai 2014.  
<http://www.separex.fr/>  
*Degradation of brominated flame retardant in computer housing plastic by supercritical fluids*, Y. Wang, F-S. Zhang, Journal of Hazardous Materials, Vol 205-206, p156.  
<http://www.portail-fluides-supercritiques.com>

## **FICHES GÉNÉRIQUES**

1- Extraction des métaux lourds	117
2- Hygiénisation	132
3- Tri optique des déchets	139
4- Séchage, extraction d'eau	147

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

Cette fiche transversale présente différentes technologies permettant de réaliser l'extraction de métaux lourds. Elle en présente les fondamentaux scientifiques, l'état d'avancement et les perspectives d'émergence. Une partie est développée autour des techniques de solubilisation des métaux lourds.

### PROBLÉMATIQUES

Les métaux lourds sont des éléments ayant des poids atomiques compris entre 63,5 et 200,6 et une densité supérieure à 5,0.

Avec le développement rapide d'industries comme les métallurgies, les mines, les industries d'engrais, les tanneries, les papeteries, et les industries chimiques de batteries et de pesticides, les eaux usées industrielles sont de plus en plus chargées en métaux lourds et nécessitent des traitements séparés avant toute possibilité de valorisation ou de recyclage.

Contrairement aux contaminants organiques, les métaux lourds ne sont pas biodégradables et ont tendance à s'accumuler dans les organismes vivants et de nombreux ions de métaux lourds sont connus pour être toxiques ou cancérogènes.

Les métaux lourds toxiques particulièrement préoccupants dans le traitement des eaux usées industrielles et les déchets solides sont le zinc, le cuivre, le nickel, le mercure, le cadmium, le plomb, le chrome, l'antimoine, le molybdène, l'arsenic et le baryum.

Le zinc (Zn) est un oligo-élément essentiel pour la santé humaine. Il est important pour les fonctions physiologiques des tissus vivants et régleme de nombreux processus biochimiques.

Cependant, trop de zinc peut causer des problèmes de santé éminents, tels que crampes d'estomac, irritations de la peau, vomissements, nausées et anémie.

Le cuivre (Cu) fait un travail essentiel dans le métabolisme animal. Mais l'ingestion excessive de cuivre entraîne de graves préoccupations toxicologiques, comme des vomissements, des crampes, des convulsions ou même la mort.

Le nickel (Ni), au-delà du niveau critique peut entraîner de graves problèmes pulmonaires et rénaux, en plus de la détresse gastro-intestinale, de la fibrose pulmonaire et de la dermatite cutanée. Le nickel est cancérogène pour l'homme.

Le mercure (Hg) est une neurotoxine qui peut causer des dommages au système nerveux central. Des concentrations élevées de mercure entraînent une altération de la fonction pulmonaire et rénale, une douleur thoracique et une dyspnée. L'exemple classique de l'empoisonnement au mercure est Minamata Bay (Japon).

Le cadmium (Cd) a été classé par l'Environmental Protection Agency des États-Unis comme un cancérogène humain probable. Le cadmium expose la santé humaine à de graves risques. L'exposition chronique au cadmium entraîne une dysfonction rénale et des niveaux élevés d'exposition entraîneront la mort.

Le plomb (Pb) peut causer des dommages au système nerveux central. Le plomb peut également endommager les reins, le foie et le système reproducteur, les processus cellulaires de base et les fonctions cérébrales. Les symptômes toxiques sont l'anémie, l'insomnie, les maux de tête, les étourdissements, l'irritabilité, la faiblesse des muscles, l'hallucination et les dommages rénaux.

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

Le chrome (Cr) sort dans le milieu aquatique principalement dans deux états : Cr (III) et Cr (VI). En général, Cr (VI) est plus toxique que Cr (III). Cr (VI) affecte la physiologie humaine, s'accumule dans la chaîne alimentaire et provoque des problèmes de santé graves allant de simple irritation de la peau au carcinome pulmonaire.

L'antimoine (Sb) est utilisé dans la fabrication d'alliages avec le plomb, l'étain et le cuivre (il augmente la dureté du plomb). Il est également employé dans la fabrication des plaques de plomb des batteries, des plombs de chasse, des semi-conducteurs, des piles thermo-électriques, pour le traitement de surface des métaux et pour le noircissement du fer. Selon les concentrations, son exposition peut provoquer des maladies des poumons, des problèmes au cœur, des diarrhées, des vomissements et des ulcères d'estomac.

Le molybdène (Mo) est utilisé dans la fabrication d'alliages, il permet notamment un durcissement de l'acier en améliorant sa résistance et son ouvrabilité. De plus, les oxydes de molybdène sont utilisés comme pigments dans les peintures, encres et plastiques. Le molybdène est aussi un élément nécessaire à pratiquement tous les organismes où on le retrouve dans une cinquantaine de métalloenzymes, intervenant dans le processus de conversion du diazote atmosphérique en ion ammonium assimilable par les plantes.

L'arsenic (As) est naturellement présent dans la partie superficielle de l'écorce terrestre à une concentration moyenne de l'ordre de 2 mg/kg. Les émissions sont dues à l'utilisation de combustibles minéraux solides, à la combustion du fioul lourd, à la production de verre et certaines industries telle que la métallurgie. Chez l'homme l'exposition par inhalation engendre l'apparition de lésions cutanées et des troubles digestifs, le développement de cancer des voies respiratoires, ainsi qu'une augmentation du risque de mortalité par accident cardiovasculaire.

Le baryum (Ba) est un métal alcalino-terreux, il est utilisé dans de nombreux procédés de fabrication notamment pour la fabrication de : tubes cathodiques, papier photographique, du verre, certaines boues de forage. L'effet sur la santé humaine dépend de l'exposition et du type d'absorption, des ingestions de sels de baryum ont conduit à de nombreux décès, sont inhalation par voies respiratoire conduit dans certain cas à une contraction des muscles et un arrêt respiratoire.

### LES TECHNIQUES DE SOLUBILISATION

La fiche ci-présente, relate des technologies de traitement des métaux lourds contaminants une phase liquide/aqueuse. Afin de répondre à la problématique du traitement des métaux lourds contenus dans les déchets solides, il a été demandé d'introduire différents procédés de solubilisation des métaux lourds (afin de réaliser un transfert de la charge polluante, de la phase solide vers une phase aqueuse ou liquide).

Le traitement des métaux lourds dans des phases liquides ou aqueuses a été plus longuement étudiés car elle est utilisée dans les industries d'extraction des minerais (technique de séparation permettant d'extraire les éléments inclus dans un minerais afin d'augmenter sa teneur en éliminant la plus grande partie possible de la gangue).

Il existe actuellement diverses technologies permettant l'extraction des métaux d'une matrice solide. La majorité de ces technologies utilisent les principes de la pyrométallurgie et de l'hydrométallurgie.

**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

La pyroméallurgie est un procédé thermo-chimique utilisés dans la récupération des métaux constituant les piles. Il comporte 3 étapes principales : le traitement thermique, permettant la fusion des métaux, une réaction chimique (type oxydation) permettant la séparation et une étape d'affinage. Les principaux métaux traités par pyroméallurgie sont le cuivre, le nickel, le zinc, le fer, le manganèse.

L'hydroméallurgie est un procédé qui repose sur la chimie des solutions et peut être divisée en trois opérations : la lixiviation (ou dissolution des métaux), la purification (séparation des différents métaux) et l'électrolyse (récupération du métal recherché sous forme métallique).

L'opération de lixiviation exercée en hydroméallurgie peut être réalisée par l'intermédiaire d'un acide (type acide sulfurique) ou d'un oxydant (type chlore). On distingue différentes techniques de purification (extraction liquide-liquide, par un solvant, cémentation, précipitation...).

Les différents métaux traités par hydroméallurgie sont le zinc, le nickel, le cuivre, le cobalt, l'uranium, le chrome, le manganèse, le lithium....

Les procédés d'hydroméallurgie permettent la récupération des métaux à des degrés de pureté plus importants que les procédés de pyroméallurgie, de plus ils sont moins consommateurs d'énergie (pyroméallurgie étant basé sur des procédés de traitement thermique). La pyroméallurgie est une technologie qui produit de grande quantité d'acide sulfurique, l'hydroméallurgie au contraire est consommateur de cet acide.

Exemple de l'application des procédés de solubilisation :

Exemple du procédé d'hydroméallurgie REZEDA développé par un groupement de sociétés (RVX, USINO, Umicore, BRGM) appliqué à la valorisation matière de déchets industriels ayant une teneur supérieure à 15% de zinc (type poussière d'aciéries électriques, boues d'hydroxyde métalliques). La technique peut se décrire par : une première étape de lixiviation dans une solution sodique (300 g/l) à une température supérieure à 90°C, permettant la production d'une solution riche en zinc et d'un résidu insoluble riche en fer à recycler au four électrique, s'en suit la purification de la solution sodique par cémentation à la poudre de zinc permettant de concentrer les métaux lourds (plomb, cadmium...) dans un résidu solide valorisé par l'industrie du plomb, ensuite l'étape d'électrolyse permet de purifier la solution et d'en extraire une poudre de zinc (pureté > 97%, granulométrie 2,7 µm..). Cette poudre offre des applications directes pour les peintures anticorrosion, en chimie comme réactif ou encore en cémentation pour éliminer certains métaux.

On peut citer aussi l'application au traitement des REFOM et le procédé développé par la société française Sagace. Ce procédé réalise un traitement hydrothermique (avec une solution de carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), qui va permettre la séparation de 3 fractions. La première, traitée par neutralisation et précipitation à l'acide chlorhydrique (HCl), permet la production de chlorure de calcium, et après séchage, une fraction de gypse sous forme de poudre valorisable. Une deuxième fraction, traitée par neutralisation (à l'aide du  $\text{CO}_2$  des fumées d'UIOM) et lavage successif permettant de produire des REFOM traités valorisables. La troisième fraction est une boue de déchets ultimes (<3% du volume initial de REFOM traité).

**PRETRAITEMENTS PAR PRÉCIPITATION CHIMIQUE**

La précipitation chimique est efficace et est de loin le procédé le plus largement utilisé dans l'industrie, car elle est relativement simple et peu coûteuse à opérer. Dans les procédés de précipitation, les produits chimiques réagissent avec les ions de métaux lourds pour former des précipités insolubles. Les précipités formateurs peuvent être séparés de l'eau par sédimentation ou



**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

filtration. Les procédés classiques de précipitation chimique comprennent la précipitation par l'hydroxyde et la précipitation au sulfure.

**1. Précipitation d'hydroxyde**

Type de procédé : chimique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

**a. Descriptif du prétraitement :**

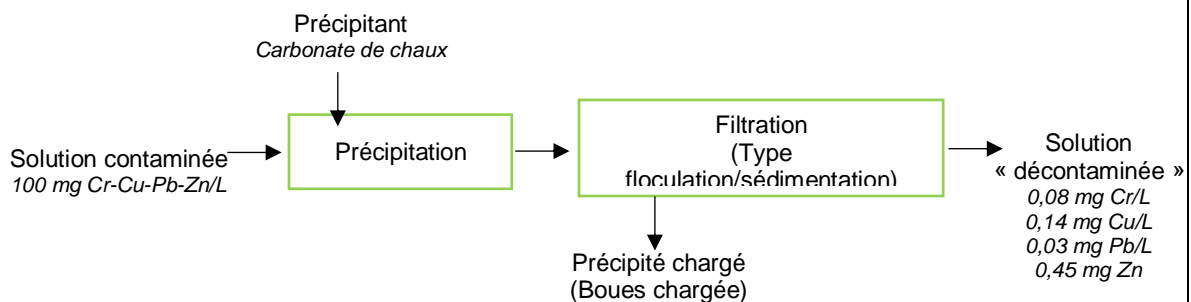
La technique de précipitation chimique la plus largement utilisée est la précipitation de l'hydroxyde due à sa relative simplicité, son faible coût et sa facilité de contrôle du pH. Les solubilités des différents hydroxydes métalliques sont minimisées dans la plage de pH de 8,0 à 11,0.

Les hydroxydes métalliques peuvent être éliminés par floculation et sédimentation. Une variété d'hydroxydes a été utilisée pour précipiter les métaux à partir de l'eau salée, en se basant sur le faible coût et la facilité de manipulation, la chaux est le choix préféré de la base utilisée dans la précipitation de l'hydroxyde dans les environnements industriels.

Le Cr (VI) est converti en Cr (III) en utilisant du sulfate ferreux. La précipitation maximale de Cr (III) se produit à pH 8,7 avec l'addition de  $Ca(OH)_2$  et la concentration de chromate est réduite de 30 mg / L à 0,01 mg / L.

Le complexe cuivre - ammoniac est réduit par aération et le pH optimal pour la précipitation maximale du cuivre était d'environ 12,0 pour  $Ca(OH)_2$  et  $NaOH$  et la concentration de cuivre est réduite de 48,51 mg / L à 0,694 mg / L.

Le traitement à la carbonate de chaux volatile augmente la taille des particules du précipité et améliore de manière significative l'efficacité de l'élimination des métaux lourds. Les concentrations de chrome, de cuivre, de plomb et de zinc dans les effluents peuvent être réduites de la concentration initiale de 100,0 mg / L à 0,08, 0,14, 0,03 et 0,45 mg / L, respectivement. Dans le procédé de précipitation par l'hydroxyde, l'addition de coagulants tels que l'alun, les sels de fer et les polymères organiques peut améliorer l'élimination des métaux lourds des eaux usées.

**SCHEMA PROCEDE**

**b. Potentiel d'émergence :**

Bien que largement utilisé, la précipitation de l'hydroxyde a également certaines limites. Tout d'abord, la précipitation par hydroxyde génère de grands volumes de boues de faible densité, qui peuvent présenter des problèmes de déshydratation et d'élimination.

Deuxièmement, certains hydroxydes métalliques sont amphotères, et les métaux mélangés créent un problème en utilisant la précipitation d'hydroxyde puisque le pH idéal pour un métal peut remettre un autre métal en solution. Troisièmement, lorsque des agents complexants sont dans les eaux usées, ils inhiberont la précipitation de l'hydroxyde métallique.

**2. Précipitation de sulfures**

Type de procédé : chimique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

### a. Descriptif du prétraitement :

La précipitation de sulfure est également un procédé efficace pour le traitement d'ions de métaux lourds toxiques. L'un des principaux avantages de l'utilisation de sulfures est que les solubilités des précipités de sulfures métalliques sont nettement inférieures aux précipités d'hydroxyde et les précipités de sulfure ne sont pas amphotères.

Ainsi, le procédé de précipitation au sulfure peut obtenir un haut degré d'élimination des métaux sur une large plage de pH par rapport à la précipitation d'hydroxyde. Les boues de sulfures métalliques présentent également de meilleures caractéristiques d'épaississement et de déshydratation que les boues d'hydroxyde de métal correspondantes.

Le mécanisme régissant ce procédé d'élimination des métaux est une précipitation chimique à faible pH (<3) due à la génération d' $H_2S$ . Récemment, un nouveau procédé de précipitation des sulfures a été mis au point à partir de bactéries sulfatées (SRB) et permet d'oxyder des composés organiques simples dans des conditions anaérobies et transformer les sulfates en sulfure d'hydrogène.

### b. Potentiel d'émergence :

Il a été constaté que le réacteur a une capacité considérable de réduction totale des sulfates pour des concentrations initiales jusqu'à 6000 mg/L, éliminant complètement le zinc soluble pour des concentrations initiales allant jusqu'à 400 mg/L et éliminant complètement le COT pour des concentrations initiales allant jusqu'à 1500 mg/L.

Il est essentiel que ce processus de précipitation soit effectué en milieu neutre ou basique.

De plus, la précipitation des sulfures métalliques tend à former des précipités colloïdaux qui causent certains problèmes de séparation dans les processus de décantation ou de filtration.

### 3. Précipitation chélatante :

Type de procédé : chimique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

#### a. Descriptif du prétraitement :

De nombreuses entreprises utilisent des précipitants chélatants pour précipiter les métaux lourds des systèmes aqueux : ainsi sont utilisés trois précipitants commerciaux de métaux lourds largement utilisés, la trimercaptotriazine, le thiocarbonate de potassium / sodium et le diméthylthiocarbamate de sodium.

De plus, le Hexahydrotriazinedithiocarbamate (HTDC) peut également réduire les ions de métaux lourds dans les eaux usées à beaucoup moins de 0,5 mg / L.

Le procédé au xanthate est aussi une méthode efficace pour éliminer les métaux lourds à partir d'eau contaminée. On utilise de l'éthyl xanthate de potassium pour éliminer les ions de cuivre des eaux usées sur une large plage de concentrations de cuivre (50, 100, 500 et 1000 mg/L) au niveau qui respecte les règlements sur les effluents (3 mg / L).

Un procédé au dipropyl-dithiophosphate chélatant de métal lourd organique existe également. Le chélateur peut éliminer la concentration de plomb, de cadmium, de cuivre et de mercure à 200 mg/L à un pH de 3 à 6 jusqu'à plus de 99,9% du métal lourd. Les concentrations dans les eaux usées après traitement sont respectivement inférieures à 1, 0,1, 0,5 et 0,05 mg/L.

#### b. Potentiel d'émergence :

Les procédés classiques de précipitation chimique présentent de nombreuses limitations et il est difficile de satisfaire les exigences environnementales de plus en plus strictes en appliquant des procédés classiques de précipitation pour traiter les eaux usées de métaux lourds contenant notamment des agents coordonnés.

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

### PRÉTRAITEMENTS PAR ÉCHANGE IONIQUE

**Type de procédé :** chimique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

1. Descriptif du prétraitement :

Les résines les plus couramment utilisées sont des résines fortement acides avec des groupes acide sulfonique ( $SO_3H$ ) et des résines faiblement acides avec des groupes acide carboxylique ( $COOH$ ).. Lorsque la solution contenant du métal lourd traverse la colonne de cations, des ions métalliques sont échangés contre les ions hydrogène sur la résine par le procédé d'échange d'ions.

L'absorption d'ions de métaux lourds par les résines échangeuses d'ions est affectée par certaines variables telles que le pH, la température, la concentration initiale des métaux et la durée de contact. La charge ionique joue également un rôle important dans le processus d'échange d'ions. Outre les résines synthétiques, les zéolithes naturelles, les minéraux silicate naturels, ont été largement utilisés pour éliminer le métal lourd des solutions aqueuses en raison de leur faible coût et de leur abondance.

De nombreux chercheurs ont démontré que les zéolites présentent de bonnes capacités d'échange de cations pour des ions de métaux lourds dans différentes conditions expérimentales.

La clinoptilolite est l'une des zéolites naturelles les plus fréquemment étudiées et a reçu une attention considérable en raison de sa sélectivité pour les métaux lourds. Récemment, certains chercheurs ont signalé que la surface de clinoptilolite chargée d'oxyde de Fe amorphe, améliorerait significativement la capacité d'échange de la clinoptilolite en utilisant le système clinoptilolite-Fe pour éliminer simultanément Cu, Mn et Zn de l'eau potable.

### SCHEMA PROCEDE

Solution contaminée  
aux métaux lourds



Résines échangeuses d'ions



Solution traitée

2. Potentiel d'émergence :

Les procédés d'échange d'ions ont été largement utilisés pour éliminer les métaux lourds des eaux usées en raison de leurs nombreux avantages, tels qu'une capacité de traitement élevée, une efficacité d'élimination élevée et une cinétique rapide. Bien qu'il existe de nombreux rapports sur l'utilisation de zéolites et de montmorillonites comme résine échangeuse d'ions pour éliminer les métaux lourds, ils sont actuellement limités par rapport aux résines synthétiques. L'application des zéolites reste à l'échelle du laboratoire.

### PRÉTRAITEMENTS PAR ADSORPTION

1. Adsorption par charbon actif :

Type de procédé : Physico-chimique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

a. Descriptif du prétraitement :

De nos jours, la source épuisée de charbon commercial à base de charbon actif entraîne l'augmentation du prix. Pour faire des progrès dans l'adsorption de métaux lourds au charbon actif sans le coût de la diminution de l'adsorption des polluants, les additifs et le composite pourraient être une option. Les additifs d'alginate, l'acide tannique, le magnésium, les tensioactifs et le charbon actif composite pourraient être des adsorbants efficaces pour métaux lourds.

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

La recherche de charbon actif alternatif à partir de sources abondantes et peu coûteuses est un enjeu important. La conversion de matières carbonées en charbon actif pour l'extraction des métaux lourds est aujourd'hui étudiée. De plus, d'autres récentes études s'intéressent à la production de charbon actif à partir de l'écorce d'eucalyptus dans la sorption de composants binaires de  $Cu^{2+}$  et  $Pb^{2+}$ . Les capacités de sorption maximales pour  $Cu^{2+}$  et  $Pb^{2+}$  sont de 0,45 et 0,53 mmol/g. La litière de volaille pour la fabrication de charbon actif pour le traitement de l'eau contaminée par des métaux lourds a été explorée, par l'« Agriculture Research Service » (ARS), et a révélé que ce charbon actif à base de litière de volaille possédait une affinité et une capacité d'adsorption significativement plus élevées pour les métaux lourds que le charbon actif commercial dérivé du charbon bitumineux ou de la coquille de noix de coco.

### SCHEMA PROCEDE



Coefficient d'adsorption : 0,13 à 1,92 mmol  $Cu^{2+}$ /g de charbon actif  
 Surface d'adsorption : 253 à 548 m<sup>2</sup>/g  
 Rendements : 18 à 28%

Issus de « Lima et Marshall » et « Propriétés physiques, chimiques, biologiques et nutritives des litières en élevage de volailles » A.BALAZART, 2010, capacités d'adsorption des ions  $Cu^{2+}$  par des charbons actifs produits à partir de litières de volaille. Capacité d'adsorption jugée « excellente » pour l'ion cuivre et autres ions métalliques en solutions, « charbon activé dérivé de la litière de volaille avait des capacités d'adsorption et des affinités pour les métaux lourds significativement plus grandes que les charbons activés industriels dérivés du charbon bitumineux »

#### b. Potentiel d'émergence :

Les adsorbants au charbon actif sont largement utilisés dans l'élimination des contaminants de métaux lourds. Son utilité provient principalement de ses gros volumes de micropores et mésopores et de la surface superficielle élevée qui en résulte. Un grand nombre de chercheurs étudient l'utilisation du charbon actif pour éliminer les métaux lourds.

### 2. L'adsorption sur nanotubes de carbone :

Type de procédé : Physico-chimique

Maturité (échelle TRL) : En développement (4-6)

#### a. Descriptif du prétraitement :

Les nanotubes de carbone (CNT) découverts par Iijima en 1991, ont été largement étudiés pour leurs excellentes propriétés et applications. En tant qu'adsorbants relativement nouveaux, on a prouvé que les CNT possédaient un grand potentiel pour éliminer les ions de métaux lourds tels que le plomb (Wang et al., 2007, Kabbashi et al., 2009), le cadmium (Kuo et Lin, 2009), le chrome (Pillay et al. Al., 2009), le cuivre (Li et al., 2010) et le nickel (Kandah et Meunier, 2007). Les résultats de ces études montrent que les CNT sont des candidats prometteurs pour l'adsorption de métaux lourds.

Les CNT sont divisés en deux types :

- CNT à paroi unique (SWCNT=single-walled carbon nanotubes)

#### 1. CNT à parois multiples (MWCNT = multi-walled carbon nanotubes).

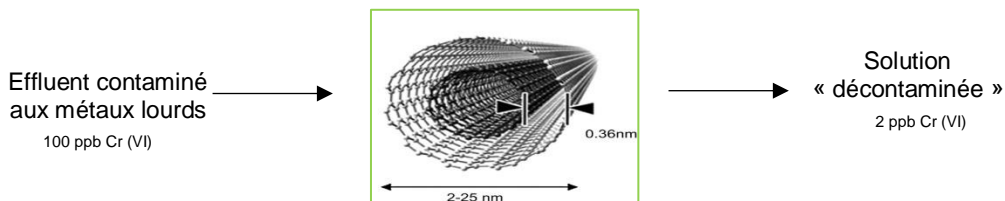
Les mécanismes par lesquels les ions métalliques sont adsorbés sur les CNT sont attribuables à l'attraction électrostatique, à la précipitation par sorption et à l'interaction chimique entre les ions métalliques et les groupes fonctionnels de surface des CNT.

Les capacités de sorption des ions métalliques par les CNT bruts sont très faibles mais augmentent significativement après oxydation par les solutions de  $HNO_3$ ,  $NaClO$  et  $KMnO_4$ . L'adsorption de Pb (II) à l'aide de MWCNT acidifiés est fortement impactée par les groupes fonctionnels oxygénés sur

**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

les MWCNT qui jouent un rôle important pour former l'adsorption du complexe chimique, et dont l'impact atteint jusqu'à 75,3% de la capacité d'adsorption.

En comparant les capacités d'adsorption pour l'élimination des parties par milliard de niveaux (ppb) de Cr (VI) par trois adsorbants, à savoir le charbon actif, MWCNT fonctionnalisé et MWCNT non fonctionnalisés, les MWCNT non fonctionnalisés montrent la capacité d'adsorption la plus élevée avec jusqu'à 98% d'une solution de 100 ppb Cr (VI) adsorbée.

**SCHEMA PROCEDE**

**b. Potentiel d'émergence :**

Les MWCNT fonctionnalisés et non fonctionnalisés ont une capacité d'adsorption supérieure à celle du charbon actif. Mais l'utilisation généralisée des CNT a longtemps été rejetée dans l'environnement aquatique pour ce qu'elle présenterait comme un risque pour les humains.

Pour résoudre ce problème, un adsorbant respectueux de l'environnement, des CNT immobilisés par de l'alginate de calcium (CNTs / charbon actif) a été utilisé pour éliminer le cuivre. Sa capacité d'adsorption du cuivre peut atteindre 67,9 mg/g à la concentration d'équilibre du cuivre de 5 mg/L.

**3. Biosorption :**

Type de procédé : Physico-Chimique

Maturité (échelle TRL) : En développement (5)

**a. Descriptif du prétraitement :**

Les biosorbants utilisés peuvent être dérivés de trois sources : la biomasse non vivante (l'écorce, la lignine, la crevette, le krill, la coquille de crabe, etc.) ; la biomasse algale ; la biomasse microbienne (type bactéries, champignons et levures).

Différentes formes de matériel végétal peu coûteux et non vivants, telles que les écorces de pommes de terre, la sciure de bois, les coques de graines, les coques de café, algues etc. ont été largement étudiés comme biosorbants potentiels pour les métaux lourds. Parmi les avantages de l'utilisation d'algues comme biosorbant, citons la grande disponibilité, le faible coût, la grande capacité de sorption des métaux et la qualité raisonnablement régulière. Il existe un grand nombre de travaux de recherche sur la biosorption des métaux à partir de la biomasse algale. Des exemples récents incluent la biosorption en utilisant l'algue verte marine séchée *Chaetomorpha linum*, la biosorption de  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  et  $Zn^{2+}$ , en utilisant l'algue verte séchée *Caulerpa lentillifera*, la biosorption du plomb (II) à partir d'eaux usées par les algues vertes *Cladophora fascicularis*, la biosorption du chrome à partir des eaux usées à partir de l'algue verte *Ulva lactuca*, la biosorption de  $Cu^{2+}$  et  $Zn^{2+}$  par les algues vertes (*C. linum*).

La granulométrie optimale (100 à 315 µm), la dose de biosorbant (20 g / L) et la solution initiale pH 5, l'algue séchée ont produit respectivement des valeurs maximales de capture de  $Cu^{2+}$  et de  $Zn^{2+}$  de 1,46 et 1,97 mmol/g. L'élimination des ions métalliques des eaux usées a été indiquée comme hautement efficace. La biosorption de métaux lourds dans des solutions aqueuses par des bactéries inclut les souches *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, etc.

Les champignons et les levures sont faciles à cultiver, produisent des rendements élevés de biomasse et peuvent en même temps être manipulés génétiquement et morphologiquement.

Les biosorbides de champignons comprennent *Aspergillus niger*, *Rhizopus arrhizus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lentinus edodes*, etc. Il existe un certain nombre de rapports impliquant l'élimination

## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

des métaux lourds en utilisant la biomasse de *Rhizopus* : l'élimination de l'ion cuivre en utilisant NaOH a traité la biomasse de *Rhizopus oryzae* dans un réacteur discontinu. La capacité maximale de charge en cuivre de la biomasse viable et prétraitée est de 19,4 et 43,7 mg / g, respectivement.

### SCHEMA PROCEDE



Exemple pour un procédé de biosorption d'ion cuivre (II) par *Bacillus cereus* dans les conditions suivantes : 30 °C, pH 6, temps de réaction 24h, concentration initiale de la solution contaminée 100 mg/L. Ces conditions optimales ont conduit à une efficacité d'extraction des ions CU(II) de 73,3%. Référence : « Biosorption of Copper Ions by *Bacillus cereus* M116 from Aqueous Solution » H.BAIRAGI, A.GHATI, L.RAY 2009

#### b. Potentiel d'émergence :

La biosorption de métaux lourds à partir de solutions aqueuses est un procédé relativement nouveau qui a été confirmé comme un processus très prometteur dans l'élimination des contaminants des métaux lourds. Les principaux avantages de la biosorption sont sa grande efficacité dans la réduction des ions de métaux lourds et l'utilisation de biosorbants peu coûteux. Les biosorbants étaient caractéristiques de larges sources, d'adsorption rapide et peu coûteuse. De façon défavorable, ces recherches étaient encore en phase théorique et expérimentale. De plus, la séparation des biosorbants serait difficile après adsorption.

### PRETRAITEMENTS PAR FILTRATION MEMBRANAIRE

Les technologies de filtration membranaire avec différents types de membranes sont très prometteuses pour l'élimination des métaux lourds pour leur efficacité élevée, leur fonctionnement facile et leur économie d'espace.

Les procédés membranaires utilisés pour éliminer les métaux des eaux usées sont l'ultrafiltration, l'osmose inverse, la nanofiltration et l'électrodialyse.

#### 1. L'ultrafiltration :

Type de procédé : Physique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

##### a. Descriptif du prétraitement :

L'ultrafiltration (UF) est une technique membranaire agissant à des pressions transmembranaires faibles pour l'élimination du matériau dissous et colloïdal. Comme les dimensions des pores des membranes UF sont plus grandes que les ions métalliques dissous sous la forme d'ions hydratés ou de complexes à bas poids moléculaire, ces ions passeraient facilement à travers les membranes UF. Pour obtenir une efficacité d'élimination élevée des ions métalliques, l'ultrafiltration améliorée par micellaire (MEUF) et l'ultrafiltration renforcée par polymère (PEUF) sont possible.

MEUF s'est révélé être une technique de séparation efficace pour éliminer les ions métalliques des eaux usées. Cette technique de séparation repose sur l'ajout d'agents tensioactifs aux eaux usées. Lorsque la concentration des tensioactifs dans les solutions aqueuses est au-delà de la concentration micellaire critique (CMC), les molécules tensioactives vont s'agréger en micelles qui peuvent lier des ions métalliques pour former de grandes structures métal-tensioactif.

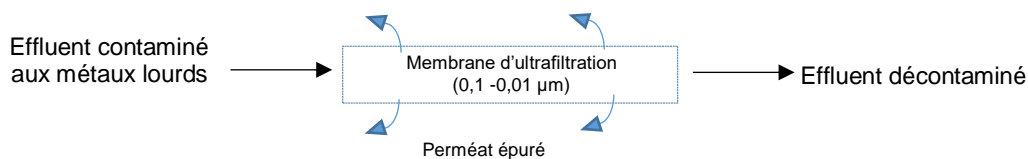
Le dodécylsulfate de sodium (SDS), un tensioactif anionique, est souvent choisi pour l'élimination efficace des ions de métaux lourds dans le MEUF. L'efficacité d'élimination des métaux par MEUF



**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

dépend des caractéristiques et des concentrations des métaux et tensioactifs, du pH de la solution, de la force ionique et des paramètres liés au fonctionnement de la membrane.

L'ultrafiltration par polymère hydrosoluble (PEUF) est également utilisée. Elle permet de composer des ions métalliques complexes et former un macromoléculaire, ayant un poids moléculaire plus élevé que le poids moléculaire propre de la membrane. Le macromoléculaire est retenu lorsqu'il est pompé à travers la membrane UF. Le retentât est ensuite traité afin de récupérer les ions métalliques et de réutiliser l'agent polymère.

**SCHEMA PROCEDE**

**b. Potentiel d'émergence :**

La principale préoccupation des études antérieures de la PEUF était de trouver des polymères appropriés pour réaliser la complexation avec des ions métalliques.

Les avantages du PEUF comprennent une efficacité d'élimination élevée, une sélectivité de liaison élevée et des concentrés de métaux hautement concentrés pour réutilisation, etc. Il existe de nombreuses publications dans ce domaine, mais elle ne s'est pas encore répandue dans l'industrie. Les agents complexants tels que l'acide polyacrylique, la polyéthylèneimine, la diéthylaminoéthylcellulose et l'acide humique sont largement étudiés pour obtenir une séparation sélective et une récupération de métaux lourds à faible consommation d'énergie.

**2. L'osmose inverse :**

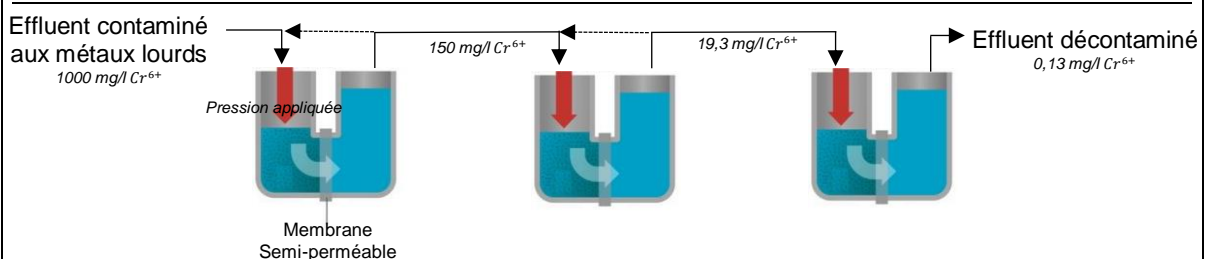
Type de procédé : Physique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

**a. Descriptif du prétraitement :**

Le procédé d'osmose inverse utilise une membrane semi-perméable, permettant au fluide qui est purifié de le traverser, tout en rejetant les contaminants. L'utilisation de membranes RO est l'une des techniques pour éliminer une grande variété d'espèces dissoutes de l'eau. Il représente plus de 20% de la capacité mondiale de dessalement et est également une option de traitement des eaux usées de plus en plus populaire dans l'ingénierie chimique et environnementale.

Les ions  $Cu^{2+}$  et  $Ni^{2+}$  peuvent être éliminés avec succès par l'osmose inverse et l'efficacité de rejet des deux ions est améliorée de 99,5% en utilisant  $Na_2EDTA$ .

**SCHEMA PROCEDE**


Exemple pour un procédé d'osmose inverse en étape pour le traitement d'une solution chargée en  $Cr^{6+}$  [8].

**b. Potentiel d'émergence :**

Des études actuelles sont en cours pour le développement de systèmes de bioréacteur membranaire à l'échelle pilote en combinaison avec de l'oxygène et ont constaté que les efficacités d'élimination des métaux lourds étaient très élevées. L'inconvénient majeur de l'osmose inverse reste tout de même la forte consommation due aux pressions de pompage et à la régénération des

**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

membranes. En règle générale, l'osmose inverse est jugée performante pour l'élimination de métaux lourds en faible concentration. L'inconvénient notable est que dans des conditions d'aérobies, les oxydes métalliques peuvent boucher les membranes.

**3. La nanofiltration :**

**Type de procédé :** Physique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

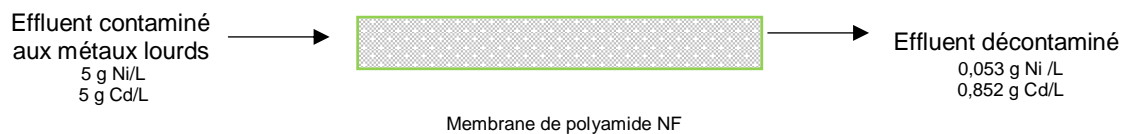
**a. Descriptif du procédé :**

La nanofiltration (NF) est le processus intermédiaire entre l'ultrafiltration et l'osmose inverse. NF est une technologie prometteuse pour le rejet d'ions de métaux lourds tels que le nickel, le chrome, le cuivre et l'arsenic.

Le procédé NF bénéficie de la facilité d'utilisation, de la fiabilité et de la consommation énergétique comparativement faible ainsi que du rendement élevé de l'élimination des polluants.

L'élimination de l'arsenic pentavalent de l'eau est caractérisée par l'augmentation du pH et la diminution de la température de fonctionnement et de la concentration d'alimentation qui conduit à un retrait plus élevé pour les deux membranes.

Parmi les paramètres affectant le rejet d'As, la concentration d'alimentation joue un rôle clé pour la production d'un courant perméable.

**SCHEMA PROCEDE**

**b. Potentiel d'émergence :**

Ces dernières années, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'élimination des ions de métaux lourds en utilisant la membrane NF. Ils ont rapporté l'application de membranes de polyamide NF composite à couche mince pour également le rejet des ions nickel des eaux usées aqueuses.

Le rejet maximal observé de nickel s'établit respectivement à 98% et 92% pour une concentration initiale d'alimentation de 5 et 250 mg / L.

Aussi, la capacité de séparation des métaux lourds binaires (nickel et cadmium) d'une membrane NF commerciale à partir de solutions aqueuses est étudiée et des prototypes permettent la récupération de respectivement 98,94% et 82,69%, des deux métaux lourds pour des concentrations de 5 g/L.

**PRETRAITEMENT PAR COAGULATION FLOCCULATION**

**Type de procédé :** Physico-chimique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

**1. Descriptif du prétraitement :**

La coagulation et la floculation, suivies d'une sédimentation et d'une filtration, sont également utilisées pour éliminer le métal lourd des eaux usées.

La coagulation est la déstabilisation des colloïdes en neutralisant les forces qui les séparent. De nombreux coagulants sont largement utilisés dans les procédés classiques de traitement des eaux usées tels que l'aluminium, le sulfate ferreux et le chlorure ferrique, ce qui a pour effet d'éliminer efficacement les particules d'eaux usées et les impuretés par neutralisation des charges des



## EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS

particules et par emmêlement des impuretés sur les précipités d'hydroxyde métallique amorphe formé.

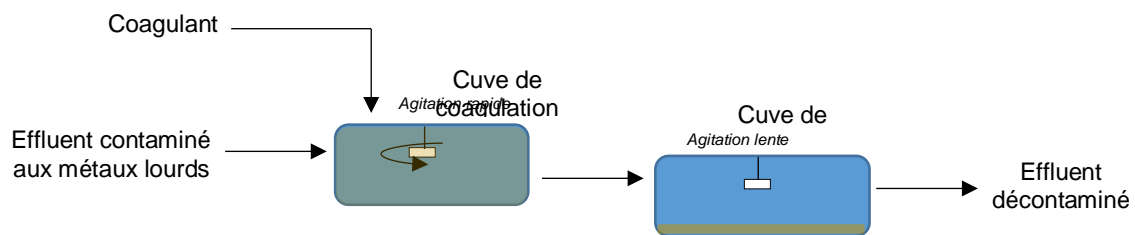
Des travaux récents ont étudié l'élimination du métal lourd par la coagulation du débordement combiné des égouts avec deux coagulants commerciaux, une solution de chlorure ferrique et un chlorure de polyaluminium (PAC). Ils ont abouti à une excellente élimination des métaux lourds dans une gamme étroite de coagulant autour des concentrations de coagulant optimales.

Afin d'éliminer à la fois les métaux lourds solubles et les substances insolubles par coagulation, le groupe xanthogénate de sodium est greffé sur de la polyéthylèneimine. Ce nouveau type de coagulant est un polyélectrolyte amphotère. Lorsque le pH de l'échantillon d'eau est plus bas, les substances colloïdales à charges négatives peuvent être coagulées par celle-ci, mais l'ion  $Ni^{2+}$ , cation cationique, ne peut pas être éliminé efficacement. Lorsque le pH de l'échantillon d'eau est plus élevé, l'élimination de la turbidité diminue et l'élimination de  $Ni^{2+}$  augmente.

La floculation est l'action des polymères pour former des ponts entre les floes et fixer les particules en grands agglomérats ou masses.

Une fois que les particules en suspension sont floculées en particules plus grandes, elles peuvent habituellement être éliminées ou séparées par filtration, stratification ou flottation. Aujourd'hui, de nombreux types de floculant, tels que le PAC, le sulfate polyferrique (PFS) et le polyacrylamide (PAM), sont largement utilisés dans le traitement des eaux usées, mais il est pratiquement impossible d'éliminer les métaux lourds des eaux usées directement par ces floculants actuels.

### SCHEMA PROCEDE



#### 2. Potentiel d'émergence :

Les floculants macromoléculaires sont un nouveau type de floculant. Des floculants macromoléculaires sont préparés en faisant réagir la chitosane avec de l'acide mercaptoacétique. Ce floculant élimine également la turbidité. Des floculants de kanthane-greffe-poly (acrylamide) - coxydate de sodium et des dérivés de chitosane polyampholyte et des chitosanes N-carboxyéthylés sont également utilisés.

### PRETRAITEMENTS PAR FLOTTATION

**Type de procédé :** Physique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

#### 1. Descriptif du prétraitement :

La flottation est aujourd'hui largement utilisée dans le traitement des eaux usées. La flottation a été employée pour séparer le métal lourd d'une phase liquide en utilisant l'attachement de bulle, historiquement dans le traitement minéral.

La flottation d'air dissous (FAD), la flottation ionique et la flottation par précipitation sont les principaux procédés de flottation pour éliminer les ions métalliques de la solution.

La FAD consiste à permettre aux microbulles d'air de s'attacher aux particules en suspension dans l'eau, en développant des agglomérats de densité inférieure à celle de l'eau, provoquant l'élévation des floes à travers l'eau et l'accumulation à la surface où ils peuvent être éliminés comme boues. FAD avait été largement étudié pour éliminer le métal lourd dans les années 1990.

**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**

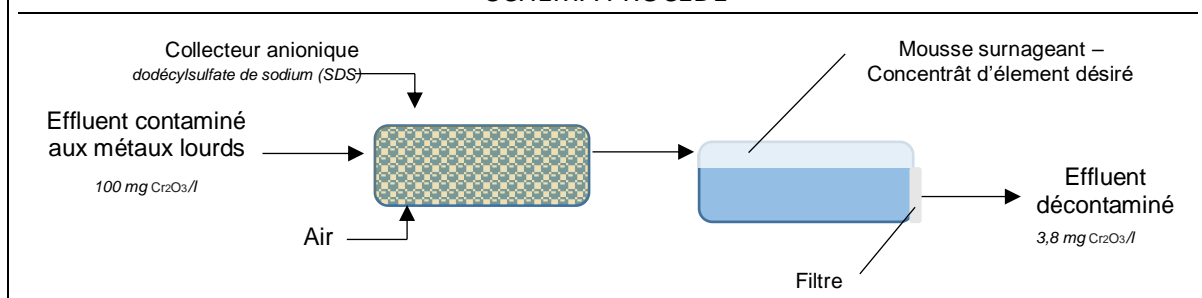
La flottation ionique est une méthode prometteuse pour éliminer les ions de métaux lourds des eaux usées. Le procédé de flottation ionique repose sur la transmission des espèces métalliques ioniques dans les eaux usées hydrophobes par l'utilisation de tensioactifs et l'élimination subséquente de ces espèces hydrophobes par des bulles d'air.

Des travaux récents ont étudié le potentiel de la flottation ionique pour éliminer le cadmium, le plomb et le cuivre d'une solution aqueuse diluée avec une saponine de biosurfactant dérivée de plantes. Le retrait maximal de  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  et  $Cd^{2+}$  peut atteindre respectivement 89,95%, 81,13% et 71,17%, lorsque le rapport du collecteur au métal est de 3: 1.

Aussi, la flottation ionique a été adaptée à l'élimination de  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  et  $Ag^+$  des eaux usées. Du dodécylsulfate de sodium (SDS) et du bromure d'hexadécyltriméthylammonium sont utilisés comme collecteurs. L'éthanol et le méthylisobutylcarbinol sont utilisés comme moussants. L'élimination des métaux atteint environ 74% dans des conditions optimales à faible pH, et à 90% à pH basique.

Le procédé de flottation par précipitation est une autre variante de la méthode de flottation, basée sur la formation du précipité et son élimination subséquente par fixation aux bulles d'air. Selon la concentration de la solution métallique, la précipitation peut se faire par formation d'hydroxyde métallique ou sous forme d'un sel avec un anion spécifique (sulfure, carbonate, etc.)

L'élimination de Cr (III) par flottation par précipitation à partir de solutions aqueuses diluées, en utilisant du SDS comme collecteur anionique et de l'éthanol comme mousse, a été étudiée à l'échelle de laboratoire. Les résultats ont montré qu'une élimination maximale de 96,2% du Cr (III) a été obtenue à un pH autour de 8,0.

**SCHEMA PROCEDE**


**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS**
**SYNTHÈSE DES TECHNOLOGIES DISPONIBLES ET ÉMERGENTES**

PROCÉDÉ	TYPE PROCÉDÉ	MATURITÉ	APPLICATIONS
<b>PRECIPITATION D'HYDROXYDE</b>	Chimique	Disponible	Effluents de traitement de surface, rejets d'hydrométallurgie, traitement eaux de lavage de gaz de combustion
			Cr, Cu, Zn, Pb
<b>PRECIPITATION DE SULFURES</b>	Chimique	Disponible	Traitement des eaux usées
			Zn
<b>PRECIPITATION CHELATANTE</b>	Chimique	Disponible	Traitement des eaux usées et effluents liquides
			Pb, Cd, Cu, Hg
<b>ECHANGE IONIQUE</b>	Chimique	Disponible	Traitement des eaux usées et effluents liquides
			Cr, Ba, Pb, Sn, Cu, Mn, Zn, Ni
<b>ADSORPTION AU CHARBON ACTIF</b>	Physique	Disponible	Traitement des eaux usées et effluents liquides (potabilisation, déchloration)
			Ar, Hg, Ni, pesticides, Pb, Cu
<b>ADSORPTION SUR NANOTUBES CARBONE</b>	Physique	En développement	Traitement des eaux usées
			Pb, Cd, Cu, Ni
<b>BIOSORPTION</b>	Physico-Chimique	En développement	Effluents contaminés
			Cd, Cu, Co, Zn, Fe, Pb, Co, Cr, Ni
<b>ULTRAFILTRATION MEMBRANAIRE</b>	Physique	Disponible	Effluents contaminés (traitement des eaux usées, adoucissement d'eau)
			Cd, Zn
<b>OSMOSE INVERSE</b>	Physique	Disponible	Effluent contaminé (traitement des eaux usées, dessalement, industries agroalimentaires etc.)
			Cu, Cr
<b>NANOFILTRATION</b>	Physique	Disponible	Effluent contaminé (traitement des eaux usées, adoucissement d'eau)
			Ca, Mg, Mn, Fe
<b>COAGULATION FLOCCULATION</b>	Physico-Chimique	Disponible	Traitement des eaux usées (potabilisation)
			Cu, Pb, Ni
<b>FLOTTATION IONIQUE</b>	Physico-Chimique	Disponible	Traitement des eaux usées
			Pb, Zn, Cu, Cd

Les coûts associés à chacune des technologies sont à adapter en fonction de l'application. Se rapprocher des principaux constructeurs pour plus de détails.

**EXTRACTION DES MÉTAUX LOURDS****BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Waste Management in the Chemical and Petroleum Industries A.Bahadori (2014) ;
- [2] Novel approach for the treatment and recycle of wastewater from soya edible oil refinery industry, K. Rajkumar (2010) ;
- [3] Oily wastewater treatment by ultrafiltration, B. Reed et al. (2015) ;
- [4] Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review, F.Fu (2015) ;
- [5] Waste materials for activated carbon preparation and its use in aqueous phase treatment : A review, J. Dias et al., (2016) ;
- [6] Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review, Battacharyya et al., (2008) ;
- [7] Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review, T.Kurniawan (2013) ;
- [8] Séparation des métaux lourds existants dans les eaux usées, Georgeta Popescu and Liliana Pasăre, (2006) ;



Cette fiche transversale présente différentes technologies permettant de réaliser une hygiénisation. Elle en présente les fondamentaux scientifiques, l'état d'avancement et les perspectives d'émergence.

### PROBLÉMATIQUES

Les prétraitements d'hygiénisation se sont fortement développés dans le cadre du traitement par méthanisation ou d'épandage de déchets (boues de STEP, huiles alimentaire, biodéchets, sous-produits animaux) et celui du traitement des DASRI. Ce développement est lié à des obligations réglementaires, concernant le traitement des sous-produits animaux le règlement européen (CE n°1069/2009) établit les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux et produits dérivés non destinés à la consommation humaine. La circulaire du 10 janvier 2012, précise, dans le cas du traitement des sous-produits animaux de catégories 3 (lait et ses produits dérivés, œufs, denrées animales cuites ou cuisinés et les déchets de cuisine et de table) : Qu'il s'agisse de compostage ou de méthanisation, le traitement doit alors se faire à une température de plus de 70°C pendant plus d'une heure, ou via une pasteurisation-hygiénisation dont les paramètres de temps et de température présentent un effet hygiénisant équivalent.

Le code de la Santé publique précise la gestion des déchets d'activités de soins à risques infectieux et assimilés (DASRI) ou des pièces anatomiques visés aux articles R. 1335-1 et R. 1335-9 du code de la santé publique. Concernant le traitement des boues, l'Arrêté du 08/01/98 modifié le 03/06/98 fixe les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles. Ce même arrêté définit l'hygiénisation des boues comme un « traitement qui réduit à un niveau non détectable les agents pathogènes présents dans la boue ». Il fixe les seuils de références pour les teneurs en micro-organismes pathogènes des boues hygiénisées.

L'hygiénisation des déchets contenant des charges organiques (sous-produits de l'industrie de la viande, boues de STEP, DASRI) est rendu obligatoire afin d'éliminer les micro-organismes pathogènes. Ces micro-organismes, impliqués dans la digestion anaérobie, sont naturellement présents dans la nature.

La valorisation de certain déchet est inhibée par le caractère infectieux de celui-ci (exemple de la valorisation énergétique des plastiques de DASRI pouvant être intégrés dans la formulation des CSR).

### PRÉTRAITEMENT PAR RADIATION

**Type de procédé :** Physique

**Maturité (échelle TRL) :** En développement (2-3)

#### c. Descriptif du prétraitement :

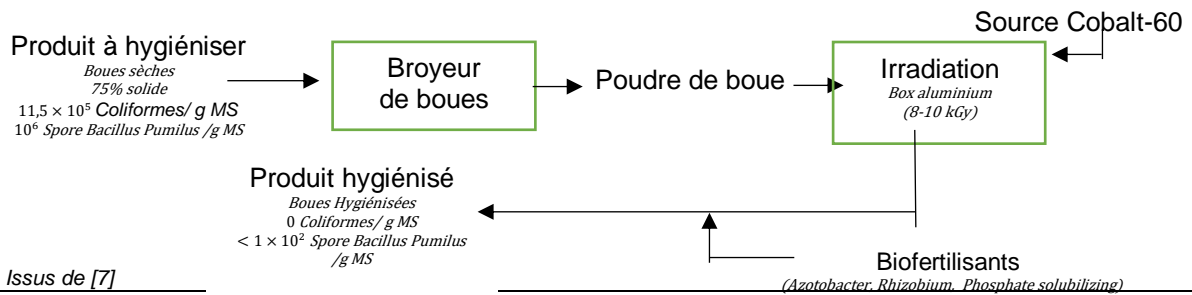
En 2010, le gisement de boues produites par les STEP Française avoisinait 1,1 million de tonnes de matières sèches (MS). De récents travaux ont mis en évidence l'intérêt de l'utilisation du phénomène de radiation dans le traitement par hygiénisation de boues de STEP.

Les radiations émises par le Cobalt-60 vont provoquer l'inactivation des micro-organismes pathogènes.

La première étape consiste à réduire la granulométrie des boues sèches puis d'introduire la boue dans des box en aluminium. Le box d'aluminium contenant les boues sèches est soumis aux radiations de la source de Cobalt-60 (8-10 kGy).

La dernière étape décrit dans [7], consiste en l'ajout de bactéries dites « utiles » (Azobacter, Phosphate) permettant une valeur ajoutée fertilisante.

SCHEMA PROCEDE



Issus de [7]

d. Potentiel d'émergence :

L'utilisation d'une source radioactive entraîne une méfiance quant au potentiel d'émergence de ce prétraitement. Un des avantages est la possibilité d'inoculer davantage de produits biofertilisants dans une boue irradiée qu'une boue non traitée ( $\approx 100$  fois plus en nombre de bactéries biofertilisantes). Les installations connues sont : Ahmedabad (Inde – pilote depuis 15ans, usine de traitement opérationnel en 2017), capacité de traitement 100 t/j. Floride (USA), capacité de traitement 1000 gal/j

PROCEDE STERILWAVE

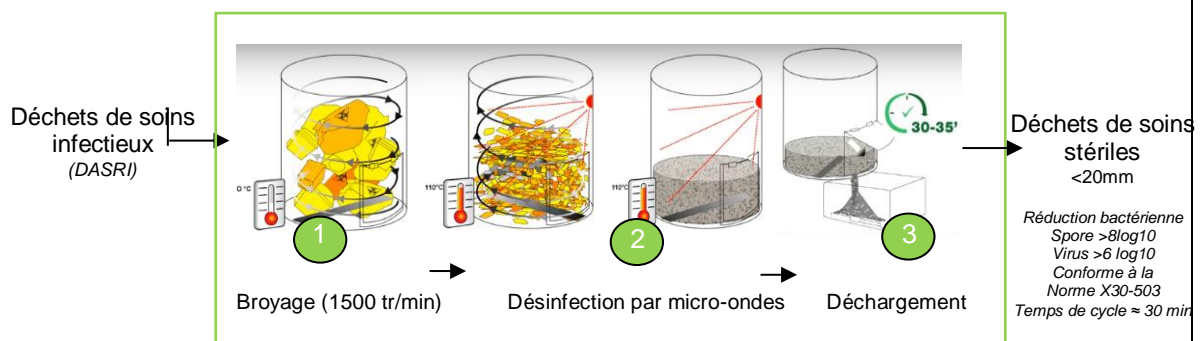
Type de procédé : Physico-chimique

Maturité (échelle TRL) : Disponible (9)

a. Descriptif du prétraitement :

Sterilwave est une solution pour la désinfection des déchets basée sur la technologie micro-onde. L'inactivation microbienne d'un flux de 100 kg dure une heure. Les déchets sont exposés à une température supérieure à 110°C grâce à un générateur haute-fréquence de micro-onde. Ils sont maintenus à cette température pendant 20 minutes dans le but d'inactiver les micro-organismes présents dans les déchets. Sterilwave permet seulement la désinfection rapide des déchets d'un niveau supérieur à 8 log10, et convertit aussi les DASRI en déchets secs et inertes avec une réduction du poids supérieure à 25 % et une réduction du volume de 80%. Sterilwave transforme les déchets hospitaliers et de laboratoires solides ou liquides, en verres, piquants ou coupants. Les capacités de traitement maximales actuelles sont de l'ordre de 70kg/h soit de 400 à 1200 kg de déchets traités par jour.

SCHEMA PROCEDE



b. Potentiel d'émergence :

Sterilwave est un équipement de traitement des déchets hospitaliers pouvant être facilement installé et pouvant fonctionner toute la journée pour un management optimal des déchets hospitaliers liquides, solides et coupants. Les déchets sont finement broyés et désinfectés par un

procédé simple et robuste. Le procédé a été homologué par le ministère de la santé et validé selon la norme NF X30-503. Sterilwave a déjà été testé dans un établissement médical de Compiègne (Oise) pendant un mois, et un autre a été vendu à l'hôpital de l'île Saint-Martin (Martinique). Les avantages majeurs comparés aux autres prétraitements est qu'il permet la stabilisation, le séchage, la réduction massique et volumique et n'engendre pas d'effluents. Il serait intéressant de savoir si le prétraitement est transposable à d'autres déchets (type sous-produits de l'industrie de la viande).

### PROCÉDE STERILPLUS

**Type de procédé :** Thermo-chimique

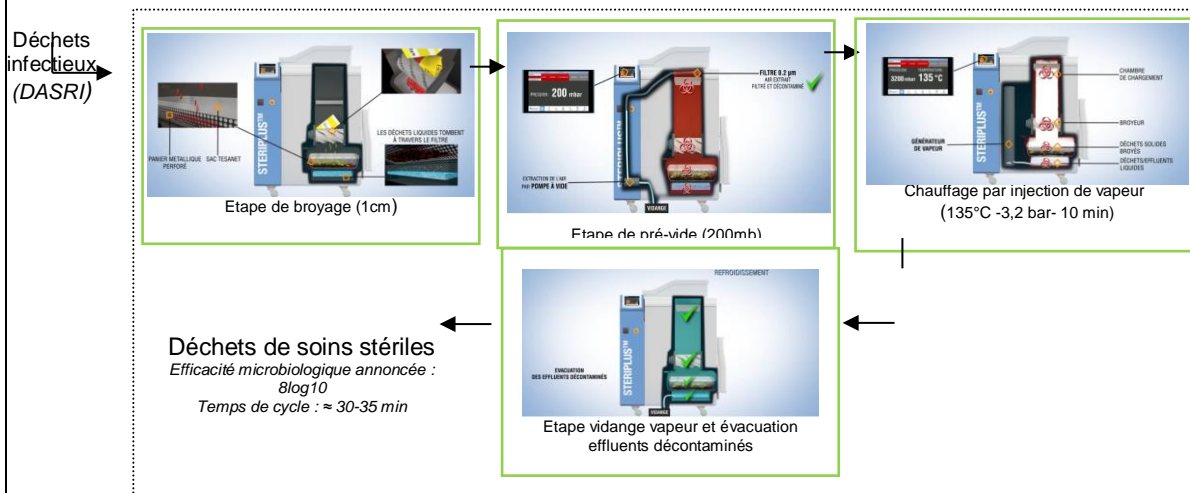
**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

**a. Descriptif du prétraitement :**

Le système Tesalys STERILPLUS est un appareil de prétraitement par désinfection des déchets d'activité de soins à risque infectieux, selon la définition de la norme NF X30-503. Le processus de décontamination consiste en un cycle d'autoclavage/stérilisation classique se déroulant selon les étapes suivantes : Il s'agit en fait d'un stérilisateur (autoclave) avec un broyeur intégré, qui réalise un broyage préalable des déchets et un cycle d'autoclavage à la vapeur à 135°C.

Les déchets infectieux, une fois traités dans le STERILPLUS<sup>TM</sup>, deviennent des déchets assimilables aux ordures ménagères (DAOM), et peuvent être éliminés comme n'importe quel autre déchet industriel banal (DIB) ou les déchets domestiques. Capacité de traitement maximale de l'ordre de 32 kg/h pour une consommation annoncée 8 kW/h.

### SCHEMA PROCÉDE



Procéde AUTOCLAVE sterilPLUS

**b. Potentiel d'émergence :**

Le potentiel d'émergence est à évaluer en corrélation avec la consommation d'énergie du système. Le coût d'investissement semble relativement élevé comparé à des prétraitements d'hygiénisation ayant des performances similaires. De plus, il serait intéressant de savoir si la technique est transposable à d'autres déchets (type sous-produits de l'industrie de la viande).

Le constructeur indique avoir vendues 150 machines dans 20 pays. Deux machines sont actuellement testées par dans une clinique à Toulouse.

### COMPOSTAGE





**Type de procédé :** Biologique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

**a. Descriptif du prétraitement :**

Le compostage est un processus aérobie par lequel les matières organiques sont dégradées par les activités de groupes successifs de microorganismes. Les substrats varient et peuvent inclure différents types de déchets organiques et inorganiques, de boues d'épuration, de porc, de bétail ou de fumier de volaille, de déchets de jardin et de déchets solides municipaux. Les effets positifs des composts sur les sols arables ont été rapportés par de nombreux auteurs (Ibekwe et al., 2001, Bailey et Lazarovits, 2003).

Un processus de compostage efficace et satisfaisant dépend de la présence d'une grande diversité microbienne (Beffa et al., 1996). Différentes communautés microbiennes prédominent au cours des quatre phases consécutives (Blanc et al., 1999; Alfreider et al., 2002; Ryckeboer et al., 2003) impliquant des microorganismes aérobies pilotes mésophiles, thermotolérants et thermophiles (Beffa et al., 1996). La variation continue des conditions environnementales dans les composts (température, pH, aération, humidité, disponibilité des substrats) se traduit par des étapes de croissance exponentielle et des phases stationnaires pour différents organismes. La connaissance de la diversité des communautés microbiennes de compost augmente rapidement grâce à l'utilisation d'outils de biologie moléculaire, tels que le microorganisme COMPOCHIP (Franke-Whittle et al., 2005, 2009, Danon et al., 2008).

Cependant, parmi les préoccupations concernant le processus de compostage et l'utilisation de compost dans l'agriculture et l'horticulture, on trouve la survie et la propagation des agents pathogènes animaux, humains et végétaux. Ainsi, tout processus de compostage doit être capable d'éliminer tout risque pour la santé qui pourrait être présent dans le produit final (Strauch, 1996; Böhnelt et al., 2002). Le compostage, en fonction des températures qu'il atteint provoque des effets d'hygiénisation. Un processus de compostage mal géré peut induire la prolifération et la dispersion de champignons et de bactéries thermotolérants / thermophiles pouvant être pathogènes et / ou allergènes (Beffa et al., 1996).

Il existe deux types de systèmes de compostage, des systèmes d'andain et de navires. Le compostage dans les navires présente plusieurs avantages par rapport au compostage de l'andain, à savoir qu'il nécessite moins d'espace, offre un meilleur contrôle que les andains et offre une efficacité de processus élevée (Cekmecelioglu et al., 2005). On a constaté que les températures plus élevées obtenues dans le compostage de l'andain entraînent une augmentation des réductions bactériennes et pathogènes (Cekmecelioglu et al., 2005). Selon Noble et Roberts (2004), les zones fraîches dans les systèmes de compostage dans les navires où il n'y a pas ou peu de tournage sont préoccupantes pour la survie des agents pathogènes. Ainsi, le compostage de l'andain des déchets d'abattoirs est l'approche la plus appropriée.

**b. Potentiel d'émergence :**

Le compostage fournit une alternative peu coûteuse et une méthode écologiquement acceptable pour l'élimination des déchets d'abattoir. Les températures atteintes pendant le processus de décomposition peuvent tuer ou réduire considérablement la plupart des agents pathogènes, réduisant ainsi les risques de propagation de la maladie. Bien que la chaleur générée lors du compostage aboutisse à une réduction des microorganismes et des nombres de pathogènes, il ne suffit pas de stériliser complètement le produit final, ce qui laisse un certain potentiel de survie et (re) la croissance des agents pathogènes. Les niveaux de bactéries pathogènes restant à la fin du processus de compostage dépendent des températures atteintes et du temps de maintien de la température. Les exigences légales dans différents pays demandent une température minimale de 65 ° C pendant au moins 6 jours consécutifs ou deux périodes de 3 jours > 65 ° C (par exemple Kompostverordnung, 2002). Atteindre une température moyenne de 55 à 60 ° C pendant 1 à 2 jours



## HYGIENISATION

est généralement suffisant pour réduire les virus pathogènes, les bactéries, les protozoaires et les œufs d'helminthes à un niveau acceptablement bas. Cependant, les endospores produites par des bactéries formant des spores telles que *Clostridium* et *Bacillus* ne seraient pas inactivées dans ces conditions (NABC, 2004). Généralement, des valeurs de pH supérieures à 8 sont également obtenues dans le processus de compostage (Reuter et al., 2011), ce qui contribue également à l'inactivation des agents pathogènes. Les agents pathogènes du compost peuvent également être inactivés par l'action d'antibiotiques produits par divers microorganismes présents dans le compost (Hoitink et Boehm, 1999). D'après [8], qui a étudié le couple température/temps/survies des bactéries pathogènes,

### HYDROLYSE ALCALINE

**Type de procédé :** Chimique

**Maturité (échelle TRL) :** Disponible (9)

#### a. Descriptif du prétraitement :

Le procédé utilise de l'hydroxyde de sodium ou de potassium pour catalyser l'hydrolyse de matériaux biologiques (protéines, acides nucléiques, hydrates de carbone, lipides, etc.) dans une solution aqueuse stérile composée de petits peptides, acides aminés, sucres et savons. Afin d'accélérer l'hydrolyse, le procédé se déroule habituellement avec la pression et la température. Pour l'inactivation des pathogènes microbiens, les carcasses doivent être chauffées à 100 ° C et pressurisées à 103 kpa pendant 3 h. Pour détruire le matériau contenant du prion, les carcasses doivent être chauffées à 150 ° C et pressurisées à 486 kpa pendant 6-8 h [9].

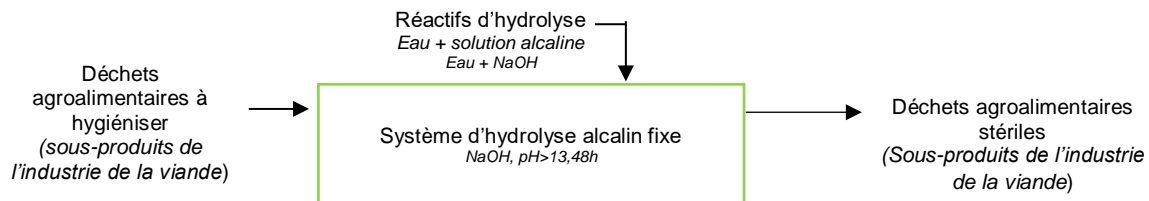
Des études portant sur l'inactivation des agents pathogènes à l'aide d'hydrolyse alcaline (HA) sont limitées, cependant, celles qui existent, indiquent que la méthode peut être efficace. Neyens et al. (2003) ont signalé qu'un processus d'HA effectué à 100 ° C, pH ≈10, 120 kpa et pendant 60 minutes a été capable de tuer tous les agents pathogènes. Malheureusement, il n'a pas été signalé quels agents pathogènes ont été étudiés. Dans une étude plus récente, Dixon et al. (2012) ont étudié l'utilisation d'HA à température ambiante pour l'inactivation du virus de l'anémie infectieuse du saumon pathologique (ISAV) et du *Lactococcus garvieae*. Les deux agents pathogènes ont été inactivés après 48 h de traitement avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à pH > 13 et à température ambiante. L'efficacité de l'HA comme alternative pour le traitement et l'élimination des déchets infectieux a également été évaluée en testant la destruction de microorganismes spécifiques dans une étude de Kaye et al. (2003). L'HA semble détruire toutes les catégories représentatives d'agents potentiellement infectieux.

Le produit final stérile peut être rejeté dans un égout sanitaire, conformément aux directives locales et fédérales concernant le pH et la température (Kaye, 2003). Les études menées par les mêmes auteurs ont montré qu'en faisant barboter du dioxyde de carbone dans l'hydrolysate à la fin de la digestion, le pH du produit final peut être réduit dans la gamme de pH 8 ou moins. Étant donné que l'hydrolysate est composé d'un mélange d'acides aminés simples, de petits peptides et d'acides gras, tous les nutriments de croissance excellents pour les microorganismes (Kaye, 2003), des méthodes d'élimination alternatives pour ce produit de déchets devraient être recherchées. Une possibilité est son utilisation comme engrais (NABC, 2004), mais une autre possibilité qui nécessiterait des recherches supplémentaires, mais qui servirait à la production d'énergie renouvelable, serait son utilisation dans une unité de fermentation anaérobie (AD). Associé à AD, une unité HA pourrait produire d'importantes quantités d'énergie et, en même temps, éliminer en toute sécurité les déchets potentiels d'abattoirs potentiellement contaminés.

Un prétraitement alcalin avec du NaOH a été utilisé dans une étude visant à améliorer la production de biogaz à partir de l'AD de farine de maïs (Zhu et al., 2010). Des concentrations différentes de NaOH (1-7,5% p/p) ont été testées et les préparations ont été soumises à une AD. Les rendements

**HYGIENISATION**

de biogaz les plus élevés ont été obtenus avec 5% de NaOH. Cette étude montre que l'HA des déchets d'abattoir suivis d'AD devrait être considérée comme une voie de traitement potentielle. Le procédé CODECAL, développé pour le traitement des boues d'épuration, est un procédé de chaulage mettant en œuvre une chaux à réactivité retardée qui réalise une hydrolyse alcaline. Le constructeur indique que la réaction d'hydrolyse alcaline de la chaux permet d'hygiéniser la boue, en conduisant à la destruction des constituants cellulaires et des acides nucléiques, par augmentation de PH.

**SCHEMA PROCEDE**

**b. Potentiel d'émergence :**

Il existe de nombreux avantages de l'utilisation d'AH pour l'inactivation des agents pathogènes dans les déchets d'abattoirs. Ceux-ci incluent la combinaison d'une étape de stérilisation et de digestion en une opération, la réduction du volume et du poids des déchets d'environ 97%, la destruction totale des agents pathogènes, y compris les prions tels que l'ESB et les faibles émissions d'odeurs ou de nuisances publiques.

**SYNTHÈSE DES TECHNOLOGIES DISPONIBLES ET ÉMERGENTES**

TECHNOLOGIE	TYPE PROCEDE	MATURITE	APPLICATIONS	COÛTS TRAITEMENT
<b>PRETRAITEMENT PAR RADIATION</b>	Physique	En développement	Traitement des boues (STEP)	OPEX : ≈128 €/tonne
<b>PROCEDE STERILPLUS</b>	Physico-chimique	Disponible	DASRI	CAPEX : 50-74 k€ OPEX : 55 € / tonne
<b>PROCEDE STERILWAVE</b>	Physico-chimique	Disponible	DASRI	CAPEX : 50 k€ OPEX : 63 € / tonne
<b>COMPOSTAGE</b>	Biologique	Disponible	Déchets organiques (biomasse, sous-produits de cultures etc.)	OPEX : ≈17 € / tonne
<b>HYDROLYSE ALCALINE</b>	Chimique	En développement	Sous-produits de l'industrie agroalimentaire (type carcasse etc.), traitement des boues	OPEX : ≈48 € / tonne

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Franke-Whittle IH, Insam H. Treatment alternatives of slaughterhouse wastes, and their effect on the inactivation of different pathogens: A review. *Critical Reviews in Microbiology* ;
- [2] Bonjoch X1, Blanch AR. Resistance of faecal coliforms and enterococci populations in sludge and biosolids to different hygienisation treatments. *Microb Ecol.* (2009) ;
- [3] Hygienization performances of innovative sludge treatment solutions to assure safe land spreading. *Environ Sci Pollut Res Int.* (2015) ;
- [4] Hygienisation and Nutrient Conservation of Sewage Sludge or Cattle Manure by Lactic Acid Fermentation *PLoS ONE.* (2015) ;



## FICHE GNERIQUE 2

# HYGIENISATION

- [5] Levantesi, C., Beimfohr, C., Blanch, A.R. et al. Environ Sci Pollut Res (2015) ;
- [6] Hong SM, Pretreatment of sludge with microwaves for pathogen destruction and improved anaerobic digestion performance. Water Environ Res. (2006) ;
- [7] Radiation Technology for Sewage Sludge Hygienisation. Lalit Varshney – Radiation Technology Development Division – BARC Newsletter ;
- [8] Hygiènisation du fumier de cheval au cours du compostage. P.Doligez (2015)
- [9] [http://ssl-edss.tamu.edu/disposal/handbook/04\\_Alkaline.pdf](http://ssl-edss.tamu.edu/disposal/handbook/04_Alkaline.pdf)

## TRI OPTIQUE DES DÉCHETS

Cette fiche présente les différentes technologies permettant de trier les déchets de façon automatisée basées sur des procédés optiques. Elle en présente les fondamentaux scientifiques, les principales applications ainsi que les perspectives de développement.

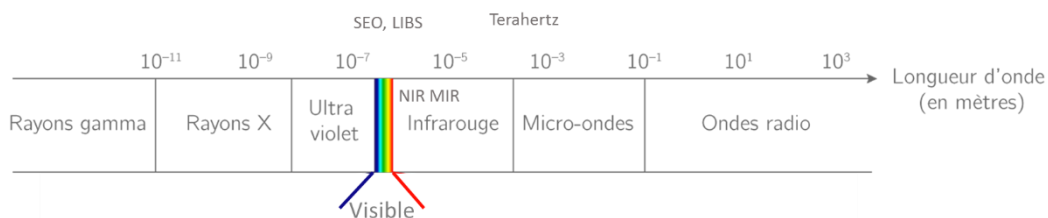
### PROBLÉMATIQUE

Les objectifs de valorisation des déchets fixés notamment par la directive cadre 2008/98/CE et par la loi Grenelle du 12 juillet 2010 pour la période 2012-2020 imposent l'amélioration des techniques de tri actuelles. Les techniques existantes doivent être adaptées pour mieux valoriser en qualité et en quantité les déchets produits. Afin de répondre aux évolutions des gisements de plus en plus diffus, comprenant des matériaux complexes ou nouveaux, des nouvelles technologies doivent également être développées.

L'offre de technologies de tri automatique des déchets est en plein essor, avec une trentaine de constructeurs proposant des systèmes de tri avancé.

Les technologies de tri optique basées sur l'analyse non destructive des matériaux en fonction de leur spectre visible, infrarouge ou de fluorescence, sont nombreuses et permettent d'identifier et de séparer toute sorte de matériaux : verres, plastiques, bois...

D'autres techniques font l'objet de nombreux projets de développement à l'échelle pilote (LIBS) ou à l'échelle du laboratoire (incorporation de traceurs dans les polymères, spectroscopie Terahertz, ultrasons, spectroscopie Raman).



Spéctre de radiation électromagnétique

Les machines de tri optiques sont équipées d'un système de détection qui permet d'identifier la nature du matériau et d'un système d'éjection (buses à air comprimés) pour séparer les objets. Elles sont le plus souvent associées à des tris mécaniques en amont (trommel, crible balistique...) et d'un tri manuel aval.

Un exemple d'application concerne l'identification des plastiques (polypropylène, polyéthylène, polystyrène, polychlorure de vinyle, polyéthylène téréphtalate) pour faciliter leur valorisation.

Ces technologies se développent également fortement pour la filière bois afin de favoriser une valorisation matière ou énergie.

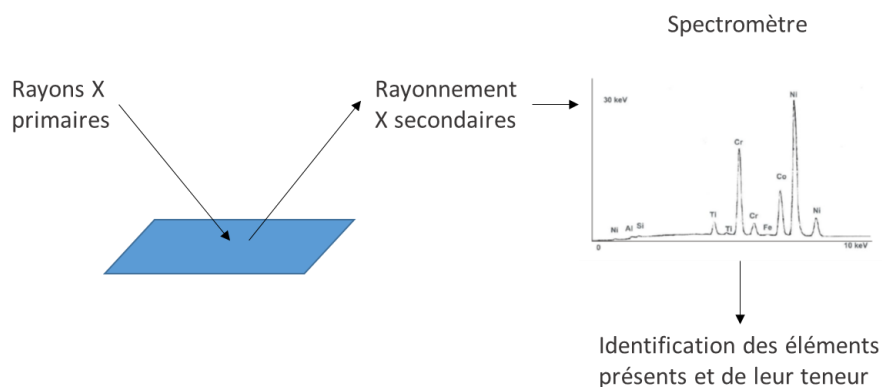
**TRI OPTIQUE DES DÉCHETS**
**FLUORESCENCE X (XRF)**

**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (TRL9) :** Disponible

**DESCRIPTIF**

Le principe de la fluorescence consiste à envoyer des rayons X sur les déchets à analyser. Ces rayons X dits « primaires » vont exciter les atomes qui vont émettre à leur tour un rayonnement X dit « secondaire » qui est analysé par un spectromètre. L'analyse du spectre émis permet d'accéder à la composition élémentaire et à la concentration de chaque élément.

**Schéma de principe**

**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

Cette technique est principalement utilisée pour le tri des alliages contenant des métaux de teneur variable. Elle est également utilisée dans l'industrie verrière pour le tri du verre au plomb. Des systèmes portables sont disponibles.

Des développements sont en cours pour le tri des bois C (traverses de chemin de fer, poteaux téléphoniques et EDF, palissades traitées, bois injecté à cœurs aux sels métalliques CC (cuivre, chrome et arsenic).

**LIMITES**

L'XRF peut détecter la présence de RFB dans des DEEE par reconnaissance du<sup>2</sup> brome, mais sans identifier la molécule. Pour cela, un couplage est nécessaire avec de l'infrarouge.

**SPECTROMÉTRIE PROCHE INFRAROUGE (NIR)**

**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (TRL 9) :** Disponible

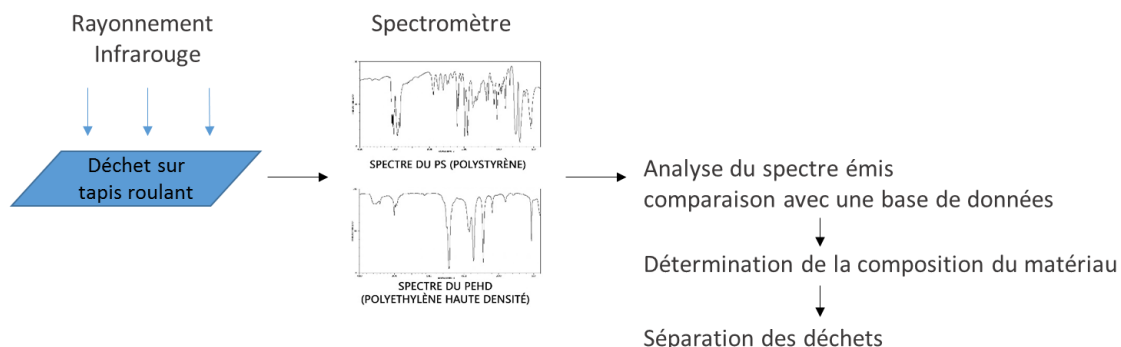
**DESCRIPTIF**

La spectrométrie proche infrarouge est basée sur l'étude du spectre d'absorption d'un faisceau de lumière proche infrarouge par un matériau qui permet de mettre en évidence la structure des molécules. Elle permet donc de reconnaître la composition d'un matériau.

## TRI OPTIQUE DES DÉCHETS

Les déchets sont acheminés par un tapis roulant vers un scanner, les spectres IR des déchets sont analysés en l'espace de quelques millisecondes par un ordinateur et comparés avec ceux d'une base de données. En fonction des spectres détectés et donc de leurs compositions, les déchets sont ensuite soufflés grâce à de l'air comprimé vers différentes goulottes.

### Schéma de principe



### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :

Le NIR est utilisé pour trier les polymères et les fibreux (papier, coton, textile) entre eux, le PVC et autres chlorés.

Le NIR permet également de séparer des déchets de bois de classe A et classe B avec une pureté supérieure à 85 %. Cette application a été développée par PELLENC ST pour du bois B (bois de démolition et dérivés : fenêtre, meubles, bois de panneau de particules) avec une teneur en peinture inférieure à 2 %, et en vernis teneur inférieure à 1%, des agglomérés à grain moyen contenant fibres et colles entre 5 à 10 %).

Une autre application concerne la séparation des plastiques entre eux, sous forme de bouteille non broyées (PP, PS, PET, PE, PVC, ABS, PEN, PAN) ou sous forme de broyats (emballages, DIB, DEEE, RB). La séparation du flux de métaux des cartes électroniques dans les DEEE a pu être réalisée selon cette technique (Mistral, PELLENC)

Le NIR est souvent combiné avec un séparateur à courant de Foucault pour réaliser un tri complet de mélanges multi matériaux (emballages par exemple).

### LIMITES

Le NIR ne peut pas être utilisé pour détecter les métaux, les retardateurs de flamme bromés, les déchets sombres ou noirs.

### SPECTROMÉTRIE VISIBLE (ANALYSE DE LA COULEUR)

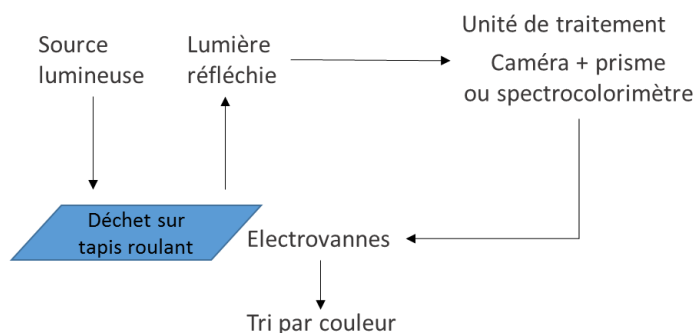
**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (TRL9) :** Disponible

#### DESRIPTIF

L'analyse du spectre visible d'un matériau permet de trier les déchets par couleur. Le capteur peut être soit une caméra couleur couplée un prisme, soit un spectrocolorimètre qui fournit des résultats plus sélectifs.

Les déchets placés sur un tapis roulant sont éclairés par des lampes halogènes. La lumière réfléchie est envoyée sur un capteur relié à un système de traitement qui commande des électrovannes permettant d'éjecter les objets selon deux ou trois familles de couleur.

**TRI OPTIQUE DES DÉCHETS**
**Schéma de principe**

**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

Cette technique est utilisée pour le tri des verres colorés, des matières plastiques (PET, PE, PP...), des papiers et des métaux type cuivre, bronze et aluminium.

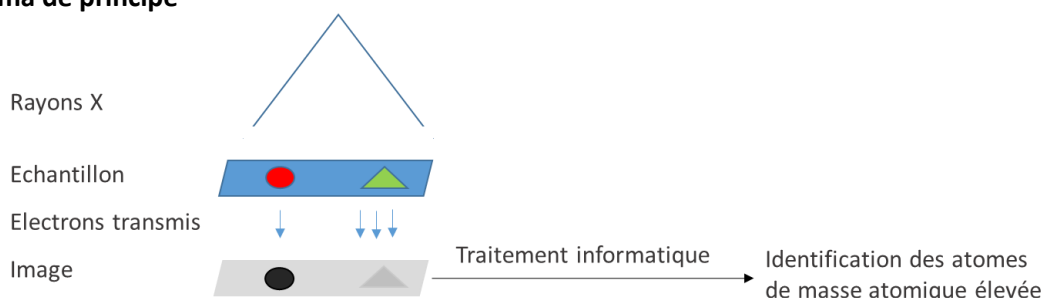
**RAYON X PAR TRANSMISSION (XRT)**

**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (TRL9) :** Disponible

**DESCRIPTIF**

Le XRT utilise le principe de la radioscopie. Il consiste à envoyer des rayons X sur le matériau, l'image obtenue par transmission est ensuite analysée par un traitement informatique. Capable de détecter la matière au niveau de l'atome, il convient particulièrement à la détection des métaux. Le XRT peut également reconnaître un matériau contenant des atomes spécifiques, par exemple les atomes de brome dans les retardateurs de flamme.

**Schéma de principe**

**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

Cette technologie permet de reconnaître les atomes de masse atomique élevée, notamment les métaux et les halogènes. Elle permet donc de trier les métaux non ferreux entre eux, de détecter les plastiques contenant des additifs bromés ou chlorés (sans différencier le type de molécule). Elle est également utilisée pour séparer le verre dopé au plomb et le verre dopé et baryum. Le projet FRISP, porté par Paprec et Pellenc ST, vise à développer une chaîne de tri automatique des déchets plastiques contenant des retardateurs de flamme.

## TRI OPTIQUE DES DÉCHETS

### LIMITES

La technique ne permet pas de différencier les molécules d'additifs bromés et ne fonctionne pas sur les bouteilles remplies d'eau ou écrasées.

### SPECTROMÉTRIE D'ÉMISSION OPTIQUE (SEO)

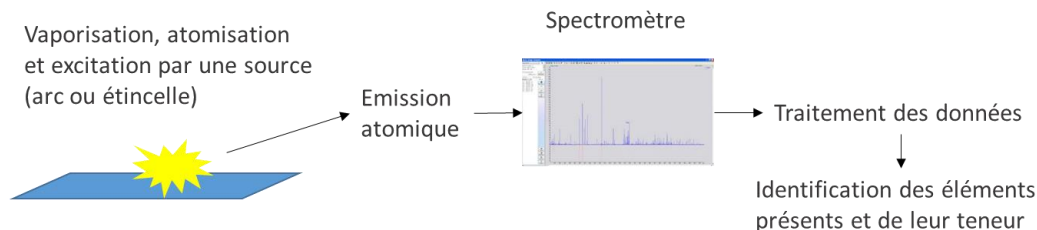
**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (TRL9) :** Disponible

#### DESRIPTIF

La spectrométrie d'émission optique consiste à exciter les atomes d'un matériau par une étincelle, une décharge ou un plasma, et à analyser le spectre émis lors de la désexcitation de ces atomes. Le spectre d'émission est un spectre de raies caractéristique d'un élément, et l'intensité de ces raies est proportionnelle à la concentration de l'élément.

#### Schéma de principe



#### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :

La SEO est la technique de référence pour l'analyse qualitative et quantitative des échantillons métalliques solides. Elle est donc très répandue en métallurgie pour caractériser les bases fer/acier, aluminium, cuivre, nickel, zinc et alliage, plomb.

Des systèmes portatifs ou de laboratoire sont disponibles. Les systèmes portatifs ou à sonde déportée sont particulièrement adaptés pour le tri des déchets.

#### LIMITES

La SEO est une technique d'analyse destructive, donc à priori non adaptée aux procédés de tri en continu.

### LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS)

**Type de procédé :** Analyse physicochimique

**Maturité (9) :** Disponible au laboratoire, émergent dans le domaine du tri des déchets

#### DESRIPTIF

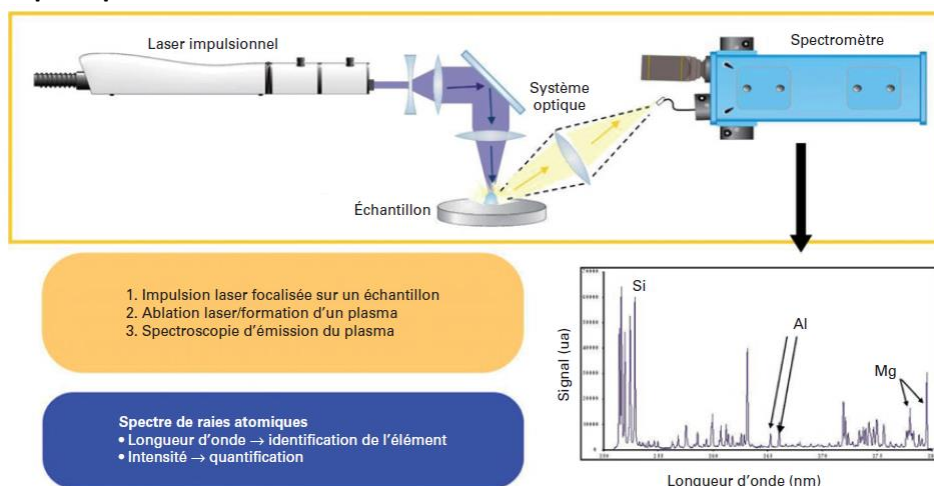
La spectrométrie d'émission optique de plasma induit par laser (Laser-induced breakdown spectroscopy ou LIBS) est une technique d'analyse rapide non destructive des échantillons. La LIBS consiste à envoyer à la surface d'un échantillon une impulsion laser de courte impulsion (5 à 10ns) qui va engendrer la production d'un microplasma à la surface du matériau. Les atomes, ions et molécules excités dans le plasma, se désexcitent en émettant des rayonnements caractéristiques dans des domaines de longueur d'onde allant de l'UV lointain au proche IR. L'étude du spectre



## TRI OPTIQUE DES DÉCHETS

d'émission permet de déterminer la composition chimique (élémentaire) de l'échantillon. L'identification des matériaux est possible par des méthodes statistiques dites « multivariées ».

### Schéma de principe



Source : LIBS, spectrométrie d'émission optique de plasma induit par laser, juin 2015, Techniques de l'ingénieur. Mesures-Analyses / Techniques d'analyse

### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :

La LIBS, technique d'analyse élémentaire non intrusive, sans contact, sans prélèvement ni préparation d'échantillon est une technique privilégiée pour l'analyse en ligne des procédés, l'analyse in-situ et l'analyse à distance. Pour ces applications, l'instrumentation devient de plus en plus compacte, des systèmes portables ou déportés par fibres optiques.

La technique a été testée pour le tri des déchets d'aluminium, des rebuts et scories, des produits miniers, des métaux, du verre, des polymères.

Bertin Technologie et Pellenc ST ont commencé à développer cette technologie pour le tri des plastiques dans les DEEE et les VHU en 2009 (projet Elit Systems). Le projet WEELIBS, porté par le CRITT Matériaux Alsace, a permis la mise au point d'un système portable permettant de détecter les retardateurs de flamme bromés et d'identifier les nuances de résine (PP, PVC, ABS...) appliqué au démantèlement des DEEE.

### INCORPORATION DE TRACEURS DANS LES POLYMERES (TRA)

**Type de procédé :** Incorporation chimique, analyse physicochimique

**Maturité (TRL 4) :** En développement

#### DESCRIPTIF

Le principe de la technique consiste à incorporer des traceurs (terres rares ou traceurs magnétiques) en faible quantité dans les polymères fabriqués. Ces traceurs seront ensuite facilement détectables par les systèmes de tri optique (fluorescence X, fluorescence UV, IR, activation neutronique, détection magnétique...)

Cette technologie est utilisée pour des applications de tri des métaux, en biologie et en médecine.

**TRI OPTIQUE DES DÉCHETS**
**Schéma de principe (exemple des RBA)**

**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

Cette technologie peut répondre à la problématique de l'identification et du tri des polymères de couleur sombre qui restent difficiles à réaliser de façon automatisée. Plusieurs projets de R&D visent à améliorer la rapidité et la qualité du tri des polymères contenus dans les VHU, et à étendre cette technologie aux DEEE (projet TRIPTIC) et aux emballages. Cette technologie pourrait être utile pour le tri des déchets broyés, le marquage des pièces n'étant plus reconnaissable.

Le déploiement de la technologie TRA nécessite la mise en place d'une codification des déchets plastiques au niveau européen.

**SYNTHÈSE**

TECHNOLOGIE	APPLICATIONS	FABRICANTS	COÛT INVESTISSEMENT(k€)
<b>XRF</b>	Alliages, détection de RFB, verre au plomb	Ametek, Austin, GreenMatech, Steinert, Mogensen, Redwave	ND <sup>2</sup>
<b>NIR et MIR</b>	OMR, emballages et papiers, DEEE (plastiques avec additifs bromés), VHU, Bois, déchets de construction	Eagle Vizion, NRT, Hamos, S+S, Steinert, PELLENC ST, TOMRA	80-250
<b>VIS</b>	Emballages plastiques et papiers, DEEE, métaux non ferreux, menuiseries en PVC, verre	NRT, Satake, S+S, Steinert, Mogensen, Rhewum, Binder, Pellenc ST, TOMRA	80
<b>NIR+VIS</b>	Emballages plastiques et papiers,	MSS, NRT, Green Machine, BT Wolfgang Binder, Pellenc ST, TOMRA	150-300
<b>XRT</b>	Métaux et alliages, plastiques contenant des additifs bromés, piles et accumulateurs, PVC	NRT, S+S, Best, PELLENC ST, TOMRA, Steinert	250-350
<b>SEO</b>	Métaux	Ametek Spectro, Bruker, Thermo Scientific	80 (appareil portatif)

<sup>2</sup> ND : Non disponible

**TRI OPTIQUE DES DÉCHETS**

<b>LIBS</b>	Polymères, métaux et alliages, verre, déchets d'aluminium,	IVEA	50-110 (portatif) 400 (en ligne)
-------------	--	------	-------------------------------------

Les applications recensées sont pour la plupart au stade industriel ou commencent à être industrialisées, sauf pour la LIBS et le TRA.

Les développements récents consistent à combiner différentes techniques, par le développement d'installations multi capteurs ou au moyen de machines mise en cascade.

Ainsi, la combinaison des techniques NIR, de la détection de couleur (VIS) et de l'induction est largement utilisée dans l'industrie. Elle est utilisée pour le tri des bouteilles PET cristal, sur le tri des métaux et des polymères dans les cartes électroniques broyées.

Au-delà de l'amélioration de l'efficacité des capteurs, l'optimisation de la phase d'éjection des produits, réalisée par air comprimé, est également un des axes de développement des technologies de tri automatisées.

**BIBLIOGRAPHIE**

Le tri optique appliqué aux différentes classes de bois, Pierre Mortelmans, Pellenc Selective Technologies.

<http://www.pellencst.com/fr/>

Etat de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets, ADEME, septembre 2012.

LIBS, spectrométrie d'émission optique de plasma induit par laser, juin 2015, Techniques de l'ingénieur. Mesures-Analyses / Techniques d'analyse

Ecoconception pour une approche multicritère d'un système polymère/traceur/détecteur pour le tri automatisé par spectrométrie de fluorescence UV-VIS en vue d'augmenter la recyclabilité des produits, Elisabeth Maris, thèse ENSAM, 2016.

**SECHAGE/EXTRACTION D'EAU**

Cette fiche transversale présente différentes technologies permettant la déshydratation. Elle présente les fondamentaux scientifiques, l'état d'avancement et les perspectives d'émergence.

**PROBLEMATIQUES**

La déshydratation est une opération unitaire qui permet de réduire voire d'éliminer l'eau qui imprègne un produit (boueux ou solide) afin de le transformer en produit solide dont l'humidité résiduelle est très faible.

Elle se pratique dans divers cas :

- réduire la masse pour réduire le coût du transport et éventuellement le coût de la mise en décharge
- l'humidité résiduelle est incompatible avec la suite du procédé
- le produit humide se conserve mal (hydrolyse possible, dégagement gazeux, production de lixiviat, ...)

**Les différents modes de déshydratation**

La déshydratation et notamment le séchage sont connus et utilisés depuis toujours bien avant l'industrialisation. Il en existe principalement deux grandes familles, mécanique et thermique.

La **déshydratation mécanique** regroupe divers procédés sous diverses appellations selon les moyens utilisés : Filtre presse et filtre à bande, filtre à tambour,essoreuse et centrifugeuse.

La **déshydratation thermique** (le séchage) regroupe également divers procédés sous diverses appellations selon les moyens utilisés : séchage conductif, séchage convectif, séchage par infrarouge ou micro-ondes, et la lyophilisation.

**Les besoins énergétiques** : La moyenne pour un sécheur thermique est de 1830 kWh/t MS. Pour les appareils mécaniques (Degremot1992) elle varie de 10-25 kWh/t MS pour un filtre à bandes, de 20 à 40 kWh/t MS pour un filtre à plateaux, de 30 à 60 kWh/t MS pour une centrifugeuse et de 50 à 150 kWh/t MS pour un filtre sous vide.

En contrepartie la déshydratation mécanique ne peut atteindre que des siccités relativement faibles par exemple de 14 à 27% pour les boues de STEP.

La déshydratation thermique étant nettement plus énergivore, la combinaison avec la déshydratation mécanique est quasi systématique dès que cette dernière est d'une part possible et d'autre part insuffisante pour atteindre la siccité souhaitée.

**Note** : que les moyens de déshydratation mécanique nécessitent des coagulants et génèrent des fluides qui peuvent nécessiter un traitement

**DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR FILTRE PRESSE**

**Type de procédé :** Physique

**Maturité (TRL 9) :** Disponible

**DESCRIPTIF**

La matrice est pressée entre deux filtres (filtre à bande ou filtre presse). Le liquide est expulsé aux travers des filtres alors que le solide est comprimé pour occuper tout le volume disponible.

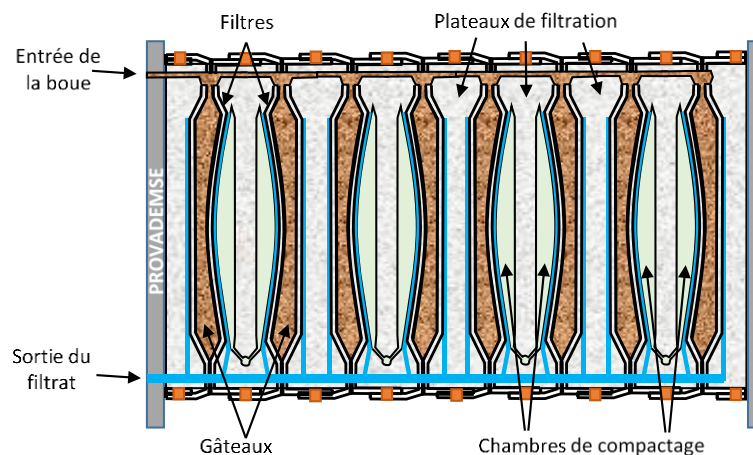
Dans le cas du filtre presse, le produit à filtrer est introduit par l'intermédiaire d'une pompe jusqu'à la pression nécessaire (généralement 7 à 8 bars). Sous cette pression le liquide passe à travers la toile qui retient les particules solides. Ce filtrat est collecté soit au niveau de chaque plateau soit en bout de filtre. L'accumulation de matière entre les plateaux induit une perte de charge qui est compensée par la pompe d'alimentation. Certains appareils sont équipés de chambre de compactage ce qui permet l'essorage des gâteaux et également le déchargement en fin de cycle.

Ces appareils peuvent permettre la réalisation d'un lavage à l'eau, une seconde compression et même un léger séchage par soufflage à l'air.

Dans le cas d'un filtre à bande, la matrice est distribuée sur une bande filtrante qui est juste après recouverte par une deuxième bande. Les bords sont joints par compression et le reste de la bande passe entre des rouleaux de plus en plus proches, ce qui engendre un écrasement de la matrice de plus en plus fort.

A noter que certains produits nécessitent une étape de conditionnement préalable au moment de la filtration par l'ajout de réactifs (coagulant/floculant) qui permettent ainsi leur filtration

**Schéma de principe d'un filtre presse**



**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

La filtration au moyen de filtres est bien maîtrisée et disponible au niveau industriel.

## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

### LIMITES :

La matrice doit être relativement fluide et pompable. Elle est donc surtout utilisée pour des boues constituées principalement de particules fines. Toutefois, une fraction grossière de moins de 10% allant de 5 à 8 mm peut être tolérée dans certains cas.

### DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR FILTRE À TAMBOUR

**Type de procédé :** Physique

**Maturité (TRL 9) :** Disponible

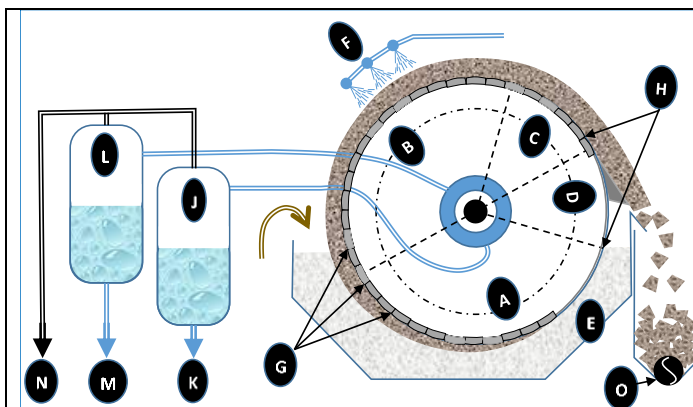
#### DESRIPTIF

La solution est aspirée au travers d'un filtre entourant un tambour partiellement immergé. La zone de filtration se situe dans la partie immergée. Se suivent ensuite les zones d'assèchement, de rinçage, puis d'assèchement final.

Le principe de fonctionnement consiste à aspirer sous vide les eaux interstitielles d'une boue. La boue s'agglutine sur le filtre pour former une couche mince qui est raclée en permanence; le colmatage est donc inexistant et le débit horaire sensiblement constant durant toute la filtration. Les débits sont fonction de la pression de la surface de la toile et surtout de la matrice filtrée (matrice plus adjuvant).

Le tambour est divisé en secteurs qui ne communiquent pas entre eux. Le filtrat et éventuellement les eaux de rinçage sont évacués à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à un collecteur indépendant qui assure la séparation air / liquide.

#### Schéma de principe



- A secteur de filtration
- B secteur de lavage
- C secteur d'arrosage
- D déchargement
- E d'alimentation en préfiltre
- F jets de lavage
- G cellules
- H toile filtrante
- J ballon de récupération du filtrat
- L sortie du filtrat
- M ballon eaux de lavage
- N sortie des eaux de lavage
- O Aspiration – mise sous vide

Figure 1: Filtre sous vide rotatif à tambour à cellules périphériques (d'après Meriguet G. 2007)

#### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :

La filtration au moyen de filtres à tambour est bien maîtrisée et disponible au niveau industriel. Elle est utilisée pour les boues fluides et notamment pour des boues organiques qui ont tendance sous pression à se déformer et boucher les filtres.

## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

**LIMITES** : La technologie nécessite souvent une pré-couche de filtration.

### DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR CENTRIFUGEUSE

**Type de procédé** : Déshydratation mécanique par centrifugation

**Maturité (échelle TRL)** : Disponible

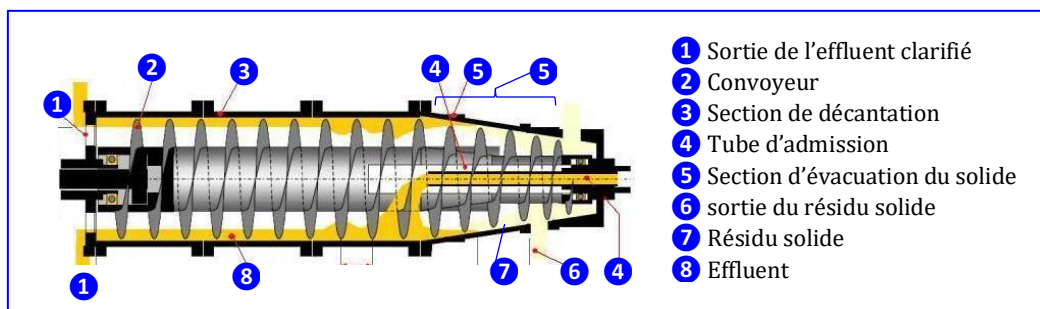
#### DESCRIPTIF

Cette technologie utilise la force centrifuge pour plaquer le long des parois du dispositif les particules solides et laisse une lame d'eau claire à la surface latérale de la partie cylindrique. La centrifugation est une opération de séparation mécanique, par action de la force centrifuge. Il s'agit d'entraîner un appareil (appelé le "bol") à grande vitesse, en rotation autour d'un axe. Sur le schéma ci-dessous, l'eau circule de la droite vers la gauche. La boue arrive par la zone d'admission (4), puis elle subit une séparation selon le procédé suivant. Un convoyeur (ici en gris) tourne de 1000 à 4000 tours par minute et accélère les particules de la boue jusqu'à 3000 g ( $g$  = intensité de pesanteur). Les solides plus lourds sont collés le long des parois et expulsés vers l'extérieur par le convoyeur à vis. Ils sont évacués par la droite (6) tandis que l'effluent aqueux est évacué vers la gauche (1). On obtient ainsi une eau clarifiée.

L'efficacité de la centrifugation dépend de plusieurs paramètres:

- le diamètre des particules.
- la différence de densité.
- la viscosité du fluide, qui diminue avec l'élévation de la température.
- la surface de base du bol.
- la vitesse de rotation.

#### Schéma de principe



#### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :

Cette technologie est bien maîtrisée et disponible au niveau industriel.

Dans le cas du traitement de déchets, elle est utilisée pour des boues humides qui donneront une phase liquide et des boues sèches qui iront chacune sur une chaîne de traitement particulière. Elle s'utilise également pour la séparation de fluide diphasique voir plus. La centrifugation peut donc être utilisée pour séparer des hydrocarbures d'une phase aqueuse

**LIMITES** : utilisée pour des matériaux fins et fluides



**SECHAGE/EXTRACTION D'EAU**
**DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR ESSOREUSE**

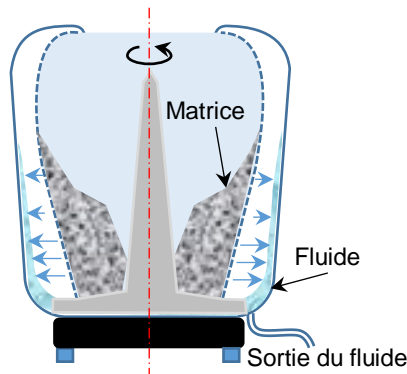
**Type de procédé :** physique

**Maturité (TRL 9) :** Disponible

**DESCRIPTIF**

Essoreuse : concerne les matrices particulaires. La solution est expulsée au travers d'une grille par la force centrifuge. S'il existe des particules fines, elles passeraient au travers de la grille qui ici n'est pas un filtre. Cette technique ne pourrait être utilisée que pour des niches particulières. C'est utiliser par exemple pour les copeaux de bois avant le séchage thermique.

L'essorage est une opération de centrifugation douce et munie d'une grille.

**Schéma de principe**

**APPLICATIONS ET POTENTIEL D'ÉMERGENCE :**

Cette technologie est bien maîtrisée et disponible au niveau industriel.

Elle est applicable aux matériaux granulaires n'ayant pas de fines.

**DESHYDRATATION THERMIQUE**

Un produit dont la pression partielle de vapeur d'eau est supérieure à celle de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant, sèche en transférant une partie à l'air sous forme de vapeur d'eau.

Le séchage peut être conductif ou convectif selon le moyen de transfert ou d'apport de la chaleur.

Le séchage est dit conductif si le produit est mis en contact avec des surfaces chaudes (cas du sécheur à tambour rotatif). Il est dit convectif si la chaleur est transmise par un courant d'air chaud, envoyé sur le produit à sécher, il fournit la chaleur et entraîne la vapeur formée.

Le chauffage peut également être effectué par Infra Rouge ou Microondes : la matrice est soumise à un rayonnement électromagnétique. Ce mode de séchage se fait sur de faibles épaisseurs. L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générées soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge. En infrarouge le chauffage se manifeste sur des épaisseurs très faibles (500 µm). L'utilisation des micro-ondes permet de sécher des épaisseurs plus importantes. Le champ électromagnétique véhiculé par ces fréquences génère une agitation moléculaire qui entraîne un échauffement du produit et donc la vaporisation des molécules d'eau. Ces méthodes étant onéreuses, elles ne sont pas utilisées pour des déchets.



## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

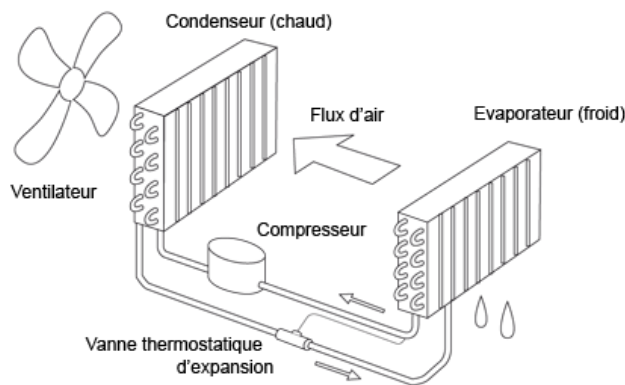
La lyophilisation est également une méthode de séchage. La matrice est congelée (en dessous de -20°C) puis amenée à très basse pression pour en sublimer la glace qu'il contient. La technique de lyophilisation est très peu productive et très coûteuse en énergie, elle est de ce fait réservée aux produits de haute valeur ajoutée.

Les dispositifs de séchage sont relativement nombreux en fonction de la matrice à sécher, de sa nature et du but recherché. Dans tous les cas le principe est le même.

Principe : On amène de la chaleur pour évaporer l'eau d'humidité et un courant d'air pour évacuer l'air humide et le renouveler par de l'air plus sec. Ce système est dit ouvert il fonctionne lorsque l'humidité de l'air extérieur est faible et sa température plutôt moyenne.

Dans l'absolu un système en circuit fermé qui fonctionne dans tous les cas est constitué d'un ventilateur qui aspire l'air humide autour de la matrice et le transporte à travers un évaporateur réfrigéré. L'air est refroidi sous le point de rosée. L'eau condense sur la surface froide de l'évaporateur et ruissèle dans un système d'évacuation. Ensuite, l'air froid continue à travers un condenseur chaud qui le chauffe et revient dans la pièce pour récupérer de l'humidité à nouveau. Cette procédure est continue jusqu'à l'obtention des conditions souhaitées (voir le schéma ci-dessous).

### Schéma de principe de la déshydratation thermique



### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'EMERGENCE :

Le séchage est une technologie très développée. Chaque constructeur apporte des modifications et améliorations selon les applications de ses clients, et se spécialise ainsi dans tel ou tel type de matière. Pour les matières fines ou légères, il est conseillé la méthode indirect pour éviter les envols.

Le choix de la technologie ne concerne pas que l'opération de séchage elle-même, souvent les difficultés sont autres : assurer l'étanchéité, transporter la matière, éviter les agglomérations, émettre efficacement la matière durant le séchage, homogénéité du séchage ...

### LIMITES

La déshydratation thermique (séchage) consomme plus d'énergie que la déshydratation mécanique. Cependant, elle peut être préférée lorsque qu'une source de chaleur produite par un process annexe est disponible.

## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

### SECHEUR A TAMBOUR ROTATIF

**Type de procédé** Physique

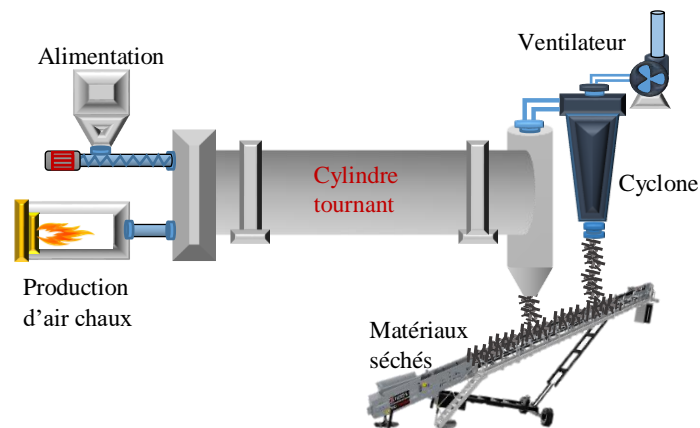
**Maturité (TRL 9)** : Disponible

#### DESCRIPTIF

Sécheur à tambour : La matrice traverse un long tube tournant. La chaleur est souvent amenée par le tube lui-même. Il est muni de lamelles soudées tout au long du tube de sorte que lors de la rotation les lamelles entraînent la matière vers le haut qui finit par chuter et se retourner. Un léger courant d'air est maintenu pour évacuer l'air humide.

Dans le schéma ci-dessous si l'air chaud produit traverse directement le cylindre et entre en contact du matériau, le chauffage est dit convectif ou direct. Si cet air passe par une double enveloppe pour chauffer la paroi cylindrique interne qui chauffera la matière à sécher par contact, le chauffage est dit conductif ou indirect.

#### Schéma de principe



#### APPLICATIONS ET POTENTIEL D'EMERGENCE :

Le sécheur à tambour rotatif est disponible industriellement.

Il est utilisable sur tous types de déchet, et notamment pour les déchets en mélanges.

**LIMITES** Le procédé n'est pas adapté aux produits collants, ni aux produits fragiles

**SECHAGE/EXTRACTION D'EAU****SECHEUR THERMIQUE A LIT FLUIDISE**

**Type de procédé** Physique

**Maturité (TRL 9)** : Disponible

**DESCRIPTIF**

Le sécheur à lit fluidisé consiste en une chambre cylindrique ou conique. Le lit est formé soit par le matériau à sécher, soit par un matériau inerte type gravier maintenu en suspension par un courant d'air chaud. La matrice à sécher est introduite à la base et au centre du lit. Les agrégats entrent en contact de l'air chaud et des autres particules, ce qui produit leur effritement puis leur séchage. Les particules deviennent de plus en plus petites et de plus en plus sèches et s'élèvent dans le lit pour sortir complètement sèches en état de sable.

Le solide est récupéré via un cyclone. L'air peut être quasi totalement dépoussiéré en ajoutant une filtration à la sortie, comme sur le schéma ci-dessous.

**Schéma de principe****APPLICATIONS ET POTENTIEL D'EMERGENCE :**

Le sécheur thermique à lit fluidisé est utilisé pour sécher des boues et des cendres.

Il est particulièrement adapté aux produits fins et granulaires.

**LIMITES** : concerne des matériaux de densités homogènes et de granulométries resserrées.



## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

### SYNTHÈSE

TECHNOLOGIE	TYPE PROCÉDE	APPLICATIONS
<b>DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR FILTRE PRESSE</b>	Physique	Boues fluides riches en minéraux
<b>DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR FILTRE À TAMBOUR</b>	physique	Boues fluides et notamment pour des boues organiques supportant mal la filtration sous pression
<b>DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR CENTRIFUGEUSE</b>	physique	Boues fluides et effluents di et triphasiques
<b>DESHYDRATATION MÉCANIQUE PAR ESSOREUSE</b>	physique	Matériaux granulaires n'ayant pas de fines
<b>SECHEUR À TAMBOUR ROTATIF</b>	Thermique	Tous types de déchet, et notamment pour les déchets en mélanges
<b>SECHEUR THERMIQUE À LIT FLUIDISE</b>	Thermique	Matériaux de densités homogènes et de granulométries resserrées

Les procédés de déshydratation mécaniques et thermiques sont relativement bien maîtrisés et disponibles à l'échelle industrielle. Ils font l'objet d'améliorations continues selon l'application visée et les besoins des clients.

Les procédés physiques permettent d'atteindre une siccité tel que le résidu ait une apparence solide notamment pour le filtre presse et à minima atteindre un état pelletable. Le taux de siccité dépend de la nature du résidu. Ils peuvent conduire à des effluents chargés qui devront être traités ensuite.

La déshydratation mécanique ne peut atteindre que des siccités relativement faibles (par exemple de 14 à 27% pour les boues de STEP). Un procédé thermique additionnel peut être nécessaire pour atteindre le taux de matière sèche souhaité.

Les procédés thermiques sont plus coûteux mais permettent d'atteindre le taux de matière sèche souhaité.

### BIBLIOGRAPHIE

Séchage industriel : principes et calcul d'appareils- Séchage convectif par air chaud (partie 2), Jean Vasseur, mars 2010.

Technologie, génie chimique. tome 2 - - Centre régional de documentation pédagogique 1989 de P Anglaret; S Kazmierczak

Evaporation-Principes généraux -Techniques de l'ingénieur, juin 2009. Martine Decloux, Bernard Rémond.

Séchage industriel-Aspects pratiques- Techniques de l'ingénieur, mai 2015. Patricia Arlabosse.

GENIE INDUSTRIEL ALIMENTAIRE. Tome 1, Les procédés physiques de conservation, 2ème édition, Broché – 5 novembre 1999 Pierre MAFART

DÉSHYDRATATION ASSISTÉE THERMIQUEMENT COUPLANT ESSORAGE ET MICRO-ONDES

THÈSE par Xabier Apaolaza Pagoaga



FICHE GÉNÉRIQUE 4

## SECHAGE/EXTRACTION D'EAU

Jérémy Olivier. ETUDES DES FILTRES A BANDES POUR LA DESHYDRATATION MECANIQUE DES BOUES RESIDUAIRES URBAINES. Génie des procédés. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003. Français.

## 5 Conclusion

Les travaux menés dans le cadre de cette étude ont consisté dans un premier temps à identifier un ensemble de problématiques d'intérêt pour lesquelles une étape préalable de prétraitement par réduction de la charge polluante est nécessaire avant de valoriser un déchet solide que ce soit sous la forme de matière première secondaire ou d'énergie.

Avec l'aide du Comité de Suivi et de la Direction scientifique de RECORD, cette liste a été affinée et certaines problématiques concernant différents types de déchets ont été pointées pour faire l'objet d'une approche plus générique dans la phase finale des travaux.

La recherche de procédés permettant de répondre aux problématiques identifiées a conduit à la rédaction de 31 fiches sommaires présentant 21 procédés commercialement disponibles et 10 procédés en développement ou émergents. Certaines problématiques, traitées par différents procédés, ont fait l'objet de plusieurs fiches. C'est le cas en particulier du prétraitement des sables de fonderie, des cendres de charbon, des pneumatiques usagés, de matériaux polymères, de lampes usagées, de déchets de plâtre, de déchets de bois C ou encore de déchets agroalimentaires.

D'autres problématiques identifiées font l'objet de solutions sans caractère technologique innovant (élimination des produits phytosanitaires résiduels dans les EVPP, extraction des indésirables des refus de TMB ou des papiers/cartons à recycler). Celles-ci n'ont pas été détaillées dans le cadre de cette étude.

L'amélioration de la qualité des CSR préparés à partir de refus de tri mécano-biologique n'a pas fait l'objet de la rédaction d'une fiche, mais cette problématique à fort enjeu stratégique a été développée dans un paragraphe spécifique.

Enfin, il est apparu le cas d'une problématique ne pouvant pas être résolue par un prétraitement du fait du caractère diffus des composés à séparer des déchets : il s'agit de la présence de composés silicés dans les biodéchets générant une corrosion précoce des équipements de valorisation énergétique par méthanisation.

D'autre part, certains procédés de prétraitement ayant un large spectre d'applications ont été pointés pour faire l'objet de fiches procédé. Les technologies décrites sont le nettoyage cryogénique, l'extraction par fluide supercritique, ainsi qu'un procédé innovant couplant lavage et hydrocyclonage.

Le classement des procédés de prétraitement identifiés montre qu'ils visent tous la production de matières premières secondaires qu'il s'agisse de ressources matière ou de ressources énergétiques. Ainsi, parmi les MPS dont la valorisation serait rendue possible figurent :

- Des ressources énergétiques (combustibles solides, liquides ou gazeux) ;
- Des métaux stratégiques
- Des métaux non ferreux
- Des matériaux minéraux
- Des matières plastiques

Les technologies concernées par ces prétraitements sont en majorité de type physico-chimique, puis thermique, mécanique, chimique ou relèvent d'une combinaison de principes thermiques et physico-chimiques (fluides supercritiques), thermiques et chimique (ozonation et procédé thermique, pyrolyse et distillation), et dans une moindre mesure biologiques voire chimique et biologique.

Si certains de ces procédés ont été développés pour répondre à une problématique relevant d'enjeux stratégiques permettant la préparation de MPS à haute valeur ajoutée (extraction en vue de valorisation des terres rares de DEEE et autres matières plastiques, dépollution en vue de préparation de combustibles) d'autres visent des cas plus spécifiques concernant un gisement relativement limité de déchets et produisant une faible valeur ajoutée (élimination du carbone résiduel de cendres de charbon, extraction par lavage de sels et de métaux, préparation de granulats minéraux). Ces derniers devront probablement diversifier leurs applications potentielles pour en assurer la rentabilité économique.

Cette revue permet donc, pour un gestionnaire de déchet à la recherche de solutions de prétraitement, d'identifier des solutions potentielles de prétraitement mutualisables ou adaptables à des problématiques non identifiées et/ou émergentes

## PARTIE 3 : ANNEXES

ANNEXE 1 - CLASSIFICATION DES FILIERES DE TRAITEMENT DES DECHETS D'APRES ALAIN NAVARRO (1994)

A) Valorisation énergétique	D) Valorisation en agriculture et agro-alimentaire
1- Combustion avec récupération d'énergie	12- Amendement organique
2- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés mécaniques	13- Amendement minéral
3- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés thermiques	14- Alimentation pour animaux
4- Élaboration de combustibles dérivés par des procédés biologiques	
	E) Valorisation en science de l'environnement
B) Valorisation matière première	15- Traitement des effluents pollués liquides ou gazeux
5- Matières premières organiques naturelles ou artificielles	16- Solidification ou stabilisation des déchets toxiques
6- Matières premières minérales métalliques ou non métalliques	
	F) Élimination
C) Valorisation en science des matériaux	17- Incinération
7- Liants hydrauliques et matériaux de structure	18- Traitement biologique des déchets
8- Verres et céramiques	19- Traitements physico-chimiques
9- Plastiques et caoutchouc	20- Mise en décharge
10- Fibres cellulosiques de récupération	
11- Autres	



## ANNEXE 2 - LISTE EUROPEENNE DES DECHETS (LED)

01. Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux.
02. Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments.
03. Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton.
04. Déchets provenant des industries du cuir, de la fourrure et du textile.
05. Déchets provenant du raffinage du pétrole, de la purification du gaz naturel et du traitement pyrolytique du charbon.
06. Déchets des procédés de la chimie minérale.
07. Déchets des procédés de la chimie organique.
08. Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation (FFDU) de produits de revêtement (peintures, vernis et émaux vitrifiés), mastics et encres d'impression.
09. Déchets provenant de l'industrie photographique.
10. Déchets provenant de procédés thermiques.
11. Déchets provenant du traitement chimique de surface et du revêtement des métaux et autres matériaux, et de l'hydrométallurgie des métaux non ferreux.
12. Déchets provenant de la mise en forme et du traitement physique et mécanique de surface des métaux et matières plastiques.
13. Huiles et combustibles liquides usagés (sauf huiles alimentaires et huiles figurant aux chapitres 05, 12 et 19).
14. Déchets de solvants organiques, d'agents réfrigérants et propulseurs (sauf chapitres 07 et 08).
15. Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs.
16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste.
17. Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés).
18. Déchets provenant des soins médicaux ou vétérinaires et/ou de la recherche associée (sauf déchets de cuisine et de restauration ne provenant pas directement des soins médicaux).
19. Déchets provenant des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel.
20. Déchets municipaux (déchets ménagers et déchets assimilés provenant des commerces, des industries et des administrations) y compris les fractions collectées séparément.

ANNEXE 3 - MATRICE FILIERE-PROCEDES

DECHETS	FILIERE NAVARRO	CATEGORIE LED	VALORISATION	SOUS FILIERE	PROBLEMATIQUE IDENTIFIEE	POLLUANTS	TYPE DE PROCEDE
Batteries accumulateur lithium-ion	6- Valorisation des matières premières minérales	16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste. 20. Déchets municipaux y compris les fractions collectées séparément	Matière	Métaux ferreux	Séparation des métaux lourds (manganèse, mercure, nickel-cadmium)	Métaux lourds	Thermochimique
Batteries accumulateur Ni-Cd	6- Valorisation des matières premières minérales	16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste. 20. Déchets municipaux y compris les fractions collectées séparément	Matière	Métaux ferreux	Séparation des métaux lourds (Ni-métal hydrure, nickel-cadmium)	Métaux lourds	Thermochimique
Batteries accumulateur Ni-Cd	6- Valorisation des matières premières minérales	16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste. 20. Déchets municipaux y compris les fractions collectées séparément	Matière	Métaux ferreux	Séparation des métaux lourds (Ni-métal hydrure, nickel-cadmium)	Métaux lourds	Thermochimique
Batteries accumulateur Ni-MH	6- Valorisation des matières premières minérales	16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste. 20. Déchets municipaux y compris les fractions collectées séparément	Matière	Métaux ferreux	Séparation des métaux lourds (Ni-métal hydrure, nickel-cadmium)	Métaux lourds	Thermochimique
Batteries accumulateur au Plomb	6- Valorisation des matières premières minérales	16. Déchets non décrits ailleurs dans la liste. 20. Déchets municipaux y compris les fractions collectées séparément	Matière	Métaux ferreux	Présence de métaux lourds (plomb)	Métaux lourds	Thermochimique
Déchet de chantier (Bétons, briques, tuiles, céramiques)	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition	Matière	Matériaux minéraux pour le BTP	Présence de sulfates en teneur supérieure aux limites d'acceptabilité technique et environnementale pour une valorisation dans des matériaux à base de liants hydrauliques	Sulfates	
Biodéchets	12- Elaboration d'amendements organiques	02- Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments	Matière	Amendements organiques	Présence de pathogènes et/ou métaux lourds, biocide, matières non dégradables	Métaux lourds Pathogènes Matières non dégradables	Biochimique
Déchets de Biomasse	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Energétique	Biocarburants	Présence de composés inorganiques, composés générateurs de goudrons	Métaux lourds Matières non dégradables	Biochimique
Déchets de Bois faiblement traités ou faiblement adjuvantés	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Energétique	Biocarburants	Présence d'adjuvants classé CMR (colle vernis (phénol-formol, urée formole))	Métaux lourds Matières non dégradables	Biologique
Déchets de Bois fortement traités ou adjuvantés	5-Valorisation des matières premières organiques	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Matière	Substance à haute valeur ajoutée	Présence de composés inorganiques, composés générateurs de goudrons	Métaux lourds Matières non dégradables	
Déchets de Bois fortement traités ou adjuvantés	5-Valorisation des matières	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de	Matière	Substance à haute valeur ajoutée	Présence de composés inorganiques, composés générateurs de goudrons	Métaux lourds Matières non dégradables	

DECHETS	FILIERE NAVARRO	CATEGORIE LED	VALORISATION	SOUS FILIERE	PROBLEMATIQUE IDENTIFIEE	POLLUANTS	TYPE DE PROCEDE
	premières organiques	meubles, de pâte à papier, de papier et de carton					
Déchets de Bois fortement traités ou adjuvantés	3- Elaboration de combustibles dérivés par procédés thermiques	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Energétique	Biocarburants	Présence d'adjuvants (substances fongicides : Cu,Cr,As)	Métaux lourds Matières non dégradables	Thermochimique
Déchets de Bois fortement traités ou adjuvantés	3- Elaboration de combustibles dérivés par procédés thermiques	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Energétique	Biocarburants	Présence d'adjuvants (organiques, substances fongicides)	Métaux lourds Matières non dégradables	Thermique
Boues de STEP	6- Valorisation des matières premières minérales	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Quantité importante de matière organique	Matière organique	Chimique
Boues de STEP	12- Elaboration d'amendements organiques	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Matière	Amendements organiques	Teneur en métaux lourds et en Polluants organiques persistants (POP)	Métaux lourds Polluants organiques persistants	
Déchets plastiques Type PET	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	15-Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs	Matière	Matières plastiques	Présence d'autre éléments résiduels limitant la valorisation matière	Autres matières plastiques, papier, souillures ...	
Déchets plastiques Type PET	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	15-Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs	Matière	Matières plastiques	Présence d'autre éléments résiduels limitant la valorisation matière	Autres matières plastiques, papier, souillures ...	
Déchets plastiques Type PP	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	15-Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs	Matière	Matières plastiques			
Déchets plastiques Type PSE	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	15-Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuyage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs	Matière	Matières plastiques			
Cendres de boues de station d'épuration	6- Valorisation des matières premières minérales	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Matière	Matériaux minéraux pour la cimenterie	Présence de phosphates contaminant les matières minérales et limitant leur valorisation		

DECHETS	FILIERE NAVARRO	CATEGORIE LED	VALORISATION	SOUS FILIERE	PROBLEMATIQUE IDENTIFIEE	POLLUANTS	TYPE DE PROCEDE
Cendres de boues de station d'épuration	7- Valorisation des liants hydrauliques et matériaux de structure	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Matière	Liants de substitution	Présence de phosphates contaminant les matières minérales et limitant leur valorisation		
Chaux résiduaires	15- Epuration des effluents liquides et gazeux	10-Déchets provenant de procédés thermiques	Matière	Neutralisation			
DASRI	1- Combustion avec récupération d'énergie	18-Déchets provenant des soins médicaux ou vétérinaires et/ou de la recherche associée	Energétique	Energie thermique	Présence de matières infectieuses	Germes pathogènes	Thermique
Déchets combustibles	3- Elaboration de combustibles dérivés par procédés thermiques	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Energétique	Energie thermique			
Déchets de chantier de construction et démolition	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence d'amiante et autres substance mêlés limitant la valorisation des matériaux minéraux	Amiante	
Déchets de chantier de construction et démolition	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de plomb et autres substance mêlés limitant la valorisation des matériaux minéraux	Plomb	
Déchets de chantier de construction et démolition	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de mercure et autres substance mêlés limitant la valorisation des matériaux minéraux	Mercure	
Déchets de chantier de construction et démolition	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de PCB (mastics, sols à base de résine, double vitrage, condensateurs ...)	PCB	
Déchets imprimante (encre, toner)	1- Combustion avec récupération d'énergie	08-Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation de produits de revêtement, mastics et encres d'impression	Energétique	Energie thermique	Séparation des déchets dangereux des déchets non dangereux en vue d'une valorisation énergétique	Métaux lourds dans les encres et solvants	
Déchets imprimante, Toners	6- Valorisation des matières premières minérales	08-Déchets provenant de la fabrication, de la formulation, de la distribution et de l'utilisation de produits de revêtement, mastics et encres d'impression	Matière	Matières plastiques	Séparation des déchets dangereux des déchets non dangereux en vue d'une valorisation matières des composants des cartouches et toners	Métaux lourds dans les encres et solvants	Mécanique
Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE)	6- Valorisation des matières premières minérales	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Métaux non ferreux	Présence de métaux lourds et/ou terres rares à séparer pour extraire les métaux valorisable	Métaux lourds	
Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE)	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Matières plastiques	Présence de retardateur de flamme (fractions bromées) à séparer avant valorisation matières	Métaux lourds	

DECHETS	FILIERE NAVARRO	CATEGORIE LED	VALORISATION	SOUS FILIERE	PROBLEMATIQUE IDENTIFIEE	POLLUANTS	TYPE DE PROCEDE
Désulfogypse	6- Valorisation des matières premières minérales	10-Déchets provenant de procédés thermiques	Matière	Matériaux minéraux pour le BTP			
Emballages Vides de Produits Phytopharmaceutiques (EVPP)	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	15-Emballages et déchets d'emballages, absorbants, chiffons d'essuage, matériaux filtrants et vêtements de protection non spécifiés ailleurs	Matière	Matières plastiques	Séparation des différents plastiques d'emballages avec les restes de produit phytopharmaceutique	Substances actives (herbicide, fongicide, insecticide, acaricides...)	
Fraction Fermentescible des déchets	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	02- Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments	Energétique	Energie thermique	Composés siliciés générant une corrosion précoce des équipements	Composés siliciés	
Granulats routiers	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de goudrons dans les granulats routier limitant leur valorisation matière	Métaux lourds (type HAP)	
Huiles alimentaires usagées	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	02- Déchets provenant de l'agriculture, de l'horticulture, de l'aquaculture, de la sylviculture, de la chasse et de la pêche ainsi que de la préparation et de la transformation des aliments	Energétique	Biocarburants	Contiennent des teneurs élevées en éléments polluants (soufre, chlore, métaux lourds) et notamment en plomb.		Chimique
Huiles et combustibles usagés	1- Combustion avec récupération d'énergie	13-Huiles et combustibles liquides usagés (sauf huiles alimentaires et huiles figurant aux chapitres 05, 12 et 19)	Energétique	Energie thermique	Présence de métaux lixiviables à des concentrations supérieures aux seuils de valorisation en technique routière	Métaux lourds	
Mâchefers (MIDND)	6- Valorisation des matières premières minérales	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Matière	Métaux ferreux	Présence de métaux lixiviables à des concentrations supérieures aux seuils de valorisation en technique routière	Métaux lourds	
Mâchefers (MIDND)	6- Valorisation des matières premières minérales	10-Déchets provenant de procédés thermiques	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de métaux lixiviables à des concentrations supérieures aux seuils de valorisation en technique routière	Métaux lourds	
Papiers Cartons à Recyclés (PCR)	10- Valorisation des fibres cellulosiques de récupération	03- Déchets provenant de la transformation du bois et de la production de panneaux et de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton	Matière	Papiers-cartons		Adjuvants (Type colles, adhésifs, métaux, agrafes, ficelle, encre, reliure..)	Mécanique
Piles	6- Valorisation des matières premières minérales	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Métaux ferreux	Séparation des métaux lourds et métaux lourds (Hg, Pb, Ni-Cd, Zn, Fe...) pour la valorisation des métaux ferreux	Métaux lourds	Thermochimique
Déchets de plâtres (Inertes contenant du plâtre)	6- Valorisation des matières premières minérales	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matériaux minéraux en technique routière	Présence de plâtres dans des matériaux inertes à séparer pour permettre la valorisation des matières inertes	Résidus de plâtre	
Déchets de plâtres (Plaques et carreaux)	6- Valorisation des matières		Matière	Gypse	Séparation des indésirables du plâtre limitant la valorisation du gypse à intégrer	Indésirables (Type papiers, bois, ferrailles..)	

DECHETS	FILIERE NAVARRO	CATEGORIE LED	VALORISATION	SOUS FILIERE	PROBLEMATIQUE IDENTIFIEE	POLLUANTS	TYPE DE PROCEDE
	premières minérales				dans la formulation de nouveaux produits à base de plâtre		
Déchets de pneumatiques usagés	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Energétique	Production de combustible propre	Présence de soufre en teneur trop importante limitant le traitement par pyrolyse et la valorisation des produits de pyrolyse	Soufre	Biologique
Déchets de pneumatiques usagés	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Energétique	Production de combustible propre	Présence de soufre en teneur trop importante limitant le traitement par pyrolyse et la valorisation des produits de pyrolyse	Soufre	Thermochimique
Déchets de pneumatiques usagés	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Caoutchouc	Présence de soufre en teneur trop importante limitant la valorisation matière	Soufre	Chimique
Déchets de pneumatiques usagés	4- Elaboration de combustibles dérivés par procédés biologiques	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Energétique	Production de combustible propre	Présence de soufre en teneur trop importante limitant le traitement par pyrolyse et la valorisation des produits de pyrolyse	Soufre	Biologique
PVC (Chlorure de polyvinyle)	9- Valorisation des matières plastiques et caoutchoucs	17-Déchets de construction et de démolition (y compris déblais provenant de sites contaminés)	Matière	Matières plastiques	Présence d'autres complexe (PVC-aluminium, PCV-fibres)		
Refus de TMB	2-Elaboration de combustibles dérivés par procédés mécaniques	19-Déchets provenant des installations de gestion de déchets, des stations d'épuration des eaux usés hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine et d'eau à usage industriel	Energétique	Production de combustible propre	Risque d'émission de polluants atmosphériques dangereux (produits chlorés, dioxines et métaux lourds ) nécessite la séparation des matières chlorés et autres métaux lourds		
Sables de fonderie	6- Valorisation des matières premières minérales	01-Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux	Matière	Matériaux minéraux pour le BTP	Présence de résidus de liants organiques limitant leur valorisation en construction (technique routière ou autre)	Liants organiques (argile, ciment, résines phénol	
Tubes fluorescents	6- Valorisation des matières premières minérales	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Métaux non ferreux	Séparation du mercure avant récupération des métaux	Métaux lourds (mercure)	
Tubes fluorescents	6- Valorisation des matières premières minérales	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Verre	Séparation du mercure avant récupération du verre	Métaux lourds (mercure)	
Véhicules Hors d'Usages (VHU)	10- Valorisation des fibres cellulosiques de récupération	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Matières plastiques			
Véhicules Hors d'Usages (VHU)	6- Valorisation des matières premières minérales	16-Déchets non décrits ailleurs dans la liste	Matière	Métaux ferreux			

## ANNEXE 4 – TRAME DE FICHE SOMMAIRE

## NOM DU PROCEDE

### OBJECTIF DU PROCEDE DE TRAITEMENT

Bases Scientifiques du procédé (Type exutoire)  
Problématique, gisement....

Type de procédé	
Nature du polluant	
Maturité du procédé (échelle TRL)	
Technologies ou solution de référence	

### SCHEMA BLOC DU PROCESS

Flux entrant

Flux sortant

### ETAPES DE TRAITEMENT



**AVANTAGE/ INTERET**

**INCONVENIENT/ LIMITATION**

**REGLEMENTATION APPLICABLE**

**EXEMPLES D'INSTALLATIONS COMMERCIALES**

**POTENTIEL D'EMERGENCE**

**CHAMP DE COMMENTAIRES**

**BIBLIOGRAPHIE**