

# Retour d'expérience sur la filière française

## stabilisation / solidification - stockage de déchets dangereux

RÉSUMÉ



avec le soutien technique  
et financier de

**ADEME**



Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie



## Résumé

<b>A</b>	<b>Contexte</b>	<b>1</b>
<b>B</b>	<b>La filière stabilisation/solidification - stockage : recherche et développement</b>	<b>3</b>
<b>C</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>6</b>

## A | Contexte

Gérer les déchets de façon maîtrisée, en réduisant au minimum les impacts, constitue l'enjeu majeur de la politique environnementale française : les dispositions prises pour une gestion optimale ont évolué depuis la loi du 15 juillet 1975, les textes réglementaires relatifs à la filière stockage sont de plus en plus techniques et précis, pour conduire dans les années 90 à l'apparition de différentes catégories d'installations de stockage (dites de classes 1, 2 et 3), admettant chacune une seule typologie de déchets (dangereux, non dangereux, inertes).

La loi du 13 juillet 1992 introduit d'autre part la notion de «déchet ultime», défini comme un déchet qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux, à des conditions économiquement acceptables : depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2002, ces déchets ultimes sont les seuls à pouvoir être admis dans les installations de stockage.

Les arrêtés ministériels du 18 décembre 1992 ont prescrit les conditions de création, d'exploitation et de fermeture des centres d'enfouissement, ainsi que les conditions d'acceptation des déchets : un traitement préalable du déchet entrant est exigé dans le cas du non respect des seuils définis par la réglementation.

Les réglementations sur les installations de stockage de classe 1, qui accueillent les déchets dangereux et présentent donc les conditions d'aménagement, d'étanchéité et de suivi les plus importants, ont fait l'objet d'une mise à jour récente transposant les dispositions de la Directive Européenne 1999/31/CE sur la mise en décharge ainsi que celles de la Décision 2003/33/CE sur les conditions d'admission des déchets.



Photo 1 : Du déchet brut au déchet stabilisé

De façon à mettre en place les outils nécessaires au traitement des déchets, un calendrier de mise en application avait été défini dès 1992 en fonction des catégories de déchet :

- les déchets de catégorie A (REFIOM : Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères, déchets de la métallurgie, résidus de forage, déchets minéraux de traitement chimiques,...) devant être stabilisés<sup>1</sup> à partir du 1<sup>er</sup> avril 1995 ;
- les déchets de catégorie B (résidus de traitement d'effluents, déchets de peinture, résidus d'amiante, réfractaires et autres minéraux souillés,...) devant être stabilisés à partir du 1<sup>er</sup> avril 1998.

1) "Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon que ses caractéristiques satisfassent aux critères d'acceptation des déchets stabilisés



Photo 2 : Usine de stabilisation/solidification de SITA FD (Bellegarde)

Le mode d'exploitation des installations de stockage est ainsi devenu de plus en plus rigoureux : les déchets admis ont été limités à certaines grandes familles (déchets minéraux) et leur contrôle a été renforcé, les surfaces d'exploitation ont été réduites afin de limiter la production de lixiviat, la gestion et le traitement des effluents ont été encadrés.

Le premier site créé selon ces nouvelles prescriptions est celui de Champteussé sur Baconne, où les déchets sont confinés et isolés du milieu extérieur à différents niveaux :

- ▶ au niveau du sous-sol, une sécurité passive constituée d'une couche argileuse imperméable de 5 mètres assure l'étanchéité du site ;
- ▶ au niveau intermédiaire, une sécurité active composée d'un complexe drainant assurant le captage des lixiviats et d'un système de collecte des eaux de ruissellement ;
- ▶ au niveau surfacique, une couverture étanche définitive est mise en place en fin d'exploitation.

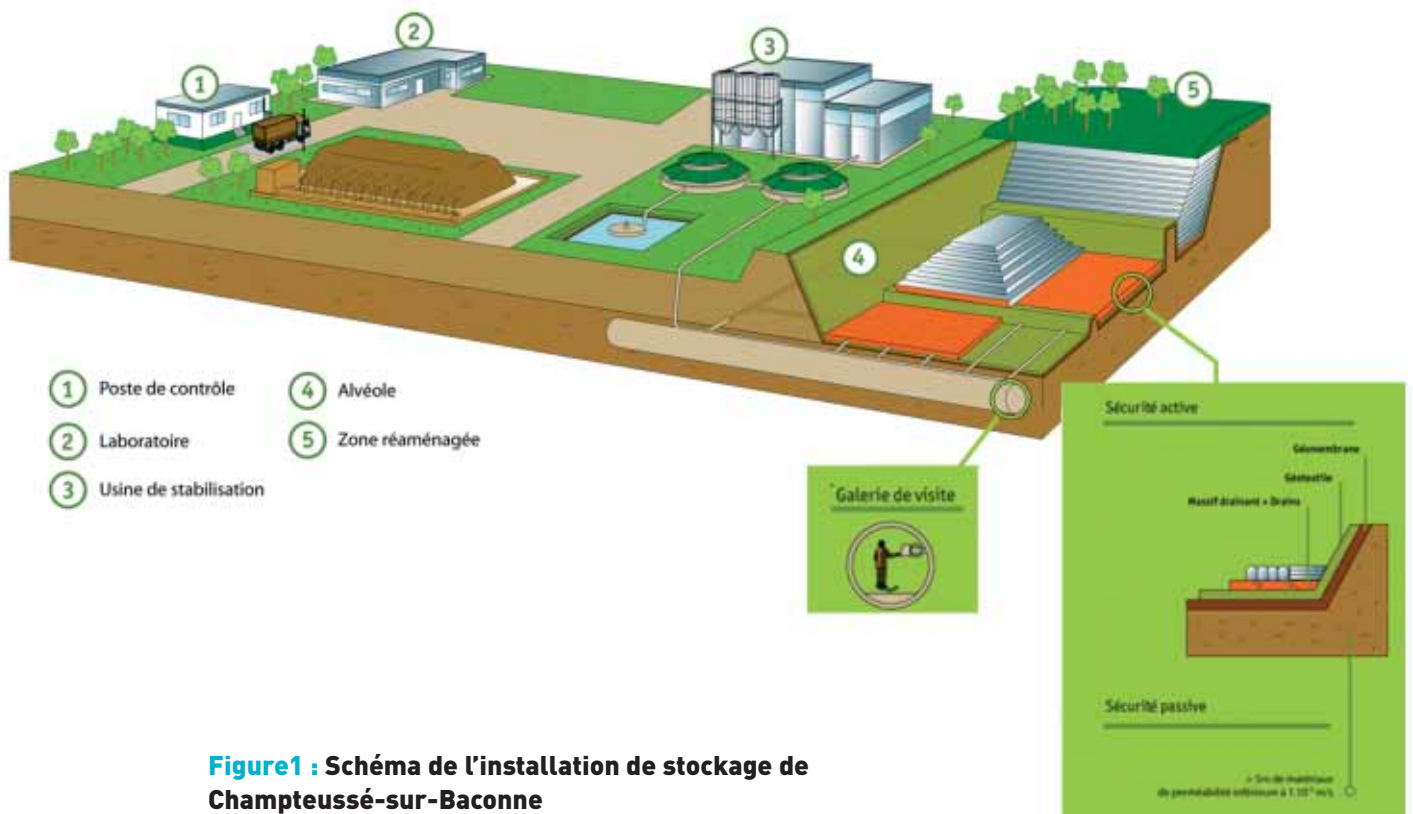


Figure 1 : Schéma de l'installation de stockage de Champteussé-sur-Baconne

## B | La filière stabilisation/solidification - stockage : recherche et développement

Lorsque la question du choix du type de traitement à mettre en place pour les déchets dangereux s'est posée aux professionnels, ces derniers se sont naturellement tournés vers les procédés de stabilisation/solidification à froid par des liants hydrauliques (ciments, laitiers, liants minéraux), qui avaient été développés dans les années 60 dans le but de contribuer à assurer une gestion efficace de certains déchets radioactifs.

S'appuyant sur cette expérience, les professionnels ont fait évoluer ces techniques de stabilisation/solidification, leurs qualités d'adaptabilité permettant de les appliquer à une grande diversité de déchets, ceci moyennant des coûts relativement intéressants par rapport à d'autres techniques (enrobage dans du bitume, encapsulation dans du plastique, vitrification).

De nombreux programmes de recherche, publics et privés, ont été entrepris pour assurer le développement des procédés de traitement, l'évaluation de performances de procédés (PEA : Procédure d'Evaluation Approfondie) et l'étude des déchets stabilisés et solidifiés, associant essais de laboratoire, essais pilotes et modélisations. Ils ont dans un premier temps permis d'évaluer le comportement au cours du temps des déchets traités, puis de valider le concept associant stabilisation/solidification et stockage.



Photo 3 : Recherche et développement au cœur de la filière (INERTEC/CERED-Vernon)

L'ensemble des études menées (voir figure 2) est axé autour de deux thématiques principales.

### **Quels traitements mettre en place avant stockage ?**

Les travaux ont dans un premier temps porté sur la caractérisation physico-chimique des déchets à traiter, de façon à définir des familles et à en évaluer la variabilité. Des études minéralogiques et microstructurales de ces déchets ont complété ces premières connaissances.

Puis, de nombreux essais ont été menés en laboratoire, portant sur la combinaison de réactifs, pour les adapter à l'ensemble des problématiques rencontrées (souvent double ou triple, telles que par exemple la présence à la fois de sels solubles, métaux lourds et aluminium métal dans le cas des REFIOM).

Les formulations et modes opératoires définis ont ensuite été validés à l'échelle industrielle au moyen de pilotes développés spécifiquement pour cette application.

En 1995, l'ensemble des installations de stockage de déchets dangereux français a donc pu s'équiper d'unités de stabilisation/solidification, assurant ainsi la mise en conformité avec la réglementation en vigueur, les résultats obtenus à échelle industrielle confirmant ceux qui avaient été obtenus à l'échelle du laboratoire.

Depuis cette date, les travaux se sont poursuivis, notamment en terme d'étude de comportement dans le temps (Figure 2 : Méthodologie générale d'étude et de recherche sur la filière stabilisation/stockage), associant de nombreux acteurs (entreprises privées, établissements et organismes publics, laboratoires universitaires,...).

### **Quel est l'impact d'un site de traitement/stockage sur la qualité des eaux ?**

Le comportement au cours du temps des déchets dangereux stabilisés et solidifiés a dans un premier temps été évalué, en se focalisant plus particulièrement sur l'étude du transfert potentiel de polluants du déchet stabilisé/solidifié vers une phase aqueuse qui pourrait être à son contact.

Pour ce faire, des études de laboratoire, complétées par des essais à l'échelle pilote, et des travaux de modélisation ont été réalisés, s'inspirant des premières étapes de la norme EN 12920 (Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans un contexte déterminé et sur une période de temps donnée).

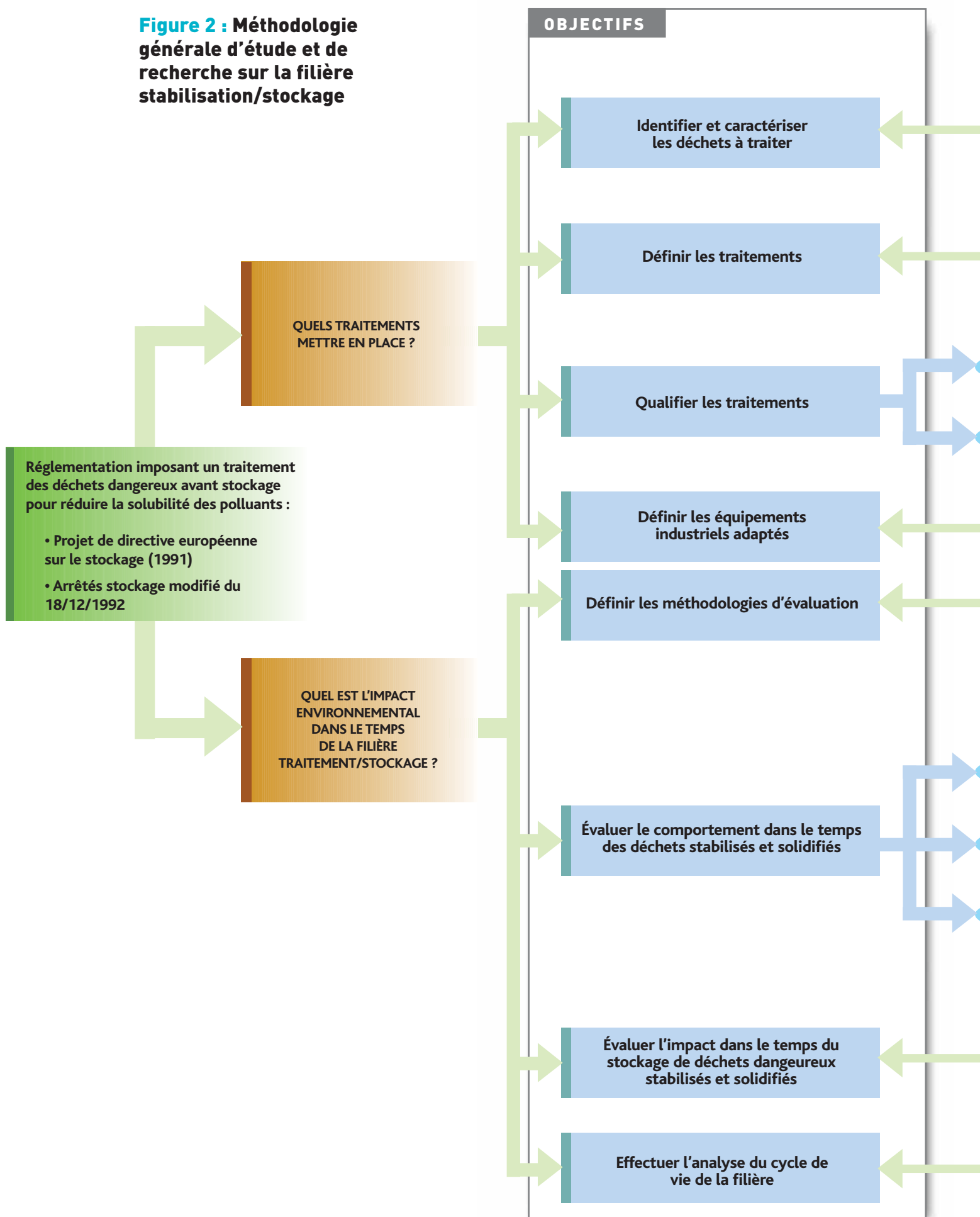
Les travaux de laboratoire ont fait apparaître que les mécanismes de mise en solution des espèces présentes dans les déchets stabilisés et solidifiés étaient différents selon les éléments chimiques considérés (mécanisme de diffusion pour les sels et de dissolution pour les métaux). Les études à l'échelle pilote ont en outre permis d'évaluer l'évolution de déchets dans des scénarii donnés, mettant en évidence des comportements différents selon les déchets et les scénarii d'exposition.

D'autre part, parallèlement à l'évaluation du comportement au cours du temps des déchets stabilisés et solidifiés, l'impact du stockage de ces déchets stabilisés sur la qualité des eaux souterraines a été évalué en étudiant le système déchet stabilisé/solidifié - installation de stockage dans sa globalité, dans différents scénarii poussés jusqu'à des conditions extrêmes telle que la rupture de la barrière active.

Les travaux de modélisation ont permis de mettre en évidence que les espèces solubles sont davantage retenues par les déchets stabilisés/solidifiés eux-mêmes que par la barrière argileuse qui régulerait pendant leur transport si cela s'avérait nécessaire.

Dans tous les cas, l'interprétation de ces études conduit à la conclusion que l'impact physico-chimique du couple traitement/stockage est acceptable pour le respect de la qualité des eaux souterraines d'éventuelles nappes sous jacentes.

**Figure 2 : Méthodologie générale d'étude et de recherche sur la filière stabilisation/stockage**



## PROGRAMMES MIS EN PLACE

**Programme SITINERT** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / ADEME / SITA 1993-1998 / [1])  
**Étude Analogues naturels** (Association RECORD / BRGM 1993-1998 / [3])  
**Thèse Lydie Le Forestier** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / SITA / INPL 1993-1996 / [2])

**Programme SITINERT** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / ADEME / SITA 1993-1998 / [1])  
**Étude Stabilisation de déchets organiques** (ADEME / SITA 1999-2002 / [5]), (Association RECORD 2000 / [6]), (MEDD / INSA Lyon / INERTEC / SARP Industries 2001 / [7])  
**Thèse L. Chatelet** (Ministères de la Recherche / de l'Industrie 1992-1995 / SITA / INPL / [4])

Normes X 31-417, X 31-211, X 31-212, (1994-1996)

**Programmes PEA** (ADEME / SITA / SARP Industries / Groupe SECHE / INSA Lyon 1996-1998 / [8], [9], [10])  
**Programme PEA** (ADEME à paraître / [11])

**Programme SITINERT** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / ADEME / SITA 1993-1998 / [1])  
**Programmes CLT catégories A et B** (ADEME / SITA / BRGM 1997-2001 / [12])

Norme NF X 30-407 (1995), puis norme EN 12 920 (1998)

**Programme SITINERT** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / ADEME / SITA 1993-1998 / [1])  
**Programmes CLT catégories A et B** (ADEME / SITA 1997-2001 / [12])  
**Programme STAB ORGA** (ADEME/SITA 1999-2002 / [5])  
**Étude Analogues naturels** (Association RECORD / BRGM 1993-1998 / [3])  
**Thèses N. Humez** (ADEME / SARP Industries / Univ. Paris VI 1996) et **AL Humez** (ADEME / CReeD / Univ. Paris VI 1999 / [13])  
**Thèse S. Brault** (Université Pierre et Marie Curie / INERTEC 1998-2001 / [15])

**Programmes CLT catégories A et B** (ADEME / SITA / BRGM / 1997-2001 / [12])

**Étude INSA Lyon** (Association RECORD 1998-1999 / [18])  
**Thèse S. Brault** (Université Pierre et Marie Curie / INERTEC 1998-2001 / [15]),  
**Thèse F. Sanchez** (Association RECORD / ADEME 1996 / [20]),  
**Thèse R. Barna** (Association RECORD / ADEME 1994 / [19])

**Programme SITINERT** (Ministère de la Recherche / Ministère de l'Industrie / ADEME / SITA 1993-1998 / [1])  
**Programme impact classe 1** (ADEME / SUEZ ENVIRONNEMENT / Golder associates 2001-2002 / [21])  
**Thèse S. Brault** (Université Pierre et Marie Curie / INERTEC 1998-2001 / [15])  
**Projet EUREKA Passify** (ADEME / SITA FD / INERTEC / LEM / Universités de Greenwich et New Hampshire 2005-2008 / [16])

**Programme ACV classe 1** (ADEME / FNADE / BIO.I.S. / 2000-2002 / [22])

Contexte réglementaire

Autres procédures

Études en laboratoire

Études à l'échelle pilote

Modélisation



## C | Conclusions et perspectives

Une dizaine d'années s'est écoulée depuis le démarrage des premières unités de stabilisation/solidification mises en place pour satisfaire les exigences réglementaires et environnementales.

La mise en œuvre des techniques de traitement, permettant la stabilisation physico-chimique des déchets dans ces unités équipées d'outils parfaitement adaptés, a permis de totalement redéfinir la gestion des installations de stockage, favorisant ainsi leur acceptation par les riverains.

La mise en place de la réglementation européenne (Directive 1999/31/CE du 26/04/1999 et Décision 2003/33/CE du 19/12/2002) a confirmé tant l'organisation que les techniques de traitement existantes.

Ajoutée à l'ensemble des résultats obtenus lors des nombreuses études réalisées, l'expérience industrielle capitalisée depuis 1995 sur 13 sites (voir Figure 3) recevant un tonnage annuel voisin de 1 million de tonnes (résidus d'épuration de fumées d'incinérateurs de déchets dangereux et non dangereux, boues de station d'épuration industrielles, poussières industrielles de systèmes d'épuration d'air, gâteaux de filtre presse,...) dont la moitié, soit près de 500.000 tonnes, est traitée avant stockage, confirme la maîtrise de la filière :

- ▶ aucun déchet secondaire n'est généré ;
- ▶ les lixiviats issus des sites de stockage sont recyclés dans le process de traitement ;
- ▶ deux types de barrières sont associées pour une sûreté optimum du système : une barrière active (traitement de stabilisation/solidification suivant les exigences réglementaires, drainage et collecte des lixiviats, membranes) et une barrière passive (5 mètres d'argile de perméabilité inférieure à  $10^{-9}$  m/s) ;
- ▶ l'existence d'une solution intégrée (stabilisation/solidification sur le site de stockage) et d'un maillage du territoire permettent de limiter l'impact environnemental (consommation énergétique et émissions de gaz à effet de serre) mais surtout d'assurer aux collectivités et aux industriels un service continu pour le traitement de leurs déchets, quelle que soit la période de l'année ;
- ▶ la traçabilité du stockage est assurée grâce au suivi analytique mis en place sur les sites.

**Figure 3 : Unités de stabilisation/solidification et installations de stockage en France (2006)**

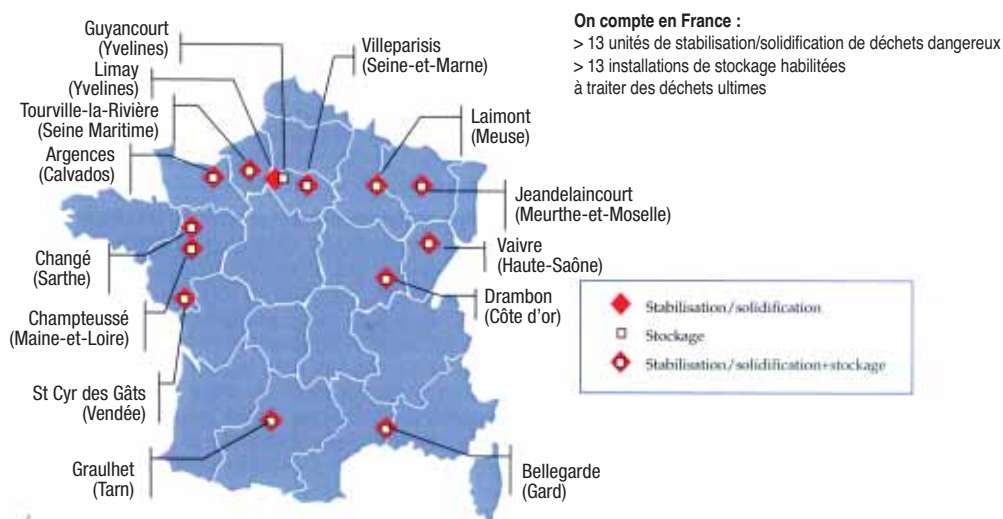


Photo 4 : Réintégration progressive du site dans son environnement (SITA FD-Villeparisis)



Parallèlement, les techniques de stabilisation/solidification ont été utilisées pour d'autres applications, telles que la réhabilitation de sites pollués, et continuent à bénéficier de retours d'expérience positifs, notamment du point de vue de l'impact engendré.

Les impacts environnementaux globaux de la filière ont été évalués au travers d'une étude s'appuyant sur la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV<sup>2</sup>) normalisée (Normes Internationales ISO 14040 à 14043).

Cette étude a notamment fait apparaître qu'à l'échelle nationale, les impacts potentiels de la filière stabilisation/solidification - stockage des déchets dangereux sur l'environnement sont globalement mineurs par rapport aux impacts des autres activités, puisque cette filière est responsable de moins de 0,3 % de la pollution globale générée (et moins de 0,02 % pour la plupart des indicateurs).

L'étape de fabrication des ciments, utilisés dans les procédés de stabilisation/solidification, étant celle qui présente l'impact environnemental prépondérant, les professionnels se sont dès lors engagés dans un processus d'amélioration : le remplacement des ciments par des sous-produits industriels. En faisant varier les quantités de ciment et de sous-produits utilisés en substitution dans le modèle de prévision développé pour l'ACV, on s'aperçoit que l'on divise l'impact global de l'activité d'un facteur allant de 2 à 10 (cas où le ciment est remplacé dans sa totalité) selon l'indicateur considéré. Les opérateurs des ISDU (Installations de Stockage de Déchets Ultimes) se sont d'ores et déjà fixés cet objectif pour les années à venir.

**La filière stabilisation/solidification - stockage des déchets dangereux, qui bénéficie déjà d'un retour d'expérience scientifique et industriel important, poursuit donc l'optimisation de ses conditions d'exploitation de façon à minimiser encore son impact environnemental, tout en offrant un exutoire fiable et pérenne aux déchets dangereux des collectivités et des industriels et en poursuivant les travaux de recherche de façon à consolider les conclusions sur le comportement dans le temps des déchets stabilisés/solidifiés.**

**S'appuyant sur cette expérience forte, des industriels d'autres pays (Portugal, Espagne, Autriche mais aussi Brésil, Mexique, Israël,...) sont venus en France, souvent accompagnés de représentants de leurs pouvoirs publics, pour visiter les installations de stockage et les unités de traitement, de façon à développer et mettre en place des filières de stabilisation/solidification - stockage pour la gestion de leurs déchets dangereux. Ces dernières années, les pays ayant récemment rejoint l'Union Européenne (la Hongrie par exemple) s'intéressent également de très près à ces techniques, afin de mettre en place les outils permettant l'application des réglementations européennes (Directive 1999/31/CE et Décision 2003/33/CE).**

2) L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil normalisé (ISO 14040) qui permet d'évaluer l'impact environnemental global d'un produit, d'un service ou d'un système, en comptabilisant les impacts environnementaux générés durant toutes les étapes de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination finale.

## Références

- [1] **Convention ADEME / SITA N° 95 74 108 (1993-1998) - MINISTERE DE LA RECHERCHE / MINISTERE DE L'INDUSTRIE** - Mise au point de nouveaux procédés de stabilisation/solidification de déchets industriels spéciaux, dits ultimes, et modélisation du comportement d'un stockage sur le long terme (programme Eureka SITINERT).
- [2] **LE FORESTIER L. (1996)** - Etude des résidus ultimes de l'incinération de déchets ménagers. Caractérisation chimique et minéralogique, essais de stabilisation par vitrification et comportement des verres à la lixiviation". Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [3] **Etude BRGM / RECORD N° 93-0105/3A (1993-1998) -** Applicabilité de l'approche "Analogues naturels" en vue de la stabilisation et de l'inertage de déchets industriels et de l'évaluation de leur longévité.
- [4] **CHATELET L. (1995)** - Solidification et stabilisation de REFION en matrice cimentaire adjuvantée. Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [5] **Convention ADEME / SITA N° 99 74 083 (2002) -** Faisabilité d'une stabilisation par liants hydrauliques de déchets à contenu organique (STAB ORGA).
- [6] **Etude RECORD N° 99-0325/1A (2000) -** Stabilisation à base de liants hydrauliques de matériaux ou déchets contaminés par des polluants organiques.
- [7] **Etude POLDEN / INERTEC et SMS / CREED N° DGAD/SRAE/98115 (2001) -** Contribution à l'étude en vue d'une maîtrise des conditions d'immobilisation des polluants organiques des sites contaminés. Mise au point d'outils d'évaluation du comportement à la lixiviation de sols pollués traité par immobilisation.
- [8] **Convention ADEME / FRANCE DECHETS N° 96 74 102 (1998) -** PEA des procédés de stabilisation utilisant des liants minéraux.
- [9] **Convention ADEME / SECHE ECO-INDUSTRIE N° 97 74 107 (1998) -** PEA des procédés de stabilisation utilisant des liants minéraux.
- [10] **Convention ADEME / SARP INDUSTRIES N° 97 74 106 (1997) -** PEA des procédés de stabilisation utilisant des liants minéraux.
- [11] **Etude ADEME (à paraître) -** Solidification/stabilisation des déchets dangereux - Procédés à base de liants minéraux - Etat des connaissances.
- [12] **Convention ADEME / SITA N° 99 74 077 (Décembre 2000 : Rapport final catégorie A ; Décembre 2001 : Rapport final catégorie B) -** Etude du comportement à long terme des déchets stabilisés par liant hydraulique.
- [13] **HUMEZ N. (1996) -** Contribution à l'étude du comportement à long terme de résidus ultimes solidifiés/stabilisés. Thèse ADEME/SARP Industries/Université Paris VI.  
**HUMEZ A-L. (1999) -** Etude de la mobilité d'éléments potentiellement toxiques dans des matériaux contaminés. Thèse ADEME/CReeD/Université Paris VI.
- [14] **MOUILLOU E. (2000) -** Cinétique et mécanismes de relargage des métaux lourds présents en trace dans les matrices cimentaires. Thèse Université d'Orléans.
- [15] **BRAULT S. (2001) -** Etude de la modélisation du comportement à la lixiviation à long terme de déchets stabilisés à l'aide de liants hydrauliques. Thèse INERTEC / Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- [16] **Projet EUREKA S3308 ADEME / SITA FD / INERTEC / LEM / Université de Greenwich / Université du New Hampshire (2005-2008) -** Performance Assessment of Stabilised/Solidified Waste-forms (PASSIFY).
- [17] **WASCON 2006 -** Sixth International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection / Belgrade, May 30 - June 2, 2006.  
"Stabilisation/solidification of hazardous waste before disposal land compliance test results on 5 year old samples." - INERTEC / SITA FD.  
"A preliminary Evaluation of the Performance of Stabilised/Solidified Soils Using Two Different Binder Systems." - CCLR, University of Greenwich.
- [18] **Etude RECORD / INSA de Lyon N° 96-0319/2A (1998-1999) -** Formalisation d'une méthodologie simplifiée d'évaluation du comportement à la lixiviation des matériaux poreux monolithiques en vue de la prédiction de leur devenir dans des scénarii spécifiés.
- [19] **BARNA R. (1994) -** Etude de la diffusion des polluants dans les déchets solidifiés par liants hydrauliques. Thèse Institut National de Sciences Appliquées de Lyon.
- [20] **SANCHEZ F. (1996) -** Etude de la lixiviation de milieux poreux contenant des espèces solubles : application au cas de déchets solidifiés par liants hydrauliques. Thèse Institut National de Sciences Appliquées de Lyon.
- [21] **Convention ADEME / SUEZ Environnement N° 01 72 002 (2002) -** Evaluation de l'impact d'un centre de stockage de Classe 1. (Etude des modèles de transfert).
- [22] **Convention ADEME / FNADE N° 00 74 077 (2002) -** Analyse du cycle de vie de la filière stockage de déchets industriels spéciaux ultimes (ACV K1).

**Ont contribué à la rédaction et à la relecture de ce document :**  
ADEME, FNADE (SITA FD, SARP industries VEOLIA Propreté, SECHE ENVIRONNEMENT), INERTEC.

**POUR EN SAVOIR PLUS**

**Contacts FNADE :** Isabelle MARTIN ([isabelle.martin@sita.fr](mailto:isabelle.martin@sita.fr)) ou Marie-Claire MAGNIE ([marie-claire.magnie@inertec.fr](mailto:marie-claire.magnie@inertec.fr)) - Nicolas HUMEZ ([nhumez@sarpindustries.fr](mailto:nhumez@sarpindustries.fr)) - Philippe Ruat ([p.ruat@groupe-seche.com](mailto:p.ruat@groupe-seche.com))

**Contacts ADEME :** Marc CHEVERRY ([marc.cheverry@ademe.fr](mailto:marc.cheverry@ademe.fr)) – Laurent CHATEAU ([laurent.chateau@ademe.fr](mailto:laurent.chateau@ademe.fr))

Copyright 2006.

Crédit photos : INERTEC - SITA FD – VEOLIA PROPRETE - SECHE ENVIRONNEMENT –  
IMAGE 'IN - Yves SOULABAILLE

Conception et réalisation PARIMAGE - Décembre 2006

