

Aller jusqu'au bout de la dépollution

Le traitement ultime des déchets toxiques

Philippe Pichat

Résumé Les déchets ultimes, c'est-à-dire non valorisables dans les conditions techniques et économiques actuelles, ont besoin de bénéficier d'un procédé de solidification-stabilisation-stockage pour que l'environnement soit protégé. Les plus grandes précautions basées sur l'expérience des activités de bâtiments et travaux publics (BTP) doivent entourer leur valorisation éventuelle.

Mots-clés Solidification, stabilisation, stockage, déchet ultime.

Abstract Go toward complete depollution. The ultimate treatment of toxic wastes

In order to prevent the degradation of the quality of the environment, surface and ground water, a process of stabilisation, solidification and storage has been developed to treat the ultimate wastes. The know-how of construction and civil engineering activities needs to be used to evaluate their recycling and possible valorisation.

Keywords Solidification, stabilisation, storage, ultimate waste.

Notre « biosphère » est une enveloppe mince de quelques kilomètres qui abrite des écosystèmes (océans, rivières, pâturages, forêts...) en équilibre fragile ; on ne peut envisager un développement durable que dans la mesure où ces écosystèmes ne sont pas sensiblement perturbés par des rejets inconsidérés de déchets toxiques susceptibles de créer une pollution, c'est-à-dire la destruction des cycles biologiques. On distingue, selon leur degré de traitement, les déchets primaires et les déchets secondaires qui, épurés, créent des « déchets de déchets ». Les déchets ultimes sont ceux qui dans les conditions techniques et économiques actuelles ne peuvent pas être valorisés. Il est clair que lorsque le cours d'une matière première monte (par exemple, celui du chrome), des déchets ultimes peuvent alors trouver un client, sinon ils doivent bénéficier d'un procédé de **solidification-stabilisation-stockage (P3S)**, faits qui sont résumés dans le schéma 1.

Lorsque les résidus d'épuration ne sont pas soumis à un traitement idoine, ils donnent lieu à un transfert de pollution. On aura dépensé beaucoup d'énergie pour un résultat incomplet et discutable.

Le cas des résidus d'épuration des fumées (REF) est particulièrement étudié compte tenu de la croissance en demande d'énergie électrique et du développement de l'incinération liée à celui de l'urbanisation (voir tableau I).

seront constitués de particules plus petites. Dans la figure 1, la courbe obtenue avec un granulomètre à laser CILAS 1064 montre la composition granulométrique d'un résidu d'épuration des fumées de déchets industriels (REFIDI).

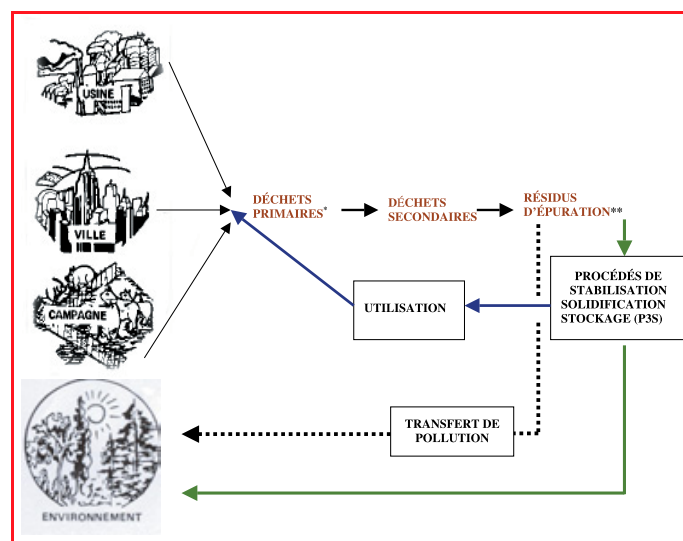


Schéma 1.

*Effluents liquides, gazeux, solides.

**Par exemple, résidu d'épuration des fumées (REF) de combustion de centrales thermiques, d'incinération d'ordures ménagères (REFIOM), de déchets industriels (REFIDI) dont les principales propriétés sont résumées dans le tableau I.

Les P3S

Les résidus d'épuration des fumées (REF) ne sont sous une forme stable dans l'atmosphère terrestre que s'ils sont constitués d'éléments chimiques sous une forme oxydée – ce qui n'est pas le cas par exemple des imbrûlés dans les REF –, mais cette condition nécessaire n'est pas suffisante. De plus, ils peuvent être très solubles dans l'eau compte tenu de leur teneur en CaCl_2 , NaCl ... La complète solubilité sera d'autant plus facilement atteinte que ces résidus

Glossaire

REF : résidu d'épuration des fumées.

REFIDI : résidu d'épuration des fumées de déchets industriels.

REFIOM : résidu d'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères.

Tableau I - Propriétés physico-chimiques de déchets de combustion.

*principalement sels ;

**25 % libres sous forme de CaO ;

***AFNOR NF X 31-210, méthode proche de la future méthode de la Communauté européenne.

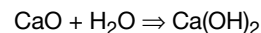
%	Combustion de charbon		Combustion de résidus		
	Cendres volantes	Cendres volantes	Cendres volantes	Résidus d'épuration	Résidus d'épuration
	silico-alumineuses	sulfo-calciques		calciques	sodiques
SiO ₂	48 - 52	21 - 32	< 20	< 4	< 2
Al ₂ O ₃	25 - 30	10 - 16	< 14	< 2	< 1
Fe ₂ O ₃	8 - 2	5 - 7	< 2	< 1	< 1
CaO	1,8 - 3	35 - 48**	< 20	* 10 - 30	< 2
MgO	2 - 3,2	traces - 2	< 3	* < 2	< 1
K ₂ O	3 - 4,5	traces - 2	* < 4	* < 3	< 3
Na ₂ O	3,5 - 4,2	traces - 2	* < 9	* < 7	< 45
SO ₃	0,1 - 0,6	6 - 10	* < 3	* < 12	< 10
Cl	traces	traces	* < 10	* < 30	* < 40
Imbrûlés	< 5	< 5	< 5	< 2	< 2
Métal lourd	< 1	< 2	< 5	< 3	< 3
Fraction soluble***	< 2	< 6	10 << 20	40 << 50	60 << 80

De plus, ils peuvent aboutir à la formation d'un produit cellulaire ou désintégrer le matériau initial compte tenu des fortes pressions produites.

• *Formation de composés expansifs*

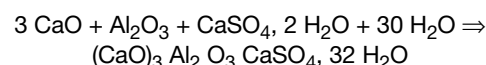
Exemples :

*Les hydroxydes de calcium et de magnésium :



La réaction est utilisée industriellement en techniques de démolition en milieu urbain.

*Il se forme des hydroxydes tels que les aluminates, les ferrites hydratés comme le sulfoaluminat de calcium (ettringite) (CaO)₃ Al₂O₃, CaSO₄, 32 H₂O, avec une augmentation de volume de 400 % et des pressions de plusieurs dizaines de tonnes. La réaction peut s'écrire (d'après [2]) :



• *Formation de composés oxydés et hydratés à partir des particules de fer avec des augmentations de volume de l'ordre de 300 %*

Pour inhiber ces réactions, l'eau libre du site de stockage doit être fixée et les résidus eux-mêmes doivent être mis dans un état :

- *chimique* défavorable à leur dissolution dans l'eau, donc sous une forme très peu soluble tels certains silicates, aluminates...
- *physique* du type monolithique, de façon à minimiser les surfaces en contact avec l'eau,
- *mécanique* permettant de supporter leur propre poids, ainsi que la masse stockée au-dessus sans écrasement ni fluage.

Étude des différentes filières technologiques envisageables en 1975

Avant de proposer la construction du premier atelier d'inertage de la solidification-stabilisation de déchets ultimes en Europe, nous avons prospecté à l'échelle internationale les réalisations industrielles de solidification qui concernaient essentiellement des déchets radioactifs et des déchets de désulfuration de fumées rejetées par les centrales thermiques.

Des études technico-économiques ont été effectuées et des essais à l'échelle du laboratoire

ont été menés avec différentes techniques, chacune ayant ses partisans [3-6] :

- systèmes utilisant des liants organiques ;
- systèmes à base de liants minéraux, ciments commerciaux, ciment Portland, silicates de sodium, phosphates, béton de type Romain ;
- systèmes nécessitant des températures élevées, vitrification, céramisation.

Après ces travaux, une évaluation des différents systèmes de solidification a été effectuée en fonction des caractéristiques du matériau obtenu, de celles du procédé

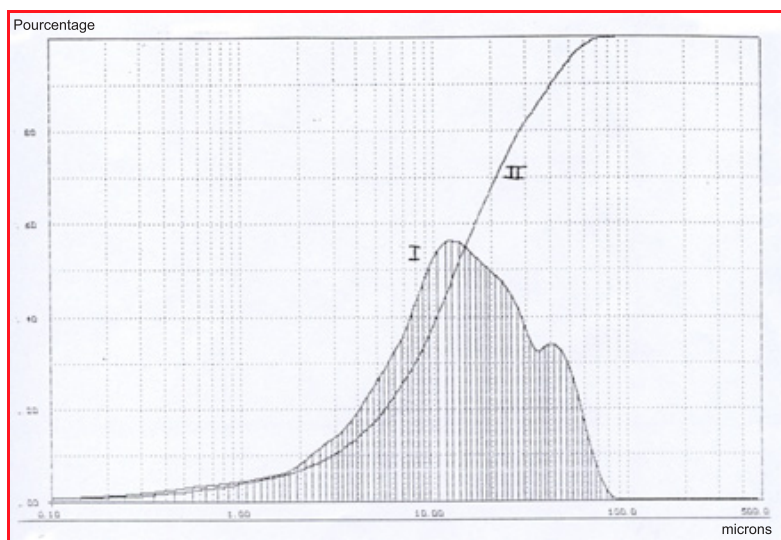


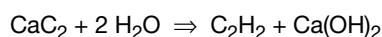
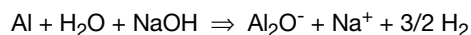
Figure 1 - Courbe de répartition granulométrique d'un REFIDI.

En abscisse : diamètre des particules en microns ; en ordonné : pourcentage de particules.
I : Courbe dérivée dont le pic correspond au diamètre moyen des particules du lot considéré.
II : Courbe cumulée, donnant donc le pourcentage de particules ayant un diamètre inférieur à la valeur indiquée sur l'ordonnée.

Lorsqu'ils sont mis en décharge, les REF peuvent provoquer différents types de pathologies [1], liées aux processus suivants :

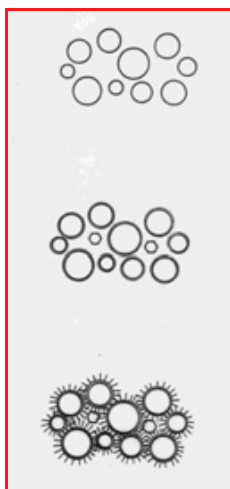
• *Formation de gaz combustibles*

Ces gaz se forment par suite de réaction des particules présentes d'aluminium (ou d'étain) et de carbure de calcium avec l'eau :

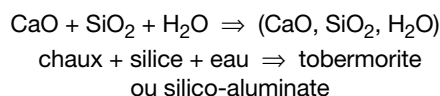


d'obtention du matériau, et de celles du stockage adapté au matériau et au procédé [7]. Seuls les procédés du type liant hydraulique permettent de traiter les déchets ultimes sans l'obligation de faire appel ultérieurement à un autre procédé.

Les procédés Ecofix^R Ashrock^R utilisant le modèle scientifique et technique du pont romain



Les travaux des archéologues ont montré la stabilité depuis plusieurs milliers d'années des mortiers et bétons correctement conçus, préparés et utilisés dans l'Empire romain pour la construction des ponts, aqueducs, réservoirs d'eau potable, thermes, égouts et digues portuaires [6]. La réaction chimique utilisée peut être représentée par l'équation (schéma 2) :



La source de dioxyde de silicium et d'oxyde d'aluminium utilisée initialement par les Romains était la cendre volante de volcan.

Schéma 2.

Depuis près de 2 000 ans, le Pont romain (figure 2) a résisté à cette corrosion chimique et aux agressions mécaniques des crues. A ce sujet, signalons que le pont romain est le seul des six ponts ayant résisté à la poussée des crues catastrophiques de l'automne 1992 de Vaison-la-Romaine.



Figure 2 - Pont romain emprunté par les voitures ; à droite : la lixiviation au quotidien.

Cette stabilité des piles provient de phénomènes physico-chimiques mis en œuvre sur trois échelles : microscopique, macroscopique et celle d'un ouvrage. Ces phénomènes sont utilisés par les procédés Ecofix^R Ashrock^R que nous présenterons à titre d'exemple, compte tenu du fait que nous les connaissons plus particulièrement (encadré 1).

Phénomènes mis en œuvre à l'échelle microscopique

Les réactions suivantes ont lieu :

Transformation d'eau libre en eau liée

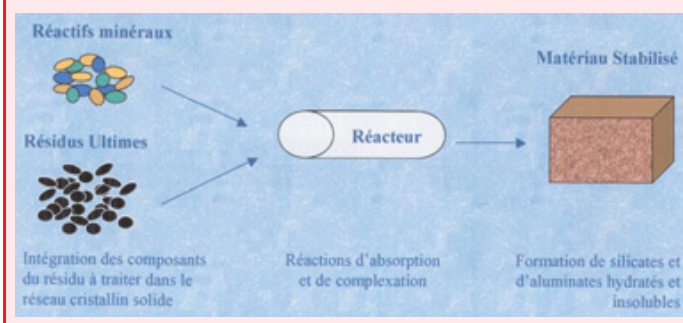
La formation de silicates hydratés utilise les molécules d'eau présentes dans le déchet. Les molécules d'hydrate

Encadré 1

Les procédés ASRHOCK^R ECOFIX^R

Ils consistent en une transformation sans apport thermique du résidu, respectueuse de l'environnement ; la stabilisation ne génère en effet aucun rejet solide, liquide ou gazeux, et s'appuie sur :

- une transformation à la fois physique et chimique du résidu,
- l'utilisation de réactifs minéraux naturels en faible quantité (de préférence des résidus),
- la faible consommation d'énergie du réacteur,
- l'absence totale de réactifs organiques.



formées transforment puis lient progressivement entre elles les particules initiales. C'est le même phénomène que celui vu précédemment avec la « prise » du ciment romain (schéma 2).

Il peut effectivement se former des silicates de calcium hydratés, comme la tobermorite ($\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}$), des aluminates de calcium hydratés, par exemple l'ettringite ($3 \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 3 \text{CaSO}_4, 32 \text{H}_2\text{O}$) quand le déchet contient aussi de l'alumine et de l'anion sulfate (schéma 3).

Formation de composés insolubles

Des silicates et des aluminates sont formés. Ils sont en général très peu solubles et sont l'un des principaux constituants de la croûte terrestre. Certains sont similaires à ceux formés lors de la solidification de déchets (K, Ca, Zn, Mn, Cr, Fe...).

Formation de composés de substitution-complexation

Lors de la formation d'un composé, tel l'ettringite par exemple, un atome d'aluminium peut être remplacé dans la structure par un atome de chrome. Ce type de réaction est intéressant car il complète la formation de composés insolubles qui a lieu à l'échelle atomique et moléculaire.

Réactions d'adsorption

Les silicates hydratés formés développent des surfaces spécifiques considérables, telles celles des molécules de ($\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}$) représentées sur la photographie au microscope électronique (figure 3). Des cations, des anions et des molécules peuvent être piégés sur ces surfaces de l'ordre de la centaine de m^2/gramme .

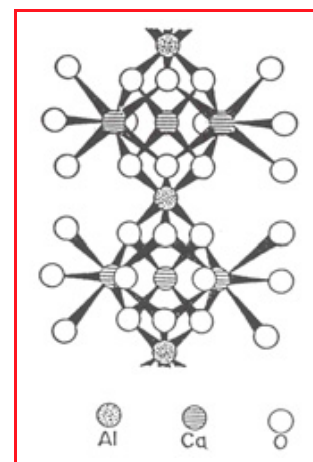


Schéma 3 - L'ettringite.

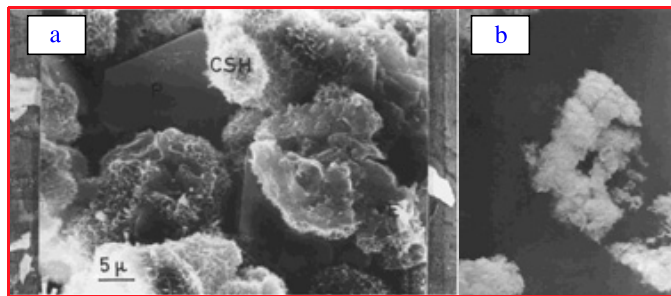


Figure 3 - (a) Photographie au microscope électronique de (CaO, SiO₂, H₂O) tobermorite ; (b) des chlorures sont fixés sous forme de chloroaluminates (photo MEB 5µ).

Phénomènes mis en œuvre à l'échelle macroscopique

Dès qu'il est traité, le déchet ultime subit une véritable transformation, à savoir :

- augmentation de la densité pour les pulvérulents de 0,3-0,4 jusqu'à 1,8-2 ;
- formation immédiate au point de vue manutention d'un mastic (les problèmes de poussière en cas de transbordement ou de vent sont supprimés, ce qui est intéressant au point de vue hygiène du travail) ;
- formation d'un véritable matériau dont les propriétés mécaniques sont proches d'un béton routier, avec une résistance à la compression $R_p > 4$ mégapascal (40 kg/cm²), et une résistance à la flexion $R_f < 3$ mégapascal (30 kg/cm²). Ces résistances mécaniques augmentent pendant plusieurs

mois ainsi qu'on peut le constater sur le graphique de la figure 4.

La perméabilité du matériau Ecofix^R peut être inférieure à celle d'une tuile céramique. L'essai est réalisé en scellant sur une plaquette de 1,5 cm d'épaisseur de matériau solidifié un tube vertical contenant de l'eau sur une hauteur de 10 cm. On mesure la quantité d'eau qui peut passer à travers la plaquette. Pour les tuiles céramiques, la norme prescrivait que la quantité d'eau soit inférieure à 10 mL par 24 heures. Avec le matériau Ecofix^R Ashrock^R, on a obtenu entre 0,6 et 3 mL par 24 heures, quantité bien inférieure à la norme prescrite.

La lixiviation est considérablement diminuée par rapport à celle du déchet brut ainsi que le montrent clairement la figure 4 et le tableau II comparatif [8].

La fraction soluble est considérablement diminuée par rapport à celle du déchet brut. Elle est inférieure à 10 % (norme AFNOR 31210) et même moins avec certains types de déchets qui ont été traités avec soin auparavant.

Comportement à long terme

Bien sûr, lorsqu'ils sont soumis aux intempéries, les matériaux (y compris ceux connus pour leur solidité tels que le granit) se dégradent peu à peu avec le temps, mais à une vitesse très faible par rapport à l'échelle géologique. On peut encore diminuer cette très faible vitesse en protégeant les matériaux des intempéries par un ouvrage type Centre d'enfouissement technique (CET) ; c'est le cas des matériaux solidifiés. Les échantillons n'ont pas donné lieu effectivement à des évolutions significatives. Pour compléter ces informations, des échantillons ont été confiés à l'INRA

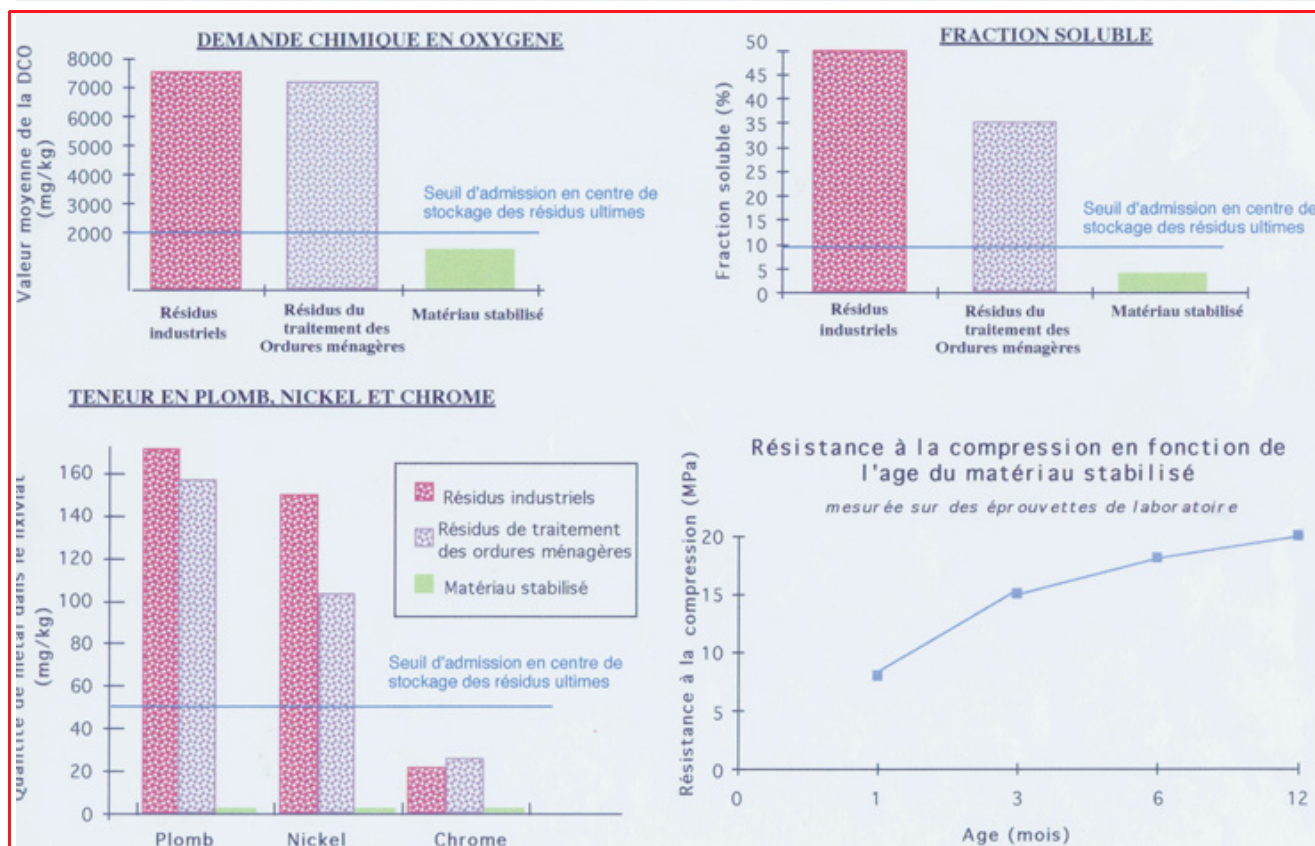


Figure 4 - Performances des procédés de stabilisation ECOFIX® ASHOCK®.

Tableau II - Comparaisons de la lixivibilité en mg/kg de déchets d'incinération de déchets industriels et de déchets municipaux avant et après solidification (norme AFNOR 31-210).

Paramètres	Moyennes lixiviations brutes		lixiviation après solidification
	Ordures ménagères	Déchets industriels	
DCO	7 200	7 500	< 500
Phénols	0,9	0,8	< 0,2
Pb	145	45	< 0,1
Zn	28	25	< 0,1
Cd	0,5	0,6	< 0,2
Cr	6,5	5	< 0,1
Fe	24	20	< 0,1
Ni	1,2	2	< 0,2

Tableau III - Fraction des éléments toxiques libérés pendant une durée de l'ordre de 700 ans.

Éléments toxiques	Pourcentages
Cd	0,003
Ni	0,5
Pb	0,07
Cu	0,4

pour effectuer des essais de vieillissement accéléré dans le cadre d'une recherche cofinancée par l'ADEME et le CreeD (Centre de recherches sur l'environnement et les Déchets) [9].

On peut voir dans le tableau III ce que serait la fraction des éléments toxiques libérés pendant une durée de l'ordre de 700 ans. Pour arriver à ces valeurs, on utilise un

dispositif de contact accéléré sur un échantillon, du type Soxhlet (représenté dans le schéma 4), dans lequel l'eau est continuellement recyclée et, par là, peu à peu enrichie. Il existe une relation entre le temps de contact dans le Soxhlet et une période d'exposition aux intempéries pour un climat donné. En conséquence, le dispositif utilisé permet de simuler au laboratoire le vieillissement.

Remarquons enfin que les Pouvoirs publics ont préconisé le stockage du résidu transformé par le procédé de solidification-stabilisation dans un ouvrage qui minimise les variations de température et d'hygrométrie, principales

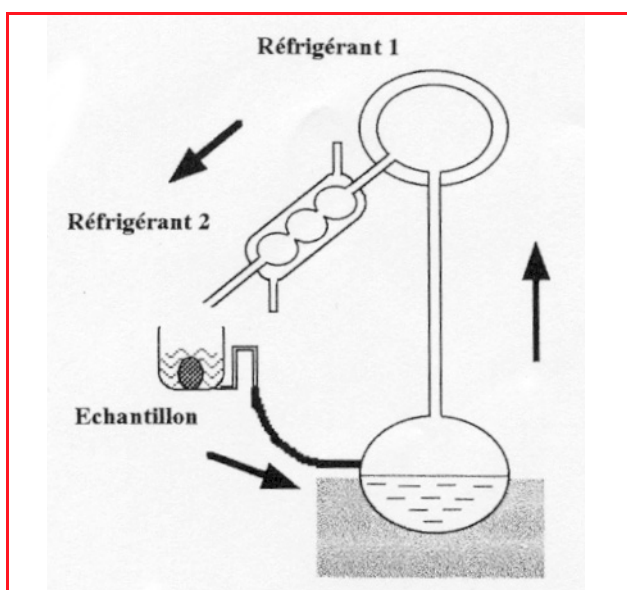


Schéma 4 - Dispositif de Soxhlet.

causes bien connues du vieillissement d'un matériau, et dont les caractéristiques sont données dans l'encadré 2.

Observations

La solidification-stabilisation-stockage est le dernier chaînon de la succession d'opérations de traitements qui commence au déchet brut. Quand dans un incinérateur municipal (un exemple parmi d'autres), des déchets sont incomplètement brûlés, les particules de cendres volantes recueillies contiennent des composés à haute teneur en carbone qui sont défavorables à l'efficacité des P3S. Il n'est ni souhaitable ni raisonnable économiquement que ce procédé doive « gommer » toutes les erreurs ou insuffisances qui ont eu lieu auparavant pendant les différentes étapes de l'épuration. Les populations, leurs associations, leurs élus, leurs traiteurs d'eau potable ont le souci légitime que les déchets ultimes soient stockés dans un système offrant de solides garanties à long terme. Les producteurs de déchets sont soumis à la concurrence économique (directement pour les entreprises, indirectement pour les municipalités), et ont la préoccupation de ne pas trop augmenter leurs coûts. Certaines techniques de solidification-stabilisation-stockage, telles celles décrites dans cet article, apportent une solution commune à ces deux préoccupations d'actualité en inertant des déchets ultimes par d'autres déchets ultimes.

Ces résultats ont toutefois pu souffrir au niveau exploitation :

- Du système d'évaluation du résidu solidifié utilisé par certaines administrations qui privilégient trop les performances à court terme, à 28 jours comme pour un béton ordinaire seulement alors que les performances peuvent s'améliorer pendant environ 18 mois. Les besoins ne sont pas les mêmes : une entreprise de construction qui a coulé du béton souhaite enlever le plus tôt possible les coffrages de façon à diminuer ses coûts. En ce qui concerne les P3S, l'objectif principal est la pérennité.
- Des exploitants qui ont été obligés d'utiliser des liants à prise rapide libérant pendant des années de la chaux libre ; cette dernière pourra en conséquence provoquer des pathologies du type « expansion à retardement » vues précédemment (rappelons que cette libération de chaux protège par contre les armatures en acier contre la corrosion dans le béton d'un ouvrage classique).
- De réacteurs conçus pour mélanger des granulats (dimensions de quelques μm) du ciment Portland, alors que comme vu précédemment, les REF par exemple ont des dimensions de l'ordre du micro.
- De l'importance trop importante donnée à la présence de chaux en excès dans la solution lessivée (test dit TCLP aux États-Unis).
- De l'évaluation rudimentaire des procédés.

L'aspect « développement durable » n'est pas pris en compte [7]. Des exploitants utilisent des liants dont la fabrication relargue du gaz carbonique de deux façons : en décomposant du calcaire, et en brûlant un combustible (charbon, fioul...).

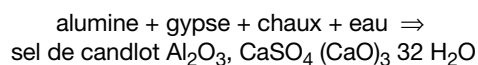
Quelques utilisations des P3S

Des précautions bien nécessaires aux niveaux microscopique et macroscopique

La réutilisation des résidus dans les BTP est notre objectif depuis longtemps [10]. Toutefois, le coût d'un ouvrage de

BTP est couramment de l'ordre de plusieurs centaines de fois celui des matériaux utilisés. L'économie à court terme réalisée en utilisant par exemple des résidus de combustion au lieu des liants et des granulats traditionnels peut être minime et ne pas être économiquement significative par rapport aux risques de « pathologies à retardement ».

Les difficultés déjà évoquées se situent d'abord au niveau de la prédisposition de certains résidus à former des composés expansifs à retardement qui font fissurer, voire éclater le matériau et l'ouvrage, en facilitant la dégradation par l'eau. A ce sujet, il y a quelque temps dans la banlieue Nord de Paris, nous avons été nommés pour une expertise concernant une ancienne usine dont des bâtiments avaient été transformés en bureaux. Sur les lieux, on observait de larges fissures sur une seule façade, celle orientée à l'ouest. Les bâtiments dataient de la fin du XIX^e siècle et les murs avaient été montés avec du mâchefer de charbon. Lors de la rénovation, un enduit traditionnel (chaux + Portland [11]) avait été mis sur les murs. Or en région parisienne, les vents dominants viennent de l'ouest et apportent la pluie ; l'eau avait dissous de la chaux libérée par l'enduit et pénétré dans le mâchefer, entraînant la réaction suivante :



avec (comme déjà mentionné) une augmentation de volume de l'ordre de 400 % par rapport aux constituants de départ et une pression de l'ordre de plusieurs tonnes qui provoqua de larges fissures [2].

Avec certains résidus, les difficultés se situent au niveau de la solubilité totale (*tableau I*). Ainsi, l'utilisation d'une REF très soluble dans un ouvrage apporte un risque non négligeable, alors que par exemple, des quantités considérables de cendres volantes de charbon très peu solubles [12] et de béton recyclé très peu soluble sont disponibles [13]. Rappelons que le béton est fabriqué à partir de granulats silico-calcaires pratiquement insolubles.

Des précautions bien nécessaires au niveau de l'ouvrage

Les précautions doivent se situer non seulement aux niveaux microscopique et macroscopique ainsi qu'on l'a vu précédemment, mais aussi à celui de l'ouvrage.

Quelques producteurs de déchets ultimes, phosphogypse, boues rouges, colis radioactifs, déversaient ceux-ci en mer ; cette pratique est enfin clairement interdite par la communauté internationale.

Mal informés de leurs responsabilités dans le domaine civil et pénal, quelques détenteurs de déchets ultimes envisagent de les envoyer dans des mines [14]. Les mines (à l'exception de celles de chlorures) présentent un milieu particulièrement peu favorable à des opérations de P3S : un élément chimique y est souvent présent à l'état de sulfure susceptible de s'oxyder. Les eaux deviennent alors acides et constituent un milieu particulièrement défavorable à la pérennité de résidus solidifiés stockés [15]. De plus, l'eau est parfois présente sous forme de véritables rivières souterraines.

Les désordres (affaissements de terrain, pollution des ressources locales en eau potable...), observables « de visu » en surface de zones minières, donnent une vision édulcorée des désordres qui ont lieu dans le sous-sol des mines : éboulements, inondations des galeries, dégradation des nappes phréatiques...

Enfin, un ouvrage de BTP construit avec des résidus peut subir des dégradations par les intempéries, des modifications, l'abandon. Qu'advient-il alors des matériaux constitutifs, c'est-à-dire de ces anciens résidus ? Créeront-ils une pathologie comme le cas suivant vécu ?

La teneur en eau d'un captage précédemment d'eau potable avait vu en quelques années sa teneur en sulfate de calcium atteindre l'ordre de 500 mg/L. Les investigations menées à la demande d'un Tribunal montrèrent que des propriétaires de terrains situés non loin, mais hors du périmètre de protection des captages, avaient d'abord vendu une autorisation d'extraction de sable, puis vendu ensuite une autorisation de dépôt de matières qualifiées « d'inertes » par des administrations, pour enfin vendre le terrain comblé comme constructible. Les investigations montrèrent ensuite que les matières inertes contenaient des plâtres, c'est-à-dire du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ dont la solubilité est de 2 000 mg/L.

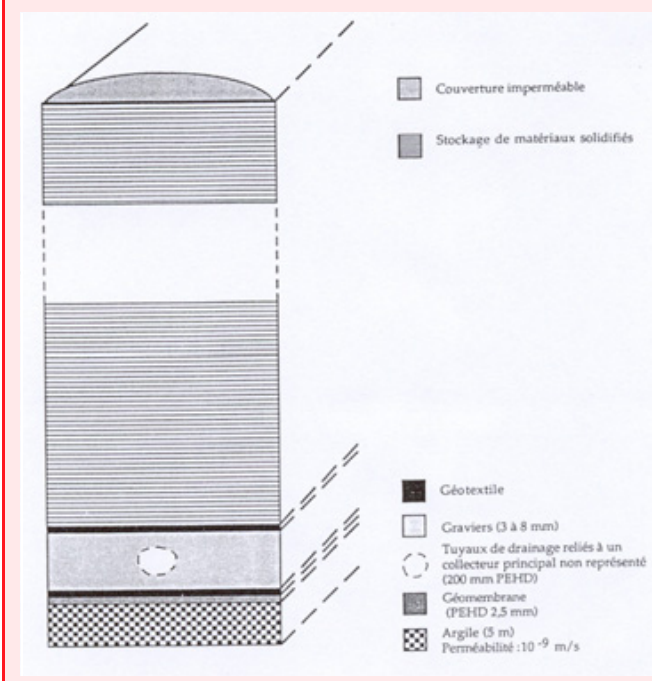
Encadré 2

Phénomènes mis en œuvre à l'échelle de l'ouvrage

L'eau étant le vecteur potentiel d'une pollution, le dispositif décrit ici a pour but :

1. d'éloigner les eaux météoriques et souterraines des matériaux solidifiés,
2. de recueillir rapidement un lessivât éventuel,
3. de pouvoir surveiller le site de stockage, soit par des visites, soit en utilisant des robots.

Ce dispositif a un certain aspect perfectionniste en termes de risque. En plus de la protection contre les agressions mécaniques (fluage, écrasement), physiques (gradients, hydriques, thermiques), chimiques (eau, feu), biologiques (mousses, lichens, végétation), le site est en sécurité contre les agressions humaines. Le dispositif comprend un système de contrôle continu de l'air, de l'eau et du sol. Des capteurs variés contrôlent leurs paramètres de qualité (pH, métaux lourds, etc.) qui sont enregistrés. Des piézomètres permettent la prise d'échantillons d'eaux souterraines et les drains sont régulièrement inspectés. Toute anomalie peut donc être détectée très rapidement.



Conclusion

Il n'y a pas d'activités humaines, y compris de recyclage de résidus, sans production de déchets ; lorsque ces derniers ne sont pas coproduits directement, ils le sont indirectement avec l'énergie consommée. Le producteur d'un tel déchet « ultime » doit donc par exemple le confier à une société spécialisée où il bénéficiera d'une opération de solidification-stabilisation-stockage. Les déchets ultimes peu solubles tels que les cendres volantes de charbon sont partie intégrante des ouvrages en béton de ciment Portland. Les REFIDI et REFION, eux, ont une solubilité élevée pouvant atteindre 80 %. Le souci de traçabilité et les préoccupations classiques de pérennité ne devraient pas encourager les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage à les incorporer dans des ouvrages banaux de BTP ou à les stocker ailleurs que dans des ouvrages spécialisés, contrôlables sans difficultés par les pouvoirs publics. Il serait souhaitable que l'augmentation de la pression administrative permette aux exploitants des P3S de mieux répercuter sur les producteurs de déchets les coûts nécessaires à l'obtention d'objectifs de qualité.

Enfin, l'évolution des techniques industrielles produit de nouveaux types de déchets ultimes ; ces derniers nécessitent la continuation de l'effort d'innovation technologique.

Remerciements

Ces travaux débutés chez un fabricant de matériaux de construction et développés dans un groupe spécialisé dans la gestion de l'environnement ont bénéficié en particulier des conseils de Bernard Cottin, des essais analytiques du professeur Albert Vaquier (INSA Toulouse), du C3S et d'exploitants ; nous les en remercions vivement.

Références

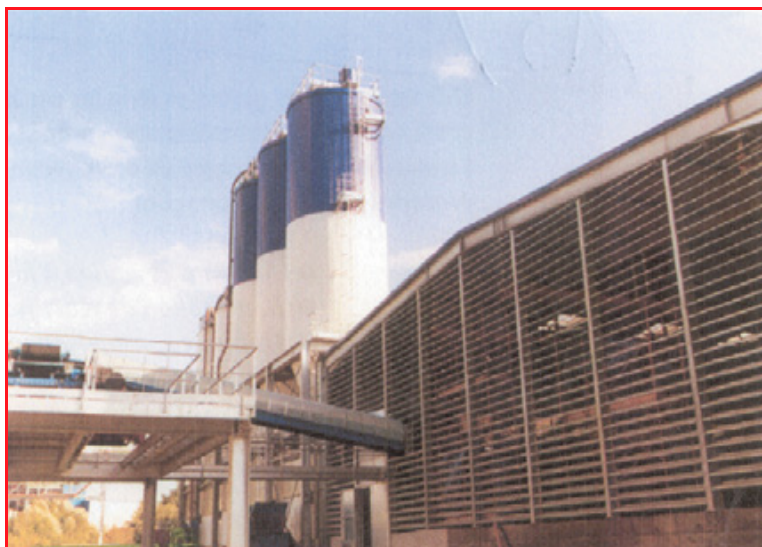
- [1] Pichat P., *Chemical properties of incineration residus. Consequences on pathologies occurring in landfill and on the choice of a chemical stabilization process*, ASH, Arlington (États-Unis), nov. 1997.
 [2] Blondeau P., Gonflement de remblais, utilisation de matériaux de démolition, *Sycodes informations*, nov.-déc. 1993, 21.

- [3] Maraval S., Mathurin D., Veron J., Murat M., Quels matériaux de confinement pour les poussières toxiques ?, *Environnement et Technique*, nov. 1992, 121, p. 31.
 [4] Grey I.E., Minerals as materials: environmental and industrial applications, *Materials Forum*, 1992, 16, p. 185.
 [5] Ryan J., Mc Phail D., Rogers P., Oakley V., Glass deterioration in the museum environment, *Chemistry and Industry*, 5 juil. 1993, p. 498.
 [6] Roman concrete and mortar, *The structural engineer*, juin 1974, 6 V 52, p. 193 ; *The Archeological New Letter*, 1958, vol. 6 (9), p. 206.
 [7] Pichat P., A methodology to select optimum waste stabilization process, R'97 Recovery-recycling-reintegration, Genève (Suisse), 4-7 fév. 1997 et International conference on incineration and thermal treatment technologies, Savannah, Georgia (États-Unis), 6-10 mai 1996.
 [8] International incineration conference, Houston, Texas (États-Unis), 9-14 mai 1994 ; Nugent M., *Total solubility parameter as a performance standard for chemical stabilization of ashes*, p. 285 ; Pichat P., Chemical stabilization of ashes from high temperature incineration facilities in Europe.
 [9] N. Humez et R. Prost (INRA), L. Piketty, B. Schnuriger, A. Benchara, P. Pichat, (C3S, Sarp Industries), Étude de l'altérabilité de résidus ultimes stabilisés par un procédé de solidification/stabilisation à base de liants minéraux, *Procédé de solidification et de stabilisation des déchets*, Nancy, 28 nov.-1^{er} déc. 1995.
 [10] Pichat P., La réutilisation des déchets dans les travaux publics et la construction, *Revue des Matériaux de construction*, nov.-déc. 1975, 697, p. 331 ; Pichat P., The use of combustion wastes opportunities and risks, R'O2 Integrated resources management, Genève (Suisse).
 [11] Pichat P., Les liants minéraux : propriétés, usages, évolutions, *La Technique Moderne*, 2001, 1-2-3, p. 23.
 [12] Pichat P., *La gestion des déchets*, Coll. Domino, Flammarion, 1995.
 [13] Galias J.L., Sulphate content threshold for recycled aggregates used in concrete III, *Recycling 99*, Genève, 1999, p. 161.
 [14] Kaliampakos D., Mavrepoulos A., Prousiotis J., National Technical University of Athens, Grèce, Abandoned mines as hazardous waste repositories in Europe, *Proceedings of the International conference on solid waste technology and management*, 2003, 18, p. 532.
 [15] Pyrite-induced oxidation zone in dumps of lignite mining and its dangerous potential with regard to ground water, Exemple Cospuden Zwenkan (Central German lignite district) CA 140 1167712 ; Cesnovar R., Pentinghaus Horst J. (Karlsruhe Germany) ; *Zeitschrift fur Geologische wissenschaften*, 2003, 31 (2), p. 111.



Philippe Pichat

est ingénieur, docteur d'état, expert national agréé par la Cour de cassation et expert près la Cour Administrative de Paris.



L'usine de Limay (78), hall de stockage des résidus.