

ÉTUDE DE LA FAISABILITÉ DE LA DÉSORPTION THERMIQUE POUR LES SOLS POLLUÉS PAR DES MOLÉCULES ORGANIQUES

Véronique Risoul*, Vivien Renauld**, Guy Fraysse***, Sylvain Durécu*, Gwenaëlle Trouvé**, Patrick Gilot**

*Tredi Département Recherche, **Laboratoire GRE, ***Tredi, Service Études et Projets

Une meilleure connaissance des phénomènes régissant la décontamination thermique des sols permet d'améliorer la conception des procédés de traitement thermique et leur mise en œuvre.

La première étape de ce travail a été menée par analyse thermogravimétrique sur des petites quantités de sols pollués artificiellement afin de déterminer les mécanismes fondamentaux mis en jeu lors du traitement thermique. L'analyse thermogravimétrique apparaît comme un outil rapide permettant d'estimer les températures et les vitesses de décontamination de sols pollués. L'étude de la décontamination thermique (températures de décontamination et contamination résiduelle après traitement) a ensuite été réalisée sur un pilote de laboratoire puis à l'échelle semi-industrielle. L'influence des principaux paramètres a pu être étudiée pour des sols pollués par des HAP : la température et le débit d'air de balayage sont les facteurs ayant une influence prépondérante sur la contamination résiduelle en HAP.

A better knowledge of the phenomena governing the thermal decontamination of soils allows to improve the conception of the thermal treatment processes: this study was realised in this aim. The first stage of this work was done by thermogravimetric analysis with small amounts of soils artificially polluted. The fundamental mechanisms controlling the release of typical organic pollutants from the soil matrix during the thermal treatment have been identified. Results have shown the importance of the inter-particle diffusive transport of the gaseous pollutants within the porous media and above the bed of soil. Furthermore, decontamination rate and decontamination temperature domains were easily obtained with this tool for several polluted soils. In a second time, the study of the thermal decontamination of soils was led on a laboratory-scale pilot: decontamination temperatures, residual contamination level and the toxicity of the gases released were studied.

To validate the fundamental results obtained and to confirm the feasibility of the thermal desorption process at the semi-industrial scale, a thermal treatment unity (30kg/h) was developed. The influence of the

main parameters (temperature, pressure, residence time and air flow-rate) was carried out for soils polluted with HAP. Treatment temperature and air flow-rate are the most important factors influencing the residual HAP level in the treated soils.

INTRODUCTION

Les sols contaminés représentent un danger important pour l'homme (inhalation, contact dermique avec les polluants ou contamination de la chaîne alimentaire), et pour l'environnement (infiltration des polluants vers la nappe phréatique). Pourtant, la prise de conscience sur la nécessité de contrôler et de traiter les sites contaminés est relativement récente. La législation sur le sujet date, aux Etats-Unis, de 1980 avec la mise en place de lois telles que « Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act » (CERCLA) ou « Superfund Amendment and Reauthorisation Act » (SARA) qui définissent les sites à traiter et avec quelle urgence. En Europe, cette prise de conscience a été à peine plus tardive, mais la législation sur le sujet n'a été effective, pour la plupart des pays européens, qu'à partir de 1987 [1-3].

Le marché des sites pollués a été évalué par l'UPDS (Union Professionnelle des entreprises de dépollution des sites) à environ 400 millions de francs, en France, en 2000. Depuis les années 1980, pour faire face à la demande, les techniques de décontamination des sols ont fait l'objet de nombreuses études de recherche [4]. Ces techniques sont aujourd'hui très nombreuses et variées [5]: méthodes d'évacuation de la pollution (excavation - mise en décharge), méthodes de fixation de la pollution (vitrification, confinement, stabilisation), méthodes de destruction de la pollution (biodégradation, incinération, traitement chimique), et méthodes de transfert des polluants dans une phase différente traitée ultérieurement (désorption thermique, lavage, extraction sous vide).

La désorption thermique consiste au transfert des polluants vers la phase gazeuse par chauffage sous atmosphère oxydante ou non, puis destruction de ces polluants gazeux dans une étape secondaire (postcombustion, condensation...) [6-9].

C'est une technique émergente en Europe qui se caractérise par une très grande efficacité pour des durées de traitement relativement courtes : selon la technologie utilisée, le temps de séjour moyen des terres dans l'unité varie de 10 minutes à 1 heure [10].

Une meilleure connaissance fondamentale des phénomènes liés à la décontamination des sols par traitement thermique permet d'améliorer la conception et la mise en œuvre de ces procédés. Le but de cette étude est de valider, par des études fondamentales (analyse thermogravimétrique) et appliquées (pilotes de désorption thermique) à différentes échelles, la méthode de la désorption thermique pour la décontamination de sols pollués par des molécules organiques. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une collaboration entre l'université de Haute-Alsace et la société Tredi sur la thématique des sols contaminés.

Le premier objectif de l'étude a été de mettre en évidence les mécanismes fondamentaux impliqués dans la décontamination thermique des sols. En particulier, l'influence de la nature minéralogique du sol et de la nature chimique du polluant, sur la décontamination thermique ont été prises en compte. Pour la deuxième partie de l'étude, le but était de confirmer, sur des masses plus élevées et avec des sols réels, à l'aide d'un pilote de décontamination thermique de laboratoire, les résultats obtenus par analyse thermogravimétrique. Ce travail a également permis d'apporter des informations complémentaires sur la contamination résiduelle du sol en fin de traitement, paramètre très important du point de vue de la faisabilité du traitement thermique. Finalement, afin de valider l'ensemble des résultats obtenus à l'échelle du laboratoire avant leur application à l'échelle industrielle, un pilote semi-industriel fonctionnant en continu a été réalisé.

MÉTHODES ET MATÉRIELS

Analyse thermogravimétrique

Pour étudier l'influence de la nature minéralogique du sol et de la nature chimique du polluant, sur la décontamination thermique, trois sols standards européens ont été contaminés artificiellement. Ces sols sont de nature minéralogique différente et parfaitement connue : S1 est de type argileux, S2 de type calcaire et S3 de type sédimentaire. Des détails complémentaires sur la nature des sols S1, S2 et S3 sont présentés dans des publications antérieures [11,12]. Les polluants choisis sont des molécules organiques cibles telles que l'hexachlorobenzène (HCB), le 4-chlorobiphényle (4-CBP) et différents hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) tels que le naphthalène, l'anthracène et le pyrène. La procédure de contamination utilisée a été décrite dans une précédente publication [13]. Le taux de contamination initial est d'environ 4 % en masse par rapport au sol non contaminé. L'étude de la décontamination des sols S1, S2, S3 a été

menée par analyse thermogravimétrique avec une thermobalance de type TG Cahn 121 [13,14], sur des échantillons de 30 mg environ. Les conditions opératoires utilisées pour cette étude sont : une vitesse de chauffe de 5°C/min jusqu'à 750°C et un flux de balayage d'air (5NL/h).

Pilote de laboratoire

Le pilote de laboratoire utilisé pour la deuxième partie de l'étude consiste en un réacteur statique à l'intérieur duquel est placé le sol à traiter (500 g maximum). Ce pilote a été décrit précédemment [15]. Le réacteur est fermé hermétiquement, il est chauffé par des résistances électriques extérieures d'une puissance totale maximale de 1750 W. Ce pilote peut fonctionner sous vide partiel (0.9 à 0.1 bar absolu), avec ou sans balayage d'air (0 à 300 NL/h). Il est équipé de 3 thermocouples de type K permettant le suivi de la température du sol, des gaz et de la paroi du réacteur. Un système de piégeage des polluants émis en phase gazeuse, par condensation et adsorption sur charbon actif, permet d'éviter le rejet de substances nocives à l'atmosphère.

Les sols contaminés, étudiés ici, sont des sols « réels » (en opposition avec les sols pollués artificiellement) pollués soit par un mélange de polychlorobiphényles : « sol PCB » (teneur en PCB : 6000 ppm), soit par un mélange de HAP « sol HAP » (teneur en HAP : 12000 ppm). Les autres principales caractéristiques de ces sols sont présentées dans le tableau I.

Tableau I : Principales caractéristiques des sols réels étudiés

	Pilote de laboratoire		Pilote semi-industriel		
	Sol PCB	Sol HAP	Sol MAS	Sol GST	Sol LA
Nature de la contamination initiale	PCB (type Aroclor 1260)	HAP	HAP	HAP	HAP
Teneur en contaminant (mg/kg sol sec)	6000*	12 000**	9000**	8000**	150**
* teneur en équivalent Aroclor 1260					
** teneur en HAP totaux calculée sur la base des 16 HAP de référence de l'EPA					
Analyse granulométrique selon la norme NFX 31-107 (en % de sol sec)					
Argile (<2µm)	4,7	22,5	22,5	5,0	3,1
Limon fin (2-20 µm)	4,5	13,2	13,2	5,2	18,1
Limon grossier (20-50 µm)	4,9	16,2	16,2	35,6	23,9
Sable fin (50-200 µm)	25,6	13,9	13,9	15,3	11,7
Sable grossier (200µm - 2mm)	60,3	34,3	34,3	38,9	43,2
Humidité (par rapport sol sec)	15%	16%	25%	13%	25%

La méthode analytique utilisée pour déterminer la teneur en polluant dans les sols est la chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur ECD pour les sols pollués par des PCB, et à un détecteur FID pour les sols pollués par des HAP. Les échantillons de sols subissent préalablement une extraction par chauffage à reflux, pendant 6 heures, dans de l'hexane (pour le sol pollué par des PCB) ou dans du dichlorométhane (pour le sol pollué par des HAP). La teneur en PCB dans les sols est exprimée en équivalent Aroclor 1260

(mélange de PCB contenant en moyenne 60 % de chlore, représentatif du mélange de PCB présent dans le sol étudié). La teneur en HAP est exprimée en HAP totaux calculée sur la base des 16 HAP de référence. Le détail des modes opératoires utilisés est décrit par ailleurs [15,16].

Pour suivre l'avancement de la décontamination en fonction de la température, des échantillons de sol sont prélevés pour différentes températures au cours du traitement puis analysés.

Les effluents gazeux issus du traitement thermique du sol HAP ont également été étudiés. Les gaz (non épurés) sont condensés dans deux barboteurs disposés en série contenant chacun une solution de dichlorométhane (400 ml chacun), refroidie dans un bain de glace. L'analyse des solutions obtenues se fait par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse [16].

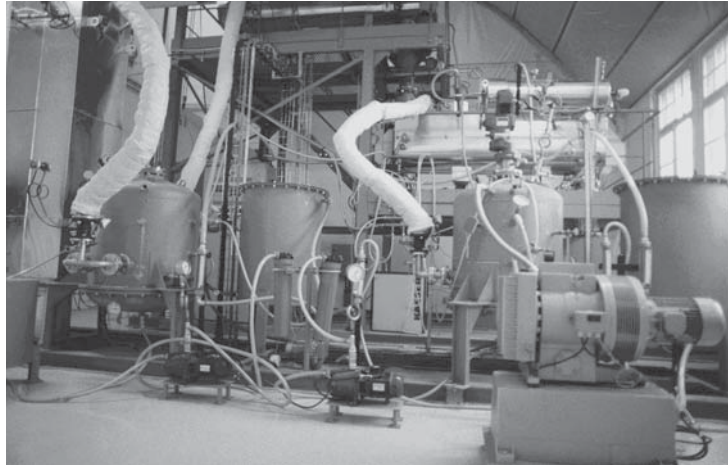


Photo 1 : Vue d'ensemble du pilote semi-industriel de traitement thermique de terres polluées

Pilote semi industriel

Pour la dernière partie de l'étude, un pilote semi-industriel fonctionnant en continu a été conçu : le schéma de principe est présenté sur la figure 1. Ce pilote de désorption thermique (photo 1) est dimensionné pour traiter environ 30 kg/h de terre polluée dont l'humidité relative est inférieure à 30 % et la teneur en PCB totaux inférieure à 50 ppm [10]. Deux transporteurs à pales rotatives, chauffés par des résistances électriques externes, sont disposés en série : le premier fonctionne à pression atmosphérique, à une température de l'ordre 100°C et permet la déshydratation de la terre, le second fonctionne sous vide partiel, à une température pouvant varier de 250 à 500°C afin de vaporiser les polluants. Un balayage d'air, préalablement chauffé à une température légèrement supérieure à la température de

consigne des malaxeurs, traverse les malaxeurs à contre-courant des terres pour favoriser l'entraînement de la vapeur d'eau et des polluants générés en phase gazeuse. En sortie du second malaxeur, les terres déshydratées et dépolluées sont réceptionnées dans un silo de recette raccordé hermétiquement à l'installation. L'alimentation en terre est réalisée grâce à une trémie de dosage couplée à une écluse rotative étanche. Chacun des malaxeurs est raccordé à un système de traitement des gaz indépendant. Les gaz sortant du malaxeur de déshydratation sont dépoussiérés au moyen d'un filtre à manches avant de traverser un laveur-condenseur (contenant de l'eau refroidie en permanence par un circuit de refroidissement indépendant) et un filtre à charbon actif. Les gaz en provenance du malaxeur de désorption passent dans un laveur-condenseur puis dans un absorbeur à huile. Les composés gazeux incondensables traversent ensuite un

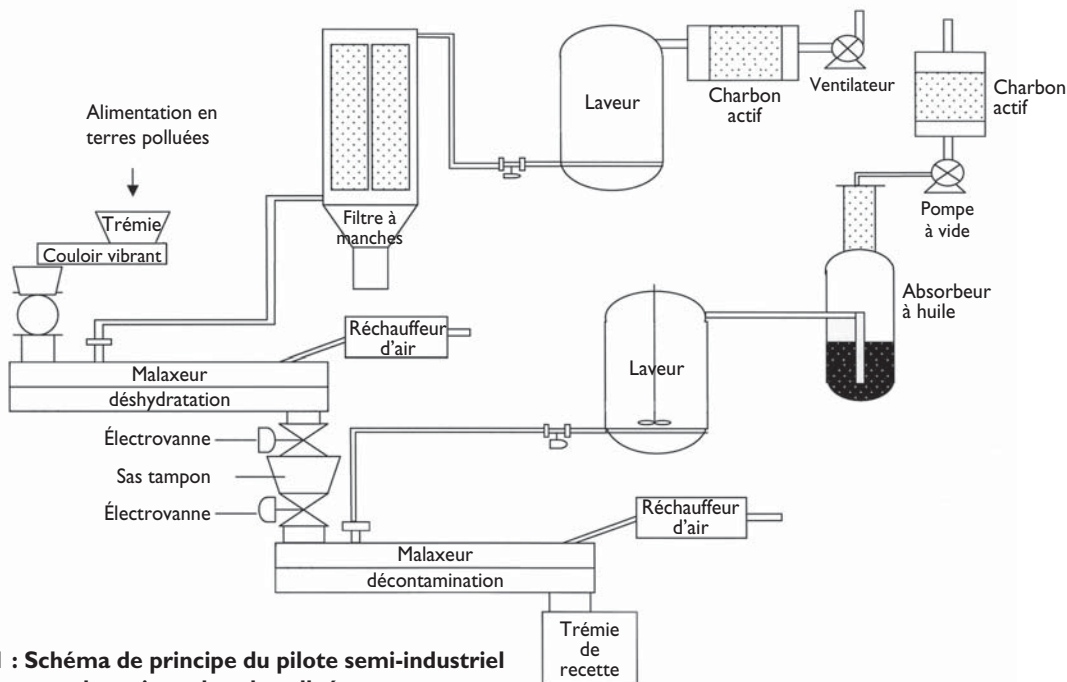


Figure 1 : Schéma de principe du pilote semi-industriel de traitement thermique de sols pollués

filtre à charbon actif avant d'être rejetés à l'atmosphère. Ce traitement permet, notamment, d'obtenir des rejets contenant moins de 50mg/Nm³ de COV.

Les prélèvements de terre traitée sont réalisés directement dans le silo de recette en fin d'essai. Les analyses quantitatives sont effectuées, selon un protocole opératoire identique à celui utilisé, au cours de l'étude sur le pilote de laboratoire, pour l'analyse des sols pollués par des HAP (chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur FID après extraction des polluants par chauffage à reflux dans une solution de dichlorométhane pendant 6 heures).

L'étude réalisée sur l'unité pilote concerne l'influence des paramètres expérimentaux (température, vide partiel, temps de séjour et débit d'air de balayage) à la fois sur le phénomène de décontamination et sur la contamination résiduelle de la terre après traitement.

Les sols étudiés sont 3 sols « réels » pollués essentiellement par des HAP : les sols MAS, GST et LA. Les principales caractéristiques de ces sols sont présentées dans le tableau 1.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Analyse thermogravimétrique

À partir de la comparaison des thermogrammes des sols pollués et des sols non pollués correspondants, les taux de décontamination puis les vitesses de décontamination (VD) ont pu être évalués en fonction de la température, et deux domaines de température de décontamination ont été définis pour les différents couples sol-polluant. La procédure de calcul utilisée est décrite dans les publications [13,14]. Le premier domaine de température (D1) correspond aux vitesses de décontamination supérieures à 10 % de la vitesse maximale, et le second (D2) correspond aux vitesses de décontamination supérieures à 50 % de la vitesse maximale. Les résultats obtenus sont résumés sur la figure 2. Ils montrent que la décontamination des sols S2 et S3 est achevée avant 450°C quel que soit le polluant. La température

de traitement nécessaire est donc inférieure à la température d'ébullition du polluant. Par contre, pour le sol S1, caractérisé par la présence importante d'argile et, en particulier, d'argile gonflante telle que la montmorillonite, la décontamination nécessite souvent des températures de traitement supérieures à celles utilisées pour les sols S2 et S3. Ce phénomène est encore plus marqué dans le cas de polluants tels que les HAP. Dans ce cas, une température de l'ordre de 750°C, donc supérieure à la température d'ébullition du HAP considéré, est nécessaire pour que la décontamination du sol S1 ait lieu. Le nombre important de noyaux aromatiques constituant les HAP peut expliquer des fortes interactions observées pour ce type de composé sur les argiles gonflantes.

Il a été mis en évidence que la décontamination est, dans la plupart des cas (sols S2 et S4 par exemple), essentiellement contrôlée par un phénomène d'évaporation [13,17]. L'importance d'un transport diffusif, interparticulaire au sein du milieu poreux, et au dessus du lit de sol a été démontrée expérimentalement, et l'hypothèse a été validée par la modélisation des transferts de masse du polluant dans et hors de la matrice de sol [13,14,16,17]. Néanmoins, pour les sols de type « argileux » et contenant des argiles gonflantes (S1 par exemple), la comparaison des résultats expérimentaux avec les prévisions du modèle proposé met en évidence l'existence d'interactions entre le sol et le polluant plus fortes que dans le cas d'une simple condensation. Le phénomène de désorption est alors prépondérant et doit être pris en compte. Afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans ce cas, une étude plus fondamentale sur la nature des interactions entre les molécules de polluants et les différents composants du sol serait nécessaire. Cependant, les sols contenant des argiles gonflantes sont d'ores et déjà à classer dans une catégorie de sols difficiles à décontaminer par désorption thermique. Ils nécessiteront une étude spécifique systématique avant traitement, tout particulièrement dans le cas d'une pollution par des HAP.

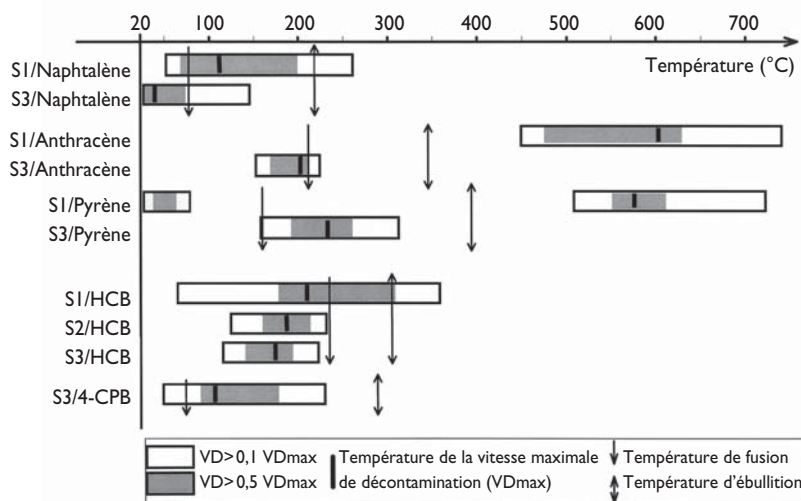


Figure 2 : Domaines de température de décontamination pour les sols pollués artificiellement

Pilote de laboratoire

Pour les deux sols étudiés, le traitement thermique a été réalisé jusqu'à une température de 450°C. À cette température, la contamination résiduelle est inférieure à 2 ppm pour le sol pollué par des PCB et inférieure à 10 ppm pour le sol pollué par des HAP. Ces valeurs correspondent à une efficacité de décontamination supérieure à 99 %, et sont inférieures à la plupart des limites imposées sur les chantiers. Elles montrent la faisabilité de la technique de désorption thermique pour ces types de sols contaminés (ne contenant pas d'argile gonflante).

Le suivi de la décontamination en fonction de la température de traitement a été réalisé uniquement pour le sol réel pollué par

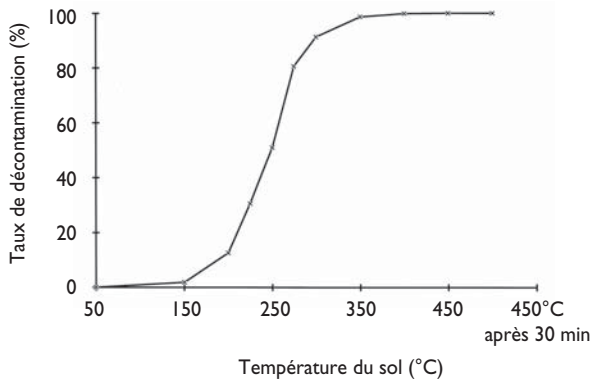


Figure 3 : Évolution du taux de décontamination en fonction de la température pour le sol pollué par des PCB

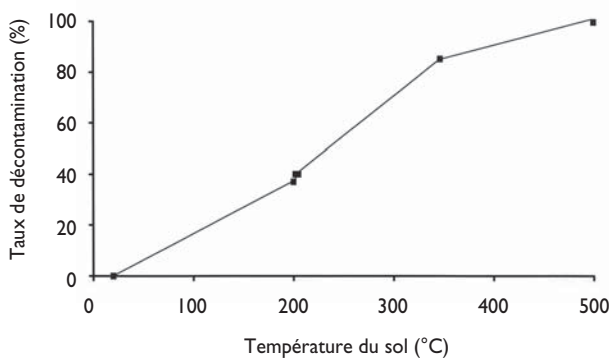


Figure 4 : Taux de décontamination en fonction de la température de traitement du sol pour le sol GST

des PCB. La figure 3 représente les résultats obtenus, avec le pilote de laboratoire, pour l'évolution du taux de décontamination en fonction de la température pour ce sol. Compte tenu de l'hétérogénéité du sol, chaque point représenté sur la figure 3 est la moyenne de 4 à 5 essais de reproductibilité. Comme pour l'analyse thermogravimétrique, la vitesse de décontamination peut être évaluée et deux domaines de température de décontamination définis à partir de la courbe de décontamination en fonction de la température. Pour le sol étudié, le domaine de température D1 correspond aux températures comprises entre 100 et 310°C, et D2 correspond aux températures comprises entre 200 et 270°C. La décontamination commence donc bien au delà du point de fusion des contaminants les moins volatils (environ 30°C) et se termine à une température correspondant au point d'ébullition des PCB les plus légers contenus dans le mélange (environ 300°C). Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus par l'analyse thermogravimétrique sur le sol S3 (non argileux) pollué par le 4-CBP. L'analyse des effluents gazeux issus du traitement thermique du « sol HAP » montre qu'aux températures étudiées ($\leq 450^\circ\text{C}$), aucune dégradation significative des polluants n'a eu lieu en phase gazeuse. Au cours du traitement, les polluants sont donc évaporés puis entraînés par le flux gazeux sans transformation chimique.

Pilote semi-industriel

Le but de cette étude est de valider les résultats obtenus dans les étapes précédentes sur un pilote semi-industriel fonctionnant en continu et de confirmer la faisabilité du traitement thermique basse température pour des sols pollués par des HAP.

Le tableau 2 et la figure 4 résument, pour les différentes manipulations, les principaux paramètres utilisés (Température moyenne de la terre (T_{moyenne}), Pression (P), temps de séjour (t_s) et Débit d'air de balayage (D) dans le malaxeur de décontamination) et les valeurs mesurées du taux de décontamination correspondant.

La décontamination atteint 80 % quand la terre est traitée à 350°C, indépendamment du choix des autres paramètres expérimentaux (pour le sol GST et le sol MAS de natures assez différentes mais avec des teneurs initiales en HAP voisines, de l'ordre de 1 %). Par contre, pour obtenir un taux de décontamination supérieur à 99 % il est nécessaire d'utiliser une température de traitement supérieure ou égale à 450°C. Selon la contamination initiale et la nature du sol, cette température doit être portée à 500°C (sol MAS et sol GST).

L'ensemble des essais réalisés sur l'unité pilote permettent de mettre en évidence l'influence des différents paramètres considérés sur le taux de décontamination. La décontamination est favorisée par

- une température de traitement élevée,
- un débit d'air de balayage important (meilleur transfert de chaleur et de matière),

Tableau 2 : Paramètres expérimentaux utilisés lors des essais de traitement thermique et taux de décontamination mesurés après traitement thermique

Essai	T_{moyenne} (°C)	D (Nm ³ /h)	P (bar)	t_s (min)	Taux de décontamination de la terre (%)
Sol MAS					
06	520-555	12-14	0,45-0,55	73-93	99-100
09	385-415	2-3	0,3-0,4	73-93	87-92
10	430-470	11-13	0,85-0,9	73-93	98-99
11	420-470	0-2	0,75-0,85	73-93	82-88
11 bis	435-450	0-2	0,75-0,85	73-93	79-85
12	425-460	1-3	0,25-0,35	35-55	93-95
13	335-370	1-3	0,25-0,35	73-93	76-83
14	335-370	14-16	0,75-0,85	35-55	90-93
15	440-450	0-2	0,25-0,35	73-93	92-95
16	335-375	14-16	0,75-0,85	73-93	95-97
Sol GST					
17	190-210	0-2	0,75-0,85	73-93	27-47
18	335-360	0-2	0,75-0,85	73-93	83-87
18 bis	335-360	0-2	0,75-0,85	73-93	83-87
19	200-210	0-2	0,25-0,35	73-93	30-50
20	195-210	14-15	0,75-0,85	73-93	30-50
21	480-510	14-15	0,75-0,85	35-55	99-100
Sol LA					
22	430-465	13-15	0,75-0,85	35-55	99-100

– une faible pression dans le malaxeur de désorption,
 – une augmentation du temps de séjour moyen de la terre.
 Les résultats présentés dans le tableau 2 montrent que le poids respectif de chaque paramètre n'est pas identique. La comparaison, pour le sol MAS par exemple, des résultats obtenus lors des essais 6, 10 et 12, et 6 et 13 met en évidence une action majeure de la température de traitement et de la présence d'un débit d'air de balayage.
 D'autre part, l'influence des paramètres sur la décontamination dépend de la nature du sol. Ainsi, l'influence du temps de séjour, du débit d'air de balayage, et de la pression est plus marquée dans le cas du sol MAS par rapport au sol GST. Cela pourrait s'expliquer, au moins partiellement, par la différence de leur nature granulométrique : le sol MAS contient une fraction de fines particules nettement plus importante que le sol GST. Or, lorsque le débit d'air de balayage est augmenté ou la pression diminuée cela a pour conséquence un entraînement plus important de ces « poussières » en suspension sur lesquelles la pollution est la plus concentrée.

La comparaison des résultats obtenus pour le sol GST (teneur initiale en HAP : environ 8000 mg/kg) et pour le sol LA (teneur initiale en HAP : 150 mg/kg) après traitement thermique, avec des conditions expérimentales relativement proches (essais 21 et 22), ne montre pas d'influence notable de la contamination initiale sur le taux de décontamination à 450°C. Cette température de traitement semble donc suffisante, indépendamment de la concentration initiale en polluant dans le sol, pour atteindre un taux de décontamination de l'ordre de 99 %.

CONCLUSION

L'analyse thermogravimétrique a permis de mettre en évidence les principaux mécanismes mis en jeu lors du traitement thermique basse température de sols pollués : évaporation, désorption (essentiellement pour les sols contenant des argiles gonflantes) et transfert des polluants à travers la matrice poreuse de sol. Cette technique permet également d'estimer rapidement les températures et les vitesses de décontamination par traitement thermique pour un couple sol-polluant donné.

L'ensemble de l'étude à l'échelle du laboratoire a prouvé la faisabilité, pour différents sols pollués, de la désorption thermique et a permis d'estimer les conditions de température de traitement en fonction de la nature de la pollution et de celle du sol. Cependant, les sols contenant des argiles nécessitent, particulièrement dans le cas d'une pollution par des HAP, des températures de traitement (>750°C) supérieures à celles utilisées généralement pour la désorption thermique (500°C) et nécessiteront donc une étude préalable à leur traitement. Les essais menés sur une unité pilote ont montré que le débit d'air de balayage et la température de traitement sont les deux paramètres de choix pour optimiser la désorption thermique. La pression et le temps de séjour ont des influences moins marquées.

Les essais réalisés à 450 ou 500°C avec 3 sols différents confirment, à l'échelle semi-industrielle, l'intérêt de la désorption thermique en matière de dépollution de terres contenant des HAP.

L'unité pilote peut maintenant être envisagée comme un outil d'aide à la décision lors d'études de projets sur des unités industrielles telle que l'unité mobile de traitement thermique de la société Tredeco (filiale de Tredi-France et Ecotechniek-Pays Bas).

Remerciements

Les auteurs remercient la Communauté Européenne et la Région Alsace pour la contribution financière apportée à cette étude.

*V. Risoul, S. Durécu

Tredi Département Recherche, BP 184, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

**V. Renaud, G. Trouvé, P. Gilot

Laboratoire GRE, UHA, 25 rue de Chemnitz, 68200 Mulhouse

***G. Fraysse

Tredi, Service Etudes et Projets, BP 3124, 69211 Lyon Cedex

Bibliographie

- [1] Von Meijenfildt H.G. et coll., *Contaminated Soil'90 Proceedings*, 1990, Vol.1, 11-16
- [2] Beck A.J., Wilson S.C., Alcock R.E., Jones K.C., *Environ. Sci. Technol.*, 1995, Vol. 25, 1, 1-43.
- [3] DeFrance G., *Gestion des Sites (Potentiellement) Pollués - Version 0*, BRGM Editions, déc. 1995.
- [4] Saito H.H., Howard J.B., Peters W.A., Bucalá V., 1998, *Encyclopedia of Environmental Analysis and Remediation*, Meyers R.A. ed., 4554-4589.
- [5] Lecomte P., *Les sites pollués*, Ed. Tec. et Doc., Antéa, Paris, 1995.
- [6] Troxler W. L., *Pesticide Remediation in Soils and Water*, 1998, 105-127.
- [7] Noris A., Al-Dhahair Z., Birnsting L., 1998, *Contaminated Soil'98 Proceedings*, 1998, 1079-1081.
- [8] Lighty J.S., Pershing D.W., Cundy V.A. et Lintz D.L., 1988, *Nucl. Chem. Waste Manag.*, Vol. 8, 225-237.
- [9] Lighty J.S., Silcox G.D., Pershing D.W., Cundy V.A. et Lintz D.L., 1990, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 24 : 5, 750-757.
- [10] Renaud V., « *Étude de la désorption de terres polluées par des composés organiques sur un pilote semi-industriel en continu* », Thèse de doctorat, numéro d'ordre 00MULH0630, Université de Haute Alsace, Décembre 2000.
- [11] Kuhnt, G.; Vetter, L.; Lattanzio, A.; Loens, J., 1994, In : *Euro-Soils, Identification, Collection, Treatment, Characterization*, Kuhnt, G., Muntau, H. ed., Ispra, p. 41-58.
- [12] Kuhnt, G.; Koerdel, W.; Vetter, L.; Bruhn, N.; Bo, F.; Serrini, G.; Bianchi, M., 1994, In : *Euro-Soils, Identification, Collection, Treatment, Characterization*, Kuhnt, G., Muntau, H. ed., Ispra, p.59-72.
- [13] Risoul V., Pichon C., Trouvé G., Peters W.A., Gilot P., and Prado G., *Journal of Hazardous Materials*, 1999, B:64, 295-311.
- [14] Risoul V., Trouvé G., Peters W.A., and Gilot P., *Thermochimica Acta*, 1999, 325, 77-87.
- [15] Risoul V., Renaud V., Trouvé G., and Gilot P., 2001, soumise à *Waste Management*.
- [16] Risoul V., « *Étude, à l'échelle du laboratoire, de l'influence de la pression sur la décontamination thermique de sols pollués par des molécules organiques. Étude particulière des HAP* », Thèse de doctorat, numéro d'ordre 98MULH0541, Université de Haute Alsace, Novembre 1998.
- [17] Gilot P., Howard J.B., and Peters W.A., *Environ. Sci. Technol.*, 1997, 31, 461.