



HAL
open science

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement : la réhabilitation des anciens sites industriels

J. M. Costes, V. Druelle

► **To cite this version:**

J. M. Costes, V. Druelle. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement : la réhabilitation des anciens sites industriels. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 1997, 52 (4), pp.425-440. <10.2516/ogst:1997051>. <hal-02079125>

HAL Id: hal-02079125

<https://hal.science/hal-02079125v1>

Submitted on 25 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

LES HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT : LA RÉHABILITATION DES ANCIENS SITES INDUSTRIELS

J.-M. COSTES et V. DRUELLE

Gaz de France¹

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP peuvent être d'origine naturelle mais ils proviennent principalement des processus de pyrolyse. On peut les retrouver dans les sols de certains anciens sites industriels. Cela peut être le cas des sites d'anciennes usines à gaz. Même si aucune conséquence sur la santé humaine n'a été signalée et même si les risques paraissent virtuels, le principe de précaution rend nécessaire de s'occuper des risques liés à ces anciens sites industriels. Gaz de France, propriétaire de 467 sites d'anciennes usines à gaz assume l'héritage industriel dans le cadre d'un protocole signé avec le ministère de l'Environnement. Après une étude des sols, une évaluation des risques est réalisée. En fonction des résultats de cette évaluation des risques et de l'usage du site (actuel et prévu), des solutions de traitement peuvent être mises en œuvre. Parmi les techniques applicables aux sols pollués par des HAP, un intérêt particulier s'est porté sur les traitements biologiques, en pleine évolution, qui offrent une solution économique bien adaptée au traitement de grands volumes de sols souillés par une pollution organique moyennement concentrée.

THE POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS
IN THE ENVIRONMENT:
THE FORMER INDUSTRIAL SITES REMEDIATION

Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) can be found under natural conditions but they can be produced by pyrolysis processes. They can be found in former industrial sites subsoil, especially on Manufactured Gas Plant sites (MGP sites). Gaz de France has inherited the patrimony of former French gas companies on nationalisation in 1946; consequently, Gaz De France is still the owner of 467 of manufactured gas plants. Even if no impact on human health has been detected and even if the risks seem to be virtual, Gaz de France has to prevent any environmental consequence due to the possible presence of residues in the subsoil of the sites: a protocol has been signed with the French Ministry of Environment. Following the investigations on the site, a risk assessment, which takes into account the future use of the site, is achieved. The definition of remediation and monitoring of the site is based on risk assessment; the pollution is treated on the basis of specifications defined in accordance with public authorities.

(1) Direction de la Recherche - CERSTA,
361, avenue du Président Wilson,
93211 La Plaine-Saint-Denis - Cedex

Biotreatments are potentially the most well adapted techniques to remediate big volumes of low or medium contaminated soils.

LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS EN EL MEDIO AMBIENTE : LA REHABILITACIÓN DE ANTIGUOS EMPLAZAMIENTOS INDUSTRIALES

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, o HAP, pueden ser de origen natural pero, principalmente, proceden de procesos de pirólisis. Así, se encuentran actualmente en antiguos emplazamientos industriales, como ocurre en las instalaciones de antiguas fábricas de gas. Aun cuando no se ha señalado ninguna consecuencia con respecto a la salud humana, e incluso si los riesgos parecen virtuales, el principio de precaución hace preciso ocuparse de los riesgos relacionados con los antiguos emplazamientos industriales. Gaz de France, empresa propietaria de 467 emplazamientos de antiguas fábricas de gas, asume la herencia industrial en el marco de un protocolo formalizado con el Ministerio de Medio Ambiente. Tras un estudio de los suelos, se ha llevado a cabo una evaluación de los riesgos. Acorde a los resultados de esta evaluación de los riesgos y del uso del emplazamiento (actual o proyectado), se pueden implementar diversas soluciones de tratamiento. Entre las técnicas aplicables a los suelos contaminados por los HAP, se ha puesto particular empeño acerca de los tratamientos biológicos, en plena evolución, que ofrecen una solución económica correctamente adaptada al tratamiento de grandes volúmenes de suelos en que existe una contaminación orgánica concentrada.

INTRODUCTION

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés chimiques constitués de plusieurs cycles aromatiques juxtaposés. Le nombre théorique de HAP susceptibles d'être rencontrés est supérieur à 1000. Ils sont en général présents dans l'environnement sous forme de mélanges.

Les HAP proviennent principalement des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète des matières organiques. Ils sont surtout d'origine anthropique mais ils peuvent aussi être présents dans l'environnement de façon naturelle par l'intermédiaire des feux de forêts ou des volcans par exemple.

Si l'on considère les sources d'exposition humaine, l'alimentation représente la première source d'exposition, suivie par la pollution intérieure, en particulier le tabagisme actif et passif et le chauffage, puis par la pollution extérieure.

Les sources alimentaires proviennent aussi bien des aliments eux-mêmes (sucre, céréales, huiles, graisses) que des modes de cuisson et en particulier du grillage des graisses.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime qu'un citadin est exposé à des doses de benzo(a)pyrène, HAP à 5 cycles aromatiques, comprises entre 1 μg par jour pour un non-fumeur et 10 μg par jour pour un fumeur.

Les propriétés physicochimiques, en particulier la solubilité dans l'eau et la volatilité, sont très différentes suivant les HAP : à partir du naphthalène, hydrocarbure à deux cycles aromatiques que l'on peut considérer comme moyennement soluble (32 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), la solubilité décroît rapidement avec le nombre de cycles aromatiques (on passe du $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ au $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$). Il en va de même pour la volatilité.

Les propriétés toxicologiques sont également très différentes selon les HAP : 3 HAP sont classés par le *Centre international de recherche contre le cancer* comme cancérigènes probables pour l'homme (benzo(a)pyrène, benzo(a)anthracène, dibenzo(a,h)anthracène) et 3 sont classés comme cancérigènes possibles pour l'homme (benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, indéno(c,d)pyrène). Les autres HAP ne sont pas classifiés (groupe 3) ou n'ont pas été évalués.

Le risque de cancer lié aux HAP [1] est certainement l'un des plus anciennement connus, depuis la description des cancers de la peau et du scrotum des ramoneurs.

De nombreuses études sur les risques de cancer du poumon dans des cohortes de travailleurs professionnellement exposés ont été réalisées. Les preuves les plus fortes de relation causale portent sur des populations de travailleurs de cokerie et d'usines à gaz (observations de la première moitié du XX^e siècle). La plupart de ces études, parce qu'anciennes, n'ont pas permis de faire la part des effets liés à la fumée de cigarettes ; or la grande majorité des sujets atteints de cancer du poumon sont des fumeurs.

S'agissant des anciennes usines à gaz dont la production est arrêtée depuis plus de trente ans, il est utile de souligner qu'aucune conséquence sur la santé humaine, liée à un site, n'a été signalée. Cependant, le principe de précaution rend nécessaire de s'occuper des risques liés aux anciennes usines à gaz, même si les risques paraissent virtuels (doses faibles).

C'est ainsi que *Gaz de France*, propriétaire d'environ 500 sites d'anciennes usines à gaz, assume son héritage industriel. Dans le cadre de sa politique visant à la préservation de l'environnement et à la valorisation de son patrimoine immobilier, *Gaz de France* a entrepris de maîtriser les risques susceptibles d'être induits par ces sites.

La réhabilitation des sites d'anciennes usines à gaz n'est pas spécifique à *Gaz de France* : il a été recensé, par exemple, 1000 sites d'anciennes usines à gaz au Royaume-Uni et 2000 en Allemagne.

On retrouve les mêmes préoccupations dans d'autres industries, par exemple les industries chimiques, pétrolières ou sidérurgiques, ces dernières ayant à faire face d'ailleurs, pour leurs cokeries, à des pollutions similaires à celles des usines à gaz.

1 LA POLITIQUE DE GESTION DES ANCIENS SITES INDUSTRIELS

La réhabilitation des sites pollués est un sujet nouveau en France. L'administration a commencé à s'y intéresser vers 1990, à l'occasion de cas de pollutions de sites devenus des "affaires médiatiques" ; on peut citer, par exemple, la décharge de Montchanin. Parallèlement, *Gaz de France* a défini sa politique suite à la découverte d'une cuve remplie de goudron sur le site de l'ancienne usine à gaz de Nantes (rue des Tanneurs).

La France ne dispose pas encore de cadre légal spécifique aux sites pollués comme cela peut être le cas aux Pays-Bas par exemple. Il n'existe pas non plus,

aujourd'hui, de définition légale de ce qu'est un site pollué ou indiquant à partir de quelles concentrations en polluants le site doit être considéré comme pollué ou enfin, quels niveaux de concentrations en polluants nécessitent une évaluation des risques et un traitement.

À l'étranger, on trouve deux approches différentes :

- certains, comme les Hollandais, annoncent une référence au bruit de fond géochimique local et des objectifs de dépollution sans prise en compte de l'usage actuel et futur du site (usage multifonctions) ;
- d'autres, comme les Anglais ou les Allemands, basent leur politique sur l'impact en fonction de l'usage du site, plutôt que sur la qualité environnementale du site lui-même.

En France, il existe des milliers de sites industriels en activité. Un siècle et demi d'histoire industrielle de notre pays nous a légué des dizaines de milliers de sites industriels anciens dont la mémoire collective a parfois oublié l'existence et la localisation précise.

L'objectif que s'est donné le ministère de l'Environnement pour les prochaines années est de recenser l'ensemble de ces sites qui sont potentiellement pollués, de sélectionner ceux qui sont à étudier en priorité et d'organiser leur réhabilitation, en concertation avec les industriels concernés et dans le respect des principes suivants :

- réhabilitation en fonction de l'impact effectif provoqué par le site ;
- réhabilitation suivant l'usage actuel ou futur prévu pour le site ;
- réhabilitation à un coût économiquement acceptable.

Le ministère de l'Environnement met en place actuellement les outils méthodologiques [2] nécessaires à l'application de sa politique. Ainsi, une méthode de classement des sites est en cours d'élaboration. Elle devrait permettre, à l'aide de critères d'aide à la décision (seuils de concentrations en fonction des usages d'un site), et de paramètres décrivant la sensibilité environnementale des sites (géologie, hydrogéologie, accès au site, etc.) de les classer en 3 catégories : sites à banaliser pour un usage donné, sites à surveiller, sites nécessitant des investigations complémentaires et une évaluation détaillée des risques.

Pour la définition des objectifs de dépollution, l'approche française repose actuellement sur une négociation au cas par cas entre l'industriel et l'Inspection des installations classées (DRIRE ou STIIC), en fonction des résultats de l'évaluation des risques et de l'usage du site (actuel ou prévu).

En attendant le référentiel national, les sociétés d'audit comparent les résultats des analyses chimiques dans le sol à des recommandations étrangères [3], qui ne sont ni des normes, ni des réglementations, mais simplement des valeurs guides, indicatives et discutables au cas par cas.

Ces recommandations étrangères se présentent sous la forme de listes de concentrations de divers composés chimiques présents dans le sol. Il y a parfois plusieurs niveaux de concentrations par composé en fonction, par exemple, de l'utilisation du site.

La France fait souvent appel au référentiel hollandais, pourtant mal adapté aux sols français dans la mesure où quelques uns d'entre eux contiennent naturellement des concentrations en certains éléments qui dépassent les seuils de contamination fixés par les Pays-Bas (exemple de l'arsenic dans le Massif central ou en Bretagne).

Il existe d'autres référentiels, qui peuvent également servir de base de discussions, comme le référentiel québécois, peu éloigné des anciennes valeurs guides

hollandaises A, B, C, ou encore le référentiel anglais, intéressant parce qu'il est appliqué à des pollutions de sites d'usines à gaz et de cokeries mais peu utilisé par l'administration française, car trop spécifique d'un type de contamination.

Le tableau 1 récapitule les listes hollandaises (ancienne et nouvelle), québécoise et anglaise pour les HAP. Les valeurs sont exprimées en ppm ou mg/kg de sol sec.

A est le niveau de référence, le risque représenté par de telles concentrations en polluants est négligeable. Au dessus de la valeur C, les Hollandais parlent de risque potentiel et dans ce cas, une évaluation des risques est nécessaire.

1.1 Inconvénients des référentiels étrangers

Les valeurs guides, établies par différents pays, ne sont pas toujours basées sur des considérations très scientifiques. Pour le sol, elles ne prennent en compte

TABLEAU 1
Recommandations étrangères pour les sols
Foreign guidelines for soils contaminated by PAHs

	Pays-Bas (1990)			Pays-Bas (1994) C	Québec (1988)			Royaume-Uni (1987)			
	A	B	C		A	B	C	Résidentiel, Jardins		Paysage, Buildings	
								Alerte	Action	Alerte	Action
Naphtalène	0,01	5	50		< 0,1	5	50				
Phénanthrène	0,1	10	100		< 0,1	5	50				
Anthracène	0,1	10	100		< 0,1	10	100				
Fluoranthène	0,1	10	100		< 0,1	10	100				
Chrysène	0,01	5	50		< 0,1	1	10				
Benzo(a)anthracène	0,01	5	50		< 0,1	1	10				
Benzo(a)pyrène	0,1	1	10		< 0,1	1	10				
Benzo(k)fluoranthène	10	5	50		< 0,1	1	10				
Indéno(1,2,3-cd)pyrène	10	5	50		< 0,1	1	10				
Benzo(g,h,i)pérylène	10	10	100		< 0,1	1	10				
Dibenzo(a,h)anthracène					< 0,1	1	10				
Benzo(b)fluoranthène					< 0,1	1	10				
Pyrène					< 0,1	10	100				
Acénaphène					< 0,1	10	100				
Acénaphylène					< 0,1	10	100				
Fluorène					< 0,1	10	100				
Somme des HAP	1	20	200	40*	1	20	200	50	500	1000	10 000

* La valeur hollandaise de 1994 pour tenir compte des risques sanitaires est en réalité non pas 40 ppm mais 1000 ppm pour la somme de 10 HAP. Cette valeur de 40 ppm a été fixée en tenant compte des résultats de tests écotoxicologiques.

que la teneur en polluant, parfois modulée en fonction de l'utilisation du site, mais jamais la sensibilité de l'environnement ou la situation de la pollution (pollution en surface ou en profondeur, confinée dans une couche d'argile ou dans un terrain très perméable).

L'emploi de ces valeurs guides peut être abusif, entraînant des traitements inutiles, toujours coûteux, parfois nocifs du point de vue environnemental (mobilisation de pollutions piégées ou inertes). Elles ne devraient constituer qu'un élément de raisonnement pour l'évaluation des risques potentiels et non des critères de décision d'un traitement ou des objectifs de décontamination.

L'application de ces référentiels pose le problème de l'échantillonnage dû à la grande hétérogénéité des sites et de l'analyse de certains composés (en particulier les HAP dans le sol).

1.2 Avantages de ces référentiels

Lorsqu'elles sont basées sur des considérations d'évaluation des risques sanitaires, ce qui souvent n'est pas le cas, ces valeurs seuils sont intéressantes ; elles présentent l'avantage d'être faciles et rapides à utiliser, et d'arriver à une position homogène sur tous les sites.

2 LES USINES À GAZ

2.1 La fabrication du gaz de houille [4]

De 1798, date de l'invention par l'ingénieur français Lebon du procédé de fabrication du gaz d'éclairage à

partir du charbon, jusqu'à la fin des années soixante, plusieurs centaines d'usines à gaz ont été exploitées en France.

Cette industrie du gaz fut au XIX^e siècle un progrès décisif et un élément clé de la révolution industrielle : le charbon permettait d'obtenir, par pyrogénéation, le gaz de ville capable d'éclairer, de chauffer et de cuire les aliments dans des conditions nouvelles de confort et de bien-être.

Quelques plaques apposées sur des façades d'immeubles anciens, autrefois très enviés, mentionnent encore "le gaz à tous les étages".

Le terme d'usine à gaz est maintenant passé dans le langage courant comme synonyme d'une complexité superflue, mais il était autrefois le modèle d'une industrie sachant valoriser l'ensemble de ses sous-produits.

Comme le montre le schéma de la figure 1, le gaz de ville était produit par pyrogénéation de la houille (chauffage à l'abri de l'air), le plus souvent à haute température (1000°C). Le gaz était ensuite traité : il subissait une épuration physique pour le débarrasser du goudron, des eaux ammoniacales et des phénols, puis une épuration chimique dans un mélange d'oxyde de fer et de sciure de bois retenant les composés sulfurés et cyanurés. Sur certains sites existait une unité de "débenzologie" pour récupérer les BTX (benzène, toluène, xylènes). Le gaz, épuré, était refoulé dans un gazomètre où il était stocké avant d'être distribué chez les clients.

L'ensemble de ces opérations permettait de récupérer les sous-produits goudrons, eaux ammoniacales et matières épurantes.

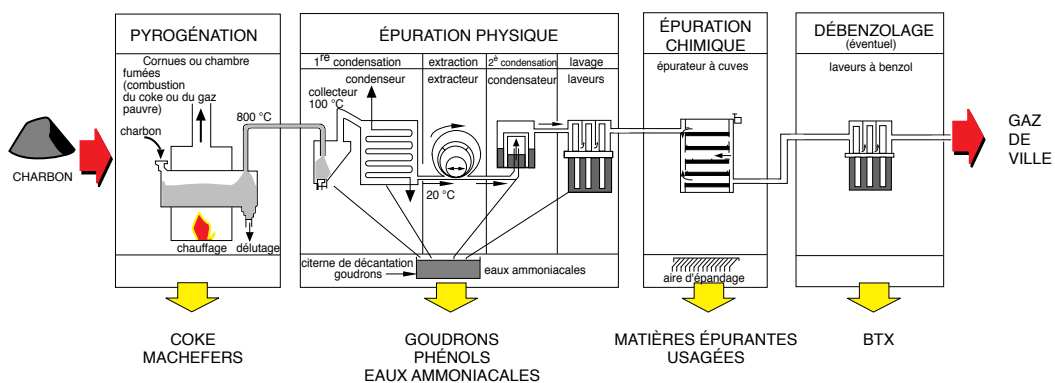


Figure 1

Schéma de principe de fonctionnement d'une usine à gaz.

Scheme of principle of a gaswork process.

On pouvait valoriser :

- les goudrons pour la protection des bois de charpente, le goudronnage des routes, l'industrie chimique (solvants, colorants, parfumerie, etc.) ;
- les eaux ammoniacales comme engrais ;
- les matières épurantes pour l'industrie chimique grâce au bleu de Prusse.

L'utilisation du gaz naturel, plus énergétique, plus sûr et de production plus propre, a entraîné la fermeture, échelonnée dans le temps, de toutes les usines à gaz.

Les installations de surface ont, la plupart du temps, été démantelées, mais les derniers sous-produits de fabrication n'ont pas toujours été éliminés et l'on retrouve dans la plupart des sites d'anciennes usines à gaz des traces plus ou moins importantes de ces sous-produits, confinés dans des ouvrages de stockage, ou mélangés avec le sol.

2.2 Les sous-produits des usines à gaz

2.2.1 Les goudrons

Composition

Les goudrons de houille renferment, pour une partie importante, des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et d'autres composés en plus faible proportion tels que les hydrocarbures monoaromatiques volatils (benzène, ethylbenzène, toluène, xylènes ou BTEX), les phénols, etc.

Cependant, la composition exacte des goudrons n'est pas connue en raison du nombre très important de composés chimiques qu'ils renferment (plusieurs centaines répartis entre plusieurs fractions : aromatique, asphaltène, polaire, saturée), de leurs proportions relatives qui varient en fonction de différents paramètres tels que la nature du charbon, la température de pyrogénéation, la forme des cornues, etc. et de leur possible évolution dans le temps.

Localisation

Les goudrons étaient généralement stockés, en attendant leur valorisation, dans des cuves réalisées en maçonnerie et enterrées dans le sol. Cependant, le sol a pu être contaminé lors de déversements accidentels à l'époque du fonctionnement de l'usine. On peut également trouver des matériaux de démolition imprégnés de goudrons qui ont servi à remblayer certaines parties du site.

Si le sol garde, en général, une trace de l'ancienne activité gazière, l'eau souterraine est souvent épargnée.

2.2.2 Les eaux ammoniacales

Composition

Elles renferment en majorité des ions ammonium ainsi que des composés organiques tels que BTX, phénols et certains HAP. Elles peuvent également contenir des composés sulfurés et cyanurés.

Localisation

On les retrouve principalement dans des cuves, soit seules, soit en phase surnageante au-dessus de la phase goudronneuse.

2.2.3 Les matières épurantes

Composition

Les matières épurantes épuisées que l'on retrouve sur certains sites d'anciennes usines à gaz contiennent principalement des composés sulfurés et des complexes de fer et de cyanure (ferrocyanure ferrique ou bleu de Prusse, de formule chimique $\text{Fe-III}_4[\text{Fe-II}(\text{CN})_6]^{3-}$). Leur pH est généralement acide. Elles sont stables car elles sont peu solubles et leur taux de dissociation est très faible.

Localisation

Elles sont retrouvées en surface ou enfouies dans le sol, seules ou associées aux goudrons, mais leur présence n'est pas systématique. Leur couleur bleue caractéristique permet parfois de les repérer facilement.

2.3 Comportement du goudron dans le sol [5]

Les résultats d'études menées au sein de *Gaz de France* en collaboration avec l'*École des Mines de Paris* sur des sols assez fortement chargés en goudrons ont mis en évidence plusieurs phénomènes.

La présence de goudron, polluant hydrophobe, modifie le comportement et les propriétés mécaniques du sol. En effet, comme le montre la figure 2 qui illustre un essai de percolation en colonne, lorsqu'il est compacté et humide, le matériau ne laisse passer aucun écoulement d'eau et les perméabilités à l'eau chutent fortement ($10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). On constate un important phénomène d'autocolmatage des pores dû à la présence de goudrons, ce qui bloque la circulation de l'eau au sein des macropores.

En termes de transfert des HAP du sol vers les eaux souterraines, les résultats des tests de percolation à l'eau, en colonnes et en cellules, illustrés sur la figure 3,

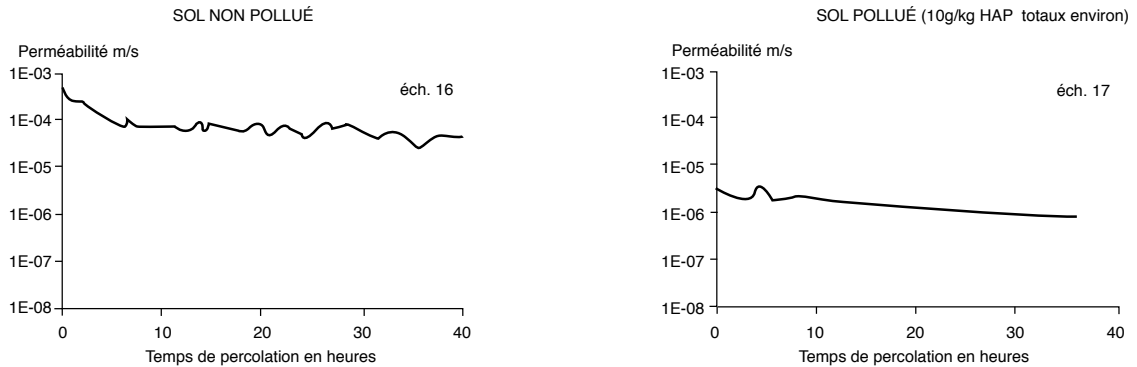


Figure 2
Influence de la présence de goudron sur la perméabilité du sol.
Influence of coal tar on soil permeability.

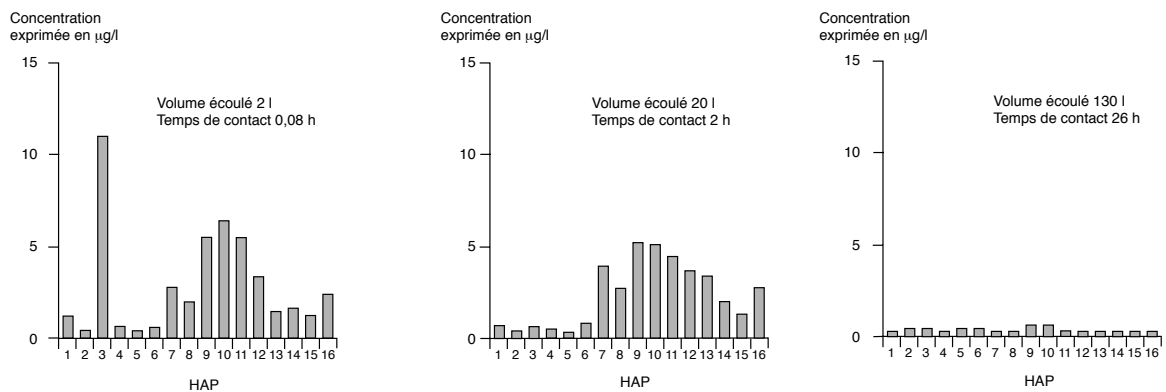


Figure 3
Analyses chimiques des percolats.
PAHs analysis of percolates.

montrent une mobilisation importante des polluants au début du lessivage (on a vraisemblablement à faire, pour les HAP lourds, à un transport par des fines), mais à long terme, leurs concentrations dans les percolats diminuent pour devenir négligeables.

Si l'on extrapole les résultats de ces études à l'échelle d'un site, les sites d'anciennes usines à gaz étant fermés depuis plusieurs dizaines d'années, on peut avancer qu'aujourd'hui les transferts de HAP du sol vers l'eau, dus au lessivage par l'eau de pluie, sont négligeables.

Une des conséquences pratiques de ces constats est qu'il peut être dans certains cas inutile de réaliser des travaux de réhabilitation comprenant des excavations (le décompactage du sol peut entraîner une restructuration et une remobilisation des polluants sous l'effet des eaux de ruissellement) et qu'il semble plus profitable,

d'un point de vue environnemental, de maîtriser l'utilisation des sites ou d'établir une surveillance.

3 LA RÉHABILITATION D'UN ANCIEN SITE INDUSTRIEL

3.1 La démarche générale

La réhabilitation d'un ancien site industriel passe nécessairement par les 3 étapes suivantes.

3.1.1 L'étude des sols

Cette étude a pour objectif de connaître l'état de pollution du sous-sol du site et le contexte environnemental du site.

3.1.2 L'évaluation des risques

Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact réel des polluants rencontrés, à court et long terme, sur l'homme et sur l'environnement.

L'évaluation des risques est un outil d'aide à la décision sur le devenir du site.

3.1.3 Le traitement du site, si nécessaire

Le traitement du site est fonction des résultats de l'évaluation des risques et du devenir du site.

La réhabilitation d'un site comprend classiquement :

- la vidange des ouvrages de stockage ;
- l'élimination ou le confinement des polluants ayant un impact sur la santé humaine et l'environnement ;
- la surveillance ultérieure du site.

Un échantillonnage maîtrisé et réfléchi permet de minimiser les risques d'erreurs lors de ces trois étapes.

3.2 L'étude des sols

L'étude des sols comporte classiquement les 3 phases suivantes :

- Une recherche historique (recherche d'anciens plans et de vues aériennes, interview d'anciens exploitants, etc.) qui permet de situer sur le terrain l'emplacement des unités de production, de traitement et de stockage des anciennes usines qui ont pu se succéder sur le site.
- Une recherche documentaire pour identifier les caractéristiques de l'environnement à prendre en compte pour ensuite évaluer les risques (contexte géologique et hydrologique de la région au plus près du site,

utilisation des ressources en eau, recouvrement du site, etc.).

- Des investigations de terrain avec réalisation de sondages, pose de piézomètres et analyses chimiques, pour mieux connaître la géologie et l'hydrogéologie du site, localiser et quantifier la pollution dans le sol, dans la nappe et éventuellement dans l'air de bâtiments présents sur le site.

3.3 L'évaluation des risques

L'évaluation des risques est une phase essentielle dans la réhabilitation d'un site.

C'est elle qui permet à l'ensemble des acteurs impliqués dans la réhabilitation (exploitant du site, pouvoirs publics, entreprise de dépollution, etc.) de prendre les décisions quant au devenir du site et aux éventuelles mesures préventives et curatives à appliquer.

C'est elle qui permet de relativiser la toxicité intrinsèque des produits et leurs concentrations, en tenant compte d'autres paramètres, tout aussi importants, que sont par exemple l'accessibilité aux produits, le confinement des produits, la présence de population exposée, le bruit de fond, etc.

Pour qu'il y ait un risque sur un site, il faut qu'il y ait à la fois une source, une cible et des phénomènes de transfert de la source vers la cible.

Ainsi, l'évaluation des risques a pour but d'examiner dans quelles conditions et dans quel délai, les polluants présents en un endroit du site peuvent avoir un impact sur les personnes (voire sur la faune, la flore et les biens matériels).

L'analyse des HAP dans les sols : une étape importante lors de l'étude des sols et pour le suivi de l'efficacité d'un traitement [6].

L'analyse est une opération techniquement délicate, pas toujours bien maîtrisée, qui est d'autant plus importante que ses résultats servent souvent de base aux décisions. Aujourd'hui, il n'existe pas de norme pour l'analyse des HAP dans les sols.

La majorité des laboratoires utilise les recommandations de l'Agence pour la protection de l'environnement américaine (EPA) et analyse, dans les sols pollués par des goudrons, les 16 HAP suivants : naphthalène, acénaphthylène, acénaphthène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, chrysène, benzo(a)anthracène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, indéno(1,2,3-cd)pyrène, dibenzo(ah)anthracène, benzo(ghi)pérylène.

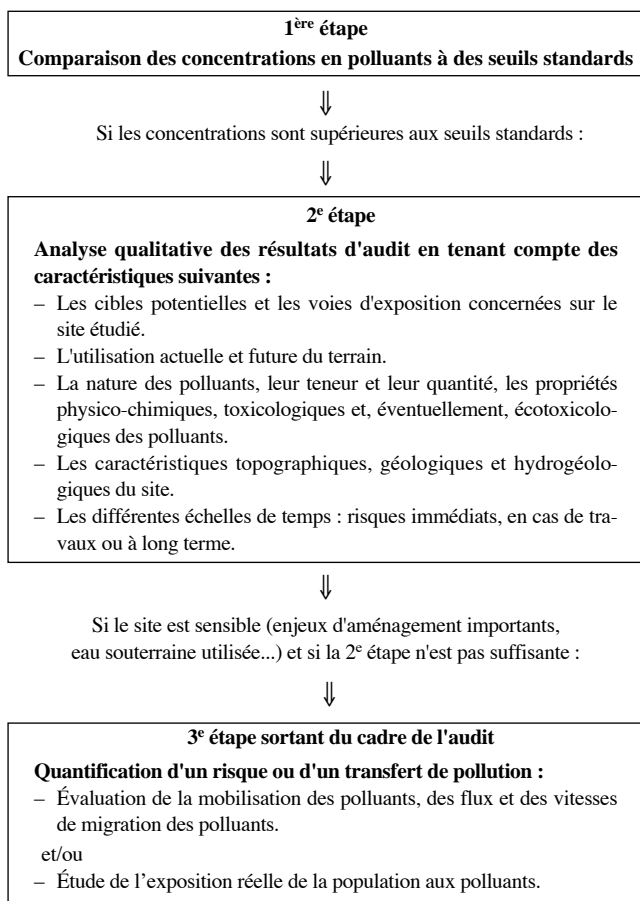
Quelle que soit la procédure employée, une analyse des HAP dans les sols comprend trois étapes incontournables :

- préparation de l'échantillon (homogénéisation, séchage, etc.) ;
- extraction des HAP contenus dans l'échantillon, dont l'objectif est le transfert des composés de la matrice solide vers la matrice liquide (avec un solvant d'extraction organique) ;
- dosage de l'extrait et interprétation des résultats.

Pour toutes ces étapes, il existe différentes techniques. L'analyse peut se faire par chromatographie liquide haute performance (HPLC) ou par chromatographie en phase gazeuse (CPG). Les détecteurs utilisés peuvent être l'UV, la fluorimétrie ou la barrette de diode pour la HPLC, la spectrométrie de masse et le FID pour la CPG.

TABLEAU 2

Démarche d'évaluation des risques
Risk assessment methodology



La démarche d'évaluation des risques mise au point par *Gaz de France* est itérative ; comme le montre la tableau 2, elle peut comporter jusqu'à 3 étapes, les deux premières étant systématiques et intégrées à l'audit, la troisième étant elle-même itérative (utilisation d'équations simplifiées ou de modèles mathématiques plus complexes) et nécessitant souvent des investigations complémentaires ciblées sur l'objectif recherché : évaluation de la mobilisation de la pollution ou évaluation des risques sanitaires.

3.4 Les actions de réhabilitation

La réhabilitation d'un site est fonction des résultats de l'évaluation des risques et de l'usage du site (actuel ou prévu) ; elle peut impliquer des solutions de natures différentes :

- simple surveillance du site si le site ne présente pas de risque pour son usage ;

- limitation des usages de certaines zones du site ;
- réduction de la mobilité des polluants par un confinement, envoi en décharge ;
- élimination des polluants par traitements.

Sur un site, en général, il n'y a pas de solution miracle et c'est une combinaison de différentes solutions qui est envisagée en tenant compte des coûts et de l'efficacité globale des traitements du point de vue environnemental.

La réussite des opérations de réhabilitation est, bien sûr, liée au choix des techniques de traitement, mais également aux procédures utilisées pour la mise en œuvre de ces techniques. On peut citer à titre d'exemples :

- les délais de réalisation qui doivent être suffisamment longs pour permettre de réaliser des investigations complémentaires et des essais de traitabilité ;
- le suivi impératif du chantier, en particulier le suivi des conditions d'extraction et de tri des différents produits afin de respecter les règles d'hygiène et de sécurité et d'éviter de traiter ce qui n'est pas nécessaire.

4 LES PROCÉDÉS DE TRAITEMENTS

Certains traitements peuvent être réalisés hors site (centres collectifs, décharge), d'autres sur site (thermique, biologique, lavage, confinement), d'autres enfin *in situ* (*venting*, *stripping*).

Le tableau 3 montre quels sont les traitements envisageables aujourd'hui sur les sites d'anciennes usines à gaz.

Nous ne nous intéresserons ici qu'aux traitements des goudrons (HAP) présents dans les sols.

4.1 Les traitements thermiques

Le traitement thermique des terres peut se faire, soit dans un centre collectif de déchets, soit sur site. Le processus résulte d'un ensemble de réactions physico-chimiques d'oxydoréduction à des températures plus ou moins élevées et a pour but de réduire les effets polluants des déchets et de réduire leur volume.

4.1.1 Le traitement thermique dans un centre collectif

Ce type de traitement par incinération est généralement réservé aux produits très chargés en

TABLEAU 3

Traitements applicables aux sous-produits d'anciennes usines à gaz

Treatment applicable to MGP sites

Traitements Sous-produits	Thermique	Lavage	Venting stripping	Physicochimique	Biologique	Mise en décharge	Confinement
Goudrons	◆						
Gravats pollués	◆	◆				◆	
Matières épurantes	◆					◆	◆
Sols pollués	◆	◆	◆		◆	◆	◆
Eaux de cuves	◆			◆	◆		
Eaux de nappes			◆	◆	◆		

hydrocarbures aromatiques polycycliques, qu'ils soient de nature solide, pâteuse ou liquide.

C'est un procédé d'élimination rapide, contrairement aux procédés biologiques, et efficace (concentration résiduelle très basse).

Cependant, il faut signaler que ce procédé est coûteux. De plus, les terres polluées à traiter sont mélangées à des déchets de provenance diverse qui, à l'issue du traitement, sont mis en décharge, ce qui empêche toute réutilisation des terres dont la destination finale sera la décharge.

Malgré ces inconvénients, l'incinération dans un centre collectif peut se révéler comme étant la seule solution réalisable aujourd'hui (pour les HAP en très fortes concentrations et pour de petites quantités).

4.1.2 Les traitements thermiques sur site

Il existe deux types de traitement thermique que l'on peut qualifier de mobiles :

- des procédés d'incinération similaires à ceux utilisés dans un centre de traitement collectif (chauffage direct et traitement des fumées) ;
- des procédés de désorption thermique à plus basse température. Ces procédés consistent à chauffer indirectement le sol à 400-500 °C.

La désorption thermique présente les avantages suivants :

- terres dépolluées à de très faibles teneurs pour les produits organiques ;
- terres non stériles (le niveau de température est suffisamment faible pour éviter les phénomènes de vitrification) ;
- procédés peu sensibles aux variations de teneur en polluants. Cependant, les procédés de désorption ne

sont pas adaptés à des pollutions trop concentrées (risque d'auto-inflammation).

Il est à signaler que les délais d'obtention d'autorisation pour l'utilisation d'un tel procédé sur site peuvent être longs, notamment si une enquête publique est nécessaire (procédure d'autorisation d'Installation classée).

4.2 Le lavage

Le lavage des sols consiste en plusieurs opérations :

- Un tri granulométrique préalable des terres permettant de séparer les particules grossières des particules les plus fines (diamètre inférieur à 63 μm) sur lesquels la pollution a tendance à se concentrer. Les particules fines sont en général incinérées.
- Une élimination des polluants liée aux particules les plus grossières qui peut se faire selon plusieurs méthodes, dont les plus courantes sont :
 - l'extraction par solvant ;
 - la flottation, qui consiste en une mise en solution du sol dans de l'eau contenant un agent chimique ayant des affinités avec les polluants. Un système d'insufflation d'air facilite la remontée à la surface de l'ensemble "agent chimique/polluant", séparé ensuite par écrémage. L'eau subit ensuite un traitement physicochimique et/ou biologique ;
 - les techniques qui utilisent les forces mécaniques pour détacher les polluants des particules de sol (jets d'eau à haute pression, cyclones).

Le lavage des sols est un procédé moins cher que le traitement thermique. Il permet la réduction du volume à traiter (pollution concentrée sur les fines) et la récupération du sol. Une pollution résiduelle peut cependant

subsister. De plus, le pourcentage de particules fines doit être limité pour éviter un trop fort volume envoyé en incinération.

4.3 Les traitements biologiques

Parmi les différentes techniques envisageables pour traiter des sols pollués par HAP, les techniques biologiques suscitent actuellement un grand intérêt. Nous détaillerons donc davantage ces traitements en indiquant leurs principes, en donnant les résultats d'un traitement biologique sur un site d'ancienne usine à gaz et les perspectives qui en découlent.

4.3.1 Principe

Le principe de base d'un traitement biologique est d'exploiter le pouvoir d'autoépuration naturel des micro-organismes. De nombreux micro-organismes, non dangereux pour l'homme (c'est-à-dire non pathogènes), sont naturellement présents dans notre environnement et ont une capacité importante d'adaptation aux conditions de leur milieu. Ils sont qualifiés de micro-organismes endogènes ou autochtones. L'association de plusieurs populations bactériennes permet de dégrader des polluants complexes comme les hydrocarbures aromatiques (BTEX, HAP) au cours des multiples étapes de la biodégradation, dont l'étape ultime est l'élimination complète (minéralisation) des polluants. Les micro-organismes peuvent agir sur une pollution présente dans les eaux ou dans les sols. On présentera plus spécifiquement le traitement biologique des sols qui est aujourd'hui en plein essor.

4.3.2 Facteurs influençant les performances d'un traitement biologique

Pour optimiser le processus naturel de biodégradation, il est indispensable de bien connaître les différents facteurs influençant son bon déroulement, à savoir :

La nature du sol

- composition granulométrique de la fraction minérale solide, qui caractérise la texture du sol ;
- composition chimique : caractéristiques de la phase minérale et organique ;
- caractéristiques physiques : conductivité électrique et hydraulique, etc. ;
- caractéristiques géotechniques : teneur en eau, porosité, densité, indice de plasticité ;

- caractéristiques biologiques : nombre de germes par gramme de sol (UFC : unité formant colonies par g de sol), genre microbien des dégradeurs de HAP.

La distribution de la pollution dans le sol (HAP)

- NAPL (phase liquide non aqueuse) : gouttelettes plus ou moins solidifiées ;
- adsorption à l'intérieur d'agrégats de fines particules ;
- adsorption autour de grains individuels.

La concentration, la structure et les caractéristiques physicochimiques de la pollution, notamment la fraction aromatique

- proportion de 2 cycles, 3 cycles, 4 cycles et 5-6 cycles aromatiques (le nombre de cycles influant sur les propriétés physicochimiques des polluants : solubilité dans l'eau, pression de vapeur, dégradabilité, etc.) ;
- densité et viscosité des goudrons contenant les HAP ;
- importance des fractions lourdes de ces goudrons associées aux HAP (résines, asphaltènes).

Les facteurs environnementaux

- la teneur en eau,
- le pH,
- la teneur en oxygène,
- la teneur en nutriments,
- la température,
- le potentiel d'oxydoréduction.

4.3.3 Description

Les mises en œuvre peuvent être de trois types :

- en bioréacteur,
- *in situ*,
- sur site.

En bioréacteur

Le traitement biologique des sols en réacteur a lieu dans des enceintes closes équipées de systèmes d'agitation mécanique. Les bioréacteurs sont plus particulièrement utilisés lorsque la pollution est concentrée et dans le cas où les micro-organismes ont des difficultés à se développer dans des conditions non contrôlées. Le bioréacteur présente plusieurs avantages :

- meilleur contrôle des paramètres de culture (pH, température, nutriments) ;
- oxygénation plus efficace ;
- contacts entre organismes et polluants plus intimes ;
- transfert de matière et thermique accru ;

- maintien de conditions optimales de biodégradation par sélection de souches adaptées.

On distingue deux types de réacteur :

- **réacteur "slurry"** : mélange sol/eau permettant de travailler en phase boueuse (30 % d'eau) ;
- **réacteur "pan"** : traitement en phase solide.

Les bioréacteurs se montrent, à travers la littérature, plus efficaces que les autres techniques (*in situ* et sur site). Cependant, cette technique est encore au stade de développement et des recherches sont en cours pour optimiser son efficacité et son coût dans le cadre d'une utilisation routinière.

In situ

La flore microbienne adaptée à la biodégradation des HAP peut être stimulée sur le site même grâce à l'injection d'oxygène (principalement sous forme de peroxyde d'hydrogène) et de nutriments.

L'avantage est qu'il n'y a pas d'excavation du sol. Cette technique a déjà été employée en France lors d'une décontamination de sols pollués par du fioul domestique, mais elle est encore très expérimentale et son utilisation sur des sites pollués par HAP ne pourrait se concevoir aujourd'hui que dans une démarche de recherche à long terme. Elle se heurte aux difficultés dues à la faible mobilité des HAP et à l'hétérogénéité des terrains.

Des techniques permettant d'améliorer la mobilité in situ des HAP sont en cours d'expérimentation aux

États-Unis, notamment grâce à l'utilisation de mousses, composées d'un surfactant, d'un composé permettant de stabiliser la mousse et de l'empêcher de se casser, et d'éthanol. La mousse peut également contenir de l'oxygène ou de l'azote et des nutriments.

Sur site

Ces techniques sont intéressantes car elles peuvent se concevoir avec des technologies légères et donc à un coût attractif. Le sol excavé est disposé en couches plus ou moins épaisses sur un parterre étanche. Deux types de traitement sont fréquemment utilisés :

- **le traitement en terre dynamique "landfarming"** ;
- **le traitement en terre statique "bioterre"**.

Traitement en terre statique

Le premier type de traitement sur site est le **tertre statique**, schématisé dans la figure 4.

La mise en œuvre d'un bioterre comprend les étapes suivantes :

- Le sol, soumis à un tri granulométrique et à une homogénéisation préalable (pour faciliter l'établissement et la réalisation d'un plan d'échantillonnage, et donc favoriser le suivi et le contrôle du traitement), est disposé sur un parterre étanche (film polyéthylène haute densité, par exemple).
- Après analyse chimique de la terre excavée, on prévient les éventuelles carences en ions N et P par l'apport de nutriments, sous forme d'engrais agricoles mélangés au sol.

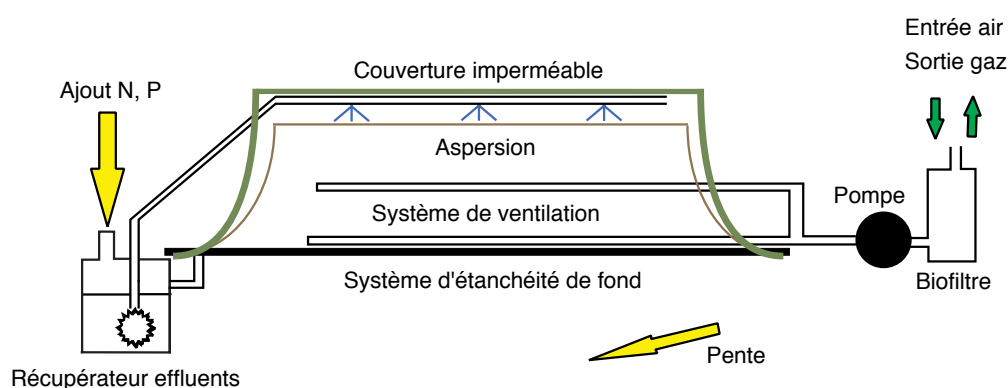


Figure 4

Schéma d'un tertre statique.

Scheme of a biopile.

- Un juste compromis entre aération et humidité doit être obtenu, la circulation des fluides dans le biotterre étant primordiale. Un paramètre important est l'épaisseur du terre, que l'on doit minimiser autant que possible. Sur cette base, plusieurs techniques sont proposées : épaisseur variable du terre (0,9 à 5 m), oxygénation par insufflation ou aspiration d'air (par l'intermédiaire de drains perforés), humidification par recyclage des lixiviats et pulvérisation, ajout d'agents structurants (écorces, copeaux de bois, sciure, paille, compost, etc.) pour diminuer la compacité et accroître la porosité et la perméabilité de la terre.
- Pour éviter tout risque de migration de polluants vers l'environnement, il peut être mis en place, dans certains cas, un système de collecte des lixiviats et un système d'adsorption par filtration (sur charbon actif ou biofiltre) des volatils.
- L'hétérogénéité de la pollution initiale et les anisotropies introduites par le traitement ne sont pas sans incidence sur la conduite du traitement et son suivi analytique. Il faut être attentif à la représentativité des analyses et à leur qualité. En règle générale, mieux vaut espacer les campagnes de prélèvement (lorsque la cinétique de dégradation est lente) et augmenter le nombre d'analyses au cours de chaque campagne, afin de disposer d'une moyenne plus représentative de la pollution résiduelle du sol au cours du traitement.

Traitement en terre dynamique

Toutes les étapes de préparation de la terre sont valables pour le terre dynamique. La différence essentielle réside dans le mode d'aération utilisé.

Pour des tas de faible épaisseur (< 1,5 m), l'aération est mécanique et se fait par retournement périodique de la terre, à l'aide d'engins spécialisés (tracteur, unité mobile munie de lames transversales rotatives), ce qui assure l'homogénéisation et l'aération des sols contaminés.

4.3.4 Exemple de cas

Sur plusieurs sites d'anciennes usines à gaz, des traitements biologiques ont été utilisés pour traiter des terres polluées par des HAP. À titre d'exemple, nous citerons le cas d'un traitement biologique par terre statique de 16 000 m³ de terres polluées par HAP (concentration moyenne : 1000 ppm).

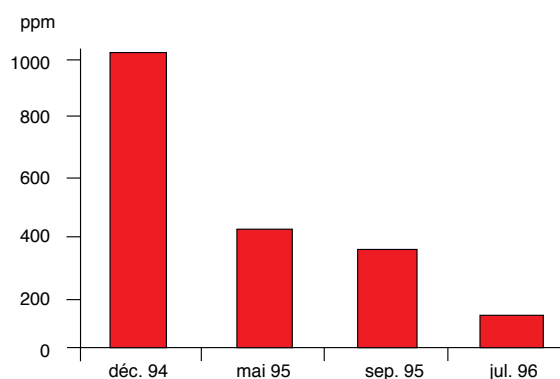


Figure 5

Résultats d'un traitement biologique par terre, de terres polluées par HAP provenant d'un site d'ancienne usine à gaz.
Results of a biopile applied on a MGP soil contaminated by PAH.

Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 5. Au bout de 6 mois, la concentration a été abaissée à 500 ppm.

4.3.5 Perspectives du traitement biologique

Les traitements combinés

Pour améliorer l'efficacité d'un traitement biologique, on peut réaliser des traitements combinés (dont l'efficacité doit être systématiquement vérifiée a priori lors des essais de faisabilité) à l'aide de traitements chimiques utilisant des oxydants (réduction de la taille moléculaire des polluants ayant un nombre de cycles élevés) ou des surfactants (solubilisation des polluants et donc accroissement de la biodisponibilité, c'est-à-dire de l'accessibilité des polluants aux micro-organismes).

La bio-augmentation

Au début ou au cours du traitement sur site, on peut réaliser ce que l'on appelle une bio-augmentation, à l'aide de bactéries exogènes (micro-organismes naturels sélectionnés et multipliés en laboratoire, apportés en renfort des bactéries déjà présentes dans le sol à traiter).

L'utilisation d'inoculums fongiques

Plusieurs sociétés s'intéressent aujourd'hui aux propriétés des inoculums fongiques (champignons filamenteux). Ils pourraient s'avérer performants pour la dégradation des HAP de gros poids moléculaire, grâce à leur mécanisme d'attaque par des enzymes extra-cellulaires (ligninases), qui confère au système enzymatique une accessibilité au substrat bien supérieure à celle des systèmes intracellulaires.

La phytoremédiation

La phytoremédiation consiste à utiliser des plantes pour dépolluer ou stabiliser les sols pollués.

Actuellement, cette technique est au stade de recherche appliquée, mis à part quelques réalisations sur site. Elle est émergente, surtout aux États-Unis, en Allemagne, en Grande-Bretagne et en France.

Elle pourrait apporter un double gain, à la fois par un changement d'image des anciens sites industriels, qui seraient revégétalisés, et à la fois par une dépollution ou une stabilisation des polluants.

Cette technique peut s'envisager indépendamment d'autres techniques pour des sols faiblement pollués, mais elle peut aussi être utilisée en amont ou en aval d'une bioremédiation.

En amont d'un traitement biologique, la phytoremédiation devrait permettre l'accélération des phénomènes naturels de biodégradation grâce à une meilleure oxygénation du sol, une plus grande richesse en carbone, une modification de la circulation de l'eau dans le sol, un développement de l'écosystème bactérien au voisinage de la rhizosphère et une restructuration globale du sol par le système racinaire.

En aval, la phytoremédiation, appliquée sur des terres traitées biologiquement et destinées à être utilisées comme remblais, permettrait de poursuivre la dépollution en développant et en maintenant une végétation *ad hoc*.

4.3.6 Conclusion sur les traitements biologiques

Parmi les techniques envisageables sur des sols pollués par HAP, un intérêt particulier est porté sur le développement des techniques biologiques mises en œuvre sur le site, qui offrent une solution économique bien adaptée au traitement de grands volumes de sols souillés par une pollution organique moyennement concentrée et lorsque les sols peuvent être réutilisés sur le site (en remblais par exemple). Elles présentent en outre l'intérêt d'éviter de transporter les terres souillées à l'extérieur du site.

Une solide expérience a été acquise par *Gaz de France* grâce aux études menées en laboratoire en partenariat avec *l'Institut français du pétrole* ainsi qu'au suivi des premières réalisations sur site.

D'autre part, une étude est en cours de réalisation sur 5 types de procédés biologiques appliqués à des terres polluées par HAP provenant du site d'une ancienne usine à gaz. Cette étude est réalisée avec la participation de l'ADEME et de l'INERIS.

4.4 Les filières de mise en sécurité d'un site

Ces filières ne constituent pas de véritables méthodes de traitement impliquant la disparition des substances polluantes, mais elles permettent d'éliminer les risques de migration des polluants. Cette mise en sécurité prend trois formes :

- le confinement,
- la stabilisation,
- la mise en décharge.

4.4.1 Le confinement

Le confinement peut être naturel, de par la nature physicochimique des produits ou la géologie du site ; il s'accompagne alors généralement de simples mesures de surveillance.

Lorsque le confinement naturel n'est pas suffisant, on peut avoir recours à la mise en place, autour de la source de contamination (qui a pu être laissée en place ou excavée et regroupée en un même lieu), de barrières étanches venant empêcher la migration des substances polluantes dans le milieu. Une couverture étanche, réalisée en matériaux naturels (argile, graviers) ou synthétiques (polyéthylène haute densité, géotextile), ainsi que des parois d'isolation latérales (complétées le cas échéant, s'il n'existe pas de niveau géologique naturel étanche, par une étanchéité de fond) forment une barrière. De plus, un système de drainage externe est prévu pour éviter l'intrusion des eaux extérieures. Dans certains cas, un système de drainage interne des eaux peut être ajouté pour collecter les lixiviats. Quant aux éventuels effluents gazeux pouvant se dégager des déchets confinés, ils peuvent être collectés et traités avant rejet dans l'atmosphère en général. Un dispositif de surveillance piézométrique est en général réalisé.

Cette méthode présente des coûts raisonnables mais elle a l'inconvénient de mobiliser pendant de longues années (durée de vie du confinement) une surface importante qui ne peut être employée que pour certains usages. Cette technique est plutôt utilisée lorsque le site reste la propriété de l'industriel.

4.4.2 La stabilisation

Cette technique joue un rôle triple : réduire la solubilité du déchet, assurer la rétention des éléments polluants et améliorer les caractéristiques mécaniques des déchets.

On distingue 3 méthodes de stabilisation :

- **la stabilisation par liants minéraux** : il s'agit d'un procédé à froid qui incorpore le déchet avec le liant minéral, les additifs et l'eau. Il combine solidification et fixation ;
- **la stabilisation par liants organiques** : il s'agit d'un procédé d'enrobage qui consiste à enfermer dans une gangue étanche les terres polluées ; les liants sont le bitume et les thermoplastiques,
- **la vitrification** : il s'agit d'une rétention physico-chimique des polluants d'un déchet dans une matrice vitreuse, obtenue par un traitement à haute température.

Ce type de technique permet de piéger les polluants à l'intérieur d'une matrice : ils ne sont donc plus disponibles et leur potentiel de relargage dans le milieu naturel est neutralisé.

Cette technique, plus spécifique des métaux lourds, est applicable aux composés organiques lorsqu'ils représentent environ 1 à 2 % du déchet à inerte.

La stabilisation est relativement peu coûteuse (sauf pour la vitrification).

4.4.3 La mise en décharge

En France, il existe, selon la nature des déchets, trois types de décharges (ou centres d'enfouissement technique).

Les sites de classe 1 sont des sites imperméables acceptant certains types de déchets spéciaux et les déchets ultimes. Une douzaine de décharges de classe 1 sont actuellement exploitées en France. Les sites de classe 2 (sites semi-perméables) acceptent les déchets assimilables aux ordures ménagères. Quant aux sites de classe 3, il s'agit de sites perméables acceptant les déchets inertes.

L'absence d'ouverture de nouvelles décharges de classe 1 depuis le milieu des années soixante-dix, ainsi que l'arrivée à saturation des sites actuels ne laissent plus que quelques années d'activité aux décharges existantes (moins de 10 ans).

Devant la saturation des sites existants, le prix de la mise en décharge grimpe.

L'admissibilité des déchets en décharge de classe 1 est définie par l'arrêté du 18 février 1994. Cet arrêté donne des critères portant sur une vingtaine de paramètres. Le choix des paramètres et le type d'analyses dépendent de l'origine du déchet (résidus de l'incinération, résidus de forage, résidus de traitement d'eaux, etc.) ou de sa nature (déchets stabilisés, emballages,

sols). Pour les sols, il faut noter que des critères (limites maximales de teneurs) portent sur les métaux, sur des indices relatifs aux hydrocarbures (carbone organique total, indice CH_2 , indice phénols, etc.), et aussi sur les PCB (50 mg/kg), les HAP (260 mg/kg) et les AOX (organiques volatils) (80 mg/kg). À noter cependant que le seuil de 260 ppm pour les HAP ne se justifie pas par des critères sanitaires.

En plus des contraintes de l'arrêté du 18 février 1994, la procédure d'acceptation est fixée d'un point de vue pratique par l'arrêté d'exploitation de la décharge. L'exploitant de la décharge est en général agréé pour se prononcer sur l'acceptation du déchet, dont il assume la responsabilité dès réception.

CONCLUSION

L'expérience de *Gaz de France* porte sur l'étude de plus d'une centaine de sites d'anciennes usines à gaz ainsi que sur plus d'une cinquantaine d'opérations de traitement. Cette expérience montre que la maîtrise d'un problème environnemental aussi complexe que celui de la pollution des anciens sites industriels peut être abordée de manière pragmatique et rationnelle. Cela implique une bonne coordination entre les spécialistes des différentes disciplines impliquées (chimie, géologie, hydrogéologie, santé publique, génie des procédés, etc.) et un dialogue constant entre les spécialistes techniques, les responsables immobiliers et opérationnels des sites et les pouvoirs publics.

Cependant, il reste encore de nombreux points à étudier, à toutes les étapes de la réhabilitation d'un site, que ce soit au niveau de l'étude des sols ou au niveau de l'évaluation des risques, étape primordiale, en particulier lorsqu'il s'agit de sols pollués par des goudrons, produits peu mobiles ou enfin au niveau des traitements, en particulier des traitements biologiques en pleine évolution.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient MM. Vandecasteele et Blanchet (*IFP*, division Chimie appliquée - Biotechnologies - Matériaux), pour leur collaboration active dans le cadre du partenariat *GDF-IFP* portant sur l'acquisition de connaissances relatives à la biodégradation des HAP.

Les auteurs remercient également M. Luc Demoulin (*Gaz de France*, *DSFJ*) pour la relecture active de cet article et ses remarques pertinentes.

Cet article s'appuie en partie sur le Guide technique des sites d'anciennes usines à gaz rédigé par les membres du projet REHABUSGAZ de la Direction de

la recherche de Gaz de France et par les membres de la Coopération nationale anciennes usines à gaz de la DSFJ de Gaz de France.

La gestion des sites d'anciennes usines à gaz [7]

Aujourd'hui Gaz de France gère 467 sites d'anciennes usines à gaz, répartis sur l'ensemble du territoire, chaque agglomération importante ayant possédé au moins une usine.

Le nombre important de sites, les observations faites sur la stabilité des éventuels contaminants, la capacité de financement de l'entreprise, le contexte national du marché de la dépollution et les orientations de la réglementation nationale ont conduit Gaz de France à hiérarchiser ses sites en fonction de la sensibilité de leur environnement, afin de pouvoir agir en priorité sur les sites les plus sensibles et planifier sur 10 ans les audits d'environnement des sites moins sensibles.

Pour cela, une méthode a été élaborée. Elle est basée sur la notation de 17 critères mesurant les différents aspects de la sensibilité des sites :

- les risques d'exposition directe pour l'homme,
- les risques d'exposition indirecte par la chaîne alimentaire,
- la qualité de l'environnement du site,
- les cibles potentielles.

Les critères ont été définis de manière à être objectifs et faciles à obtenir, sans investigation sur le site ni analyse chimique.

Le résultat ne présume en rien de la pollution du site qui ne peut être évaluée que par des investigations plus lourdes.

Les sites ont été répartis en 5 classes. Pour chacune des classes, Gaz de France a pris des engagements dans le cadre d'un protocole avec le ministère de l'Environnement signé le 25 avril 1996 :

Pour les sites appartenant à la classe 1 : Gaz de France s'engage à réaliser un diagnostic initial dans les plus brefs délais, et à entreprendre des travaux de réhabilitation déterminés par le diagnostic et adaptés au contexte local. Ces travaux seront réalisés dans les conditions définies d'un commun accord avec l'Inspection des installations classées (DRIRE, STIIC).

Pour les sites appartenant à la classe 2 : Gaz de France s'engage à réaliser un diagnostic initial dans un délai de 3 ans. En fonction du diagnostic, Gaz de France s'engage à prendre, dans ce délai, en accord avec les services de l'Inspection des installations classées (DRIRE, STIIC), les mesures appropriées à mettre en œuvre.

Pour les sites appartenant à la classe 3 : Gaz de France s'engage à réaliser dans un délai de 8 ans, une étude historique avec localisation des cuves, qui seront systématiquement vidées et comblées.

Pour les sites appartenant aux classes 4 et 5 : Gaz de France s'engage à réaliser dans un délai de 10 ans, une étude historique avec localisation des cuves, qui seront systématiquement vidées et comblées.

Si, en ce qui concerne les sites de classes 3, 4 et 5, les opérations de vidange des cuves faisaient apparaître une pollution résiduelle, des investigations complémentaires seront effectuées en accord avec l'Inspection des installations classées.

Par ailleurs, Gaz de France s'engage à réaliser un diagnostic initial en préalable à toute opération de vente, cession ou réaménagement des 467 sites. Les conditions de réhabilitation définies en accord avec les services de l'Inspection des installations classées, seront adaptées à la classe de sensibilité du site et à sa destination future.

RÉFÉRENCES

- 1 *Évaluation quantitative des risques sur le site du Pecq* (1996), réalisée pour le compte de GDF par l'Ineris.
- 2 *Gestion des sites (potentiellement) pollués* (1995), version 0, ministère de l'Environnement.
- 3 Visser W.J.F. (1993), *Contaminated land policies in some industrialized countries*. Technische Commissie Bodembescherming.
- 4 *Généralités sur les usines à gaz*, document GDF (à paraître).
- 5 Vercamer P., H.P. Nguyen et J.P. Faccendini (1996), Le devenir dans le sous-sol des résidus d'anciennes usines à gaz. 113^e congrès du gaz.
- 6 Caron S. et S. Carmant (1997), Analyse des polluants organiques présents dans des sols d'anciennes usines à gaz : évaluation expérimentale de la chaîne analytique et préconisations. Gaz de France. *Congrès mondial du gaz* 10-13 juin 1997 à Copenhague.
- 7 *Protocole d'accord GDF-ministère de l'Environnement* (1996), signé en avril 1996.
- 8 Luthy RG, D.A. Dzombak, C.A. Peters, S.B. Roy, A. Ramaswani, D.V. Nakle et B.R. Nott (1994), Remediating tar-contaminated soils at manufactured gas plant sites. *Environ. Sci. Technol.* 28:266-276
- 9 Wilson SC et Jones KC (1993), Bioremediation of soil contaminated with PAHs : a review. *Environ. pollut.* 81: 229-249.

Manuscrit définitif reçu en juin 1997