LES SCIENCES DE LA TERRE AU SERVICE DES SITES ET SOLS POLLUÉS. ÉTAT DE L'ART

Earth Sciences in contaminated soils' service. State of the art

Franck MAROT *

* CIFEG, B.P. 6517, 45065 Orléans Cedex 2 (France)
* Subfaculty of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology, Mijnbouwstraat 120, 2628 RX Delft (The Netherlands)

RÉSUMÉ

Les activités industrielles sont dans une large mesure à l'origine des sites et sols pollués. Ces derniers relèvent soit de pollutions chroniques souvent anciennes (fuites, rejets, décharges, etc.) soit de pollutions accidentelles. Les conséquences parfois graves engendrées par ces sites ont motivé les efforts de remédiation menés depuis quelques années. A l'exception des études toxicologiques, les principaux thèmes de la problématique sont présentés dans cet article. Une première partie est consacrée aux travaux d'investigation et de caractérisation. Dans ce cadre, les principales familles de polluants sont présentées et les relations entre les contaminants et les constituants des sols sont décrites. Dans la seconde partie, les techniques de traitement sont inventoriées et classées selon leurs principes et leurs résultats. En conclusion, la problématique est étendue à celle des sédiments de dragage de port et de canaux.

Mots clés : sol pollué, investigation, caractérisation, traitement.

ABSTRACT

Industrial activities are in a great extent at the origin of polluted soils. These latter are due either to chronic pollutions (escapes, disposal sites, etc.) or accidental pollutions. For several years, serious consequences of some of these sites have been motivating remediation works. Excepted toxicological studies, the main topics of the problematic are discussed in this paper. A description of investigation and characterisation works is proposed in the first part. The main families of pollutants are presented and relations between contaminants and soils' constituents are described. In the second part, treatment techniques are enumerated and classified depending on their principles and results. Finally, the problematic is extended to the dredge sludges of harbours and canals.

***Key words:** polluted soil, investigation, characterisation, treatment.*

INTRODUCTION

Depuis toujours l'Homme cherche à utiliser au mieux les ressources naturelles que lui procure son milieu. Ainsi, une des échelles des temps préhistoriques est basée sur le savoir de nos ancêtres à maîtriser les éléments (feu, métaux, etc.). Cette marche du 'progrès' nous a conduits par étapes à la révolution industrielle. A partir de ce moment, l'apparition de techniques nouvelles s'est accentuée presque soudainement.

Ainsi, alors que nous avons mis plusieurs siècles pour passer de la roue hydraulique (les premières sont connues chez les Grecs) au moulin à eau des meuneries (découvert par les Romains 100 ans avant J.-C.), quelques décennies seulement ont suffi pour passer de la machine à vapeur aux premières locomotives.

Cette transition brutale de l'agraire vers l'industriel, qui s'est accompagnée d'une forte croissance de la population, n'a pas été sans conséquence pour notre planète et donc pour notre environnement.

Ainsi, les sites et sols pollués sont apparus comme une conséquence de cette évolution. Pourtant, la prise de conscience des préjudices engendrés est assez récente. Son émergence est consécutive à l'apparition des symptômes de toxicité liés à certains de ces sites devenus parfois tristement célèbres. Peut-être pensions-nous à tort que les équilibres établis depuis la nuit des temps ne pouvaient pas être déstabilisés par notre intervention...

Aujourd'hui, alors que nous intégrons davantage le respect de notre milieu dans la poursuite de notre développement, nous devons aussi gérer les méfaits du passé.

Ainsi, c'est parce que nous respirons que nous accordons une attention croissante à la qualité de l'air ; c'est également parce que nous mangeons et buvons que nous devons veiller à préserver et à améliorer si nécessaire la qualité de nos sols et de nos ressources en eau.

LA PROBLÉMATIQUE

La problématique des sites et sols pollués fait appel à de nombreux domaines scientifiques et techniques, dont beaucoup relèvent des sciences de la terre (pédologie, géologie, hydrogéologie, géophysique, géotechnique, etc.). D'autres sciences comme la biologie, l'écotoxicologie ou encore la médecine viennent en renfort notamment pour mener les études de risque. Chaque thème de la problématique générale des sites et sols pollués repose ainsi sur l'utilisation en combinaison de tout ou partie de ces disciplines. Parfois aussi, cette combinaison aboutit à la naissance de disciplines nouvelles comme la géotechnique environnementale.

Le recensement des sites pollués est un des premiers travaux à effectuer. Pourtant, sur quelles bases peut-on considérer qu'un site est contaminé et surtout toxique ? Les études sur cette problématique sont relativement récentes et le comportement des polluants dans tel ou tel milieu est toujours complexe. Les conséquences sur l'environnement sont donc souvent mal connues. L'expression 'sols pollués' est actuellement remplacée de plus en plus souvent par 'sols potentiellement pollués'. Depuis 1993, la politique de la France en la matière est basée sur une évaluation des risques liés à ces sites en posant les principes d'une action spécifique (site par site), en fonction de l'usage envisagé pour le site étudié. L'objectif est de rattacher la notion de danger (présence de substances toxiques) à la notion d'exposition (relation dose–effet pour chaque cible : homme ou composante de l'environnement).

Cela explique grandement l'absence de norme de référence en France pour 'mesurer' la pollution d'un sol. D'autres pays ont choisi des approches différentes comme les Pays-Bas ou le Canada qui proposent des teneurs-seuils, voire des tests spécifiques.

Cette absence de référence en France alimente en partie les polémiques qui accompagnent la publication d'un nouveau recensement. Le dernier, qui est aussi le quatrième en quatre ans, est paru en novembre 1997 et comptabilise 896 sites pollués. Au niveau national, les fonctionnaires de la DPPR (Direction de la Prévention de la Pollution et des Risques) estiment pourtant que parmi les 300 000 sites potentiellement pollués, un bon tiers le serait véritablement (Laramée, 1997). Ce dernier chiffre est davantage en accord avec ceux présentés par nos voisins. L'Allemagne a recensé par exemple plus de 170 000 anciens sites industriels où une contamination est suspectée (Feil *et al.*, 1997).

INVESTIGATION

Pour mesurer l'importance du travail d'investigation nécessaire à l'étude d'un site contaminé, on peut insister sur la spécificité de chaque site qui est souvent bien marquée. Celle-ci trouve son origine dans deux paramètres indépendants. Le premier est caractéristique de la pollution. Le second est caractéristique du milieu (nature des sols, eaux de surface et souterraine, etc.). Pour mener le plus justement possible cette étape de reconnaissance, un éventail d'outils doit être utilisé, afin notamment d'éviter des plans de prélèvement trop lourds et donc trop coûteux. Pour les anciens sites industriels par exemple, les documents historiques apportent souvent des informations utiles sur l'origine et le type de contamination que l'on peut rencontrer. Les photos d'époque permettent parfois de localiser précisément d'anciennes zones de décharge ou de stockage qui peuvent s'avérer davantage polluées aujourd'hui. Les témoignages de personnes ayant travaillé jadis sur le site peuvent aussi fournir des informations intéressantes. Ce travail est parfois rendu difficile lorsque plusieurs activités se sont succédé sur le même site.

En parallèle, la reconnaissance sur le terrain est évidemment indispensable. Celle-ci peut être guidée par des couleurs suspectes, des odeurs inhabituelles, mais aussi par une faune ou une flore particulière. Ainsi, là où certaines plantes vont présenter des états de stress importants, d'autres vont se développer à merveille. Certaines pollutions métalliques peuvent être décelées ainsi. Toutes ces investigations doivent conduire à dresser un plan d'échantillonnage rigoureux qui va permettre d'effectuer les prélèvements les plus représentatifs possibles destinés aux analyses.

CARACTÉRISATION

Les analyses physiques, chimiques et minérales menées sur les échantillons de sol visent à déterminer leurs principales caractéristiques (granulométrie, teneur en eau, etc.), leurs principaux constituants et leur contamination éventuelle.

Principaux constituants

Les sols sont des matériaux souvent très hétérogènes, constitués d'une phase minérale, d'une phase organique et d'une phase liquide. Deux familles de constituants jouent un rôle important sur les liaisons entre les particules solides du sol et les contaminants :

– ***les argiles***, minéraux spécifiques (silicates d'alu-

minium hydratés) qui présentent une structure cristalline en feuillets. L'assemblage de ces feuillets entre eux forme différentes structures correspondant à chacune des familles d'argile (illite, kaolinite, smectite, etc.). La granulométrie très fine de leurs particules ainsi que leur structure en feuillets confèrent à ces minéraux des surfaces spécifiques très importantes (5 à 800 m^2/g). De plus, en raison de substitutions isomorphiques dans leur structure et des dissociations des fonctions acide/base faibles, les argiles sont chargées négativement. Ces charges superficielles sont compensées par des cations (cations compensateurs) qui assurent l'électroneutralité du feuillet. Ces cations – relativement mobiles entre les feuillets – peuvent s'échanger avec les cations du milieu pour former un équilibre plus ou moins stable. Ce phénomène explique en grande partie les affinités qui existent entre les argiles et certains polluants, notamment les métaux lourds. Par ailleurs, les propriétés physiques des argiles (gonflement, thixotropie, plasticité) découlent de ces caractéristiques particulières.

- Tous ***les composés organiques*** simples ou complexes qui sont susceptibles d'être rencontrés dans les sols. Ils peuvent être à l'état libre ou en association plus ou moins étroite avec les constituants minéraux. On distingue des constituants de nature bien définie, hérités des plantes et des animaux du milieu ou biosynthétisés par la microflore, et des constituants plus complexes comme les substances humiques. Ces dernières sont des composés macromoléculaires, élaborés par voie chimique ou biochimique et définis par leur solubilité dans différents réactifs. Leur décomposition est très lente et elles combinent de très fortes propriétés tensioactives et de fortes propriétés complexantes. Leur rôle est de ce fait prépondérant dans les interactions organo-minérales qui existent dans les sols. Parmi les substances humiques, on distingue usuellement les acides humiques et les acides fulviques.

Principaux polluants

- ***Les substances organiques toxiques*** (composées de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote, etc.) se comptent par milliers. On estime que 60 000 sont couramment utilisées. Elles sont pour la plupart synthétisées par l'homme. Les composés organiques chlorés par exemple n'existent pas naturellement et les organismes vivants ne sont pas adaptés pour les éliminer. Leur durée de vie est de ce fait importante et leur toxicité souvent bien marquée. Les solvants chlorés s'attaquent à la membrane des fibres nerveuses, alors que certains pesticides provoquent des influx nerveux anormaux.

  On peut aussi citer les hydrocarbures monocycliques (benzène, toluène, etc.) et polycycliques (naphtalène, pyrène, etc.) qui sont des produits cancérigènes.

  La caractérisation des composés organiques se heurte à trois problèmes analytiques majeurs. D'une part, face au grand nombre de ces produits, il est pratiquement impossible de mener une caractérisation chimique complète. D'autre part, des précautions particulières doivent être prises lors du prélèvement des échantillons vis-à-vis du caractère volatil de certaines molécules. Enfin, certains composés tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont difficiles à doser.

- ***Les éléments inorganiques*** tels que les métaux et les métalloïdes qui entrent dans la constitution des roches sont tout naturellement présents dans les sols, en très faible concentration toutefois. En dehors des anomalies naturelles (minerais métallifères par exemple), les teneurs élevées de ces éléments dans les sols sont essentiellement dues à l'activité humaine (Fox *et al.*, 1993). Or, depuis le début de l'ère industrielle, des changements importants ont eu lieu dans le bilan global de la répartition des métaux à la surface de la terre, entraînant parfois des préjudices graves pour l'environnement. Les plus dangereux sont le mercure et le cadmium qui ne possèdent aucune activité biologique favorable. Ils bloquent l'activité enzymatique indispensable au métabolisme (oxygénation, digestion, reproduction). Viennent ensuite le plomb, le cuivre, le nickel, le chrome ou encore le zinc dont l'accumulation dans les organes cibles peut entraîner la mort (Bogusz, 1992).

Par rapport aux substances organiques, la liste des éléments inorganiques est nettement plus restreinte et les outils analytiques sont assez performants pour déterminer leur concentration. Toutefois, les métaux ne sont pas biodégradables et ont une durée de vie infinie. Par ailleurs, la détermination des concentrations totales de ces éléments ne permet pas de prévoir leur mobilité et leur biodisponibilité. Ces paramètres qui influent considérablement sur la notion de risque, dépendent davantage des formes physico-chimiques des métaux dans les sols que de leur teneur totale. Les études de spéciation qui visent à déterminer ces formes physico-chimiques sont menées généralement par une méthode géochimique qui vise à dissoudre une à une chacune des phases constitutives du sol (carbonates, oxydes de fer et de manganèse, matières organiques, sulfures et fractions résiduelles). L'analyse des concentrations en élément de chaque phase dissoute permet alors d'établir la proportion d'élément qui était liée à cette phase avant attaque.

Relations polluants/constituants des sols

Les études de spéciation géochimique par extraction sélective sont spécifiques des polluants inorganiques et présentent certaines limites (dissolution non sélective des phases, réadsorption des métaux sur les autres phases en cours de dissolution). Par conséquent, ce protocole analytique peut être complété par une étude de type minéralogique (localisation des polluants dans les différentes fractions physiques de la matrice combinée à des observations et à des analyses au microscope électronique à balayage, à la microsonde, etc.). Ces études minéralogiques permettent de caractériser les relations polluants/particules, quelle que soit la nature des polluants. On peut classer ces relations en trois catégories (Marot *et al.*, 1998) :

- ***Première catégorie*** (fig. 1). Les polluants sont soit sous forme de particule 'libre' dans la matrice (particule de goudron, goutte d'huile, particule métallique) (1-a), soit ils appartiennent à la constitution chimique de certaines particules et dans ce cas, ces particules sont considérées polluantes dans leur intégralité (scories) (1-b).

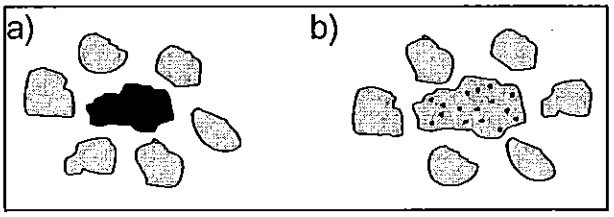


Fig. 1 - Particules (de polluant) 'libres'.

- ***Deuxième catégorie*** (fig. 2). Les polluants sont absorbés dans les particules poreuses de la matrice (bois, charbon, scories, déchets de brique, etc.) mais n'appartiennent pas à la constitution chimique de ces particules. Les polluants peuvent être soit dissous dans l'eau (ions) (2-a), soit à l'état solide ou liquide (hydrocarbures) (2-b).

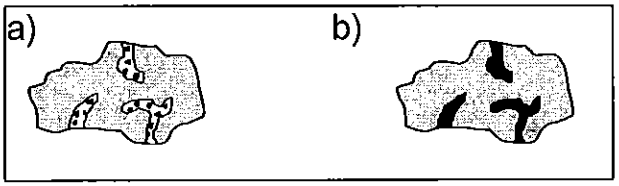


Fig. 2 - Polluants absorbés dans les particules poreuses.

- ***Troisième catégorie*** (fig. 3). Les polluants sont liés à la surface des particules par différents types de forces. Ils peuvent être adsorbés à la matrice par physisorption ou par des forces de cohésion (hydrocarbures, huiles fortement visqueuses) (3-a). Ils peuvent être adsorbés par chimisorption à des particules spécifiques de la matrice telles que les argiles ou les matières organiques (métaux lourds) (3-b), ou encore précipités en surface des particules (métaux lourds) (3-c).

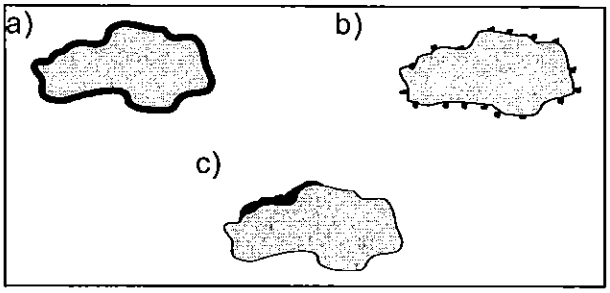


Fig. 3 - Polluants en surface de particules.

Dans un même sol contaminé, on rencontre souvent plusieurs de ces cas de figure en simultané et/ou en combinaison. Ainsi, une argile contaminée par des métaux lourds (chimisorption 3-b) peut enrober des particules de sable (physisorption 3-a) et contribuer à la contamination de ces dernières.

Combiné à des approches toxicologiques, l'ensemble de ce travail d'investigation et de caractérisation vise d'abord à évaluer les risques potentiels du site pour l'environnement (diffusion de la pollution vers l'eau, les animaux et contamination de la chaîne alimentaire). Il permet aussi le cas échéant d'orienter le choix des techniques de traitement.

PROCÉDÉS DE TRAITEMENT

Certains pays travaillent depuis plusieurs années sur la problématique du traitement des sols pollués. On peut citer l'exemple des Pays-Bas qui ne peuvent se permettre d'immobiliser des centaines voire des milliers de sites compte tenu de leur densité de population et de l'exposition particulière de leurs eaux de surface et souterraines aux risques de transferts de contaminants. On peut également ajouter une sensibilité assez importante du public pour cette problématique et aussi un besoin économique en matériaux de construction qui valorise directement et davantage que dans bien d'autres pays les sols ainsi décontaminés, abaissant de ce fait les coûts de leur dépollution.

Pour traiter les sols pollués, les techniques utilisées sont soit des transferts de techniques existantes dans d'autres secteurs d'activité, soit des développements de techniques nouvelles.

Utilisées seules ou en combinaison, *'in-situ'*, *'on-site'* ou *'ex-situ'*, ces techniques reposent sur cinq grands principes (physique, chimique, physico-chimique, bio-

logique et thermique), et conduisent à trois types de traitement :

- traitement par concentration des polluants : les polluants sont isolés de la matrice et le sol est décontaminé en tout ou en partie ;
- traitement par neutralisation des polluants : le matériau contaminé est alors inerté ;
- traitement par dégradation des polluants : ces procédés ne sont applicables qu'à certaines contaminations organiques.

Principaux procédés

Les *traitements physiques* visent à concentrer les polluants. Ces derniers sont souvent présents dans des fractions particulières de la matrice du sol. Ainsi, selon les cas, les particules fines (argiles, etc.), magnétiques (oxydes de fer, etc.), lourdes (minéraux lourds, etc.) ou légères (matières organiques, etc.) peuvent présenter des teneurs en polluants très élevées. D'une façon générale, les procédés de traitement physiques reposent sur ces spécificités et reprennent techniquement des principes largement répandus dans certains secteurs industriels (traitement des minerais, etc.). On parle alors de lavage de sol (*soil washing*). L'objectif est de réduire le volume de matériau contaminé et destiné à la décharge tout en valorisant les fractions saines telles que les sables. Plusieurs unités de traitement en grande échelle (80 t/h) sont actuellement en service, notamment aux Pays-Bas ou en Allemagne.

La plupart des *traitements chimiques* reposent sur la transformation chimique des polluants afin de faciliter leur extraction de la matrice du sol. Selon leur nature, les polluants sont soit piégés (échange de cations, etc.), soit extraits par mise en solution (lixiviation, complexation, extraction par solvant, etc.). Certains polluants organiques peuvent également être dégradés chimiquement par oxydation. La plupart des traitements chimiques impliquent des conditions d'opération très contrôlées, ce qui contribue à accroître considérablement leur coût. De plus, le matériau qui en résulte a souvent perdu bon nombre de ses propriétés biologiques.

Les *traitements physico-chimiques* sont soit des traitements de concentration qui font appel aux propriétés de surface des particules (flottation) ou aux propriétés électrochimiques (électro-migration), soit des traitements de neutralisation par ajout d'un réactif pour immobiliser les polluants au sein de la matrice du sol.

Lorsque l'immobilisation conduit uniquement à stabiliser chimiquement les constituants et les polluants, on parle de stabilisation. Lorsqu'elle entraîne en plus la formation d'une masse solide et monolithique ayant des propriétés mécaniques accrues, on parle de solidification. Dans ce dernier cas, la valorisation du matériau peut être envisagée. Les principaux réactifs utilisés sont les liants hydrauliques tels que les ciments, la chaux, le carbonate de calcium, les cendres volantes et les matériaux pouzzolaniques.

La stabilisation chimique n'est cependant pas toujours efficace car l'ajout de ces réactifs engendre généralement une augmentation du pH qui peut entraîner des relargages de polluants (Montgomery *et al*, 1988). Par ailleurs, la stabilisation à long terme n'est pas assurée.

Les *traitements biologiques* séduisent de plus en plus car ils consistent à utiliser et à optimiser des phénomènes naturels de dégradation ou de concentration pour remédier aux problèmes de pollution. En faisant appel aux bactéries, aux champignons ou aux plantes, leur large éventail est potentiellement applicable à de nombreux types de contamination.

Ainsi, les plantes bioaccumulatrices (jacinthe, tournesol, herbes grasses, etc.) concentrent les polluants inorganiques dans leurs organes. Chaque récolte permet ainsi de réduire les teneurs du sol en polluants. Cette méthode est cependant souvent très longue et présente un risque de diffusion de la pollution par les animaux qui se nourrissent des plantes. Par ailleurs, elle ne permet pas de traiter directement des pollutions profondes et peut être inefficace pour les pollutions importantes.

D'autres plantes peuvent également stabiliser chimiquement les polluants inorganiques dans les sols par l'intermédiaire d'échanges biochimiques complexes au niveau de leurs racines (biostabilisation).

Enfin, les microorganismes permettent soit d'attaquer les polluants inorganiques ou les porteurs de ces polluants afin d'engendrer leur dissolution (biolixiviation), soit de dégrader les polluants organiques (biodégradation). Dans ce dernier cas, le traitement sur site à faible coût est souvent envisageable (*land-farming*). Il représente l'un des seuls traitements biologiques couramment utilisé.

Les *traitements thermiques* ont des finalités très différentes selon les températures atteintes. Ainsi, l'élévation de la température d'un sol (100 à 200 °C) favorise la désorption des polluants et un traitement annexe permet alors leur récupération.

Par ailleurs, la vitrification consiste à fondre les constituants du sol à très haute température pour former une structure cristalline qui fixe les polluants inorganiques, tandis que les polluants organiques sont détruits.

Le coût de ce traitement est élevé, mais les matériaux obtenus peuvent être valorisés.

Enfin, l'incinération permet l'élimination du matériau et des polluants organiques et la concentration des polluants inorganiques dans les cendres et les fumées.

A l'exception du traitement par désorption, les traitements par vitrification ou incinération sont rarement utilisés, notamment en raison de leurs coûts très élevés.

Il est bien évident qu'aucune de ces techniques n'offre la solution idéale à tous les types de situation. La nature du sol et des polluants, le degré de contamination, l'objectif souhaité, son coût, le volume à traiter, le délai, ou encore l'espace disponible sur le site, sont autant de paramètres à prendre en compte dans le choix du procédé ou de la combinaison de procédés à retenir. Une classification de ces procédés est proposée dans le tableau 1.

Traitement	Concentration (Polluants organiques et / ou inorganiques)	Neutralisation (Polluants organiques et / ou inorganiques)	Dégradation (Polluants organiques)
physique	- granulométrique par hydrocyclone (pol. mixtes), - gravimétrique par spirale, lavage à contre-courant (pol. mixtes), - magnétique (pol. inorganiques).		
chimique	- lixiviation, complexation, échange cationique, (pol. inorganiques), - extraction par solvant (pol. organiques).		- oxydation chimique.
physico-chimique	- flottation (pol. mixtes), - électromigration (pol. inorganiques).	- immobilisation par des liants hydrauliques ou organiques (pol. mixtes).	
biologique	- biolixiviation par les bactéries ou les champignons, - bioaccumulation par les plantes (pol. inorganiques).	- biostabilisation par les plantes (pol. inorganiques).	- biodégradation par les plantes et les bactéries (*land-farming* ou réacteur).
thermique	- désorption (pol. organiques), - volatilisation (pol. spécifiques), - incinération (pol. inorganiques).	- vitrification (pol. mixtes).	- incinération.

Tableau 1 – Principaux procédés de traitement des sols pollués.

CONCLUSION

La problématique des sols pollués peut être étendue à une autre très proche, celle des sédiments de dragage (Marot, 1997). Ainsi, l'entretien des voies navigables (canaux, chenaux, ports, etc.) génère plusieurs dizaines de millions de mètres cubes de vases par an en France. Traditionnellement, ces matériaux sont soit mis en régalage sur les berges dans le cas des canaux, soit mis en immersion dans le cas des zones estuariennes (40 millions de m³ sont ainsi déposés en mer chaque année en France). Néanmoins, lorsque les zones de dragage sont à proximité d'activités industrielles ou de zones portuaires, les sédiments à excaver peuvent s'avérer contaminés. Le devenir de ces matériaux après dragage est alors particulièrement problématique et les solutions retenues actuellement consistent soit à repousser l'échéance du dragage dans la mesure du possible (il existe des canaux actuellement totalement remplis de vase, rendant les alentours insalubres), soit à mettre en confinement l'ensemble des matériaux excavés. Parce que ces deux solutions sont peu satisfaisantes (l'une est provisoire et l'autre n'est pas généralisable en raison des volumes concernés), des efforts de remédiation commencent à apparaître comme le chantier de curage du Port du Dragon dans le département du Nord (Kaszynski *et al.*, 1998).

Plus généralement, pour gérer à long terme les problèmes de pollution (sol, eau, air, etc.), il faut s'attaquer à la base du problème, en maîtrisant au mieux les rejets de toutes les activités humaines confondues, qu'elles soient industrielles, urbaines ou agricoles ; ceci afin d'éviter la dilution des polluants dans le milieu naturel où ils seront beaucoup plus difficiles à concentrer, à inerter où à détruire et où ils représentent un risque pour l'environnement. On constate aujourd'hui que la gestion des sites pollués se heurte non seulement à des problè-

mes techniques et écologiques mais aussi et surtout à un problème économique. En effet, le marché de la dépollution des sols est un marché qui engendre des coûts qui, mis à part les cessions immobilières avec plus-value, sont sans aucun retour d'investissement (Briglia, 1997). Nous devons donc aujourd'hui gérer au mieux les sites pollués dont nous héritons, en attendant que la politique actuelle favorisant les activités propres ne porte ses fruits. □

Références bibliographiques

BOGUSZ, D. (1992) - Toxicités et substances toxiques. - Colloque - La restauration des rivières et des canaux, 24-25 septembre 1992, Bouvines - Chapitre 1, 16 p.

BRIGLIA, P. (1997) - La dépollution des sols est un marché de PME. - *L'Environnement Magazines*, 1563, Décembre 1997, Interview, p. 25.

FEIL, A., NEEßE, Th. & HOBERG, H. (1997) - Washability of Contaminated Soil. - *Aufbereitungs Technik*, 38 (1997), Nr. 8, p. 399-409.

FOX, R.G., DENNIS-FLAGLER, D., COWGILL, D.C., GARBACIAK, Jr. St., TUCHMAN, M.L., CRECELIUS, E.A., INGERSOLL, C. & BURTON, G.A. (1993) - Integrated sediment assessment approach of the U.S. assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) program. - CATS II Congress - Antwerp, 15-17 November 1993, Session 2, p. 2.11-2.14.

KASZYNSKI, M. & GUILLARD, P. (1998) - Le chantier de curage du Port du Dragon - Pôle de Compétence sur les sites et sols pollués / Nord-Pas de Calais. - *La lettre du pôle*, Février 1998, p. 5.

LAMARÉE, V. (1997) - Sols pollués : l'inventaire qui cache la forêt. - *L'Environnement Magazines*, 1563, Décembre 1997, Actualités, p. 9.

MAROT, F. (1997) - Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. - Thèse doct., Univ. du Havre, *Documents du BRGM*, 278, ISBN 2-7159-0867-9, 330 p.

MAROT, F., RINGELING, R.H.P., WITTING, R. (à paraître) - The use of attrition in soil washing. - The International Conference of Environment and Mineral Processing, TU Ostrava, République Tchèque, 25-27 juin 1998.

MONTGOMERY, D.M., SOLLARS, C.J. & PERRY, R. (1988) - Cement-based solidification for the safe disposal of Heavy Metal contaminated sewage sludge. - *Waste Management & Research*, 6, p. 217-226.