

- Biotechnologies
- Dépollution
- Sol
- Risque biologique
- Mesure de prévention

► *Christine DAVID, INRS, département Expertise et conseil technique, prévention des risques biologiques*

RISQUES BIOLOGIQUES ET BIODÉPOLLUTION DES SOLS

BIOLOGICAL RISKS AND BIOREMEDIATION OF SOIL

Soil remediation is a rapidly expanding sector, witness the tonnage of remediated soil that grew by more than 68% from 2006 to 2010. It is therefore important to take stock in order to identify the techniques used and the related occupational risks.

Polluted soil is treated mainly using biological techniques that are preferably applied off-site, in specialist facilities receiving soil from various origins. Then come in situ soil bioremediation techniques, followed by biodegradation of the pollutants of the soil placed in windrows on the site. These techniques are based on the fact that the microorganisms that develop in polluted soil find favourable conditions in such soil and feed, in particular, on the pollutant present that is then degraded. By modulating parameters such as oxygen, humidity, temperature, and nutrients, the growth of the depollutant microorganisms can be optimised.

This article makes a first-level assessment of the biological risks related to the bioremediation techniques and makes it possible to recommend a certain number of protective measures. However, the assessment of the biological and chemical risks needs to be continued in more depth and quantified, taking account of the specificities of each worksite. That should make it possible to adapt the risk prevention measures more precisely for staff working in the soil bioremediation sector.

- Biotechnologies
- Remediation
- Soil
- Biological risk
- Preventive measure

La dépollution des sols est un secteur professionnel en plein essor, comme le montre le tonnage des terres dépolluées qui a progressé de plus de 68% entre 2006 et 2010. Il est donc important d'établir un état des lieux afin d'identifier les techniques employées et les risques professionnels associés.

Il s'avère que le traitement des terres polluées se fait majoritairement à l'aide de techniques biologiques qui s'appliquent préférentiellement hors site, dans des installations spécialisées recevant des terres de plusieurs origines. Suivent les techniques de biodépollution des sols *in situ* puis la biodégradation des polluants des terres mises en andain sur le site. Ces techniques se basent sur le fait que les micro-organismes qui se développent dans un sol pollué y trouvent des conditions favorables et se nourrissent notamment du polluant présent qui est alors dégradé. En modulant des paramètres comme l'oxygène, l'humidité, la température et les éléments nutritifs, la croissance des micro-organismes dépollueurs peut être optimisée.

Cet article présente une évaluation de premier niveau des risques biologiques liés aux techniques de biodépollution et permet de préconiser un certain nombre de mesures de protection. Toutefois, l'évaluation des risques biologiques et chimiques nécessite d'être approfondie et quantifiée, en tenant compte des particularités de chaque chantier. Cela doit permettre d'adapter plus précisément les mesures de prévention des risques pour le personnel travaillant dans le secteur de la biodépollution des sols.

Un site pollué est défini, selon le ministère en charge de l'écologie comme « un site qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. Ces situations sont souvent dues à d'anciennes pratiques sommaires d'élimination des déchets, mais aussi à des fuites ou à des épandages de produits chimiques, accidentels ou pas » [1].

La gestion des sites et sols pollués répond, pour l'essentiel, au code de l'environnement (Livre V). Cette réglementation impose de localiser l'ensemble des sites pollués, d'évaluer les risques qu'ils représentent et de fixer les objectifs de réhabilitation. Cette pression réglementaire a entraîné une augmentation des opérations de dépollution des sols et, par voie de conséquence, une organisation progressive du secteur autour de normes définissant les exigences et classant les activités en trois

domaines complémentaires: les études, l'assistance et les contrôles, d'une part, l'ingénierie des travaux de réhabilitation, d'autre part et, enfin, l'exécution des travaux de réhabilitation.

Parallèlement, les biotechnologies se développent suite aux pressions économique-politiques en faveur du développement durable. Elles offrent en effet de bons rendements à un coût faible, consomment peu d'énergie et peuvent même participer à la production d'énergie renouvelable.

Ces secteurs en pleine évolution économique et technique soulèvent quelques questions, concernant notamment la part des biotechnologies dans le marché de la dépollution des sols, ainsi que les risques biologiques et les mesures de prévention pour les personnels travaillant sur ces chantiers.

LE MARCHÉ ET LES TECHNIQUES DE DÉPOLLUTION

Les principaux maîtres d'ouvrage des chantiers de réhabilitation sont des industriels, suivis des aménageurs immobiliers puis des collectivités territoriales. Les « sites orphelins », dont le responsable n'est pas connu ou insolvable, sont réhabilités par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Le marché de la dépollution est dominé par les grands groupes mais comporte également un vaste tissu de PME. Depuis 2002, les sociétés de terrassement et de démolition se sont également positionnées sur le marché. Ce secteur compte approximativement 3 000 salariés pour un chiffre d'affaires estimé à 500 millions d'euros [2].

Le tonnage des terres dépolluées est en continuelle croissance depuis quelques années. En 2010, l'ADEME estime que 3 707 000 tonnes de terres polluées ont été traitées, contre 3 200 000 tonnes en 2008 et 2 200 000 en 2006 (Cf. Figure 1). Cela représente une croissance de plus de 68% entre 2006 et 2010.

Cette progression aurait plusieurs causes:

- le déploiement urbain, y compris sur des friches industrielles;

- le renforcement de la réglementation (plan de gestion obligatoire lors de la cessation d'activité d'une ICPE^a);

- le recensement des sites industriels;

- le développement des techniques et des filières de dépollution des sols.

Les sols réhabilités sont majoritairement pollués par des hydrocarbures (dont des hydrocarbures aromatiques polycycliques), du plomb, des composés organiques halogénés volatils ou encore du chrome. Le traitement des sols fait donc appel à des techniques très variées, entraînant des contraintes et des coûts tout aussi différents. Ces traitements peuvent être appliqués *in situ* (traitement de la terre dans le sol) ou *ex situ* (terre extraite du sol puis traitée sur site ou hors site) au moyen de techniques:

- physiques: modifiant un paramètre physique tel que la température ou la pression;

- chimiques: mettant en jeu des réactions chimiques;

- physico-chimiques: combinant techniques physiques et chimiques;

- biologiques: favorisant la dégradation du polluant par les micro-organismes.

L'ADEME a effectué un état des lieux des procédés utilisés et a évalué, pour chacun, le tonnage des terres traitées en France en 2010 (Cf. Tableau 1) [2]. Les techniques citées visent à réduire ou à dégrader le polluant, mais également à limiter sa dispersion par confinement ou stabilisation.

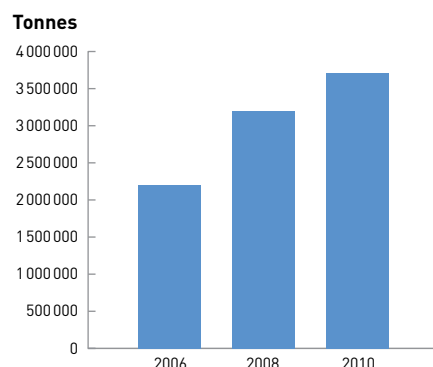
En 2010, les sites pollués ont été essentiellement réhabilités en confinant les terres *in situ* ou en stockant les terres en tant que déchet inerte. Ces solutions sont choisies en l'absence de technique efficace pour dégrader le polluant ou, pour des raisons logistiques, lorsque le site est encore en activité.

Hormis ces deux méthodes, le réel traitement des terres polluées se fait majoritairement à l'aide de techniques biologiques (79,7% des terres) [2]. Ces techniques s'appliquent préférentiellement hors site, dans des installations spécialisées recevant des terres de plusieurs origines. Suivent les techniques de biodégradation des polluants *in situ*, puis de biodégradation des polluants des terres mises en andain sur le site.

^a ICPE: installations classées pour la protection de l'environnement

FIGURE 1

Evolution du tonnage des terres dépolluées en France.



Après les techniques biologiques, les traitements physico-chimiques (14,8% des terres) sont employés préférentiellement aux traitements thermiques (5,5% des terres).

Le choix prioritaire des techniques biologiques pour dépolluer les sols s'explique grandement par leur coût moyen nettement inférieur aux autres techniques. A l'opposé, les traitements par incinération sont les plus onéreux. Le coût moyen est globalement plus important pour les traitements hors site nécessitant le transport des terres.

LES TECHNIQUES DE BIODÉPOLLUTION DES SOLS

Les traitements biologiques font appel aux capacités naturelles des micro-organismes à dégrader certains polluants comme:

- les hydrocarbures pétroliers (essences, gasoil, fioul, pétrole brut);

- les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP);

- les solvants chlorés;

- les autres composés: alcools, glycols, cétones, phénols, cyanures, PCB (polychloro-biphényles), PCP (polychlorophénols), pesticides.

Les techniques de biodépollution se basent sur le fait que les micro-organismes qui se développent dans un sol pollué y trouvent des conditions favorables et se nourrissent notamment du polluant présent qui est alors dégradé. En modulant des paramètres comme

TABLEAU I

Tonnages de terres dépolluées en France en 2010 selon les différentes techniques (ADEME). Les terres ayant subi plusieurs traitements sont comptées plusieurs fois.

Techniques de dépollution	Tonnages 2010	Taux d'utilisation
In situ		
Confinement <i>in situ</i> (encapsulation, étanchéification, isolement) : constitution d'une barrière peu perméable autour du volume de sol pollué.	1 224 200	25,4 %
Bioventing (traitement biologique <i>in situ</i>, biodégradation <i>in situ</i>, biodécontamination <i>in situ</i>) : injection d'oxygène dans la zone non saturée pour stimuler la biodégradation par la microflore présente dans le sol.	529 200	11,0 %
Oxydation/réduction chimique : ajout d'un oxydant ou d'un réducteur détruisant les polluants.	150 100	3,1 %
Bio-augmentation (apport de micro-organismes exogènes ou endogènes) / bio-stimulation (apport d'oxygène et de nutriments pour stimuler les micro-organismes du sol)	126 600	2,6 %
Stabilisation physico-chimique : réduction de la dissémination des polluants par des mécanismes physico-chimiques.	56 200	1,2 %
Phytoremédiation <i>in situ</i> : plantation concentrant ou transformant les polluants.	5 800	0,1 %
Ex situ sur site		
Biodégradation sur site (biotertre, biopile, bioremédiation en tertre) : apport d'oxygène stimulant les micro-organismes dégradant les polluants du sol mis en tertre.	209 800	4,4 %
Confinement sur site (encapsulation, couverture, étanchéification, isolement) : disposition des terres dans une alvéole dont la perméabilité est très faible et dont les eaux d'infiltration sont collectées et traitées.	46 000	1,0 %
Stabilisation physico-chimique : réduction de la dissémination des polluants par des mécanismes physico-chimiques.	40 600	0,8 %
Autres traitements sur site	17 200	0,4 %
Traitement thermique sur site	2 000	0,0 %
Ex situ hors site		
Stockage de déchets inertes : disposition des terres dans une alvéole.	1 201 600	25,0 %
Biodégradation hors site (biocentre, biopile, bioremédiation en tertre, biotertre) : stimulation des micro-organismes dégradant les polluants des terres mises en tertre.	568 200	11,8 %
Stockage de déchets non dangereux : disposition des terres dans une alvéole dont la perméabilité est très faible et dont les eaux d'infiltration sont collectées et traitées.	425 200	8,8 %
Stockage de déchets dangereux : disposition des terres dans une alvéole dont la perméabilité est très faible et dont les eaux d'infiltration sont collectées et traitées.	87 300	1,8 %
Traitement thermique : chauffage des terres entre 150 et 540 °C, volatilisant les polluants qui sont ensuite traités.	66 200	1,4 %
Autres techniques hors site	25 000	0,5 %
Cimenterie : destruction des composés organiques par combustion à haute température (> 1 000 °C).	21 400	0,4 %
Incinération hors site : destruction des composés organiques par combustion à haute température (> 1 000 °C).	10 300	0,2 %
Lavage des terres : mobilisation et extraction des polluants soit par solubilisation à l'eau, aux solvants, aux acides-bases, aux tensio-actifs, ou à d'autres produits chimiques.	2 600	0,1 %

l'oxygène, l'humidité, la température et les éléments nutritifs, la croissance des micro-organismes dépollueurs peut être optimisée.

BIODÉGRADATION HORS SITE

Les terres polluées sont excavées du site et transportées jusqu'à une installation de traitement regroupant les terres de différents sites. Afin d'homogénéiser leur granulométrie, les terres sont pré-traitées par émottage, broyage et criblage. Des éléments nutritifs et structurants, comme le compost de déchets verts, sont ensuite ajoutés (25 à 35 % de la masse de terre).

Des biotertres sont alors formés avec des terres d'un seul site ou des terres de plusieurs sites contenant les mêmes polluants en concentration similaire. Le biotertre représente un volume de plusieurs centaines de mètres cubes (longueur : plusieurs dizaines de mètres - largeur : plusieurs mètres (< 10 m) - hauteur inférieure à 4 - 5 m). Des canalisations perforées plongeant dans le biotertre apportent de l'oxygène. Des rampes d'aspersion assurent une humidité optimale du biotertre et parfois apportent des éléments nutritifs (azote, phosphore, potassium...) favorisant la croissance des micro-organismes. Dans certains cas, des micro-organismes peuvent être ajoutés afin d'augmenter la vitesse de biodégradation et donc diminuer le temps de traitement. Ces micro-organismes proviennent des terres à décontaminer et sont cultivés en masse dans un bioréacteur (cf. Figure 2).

Le traitement biologique hors site se pratique lorsque le sol est hétérogène (rendant impossible le traitement *in situ*) et lorsque la pollution est peu étendue (limitant les coûts liés à l'excavation et au transport des terres).

Le rendement peut atteindre 99 % si le temps de traitement est suffisant (en moyenne de quatre à six mois).

BIODÉGRADATION SUR SITE

Les sols sont excavés et mis en tertres ou andains sur le site, selon le principe développé ci-dessus. Le traitement consiste à maintenir un taux d'oxygène et d'humidité optimal pour la croissance des micro-organismes endogènes dégradant les polluants. Selon la nature de la pollution et du sol, il peut s'avérer opportun d'ajouter des éléments nutritifs et des micro-organismes préalable-

FIGURE 2

Traitement biologique hors site des terres polluées.

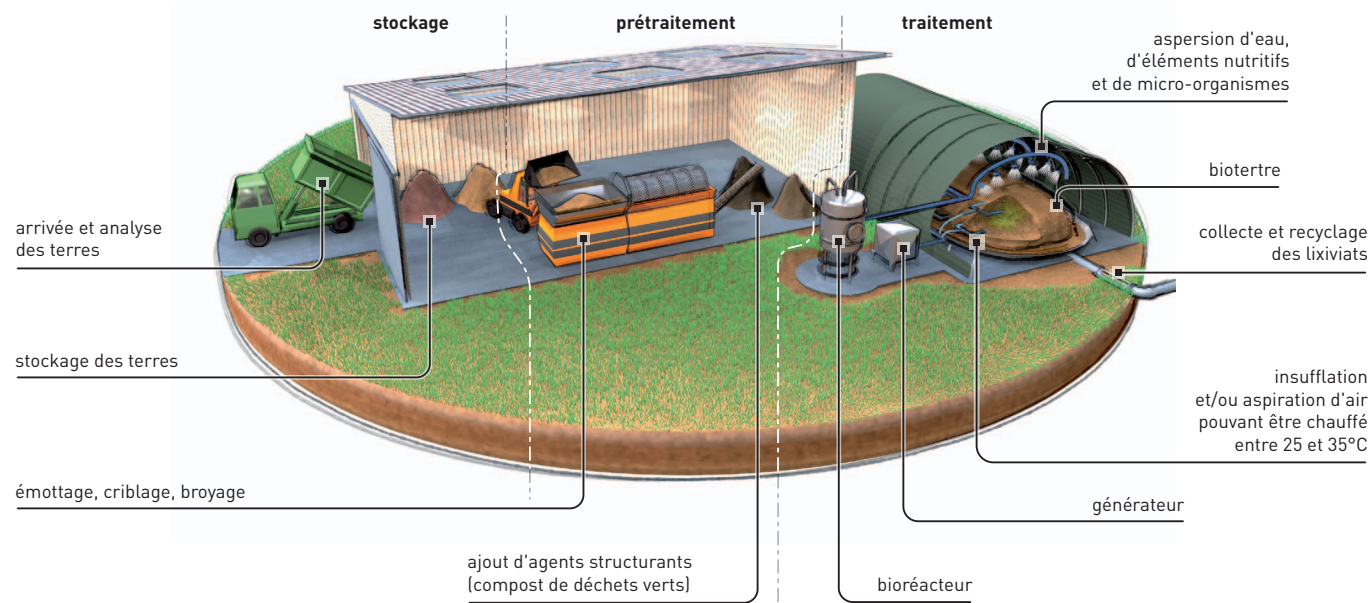
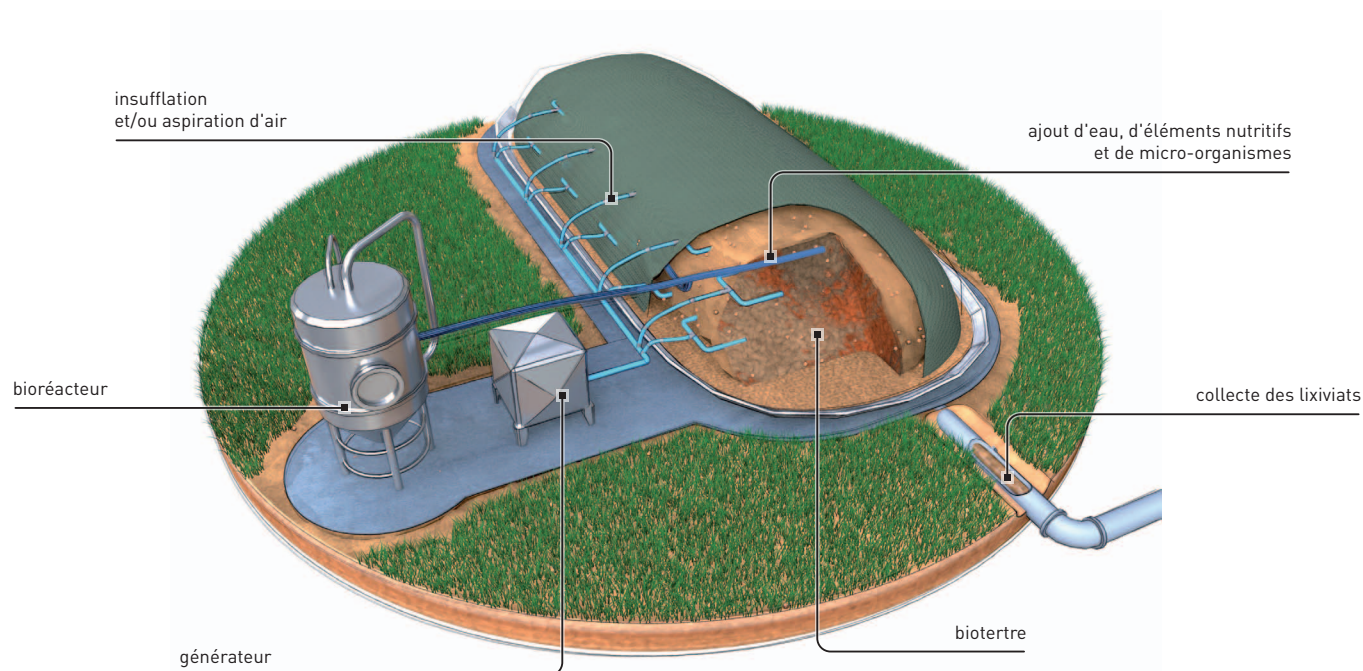


FIGURE 3

Traitement biologique sur site des terres polluées.



ment cultivés en masse dans un bioréacteur (cf. Figure 3).

L'aération des andains (plus petits que les tertres) peut se faire par retournements, réalisés à l'aide d'engins ou de retourneurs automatiques.

La biodégradation sur site peut s'envisager lorsque la pollution n'est pas trop importante et qu'il existe une surface suffisante pour l'installation de traitement qui peut rester à demeure plusieurs mois.

BIODÉGRADATION *IN SITU* OU BIOVENTING

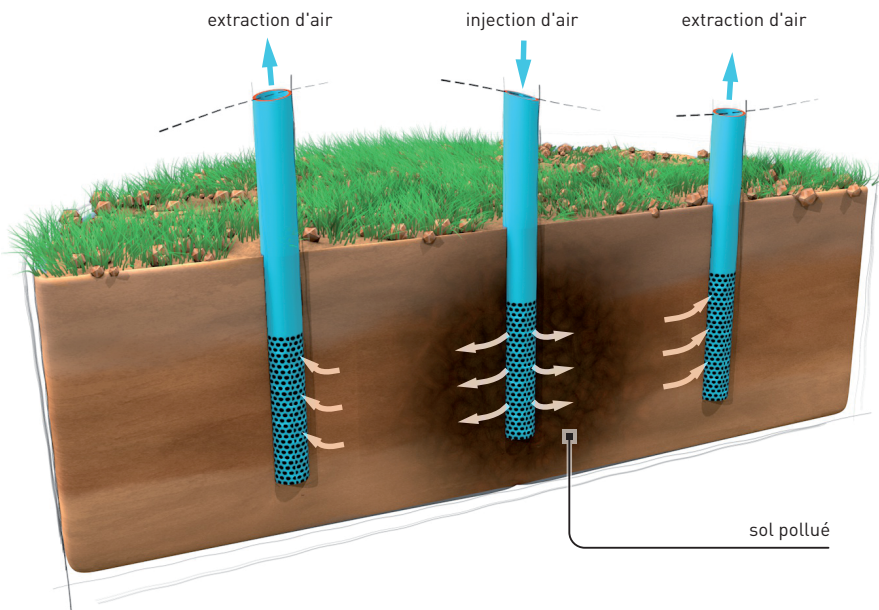
Ce traitement biologique *in situ* consiste à traiter la terre sans l'excaver, en apportant de l'oxygène favorisant la croissance des micro-organismes dégradant le polluant. Il est parfois également nécessaire d'apporter des éléments nutritifs (azote, potassium...) qui se révéleraient insuffisamment présents dans le sol.

Cela se traduit par la mise en place d'un système de ventilation qui insuffle de l'air dans la zone polluée et extrait l'air depuis la zone non polluée du sol (cf. Figure 4).

Cette technique est préférentiellement choisie lorsque la pollution s'étend sur une surface et une profondeur de sol importantes et que l'excavation des terres devient alors trop onéreuse. Le bioventing nécessite toutefois un sol non fissuré, pour ne pas créer de flux

FIGURE 4

Traitement biologique *in situ* des terres polluées.



d'air préférentiels qui perturberaient l'oxygénation homogène de la zone polluée.

Dans les conditions optimales, le rendement de la dépollution peut dépasser les 90% [3]. Cette technique est souvent employée pour les stations-services et les dépôts de produits pétroliers.

L'ÉVALUATION DES RISQUES BIOLOGIQUES

Les opérations de biodépollution des sols exposent les personnels à de nombreux risques (routier, électrique, biologique, chimique, amiante, incendie/explosion...) [4]. Certains risques, notamment chimiques et biologiques, nécessiteraient d'être étudiés de façon plus approfondie. En ce qui concerne l'analyse des risques biologiques, il convient d'évaluer les dangers liés aux micro-organismes mis en œuvre et l'exposition des opérateurs lors des différentes phases de travail.

DANGERS BIOLOGIQUES

Les micro-organismes stimulés pour dégrader les polluants se trouvent naturellement dans le sol. Ce dernier

héberge une quantité phénoménale de micro-organismes, qu'il est impossible d'identifier en totalité pour évaluer leurs dangers potentiels. Toutefois, un certain nombre de micro-organismes du sol ont pu être identifiés.

Parmi ceux-ci, seul un très faible pourcentage est connu pour provoquer des pathologies chez l'Homme, notamment *Bacillus anthracis* à l'origine de la maladie du charbon, des *Clostridium* responsables du tétanos et du botulisme, des *Pseudomonas* surinfectant des plaies, sans oublier les œufs de parasites intestinaux. Lors des opérations de dépollution, il n'est pas possible de savoir quels sont les micro-organismes pathogènes réellement présents dans les terres traitées.

Dans d'autres cas, des bactéries connues sont cultivées afin d'ensemencer les sols pollués. Par exemple, les bactéries *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus sphaericus* et *Pseudomonas fluorescens* sont cultivées pour leur capacité à produire des tensioactifs et à dégrader les hydrocarbures [5]. De même, *Pseudomonas alcaligenes*, *Pseudomonas mendocina* et *Pseudomonas testosteroni* sont connues pour dégrader les alcanes [6].

Les bactéries manipulées sont alors des souches bien identifiées, dont il est possible d'évaluer le danger qu'elles représentent pour l'opérateur. Il s'agit, pour la plupart, de germes opportu-

nistes n'entraînant des pathologies que chez des personnes aux défenses immunitaires affaiblies. Toutefois, lorsque *B. licheniformis*, *B. subtilis*, *B. cereus* sont ingérés à de fortes concentrations (plus de 10^6 bactéries/g), ils peuvent entraîner des intoxications alimentaires.

En plus de ces micro-organismes, des fragments de certaines bactéries (appelés endotoxines) peuvent également provoquer de pathologies respiratoires allergiques.

EXPOSITIONS

Les micro-organismes peuvent pénétrer l'organisme par différentes voies :

- par contact de la peau lésée avec la terre et des surfaces contaminées ;
- par ingestion en portant les mains ou des objets contaminés à la bouche ;
- par projection sur les muqueuses (yeux, nez, lèvres) ;
- par inhalation d'aérosols de particules ou de gouttelettes.

Une fois dans l'organisme, les micro-organismes, leurs fragments ou leurs toxines peuvent provoquer différents types de pathologies :

- des infections dues à la multiplication des micro-organismes dans le corps ;
- des intoxications provoquées par des toxines provenant des micro-organismes ;
- des allergies résultant d'une réaction de défense excessive du corps contre un fragment de micro-organisme.

L'observation des opérateurs à leur poste de travail montre qu'ils peuvent être exposés aux micro-organismes par contact, ingestion, projection ou inhalation. Cette voie de contamination s'observe notamment au cours des travaux de manutention de terre ou de compost de déchets verts :

- l'excavation des terres ;
 - le prétraitement des terres (tri, criblage, stockage, chargement) ;
 - la manipulation de compost ;
 - la mise en terre ou en andain ;
 - le retournement non automatisé des andains,
- mais aussi lors de la pulvérisation de micro-organismes sur les tertres.

LA PRÉVENTION DES RISQUES BIOLOGIQUES

L'analyse des risques et des mesures de prévention doit se faire le plus en amont possible, dans les bureaux d'étude qui choisissent les techniques de traitement en fonction du type de pollution diagnostiquée.

Une réflexion doit être menée sur la mise en œuvre de mesures de protection collective qui doivent s'appliquer en priorité. Ces mesures permettent le plus souvent d'agir sur plusieurs risques. Ainsi, le confinement des opérations générant des aérosols (le criblage, le stockage, le retournement des andains...) permet de prévenir les risques biologiques et chimiques. Ces opérations peuvent se faire dans des locaux fermés, munis d'une ventilation générale rejetant l'air à l'extérieur après traitement.

Des méthodes de confinement par capotage, encore plus efficaces pour la protection des opérateurs, peuvent également s'envisager pour certains procédés (convoyeur, cribleur...), à l'image de ce qui se fait dans d'autres secteurs professionnels tels que le compostage.

De plus, certaines opérations hors site, comme le retournement des andains, peuvent être automatisées et être ainsi effectuées hors présence humaine.

D'autres mesures de protection s'imposent d'ores et déjà. Ainsi, lors de l'utilisation d'engins pour excaver, déplacer ou retourner les terres, la cabine de l'engin doit être en surpression et munies d'un caisson de filtration de l'air entrant. Les filtres doivent retenir les particules (filtre H13) et les gaz (type de filtre à choisir selon le polluant identifié). Le fournisseur du filtre doit communiquer à l'utilisateur la fréquence de changement du filtre en fonction des conditions d'usage.

Si les mesures de protection collective sont insuffisantes ou impossibles à mettre en place, des équipements de protection individuelle doivent être adoptés selon les risques encourus.

Les mains sont protégées par des gants étanches (pour éviter la contamination) et résistants aux coupures pouvant se produire lors de la manutention.

Des lunettes-masques sont portées pour se prémunir des projections, par exemple lors de la mise en terre.

Les demi-masques jetables FFP2 sont portés en présence d'aérosols. La filtration anti-particules est complétée d'une filtration anti-gaz selon les cas. Afin d'améliorer le confort de l'utilisateur, lors de tâches longues ou nécessitant un effort physique important, des appareils de protection respiratoire à ventilation assistée (cagoules, casques ou masques complets) peuvent être préconisés.

De plus, pour limiter leur contamination, les opérateurs doivent respecter les mesures d'hygiène comme éviter de porter les mains et des objets à la bouche, se laver les mains avec du savon avant de manger, boire ou fumer et couvrir les plaies même minimes.

Enfin, la surveillance médicale devra particulièrement tenir compte des personnes aux défenses immunitaires affaiblies : diabétiques, immunodéprimés, greffés... En outre, même si le code du travail n'impose aucune vaccination, le risque de blessure et de contact avec la terre, rend indispensable les rappels réguliers de la vaccination contre le tétanos.

CONCLUSION

L'évaluation de premier niveau effectuée dans ce document permet de préconiser un certain nombre de mesures de protection des personnes intervenant sur les chantiers de biodépollution des sols. Toutefois, l'évaluation des risques biologiques et chimiques

nécessite d'être approfondie et quantifiée, en tenant compte des particularités de chaque chantier. Une étude de l'INRS va être initiée dans ce but. Des prélèvements d'air effectués sur différents sites permettront de mesurer certains polluants chimiques et biologiques et d'adapter plus précisément les mesures de prévention des risques pour le personnel travaillant dans le secteur de la biodépollution des sols.

Reçu le : 12/11/2012

Accepté le : 18/01/2013

BIBLIOGRAPHIE

[1] <http://basol.environnement.gouv.fr/accueil.php>. Consulté le 18/01/13.

[2] *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France. Synthèse des données 2010*. Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Ernst & Young. Coordination technique: Frédérique Cadière, ADEME Angers.

[3] Vogel T. M.: *Bioremédiation des sols*. Techniques de l'ingénieur. 2008.

[4] ED 866 : *Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites industriels pollués*. INRS, 2002.

[5] Jennings E. M. et Tanner R. S. (2000): *Biosurfactant-producing bacteria found in contaminated and uncontaminated soils*. Proceedings of the 2000 Conference on Hazardous Waste Research.

[6] Lahoussine V.: *Dégradation des hydrocarbures par les bactéries isolées des eaux superficielles du bassin parisien* - Agence de l'eau et CRECEP - étude n° 92 ECOL 6. <http://www.eau-seine-normandie.fr/>. Consulté le 18/01/13.