

Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds: une revue (The remediation techniques of heavy metals contaminated soils: a review)

Nouri Mohamed*, Haddioui Abdelmajid

*Laboratoire de Gestion et valorisation des ressources naturelles, Faculté des Sciences et Techniques,
Université Sultan Moulay Slimane, PO 523, Beni-Mellal 23000, Maroc.*

* *Corresponding author. E-mail: mohamednouri35@gmail.com; Tel: +212 6 54 25 21 63*

Received 14 Oct 2016, Revised 15 Nov 2016, Accepted 20 Nov 2016

Résumé

Le problème des sols pollués par les métaux lourds est la conséquence d'un passé, et trop souvent encore d'un présent industriel, peu soucieux des rejets d'éléments toxiques dans les sols, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux pour la santé publique et animale. Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés par les métaux lourds, néanmoins toutes ne sont pas applicables dans toutes les conditions. Une étude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technologie pour les sols pollués. Le contexte économique est à prendre en considération, dans ce cas, afin de trouver des solutions innovatrices à la problématique de la contamination des sols par les métaux lourds.

Mots clés : Sol; Métaux lourds; Techniques de dépollution; Phytoremédiation; Bioremédiation

Abstract

The problem of heavy metals polluted soils is a result of a past, and too often an industrial present, careless release of toxic elements in soils, making many sites potentially polluted and dangerous for health public and animal. There are several technologies for decontamination of soils polluted with heavy metals, however not all are applicable in all conditions. A study is needed to determine the best technology for contaminated soil. The economic context is to be considered in this case, to find innovative solutions to the problem of soil contamination by heavy metals.

Keywords: Sol; Heavy metals; Decontamination techniques; Phytoremediation; Bioremediation

1. Introduction

Depuis la fin du 20^{ème} siècle, des contaminations de sol avérées sont médiatisées et ce problème a été concrètement pris en considération. Au Maroc comme à l'étranger, il existe une quantité considérable de sites aux prises avec une problématique de contamination mixte, soit à la fois par des métaux et métalloïdes (As, Cd, Cu, Se, Cr, Ni, Pb, Zn, etc.) et des composés organiques.

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, le secteur industriel s'est développé sans préoccupation des rejets d'éléments toxiques dans les sols. De fait, le sol a été longtemps considéré comme une ressource renouvelable, voire même inépuisable à l'échelle des générations humaines, capable de recevoir sans conséquence les rejets de nos activités. On sait maintenant que les sols sont caractérisés par un équilibre fragile et sont vulnérables. Aujourd'hui, ce patrimoine est menacé à la fois par le lourd héritage du passé et par l'extension des surfaces consacrées au développement industriel. La prise de conscience des atteintes à l'environnement n'est que

relativement récente puisque le premier meeting international sur les sols pollués n'a eu lieu qu'en 1985 au Pays Bas. Ce fut l'occasion de reconnaître le besoin de comprendre les processus à l'origine de ces pollutions et de trouver des moyens possibles de dépollution [1].

Les composés inorganiques sont principalement composés de métaux, également appelés «éléments traces métalliques (ETM)». Les éléments chimiques qui les constituent peuvent se retrouver à l'état naturel dans l'environnement dans la roche mère [2]. L'activité humaine contribue également à augmenter leur concentration par le stockage de déchets industriels et urbains, les diverses pratiques agricoles et les retombées atmosphériques provenant des usines. D'autres composés inorganiques peuvent être recensés, à savoir les cyanures (traitements des minerais).

Ces composés ont engendré une contamination de quantités importantes des sols, pouvant même se propager aux sols environnants et contaminer les nappes phréatiques. Des quantités importantes de sols contaminés doivent aujourd'hui être nettoyées.

Le problème des sols contaminés est aujourd'hui très préoccupant pour les pays émergents. Les métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc et le mercure, etc. ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux [3]. A l'échelle microscopique, les métaux lourds ont aussi des effets néfastes sur les populations bactériennes ce qui n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de l'écosystème. Ces dernières années, le développement de techniques efficaces pour décontaminer les sites pollués est devenu indispensable. L'une de ces techniques est la phytoremédiation qui exploite les propriétés de certaines plantes à accumuler de grandes quantités de métaux lourds [4]. La phytoremédiation présente de nombreux avantages: elle est viable économiquement car on peut exploiter les végétaux produits et récupérer les métaux à haute valeur ajoutée et elle est compatible avec les politiques de préservation de l'environnement. Néanmoins cette technique comporte des limites: la croissance lente et la production faible de biomasse demandent un investissement en temps assez important et/ou en argent avec l'adjonction de chélateurs ou autres substances «*starter*» car la concentration et le type de métaux lourds influencent la phytotoxicité, et dans certains cas, la croissance des plantes peut être réduite [5].

L'étude de ces plantes résistantes par leurs capacités de détoxification, d'immobilisation ou d'absorption des métaux lourds, pourrait constituer un outil intéressant non seulement pour estimer les risques de transfert potentiel des métaux lourds au sein de l'écosystème, mais aussi comme outil de réhabilitation des sols.

2. Origine des polluants métalliques dans le sol

Les ETM sont les 68 éléments constituant la croûte terrestre, dont la concentration est inférieure à 0,1% et représentant seulement 0,06 % du total des éléments. Les éléments en traces peuvent être des métaux (Fe, Pb, Zn, Cu etc...), des métalloïdes (As, B...) ou des non métaux (P, N...) [6]. Le terme métaux lourds, du point de vue physique, regroupe les 65 éléments traces qui présentent une masse volumique supérieure à 5 g.cm⁻³ [7]. Hormis le Fe et le Mn, tous sont rares dans la croûte terrestre, et sont donc des ETM. D'un point de vue purement chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux. D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques: métaux essentiels et métaux toxiques pour les organismes végétaux et animaux. Dans les études environnementales, le terme est souvent associé au qualificatif de toxique en omettant de signaler qu'en faibles concentrations certains ETM sont des nutriments indispensables pour le vivant.

Les ETM sont naturellement présents dans les sols en faibles quantités. Ils sont en partie libérés lors de l'altération de la roche mère et constituent le pool endogène appelé fond pédogéochimique. C'est la concentration naturelle d'une substance dans un horizon de sol, résultant de l'évolution géologique et pédologique à l'exclusion de tout apport d'origine anthropique [6]. Un second pool, plus ou moins important selon la situation géographique, issu d'apports exogènes provient essentiellement de l'activité humaine: i) de façon diffuse, émis par l'activité industrielle, les moyens de transport et amené par voie atmosphérique, ou ii)

localement soit de façon ponctuelle par l'apport de déchets contaminés (pollution souvent aiguë), soit de façon répétée et cumulative par l'activité agricole [8]. Ces sources apportent une contribution variable en fonction du pays considéré.

3. Effets directs: Contact, Ingestion, Inhalation

Les xénobiotiques sont souvent très toxiques pour les mammifères en général, et l'homme en particulier. Trois types d'effets immédiats liés sont répertoriés [9,10]:

- i. Au contact avec la peau, et surtout les muqueuses; à ceci s'ajoutent, à terme, des effets carcinogènes;
- ii. Par inhalation: cette forme d'intoxication par vapeurs toxiques est souvent mortelle quand sont respirés des composés.
- iii. enfin, et surtout, à l'ingestion directe: des intoxications très sévères peuvent survenir. Enfin, un nombre limité de ces composés, ingérés à des doses très faibles, mais cumulatives, sont hautement mutagènes et, de ce fait, sont cancérigènes.

La circulation des polluants par l'intermédiaire des chaînes trophiques donne lieu à ce que l'on a appelé "l'intensification biologique" de leurs effets.

4. Les différentes méthodes physico-chimiques de dépollution

Le but de la dépollution des sols est de restituer les sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution. En outre, la ou les techniques de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la dépollution. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de transfert de pollution. La liste des critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution [11]:

- Enlever ou neutraliser les matières incriminées;
- Peser aussi peu que possible sur les ressources mises en œuvre (eau, air, énergie, capital...);
- Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants;
- Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité;
- Minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles;
- Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes.

La dépollution des sites contaminés par des sources de pollution variées est contrainte par différents facteurs, la nature de la pollution étant le premier. Toutefois, la dépollution d'un site encore en activité sera beaucoup plus contraignante que celle d'un site fermé [2]. Les traitements proposés peuvent être définis en trois grandes familles [11]:

- Les procédés «*in situ*», réalisés dans le sol en état;
- Les procédés «*on site*» ou «*sur site*», traitements sur place des sols excavés;
- Les procédés «*hors site*» ou «*off site*» ou «*ex situ*», nécessitant l'évacuation.

Ces différents procédés sont dépendants d'un facteur de temps, sachant que les traitements «*in situ*» demandent un temps plus long que ceux réalisés hors site. Enfin, le type de traitement choisi dépendra également de la nature du ou des polluants, certains d'entre eux présentant la caractéristique d'être biodégradables et d'autres non.

Ainsi trois méthodologies peuvent s'appliquer pour le traitement de polluants non biodégradables:

- Les traitements physico-chimiques;
- Les traitements thermiques;
- Les méthodes de confinement.

Ces trois méthodologies s'appliquant essentiellement pour le traitement de polluants non biodégradables, nous exposerons dans un quatrième temps les techniques liées à la bioremédiation.

4.1. Les procédés physico-chimiques

Les traitements classiques de dépollution des sols contaminés par des composés organiques sont essentiellement basés sur des méthodes physico-chimiques: la neutralisation chimique, l'incinération, l'adsorption sur charbon actif ou sur résines, la lixiviation des sols par des solvants ou encore la photo-oxydation (UV/ O₃) [12-13].

Bien qu'elles diminuent les concentrations en polluants, ces méthodes ne restaurent pas les sols et ont la plupart du temps un effet néfaste sur l'activité biologique et la fertilité des sols traités [14].

La technique physique la plus répandue actuellement consiste à injecter des fluides dans le sol afin de transférer et concentrer la pollution vers des points de récupération. Cette technique de «lavage des sols» préalablement excavés peut être réalisée à pression normale ou haute pression. L'eau est ensuite dépolluée par passage dans une station d'épuration adaptée au polluant, l'air chargé en vapeurs toxiques est filtré sur charbon actif. Cette méthode s'adresse à la plupart des polluants sur sols grenus. Elle atteint des rendements de 80 % et peut être améliorée si elle est associée à un traitement biologique ou en ajoutant des tensioactifs [15]. Pour l'extraction des métaux et des petites molécules organiques chargées, il existe des procédés électriques [16]. Le principe repose sur la circulation d'un courant électrique dans le sol par l'intermédiaire d'électrodes poreuses. Le procédé sera d'autant plus efficace que le sol aura une grande teneur en eau et un pouvoir tampon faible. Cette technique nécessite une excavation du sol et le traitement est réalisé *on-site*.

Les techniques d'ordre chimique consistent à détruire, fixer ou neutraliser les polluants par l'introduction de composés chimiquement actifs [17-19]. Toutefois ces techniques s'appliquent difficilement aux matrices solides et nécessitent de bien connaître la nature du réactif et du sol. En effet, leur utilisation non maîtrisée pourrait générer d'autres formes de pollution. A l'heure actuelle, il existe un très grand nombre de procédés chimiques qui permettent d'éliminer la majeure partie des polluants. Cependant les coûts et l'efficacité des traitements sont très différents d'un produit à un autre. L'extraction par solvant est la technologie la plus simple et donnant les meilleurs résultats. On utilise comme solvant organique des alcanes, des alcools ou des cétones qui permettent de dissoudre la plupart des polluants organiques toxiques. Le solvant est introduit sur le sol préalablement excavé. Il solubilise alors les polluants qui passent dans la phase organique. Le solvant est alors extrait.

D'autres exemples peuvent également résulter de l'adaptation de deux ou trois principes de fonctionnement permettant d'améliorer les rendements de dépollution [11].

2.3.2. Les traitements thermiques

Dans le cadre de ces techniques physiques existent aussi des traitements thermiques qui peuvent être réalisés sur le site même «on-site» ou sur des sites appropriés «hors-site» comme une usine d'incinération. Cette technique est adaptée aux sols contaminés par des composés organiques facilement oxydables et convertibles en CO₂ et H₂O. Il est nécessaire de procéder à une excavation des sols, un broyage et un tamisage avant le traitement thermique.

Il existe deux méthodes de chauffage:

- Le chauffage direct où le sol est chauffé à 1000°C directement en introduisant de l'oxygène,
- Le chauffage indirect où le sol est dans un four étanche et n'est pas en contact avec la source de chaleur. La température avoisine les 800 °C et est suffisante pour extraire les polluants par l'intermédiaire des vapeurs se dégageant [20].

Ces deux méthodes sont très efficaces mais très coûteuses en énergie. Il existe à l'heure actuelle plusieurs types de fours [11,13].

2.3.4. Les méthodes de confinement

Le confinement est plus une solution qu'une méthode de dépollution. Cette méthode permet le traitement de surfaces importantes et de polluants multiples. La pollution n'est donc pas enlevée ni supprimée. Le confinement ayant pour objectif d'en réduire les effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement [2]. Il peut s'appliquer selon trois méthodologies [11]:

- Le confinement de surface avec mise en place d'une géomembrane;
- Le confinement vertical, derrière des parois étanches en béton, matériaux rétenteurs ou mortiers plastiques;

- Le confinement horizontal profond.

3. Réhabilitation des écosystèmes métallifères par phytoremédiation et bioremédiation

3.1. Techniques de phytoremédiation

Afin de pallier les principales limitations des méthodes actuellement disponibles dans les stratégies de dépollution, les recherches s'orientent depuis quelques années vers l'utilisation de plantes supérieures. On sait en effet depuis longtemps que la présence d'un couvert végétal induit ou stimule la biodégradation d'une grande variété de contaminants organiques [21]. Par ailleurs, certaines plantes dites métallophytes sont capables de se développer normalement sur des sites fortement contaminés par divers métaux. Certains de ces végétaux, qualifiés d'hyperaccumulateurs, sont capables de stocker massivement les métaux dans leurs parties aériennes [22]. Elles peuvent être utilisées sur des substrats solides (sols pollués), liquides (eaux contaminées) ou gazeux (filtration d'air chargé en composés nocifs volatils) [23] (Figure 1). Ainsi, les études concernant l'écophysiologie et le métabolisme des plantes supérieures en milieu contaminé ont progressivement permis d'insérer le concept de phytoremédiation à côté de celui de bioremédiation des sites pollués.

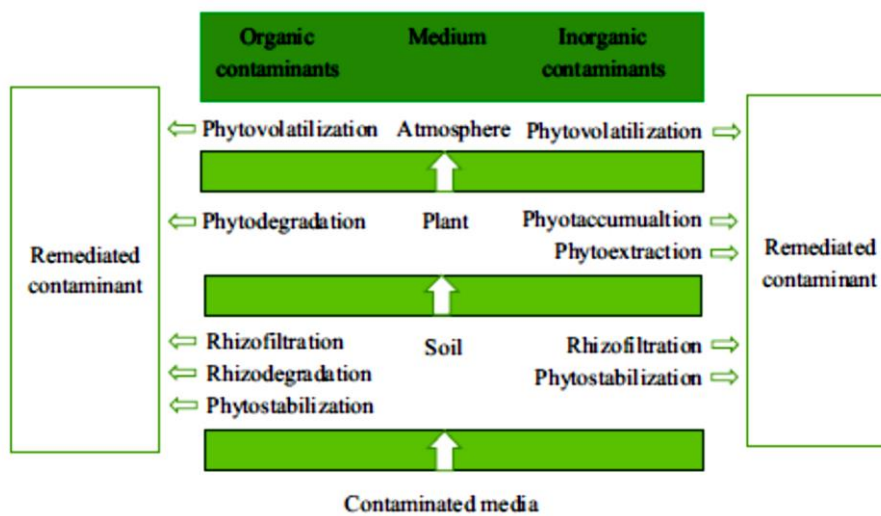


Figure 1. Les principales techniques de phytoremédiation (d'après Mahar et al. 2016 [23])

Aujourd'hui, le terme de phytoremédiation est largement accepté et regroupe toutes les méthodes basées sur l'utilisation de végétaux supérieurs dans un but de dépollution. Malgré leur développement récent, ces méthodes sont variées et des résultats encourageants ont d'ores et déjà été obtenus pour des problématiques diverses. Plus précisément, les quelques études réalisées à ce jour permettent d'envisager six types de stratégies de phytoremédiation particulièrement prometteuses [24]:

- La *phytoextraction* (*phytoaccumulation*) est basée sur l'utilisation de végétaux hyperaccumulateurs qui absorbent les métaux du sol et les accumulent dans des organes aériens faciles à récolter [25]. Cette méthode, qui se révèle efficace pour une grande variété de métaux lourds (Pb, Cd, Ni, Zn, ...), est aujourd'hui proposée par de nombreuses sociétés américaines. La possibilité de recyclage de ces métaux ("phytomining") rendrait cette technique encore plus rentable [26].
- La *phytovolatilisation* permet la transformation des polluants inorganiques en produits volatiles puis le relargage dans l'atmosphère d'éléments tels que le mercure ou le sélénium [27]. Cette approche, encore au stade expérimental, fait actuellement l'objet de recherches très actives. Les résultats dans ce domaine sont particulièrement encourageants [28].
- La *rhizofiltration* utilise les capacités élevées du système racinaire de certains végétaux pour fixer les polluants d'un milieu liquide. Cette méthode a notamment été testée en Ukraine dans le cadre de la dépollution du site de Tchernobyl (US EPA, <http://clu.in.org>).

- ♣ *La phytostabilisation* n'est pas une méthode de dépollution sensu stricto, mais elle permet de diminuer la mobilité des contaminants en limitant l'érosion éolienne, ruissellement et le lessivage du sol. Cette approche vise ainsi à limiter les risques de transfert de la pollution en dehors du sol contaminé et permet en même temps une meilleure intégration paysagère pour des sites présentant d'importants volumes impossibles à stocker en décharge, car les plantes auraient en effet une action mécanique (parties aériennes et racinaires), et chimique (complexation des métaux grâce à des substances provenant des racines) [29]. Dans ce contexte, l'utilisation d'arbres est particulièrement intéressante puisque leur système racinaire est profond et dense et l'évapotranspiration est très efficace, ce qui limite d'autant plus le lessivage et le ruissellement [30].
- ♣ *La phytodégradation / phytotransformation* c'est une méthode de Transformation par la plante et les micro-organismes associés de molécules organiques complexes en composés plus simples qui seront intégrés dans les tissus de la plante [31].
- ♣ *La phytostimulation / Rhizodégradation* exploite l'effet stimulant de la rhizosphère sur la dégradation microbiologique des composés organiques [32]. Cette démarche est notamment utilisée depuis plusieurs années par l'armée américaine dans le cadre de la dépollution de sites contaminés par des explosifs (TNT) ou par des herbicides.

Ces quelques exemples, loin d'être exhaustifs, montrent que le recours aux végétaux supérieurs dans les stratégies de dépollution est considéré avec un intérêt croissant. Cette tendance est particulièrement marquée sur le continent Nord-Américain où plusieurs brevets ont été déposés. Certains d'entre eux protègent une méthodologie spécifique et bénéficient d'une couverture internationale [33], alors que les autres ont trait à des mises au point techniques ou à l'utilisation d'espèces végétales.

Cependant, à l'heure actuelle, le principal obstacle au développement de la phytoremédiation réside dans le faible nombre d'espèces potentiellement utilisables à l'échelle industrielle. En effet la plupart des métallobytes connues sont caractérisées par un enracinement peu profond, une croissance assez lente et une faible production de biomasse, autant de critères qui limitent considérablement les taux prévisibles d'extraction. Par ailleurs, un rendement optimal nécessite que les conditions de culture (climatiques et édaphiques) sur les sites pollués correspondent aux exigences naturelles des végétaux utilisés; ce paramètre est par essence très difficile à contrôler et représente une limitation supplémentaire de la méthode. Par conséquent, il est nécessaire de poursuivre les recherches afin de sélectionner de nouvelles plantes tolérantes et/ou accumulatrices et de mieux comprendre leur comportement sur site pollué.

3.2. Défis de phytoremédiation

La phytoremédiation est une technique intéressante pour l'enlèvement des métaux lourds du sol, mais il a aussi quelques défis [23]:

- ♣ Longue période (plusieurs années) nécessaires pour la remédiation des sols.
- ♣ L'efficacité de la phytoextraction de la plupart des plantes hyper-accumulatrices des métaux est généralement limitée par la faible biomasse et le lent taux de croissance.
- ♣ L'élimination de la biomasse polluée est nécessaire à la suite de la phytoextraction.
- ♣ La capacité d'accumulation de certaines plantes peut être inefficace à cause de l'attaque des maladies dans les climats touchés des régions tropicales et subtropicales.
- ♣ Difficulté de mobiliser la fraction des ions métalliques étroitement liée au sol.
- ♣ Eviter l'introduction des espèces de plantes envahissantes comme hyper-accumulatrices qui peuvent affecter la diversité florale indigène.
- ♣ Les pratiques agronomiques et des amendements peuvent influencer négativement la mobilité des métaux.
- ♣ La phytoremédiation durable dépend principalement des conditions climatiques et météorologiques.
- ♣ La phytoremédiation est une approche applicable pour les sites avec des niveaux de pollution par les métaux faible à modéré, en raison que la croissance des plantes est non durable dans les sols fortement contaminés.
- ♣ Les métaux accumulés peuvent être transférer dans la chaîne alimentaire en cas de mauvaise manipulation de la biomasse [9].

3.3. Techniques de bioremédiation

Les techniques de bioremédiation utilisent les propriétés dépolluantes de micro-organismes (des bactéries essentiellement, mais également des champignons) endogènes ou exogènes au terrain contaminé [34] dans le but de dégrader ou transformer les contaminants à une forme moins contaminée [35]. Les micro-organismes ont besoin de nutriments et de source carbonée pour fournir l'énergie nécessaire à leur croissance et leur survie. La bioremédiation doit faire face à un environnement hétérogène dans lequel la plupart du temps, le(s) contaminant(s) est (sont) présent(s) en association avec des particules, dissous dans la solution du sol, etc. Pour cette raison, la bioremédiation se doit d'avoir une approche pluridisciplinaire prenant ainsi en compte la microbiologie, l'ingénierie, l'écologie, l'écotoxicologie, la pédologie et la chimie. La mise en œuvre de ces techniques se fait sur le site même (*in situ*). Certaines nécessitent l'excavation des terres et sont réalisés sur site (excavation des terres qui sont traitées sur le site même) ou hors site (excavation et transport des terres vers un centre de dépollution) [35]. Ces techniques peuvent être subdivisées en sept catégories selon le principe biologique ou le mode de dépollution mis en œuvre:

- ♣ *biodégradation*: Utilisation de la capacité de certains micro-organismes à transformer le polluant en substrat (source de carbone, d'énergie) [35];
- ♣ *bioimmobilisation*: Utilisation de la capacité de certains micro-organismes à immobiliser un ou plusieurs composants présents à l'état soluble (bactéries) [36];
- ♣ *biolixiviation*: Solubilisation et entraînement dans la phase aqueuse par les micro-organismes de polluants fixés ou piégés dans le sol [37];
- ♣ *bioslurry* (traitement en bioréacteur): Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau (concentration de solide entre 10 et 50 % en poids). L'eau utilisée étant de l'eau de rivière ou de l'eau souterraine, contaminée ou non et ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. En fin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place [38];
- ♣ *biorestauration*: Ajout de nutriments (azote/phosphore) pour stimuler la croissance des micro-organismes indigènes et favoriser la dégradation des polluants [39];
- ♣ *bioaugmentation*: Introduction dans le sol de micro-organismes exogènes adaptés aux polluants à traiter [40];
- ♣ *biostimulation*: Réensemencement de populations prélevées sur le site dont la croissance a été stimulée en laboratoire ou en bioréacteurs installés sur site [41].

L'intervention des microbiologistes tend à augmenter les populations de micro-organismes dégradant l'agent polluant pour en accélérer la dégradation, peut prendre deux formes :

- Le renforcement des populations autochtones aptes à dégrader l'agent polluant par apport d'éléments nutritifs et modification des conditions de milieu, afin de diminuer la durée de la phase de latence et leur permettre de dégrader plus rapidement le contaminant. Ces techniques sont regroupées sous l'expression "approche écologique microbienne".
- L'inoculation microbienne qui peut utiliser des souches:
 - sélectionnées et choisies pour leurs performances après une étude au laboratoire;
 - adaptées, c'est-à-dire extraites de ce biotope, et dont on a (toujours au laboratoire) amélioré les possibilités en matière de dépollution;
 - génétiquement modifiées;
 - incluses dans des produits commercialisés.

3.4. Techniques innovantes

Les techniques biologiques les plus innovantes développées en laboratoire et prometteuses du point de vue de leur application sur le terrain ont été identifiées. Elles concernent principalement la combinaison de procédés existants et bien connus. Elles sont au nombre de quatre:

3.4.1. *Couplage bioremédiation (rhizosphère) / phytoremédiation*

Selon Lawton et Jones (1995) [42], les racines des végétaux peuvent être considérées comme les «ingénieurs biologiques du sol». En effet, ces dernières créent et maintiennent leur propre milieu, et ceci, non seulement par leur présence physique mais aussi par leur activité. Par des processus tels que l'exsudation d'acides organiques et d'enzyme dans la rhizosphère, les racines vont pouvoir, par exemple, permettre le maintien de communautés microbiennes [43] ou l'accroissement de l'érosion des minéraux [44]. Ainsi, en dépit du faible volume de la rhizosphère dans les sols, celle-ci joue un rôle central dans le maintien du système sol-plante [45].

Parmi les micro-organismes retrouvés dans le sol, certains vivent en symbiose ou mutualisme avec les végétaux, c'est-à-dire en association à bénéfices réciproques. L'apport d'eau et de nutriments à la plante, en échange de substances carbonées et d'une protection physique aux micro-organismes peuvent définir ces échanges.

Dans ces associations, les micro-organismes peuvent être classés en deux catégories :

- les ectosymbiontes qui constituent les micro-organismes colonisant l'extérieur de la racine, c'est-à-dire, la rhizosphère ou le rhizoplane (surface des racines). Parmi ces organismes, sont retrouvés des bactéries telles que *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter* [46] et des champignons (*Trichoderma*). Les bactéries de ce type sont alors définies comme des rhizobactéries ou bactéries rhizoplane;
- les endosymbiontes qui regroupent les micro-organismes vivant à l'intérieur des cellules de la plante hôte. Le plasmalemmes peut également être transpercé, ceci étant l'œuvre de bactéries dites endophytes. Ces bactéries, appartenant principalement aux genres *Rhizobium* et *Frankia*, peuvent alors former des nodules racinaires, et ceci sur les racines des légumineuses et des ligneuses [46-47].

En raison de leurs caractéristiques rhizosphériques et endophytiques, les bactéries ont retenu l'attention au cours des dernières années pour promouvoir l'établissement des plantes dans des conditions défavorables, en favorisant les processus de phytoremédiation. Ces bactéries peuvent être isolées à partir de plantes vivant sur des sols contaminés par des métaux ou des composés organiques.

3.4.2. *Couplage bioaugmentation / phytoremédiation*

Inoculation de micro-organismes spécifiques (bio-augmentation) dans des matrices poreuses (sols, sédiments), capables : i) de dégrader des molécules organiques (des pesticides notamment) ou ii) d'augmenter le stock de métaux disponibles pour les plantes utilisées pour la phytoextraction (avec des micro-organismes producteurs de sidérophores par exemple). En conséquence, la croissance des micro-organismes inoculés est améliorée par l'approvisionnement de nutriments exsudés par les racines des plantes utilisées pour la phytoextraction.

3.4.3. *Couplage phytoextraction / valorisation énergétique de la biomasse*

En 2003, le ministère fédéral de la Recherche (BMBF) de l'Allemagne a lancé un programme visant à mettre en place un réseau interdisciplinaire sur la thématique "Energies renouvelables à partir de biomasse issue de la phytoextraction des sols contaminés". Ce programme est piloté par l'Institut CUTEC (Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Allemagne) pour une durée de deux ans. Dans le cadre de ce programme, neuf projets ont été menés qui visent à réaliser les objectifs suivants : i) la mise en place d'un réseau d'experts permettant de faire l'état des lieux de la science et de la technique dans le domaine de l'utilisation de biomasse provenant de sols décontaminés par phytoextraction, ii) l'évaluation des possibilités et des limites de ce procédé, iii) la conception de projets prioritaires. Actuellement, ce réseau se compose de 35 experts issus de divers secteurs scientifiques et industriels et qui travaillent sur des thématiques telles que:

- ♣ la récupération des métaux lourds dans les plantes;
- ♣ les différentes techniques disponibles actuellement;
- ♣ les meilleures méthodes pour l'utilisation énergétique des plantes (Ex : la combustion);
- ♣ les limites des procédés actuels et les nouvelles solutions envisageables.

3.4.4. *Système de phytoremédiation multiprocess*

Combinaison de diverses techniques de bioremédiation autour d'un système de phytoremédiation pour décontaminer les sols pollués par des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) persistants. Les techniques impliquées dans le système sont:

- ♣ le landfarming (aération);
- ♣ la bioremédiation (bactéries);
- ♣ la phytoremédiation.

3.5. D'autres techniques, déjà anciennes, évoluent peu

Les techniques biologiques de dépollution des sols commercialisées par les entreprises sont déjà anciennes et ne font plus l'objet de travaux majeurs de recherche et développement. Il s'agit de techniques de bioremédiation qui consistent soit à stimuler la population bactérienne endogène, soit à opérer dans un espace contrôlé. Elles emploient les huit procédés suivants:

- bioventing (ventilation, injection d'air et de nutriments dans le sol) : Le bioventing est une technologie prometteuse qui consiste à stimuler la biodégradation *in situ* de polluants dans les sols, en fournissant à la microflore en place l'oxygène nécessaire. L'oxygène est apporté par l'injection d'air dans la zone contaminée. Afin que cette méthode soit efficace, il est nécessaire que le milieu poreux présente une bonne teneur en éléments minéraux, et un sol colonisé par des micro-organismes adaptés à la pollution pour que la technique du bioventing soit envisageable [11];
- Traitement des sols par injection d'eau oxygénée (H_2O_2) : L'oxydation chimique consiste à injecter un oxydant dans les sols contaminés. Elle peut s'effectuer *ex situ*;
- Epanchage contrôlé (ou landfarming) : Cette technique est efficace, mais lente (il faut en général plusieurs mois de traitement). Elle présente l'avantage d'être relativement peu onéreuse. Cependant, utilisée sans précaution particulière, elle présente des effets néfastes: les composés fortement récalcitrants s'accumulent dans la zone traitée, si le dispositif n'est pas clos, les zones voisines sont contaminées par ruissellement des eaux ayant traversé la masse en traitement et le brassage régulier peut entraîner la volatilisation de composés dans l'atmosphère;
- biosparging (lavage) : consiste à stimuler la biodégradation *in situ* de polluants dans les sols, en fournissant à la microflore en place l'oxygène nécessaire au métabolisme bactérien. L'oxygène, qui est souvent l'élément limitant des actions microbiennes en aérobiose, est fourni par l'injection d'air sous pression dans la zone contaminée en zone saturée. Le principe du traitement de sol par biosparging est le même que celui du bioventing à la différence près qu'il porte sur des pollutions situées dans la zone saturée [48];
- combinaison bioventing / biosparging (ventilation / lavage);
- pump and treat (traitement du sol associé au traitement de la nappe);
- biotertre (biopile: excavation des terres avant ajout de micro-organismes adaptés au polluant, correspondant à de la bioaugmentation);
- compostage : C'est un procédé qui met en œuvre des micro-organismes aérobies et thermophiles et qui est traditionnellement utilisé pour dégrader des déchets végétaux issus de l'agriculture et les transformer en un produit moins volumineux, enrichi en éléments nutritifs et qui peut être réutilisé comme engrais. Ce procédé peut être appliqué au sol contaminé. Le sol excavé, est disposé sur un film imperméable, et traversé de drains pour permettre une ventilation forcée dans la masse. Les nutriments favorables à la microflore sont apportés sous la forme de solution par des asperseurs. La phase aqueuse, qui percole à travers l'ensemble du tas de sol, est évacuée dans sa partie la plus basse par un drain. Le sol à traiter peut également être enrichi en différents substrats organiques destinés à favoriser l'aération du sol et à promouvoir l'activité microbienne [49].
- Couplage du compost, de la chaux et du phosphate [49].

4. Remédiation animale

La remédiation animale dépend des caractéristiques de certains animaux inférieurs adsorbant et dégradant les métaux lourds, donc éliminant et inhibant leur toxicité. Les vers de terre «ingénieurs de l'écosystème»

représentent une composante majeure de la macrofaune du sol dans la plupart des écosystèmes terrestres. Les vers de terre augmentent la disponibilité des métaux lourds dans certaines situations et aider à maintenir la structure et la qualité du sol. L'introduction de vers de terre dans les sols contaminés par des métaux a été suggéré comme une aide pour les processus de phytoremédiation [50].

Les vers de terre, en stimulant les activités microbiennes, améliorent la décomposition de la matière organique, ce qui a finalement abouti à l'augmentation du teneur des acides organiques à faible et haute masse moléculaire. Ce processus a tendance à diminuer la disponibilité de certains métaux en incorporant les éléments métalliques (Cu et Pb) dans les complexes de la matière organique, et a augmenté la disponibilité du Cd et Zn en formant des chélates avec des molécules organiques solubles [51].

5. Critères de sélection des technologies applicables

Les technologies sont nombreuses et variées. Une première étape consiste donc à effectuer une revue de différentes technologies applicables, et de ne pas retenir celles qui semblent le moins convenir au cas à l'étude. Cette démarche s'est faite en mettant en place les premiers critères de sélection. Les technologies qui ont été choisies de prime abord l'ont donc été en fonction de leur domaine d'application, de leur coût et de leur efficacité technique [52]. Le coût total de la phytoremédiation (37,7 US\$/m³) était plus bas que ceux de la plupart des technologies rapportées dans la littérature [53].

5.1. La décontamination vue sous l'angle du développement durable

Le développement durable est devenu inéluctable et les approches durables plus pertinentes que jamais. Tout projet doit dorénavant être mis en œuvre en tenant compte de ce nouvel aspect. Les projets de décontamination des sols ne dérogent pas à cela. La définition la plus connue du développement durable est celle de la Commission Brundtland : «un développement qui permet de répondre aux besoins de la génération actuelle sans remettre en cause la capacité des générations futures à répondre aux leurs.» [54]

Une technologie prenant en compte le développement durable a l'avantage de considérer ses effets sur l'environnement au début du processus de traitement et d'y introduire des options pour optimiser les gains en termes de qualité sur l'environnement. Chaque phase du traitement, de la sélection de la technologie à sa mise en œuvre doit être considérée lors de son choix [55].

Cette vision de la décontamination permet d'améliorer l'empreinte écologique de la technologie choisie puisque le cycle de vie est inclus dans le processus. L'empreinte écologique d'une technologie dépend grandement du matériel utilisé, mais aussi de l'énergie consommée. De même, il inclut les libérations directes et indirectes de polluants, la consommation de produits de base, la production, la collecte et la mise à disposition de déchets éventuellement produits [56]. Le but de la décontamination est de promouvoir la qualité de l'environnement, la santé humaine et la sécurité. Pour atteindre ces buts, beaucoup de technologies sont possibles, mais il faut également minimiser leurs impacts négatifs. Par exemple, en choisissant une technologie beaucoup n'évaluent pas les impacts d'émissions de gaz de serre, les consommations de ressources minérales, ou l'utilisation d'énergie. La protection de la santé humaine et de l'environnement doit donc être présente lors de l'élaboration des critères de sélection des technologies [57]. En outre, ces critères incluront des analyses d'impacts sociaux et économiques, comme les analyses d'impacts entraînés par le bruit ou la pollution visuelle sur la communauté qui pourrait être atténuée par la considération d'opportunités pour l'emploi [56].

Les principes de la réhabilitation durable sur lesquels s'appuie l'analyse de développement durable sont ceux édictés par l'USEPA. Ce sont :

- i. L'optimisation des besoins énergétiques : la technologie ne doit pas être très énergivore; elle doit pouvoir utiliser une énergie renouvelable si cela est possible; elle doit également faire preuve d'efficacité énergétique.
- ii. La minimisation des émissions atmosphériques : la technologie ne doit pas utiliser des machines qui consomment beaucoup d'énergie fossile; elle ne doit pas non plus être la source d'émissions de beaucoup de gaz à effet de serre et de poussières.

- iii. L'optimisation des besoins en eau : la technologie ne doit pas être consommatrice de beaucoup d'eau; elle doit permettre une réutilisation de l'eau soit dans le processus de décontamination ou à d'autres fins (irrigation par exemple).
- iv. La minimisation des impacts sur les écosystèmes et les terres : la technologie ne doit pas perturber, outre mesure, les habitats naturels.
- v. L'optimisation de la consommation des matériaux et de la gestion des déchets : la technologie ne doit pas consommer beaucoup de matériaux ni ne doit générer beaucoup de déchets; le cas échéant, le recyclage doit être possible.
- vi. La participation publique : elle permet une plus grande acceptabilité sociale du projet [52,58].

Conclusion

Si l'activité minière est indispensable pour le développement économique des sociétés, elle a aussi des conséquences sur l'environnement. Cette activité minière est à la base de la production des minerais sur lesquels le développement technologique s'appuie. Cependant, les activités minières s'accompagnent inévitablement de la production de déchets riches en éléments métalliques toxiques. Le sol est le milieu récepteur d'une grande variété de déchets produits par l'activité humaine. La décontamination des sols contaminés est devenue une priorité du fait qu'elle peut engendrer des dommages à l'environnement et à la santé humaine. Plusieurs technologies de décontamination existent et peuvent être appliquées aux métaux lourds. Toutefois, il convient d'en choisir la plus opportune et celle qui convient le plus.

Remerciements

Cette étude a été soutenue financièrement par l'Organisation du Traité Atlantique Nord (OTAN), Science Programme pour la paix (Réf. Sfp.983311).

Références

1. J.W. Assink, W.J. Van den Brink. **In: J.W. Assink and W.J. Van den Brink (Eds.), The Netherlands (1986)**
2. C. Legrand, M. Solerieu, E. Goglio. **Territorial (Eds.), Voiron Cedex, France (2006)**
3. Q.R. Wang, Y.S. Cui, X.M. Liu, Y.T. Dong, P. Christie. **Journal of Environmental Science and Health, 38, 823-838 (2003)**
4. M. Mench, N. Lepp, V. Bert, J.P. Schwitzguébel, S. Gawronski, P. Schröder, J. Vangronsveld. **Journal of Soils and Sediments, 10, 1039-1070 (2010)**
5. K. Shah, J.M. Nongkynrih. **Biologia Plantarum, 51, 618-634 (2007)**
6. D. Baize. **INRA (Eds.), Paris (1997)**
7. D.C. Adriano. **2nd Springer-Verlag (Eds.), New York, Berlin, Heidelberg (2001)**
8. B.J. Alloway. **In: B.J. Alloway, 2nd London (Eds.), United Kingdom (1995)**
9. M. Nouri, A. Haddioui. **Environmental Monitoring and Assessment, 188(1)-6 (2016)**
10. M. Nouri, T. EL Rasafi, A. Haddioui. **Journal of Materials and Environmental Science (Submitted 26-05-2016)**
11. G.T. Perchet. **Institut National Polytechnique de Toulouse, Thèse (2008)**
12. S.Y. Oh, K. Chad, P.C. Chiu. **Water Science and Technology, 49, 129-136 (2004)**
13. M.W. Lim, E.V. Lau, P.E. Poh. **Marine Pollution Bulletin, (2016) in press**
14. P.K. Padmavathiamma. **Water, Air and Soil Pollution, 184, 105-126 (2007)**
15. M. Race, R. Marott, M. Fabbicino, F. Pirozzi, R. Andreozzi, L. Cortese, P. Giudicianni. **Journal of Environmental Chemical Engineering, 4, 2878-2891 (2016)**
16. M. Bahemmat, M. Farahbakhsh, M. Kianirad. **Journal of Hazardous Materials, 312, 307-318 (2016)**
17. J.C. Yoo, C. Lee, J.S. Lee, K. Baek. **Journal of Environmental Management, (2016) in press**
18. A. Venegas, A. Rigol, M. Vidal. **Geoderma, 279, 132-140 (2016)**
19. C. Tibergh, J. Kumpiene, J.P. Gustafsson, A. Marsz, I. Persson, M. Mench, D.B. Klej. **Applied Geochemistry, 67, 144-152 (2016)**
20. U. Samakhsaman, T.H. Peng, J.H. Kuo, C.H. Lu, M.Y. Wey. **Applied Thermal Engineering, 93, 131-138 (2016)**
21. R. Miller. **Technology Overview Report, GWRTAC Series (1997)**
22. R.R. Brooks. **In: R.R. Brooks (Eds.). CABI Publishing, Wallingford (1998)**

23. A. Mahar, P. Wang, A. Ali, M.K. Awasthi, A.H. Lahori, Q. Wang, R. Li, Z. Zhang. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, **126**, 111–121 (2016)
24. M.M. Lasat. **Journal of Environmental Quality**, **31**, 109-120 (2002)
25. S.P. McGrath. In: R.R. Brooks (Eds.). CABI Publishing, Wallingford (1998)
26. M. Leblanc, D. Petit, A. Deram, B.H. Robinson, R.R. Brooks. **Economic Geology**, **94**, 109 114 (1999)
27. E. Pilon-Smits. **Annual Review of Plant Biology**, **56**, 15-39 (2005)
28. S.P. Bizily, C.L. Rugh, A.O. Summers, R.B. Meagher. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, **96**, 6808-6813 (1999)
29. W.R. Berti, S.D. Cunningham. In: I. Raskin, B.D. Ensley (Eds.), John Wiley & Sons, Inc.: New York (2000)
30. J.L. Schnoor. In: I. Raskin, B.D. Ensley (Eds.), John Wiley & Sons: New York (2000)
31. C. Garbisu, I. Alkorta. **Bioresource Technology**, **77**, 229-236 (2001)
32. I. Kuiper, E.L. Lagendijk, G.V. Bloemberg, B.J.J. Lugtenberg. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, **17**, 6-15 (2004)
33. R.L. Chaney, R.S. Angle, A.J.M. Baker, Y.M. Li. **United States Patent 5711784**, (1998)
34. R. Boopathy. **International Biodeterioration and Biodegradation**, **46**, 29-36 (2000)
35. M. Vidali. **Pure and Applied Chemistry**, **73**, 1163-1172 (2001).
36. T. Barkay, J. Schaefer. **Current Opinion in Microbiology**, **4**, 318-323 (2001)
37. T. Rohwerder, T. Gehrke, K. Kinzler, W. Sand. **Applied Microbiology and Biotechnology**, **63**, 239-248 (2003)
38. M.E. Zappi, B.A. Rogers, C.L. Teeter, D. Gunnison, R. Bajpai. **Journal of Hazardous Materials**, **46**, 1-12 (1996)
39. S.R. Hutchins, G.W. Sewell, D.A. Kovacs, G.A. Smith. **Environmental Science and Technology**, **25**, 68-76 (1991)
40. G.S. Sayler, S. Ripp. **Current Opinion in Biotechnology**, **11**, 286-289 (2000)
41. C.J. Cunningham, J.C. Philip. **Land Contamination and Reclamation**, **8**, 261-269 (2000)
42. J.H. Lawton, C.G. Jones. In: C.G. Jones, J.H. Lawton (Eds.) Chapman and Hall Inc. (1995)
43. E.A. Curl, B. Truelove. **Springer-Verlag (Eds.), Heidelberg** (1986)
44. P. Hinsinger, B. Jaillard, J.E. Dufey. **Soil Science Society of America Journal**, **56**, 977-982 (1992)
45. G.R. Gobran, S. Clegg, F. Courchesne. **Biogeochemistry**, **42**, 107-120 (1998)
46. E.J. Gray, D.L. Smith. **Soil Biology and Biochemistry**, **37**, 395-412 (2005)
47. B. Lugtenberg, F. Kamilova. **Annual Review of Microbiology**, **63**, 541-556 (2009)
48. ADEM (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) (2008)
https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=12&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiVvej_gIfNAhWQmhOKHRLXDcQ4ChAWCB0wAQ&url=http%3A%2F%2Fdecouverte.entmip.fr%2FlectureFichiergw.do%3FID_FICHIER%3D1243924156280&usg=AFQjCNEvraC9CwzE9YoBXOWi8WEoeGxfg&bvm=bv.123325700,d.d24 (Page consultée: 1-06-2016)
49. M. Chen, P. Xu, G. Zeng, C. Yang, D. Huang, J. Zhang. **Biotechnology Advances**, (2015) in press
50. A. Lemtiri, A. Liénard, T. Alabi, Y. Brostaux, D. Cluzeau, F. Francis, G. Colinet. **Applied Soil Ecology**, (2015) in press
51. C. Zhang, P. Mora, J. Dai, X. Chen, S.G. Miller, N.R. Camacho, E. Velasquez, P. Lavelle. **Applied Soil Ecology**, (2015) in press
52. O.B.K. Ndiaye. **Université de Sherbrooke, Québec, Canada. Thèse** (2010)
53. X. Wan, M. Lei, T. Chen. **Science of the Total Environment**, **796–802** (2016)
54. Wikisource (2009)
http://fr.wikisource.org/wiki/Notre_avenir_à_tous_-_Rapport_Brundtland/Chapitre_2 (Page consultée le 31-05-2016)
55. A.D. Dellens. (2007). <http://www.cluin.org/download/studentpapers/Green-Remediation-Renewables-A-Dellens.pdf> (Page consultée: 31-05-2016)
56. M. Taysser (2009). http://www.dtsc.ca.gov/OMF/Grn_Remediation.cfm (Page consultée le 31-05-2016)
57. T. O'Neill (2010). http://www.itrcweb.org/teampublic_GSR.asp (Page consultée le 31-05-2016)
58. USEPA. (2008). www.cluin.info/download/remed/Green-Remediation-Primer.pdf (Page consultée le 31-05-2016)

(2016); <http://revues.imist.ma/?journal=mjpas&page=index>