

Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation

Nadia Origo, Stanislas Wicherek and Micheline Hotyat

Volume 12, Number 2, September 2012

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/1022549ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Origo, N., Wicherek, S. & Hotyat, M. (2012). Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation. *VertigO*, 12(2).

Article abstract

Phytoremediation counts among the innovating methods of depollution increasingly used on grounds in complex conditions of environment and according to the nature of the pollutants to be treated. Phytoremediation belongs to the family of the treatments known as biological, applied on polluted ground. Their use went up in the middle of the Eighties, but their generalization occurred only in the Nineties. Initially in full expansion in North America (USA and Canada), phytoremediation was only ten years ago very slightly employed in France and Europe. From now, it is experiencing a remarkable dash in France and in the rest of Europe. That is probably because phytoremediation offers a real alternative, from financial as well as ecological and landscaping point of view for the rehabilitation of contaminated grounds, in front of traditional techniques of depollution such as excavation, landfarming or incineration. Even if American and Canadian experiments are very advanced in this field, one notes in France a team work which implies public as well as private actors. From universities to the research centers, including Research Development within some companies, French research on bio-depollution augurs well. Examples like the experimental farm of Auby or the Total company site of Vendin-Le-Vieil in the region of Pas-de-Calais and Gabon in central Africa testify. Even if this technique presents limits particularly at the levels of the treatments duration and contaminated residues (ashes) revalorization, it remains nevertheless cheaper and reliable. It also fits in durability, insofar as the reconversion of a polluted site into park generates on one hand a green landscape and on the other hand a natural system of grounds depollution.



Nadia Origo, Stanislas Wicherek et Micheline Hotyat

Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation

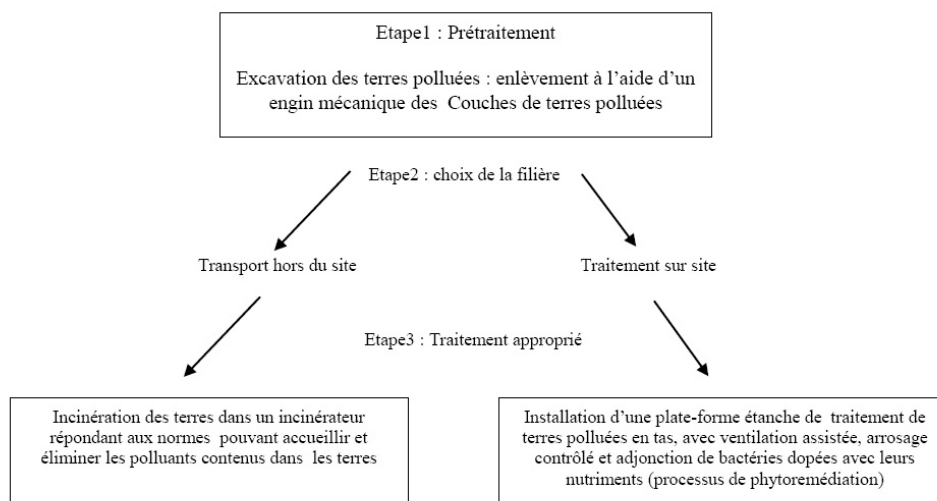
- 1 La phytoremédiation est une biotechnique végétale basée sur la capacité des plantes à extraire ou à bloquer les polluants, tant en milieux poreux, que liquide ou gazeux. Cette technique ne s'est réellement développée que depuis une dizaine d'années et les véritables enjeux commerciaux ne sont apparus qu'au début des années 2000. Contrairement aux États-Unis et au Canada, la phytoremédiation se développe moins rapidement en France et en Europe en général. En effet, en France, le marché des traitements biologiques ne représente qu'un chiffre d'affaires d'environ 80 millions d'euros en 2005, nettement moins qu'au Canada où l'on estime qu'il a connu une croissance moyenne oscillant entre 5 et 15 % par an depuis 2000 pour atteindre les 500 millions de dollars en 2005 (ARTEB, 2006). En Afrique, au Gabon notamment, les cas de recours à la phytoremédiation pour le traitement de sites pollués sont très marginaux.
- 2 La technique présente plusieurs avantages d'ordres financiers et sociaux, ou en matière d'aménagement du territoire. Dans un premier temps, la dépollution par phytoremédiation coûte moins cher que celle ayant recours aux techniques classiques et traditionnelles telles que l'incinération ou le lessivage des sols (Verdin, 2004). Les coûts seraient de 100 à 10 000 fois moins élevés. Ainsi les techniques traditionnelles coûteraient en moyenne entre 50 \$ et 500 \$ par tonne de terre traitée, certaines pouvant même excéder les 1000 \$ (Cunningham et Ow, 1996). Aux États-Unis par exemple, la commission de l'énergie atomique estime que le coût de dépollution par phytoremédiation pour un demi-hectare de terre contaminée au plomb sur une profondeur de 50 centimètres, se situe entre 60 000 \$, soit 43 400 € environ, et 100 000 \$, tandis que l'excavation et le *landfilling* du même volume s'évalueraient entre 400 000 \$ et 700 000 \$.
- 3 Dans un second temps, l'intérêt paysager de la phytoremédiation relève de la facilité de son intégration dans l'environnement et de son impact social. Sur ce dernier point, on peut citer la démonstration de Westphal et Isebrands (2001) qui envisagent la phytoremédiation en tant qu'outil social. Selon eux, la phytoremédiation permet un aménagement paysager qui aurait un impact positif sur le comportement humain. Ainsi, ils défendent l'idée selon laquelle un paysage vert peut avoir des effets positifs sur l'homme en diminuant son niveau de stress et de violence et permettrait aussi de resserrer les liens entre habitants d'un même quartier. La phytoremédiation en tant qu'aménagement paysager aurait donc des atouts psychologiques et sociaux.
- 4 En plus de l'aspect paysager, la phytoremédiation est une technique dite passive du fait qu'elle ne demande pas d'apport énergétique si ce n'est celui du soleil. Elle permet aussi le traitement d'une grande diversité de polluants (métaux, pétrole brut, Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques, solvants, explosifs, lixiviats de remblai, produits phytosanitaires, etc.). En un mot, elle est en adéquation avec les engagements du développement durable, c'est-à-dire le respect de l'environnement, assurant le traitement durable des sols pollués. La phytoremédiation permet donc une occupation non négligeable des terrains (espace vert), tout en dépolluant les terres contaminées à des coûts moindres. On parle alors de *phytomanagement* défini par Dubourguier et al. (2001), comme étant l'ensemble des méthodes qui permettent la gestion de sites et/ou de sols industriels fortement anthropisés grâce à l'utilisation de végétaux dans une perspective de développement durable.
- 5 Ainsi, malgré son développement relativement lent en France et quasi inexistant au Gabon, la phytoremédiation possède de nombreux atouts aussi bien financiers qu'environnementaux qui pourraient être profitables à la réhabilitation des sites et sols pollués dans ces deux pays. En résumé, ces atouts s'articulent pour les uns autour des coûts de dépollution, pour les autres sur l'aspect paysager de la technique. Nous allons analyser l'usage de la phytoremédiation à partir des expérimentations menées sur les sites industriels de la multinationale Total, en

France à Vendin-Le-Veil (Nord-Pas-de-Calais), et au Gabon sur les bourbiers de Torchage de l'Ile Mandji (Ouest du Gabon).

Des techniques traditionnelles de dépollution à la phytoremédiation

- 6 Nous assistons depuis deux décennies à l'évolution des techniques de dépollution avec le passage progressif des techniques dites traditionnelles aux techniques de biodégradation. Il s'agit de deux types de traitements appliqués aux sites et sols pollués qui cohabitent de plus en plus et dont l'usage est fortement corrélé aux caractéristiques des sites à traiter telles que la durée d'exploitation, le niveau de pollution, l'impact environnemental, les capacités financières du responsable et l'usage auquel on destine le site après traitement. Car ces paramètres induisent le processus de réhabilitation et fixent les objectifs à atteindre.
- 7 Le processus défini mettra l'accent sur les techniques traditionnelles ou sur les techniques de bio-dépollution, et leur usage exclusif ou combiné. On regroupe sous l'appellation « techniques traditionnelles » tous les procédés physico-chimiques et mécaniques utilisés pour la dépollution des sites (Figure 1). Il s'agit entre autres de
- L'excavation, technique qui consiste à extraire les terres du sol avant de les traiter. Le traitement se fait soit par incinération des terres, soit par voie biologique sur une plate forme, selon le schéma ci-dessous.
 - Le confinement (des terres polluées) qui consiste à mettre en place une cloison étanche souterraine, afin d'empêcher la migration des polluants vers la nappe phréatique.
 - Le lavage (des sols contaminés) quant à lui stimule la circulation dans le sol d'agents actifs additionnés à l'eau, afin de libérer et entraîner les produits organiques, qui sont ensuite séparés par décantation au niveau du sol. On parle alors de « lavage in situ ».

Figure 1. Schéma type du processus de traitement des terres polluées après excavation



- 8 Le processus de traitement des terres polluées par les techniques traditionnelles de traitement met en évidence leur complexité. Complexité des procédés qui, associée à la complexité des pollutions elles-mêmes, conduit au déploiement de moyens logistiques importants pour le transport des terres ou leur traitement sur place, pour des coûts souvent élevés. À cette complexité s'ajoutent les exigences environnementales des sites et sols pollués, surtout en zones périurbaines et urbaines, où la pression foncière est d'autant plus forte que les acteurs locaux exigent non seulement l'assainissement des milieux contaminés, mais aussi une reconversion durable et pérenne. Ainsi, pour faire face aux coûts de dépollution élevés, répondre aux exigences sociales et éviter le gel des terrains contaminés, les professionnels présents sur le marché des traitements s'orientent de plus en plus vers des techniques moins lourdes et moins coûteuses telles que la phytoremédiation.

- 9 Cette technique aux atouts prometteurs, comme la majorité des techniques dites de bioremédiation, est employée pour le traitement de pollutions organiques, telles que les dioxines et furannes, les Polychlorobiphényles (PCB), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) ou les pesticides. La phytoremédiation de molécules organiques repose sur le principe de biodégradation par l'action combinée des racines des végétaux et des microorganismes, mais elle peut aussi s'appliquer à certains polluants inorganiques tels que les métaux ou les radioéléments (ARTEB, 2006). Parmi les métaux souvent présents dans le sol, nous pouvons citer : le cadmium, le manganèse, le cobalt, le chrome, le cuivre, le plomb, le mercure, le nickel ou le zinc. En ce qui concerne les radioéléments, il s'agit de l'uranium, de l'iode 131, du césium 137 ou du plutonium 239 (Wicherek, 2000).
- 10 La phytoremédiation est un terme général qui désigne plus spécifiquement divers procédés dits de bio-dépollution (Bert et Deram, 1999 ; ARTEB, 2006) tels que la phytoextraction, la rhizofiltration, la phytostabilisation, la phytodégradation, la rhizodégradation et la phytovolatilisation. L'atout principal de ces différents procédés est qu'ils permettent une transformation agréable du paysage avec l'installation d'un couvert végétal (reverdissement, floraison) tout en dépolluant les sols. Toutefois, leur application et leur efficacité dépendent fortement des caractéristiques du milieu et des espèces végétales utilisées. En effet, tous les procédés ne peuvent être utilisés partout ; les espèces doivent être compatibles avec le milieu à dépolluer. De bonnes conditions climatiques et édaphiques doivent être réunies pour que le traitement soit le plus efficace possible. Ainsi, les expériences réalisées en milieu tempéré sont difficilement transposables en milieu tropical, sans qu'un biotope compatible ait été recréé au préalable. Surtout lorsque cette transposition doit se faire sur des espaces pollués vastes ou hétérogènes. Ainsi les procédés de phytoremédiation appliqués sur le site de Vendin-Le-Vieil ne peuvent être purement et simplement transposés sur les borbiers de torchage de l'Ile Mandji, bien que quelques similitudes demeurent dans la démarche. Par ailleurs, en matière de compatibilité du milieu, les sols profondément contaminés et sur de grandes surfaces, comme à Vendin-Le-Vieil (2 à 4 m de profondeur sur 32 hectares), nécessitent des végétaux à enracinement profond, sachant que celui de la plupart des herbacées va de 0,50 m à 1 m, et celui de la grande majorité des arbres et arbustes va de 2 à 10 m. Un autre paramètre important à intégrer dans la compatibilité du milieu est la durée de vie d'une plante qui dépend directement ou indirectement du climat et du milieu dans lequel évolue la plante. Il est donc nécessaire de mener au préalable des études sur les caractéristiques du milieu et de la plante afin d'obtenir la meilleure adaptabilité possible. Sur l'Ile Mandji, nous sommes en présence d'un terrain sablonneux avec une forte densité de zones marécageuses et une nappe phréatique qui affleure (1 m du sol). Envisager une dépollution par phytoremédiation en utilisant une espèce végétale aquatique adaptée aux zones humides serait plus indiqué.
- 11 L'intérêt de la phytoremédiation en général, réside dans le fait que les plantes permettent de stabiliser les polluants, tout en servant de support pour recréer un nouvel écosystème et servir ainsi de réservoir de biodiversité sur un site dévalorisé par la pollution. La technique de phytoremédiation qui semble le plus intéresser les acteurs du secteur de la dépollution en France est la Phytostabilisation. Elle offre des avantages environnementaux non négligeables du fait qu'elle ne concentre pas les polluants dans la plante (Phytoextraction) et ne les transfère pas dans l'atmosphère (phytovolatilisation) (Ineris, 2010). D'autres pistes, notamment la production de la biomasse, sont actuellement soutenues par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie).
- 12 Même si la phytoremédiation coûte 50, voire 100 fois moins cher que les techniques traditionnelles, elle ne semble pas susciter l'adhésion massive des acteurs français du secteur, l'une des explications évoquées consisterait à dire que les « *industriels n'ont pas forcément envie de vendre des techniques qui rapportent moins* » (Valérie Bert, in La gazette, 2009).

Quelques expériences françaises et gabonaises en matière de phytoremédiation

- 13 L'expérience française en matière de phytoremédiation reste essentiellement expérimentale, aussi bien les recherches en laboratoire que les applications sur le terrain. Quelques

laboratoires, en majorité rattachés aux universités, travaillent sur le sujet et les applications sur le terrain ne concernent que quelques polluants, pour la plupart des métaux lourds. Il s'agit entre autres du *Laboratoire Sol et Environnement* de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de Nancy, qui développe des recherches dont l'objectif est d'identifier des végétaux adaptés à la phytoremédiation et de décrire leur fonctionnement. D'autres structures comme le Laboratoire d'Ecologie Microbienne de l'Université de Lyon, le Laboratoire de Chimie de Coordination du CNRS et de l'Université de Toulouse, l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) de Bordeaux, l'Institut Supérieur d'Agriculture (ISA) de Lille, l'École des Mines de Douai, la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche Environnementale (DRIRE) du Nord-Pas-de-Calais (dont les activités sont reprises depuis 2010 par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – DREAL) et le Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de l'Université de Grenoble, développent aussi des projets de phytoremédiation en laboratoire et sur le terrain dans des parcelles expérimentales. L'ISA de Lille s'investit plus spécifiquement dans la phytostabilisation des sols, et l'Université de Montpellier 2 dans la phytoremédiation pour la production de molécules à destination de l'industrie pharmaceutique.

- 14 Les autres acteurs, tels que le Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués (CNRSSP) dans la région du Nord-Pas-De-Calais, participent aussi activement au développement de la technique. En effet, le CNRSSP et d'autres acteurs régionaux articulent leurs recherches et expérimentations sur la phytostabilisation de sédiments de curage. La région Nord-Pas-De-Calais est à la pointe par rapport à d'autres régions françaises grâce aux efforts conjugués des acteurs publics et privés pour des recherches en matière de phytoremédiation. C'est ainsi que des entreprises spécialisées dans la dépollution, comme Apinor, développent un secteur Recherche et Développement en phytoremédiation et la Région soutient aussi à travers le Programme de Recherche Concertée (PRC) des projets liés à la phytoremédiation. Des associations comme Environnement et Développement Alternatif (EDA) expérimentent sur le site d'Auby dans le département du Pas-de-Calais la dépollution par phytoextraction. Cette ferme expérimentale créée à l'initiative de l'association est consacrée à la dépollution des sols sur le périmètre du Projet d'Intérêt Général (PIG) de Métaleurop. Elle est financée à 50 % par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et la Région et à 50 % par les fonds du programme d'initiative communautaire INTEREG, instrument de la politique régionale qui finance les projets. La ferme expérimentale permet aux chercheurs nationaux et régionaux de réaliser des expériences de dépollution, accueille des étudiants et constitue une véritable banque de données sur la pollution des sols.
- 15 Par ailleurs, d'autres acteurs privés tels que des entreprises développent en interne des méthodologies de dépollution par la phytoremédiation, à l'exemple des multinationales Veolia et Total. Veolia par sa filiale GRS VALTECH expérimente en partenariat avec le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) un procédé de phytoremédiation sur les sols pollués par des épandages de boues. Cette technique est déjà utilisée en France pour la végétalisation des pistes de ski (Hassid et al., 2007). Le groupe Total quant à lui, expérimente depuis six ans un traitement par phytoremédiation sur son site de Vendin-Le-Veil dans le département du Pas-De-Calais. Cette expérimentation fait suite aux résultats prometteurs des analyses réalisées par le « Groupement de Recherche de Lacq » (GRL) Total-ARKEMA situé à Lacq dans le département des Pyrénées Atlantiques.
- 16 Contrairement aux avancées significatives et concertées enregistrées en France, aucune politique n'est mise en place au Gabon pour développer l'usage de la phytoremédiation dans le traitement des sites pollués. Cette technique reste essentiellement expérimentale et n'est utilisée que par des acteurs privés tels que Total Gabon pour la réhabilitation de ses sites pollués. Aucun programme universitaire ou coordonné par un organisme public n'existe. Les expérimentations isolées, notamment celle sur les bourbiers de torchage de l'Île Mandji, prouvent que cette technique est prometteuse. L'Île Mandji, berceau de l'activité pétrolière au Gabon, enregistre un nombre croissant de sites pollués accompagnant la baisse

de l'activité pétrolière. On note alors une timide mutation économique avec une reconversion vers les activités artisanales (pêche essentiellement) et agricoles (surtout maraîchères). Cette mutation économique, couplée à la proximité entre habitat humain et sites pollués, nécessite le développement d'une politique de dépollution qui allie respect de l'environnement, chaîne alimentaire et santé des populations. À ce titre, la phytoremédiation apparaît comme la technique appropriée pour accompagner les industriels dans leurs efforts de dépollution et de reconversion des sites. Une dépollution qui vise dans la mesure du possible à atteindre l'état initial des sites afin de favoriser l'implantation et le développement de l'agriculture périurbaine dans l'Île Mandji.

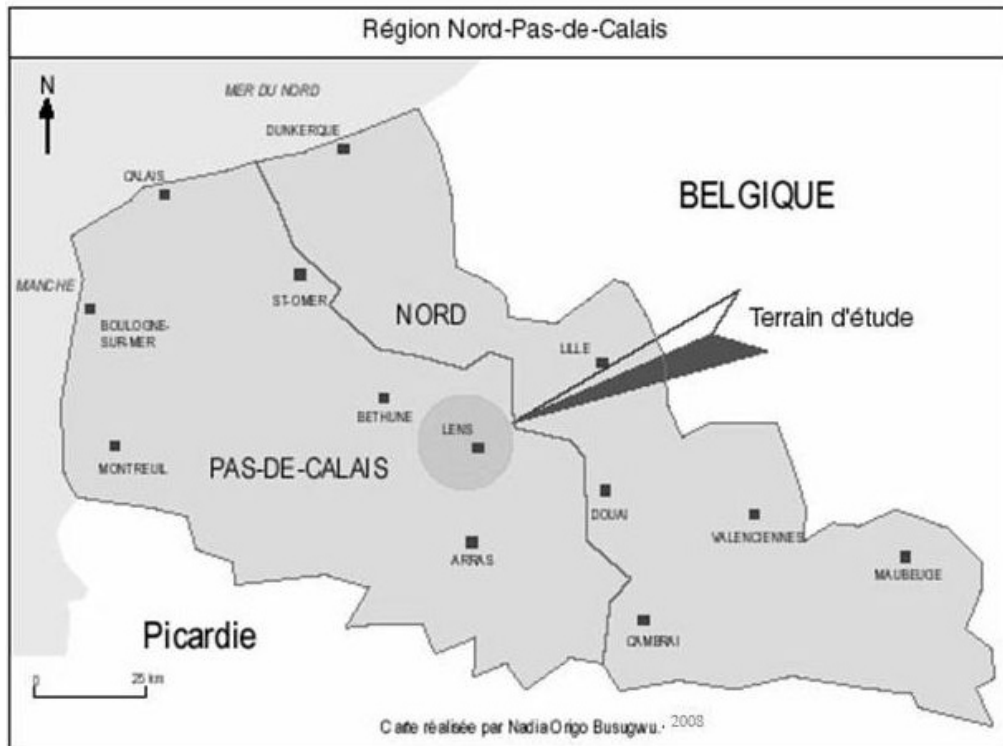
Efficacité du traitement et revalorisation des sites de Vendin-Le-Vieil et de L'Île Mandji

- 17 La technique de phytoremédiation telle qu'elle a été appliquée sur ces sites aussi bien en matière de traitement, que de valorisation des végétaux utilisés, mais aussi ses atouts économiques et environnementaux, conduisent à la qualifier de méthodologie de dépollution mixte. D'une part, pour accélérer la décontamination des terres tout en gardant des coûts relativement bas, on a eu recours aux techniques traditionnelles. D'autre part, pour réduire la quantité des polluants contenus à terme dans les végétaux, tout en favorisant un aménagement paysager (socialement acceptable), on a eu recours à la phytoremédiation. L'aménagement paysager est d'autant plus bénéfique qu'aucun usage immédiat n'avait été fixé sur le site de Vendin-Le-Vieil ni sur certains bourbiers de torchage. Ces terrains d'étude renferment, surtout pour le cas du Gabon, des potentialités en matière d'aménagement périurbain et agricole.
- 18 La mixité des procédés a été réalisée en deux temps. Premièrement par l'utilisation de la méthode dite classique et traditionnelle décrite précédemment. Deuxièmement par le recours à la biodégradation assistée complétée par une phytoremédiation utilisant dans le premier cas des feuillus, en particulier le Saule et l'Acacia, et dans le deuxième cas des herbacés (jacinthe d'eau, nénuphars, herbes sauvages) et des cultures maraîchères (petits légumes).

À Vendin-Le-Vieil

- 19 La réhabilitation du site Total de Vendin-Le-Vieil (Figure 2) dans le département du Pas-De-Calais (région Nord-Pas-de-Calais) en France est un exemple prometteur d'une méthodologie de dépollution mixte efficace (Origo, 2004).

Figure 2. Localisation du terrain d'étude



- 20 Le propriétaire du site a opté pour une réhabilitation mixte par l'utilisation des plantes associée à des techniques de biodégradation. Sur cette ancienne plate-forme industrielle de 32 hectares qui a été exploitée pendant 74 ans et qui a vu se succéder plusieurs ateliers de distillation de goudrons et de houille ou de fabrication de produits dérivés (brai pour électrodes, naphthalène, anthracène, liants routiers, huiles carbochimiques...), l'entreprise a déployé un dispositif important pour remettre en état le site qui peut être considéré aujourd'hui comme une référence au niveau du groupe Total.
- 21 Les études de risques réalisées sur ce site ont permis de mettre en évidence le type et les sources de pollution, les cibles éventuelles (faune, flore, sol, eaux et population), mais aussi de fixer des objectifs de dépollution. Les opérations de reconnaissance du type et du degré de pollution ont révélé d'une part une contamination du sous-sol par du brai et des H.A.P et d'autre part une contamination des eaux souterraines par du phénol, des H.A.P, des hydrocarbures totaux et des aromatiques, tous polluants susceptibles d'être traités par phytoremédiation. Les objectifs de dépollution fixés par l'exploitant dès 1998 prévoyaient alors de procéder premièrement à la suppression de l'impact du site sur le milieu extérieur par rabattement et traitement des eaux souterraines, deuxièmement à l'élimination de la source de pollution la plus facilement accessible par traitement des sols contaminés sur une épaisseur limitée (2 à 4 mètres) de façon à supprimer une migration de la contamination en profondeur, et troisièmement à la réhabilitation des zones d'infiltration et de contamination en profondeur au niveau du toit de la craie.
- 22 Les travaux réalisés depuis 2003, ainsi que les différentes méthodes de traitement retenues, visent à respecter les objectifs fixés en 1998. Ces derniers consistaient d'abord à quadriller des zones de traitement et à décaisser des terres polluées. Ces terres ont ensuite permis de mettre en place des andins (espèces de buttes allongées composées d'un mélange de terres polluées et de débris végétaux secs) (Figure 3). Composé à 70 % de terres polluées et à 30 % d'agents structurants, essentiellement du bois et des morceaux d'arbres séchés, mais aussi de compost de déchets verts (acides humiques qui constituent des intermédiaires de biodégradation des H.A.P), ce mélange accélère la biodégradation des H.A.P. Les andins sont disposés les uns à côté des autres et posés sur une membrane qui empêche les infiltrations des polluants dans le sol pour freiner le risque de pollution de la nappe phréatique.

Figure 3. Retournement d'un andin vue de face (Site Total, Vendin-LeVieil, Nord-Pas-de-Calais)



Deux buttes allongées
composées de terres et
débris végétaux

Source : A. Perez, 2004

- 23 L'objectif de cette méthode est d'accélérer le processus de biodégradation des hydrocarbures, même si le dispositif mis en place ne suffira pas pour dégrader biologiquement tous les H.A.P. En effet, seuls les H.A.P à deux ou trois cycles le seront. Ensuite, la terre des andins est remise en place sur une partie du site déjà excavée et traitée pour accueillir la végétation (Saules) (Figure 4). L'objectif est de favoriser la dégradation, lente, mais efficace, par absorption des H.A.P les plus lourds. L'environnement microbologique (champignons) associé au système racinaire des saules favoriserait cette dégradation.

Figure 4. Évolution de la plantation de saules sur le site de Vendin-Le-Vieil (Site Total, Vendin-LeVieil, Nord-Pas-de-Calais)



1. mise en terre des plants



2. Jeunes pousses



3. Jeunes arbustes

Source : A. Perez, 2004

- 24 Il faut noter à ce sujet que des essais ont été réalisés en laboratoire sur la biodégradation des H.A.P. par des champignons, donnant des résultats positifs pour certaines espèces. C'est donc sur ces résultats que se sont appuyés les chercheurs du Groupement de Recherche Lacq pour les expérimentations sur le site de Vendin-Le-Vieil.
- 25 Il ressort de cette expérimentation que la phytoremédiation présente trois principaux avantages environnementaux : la neutralité du traitement (utilisation de végétaux), son efficacité lorsqu'il est associé en amont à d'autres techniques de dépollution (traditionnelles ou de bio-dépollution) et son caractère agréable (permet une occupation « verte » du terrain). Ce dernier aspect est un sujet majeur qui alimente les débats entre les acteurs locaux et les exploitants. Le redéploiement du site Total de Vendin-Le-Vieil en est l'exemple. Il suscitait déjà en 2005 des interrogations au sein du conseil municipal pour qui l'aménagement d'une nouvelle zone d'activité industrielle sur ce site présentait une incompatibilité manifeste avec le projet de renouvellement du quartier que prévoyait la municipalité qui souhaitait une reconversion complète du quartier de la Fosse 8 (quartier dans lequel se situe le site). Ce projet écartait toute réindustrialisation du quartier, resté longtemps industriel avec l'exploitation des mines et la distillation du goudron. Les locaux et habitations appartenant à l'ancienne usine avaient été vendus et rénovés pour donner un nouveau visage au quartier. Le Plan Local d'Urbanisme,

prévoyait que le secteur se redéploie en zone d'habitation et la municipalité envisageait de classer l'ancien site industriel en Zone verte. Ce classement cadre parfaitement avec la dépollution par phytoremédiation, du moins jusqu'en 2012 (date prévue pour la fin des travaux de réhabilitation).

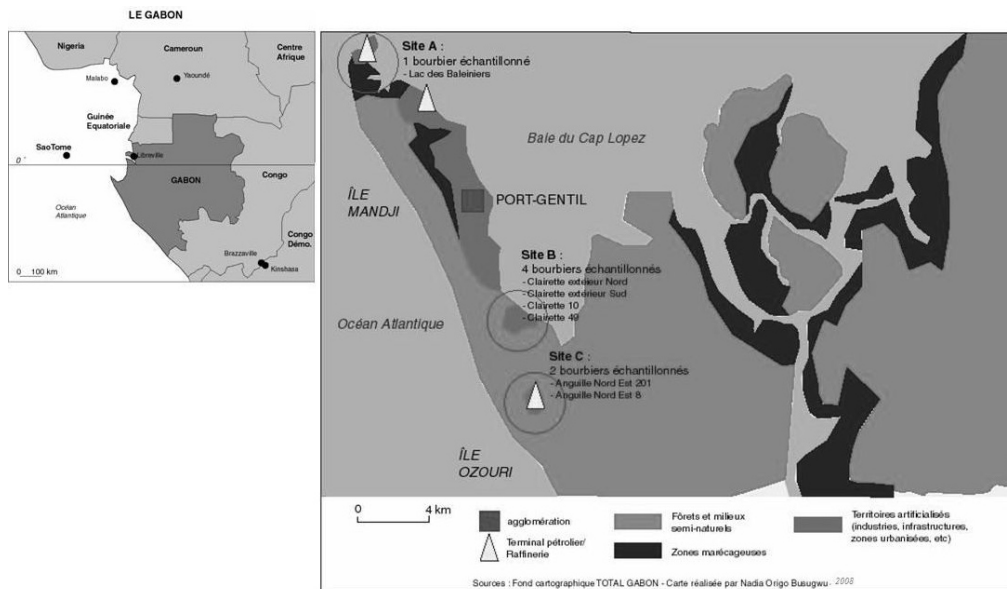
26 Pour faire face aux coûts de dépollution de plus en plus élevés, répondre aux exigences réglementaires et sociales et éviter le gel des terrains contaminés, les travaux de dépollution réalisés sur le site de Vendin-Le-Vieil ont été évalués à 9 millions d'Euros incluant les travaux de reconnaissance, les études de terrains, le désamiantage et le démantèlement des infrastructures entre 1996 et 2002. Les prévisions budgétaires réalisées en 2002, pour la période 2003 à 2012, étaient quant à elles de l'ordre de 17 850 k€ (Atofina, 2002). Cette estimation globale ne présente aucune distinction entre les coûts liés à la phytoremédiation et ceux des autres techniques utilisées sur le site. Toutefois, le facteur financier a fortement influencé l'orientation prise.

27 En substance, la Zone verte représenterait un espace neutre, une sorte de compromis qui empêcherait un redéploiement de l'industrie. Elle serait à la fois un moyen de poursuivre la dépollution du site par la phytoremédiation, une utilisation non négligeable du terrain (un petit poumon vert) et éviterait une exposition directe des populations riveraines. Ici, la réutilisation des terrains pour l'agriculture périurbaine n'est pas envisagée à moyen terme, même si à terme un usage vert est retenu.

Dans l'Île Mandji

28 La technique du torchage dans l'industrie pétrolière est utilisée pendant les essais et l'exploitation des puits pétroliers pour l'élimination des gaz inflammables inutilisables ou peu rentables, mais aussi pour dépressuriser le matériel de traitement des gaz pendant les activités ordinaires d'entretien et en cas d'urgence. Les bourbiers de torchage sont donc des bassins d'évacuation dans lesquels le pétrole brut inutilisable est stocké lors des opérations de curage des cuves de stockage des terminaux pétroliers ou des pipe-lines, avant d'être brûlé. Cette technique a été utilisée systématiquement pendant des décennies (1956-1995) sur toutes les zones d'exploitation pétrolière.

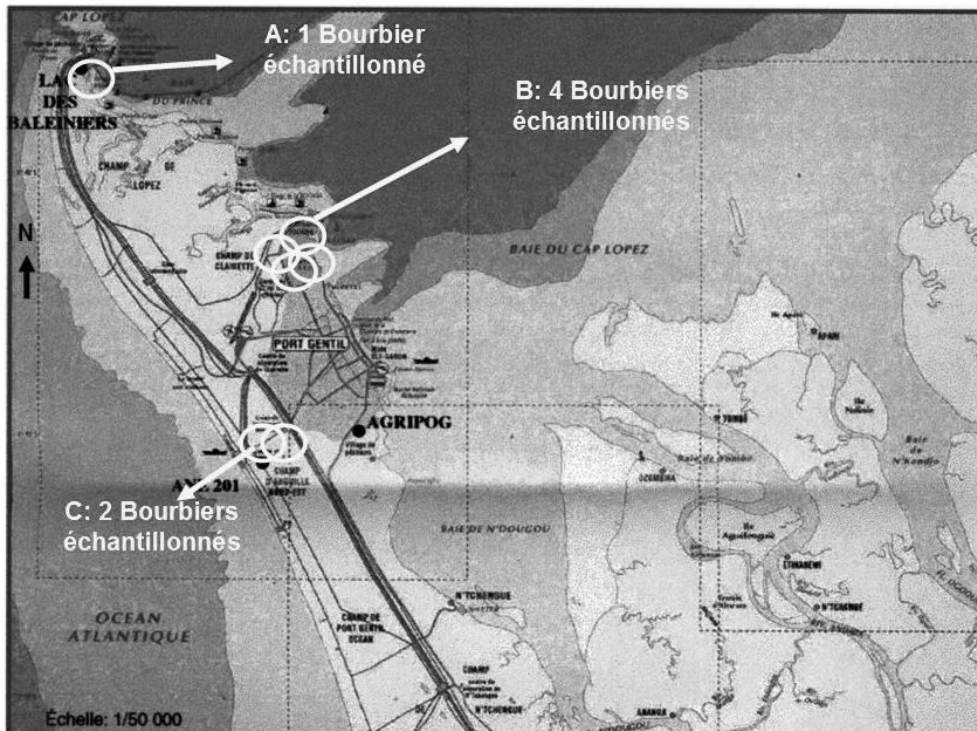
Figure 5. Presqu'île Mandji (Gabon)



29 La réhabilitation des bourbiers de torchage de l'île Mandji (Origo, 2007, figure 6) a été amorcée en 1995 par Total, principal opérateur du secteur pétrolier dans le pays. Malgré sa volonté de traiter ses terrains contaminés, l'occupation anarchique des terres par les populations qui se rapprochent de plus en plus des bourbiers, avec tous les inconvénients que ces sites présentent, rend l'opération difficile. Ces espaces à risques, jouxtant la ville, sont très convoités, aussi devons-nous d'autant plus nous interroger sur l'efficacité des techniques de traitement utilisées et plus singulièrement sur l'usage de la phytoremédiation.

Plusieurs bourbiers ont été inscrits dans un programme pluriannuel de réhabilitation. L'étude de traçabilité avait pour objectif de fournir les préconisations les mieux adaptées pour la réhabilitation de l'ensemble des bourbiers de la filiale dans l'île. Sept sites avaient été choisis pour faire un point sur l'efficacité de l'ensemble des techniques de dépollution appliquées. Le suivi réalisé portait essentiellement sur la végétation et le sol. Il s'agissait de vérifier le niveau de revégétalisation du site et les taux d'hydrocarbures dans le sol. Les sept bourbiers échantillonnés en 2000 étaient situés dans le nord de l'île (Figure 6).

Figure 6. Plan d'échantillonnage des bourbiers de torchage étudiés



Source : Fond cartographie Total Gabon, 2000, modifié par Origo (2008).

Légende : A : Lacs des baleiniers, B : Clairette extérieur nord, Clairette extérieur sud, Clairette 10, Clairette 49, C : Anguille Nord-Est 201, Anguille Nord Est 8.

30 Il s'agissait d'Anguille Nord Est 201, d'Anguille Nord Est 8, de Clairette extérieur sud, de Clairette extérieur nord, de Clairette 49, de Clairette 10 et d'un des bourbiers du Cap Lopez situé à proximité du village des Togolais.

31 Le choix du traitement des sables s'est fait en deux étapes. D'abord un traitement dit traditionnel (incinération, inertage à la chaux, landfarming, etc.) selon le tableau ci-dessous (Tableau 1), suivi d'un traitement par phytoremédiation (revégétalisation des bourbiers)

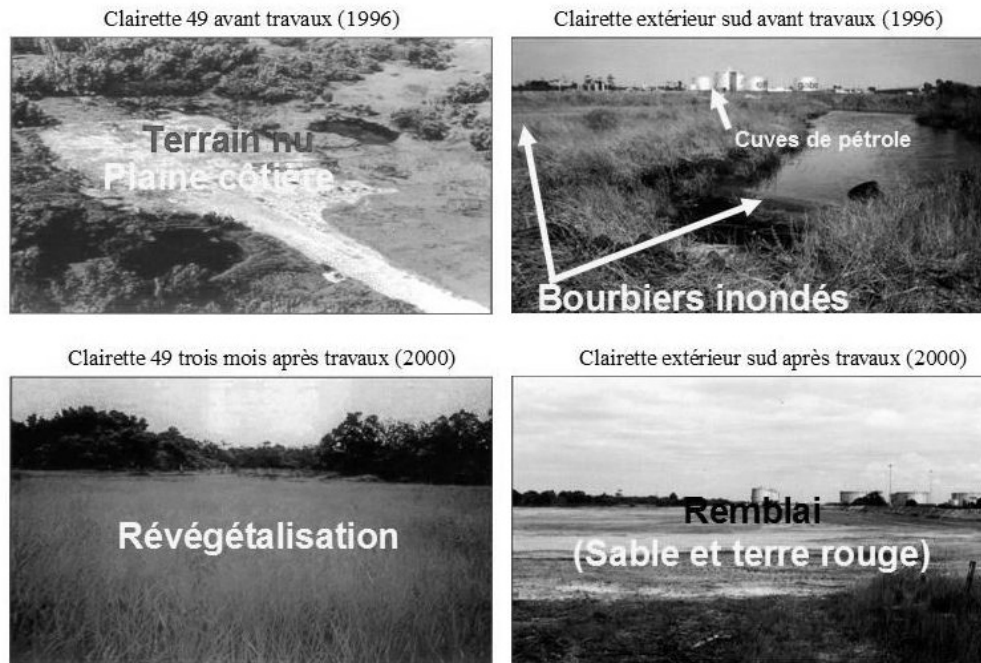
Tableau 1. Choix du traitement des sables

Teneurs en hydrocarbures dans les sables	Filières d'élimination ou de traitement
Inférieures ou égales à 5 %	Aucun traitement
Comprises entre 5 % et 10 %	Aération régulière du sol par labourage
Comprises entre 10 % et 30 %	Inertage à la chaux ou biodégradation par compostage
Supérieures à 30 %	Incinération

Source : Elf Gabon, 2001, Réhabilitation des bourbiers de l'île Mandji

32 Le bilan effectué en 2000 (Figure 7) sur l'ensemble des sites pilotes traités depuis 1995 avait révélé l'efficacité des traitements en prenant comme référence l'état du bourbier avant et après traitement, excluant l'usage futur du site dans les préconisations retenues. L'usage n'a été envisagé qu'une fois le site traité.

Figure 7. État des bourbiers torchage avant et après traitement (Sites Total 1996 et 2000, Nord-Ouest du Gabon)



Source : photos de L. Moussodou, modifiées par N. Origo

- 33 En tout 25 910 m² de terrains ont été traités pour les sept sites, bien loin des 32 hectares du seul site de Vendin-Le-Vieil, pour 209 milliards de Francs CFA soit environ 32 M€ de coût global contre 17 850 k€ de prévisions budgétaires. Avec des délais de traitement relativement courts (1 à 3 mois) contre plus d'une décennie. Le fait est qu'il s'agit dans un cas d'un site pétrochimique et dans l'autre d'un site d'exploitation de pétrole brut avec une durée d'exploitation variant de 74 ans pour Vendin-Le-Vieil et de 40 ans maximum pour les bourbiers les plus anciens de l'île Mandji. Dans ce cas aussi, l'atout financier a orienté le choix des techniques utilisées, même si le rapport n'est pas distinctement mentionné dans le coût total.
- 34 Après revégétalisation par les herbacées, certains sites tels que le bourbier Clairette10 ont été reconvertis en jardins potagers ou en zone de cultures maraîchères composées essentiellement de petits légumes tels que le piment, la tomate, l'oseille et le combo pour attester de la fiabilité des traitements. Toutefois, aucun contrôle n'a été effectué sur les légumes pour vérifier la qualité des récoltes et l'absence de risques pour les consommateurs. D'autres bourbiers dont ceux de Clairette 49, de Clairette extérieur Nord et Sud étaient retenus comme terrains constructibles. L'exploitant avait alors conclu que le programme était concluant et que la méthode pouvait être appliquée à d'autres bourbiers. Le traitement des bourbiers de l'île Mandji dans sa première phase s'est certes montré concluant, mais le faible suivi sur le traitement par phytoremédiation et la reconversion des sites rend difficile l'appréciation sur la mixité des traitements effectués.
- 35 Cette démarche et ce type de réhabilitation de l'environnement sont compatibles avec la politique de l'État gabonais qui a créé en 2002 treize parcs nationaux afin de conserver l'exceptionnelle biodiversité du pays, avec l'appui des grandes ONG de protection de la nature. La création de ces aires protégées sur 11 % du territoire (les forêts denses et humides couvrent encore plus de 80 % du pays ; c'est l'un des taux de boisement les plus élevés du monde) est l'occasion de développer le tourisme, qui pourrait prendre en partie le relais de l'exploitation pétrolière, secteur économiquement essentiel aujourd'hui en déclin.

Conclusion

- 36 La phytoremédiation est une biotechnologie végétale qui présente des atouts écologiques (fiabilité des traitements) et financiers (faibles coûts de dépollution), du moins pour les sites dont l'expérimentation a donné des résultats probants comme à Vendin-Le-Vieil. Cela conforte

également l'utilisation de plus en plus fréquente de cette méthodologie dans les terres de grande culture pour faire face à une pollution accrue par les métaux lourds et les produits phytosanitaires. Toutefois, il n'en demeure pas moins que la phytoremédiation présente des inconvénients tant au niveau de la durée des traitements, relativement longue (5 à 10 ans), qu'à celui de l'élimination et de la revalorisation des résidus végétaux pollués. Par ailleurs, la phytoremédiation se révèle être un bon instrument d'aménagement paysager du territoire puisqu'elle permet d'occuper agréablement le terrain tout en le dépolluant.

37 Cette technique aux atouts prometteurs, en évolution récente en France, montre que les efforts conjugués des acteurs publics et privés vont lui donner une place non négligeable sur le marché national. Cette méthode de plus en plus utilisée dans les pays du Nord doit être encouragée dans les pays du sud confrontés aux problématiques de pollution industrielle, notamment au Gabon. Sa technicité simple et son coût financier moindre sont des facteurs importants pour son adaptabilité. En somme, ce type de gestion de l'environnement participe d'un développement raisonné des terres contaminées.

Remerciements

38 Nous tenons à remercier M. Alain Perez, Responsable sites et sols pollués à la direction de l'environnement et du développement durable chez Total SA pour sa collaboration.

Bibliographie

ARTEB, 2006, Développement des techniques de diagnostic et de traitement des sols : la phytoremédiation. *Technologies Clefs 2000-2005* sur <http://www.arteb.com>

Atofina, 2002, Projet Vendin 2012. Rapport technique- Document de travail interne.

Bert, V., 2009, La phytoremédiation, un procédé prometteur. *In La gazette* n° 2008, France, pp. 1-3.

Bert, V., 2004, Phytoremédiation ? Vous avez dit phytoremédiation ? Sur <http://www.eda-lille.org>

Bert, V. et A. Deram, 1999, Utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds. Guide des phytotechnologies à l'initiative de l'EDA, 154p.

BRGM, 2001, Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Editions BRGM, Orléans, document n° 298.

Busugwu, N., 2004, Approche socio-spatiale de la Réhabilitation des sites industriels pollués. Mémoire de DEA, Université Paris IV- Sorbonne, Paris, 72p.

Cunningham, S. et D. Ow, 1996, Promises and prospects of phytoremediation, *Plant Physiology*, vol 110, 715-719

Dabouineau, L., 2005, Phytoremédiation et phytorestoration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées, *Le rôle d'eau*, vol 124, 8-15

Dubourguier, H.C., D. Petit, A. Deram et C. Logeay, 2001, Le phytomanagement : éléments de synthèse. Pôle de compétence sites et sédiments pollués, Lille, 53p.

ELF GABON/DES, 2001, Réhabilitation des bourbiers de l'île Mandji, Port-Gentil, 6 p

FRTR, 2006, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide : phytoremediation, sur <http://www.frtr.gov>

Hassid, M.J., S. Wicherek et P. Arnould, 2007, Evaluation des transferts des éléments traces métalliques vers les eaux superficielles. Application aux terrassements et à la végétalisation des pistes de ski, *Revue ingénieur EAT*, n° 48, pp. 13-26

INRA, 2007, Dépollution par les plantes des sols pollués en sélénium : exemple de phytoremédiation, sur www.inra.fr, onglet Laboratoires- section recherches.

Laboratoire Sols et environnement, 2007, Thème de recherche : phytoremédiation des sols contaminés. Nancy.

Makaya, J. F., 1993, La pollution des plages et des lagunes côtières par les hydrocarbures, Libreville, 53 p

Moukagni Mounguengui, J.M., 1982, L'exploitation du pétrole au Gabon et ses conséquences sur le développement du pays, Mémoire de DEA en géographie, Université de Basse Normandie, Caen, 97p

- Moussodou, L., 1984, Etude sédimentologique et géodynamique de forages sénoniens pp entre plate forme et talus dans la région de Port Gentil (Gabon), Thèse de Doctorat, Géologie, Université de Bourgogne, Dijon, 168 p.
- Ogé, F., 2001, L'inventaire des sites potentiellement pollués : responsabilité du chercheur, éthique de l'engagement. In *La responsabilité des scientifiques*, Préface de L. SEVE, L'Harmattan, 2001, pp. 103-121.
- Ogé, F. et P. Simon, 2005, Sites pollués en France : Enquête sur un scandale sanitaire. Edition Librio, 93p
- Origo, N., 2008, La gestion des friches industrielles polluées au Gabon comme indicateur de la prévention des risques environnementaux. p. 99-110. In : *L'après développement durable : Espaces, nature, culture et qualité*. Dir. A. Da Lage, J.P. Amat, A.M. Frérot, S. Guicahrd-Anguis, B. Julien-Laferrrière, S.P. Wicherek, Paris, Ellipses, 351 p.
- Origo, N., 2009, Approche socio-spatiale de la réhabilitation des sites industriels pollués Paris, Thèse de doctorat, 393 p., Université Paris IV-Sorbonne.
- Pilz, C. S., 2001, A framework integrating phytoremediation into the landscape architectural design process. A thesis presented to the faculty of graduate studies of the University of Guelph, Canada, 139p.
- Rabekogo, N., 1989, Evolution de la presqu'île Mandji de 1957 à nos jours, Mémoire de maîtrise, UOB, Libreville, 115 p
- Verdin, A., 2004, Les agents de la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures aromatiques polycycliques, *Déchets sciences et techniques*, n°36, pp. 30-37
- Westphal, L.M. et J.G. Isebands, 2001, Phytoremediation of Chicago's brownfields : consideration of ecological approaches and social issues, *Brownfield's proceedings*, ChicagoII, 9p.
- Wicherek, S., 2000, L'eau, de la cellule au paysage. Editions Elsevier UNESCO, Paris, 424p.

Pour citer cet article

Référence électronique

Nadia Origo, Stanislas Wicherek et Micheline Hotyat, « Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation », *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 12 Numéro 2 | septembre 2012, mis en ligne le 20 septembre 2012, consulté le 07 juin 2013.
URL : <http://vertigo.revues.org/12633> ; DOI : 10.4000/vertigo.12633

À propos des auteurs

Nadia Origo

Docteur en Géographie

Stanislas Wicherek

Directeur de Recherche CNRS, Laboratoire Espaces, Nature et Culture, UMR 8185 CNRS - Université Paris IV Sorbonne, Maison de la Recherche, 28 rue Serpente, 75 006 Paris, Courriel : stan.wicherek@orange.fr

Micheline Hotyat

Professeur Université Paris IV Sorbonne.

Droits d'auteur

© Tous droits réservés

Résumés

La phytoremédiation compte parmi les méthodes innovantes de dépollution des sols de plus en plus utilisées dans des milieux complexes en fonction de la nature des polluants à traiter. Elle fait partie de la famille des traitements biologiques appliqués aux sols pollués dont l'usage remonte au milieu des années 80, mais dont la généralisation ne date que des années 90. D'abord en pleine expansion en Amérique du Nord (États-Unis et Canada), la phytoremédiation était il y a encore une dizaine d'années très faiblement employée en

Europe, en France, et en Afrique, notamment au Gabon. La phytoremédiation offre une réelle alternative, aussi bien écologique que paysagère et financière face aux techniques de dépollution traditionnelles telles que l'excavation, l'épandage ou l'incinération, pour aider à la réhabilitation des terrains contaminés et leur reconversion à des fins d'aménagement agricole, urbain ou de loisirs. La ferme expérimentale d'Auby ou le site Total de Vendin-Le-Vieil dans la région du Nord-Pas-de-Calais et celui des bourniers de torchage de l'île Mandji au Gabon en sont de bons exemples. Même si cette technique présente des limites, notamment au niveau de la durée des traitements et de la revalorisation des résidus contaminés (cendres), elle demeure moins onéreuse et assez fiable. Elle s'inscrit aussi dans la durabilité, dans la mesure où la reconversion d'un site pollué en espace vert engendre d'une part un paysage verdoyant et d'autre part un système naturel de dépollution des terrains, ce qui de toute évidence facilitera la tâche des décideurs de l'aménagement raisonné du territoire.

Phytoremediation counts among the innovating methods of depollution increasingly used on grounds in complex conditions of environment and according to the nature of the pollutants to be treated. Phytoremediation belongs to the family of the treatments known as biological, applied on polluted ground. Their use went up in the middle of the Eighties, but their generalization occurred only in the Nineties. Initially in full expansion in North America (USA and Canada), phytoremediation was only ten years ago very slightly employed in France and Europe. From now, it is experiencing a remarkable dash in France and in the rest of Europe. That is probably because phytoremediation offers a real alternative, from financial as well as ecological and landscaping point of view for the rehabilitation of contaminated grounds, in front of traditional techniques of depollution such as excavation, landfarming or incineration. Even if American and Canadian experiments are very advanced in this field, one notes in France a team work which implies public as well as private actors. From universities to the research centers, including Research Development within some companies, French research on bio-depollution augurs well. Examples like the experimental farm of Auby or the Total company site of Vendin-Le-Vieil in the region of Pas-de-Calais and Gabon in central Africa testify. Even if this technique presents limits particularly at the levels of the treatments duration and contaminated residues (ashes) revalorization, it remains nevertheless cheaper and reliable. It also fits in durability, insofar as the reconversion of a polluted site into park generates on one hand a green landscape and on the other hand a natural system of grounds depollution.

Entrées d'index

Mots-clés : phytoremédiation, environnement, aménagement, paysage, développement durable, agriculture, France, Gabon, Total

Keywords : phytoremediation, environment, town and country planning, sustainable development, agriculture, France, Gabon, Total