



Phytoremédiation et phytorestauration. ou L'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées

Laurent DABOUINEAU¹, Yann LAMY², Philippe COLLAS¹,

L'homme a toujours su utiliser les plantes pour sa survie. Elles ont d'abord servi de ressource alimentaire et de matériaux de construction. Elles sont utilisées pour construire des outils. L'homme, mais aussi les grands singes (chimpanzés et gorilles), les utilisent depuis très longtemps pour leurs propriétés thérapeutiques afin de soigner des maladies ou se débarrasser de parasites. On pourrait multiplier les exemples très nombreux d'utilisation des plantes.

Depuis une dizaine d'année et face aux nombreux problèmes de pollution, certaines espèces semblent être intéressantes car potentiellement accumulatrices de polluants. On pourrait donc envisager de les cultiver sur des sols contaminés par certaines molécules afin qu'elles extraient ces substances toxiques. C'est le concept de phytoremédiation ou dépollution des sols par des plantes.

Dans un autre contexte, d'autres espèces comme les roseaux de type *Phragmites* sont actuellement utilisées dans des stations de lagunage de petites communes afin de filtrer et épurer nos eaux usées. On appellera cette technique la phytorestauration des eaux usées.

Voici deux exemples prometteurs où l'homme trouve dans le végétal une ressource qui lui permettra de limiter son propre impact sur la nature.

Nous expliquerons dans un premier chapitre l'état des recherches actuelles sur la phytoremédiation en l'illustrant d'exemples. Puis dans un second temps nous traiterons la phytorestauration.

1 - Phytoremédiation

Nos écosystèmes sont exposés à de nombreuses sources de pollution. Les sols et les eaux, près des sites industriels, subissent une accumulation de métaux lourds, de composés organiques, ainsi que parfois de composés radioactifs. Nous n'aborderons pas les conséquences de ces pollutions sur les écosystèmes mais plutôt comment des sols peuvent être dépollués. Cette accumulation peut être très importante aux abords des sites industriels et dans ce cas, la seule solution est l'excavation et le retraitement. Lorsque la pollution est plus diffuse, la dépollution reste très coûteuse et souvent peu efficace.

Au 16^{ème} siècle, Andréa Cesalpino, un botaniste de Florence, découvre une plante poussant sur des roches naturellement riches en métaux (nickel notamment). De 1814 à 1948, de nombreuses études sont faites par des scientifiques sur cette plante nommée *Alysum bertolonii*, et on découvre alors qu'elle accumule dans son organisme une forte teneur en métaux du sol où elle vit, une teneur plus importante que celle dans le sol. Par la suite, d'autres plantes ayant les mêmes propriétés sont découvertes. Et c'est en 1970 qu'apparaît l'idée d'utiliser ces plantes aux propriétés particulières.

La phytoremédiation est basée sur cette propriété et peut dans certains cas apporter une solution. Il s'agit d'une méthode de décontamination des sols et des eaux, souillés par des polluants tels que les métaux lourds, les hydrocarbures ou les composés radioactifs. Elle est

¹ P.Collas et L. Dabouineau sont Maîtres de conférence à l'Université (U.C.O. Bretagne Nord à Guingamp)

² Y. Lamy est étudiant en 2ème année de licence Biologie à Guingamp

basée sur la capacité qu'ont certaines plantes à se développer en milieux contaminés, et à extraire, accumuler, stabiliser, volatiliser, transformer ou dégrader un agent polluant donné.

Phytoextraction

La phytoextraction est une méthode de décontamination des sols pollués par des métaux lourds (cuivre, argent, or, mercure, zinc, cadmium, fer, plomb,...). Elle est basée sur la culture de plantes possédant des propriétés de tolérance et d'accumulation de ces métaux. Elles vont ainsi être capables, grâce à ces propriétés particulières, d'extraire et d'accumuler les métaux dans leurs parties récoltables. Ces plantes accumulatrices sont capables, grâce à leur physiologie adaptée, d'accumuler jusqu'à 1% de leur matière sèche en métaux lourds, ce qui est un taux très supérieur à la normale.

Il existe environ 400 espèces reconnues de plantes hyper accumulatrices tolérantes aux métaux. Elles sont ainsi capables d'accumuler une certaine concentration d'un métal donné. On peut citer par exemple le tournesol, le pissenlit, le colza, l'orge, différentes Crucifères, l'ortie. Les américains travaillent beaucoup sur des arbres comme le peuplier.

Métal	Concentration dans les feuilles (% de matière sèche)	Nombre de familles de plantes
Cadmium	> 0,001	1
Cobalt	>0,1	12
Cuivre	>0,1	11
Plomb	>0,1	3
Nickel	>0,1	35
Zinc	>1	5

Exemples de métaux accumulés.

Source : J.L. Morel, G. Bitton, C. Schwartz, M. Schiavon. (1997). Rapport pour l'OCDE *Ecotoxicology: responses, biomarkers and risk assesment*

Les plantes vont donc être choisies en fonction de la nature du polluant contaminant le sol (type de métal), car il faut que la plante utilisée soit capable d'extraire le métal, en fonction du climat, et également en fonction de sa biomasse, de façon à ce qu'elle puisse accumuler une quantité importante de polluants. De plus, le sol est souvent contaminé par de nombreux métaux, ce qui nécessite une culture de différentes espèces de plantes.

A maturité les plantes sont récoltées, incinérées, et les cendres sont alors stockées dans un lieu sécurisé. Une partie des métaux pourra ensuite être retraitée, puis réutilisée. On pourra renouveler la culture jusqu'à obtenir des taux acceptables de métaux dans le sol.

Le problème des métaux dans le sol est qu'ils ne sont pas toujours solubles dans l'eau (bio-disponibles), les ions métalliques peuvent être fixés à d'autres ions et deviennent indisponibles pour les plantes. Dans ce cas il faudra parfois ajouter des molécules que l'on appelle « chélateurs » afin de « libérer » les métaux. Par exemple, pour le plomb, il faudra ajouter dans le sol de l'EDTA (Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique) !!!

Les complexes chélateurs/ions métalliques sont ensuite absorbés par les poils absorbants des racines, rejoignent les cellules de l'épiderme, puis du parenchyme cortical, de l'endoderme, et enfin du xylème (tissu conducteur de la plante). Ensuite, ils sont transportés dans les vacuoles des cellules grâce à des transporteurs, et y sont séquestrés.

Les parties de la plante accumulant le métal sont différentes en fonction de l'espèce et du métal. Il peut s'agir des racines, des tiges, des feuilles, mais aussi parfois de la sève, des graines ou même des bourgeons.

Remarque : Le même principe est utilisable pour des eaux polluées (rivière ou étang), il s'agit dans ce cas de trouver des espèces aquatiques développant un système aérien récoltable donc incinérable.

Phytodégradation

Pour les polluants organiques difficilement biodégradables tels que les hydrocarbures, les plantes peuvent être d'un grand secours. La phytodégradation est une méthode de décontamination des sols, consistant en la dégradation de polluants par les plantes cultivées. Les plantes peuvent croître sur un sol contaminé jusqu'à un certain seuil par des hydrocarbures. Une concentration de 7 tonnes par hectare permet une croissance normale de la plante et un rythme de dégradation élevé par les microorganismes se développant dans la rhizosphère (Chaîneau *et al.*, 1995).

Dans la rhizosphère, nous savons que les champignons développant des mycorhizes (*Aspergillus p*, *Penicillium sp*, ...) ou les bactéries (*Pseudomonas sp*, *Xanthomonas sp*,...), ont la capacité de dégrader les composés organiques présents dans le sol. En effet, ceux-ci étant hétérotrophes, ils se nourrissent de cette matière organique après l'avoir dégradée grâce à des enzymes digestives qu'ils sécrètent. Cependant, les microorganismes ne dégradent pas tous les composés organiques. Ces microorganismes sont naturellement présents dans le sol, et effectuent, par conséquent, naturellement la dégradation. Cependant il a été montré que lorsque certaines plantes étaient présentes sur un sol pollué par des composés organiques difficilement dégradables, cette biodégradation se faisait plus efficacement.

Les plantes peuvent également dégrader les polluants organiques à l'intérieur de leurs cellules. En effet, ces plantes ne sont, contrairement aux plantes utilisées pour la phytoextraction, ni hyper tolérantes aux polluants organiques, ni hyper accumulatrices. Par conséquent, il leur est impossible d'accumuler les polluants organiques. Par contre, elles peuvent absorber ces polluants, puis les dégrader, les volatiliser, les transformer en composés moins toxiques. On parle alors de phytodégradation.

Conclusion de cette première partie :

La phytoremédiation présente de nombreux intérêts, d'ordre environnemental et économique. Elle permet d'abord de conserver le paysage agréable, contrairement à d'autres méthodes de dépollution qui le transforment. Ensuite, il est parfois possible de réutiliser les sols en agriculture après leur décontamination. Enfin, économiquement, elle est souvent plus avantageuse que les autres méthodes. Ceci est dû au fait que la phyto extraction entraîne la production de produits secondaires utilisables, qui sont donc des sources de rentabilité. Ainsi, les métaux qui ont été extraits (via les cendres) peuvent être vendus et réutilisés, et l'incinération de la récolte permet la production d'énergie utilisable (électricité, chauffage).

Cependant la phytoremédiation a ses limites. La première est la durée de décontamination. En effet, toutes les méthodes de phytoremédiation sont très lentes, il faut en moyenne une dizaine d'années pour une bonne dépollution du sol contaminé. L'investissement immédiat est donc moins élevé, mais l'immobilisation plus longue, ce qui pose vraiment le problème de son avantage !

D'autres problèmes se posent et devront faire l'objet d'études approfondi. Elles prendront du temps, mais l'enjeu est capital puisqu'il s'agit d'effacer les erreurs du passé. Les recherches actuelles tentent d'améliorer les méthodes. L'une des voies explorées est de modifier le génome des plantes afin d'améliorer l'efficacité de l'extraction par les plantes et notamment augmenter la tolérance et l'accumulation des métaux. Il s'agit aussi d'obtenir des racines plus développées

et plus nombreuses, dans le but qu'elles puissent pénétrer plus profondément dans le sol, et ainsi atteindre des polluants en profondeur. Voilà un dilemme intéressant : Métaux lourds ou OGM ?

2 - Phytorestauration

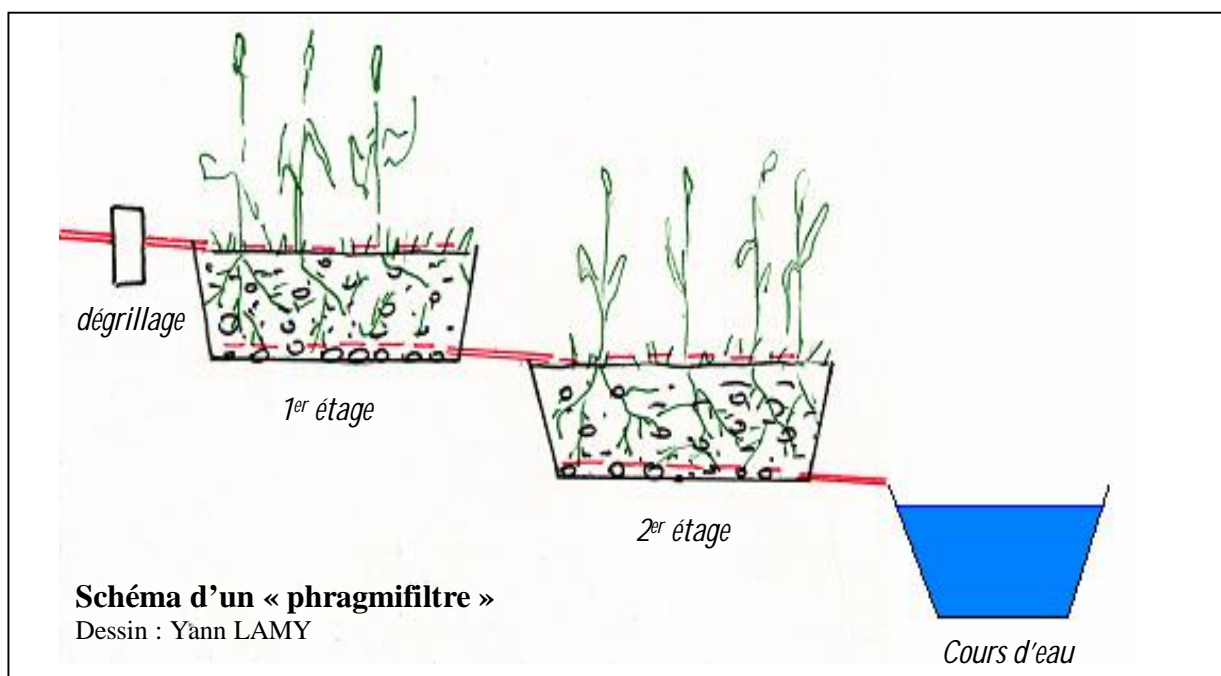
L'épuration de l'eau dans la nature se fait de manière naturelle. Toutefois, depuis que l'homme s'est installé et pollue la ressource en eau, il est également obligé de l'épurer. La **phytorestauration** de l'eau ou l'utilisation des végétaux dans l'épuration des eaux usées et pluviales est un procédé récent qui reprend les techniques naturelles d'autoépuration.

Depuis l'antiquité chez les Grecs et les Romains, ainsi qu'en Chine depuis plusieurs siècles, les plantes sont utilisées pour traiter la pollution. L'effet « dépolluant » des macrophytes³ est connu de façon empirique depuis très longtemps cependant, ce n'est qu'à partir des années 1950 que des chercheurs allemands commencent à analyser ce phénomène de façon scientifique. Ils mettent en évidence que ce ne sont pas les plantes elles-mêmes qui ont une activité dépolluante mais plutôt les bactéries vivant autour de leurs rhizomes (tige souterraine en forme de racines)

En France, dans les années 1980, des recherches du Cemagref (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) dans le domaine des cultures fixées sur supports fins plantés de roseaux ont conduit à la filière « Filtres Plantés de Roseaux » (FPR). Depuis 1991, une société privée, la Société d'Ingénierie Nature et Technique (S.I.N.T), développe cette technologie sous le nom de « Phragmifiltre ». D'autres sociétés comme Phytorestore développent en France des systèmes dépolluants utilisant les macrophytes.

Les technologies usuelles en matière de dépollution sont souvent mal adaptées aux petites collectivités car elles sont coûteuses et complexes. L'utilisation de « procédés rustiques » comme les Filtres Plantés de Roseaux semble être une bonne alternative aux stations d'épurations classiques pour ces petites collectivités.

Les « phragmifiltres » sont des filtres plantés de roseaux. Ils sont constitués de deux étages de traitement par filtration verticale et alimentés en eaux brutes après un simple dégrillage.



³ *Macrophytes : Végétaux aquatiques visibles à l'œil nu*

Suivons le chemin de l'eau dans un « phragmifiltre » :

L'eau brute collectée arrive à la « station ». Là, elle subit un simple dégrillage afin d'éliminer les débris et autres gros objets qui ne pourraient pas être dégradés rapidement tel que des objets plastiques...

Cette eau est ensuite envoyée sur le premier étage qui est généralement composé de trois filtres en parallèles. Il est dimensionné de 0,60 à 2 m² par équivalent – habitant (EH) (voir encadré ci-dessous) pour une profondeur comprise entre 0,20 et 0,80 m de massif filtrant plus une couche drainante au fond comme du gravier. L'eau subit une filtration physique lors de sa descente par gravité, les grosses particules sont retenues à la surface du filtre. Elle subit aussi une filtration biologique par l'activité des micro organismes comme les bactéries.

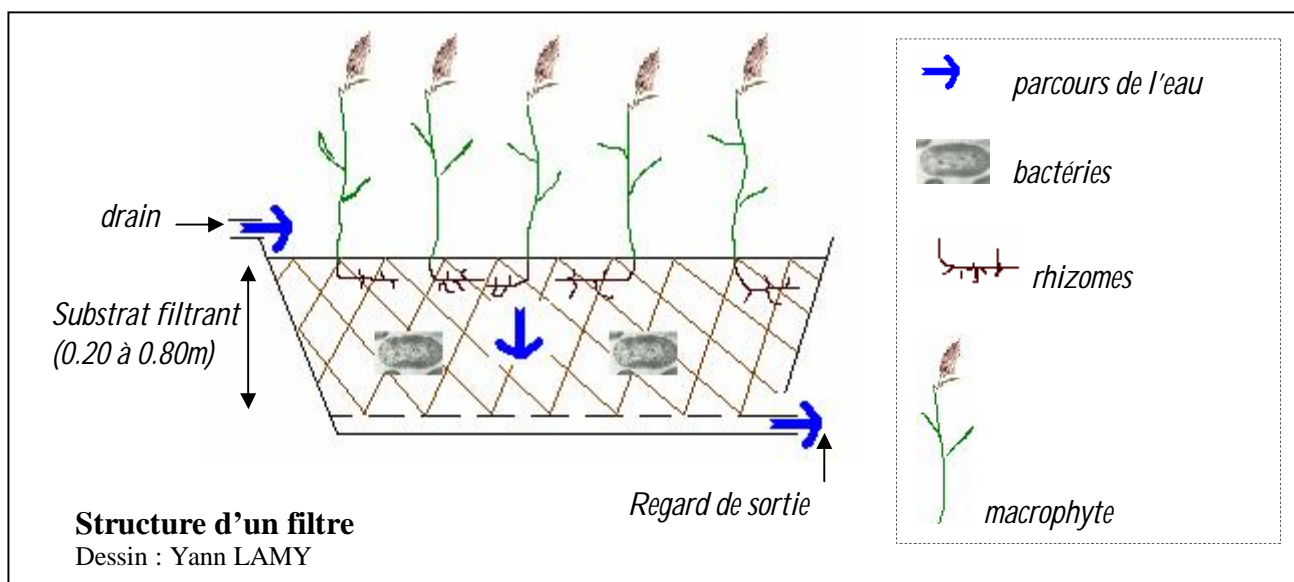
Le second étage est généralement composé de 2 filtres en parallèle. Il est dimensionné de 0,40 à 1,50 m² par EH pour une profondeur comprise entre 0,30 et 0,80 m de massif filtrant plus la couche drainante. Là, l'eau subit essentiellement un traitement biologique.

Les filtres sont constitués d'un substrat filtrant dont la granulométrie et la hauteur varient, tout comme leur dimension, en fonction de l'eau brute reçue et de la qualité imposée en sortie.

Au fond du filtre se trouve un drain permettant de collecter l'eau traitée pour l'acheminer vers un exutoire. C'est le regard de sortie qui limite le débit. En effet, ce n'est pas la perméabilité des granulats filtrants qui régule le débit mais un orifice calibré dans le regard de sortie. La capacité de percolation du filtre est ainsi toujours supérieure au débit de cet orifice et ce même après plusieurs années de fonctionnement lorsque le substrat a perdu de sa perméabilité. Ceci garantit à l'eau un temps de séjour plus long dans le filtre et ainsi une plus grande efficacité épuratoire. Ainsi, pour 1 m² de filtre capable d'infiltrer un litre /seconde, on limitera le débit de sortie à 5% de cette valeur soit 0,05 litre/seconde.

La notion d'équivalent habitant (EH) est une notion ancienne utilisée en assainissement pour évaluer la capacité des stations d'épuration. Cette notion a été introduite pour convertir les rejets d'eaux usées industrielles en « équivalents habitants ».

Pour les habitations unifamiliales qui ne génèrent que des eaux usées domestiques, on considère que le nombre d'équivalent habitants est égal au nombre d'occupants.



Les roseaux gardent également l'humidité sur la surface des filtres et évitent les rayons U.V. permettant ainsi une bonne minéralisation des boues à la surface. Ces boues se transforment en terreau qui garde une bonne perméabilité.

Dernier point qui a son importance, il donne un aspect plus esthétique au filtre et facilite leur entretien car il n'y a pas besoin de les désherber ni de les gratter.

<p>Remarques :</p> <ul style="list-style-type: none"> Ø Les filtres fonctionneraient sans roseau mais seraient moins efficaces. Ø D'autres plantes aquatiques et terrestres seraient beaucoup moins adaptées à cause d'une trop forte production de biomasse putrescible pour les premières et l'incapacité de supporter des périodes d'inondation prolongée pour les dernières. Ø Les roseaux ne sont pas là pour absorber la matière organique produite, il y en a beaucoup trop et aucun végétal n'en serait capable
--

Particulièrement proliférantes en milieu humide, les bactéries se nourrissent de matières dont sont chargées les eaux usées. Véritables « ciseaux biologiques » elles les transforment en molécules inoffensives.

Les bactéries n'ont pas d'impact négatif sur l'environnement aquatique néanmoins dans le cas où l'on trouverait une zone de baignade ou un élevage ostréicole en aval du rejet de la station, elles peuvent présenter un risque pour la santé humaine. Dans ce cas il est impératif de mettre en place un système évitant qu'elles soient rejetées directement.

Un « phragmifiltre » peut-être utilisé en complément d'une station ayant perdu de son efficacité ou bien être complété par d'autres organes de dépollution.

Voici un tableau récapitulatif des points positifs et négatifs de ces filtres :

Avantages	Inconvénients
-Coût d'investissement assez faible et largement inférieur à celui d'une station d'épuration classique.	-Surface des bassins. En moyenne, il faut compter 2m ² /EH
-Faible coût de fonctionnement. Une pente naturelle suffisante permet de fonctionner sans apport d'énergie extérieur, dans le cas contraire un simple pompage suffit. Par ailleurs, les filtres ne réclament que très peu d'entretien.	-Impossibilité d'effectuer le traitement complet de l'azote et du phosphate nécessaire dans les zones sensibles à l'eutrophisation.
-Bonne intégration dans le paysage. Les lits étant creusés directement dans le sol, lorsque le remplissage est effectué, ils tendent à se confondre avec le terrain naturel. La station terminée, seul un champ de macrophytes est visible et aucun bruit n'est audible.	-Risque d'odeur due à la septicité de l'effluent.
	-Système relativement récent.

Résultats des deux bilans réalisés par l'IRH de la Meuse entre 1997 et 1998.

Source : Institut en Recherche Hydrologique de la Meuse

Voici un exemple de réalisation de la S.I.N.T à Saudrup dans la Meuse :

Date de création	Capacité en EH	Eaux reçues	Coût en €
1996	250 EH	200 habitants	145 000 €

1 ^{er} étage	Nombre de filtres	4
	Superficie unitaire en m ²	97.5 m ² total : 390 m ²
	Alternance	Deux fois par semaine

2 ^{ème} étage	Nombre de filtres	2
	Superficie unitaire en m ²	135 m ² total : 270 m ²
	Alternance	hebdomadaire

Résultats:

Paramètre	Entrée	Sortie		Rendement %	
DCO mg/l	804	45	125 ¹	94.5	75 ²
DBO5 mg/l	288	6	25 ¹	97	70 ²
MES mg/l	303	5	35 ¹	98.3	90 ²

¹ concentration maximale en sortie selon les exigences épuratoires minimales de l'arrêté du 22 décembre 1994.

² rendement minimal selon les exigences épuratoires minimales de l'arrêté du 22 décembre 1994

DBO5 : Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours. Elle représente une mesure de la charge polluante d'origine carbonée (pollution organique biodégradable). Elle fournit donc une des indications importantes permettant de juger de la qualité d'une eau et de son degré de pollution.

DCO : La Demande Chimique en Oxygène. Elle permet de déterminer la concentration des principaux polluants. C'est une mesure globale des matières organiques et de certains sels minéraux oxydables (pollution organique totale).

MES : Il s'agit de la quantité de Matière, organiques ou minérales, En Suspension dans l'eau. Elles correspondent à la pollution solide.

La phytorestauration de l'eau semble être, au travers des Filtres Plantés de Roseaux, une bonne alternative aux stations d'épuration classiques au moins pour les agglomérations ne dépassant pas les 2000 voire 3000 EH. En effet, ces agglomérations sont le plus fréquemment rurales et la surface n'est donc souvent pas un problème.

La qualité de l'eau en sortie respectant largement la réglementation et le faible coût de fonctionnement en font un système très intéressant. Toutefois, ce système est en développement et son évolution dans le temps n'est pas connue. En tout cas, pour une fois, les mentalités semblent prêtes à changer et ainsi préférer l'épuration « rustique » à l'épuration « classique » puisque le nombre de ces stations augmente. De plus, aujourd'hui, certains développent de nouveaux systèmes encore plus innovant utilisent par exemple des lombrics dans l'épuration.

Bibliographie

- Sites Internet très complet sur la phytoremédiation : <http://quasimodo.versailles.inra.fr/inapg/phytoremed/index.htm>
- Site sur la phytorestoration de l'eau : <http://www.sint.fr>
- ARTEB (Agence Rhone-Alpes pour le développement des technologies médicales et des biotechnologies), 2001, développement des techniques de diagnostic et de traitement des sols, <http://www.arteb.com/infos/Technoclef/Phytoremediation.PDF>
- CHAINEAU et al., 1995, Microbial degradation in soil microcosms of fuel oil hydrocarbons from drilling cuttings, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, Vol 29, , 1615-1621
- EEED D. Ph, SCHNOOR J. L., 1997, Phytoremediation, The University of Iowa Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research Iowa City, Iowa, http://www.gwrtac.org/pdf/phyto_e.pdf
- FREROT H., 2004, Aspects génétiques et écologiques de l'hyperaccumulation et de la tolérance aux métaux lourds et de l'hyperaccumulation chez *Thlaspi caerulescens* (Brassicaceae). Perspectives en phytoremédiation, CEFE (centre d'écologie fonctionnelle et évolutive), <http://www.cefe.cnrs-mop.fr/dse>
- JEANMAIRE N. 2000. L'assainissement des petites collectivités par les procédés à cultures fixées sur supports fins, Environnement & Technique N°194
- LIENARD A. (Cemagref), BOUTIN C. (Cemagref) & ESSER D. (SINT) 1998. Les stations d'épuration par filtre plantés de roseaux, L'eau, l'industrie, les nuisances N°223
- SCHWARTZ C., 1994, Thèse, Phytoextraction des métaux pollués par la plante hyperaccumulatrice *Thlaspi caerulescens*, Institut national polytechnique de Lorraine (INPL).
- SHALLARI S., 1997, Nancy, Thèse, Disponibilité du nickel du sol pour l'hyperaccumulateur *Alyssum murale*
- TUBIANA F. 2001. Des roseaux pas si sauvages, Environnement magazine N°1598