

Projet de Fin d'Etudes

**La phytoremédiation comme outil de
restauration des zones humides :
limites et perspectives**



2018

Directeur de recherche
Grellier Séraphine
Isselin Francis

Palud Nolwenn

La phytoremediation comme outil de restauration des zones humides : limites et perspectives

Grellier Séraphine

Isselin Francis

2018

Nolwenn Palud

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce projet d'études. J'adresse mes remerciements aux directeurs de recherche, Séraphine Grellier et Francis Isselin, qui m'ont aiguillé dans mes recherches. Je tiens aussi à remercier mes camarades et mes proches qui m'ont conseillé et relu.

SOMMAIRE

I.	Introduction.....	1
II.	La phytoremédiation, ce que nous savons aujourd’hui	2
III.	Restauration des écosystèmes : la phytoremédiation pour dépolluer les milieux	3
IV.	L’application de la phytoremédiation dans la restauration des milieux humides	5
V.	Conclusion.....	10
VI.	Bibliographie.....	12

I. Introduction

L'urbanisation, les déchets industriels et ménagers ainsi que l'agriculture intensive sont des causes de la dégradation des zones humides au cours de ces dernières années (Ramsar, 2015). Elles sont, aujourd'hui, mondialement menacées en qualité mais aussi en quantité. La préservation de ces milieux est devenue un enjeu important dès les années 1960. Des pays et organisations non-gouvernementales à l'échelle mondiale se sont réunis afin de convenir de la Convention de Ramsar, un traité international pour la protection des zones humides. Cette préoccupation mondiale s'explique par les nombreux services écosystémiques que nous rendent ces milieux particuliers. Gros réservoirs de biodiversité mais aussi atténuation des crues, épuration de l'eau, régulation du climat et valeurs culturelles, les zones humides nous offrent des services bien précieux qu'il est nécessaire de protéger (Ramsar, 2015).

Au vue des services écosystémiques des zones humides, leur préservation et leur restauration sont un enjeu majeur du XXI^e siècle. La préservation signifie respecter des principes dont notamment, « préserver la diversité des habitats et des espèces, préserver l'intégrité d'entités écologiques et conserver le système naturel de la

régulation quantitative et qualitative de la ressource en eau » (Berton and Bacchi, 1996). La réhabilitation est une réparation de fonctions par de méthodes plus lourdes telles que l'excavation du sol pollué, l'ajout de tourbe ou encore la 'réparation de l'hydrologie'. Au contraire, la restauration a pour objectif de retrouver l'état initial d'un écosystème par retrait des activités humaines et un contrôle raisonné du territoire. (Berton and Bacchi, 1996). Malgré le nombre de recherches qui saisissent la restauration des milieux humides, les méthodologies de restauration des zones humides sont encore en questionnement. Quelles méthodes peuvent être adaptées à échelle locale ou régionale ? (Gallet et al., 2017).

Cette synthèse va donner un aperçu sur le potentiel de la phytoremédiation pour restaurer une zone humide. Quelles sont les limites et les perspectives de cette méthode ? Ce retour bibliographique fera un tour des paramètres pris en compte dans la mise en place de cette méthode avant de se pencher sur l'application pratique de la phytoremédiation sur des zones humides à travers la décontamination de l'eau et du sol de métaux lourds, de nitrates et de phosphates ainsi que des pesticides et hydrocarbures.

II. La phytoremédiation, ce que nous savons aujourd'hui

La phytoremédiation est une technique de dépollution basée sur les propriétés des plantes. Par différents mécanismes biogéochimiques, ces dernières peuvent immobiliser, dégrader ou extraire des polluants présents dans le sol, l'eau ou l'atmosphère (Origo et al., 2012). Les stratégies végétales sont actuellement comptabilisées au nombre de cinq (Yang and Liu, 2011) :

- La phytostabilisation est la séquestration de contaminants dans un sol ce qui empêche la biodisponibilité ou le lessivage des polluants ;
- La rhizodégradation, quant à elle, permet la dégradation des polluants par des « agents de liaison » tels que les microorganismes rhizosphériques et les sécrétions des racines ;
- La phytoextraction est l'extraction des polluants puis le stockage de ceux-ci dans les racines ou les parties aériennes de la plante ;
- La phytodégradation transforme ou/et dégrade les polluants après extraction ;
- La phytovolatilisation est la transformation des polluants, absorbés du sol ou de l'eau, par les feuilles des plantes

L'ensemble de ces processus est pris en compte dans la phytoremediation, potentiel outil de dépollution des milieux. Cependant, cette « biotechnique » est encore peu utilisée lors de la gestion des sites pollués. Ce traitement biologique n'est étudié qu'à des fins opérationnelles et commerciales que depuis une petite vingtaine d'années (Origo et al., 2012). Les avantages de cette technique mériteraient une attention particulière à son potentiel de dépollution des zones humides.

Ces avantages sont autant d'ordres environnementaux que sociaux et économiques. La phytoremédiation présente une faible perturbation des sites ainsi qu'un maintien et une préservation de la biodiversité. La valorisation foncière et l'absence de lourds procédés de dépollution permettent d'être économiquement rentable tout en proposant un aménagement paysager. Les principaux polluants rejetés par l'activité humaine se retrouvent dans la gamme de polluants pouvant être traités par la phytoremédiation : hydrocarbures, HAP, BTEX, métaux lourds, nitrates et phosphore (Blueset et microhumus, Pollutec 2016). Dans un contexte mondial où les écosystèmes sont menacés par les activités humaines, les innovations réduisant la pression sur l'environnement sont une

nécessité. La phytoremédiation semble être une méthode à approfondir et à perfectionner pour une mise en application. Effectivement, si elle présente des avantages, de nombreux inconvénients se sont dévoilés.

Le premier désavantage est que la phytoremédiation est une méthode qui montre son efficacité à long terme. Il faut attendre jusqu'à cinq à dix ans pour atteindre les objectifs de dépollution. Les autres inconvénients sont liés au métabolisme et aux mécanismes des plantes. La bioconcentration dépend de la concentration optimale du polluant qui varie en fonction de l'espèce végétale. De plus, une limite de toxicité est observée, une trop haute concentration perturbe la croissance des végétaux. Des mécanismes chimiques impliqués dans la phytodégradation ou la phytovolatilisation peuvent ne pas jouer le rôle désiré de dépolluants. Les polluants peuvent, sous l'action du métabolisme de la plante, se dégrader en composé intermédiaire qui sera considéré comme tout aussi polluant ou plus polluant (Yang and Liu, 2011).

La mise en lumière de ces inconvénients exprime le besoin d'études sérieuses dans le domaine de la phytoremédiation. Quelles plantes utiliser pour dépolluer un site ? Quelles conditions installer pour une phytoremédiation optimale ? Des chercheurs se sont attelés à déterminer les espèces capables de bioaccumuler les polluants ciblés ? Quels sont les mécanismes impliqués dans la phytoremédiation ?

Un dernier point est à noter dans l'appréciation de cette « biotechnique végétale ». Lors d'une phytostabilisation de polluants par les plantes, le devenir de cette biomasse doit être intégré dans la gestion. Puisqu'il n'y a pas élimination de la pollution du milieu mais seulement un déplacement, la gestion du milieu en dépollution est souvent de récolter les plants. La valorisation de la biomasse est pensée par la chimie verte, la production d'énergie (combustible), les éco-matériaux ou la bioraffinerie (Blueset et Microhumus, Pollutech 2016). Cependant, ces processus sont à réfléchir en fonction des polluants.

III. Restauration des écosystèmes : la phytoremédiation pour dépolluer les milieux

D'après la société internationale pour la restauration écologique, un projet de restauration vise à entamer ou accélérer la

réparation d'un écosystème, incluant ses fonctions, son intégrité et sa durabilité. La restauration est due à la volonté humaine de

rétablir les services écosystémiques d'un milieu (Cristofoli and Mahy, 2009). Une restauration s'établit autour d'objectifs concrets définis à l'aide d'un écosystème de référence. C'est après avoir pointé quelles fonctions vont être restaurés que des méthodes de gestion vont être proposées (Cristofoli and Mahy, 2009). Quel rôle peut avoir la phytoremédiation dans un projet de restauration de zones humides ?

Il est démontré que les zones humides jouent un rôle d'épuration de l'eau en particulier les marais et les tourbes (Crites et al., 2006). Ce service d'épuration est mis en valeur dans de nombreux cas à travers le monde. Par exemple, le marécage Nakivubo au sud-est de l'Ouganda protège la baie de Murchison et le lac Victoria des pollutions industrielles et domestiques rejetées par la ville de Kampala (de Groot et al., 2007). Les propriétés impliquées dans le rôle d'épuration des milieux humides ont été étudiées dans l'optique de mettre en application ces systèmes pour dépolluer les milieux.

Le rôle des végétaux et de la flore bactérienne est constaté. Végétation et micro-organismes sont adéquats à la purification de l'eau de certains polluants. Naturellement, les zones humides présentent le substrat qui permet le développement des micro-organismes qui consomment la matière organique ou

immobilisent les métaux lourds (Zhang et al., 2010).

La compréhension et la construction artificielle de zones humides pour le traitement des eaux usées ont mobilisé des connaissances et une coopération interdisciplinaire (Benslimane, 2013). Chercheurs en biochimie végétale, biologie moléculaire, chimie du sol, agronomie et ingénierie végétale se sont penchés sur la question. Étudier le potentiel de la phytoremédiation au sein des zones humides demande une maîtrise des réactions biochimiques et géochimiques impliqués dans la biodisponibilité des plantes, le rôle du génie génétique des espèces hyperaccumulatrice et les conditions d'action de la flore microbienne (Zhang et al, 2010).

Par le fait des quantités de pollution rejetées dans les milieux et les objectifs exigés de qualité de l'eau, les performances de remédiation des écosystèmes naturels ne suffisent pas. Ce qui explique l'utilisation de zones humides artificielles dans les projets de dépollution. Ingénieurs et chercheurs s'appliquent à instaurer le principe de phytoremédiation au sein de ces zones humides artificielles. Toutefois, la performance de ces installations est sensible aux saisons, aux produits toxiques tels que l'ammoniac et pesticides qui peuvent affecter certains composants biologiques mais aussi à la variation de la quantité de

polluants dans l'eau. La gestion par l'Homme est alors inévitable tout le long du processus (Zhang et al., 2010).

Le potentiel de la phytoremédiation en zone humide peut laisser penser à son utilisation dans une optique de restauration d'écosystème. Une pollution présente dans un milieu peut être un obstacle au rétablissement de certaines fonctions comme la capacité de soutien du sol tel que son rôle de soutien dans la production primaire ou les cycles biogéochimiques. Par son potentiel de dépollution, la

phytoremédiation peut être utilisée pour atteindre des objectifs dans un projet de restauration.

Cependant, les limites soulignées précédemment doivent être prises en compte dans la mise en place d'un plan de gestion. Si le pouvoir de phytoremédiation dépend des conditions du milieu et la composition de la végétation, il faut alors adapter les solutions au terrain concerné par la restauration. Comment appliquer de façon optimale la phytoremédiation sur le terrain ?

IV. L'application de la phytoremédiation dans la restauration des milieux humides

Les travaux qui se focalisent sur les paramètres influençant la phytoremédiation sont majoritairement des études ex-situ des milieux pollués. Qu'en est-il des

expériences sur le terrain ? Quel est le potentiel de la phytoremédiation en milieu naturel ? Quels facteurs doivent être surveillés et contrôlés

a. La phytoremédiation des métaux lourds : la gestion des bioaccumulateurs

Dans le cas des métaux lourds, aucune dégradation ne peut se faire. Les ions métalliques présents dans le sol ne peuvent être qu'immobilisés au niveau de la rhizosphère ou séquestrer dans les végétaux. Lors d'une restauration d'écosystème, la phytostabilisation n'est pas la méthode privilégiée. Il est plus utile d'utiliser de la phytoextraction, mécanisme qui jouant sur la capacité de bioaccumulation des végétaux (Lone et al., 2008, Wang et al., 2002, Weiss and Weiss, 2003, Pérez-

Lorenzo et al, 2017). Les bioaccumulateurs ne suppriment pas la pollution, ils la neutralisent en déplaçant la source du sol à son organisme.

Les principaux travaux s'intéressent à la capacité de bioaccumulation des métaux lourds par les végétaux. Il ressort des résultats que le potentiel de bioaccumulation varie en fonction des espèces testées (Zhang et al., 2010, Wang et al., 2011, Lone et al., 2008, Wang et al., 2002, Weiss and Weiss, 2003,

Pérez-Lorenzo et al., 2017). Si la capacité de bioaccumulation diffère entre les espèces lorsqu'elles sont un milieu aux propriétés identiques, une même espèce peut présenter des résultats différents en présence d'une concentration variable de polluants (Wang et al, 2002). Pour les métaux lourds, une diminution est notée par toutes les espèces testées à des taux différents (Wang et al., 2002). Il existe une valeur de concentration toxique pour les espèces végétales. Cette valeur varie en fonction de l'espèce.

Une étude, qui porte sur traitement des métaux par les végétaux de zones humides, s'est intéressé à l'implication de la phytoremédiation dans la restauration des zones humides telles que les marais (Weiss and Weiss, 2003). Il ressort des résultats que les marais peuvent être des sources ou des puits pour les contaminants métalliques. L'association des plantes et des conditions anoxiques présentes dans les marais permet de réduire la biodisponibilité des métaux. Le manque d'oxygène agit sur les métaux les maintenant à état réduit.

Un second fait est mis en lumière. Les plantes de zones humides peuvent stocker les métaux lourds dans leurs racines ou leurs feuilles. Dans le premier cas, la phytostabilisation est plus performante puisque la disponibilité des métaux est réduite lorsqu'ils sont concentrés dans le sol. Dans le second cas, les feuilles qui séquestrent les métaux finissent par les

excréter par les glandes salées et retourner dans le milieu. En fonction des espèces présentes dans l'écosystème, les zones humides peuvent devenir à long terme des sources à métaux.

Un autre paramètre est intéressant à prendre en compte pour améliorer l'efficacité de la phytoremédiation : le rapport entre le facteur de bioconcentration (BCF) et la biomasse d'une plante. Une haute valeur de BCF ne suffit pas à conclure sur la meilleure espèce végétale sur le terrain. Un plant d'une espèce A peut très bien avoir un bon BCF et pourtant bioaccumuler moins de quantité de polluants qu'un plant d'espèce B qui a un BCF plus bas. Ce constat s'explique par la différence de biomasse entre les espèces (Wang et al., 2002). Sachant aussi que la croissance des végétaux est influencée par la concentration des polluants, le rapport capacité de bioaccumulation et biomasse produite est un facteur à prendre en compte.

La gestion humaine devient primordiale. Si l'objectif de la restauration des écosystèmes est de supprimer la source de pollution, il est nécessaire de récolter les plants. Un dilemme se pose sur le choix des végétaux ; la capacité de stockage racinaire ou dans le feuillage ? Globalement, le rendement est meilleur dans les racines puisque les métaux ne sont pas excrétés contrairement à l'action des feuilles. Cependant, il faut prendre en compte les

contraintes techniques : il est plus difficile de récolter les racines que les parties aériennes d'une plante (Wang et al, 2002). Cette gestion demande une sélection des plantes dont le système racinaire peut être extrait facilement (Lone et al., 2008) ou de se focaliser sur l'utilisation de plantes flottantes plus pratique à récolter (Wang et al., 2002). En effet, la capacité de stockage n'est pas localisée au même endroit pour toutes les plantes ; les polluants peuvent

s'accumuler dans les racines ou les parties aériennes (Pollard et al, 2002). Une autre solution est de connaître le temps d'accumulation des métaux avant excrétion ou les conditions d'excrétion des végétaux. Cette sélection d'espèces doit aussi considérer la biomasse des plants pour un meilleur rendement. La maîtrise des paramètres du milieu est indispensable afin de mettre en place une restauration de zones humides.

b. L'application de la phytoremédiation dans les milieux eutrophisés : le problème des pesticides

Les zones humides eutrophisées sont principalement des milieux à grande concentration de nitrates et de phosphates. Les plantes aquatiques consomment nitrates et phosphates pour leur croissance bien qu'une concentration optimale améliore les processus. Dans des conditions hydroponiques, une étude a varié la concentration de nitrates, de phosphates et de différents métaux lourds sur plusieurs espèces (Wang et al., 2002). Les résultats varient entre les espèces pour le nitrate et le phosphate. Sur les cinq plantes étudiées, trois espèces voient leur biomasse augmenter avec la concentration des nitrates et des phosphates alors que les deux autres montrent une diminution de la biomasse à partir d'une concentration précise.

Comme pour la dépollution des métaux lourds, l'efficacité d'assimilation des nitrates et des phosphates dépend des espèces végétales (Wang et al., 2002). Au cours d'une étude sur l'effet des plantes aquatiques sur les milieux eutrophisés, l'élimination des nitrates est plus rapide et meilleure lors du traitement avec les plantes sélectionnées que dans les milieux témoins (sans plantation) (Xu et al, 2017). Ces résultats ont été expliqués par la capacité d'assimilation de l'azote par les plantes mais aussi la stimulation des processus biochimiques des microbes par les végétaux.

De même, l'impact du temps de rétention hydraulique a été évalué pour l'ammonium. Un temps de rétention de 30 jours était la valeur optimum pour obtenir la meilleure élimination d'ammonium à une

concentration donnée (Xu et al, 2017). Cette même étude se penche sur l'influence de la demande en oxygène (DO) sur la purification de l'eau par des plantes aquatiques. L'oxygène étant une composante importante dans l'activité de la flore microbienne, son incidence sur sa variation n'est pas étonnante.

Le pH est aussi un paramètre variable qui influence le potentiel de phytoremédiation. Des réactions chimiques sont favorisées et les formes ioniques des molécules se modifient avec le pH. Une étude remarque l'influence du pH sur le mécanisme de phytovolatilisation de l'ammonium (Vymazal, 2007). Une autre étude met en avant la baisse de solubilité du phosphore lorsque le pH augmente (Dra et al, 1994).

Les milieux naturels sont eutrophisés par la pratique de l'agriculture intensive. Les éléments responsables de l'eutrophisation, phosphates et nitrates contenus dans l'engrais, sont souvent accompagnés de pesticides. De nombreux travaux se sont penchés sur la capacité de traitement des pesticides par les plantes des zones humides. Dans la grande majorité, les plantes préfèrent séquestrer les molécules toxiques plutôt que de les utiliser pour protéger leurs organites (Burken, 2003, Weyens et al., 2009). Néanmoins, des espèces capables d'éliminer des molécules contenues dans des pesticides ont été

identifiées (Meggo et al. 2013, Somtrakoon et al., 2014, Khan et al., 2011). Tout comme les métaux lourds, la capacité de bioaccumulation des plantes varie en fonction de l'espèce ; ceci a été observé dans une étude sur le potentiel de phytoremédiation de l'Atrazine (Marecik et al, 2011). Pour observer cette dégradation des molécules, il faut prendre en compte l'association rhizosphère et flore microbienne. Les plantes peuvent sécréter des exsudats dont des acides aminés, des hydrates de carbone ou des acides organiques qui activent le métabolisme de certains micro-organismes (Kramer, 2005, Ramos, 2013). Les expériences appliquées montrent que cette association symbiotique est efficace dans un milieu contaminé par un seul polluant mais qu'un milieu plus complexe donnait des résultats encore peu expliqués (Toyama et al, 2011).

Un dernier point est important à aborder lors d'une restauration d'un écosystème eutrophisé : la présence de cyanobactéries. Nommées responsables de l'accélération de l'eutrophisation sous l'apport de nitrates et de phosphates, leur contrôle ou leur élimination est un enjeu majeur dans la restauration. Il a été soulevé que la composition de la végétation avait un effet sur la composition de la flore microbienne dû à la nature des exsudats sécrétés par les racines. L'abondance des bactéries varie aussi en fonction de la nature

des polluants et de la quantité de nutriments (Xu et al. 2017). L'implantation de plantes aquatiques présentant une bonne

performance de phytoremédiation du nitrate et du phosphate peut être une solution pour restaurer une zone humide eutrophisée.

c. L'application de la phytoremédiation des hydrocarbures : exemple du pétrole

Une grande concentration d'hydrocarbures est toxique pour les végétaux. Une étude s'est attelée à combiner biostimulation et la phytoremédiation pour décontaminer les zones humides des hydrocarbures (Lin et al., 1998). Les deux espèces sélectionnées pour l'expérience ont été exposées à du pétrole à des quantités raisonnables durant deux ans. Ces plants ont ensuite été transplantés dans des milieux naturels. Des milieux ont été recouverts de pétrole alors que d'autres n'ont pas reçu ce traitement. En comparant avec le milieu sans pétrole, les résultats montrent que la biomasse n'est que peu affectée par la présence de pétrole sauf à haute concentration. L'application de fertilisants sur les parcelles montre une augmentation de la dégradation du pétrole par la végétation.

Cette expérience prouve qu'il est possible de combiner la phytoremédiation et la biostimulation afin de restaurer des écosystèmes (Lin et al. 1998). Cette méthode demande une préparation préalable avant application sur site. Si les objectifs sont à atteindre dans un temps restreint, une gestion durant la restauration est indispensable pour ajouter les fertilisants responsables de l'accélération des processus. Il faut tout de même faire attention à ne pas créer un problème en voulant en résoudre un autre. Un trop gros apport en nutriments provoquerait l'eutrophisation du milieu.

L'environnement entier d'une plante peut affecter le fonctionnement de son métabolisme. Il est alors peu étonnant de constater que plusieurs paramètres extérieurs sont impliqués dans le bon fonctionnement de la phytoremédiation. Il a été observé que l'humidité du sol avec un impact sur la croissance de certaines

espèces (Wang et al, 2002). La production de biomasse est avantageuse lorsque la capacité de bioaccumulation de polluants est liée à la masse de la plante. Plus un plant prend en biomasse et plus elle pourra stocker des polluants dans son organisme.

Les conditions climatiques impactent l'activité végétale et

microbienne. Chaque être vivant présente des conditions abiotiques optimales qui lui permettent de bien se développer. La température peut avoir un impact sur l'activité microbienne, cette dernière s'intensifie à plus chaude température. Les précipitations, elles aussi, ont un impact

V. Conclusion

Au vu des nombreux travaux sur le sujet, l'utilisation de la phytoremédiation pour la restauration des zones humides, telles que les marais, plans d'eau stagnante et cours d'eau, est possible. Les progrès de la biotechnologie végétale donnent un espoir pour le développement de ces méthodes dans des applications concrètes de dépollution. L'identification des mécanismes des plantes qui s'applique aux différents polluants est éclaircie. Les métaux sont séquestrés par phytostabilisation et phytoextraction, les nitrates et phosphates sont assimilés et consommés par phytodégradation, les pesticides sont soit phytostabilisés, phyto- ou rhizo-dégradés alors que les

non-négligeable sur la performance de phytoremédiation. Une période de pluie peut diluer les polluants ou à l'inverse, une sécheresse provoquera une concentration ; or la concentration des polluants dans le milieu a une influence, comme vu précédemment.

hydrocarbures sont potentiellement extraient avant d'être phytodégradés.

Toutefois, la performance de la phytoremédiation sur le terrain est loin d'être aussi simple à obtenir. Afin de proposer la meilleure couverture végétale, il faut prendre en compte différents paramètres (figure 1). L'espèce de la plante, la concentration des polluants dans le milieu, la composition de la flore bactérienne, les conditions climatiques, le pH et le taux d'humidité du sol ainsi que le temps de rétention hydraulique impactent les résultats de processus de phytoremédiation que ce soit la capacité de bioaccumulation ou de dégradation.

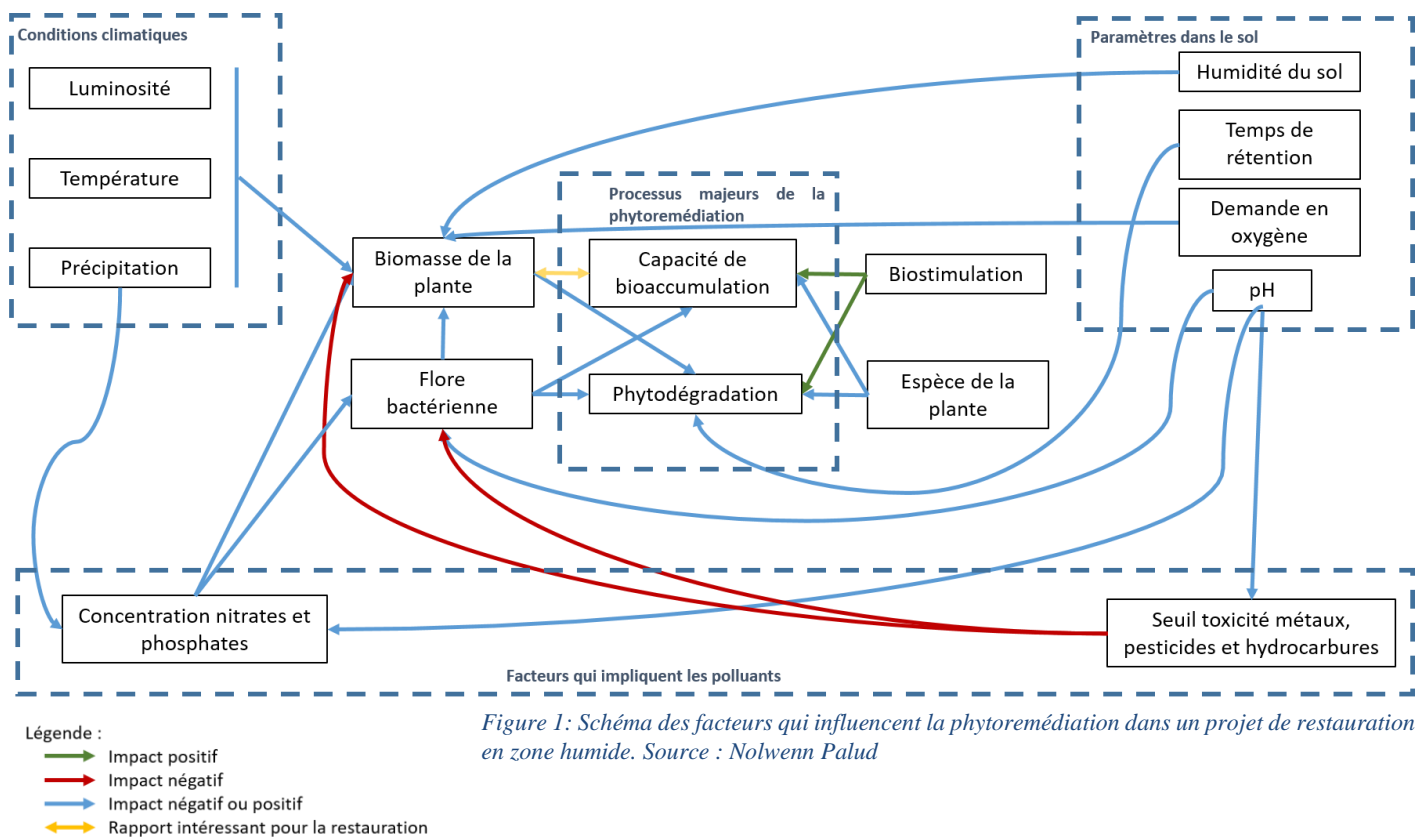


Figure 1: Schéma des facteurs qui influencent la phytoremédiation dans un projet de restauration en zone humide. Source : Nolwenn Palud

Des études de tous les facteurs sont nécessaires avant d'engager une mise en place de restauration d'une zone humide. Comprendre l'influence des facteurs sur la solubilité des métaux ou l'activité microbienne est primordiale afin de construire une méthode de dépollution efficace.

Les principales limitations de la restauration des écosystèmes par la phytoremédiation sont la sensibilité des zones humides aux paramètres inventoriés précédemment mais aussi le besoin de l'intervention humaine durant le processus pour s'assurer des bonnes conditions. Effectivement, un milieu trop pollué ne pourra pas être décontaminé par les plantes,

les niveaux seront toxiques pour la végétation, il est alors nécessaire de mettre en place une phase de pré-dépollution.

Globalement, les recherches de phytoremédiation se concentrent sur les métaux lourds ensuite sur les nitrates et phosphates. Un manque se fait sentir sur l'étude de dépollution des hydrocarbures par les végétaux. De plus, les études se concentrent surtout sur le potentiel de phytoremédiation des tourbes et marécages, qu'en est-il des plants d'eau tels que les étangs ? Les résultats dans ce domaine ne s'accumulent que depuis une vingtaine d'années, les connaissances ne feront que s'accumuler avec la tendance à user de méthodes douces et plus économiques.

VI. Bibliographie

- Bacchi J.P & Berton M. "La restauration des zones humides". *La Houille Blanche*, n°6-7, 1996, p.120-132.
- Benslimane M, Mostephaoui T, Hamimed A & Cherif Z.T. "Performances épuratoires et intérêt du procédé de phytotraitement des eaux usées par des végétaux macrophytes". *Courrier du Savoir*, n°17, 2013, p.47-51.
- Burken J.G. "Uptake and metabolism of organic compounds: green-liver model" dans : *Phytoremediation : Transformation and control of Contaminants*, Edité par Steven C. McCutcheon & Jerald L. Schnoor, 2003, p.59-84.
- Crites R.W, Middlebrookds E.J & Reed S.C. *Natural Wastewater Treatment Systems*. CRC Press, 2005, 576p.
- Gallet S, Hurugen A, Biteau B & Gaucherand S. "La restauration des zones humides, enjeu majeur du XXIe siècle". *Sciences Eaux & Territoires*, 2017, n°24, p.72-77.
- de Groot R, Stuip M, Finlayson M & Davidson N. *Evaluation des zones humides : Orientation sur l'estimation des avantages issus des services écosystémiques des zones humides*. Gland, Suisse: Secrétariat technique Ramsar, 2007, 60 p.
- Khan N.U, Varma B, Imrana N & Shetty P.K. "Phytoremediation using an indigenous crop plant (wheat): the uptake of methyl parathion and metabolism of p-nitrophenol". *Science & Technology*, n°4, 2011, p.1-7.
- Kramer U. "Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils". *Current Opinion in Biotechnology*, n°16, 2005, p.133-141.
- Lin Q. & Mendelssohn A. "The combined effects of phytoremediation and biostimulation in enhancing habitat restoration and oil degradation of petroleum contaminated wetlands". *Ecological Engineering*, n°10, 1998, p.263-274.
- Liu H & Yang Y. "Phytoremediation on Air Pollution". dans *The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources*, Edité par Dr. Mohamed Khallaf, 2011, p. 281-294.
- Lone M.I, He Z-L, Stoffella P.J & Yang X-E. "Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives". *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, n°9, 2008, p.210-220.
- Marecik R, Bialas W, Cyplik P, Lawniczak L & Chrazanowski L. "Phytoremediation Potential of Three Wetland Plant Species Toward Atrazine in Environmentally Relevant Concentrations". *Pol. J. Environ. Stud.*, 2012, p.697-702.
- Meggo R.E, Schnoor J.L & Hu D. "Dechlorination of PCBs in the rhizosphere of switch grass and poplar". *Environ. Pollut.*, n°178, 2013, p.312-321.
- microhumus & blueset. *La phytoremédiation des effluents et des sols*. Support de présentation en ligne :Pollutech 2016, Lyon, 2016. Disponible sur l'URL : <http://www.genie-ecologique.fr/wp-content/uploads/2016/12/23-Phyto.pdf>
- Origo N, Wicherek S & Hotyat M. "Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation". *VertigO [en ligne]*, n°12, 2012.
- Pérez-Sirvent C, Hernández-Pérez C, Martínez-Sánchez M.J, García-Lorenzo M.L & Bech J. "Metal uptake by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration". *Journal of soils and sediments*, n°17, 2017, p.1384-1393.

- Pollard A.J, Powell K.D, Harper F.A & Smith J.A.C. "The genetic basis of metal hyperaccumulation in plants". *Critical Reviews in Plant Sciences*, n°21, 2002, p.539-566.
- Segura A & Ramos J.L "Plant-bacteria interactions in the removal of pollutants". *Current Opinion in Biotechnology*, n°24, 2013, p.467-473.
- Somtrakoon K, Kruatrachue M & Lee H. "Phytoremediation of Endosulfan Sulfate-contaminated soil by single and mixed plant cultivations". *Water, Air, Soil Pollut*, n°225, 2014, p.1886.
- Toyama T, Furukawa T, Maeda N, Inoue D, Sei K, Kibuchi S & Ike M. "Accelerated biodegradation of pyrene and benzo[a]pyrene in the *Phragmites australis* rhizosphere by bacteria-root exudate interactions". *Water Research*, n°45, 2011, p.1629-1638.
- Vymazal J. "Removal of nutrients in various types of constructed wetlands". *Science of the Total Environment*, n°380, 2007, p.48-65.
- Wang H, Zhang H & Cai G. "An Application of Phytoremediation to River Pollution Remediation". *Procedia Environmental Sciences*, n°10, 2011, p.1904-1907.
- Wang Q, Cui Y & Dong Y. "Phytoremediation of Polluted Waters : Potentials and Prospects of Wetland Plants". *Engineering in Life Sciences*, n°22, 2002, p.199-208.
- Weiss, J.S & Weiss P. "Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration". *Environment International*, n°30, 2005, p.685-700.
- Weyens N, vand der Lelie D, Taghavi S & Vangronsveld J. "Phytoremediation: plant-endophyte partnerships take the challenge". *Current Opinion in Biotechnology*, n°20, 2009, p.148-254.
- Xu X.J, Lai G, Chi C.Q, Zhao J.Y, Yan Y.C, Nie Y & Wu X.L. "Purification of eutrophic water containing chlorpyrifos by aquatic plants and its effects on planktonic bacteria". *Chemosphere*, n°193, 2018, p.178-188.
- Zhang B.Y, Zheng J.S & Sharp R.G. "Phytoremediation in Engineered Wetlands: Mechanisms and Applications". *Procedia Environmental Sciences*, n°2, 2010, p.1315-1325.

CITERES UMR 7324

*Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

Equipe DATE

*Dynamiques et Actions Territoriales et
Environnementales*



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
Grellier Séraphine
Isselin Francis

Palud Nolwenn
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2017-2018

La phytoremediation comme outil de restauration des zones humides : limites et perspectives

Résumé :

Wetlands threatened by human pollution, phytoremediation appears as an effective and innovative method of restoring these ecosystems. This review aims to list the main knowledge acquired in recent years on this method of environmental cleanup. Many studies highlight the impact of parameters on the effectiveness of phytoremediation such as the plant species, the concentration of pollutants in the environment, the composition of the bacterial flora, the climatic conditions, the pH and the rate of soil moisture as well as hydraulic retention time. In practice, it is more difficult to obtain the right conditions to decontaminate wetlands but with human action, phytoremediation can grow. The research prospects would rather focus on improving the restoration time of the ecosystem since phytoremediation is identified as a slow method.

Mots Clés : phytoremediation – restoration – wetlands - heavy metals – pesticides - nitrates