

## THIERRY LEBEAU - PRATIQUES USUELLES ET ALTERNATIVES POUR UNE GESTION DURABLE DE LA POLLUTION

Donc cette présentation est assez générale, je l'ai voulue aussi beaucoup à l'attention des étudiants pour la première partie en tout cas, et la deuxième partie sera plus focalisée sur l'une des techniques de dépollution ou en tout cas de gestion de la pollution par les plantes, on en a un petit peu parlé avec la phytostabilisation. Donc comme je le disais, cette présentation porte sur la gestion des sols pollués avec toujours ce fil rouge qui est le sol, comme matériau très lentement renouvelable, et on peut le dire, à l'échelle mondiale, surconsommé probablement. Donc avec en introduction un rappel des objectifs généraux de gestion des sols pollués, et puis je balaierai les différentes pratiques de gestion, encore une fois, c'est une présentation générale, en insistant plus particulièrement sur la gestion *in situ* des sols et qui est probablement le plus adapté des modes de gestion aux pollutions diffuses.

Alors, des années 1980 à 2015 la politique de gestion et de réaménagement des sites pollués a fortement évolué, elle visait au départ la dépollution, je pense qu'on peut le dire, dans l'histoire, de tous les sites identifiés comme sensibles au vu de leur pollution intrinsèque par le pollueur, ou avec le concours de son financement, et puis cette stratégie coûteuse et difficile à appliquer, notamment aux pollutions diffuses et la problématique des sites orphelins s'est infléchie, petit à petit. Elle porte maintenant, on en a parlé à plusieurs reprises, aujourd'hui, sur la gestion des risques au cas par cas de façon à rendre compatible l'état d'un site avec son usage. Je ne sais pas si cet article est toujours d'actualité de 1977, que j'ai retrouvé, mais je l'ai trouvé intéressant, donc je le cite quand même, donc l'objectif c'est évidemment d'avoir un coût-bénéfice acceptable pour atteindre le meilleur niveau de protection de l'environnement humain et naturel, à un coût raisonnable, on en a reparlé encore à l'instant, tout en évitant, et ça, j'ai trouvé ce point intéressant, de mobiliser les ressources inutilement démesurées au regard des intérêts à protéger. Parce qu'effectivement, quand on parle de coût, de coût de dépollution, ou des coûts de gestion de cette pollution, on parle d'argent. L'estimation des coûts totaux de nettoyage des sites et sols pollués, enfin les chiffres que j'ai pu trouver dans la littérature en Europe, varie entre 59 milliards et 109 milliards d'euros, en France les chiffres 2010 donnent un coût de 470 millions d'euros, avec un coût qui a été multiplié par dix, donc ce sont des coûts qui sont extrêmement importants, sans compter des coûts de prévention, qui sont pris à la charge souvent des industriels pour éviter, justement, les problèmes de pollution des sols, avec toujours en 2010, un chiffre de l'ordre de 160 millions d'euros pour prévenir les risques d'infiltration de polluants dans les sols, contre en 2001, 70 millions d'euros, donc des sommes importantes.

Je reviens sur un exemple dont on a parlé à plusieurs reprises pour justement faire un peu le parallèle entre un problème de pollution qui a pu être identifié, l'usage du sol et puis les coûts qui sont soit de gestion, qui peuvent entraîner des coûts de dépollution, qui sont engendrés. C'est le cas du jardin des Églantiers à Nantes, on en a parlé, qui, grâce à une caractérisation fine, a permis de retirer du plan de gestion, enfin le plan de gestion s'est limité à la moitié de la surface, c.-à-d. une surface totale de 2 Ha, on est passé à un Ha à gérer, et sur ces 50 parcelles restantes intégrées au plan de gestion, une quinzaine de parcelles ont été réaménagées. On est face, là, non pas à une pollution entropique, mais une contamination naturelle, c'est le sous-sol qui est naturellement riche en plomb et en arsenic, mais surtout plomb dans ce cas-là. Avec, ce qui a été pratiqué, ce n'est pas un décaissement du sol puisque que plus on décaisse et plus on trouve du plomb, mais un terrassement de 50 cm de terre végétale, le remplacement des cabanes, la remise en état du réseau d'eau, et finalement, si on regarde le coût : 200 000 euros, sachant que la ville de Nantes a utilisé ses propres camions, a récupéré la terre d'un autre chantier, donc elle a géré en autonomie un certain nombre de choses ; mais 200 000€ pour 3 200 mètres carrés. Donc c'est vrai qu'on peut s'interroger sur le coût qui a été pris à la charge de la ville, donc du contribuable, par rapport à l'usage et l'utilisation de ce site pour faire pousser des légumes. Sur ce site, j'en profite pour le dire maintenant puisque j'y reviendrai tout à l'heure, la ville de Nantes

a mis à disposition de l'université de Nantes quatre parcelles expérimentales, en plein cœur du jardin pour tester des solutions de gestion de la pollution par les plantes, je vais en reparler par la suite.

Je reviens à des points qui ont déjà été évoqués, mais intéressants d'en reparler, lorsqu'on gère la pollution, on peut gérer la source, le transfert, la cible. En priorité, on éliminera la source, généralement par excavation parce que finalement, une fois qu'on a excavé, il n'y a plus de problème, et dans un bon nombre de cas, notamment en aménagement urbain, il y a notion de temporalité des aménagements quand il faut sortir X logements en un an ou en deux ans, on n'a pas forcément la possibilité d'utiliser des solutions de gestion qui demanderaient un peu plus de temps. Et puis également, cela évite tous problèmes liés aux solutions *in situ*, avec toujours la question « quel est l'objectif de réhabilitation du sol ? » Est-ce qu'on discute de concentration ? Est-ce qu'on discute de quantité de polluant à retirer ? Est-ce qu'on discute de disponibilité de ce polluant ? Encore une fois, si la source est retirée, il n'y a plus de souci, quelque part, mais ça en génère d'autres. En deuxième solution, c'est en second lieu de désactiver la ou les voies de transfert, par exemple sur site, *in situ* ou *ex-situ*, puis en dernière option, modifier les aménagements et les usages. On comprend assez facilement qu'il est peut-être plus raisonnable de construire un parking plutôt qu'une crèche ou un jardin partagé.

Quelques données que j'ai extraites du document ADEME de 2012 sur les taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols. Donc en 2010, le marché de la gestion et du traitement des terres polluées était dominé par les méthodes de confinement *in situ* et de stockage, donc 50% des tonnages traités ou gérés. En 2010, ce chiffre a sûrement évolué, on pourra en reparler, c'est l'étude dont j'ai connaissance. En 2010, les tonnages totaux étaient de 5 millions de tonnes avec un peu plus de la moitié excavée, donc ce qui pose quand même la question du devenir de cette ressource qui est quand même le sol, même si on va le voir par la suite, une fois que le sol est excavé, ce n'est plus un sol mais un déchet. La gestion *in situ* représente 43% des tonnages totaux. Le confinement, que ce soit *in situ*, sur site ou *ex-situ* représente 60% des 5 millions de tonnes, et les traitements biologiques, je fais un focus sur les traitements biologiques, le pourcentage que je vous donne qui est à peu près de 80% est calculé par rapport aux 1,8 million de tonnes de sol qui sont traitées. Tout n'est pas traité dans les sols, qu'une partie. Mais pour les sols qui le sont, traités, les solutions biologiques ont une part importante, elles représentent sur les 5 millions de tonnes, à peu près 30 %.

Les évolutions des différentes solutions de gestion entre 2008, 2010, évidemment ça a bougé puis il faut prendre les chiffres avec des pincettes, puisque quelques gros chantiers biaisent les résultats. Ce que l'on peut retenir, c'est que les solutions hors et sur site perdent du terrain, le *in situ* a plutôt tendance à se développer, je pense qu'après la question est ouverte sur des chiffres plus récents que je n'ai pas, et les solutions biologiques tendent à progresser globalement.

Une diapositive sur les palettes de solutions fournies, à disposition, l'ADEME a édité un document en 2011 « Traitabilité des sols pollués », un guide méthodologique qui s'adresse à la fois au maître d'ouvrage pour présélectionner une ou des techniques de traitement, sachant qu'il existe deux cas de figure : soit la technique de traitement ou de gestion, plus globalement, des sols pollués, l'application peut être directe, si la solution était prouvée depuis longtemps. Dans l'autre cas, il y a nécessité de réaliser des essais au laboratoire, voire en pilote avec la question derrière de qui paie ces essais, ces pré-essais avant d'appliquer à plus grande échelle les solutions de gestion. Et puis, ce guide apporte aussi une aide à la décision pour les prestataires de traitement avec des fiches techniques qui sont utilisables à la fois pour les sols en milieux saturés, et en milieux non saturés.

On peut se questionner sur les solutions sur et hors site, notamment par rapport aux coûts de l'excavation et du transport. J'ai repris, extrait toujours du même document de l'ADEME, les valeurs pour l'excavation, une moyenne de 4€ par tonne avec des variations entre 2 et 30. Même chose pour

le transport, des coûts qui ne sont pas négligeables. Tout simplement parce que l'acheminement des terres à stocker ou à traiter, le cheminement peut être long. Vous avez une carte des biocentres existants en France avec bien sûr des répercussions sur les coûts de traitement. La fourchette pour les solutions hors site varie entre 45 et 135€ par tonne, pour l'in situ on est entre 10 et 30€ par tonne, et sur le graphe que vous pouvez observer en bas à droite de la diapositive, on constate que les coûts sont extrêmement variables, notamment pour les installations d'incinération ou le stockage de déchets dangereux.

Se pose aussi la question du statut de ce que j'ai appelé les extrants, c.-à-d. la terre qui a été excavée et le questionnement sur les intrants, la terre de remplacement, on en a parlé précédemment. Le problème lorsqu'on excave, c'est que la terre excavée n'a plus le statut de sol, à ma connaissance, elle devient un déchet, mais il existe des possibilités de réutilisation hors site des terres excavées, donc vous pouvez vous référer au document indiqué en bas du BRGM 2012. Cela étant, d'après les calculs que j'ai pu faire, cela représente pour l'instant un tonnage assez faible, 0,5% du tonnage des terres traitées ; avec trois principes : permettre une réutilisation maîtrisée et raisonnée de ces terres excavées afin de participer à la réduction de la pression de l'homme sur l'environnement, donc il y a la notion de la gestion de la ressource. Réutiliser ces terres sur un rayon assez limité, donc ce qui est recommandé c'est maximum 30 km autour du lieu d'excavation, puis évidemment, pas de mélange de lots distincts, par exemple comme on peut le faire avec du vin et des assemblages de vins, là c'est pas possible avec du sol. On ne peut pas assembler un sol extrêmement pollué avec un sol pas pollué pour faire un sol qui serait aux normes. Je caricature, mais je pense que c'est un peu ça. Concernant les intrants, la question a été soulevée tout à l'heure de la disponibilité et la qualité des terres de remplacement. Également, le coût de transport de ces terres qui représente une part importante, entre deux tiers et trois quarts du coût total. Et on peut remplacer les terres excavées par d'autres terres, il y a d'autres solutions pour faire notamment pousser des végétaux en ville avec des matériaux de remplacement qui peuvent être des produits organiques mélangés à des matières minérales. Je vous renvoie au projet SITERRE qui est un projet de recherche qui vient de se terminer.

Concernant les pollutions diffuses, je vais focaliser là-dessus ; on a parlé des solutions hors et ex-situ, du coût de la gestion de ces terres dans le cadre des sites et sols pollués. Pour les pollutions diffuses se pose la question de la gestion des volumes extrêmement gigantesques de sol à gérer. J'ai repris quelques petits exemples : Fukushima, les sols impactés au Césium, une zone de 600 km<sup>2</sup> a été délimitée, zone dans laquelle on dépasse des seuils admissibles de radioactivité. J'ai pris un autre exemple sur lequel on travaille dans le cadre du projet Pollusol, les sols viticoles dans le pays nantais ; avec des prévisions d'arrachage même si finalement elles seront peut-être revues à la baisse mais au départ elles étaient de deux à trois mille hectares. On l'a vu, les sols viticoles ont des teneurs non négligeables en cuivre mais aussi en d'autres éléments. Comment gère-t-on ces sols une fois qu'ils sont en friche, éventuellement, ou si on veut les réutiliser ? On a vu également l'exemple des jardins partagés urbains, je reviens sur les jardins partagés urbains nantais. La ville de Nantes gère plus d'un millier de parcelles sur 26 sites, et huit sites sur les 26 en question présentent des anomalies en termes de plomb, d'ailleurs pas que des anomalies naturelles, ce ne sont pas forcément des contaminations naturelles, géogènes, mais aussi entropiques, avec un certain nombre de parcelles impactées, où les teneurs dépassent le fond géochimique local. Finalement, est-ce que la réhabilitation *in situ* n'est pas la seule option possible dans le cas de la pollution diffuse ? On a vu le cas de L'Escalette avec la phytostabilisation, de toute façon c'est clair avec le coût, il suffit d'imaginer les tonnages qu'on serait amené à gérer dans le cas de ces pollutions diffuses, puisqu'un petit calcul tout simple, 1Ha de sol sur une épaisseur de 30 cm c'est à peu près 4 000 tonnes de sol. Pour par exemple Fukushima on est à 240 millions de tonnes, c'est totalement impossible à gérer. Et puis, qui dit réhabilitation *in situ* dit également éviter encore une fois cette consommation excessive de sol dont on risque de manquer à l'avenir, ne serait-ce que pour couvrir nos besoins alimentaires.

L'objectif n'est pas de balayer les techniques de gestion des sols pollués ou de traitement, je vais focaliser la suite sur des traitements *in situ* biologiques qui a priori, même si c'est avéré dans un certain nombre de cas, sont moins intrusifs pour les sols, ça peut être en termes de structure de sol, de fertilité des sols, de vie des sols. Une technique qui est bien connue pour les polluants organiques, je le précise, c'est le bioventing, il suffit d'injecter de l'air dans le sol de façon à stimuler l'activité dégradante des micro-organismes, mais cette technique ne s'applique pas aux polluants inorganiques puisqu'évidemment le plomb reste le plomb et le cadmium reste le cadmium. Autre technique, la phytoremédiation. La phytoremédiation qui se décline en plusieurs sous-techniques, de la phytovolatilisation on peut dépolluer un sol contaminé au mercure et revolatiliser le mercure dans l'atmosphère avec comme objectif, évidemment, il va retomber, mais de manière diluée. On peut faire de la phytodégradation, de la rhizodégradation, ce sont à ce moment-là surtout les microorganismes de la rhizosphère des plantes, c.-à-d. les microorganismes proches des racines, attachés aux racines, qui dégradent les polluants, et la phytostabilisation, on en a parlé, et une dernière sous-technique de la phytoremédiation, sur laquelle je vais m'attarder, il s'agit de la phyto-extraction. Là il s'agit d'extraire des contaminants inorganiques, des métaux par exemple, la plante sert dans ce cas-là comme extracteur à métaux.

Je développe ce point dans la deuxième partie, les limites et perspectives de la phytoextraction *in situ* appliquées aux contaminants inorganiques. Très clairement, je présente cette méthode, mais c'est une méthode qui ne s'emploie quasiment pas, j'ai plus les chiffres par rapport aux volumes totaux de terres traitées, mais c'est peut-être 0,5% des terres traitées, total qui font l'objet de cette technique, qui pour autant n'est pas inintéressante, et on essaye de la faire progresser au niveau de la recherche, donc pourquoi elle ne se développe pas ? En particulier parce que cette méthode est trop lente, donc elle ne pourra s'appliquer qu'aux pollutions diffuses, et surtout à mon avis, inorganiques, puisque pour les pollutions organiques on a des techniques telles que le bioventing qui sont des solutions bien plus performantes. La question qui se pose, encore une fois, c'est une technique très lente, mais est-ce qu'elle est très très lente ? Ou est-ce qu'elle est un peu lente ? Tout va dépendre de l'objectif qu'on se fixe. Par rapport aux polluants inorganiques, exemple : les métaux, est-ce qu'on raisonne par rapport aux métaux totaux, ou aux métaux disponibles ? Je vous montre ce petit graphique, qui est issu d'une étude en cours dans le cadre d'une thèse de Dorine Bouquet, qui est présente ici, d'une thèse cofinancée par la ville de Nantes. Sur ce graphique, vous avez deux sols issus de deux jardins nantais, contaminés au plomb tous les deux, à la même teneur quasiment, 170 mg de plomb par kilo de sol. Sur la gauche, il s'agit d'un sol contaminé de manière entropique, et si l'on regarde les différentes formes chimiques du plomb, pour faire court, ce sont des schémas de spéciation, on se rend compte que dans le premier cas, cette pollution entropique, 55% du plomb est non résiduel, c.-à-d. qu'un jour ou l'autre, il pourrait être susceptible d'être remobilisé, en contact avec des organismes vivants, être prélevé par la plante. Dans l'autre cas, même teneur totale, mais cette fois, contamination naturelle, c'est la roche qui est naturellement enrichie en plomb : la fraction non résiduelle n'est que de 20%. Donc on peut imaginer que si la même plante pousse sur ces deux sols, elle ne va pas forcément prélever la même quantité de plomb. J'ai pris deux autres exemples de phytoextraction issus de deux études différentes, je ne sais pas si vous voyez à peu près les valeurs mais je vais les citer, on ne va pas regarder tous les éléments du tableau. Dans la première étude, je me focalise sur le cadmium, un calcul a été fait : pour un sol contenant 7mg de cadmium par kilo, en utilisant comme une plante, une poaceae, *Agrostis capillaris*, et l'objectif de dépollution était de rabattre la teneur en cadmium à 1mg/kg. Et le calcul est sans appel : la durée de dépollution est de 4 500 ans. Donc on imagine annoncer ça à des jardiniers, ou peu importe l'utilisateur du sol, qu'il faudra attendre un certain temps avant de revenir sur ce sol-là. Donc c'est-à-dire que le taux, l'extraction du cadmium, elle est de 0,0056% en trois mois de culture. Mais, si on regarde les choses plus positivement, une autre étude avec une teneur totale en cadmium relativement similaire, 8,9mg/kg, cette fois on a regardé dans cette étude le pourcentage du cadmium dans cette extraction qui est disponible, c.-à-d. que la plante va pouvoir... enfin qui peut être mobilisé par un organisme vivant, trois plantes ont été utilisées en phytoextraction notamment celle du bas, *Thlaspi caerulescens*, on a montré que le

pourcentage cette fois de phytoextraction du cadmium disponible, en trois mois de culture, était de 22%, c.-à-d. des temps de dépollution qui sont beaucoup plus courts. Après, où met-on le curseur ? Est-ce que l'objectif c'est de se baser sur la teneur totale en cadmium, ou sur une teneur accessible avec tout ce questionnement sur qu'est-ce que l'accessibilité, la bioaccessibilité, la biodisponibilité des métaux ?

La phytoextraction est lente, on peut accélérer cette phytoextraction. Je vous montre ce schéma de gauche, un schéma de principe où l'une des solutions c'est de, par exemple, rendre évidemment le métal plus mobile pour l'extraire, donc on peut utiliser des complexants, il y a beaucoup d'études qui ont été faites, en utilisant l'EDTA par exemple, comme complexant, donc l'idée, c'est d'attendre que la plante ait suffisamment poussé, vous voyez la courbe de la biomasse produite, et d'appliquer le complexant qui va augmenter le pool de métal biodisponible, ou phytodisponible, qui va être prélevé par la plante dans le flux d'évapotranspiration. Donc c'est une solution qui fonctionne bien, encore un exemple, je me base à nouveau sur le sol contaminé au plomb dont je vous ai parlé à l'instant, le sol de jardin urbain contaminé à 170mg/kg : en utilisant de l'EDTA, on peut augmenter la concentration d'un facteur, dans cet exemple-là, 11 à 47. Le souci, c'est que des complexants types EDTA, règlementairement, il ne sera jamais possible d'utiliser ces complexants, ils sont également souvent toxiques pour la plante qu'on utilise pour extraire le métal, en tout cas ils réduisent la biomasse de la plante phytoextractrice, et ils sont extrêmement coûteux, on a testé d'autres molécules qui ne sont pas forcément utilisées comme complexants, mais plutôt pour jouer sur le pH du sol: l'acide citrique, qui lui pourrait très bien être utilisé, c'est pas très dangereux, l'acide citrique, mais en faisant un rapide coût de l'usage de l'acide citrique, on arrive à 30€/m<sup>2</sup> de sol dépollué. Une autre solution qui est à l'étude en recherche, à l'échelle de la recherche, c'est l'ajout de bactéries au sol qu'on appelle bioaugmentation, ces bactéries peuvent d'une part réduire la phytotoxicité des métaux, stimuler la croissance des plantes, et augmenter la concentration en métaux extraits, puisque ces bactéries peuvent produire elles-mêmes des complexants naturels. Donc le principe est très simple, vous avez le schéma ici, sur la gauche, la phase solide du sol, sur la droite la phase liquide, on ne fait que jouer sur l'équilibre entre les phases, et on essaie de déplacer le métal de la phase solide vers la phase liquide, pour qu'ensuite ce métal soit prélevé par la plante. Donc si on regarde la littérature internationale, sur ces couplages bioaugmentation – phytoextraction, il est possible d'augmenter la quantité de métaux extraits par la plante, d'un facteur 2 à 5, je vous donne ici un résultat de recherche sur du chrome, avec une plante modèle qu'on avait utilisée à l'époque, le maïs, on avait pu augmenter la quantité de chrome extrait par le maïs d'un facteur 5.

On a vu qu'on peut essayer de réduire la durée du traitement par les plantes, mais quand cette durée de traitement reste encore trop importante, on peut proposer d'autres solutions, mais il faut vérifier qu'elles sont applicables et il y a aussi sûrement des questions juridiques qui se posent derrière, par exemple des systèmes de culture associant une plante alimentaire qui serait non consommable en monoculture et une plante hyperaccumulatrice, donc ce sont des travaux qui ont été des expériences sur des petites surfaces qui ont été essayées. Donc là, c'est une expérience sur un sol contenant du cadmium et du zinc. Si on fait pousser uniquement du maïs, ce maïs ne peut pas être consommé, il dépasse les seuils règlementaires en cadmium. En tout cas c'est une étude chinoise donc c'est peut-être par rapport au seuil règlementaire en Chine. Je ne sais pas pour le cadmium, je connais pour le plomb, mais peut-être que pour le cadmium, c'est différent. Il faudrait voir. Par contre, si on cultive le maïs en association avec cette petite plante que vous observez au pied du maïs, qui est une petite plante hyper accumulatrice de cadmium, et bien le maïs accumule moins de cadmium et devient commercialisable. Donc c'est une solution.

On peut aussi proposer des systèmes de cultures, ce sont des expérimentations en cours dans le cadre de la thèse dont je parlais à l'instant avec la ville de Nantes, en utilisant un légume excluant, qui n'accumule pas les métaux, et éventuellement de l'associer avec une plante hyper accumulatrice, en association ou en rotation, donc vous avez cette photo d'expérimentation en cours, sur la gauche c'est

une association moutarde brune – tomates, on aperçoit à peine les tomates qui sont dans la moutarde brune. À droite, on voit la rotation avec en été des tomates et en contre-saison de la moutarde brune. Donc pour cette expérimentation voilà les résultats, pour le plomb vous avez la limite le seuil au-dessus duquel on ne peut plus consommer les légumes pour le plomb, donc 0,1 mg par kilo de matière fraîche, les barres en rouge vous montrent la teneur en plomb dans les tomates, on constate hormis un prélèvement que les tomates n'ont pas accumulé, ou pas significativement, de plomb, alors que le sol contient des teneurs en plomb de 200 à 250mg/kg.

Ensuite, la question du déchet se pose, une fois qu'on a phyto extrait, qu'est-ce qu'on fait du déchet ? Des solutions techniques émergent et sont déjà bien avancées, on peut valoriser la biomasse végétale en bioénergie, évidemment l'objectif n'est pas de renvoyer dans l'atmosphère des contaminants, mais il existe des prototypes. Des chercheurs de Montpellier ont montré qu'en incinérant de manière ménagée la biomasse végétale, on peut produire des biocatalyseurs plus performants que les catalyseurs synthétiques, on pourrait aussi imaginer de faire de la biofortification c.-à-d. de produire des plantes enrichies en certains éléments, je pensais par exemple en cuivre. C'est une réflexion qu'on peut avoir, l'alimentation aux cochons, on apporte aux cochons des aliments énergétiques, à côté de ça, des compléments minéraux cuivres et zinc : est-ce qu'on peut pas imaginer de les nourrir en partie avec des plantes qui auraient surconcentré du cuivre ? Est-ce qu'économiquement ces techniques de phytoextraction sont rentables ? Des calculs ont été faits par l'ENSAIA sur des plantes qui extraient le nickel, donc vous avez un calcul qui vous donne le résultat net, c'est un calcul qui a été fait en 2008 où le cours du nickel était très élevé, donc on est à peu près à 1 000€ de marge nette, en 2016 on ne serait plus qu'à 300€/ha, mais si on compare la marge nette du blé, on est à 300€/ha selon l'année, ça peut être intéressant pour un agriculteur de produire des plantes pour un autre usage qu'alimentaire, notamment sur des sols qui sont pauvres, ne peuvent pas être utilisés pour une grande culture, parce qu'évidemment, il ne faut pas qu'il y ait une concurrence entre des productions végétales alimentaires et non alimentaires. Où placer cette phytoremédiation sur les sites ? Un exemple très rapide sur les sols viticoles : on peut imaginer d'installer les plantes qui extraient les métaux du sol en inter rangs dans un vignoble, tout en maintenant l'activité viticole, c'est une possibilité. On sait que maintenant dans le cadre des pollutions diffuses, une autre solution c'est d'intercepter à l'exutoire des bassins versants les ruissellements enrichis en certains éléments contaminants dans les bassins d'orage.

Et je termine sur une dernière diapositive peut-être futuriste, c'est un exemple que j'aime bien montrer, une publication qui est sortie en 2013, qui a été réalisée par des architectes et des urbanistes, ils sont basés sur le cas d'une ancienne zone industrielle à Amsterdam avec la question : que faire des sols pollués et de la quantité massive des sols pollués ? Donc ils ont proposé par exemple une gestion soit *in situ* de la pollution en utilisant des plantes, ou *ex situ* mais avec un réemploi local du sol, donc vous avez par exemple ici la création d'un cordon de sols pollués végétalisés séparant différents modes de trafic. À partir du moment où le sol est végétalisé, la question va se poser derrière : y a-t-il un risque ou pas ? Autre solution qui était proposée sur des sols très pollués, les dépolluer et produire de la biomasse à vocation énergétique, sachant qu'à Amsterdam ils ont une chaudière municipale il me semble, au niveau de la ville, ou peut-être même plusieurs. Il a été également proposé de créer des parcs sur les sols pollués, donc là on a une phytoremédiation naturelle, avec les végétaux, ça pourrait être comme l'Escalette, des végétaux qui poussent naturellement sur le site, et pour éviter tout risque de contamination des promeneurs, c'est de créer des zones de cheminement sans contact avec le sol pollué, une sorte de cheminement aérien. Je trouve que c'est assez élégant finalement, et dernière proposition dans cette étude, c'est vrai qu'Amsterdam est une ville d'eau avec beaucoup de canaux, c'est de stocker les terres sur des barges pour la phytoextraction à long terme, de laisser ces sols très longtemps sur les barges, de les végétaliser jusqu'à élimination de la pollution. Voilà. Je vous remercie.