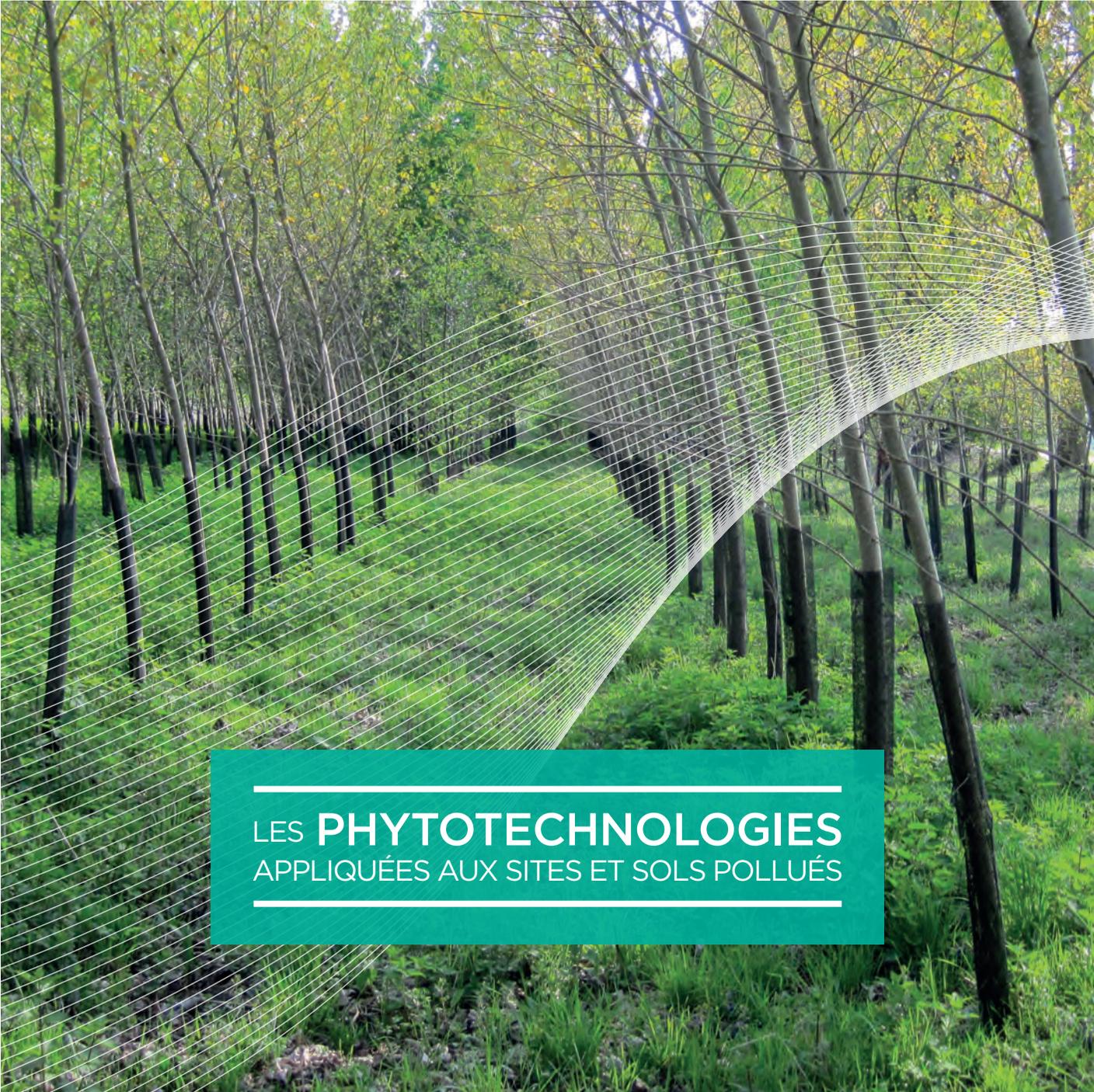


# LES DOSSIERS DE L'**INERIS**

Novembre 2018



LES **PHYTOTECHNOLOGIES**  
APPLIQUÉES AUX SITES ET SOLS POLLUÉS

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



**P.05**

**MAÎTRISER  
LA POLLUTION  
DES SOLS  
SUR LE LONG  
TERME**

**P.06**

**RECONQUÉRIR  
LES FRICHES  
URBAINES**

**P.07**

**VALORISER  
LA BIOMASSE  
PRODUITE  
PAR PHYTO-  
MANAGEMENT**

---

## LES **PHYTOTECHNOLOGIES** APPLIQUÉES AUX SITES ET SOLS POLLUÉS

---

**La réhabilitation des sites pollués, c'est-à-dire leur dépollution pour en permettre un nouvel usage, est aujourd'hui un enjeu important compte tenu du nombre de situations héritées du passé et de la pression foncière croissante. Fort d'une expérience de longue date, l'Ineris étudie les performances des phytotechnologies, techniques qui utilisent les propriétés des plantes pour agir sur les polluants présents dans le sol.**

Les phytotechnologies appliquées à la gestion des sites pollués regroupent un ensemble de techniques qui utilisent *in situ* des espèces végétales pour, selon les cas, contenir ou extraire les métaux, ou bien encore dégrader les polluants organiques présents dans les sols (ex: hydrocarbures).



La pollution des sols par les activités anthropiques est reconnue comme une question environnementale depuis les années 1990. En France, la base de données BASIAS<sup>1</sup> dresse l'inventaire des anciens sites industriels et des activités de service pouvant éventuellement être à l'origine de pollutions. Elle recense environ 260 000 sites susceptibles d'être pollués. Ces pollutions peuvent avoir des conséquences sur la santé humaine et sur l'environnement (contamination de la ressource en eau, impact sur les écosystèmes...). En parallèle, la pression foncière renforce le besoin de réhabiliter les sites pollués. La loi ALUR<sup>2</sup>, votée en 2014, a par ailleurs modifié et renforcé les règles pour faciliter cette réhabilitation en fonction de l'usage.

Les phytotechnologies regroupent différentes techniques de gestion de la pollution :

- La **phytostabilisation** est un mode de gestion par lequel des espèces végétales, éventuellement en combinaison avec des amendements minéraux ou organiques (on parle alors de phytostabilisation aidée), réduisent la mobilité des métaux (zinc, cadmium...) dans le sol et limitent leur transfert dans l'environnement. Cette technique limite les transferts de contaminants dans l'environnement, que ce soit leur migration dans les eaux souterraines ou l'envol de poussières.
- La **phytoextraction** est un mode de gestion fondé sur l'usage d'espèces végétales qui, en accumulant les métaux dans leurs parties aériennes récoltables, par exemple leurs feuilles, permettent de réduire les concentrations de polluant dans les sols. La dépollution reste cependant partielle car elle ne concerne que la fraction de polluant assimilable par les espèces végétales.
- Enfin, la **phyto/rhizodégradation** est une technique utilisant les plantes et les micro-organismes associés pour dégrader les polluants organiques.

On parle aujourd'hui de phytomanagement lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre l'une ou l'autre de ces phytotechnologies. Ce concept rappelle qu'il s'agit bien d'une gestion de la pollution sur le long terme, même si une dépollution partielle peut être obtenue, ou de ce qui en découle (gestion du foncier, de la biomasse produite; valorisation écologique...).

Les phytotechnologies ont longtemps été mises en opposition avec les techniques de dépollution classiques sur site et hors site auxquelles on pouvait reprocher, selon les cas, leur coût, l'occupation d'espace lorsqu'il s'agit de stocker les terres polluées en centre d'enfouissement ou bien encore la dégradation du sol et de ses fonctions (fertilité, support à la biodiversité souterraine...). Aujourd'hui, les phytotechnologies viennent en complément des techniques dites classiques. Le choix des technologies à mettre en œuvre dépend de nombreux critères et de la situation propre à chaque site pollué.

Les phytotechnologies sont perçues comme des techniques de réhabilitation « douces » qui permettent de maîtriser la pollution tout en apportant différents impacts positifs, notamment en termes de biodiversité, de propriétés des sols et d'amélioration du cadre de vie. Elles soulèvent cependant un certain nombre de questions qui font actuellement l'objet de travaux de recherche appliquée portant sur :

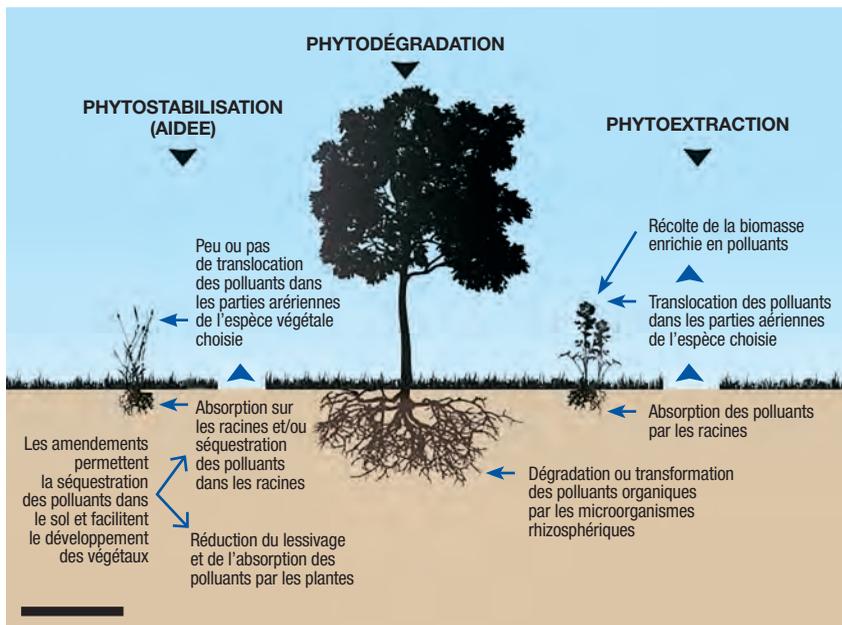
- l'évaluation sur le long terme de la maîtrise de la pollution du sol;
- la gestion des terres polluées *in situ* dans le cadre d'un aménagement urbain en lien avec l'amélioration du cadre de vie;
- la valorisation de la biomasse pouvant contenir des polluants du sol.

### Une expertise au service des technologies propres

Évaluer l'efficacité des phytotechnologies passe notamment par la conduite de projets sur le terrain, où ces techniques sont mises en œuvre sur des sites « pilotes » et testées pendant plusieurs années. L'Institut a mis en place

1. [www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr)

2. <https://droit-finances.commentcamarche.com/faq/25450-loi-alur-les-nouvelles-mesures>



Les techniques de gestion de la pollution.

ou contribue au suivi de plusieurs expériences pilotes (de la parcelle à plusieurs hectares). Ces dispositifs expérimentaux sont complétés par des travaux au laboratoire où l'action des plantes et des micro-organismes sur les polluants peut être étudiée en conditions contrôlées.

L'Ineris a développé son expertise sur les phytotechnologies ces quinze dernières années, notamment *via* son implication dans des projets de recherche nationaux et européens qui favorisent l'échange d'expériences et la définition de méthodologies partagées en matière d'aide à la décision pour la gestion des sites et sols pollués par le phytomanagement. L'Ineris a notamment été partenaire du projet FP7 « Greenland » 2011-2014<sup>1</sup> et participe actuellement au projet Interreg NewCLand 2017-2021.

L'Institut met également son expertise en matière de sites et sols pollués au service de l'État, des collectivités et des industriels dans l'accompagnement des technologies propres. À ce titre, l'Ineris évalue les performances des phytotechnologies. L'enjeu de ces travaux est de vérifier la faisabilité, l'efficacité et la pérennité de ces techniques. Il s'agit également d'étudier comment valoriser la biomasse issue des terrains où ces technologies sont mises en œuvre. Ces travaux

1. <http://www.greenland-project.eu>

mobilisent différentes spécialités au sein de l'Institut : biologie végétale, métrologie (sol, air, plantes, déchets), écotoxicologie, évaluation des risques, économie et différents moyens d'essai (laboratoire : chambre de culture, moyens analytiques ; pilote : chaudière biomasse, méthaniseur).

### Des aménagements sur le terrain et des guides opérationnels pour favoriser le transfert de connaissance vers les acteurs de la filière

Le recours aux phytotechnologies est souvent évoqué lors des opérations de réhabilitation de friches industrielles ou urbaines.

Ces techniques sont plutôt bien perçues par les gestionnaires et opérateurs des sites pollués. Elles restent toutefois encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion des sites et sols pollués, notamment du fait de la logique court terme très souvent associée à la pression foncière, ou bien encore par manque de recul opérationnel et d'informations sur les possibilités de valorisation de la biomasse produite et les coûts et bénéfices associés. Pourtant, des expérimentations sur l'ensemble du territoire permettent aujourd'hui de disposer de retours d'expérience dans différentes situations de pollution et de donner une vision concrète

des apports et limites des différentes solutions appliquées sur le terrain. L'Ineris a piloté, en collaboration avec l'Ademe et plusieurs laboratoires de recherche, la rédaction de deux guides de mise en œuvre et de retour d'expériences : le guide « Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués » paru en mars 2017, vient compléter un premier guide réalisé en 2012, qui présentait les techniques de phytotechnologies. Ce nouveau guide est le fruit de la collaboration de l'Ademe, l'Ineris, l'Isa-Lille et Mines Saint-Étienne. Il fait le point sur les résultats récents de recherche et d'expérimentation en phytoextraction et phytostabilisation. Recueils à vocation opérationnelle pour la mise en œuvre concrète de projet de réhabilitation, ils sont à usage des utilisateurs potentiels et prescripteurs des phytotechnologies. Les guides présentent notamment des outils d'aide à la décision simples qui permettent aux aménageurs de déterminer la faisabilité des phytotechnologies appliquées à leurs projets et de choisir les techniques les mieux adaptées. ■

#### DOCUMENTS ASSOCIÉS



Guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - état de l'art et guide de mise en œuvre » (2012) <https://bit.ly/2C0hC1k>



Guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - nouveaux résultats de recherche et démonstration » (2017) <https://bit.ly/2NuJd5L>

# Maîtriser la pollution des sols sur le long terme



La valorisation par le phytomanagement d'un foncier dégradé est l'occasion de limiter les risques liés à la pollution des sols, tout en produisant une biomasse valorisable, en améliorant la qualité des sols et en favorisant la biodiversité.

**Les phytotechnologies restent encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion et de dépollution des sols. Elles constituent pourtant, *a priori*, des solutions technico-financières particulièrement bien adaptées aux sites où de vastes surfaces sont polluées (anciens sites industriels et zones de retombées de leurs rejets atmosphériques, tel que l'ancien site de Metaleurop dans le Nord de la France par exemple).**

Depuis les années 1990, les phytotechnologies font l'objet de multiples recherches menées par des équipes nationales et internationales selon deux axes complémentaires : l'un, de nature plutôt fondamentale, vise à acquérir des connaissances sur les mécanismes de tolérance et d'accumulation des plantes candidates en phytotechnologies pour connaître, voire améliorer, leur capacité à tolérer, à immobiliser ou à extraire les polluants (phytoextraction) ; l'autre, plus appliqué, vise à mettre en œuvre et à optimiser les itinéraires techniques (du semis à la récolte) et les filières de valorisation de la biomasse collectée pour que la gestion des pollutions par les phytotechnologies soit un cycle vertueux complet. L'Ineris

a rapidement orienté son action selon ce second axe de recherche et la mise en place d'expérimentations *in situ*.

Les objectifs poursuivis sont :

- d'évaluer les enjeux associés au phytomanagement en termes de maîtrise des risques environnementaux et sanitaires marqués par la temporalité propre à ces projets (gestion sur le long terme) ;
- d'accompagner la levée des verrous technico-économiques et réglementaires.

1. <http://www.alluvio.net/>

## Le phytomanagement appliqué aux terrains de dépôts de sédiment de dragage

Le dragage des sédiments qui se déposent naturellement au fond des voies d'eau est une opération nécessaire pour faciliter la navigation, préserver le bon état écologique du milieu mais aussi pour réaliser le traitement de certains de ces sédiments qui peuvent présenter un risque pour l'environnement et la santé humaine. En l'absence de valorisation possible, la mise en dépôt définitive de sédiments fut le débouché privilégié en Nord-Pas-de-Calais. Désormais, Voies Navigables de France (VNF) privilégie les options de valorisation des sédiments dans le cadre de sa politique environnementale et de sa stratégie de gestion et de valorisation des sédiments, Alluvio<sup>1</sup>. L'Ineris conduit depuis 2002, dans le cadre du projet Phytosed soutenu par l'Ademe, un essai de phytostabilisation aidée, sur un site expérimental mimant un stockage de sédiments pollués

aux métaux. L'objectif du projet vise à évaluer l'efficacité et la pérennité de la phytostabilisation aidée dans ce contexte, en particulier le suivi de l'évolution de la végétation sur la longue durée, ainsi que le suivi de la fonction d'immobilisation des métaux. Il s'agit d'un des rares projets en Europe qui bénéficie d'un suivi sur une durée supérieure à 15 ans, permettant de mieux comprendre l'évolution de la diversité et la dynamique floristique et des transferts dans les plantes, en fonction des modalités de traitement choisies sur les différentes parcelles mises en place. Depuis 2011, l'Ineris a mis en œuvre cette technique sur 2 hectares d'un



Phytostabilisation aidée par mise en œuvre de saules et de canches.

terrain de dépôt situé à Fresnes-sur-Escout (59), en partenariat avec l'université de Franche-Comté et avec le concours de VNF, l'Ademe et l'Agence nationale de la recherche.

Une plantation de peupliers et de saules couplée à la mise en place d'un couvert végétal par de la canche cespiteuse, une plante identifiée comme plante stabilisatrice de cadmium et de zinc, ont été déployées. L'Ineris assure le suivi du site, avec pour finalité d'améliorer les itinéraires techniques et de mieux comprendre les déterminants de la mobilité et des transferts de polluants, pour mieux maîtriser les risques associés : performance des plantes choisies, optimisation de la stratégie de suivi du site (effets des amendements à moyen-long terme, suivi des plantes invasives...), faisabilité de la valorisation de la biomasse récoltée sur la parcelle et évaluation technico-économique. ■

## Reconquérir les friches urbaines



Les phytotechnologies peuvent constituer une réponse pertinente pour la création d'espaces verts en zone urbaine et la gestion *in situ* de terres contaminées

**Comment mieux intégrer les sols pollués dans les projets d'aménagement urbain sans procéder à l'excavation et la mise en décharge systématique de terres contaminées ? Comment concilier renouvellement urbain, dans une démarche de ville durable, et valorisation des friches en redonnant une nouvelle vie aux sols en place ? L'Ineris contribue à apporter des réponses, en étudiant les solutions fournies par les phytotechnologies dans des projets urbains, souvent soumis à une forte pression foncière.**

La réhabilitation d'un nombre croissant de friches, pour répondre aux pressions démographiques et foncières des zones urbanisées, fait de la gestion des sites et sols pollués un enjeu majeur pour les collectivités. Les sites pollués font l'objet d'une politique s'appuyant sur

une « évaluation des risques fondée sur la réalité des usages », dont les principes sont réaffirmés par une note ministérielle du 19 avril 2017<sup>1</sup>, qui met à jour les textes méthodologiques de gestion des sites et sols pollués. La note rappelle que « *quelle que soit*

*la nature du polluant, et dans le respect des principes de l'économie circulaire, les traitements in situ ou sur site, qui limitent la production et le transport de déchets, doivent être privilégiés* ». La gestion des terres contaminées fait encore appel aujourd'hui à des techniques, certes éprouvées, mais coûteuses (par exemple, excavation pour enfouissement ou traitement *ex situ*) qui augmentent le coût global des opérations. De nombreux travaux de recherche visent à faire émerger des solutions alternatives comme les phytotechnologies. Ces techniques innovantes consistent à gérer *in situ* les terres polluées, tout en développant des services écosystémiques donnant une valeur supplémentaire à ces territoires en friche (par exemple, amélioration du cadre de vie, accroissement de la biodiversité). Elles se heurtent souvent aux délais contraints des projets d'aménagement qui favorisent les techniques usuelles moins longues à mettre en œuvre. Une approche plus globale du territoire permettrait cependant de s'affranchir de ces freins et de faire émerger des solutions plus durables. Aujourd'hui, de plus en plus de collectivités s'intéressent aux phytotechnologies dans le cadre de leur politique de réhabilitation des sites pollués.

1. [https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/39301](https://aida.ineris.fr/consultation_document/39301)

## L'aménagement de la Voie nouvelle et du carrefour des Forges (Montataire, Oise)



Phytoextraction au carrefour des Forges à Montataire.

L'agglomération Creil Sud Oise (ACSO), la ville de Montataire et l'Ineris collaborent sur une expérience inédite en France sur des sols pollués en contexte urbain depuis 2011, avec le soutien de l'Ademe, qui intègre les préoccupations d'aménagement dans le cadre de la rénovation du quartier intercommunal de Gournay-les-Usines. Avec ce projet novateur, l'ACSO a été récompensée par le Concours national des villes 2013. Cette expérimentation est réalisée dans le cadre de la restructuration du

carrefour des Forges à Montataire. En pratique, deux techniques ont été mises en place :

- la « phytoextraction » sur une zone d'environ 500 m<sup>2</sup> au niveau même du carrefour des Forges ;
- la « phytostabilisation » sur une zone d'environ 300 m<sup>2</sup> au niveau de la voie nouvelle Irène et Frédéric Joliot-Curie.

Au carrefour des Forges, les terres propices à l'expérimentation ont été identifiées et préparées pour recevoir les espèces végétales qui ont été choisies en concertation étroite avec les acteurs du projet, afin de respecter les enjeux liés à la revégétalisation du quartier.

Des saules des vanniers ont été choisis pour leur capacité d'extraction des métaux du sol au niveau du carrefour des Forges, de même que l'arabette de Haller, un hyperaccumulateur de métaux sur lequel l'Ineris travaille depuis plusieurs années. L'Institut, qui suit l'expérimentation en étroite collaboration avec les services espaces verts de la ville, mesure régulièrement les performances des plantes et collecte des échantillons pour réaliser des essais. L'objectif pour l'Institut est notamment d'évaluer la performance de la phytoextraction sur la diminution de la présence de zinc et de cadmium, tout en maîtrisant les risques/impacts

sur l'environnement. Le projet s'efforce d'intégrer les aspects écosystémiques et économiques. Le défi de la phytoextraction est d'augmenter la biomasse produite et les concentrations en métal dans les parties récoltées. ■



© Sophie Polmier

**« Le partenariat avec l'Ineris est un prolongement du projet de territoire de la CAC et de son plan d'actions environnementales. Une opération-vitrine pour l'écoquartier de Gournay-les-Usines, qui devrait permettre de trouver une solution aux problèmes de pollution des sols. »**

**Jean-Claude Villemain**  
Président de l'agglomération Creil Sud Oise

## Valoriser la biomasse produite par phytomanagement



L'Ineris réalise ou accompagne des essais de valorisation, afin d'évaluer le devenir des métaux contenus dans la biomasse issue du phytomanagement.

Les recherches en phytotechnologies sont étroitement liées aux questions de valorisation énergétique ou de matière. La biomasse issue de sols contaminés pourrait en effet, une fois récoltée, être envisagée comme source d'énergie dans des filières traditionnelles (phytostabilisation) ou être utilisée pour valoriser la biomasse et/ou les métaux qu'elle contient (phytoextraction), par exemple, en chimie verte ou bioraffinerie.

Les besoins en biomasse ne cessent d'augmenter, encouragés par les politiques publiques, tant en matière de

transition énergétique que d'économie circulaire. Utiliser les sites et sols pollués pour produire une biomasse valorisable et qui n'entre pas en compétition avec l'utilisation des sols pour l'alimentation apparaît depuis quelques années comme une piste de recherche sérieuse et complémentaire de la logique de réhabilitation des sols pollués par les plantes. Mieux sélectionner les espèces végétales pour le phytomanagement en fonction des filières de valorisation locales pertinentes, est devenu la règle et un moteur fort des projets qui voient le jour. En effet, la valorisation de la biomasse permettrait d'abaisser les coûts globaux de la gestion de la pollution et de valoriser l'usage de sols, par ailleurs délaissés. Cependant, le principal frein au développement de ces filières de valorisation est la mise en adéquation entre la nature de la production végétale, la quantité et la qualité de la biomasse produite (teneur éventuelle en contaminants) et l'accès à une filière de valorisation, à proximité du lieu de production conditionnant sa rentabilité. La connaissance de la distribution des métaux dans les produits, co-produits, déchets et émissions est essentielle pour s'assurer qu'ils ne sont pas transférés du sol pollué vers les autres milieux (air et eau) et qu'ils ne modifient pas les caractéristiques attendues des produits destinés à être vendus. Une conséquence possible, en l'absence d'une telle évaluation, est de disposer *in fine* de biomasses non valorisables du fait des teneurs en contaminants qu'elles contiennent, ce qui nécessiterait alors d'avoir recours à une filière d'élimination

## Biomasse

La biomasse fait l'objet d'une définition réglementaire au niveau européen, dans le cadre de sa valorisation en tant que combustible. Il s'agit bien évidemment de matière végétale ou forestière mais aussi d'un certain nombre de déchets végétaux.

### Pour en savoir plus :

Article 3-31 de la directive n° 2010/75/UE relative aux émissions industrielles



Chaudière biomasse de l'Ineris.

nécessairement plus coûteuse. Du fait de la pluralité de ses métiers (notamment en matière de métrologie), de sa connaissance des filières industrielles et de la maîtrise des émissions et des risques associés, l'Ineris s'est toujours positionné sur les projets qui visent à explorer différentes voies de valorisation de cette biomasse, afin d'apporter des réponses quant à la maîtrise des polluants tout au long des filières considérées. L'Institut a ainsi piloté divers essais de valorisation énergétique de ces biomasses, soit sur ses installations (ex : chaudière biomasse, pilote de méthanisation), soit sur des installations de partenaires industriels (ex : pyrogazéification). Les résultats ont permis de faire des recommandations, qui permettent d'orienter la sélection d'espèces en vue de leur valorisation énergétique, ou de contribuer à adapter la réglementation pour prévenir les transferts de polluants vers l'environnement.

Plus récemment, l'Ineris accompagne sur ce volet des filières de valorisation matière innovantes portées par ses partenaires, telles que :

- la production d'écocatalyseurs pour la chimie verte (où la présence de métaux dans les plantes s'avère un atout pour les réactions chimiques) ;
- la préparation de la lignine du bois, pour l'utilisation en bioraffinerie ;
- la production d'huiles essentielles.

D'autres travaux portés par les équipes de recherche universitaires nationales visent à valoriser des plantes, telles que l'ortie ou le chanvre, dans des filières matériaux ou textiles. ■

### À PROPOS DE L'INERIS

Créé en 1990, l'Ineris, Institut national de l'environnement industriel et des risques, est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire.

### INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Parc Technologique Alata BP2  
60550 Verneuil-en-Halatte  
03 44 55 66 77  
ineris@ineris.fr

[www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)

[@ineris\\_fr](https://twitter.com/ineris_fr)



Pour en savoir plus, rendez-vous sur le site internet de l'Ineris : <http://bit.ly/2dPiobb>

**INERIS**

maîtriser le risque  
pour un développement durable