RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

COMMUNICATIONS ORALES

5e RENCONTRES NATIONALES de la Recherche sur les sites et sols pollués

04 et 05 février 2025 - Paris

Recueil des résumés

ATELIER 6A : Enjeux environnementaux et sanitaires de la requalification des friches à risque de pollution

En partenariat avec :

brgm – Géosciences pour une Terre durable
Cerema
Réseau ESSORT – Sites et sols pollués, Rechercher, partager et innover
INERIS – maîtriser le risque pour un développement durable
innovaSOL – Collaborer, innover, transférer
INRAE – la science pour la vie, l'humain, la terre
RECORD – Recherche coopérative en environnement et économie circulaire
UCIE – L'Union des Consultants et Ingénieurs en Environnement
upds – Union des Professionnels de la Dépollution des Sites

Atelier 6A

Enjeux environnementaux et sanitaires de la requalification des friches à risque de pollution

[Prise en compte des fonciers dégradés dans une échelle territoriale]

Phytostabilisation des haldes miniers par la flore indigène 3

Ancien site minier des Avinières

Quels besoins de refonctionnalisation des sols urbains pour développer l'agriculture de proximité ? 8

Approche de la Métropole Européenne de Lille

Potagers urbains et amendements 14

Gestion et challenges environnementaux et sanitaires

Phytostabilisation des haldes miniers par la flore indigène

Ancien site minier des Avinières

Souhir SOUSSOU

Fertil'Innov Environnement ; 460 Rue Louis Pasteur ; 34790 Grabels.

* s.soussou@fertilinnov-environnement.com

Résumé

L'ADEME, suivant les prescriptions de l'arrêté préfectoral de travaux d'office n°2016-01-001 du 11 janvier 2016, a été mandatée pour réaliser des travaux de mise en sécurité de l'ancienne mine de Saint Laurent Le Minier visant en particulier à la réduction de l'émission de poussières impactant les riverains par le déploiement de techniques de végétalisation de la verse de stériles des Avinières.

Ainsi les grandes étapes de cette mise en sécurité consistaient en :

- Un reprofilage des haldes par terrassement, y compris la stabilisation des deux ravines,
- La fermeture des entrées de galeries minières existantes,
- La création des accès et des ouvrages de gestion des eaux (réseau de pistes, circulation de l'eau favorisant l'arrosage et limitant l'érosion),
- La mise en œuvre d'un programme de phytostabilisation,
- L'installation d'un système d'arrosage des plantations (y compris les réserves d'eau nécessaires pendant l'été).

Une des spécificités de cette opération consistait en la mise en place d'une technique innovante de phytostabilisation des haldes à l'aide des espèces métallicoles du site.

Introduction

L'Hérault est le témoin d'une activité minière plurimillénaire, comme en témoignent les mines de cuivre de Pioch Farrus à Cabrières, exploitées dès 3000 ans avant J.-C. (Néolithique). Cette tradition minière ancienne est largement documentée par des travaux soulignant l'importance historique et archéologique de la région (Ambert, P., et al., 1987 ; Espérou, J.-L., 1992). L'exploitation intensive des gisements de minerais métallifères au XIXe et XXe siècles dans le sud de la France a généré d'importantes quantités de stériles et de résidus à fortes teneurs en métaux lourds extrêmement toxiques. Les anciens sites miniers sont ainsi devenus des « hot spots » de pollution métallique, pour la plupart situés en amont de cours d'eau.

La restauration et la réhabilitation de ces sites par des méthodes physico-chimiques avec l'appui de techniques classiques de génie civil sont à la fois très délicates et extrêmement coûteuses (Berti & Cunningham 2000). Une alternative plus respectueuse de l'environnement consiste à associer des stratégies de génie civil et de génie écologique afin de créer une couverture végétale durable capable de prévenir l'érosion des sols (Jacquemin et al., 2006).

Plusieurs études ont montré que le succès de la végétalisation sur ce type de site est favorisé par l'utilisation de plantes autochtones car elles sont les mieux adaptées aux conditions locales (Joshi et al. 2001 ; Hufford & Mazer 2003 ; Frérot et al., 2006 ; Soussou et al., 2013, ANR SyMetal, 2010 - 2015). Afin d'éviter l'intégration des métaux dans la chaîne alimentaire, la phytostabilisation implique cependant que les végétaux choisis ne soient

pas hyperaccumulateurs (Angle & Linacre, 2005). De plus, le développement d'un couvert végétal doit intégrer le très faible niveau de fertilité des sols en place (Frérot et al., 2006). De fait, la prise en compte de l'ensemble de ces contraintes nécessite la réalisation d'études en amont de la mise en œuvre des opérations de réaménagement.

Le site des Avinières est situé dans le district minier des Malines dans la région de Saint-Laurent-le-Minier (Gard), à une quarantaine de kilomètres au nord de Montpellier (Figure 1). Ce district a constitué la plus importante zone d'exploitation de plomb et zinc de France conduisant à l'essor de l'activité minière et industrielle sur la commune à la fin du XIXe et au XXe siècle. La zone des Avinières, qui surplombe la rive gauche de la vallée de la Vis, a été exploitée de 1875 à 1914, principalement à ciel ouvert. L'exploitation a aussi été en partie réalisée en souterrain, le long de petites galeries suivant les axes de minéralisation et le réseau karstique où le minerai était présent en remplissage de ces cavités. Les stériles d'exploitation étaient poussés en bordure des niveaux et déversés à flanc de coteau (Figure 2).

Le hameau de la Papeterie, situé en rive droite de la Vis, en face des Avinières, a été le siège d'activités industrielles qui ont perduré, au-delà de l'arrêt de la mine, jusque dans les années 1950. Fours de calcination et de grillage, laveries et usines de flottation se sont ainsi installés pour traiter le minerai exploité dans d'autres mines de la commune. Cette activité industrielle a conduit à la formation de dépôts de résidus contaminés dans l'environnement du site des Avinières et du hameau de la Papeterie, notamment de cinq bassins situés en bord de Vis, et contenant 40 000 m³ de résidus de traitement du minerai dont les teneurs vont de 1 à 5 % en plomb et 4 à 13 % en zinc.

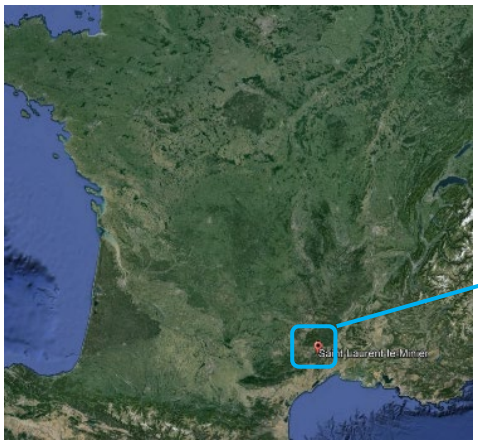

Figure 1 : Localisation du site.

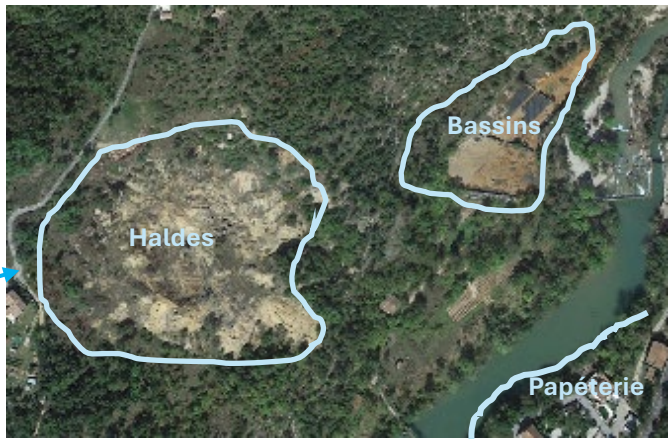

Figure 2 : Vue aérienne du site avant travaux de réhabilitation

Les premiers travaux de diagnostic et d'état des lieux des sols de la commune et la prise de conscience du caractère contaminé de l'ancien site minier et industriel des Avinières et de la Papeterie ont lieu dans le courant des années 2000.

En 2011, la préfecture du Gard mandate l'ADEME par arrêté pour poursuivre les études dans le cadre de sa mission de gestion des sites pollués à responsables défaillants. Un plan de gestion est alors élaboré par les bureaux d'études TESORA et EAUGEO, mettant en évidence les enjeux sanitaires du site et les voies d'exposition, et proposant différentes solutions de mise en sécurité. Il est ressorti de cette étude que les riverains du hameau de la Papeterie subissaient une exposition aux métaux (plomb et zinc principalement, mais aussi cadmium et arsenic) par les envols de poussières issues des haldes des Avinières et des bassins de résidus, situés dans un rayon de 500 m.

L'autre voie de contamination de l'environnement est l'érosion intense subie par les haldes lors des évènements pluvieux cévenols qui entraine vers la Vis d'importantes quantités de stériles riches en métaux.

Par arrêté préfectoral de travaux d'office n° 2019-04-010 du 8 avril 2019, l'ADEME a donc été mandatée pour conduire la mise en sécurité du site des Avinières. Les travaux ont consisté, entre autres opérations, à la végétalisation de la verse de stériles des Avinières afin de réduire l'émission de poussières chargées en Eléments Traces Métalliques (ETMs) et notamment en plomb qui présente un danger pour la population habitant en contrebas.

Matériel et méthodes

L'opération de réhabilitation engagée sur le site des Avinières s'inscrit dans la durée et comprend plusieurs étapes :

- Contrôle et amélioration de la qualité du substrat minier : Outre la forte charge en ETMs (5 % de plomb, 10 % de zinc), le substrat a une faible teneur en matière organique et en éléments majeurs indispensables à la croissance des plantes. Une stratégie particulière a été développée pour apporter des amendements à fortes teneurs en composés organiques.
- Essais en laboratoire : Des semences de toutes les espèces autochtones ont été récoltées puis testées en laboratoire afin de déterminer leur niveau de tolérance aux ETMs. Nous avons ainsi identifié 18 espèces végétales adaptées aux conditions du site et de tout un ensemble de microorganismes symbiotiques.
- Essais *in situ* : Avant de procéder à la réhabilitation de l'ancienne mine, des essais in situ ont été réalisés afin de confirmer l'efficacité de l'apport de matières organiques et d'optimiser l'association des différentes espèces végétales et microbiennes permettant de couvrir rapidement les stériles miniers.
- Mise en place d'une pépinière *in situ* pour multiplier les espèces autochtones : Le but était de produire des semences en quantités suffisantes pour phytostabiliser la verse à stériles des Avinières.
- Travaux de terrassement du site : l'objectif de ces travaux était de coucher les fortes pentes des haldes afin d'améliorer leur stabilité, de limiter l'érosion de surface et de favoriser la reprise de la végétation. Les travaux de terrassement ont été réalisés en déblais-remblais équilibrés par zone, avec de petits engins mécanisés, et sous brumisation continue afin de prévenir l'émission de poussières.
- Un suivi environnemental de l'air et de l'eau a été également réalisé pendant les travaux, afin de vérifier l'absence d'impact des travaux sur l'environnement.
- Amendement du substrat : pour garantir le bon développement de la végétation, un amendement organique à base de compost de déchets verts a été apporté. Une attention particulière a été accordée aux quantités de compost et à l'homogénéité de l'incorporation du compost dans les 30 premiers centimètres du substrat minier à travers la réalisation de contrôles spécifiques et réguliers du substrat après préparation. Des géofilets en fibres de coco ont par la suite été agrafées sur les talus pour favoriser l'accroche des semences.
- Mise en place du système d'irrigation : afin de garantir la germination et le développement correct des plantes autochtones durant les premières années, il a été nécessaire de mettre en place un système d'irrigation. Les apports d'eau ont été programmés pour favoriser le développement du système racinaire des plantes en profondeur.
- Travaux de végétalisation : le semis final des plantes autochtones a été effectué par semis hydraulique.
- Pour l'ensemble des étapes, un suivi de l'air et de l'eau est réalisé afin de vérifier l'impact des travaux sur l'environnement.

Résultats et discussion

- Essais en laboratoire : Sur les 18 espèces végétales testées, 10 ont été retenues pour la phytostabilisation du site dont 3 espèces appartenant à la famille de légumineuses. Les espèces hyperaccumulatrices ont été écartées afin de préserver la chaine alimentaire.
- Essais *in situ* : les essais sur site ont montré que seules les espèces autochtones sont capable de se développer sur le substrat des Avinières.
- Pépinière de multiplication des espèces autochtones : La mise en place rigoureuse de la pépinière et le suivi constant ont conduit à une production de semences dès la première année et cette production a été constante sur les trois années d'entretien de la pépinière. Une réserve de 174 kg de semence a été obtenue.
- Travaux de terrassement du site : Les travaux ont permis d'abaisser les pentes et d'incorporer les amendements sur 30 centimètres de profondeur. De plus, un réseau de gestion des eaux a été créé afin de canaliser les eaux de ruissellement et de les drainer vers l'aval du site. Les ouvrages qui ont été mis en

œuvre sont volontairement robustes, dimensionné pour des pluies de temps retour important et nécessitent peu d'entretien sur la durée.

- Traitement des zones ravinées par fascines : sur certaines zones des haldes ravinées et difficiles d'accès, les travaux de terrassement n'ont pas été possibles. Il a donc été décidé de traiter ces zones par la mise en place de fascines. Cette technique de génie végétal basée sur la mise en place de fagots de branches inertes a permis de créer des micro-terrasses dans les pentes et a favorisé le développement de la végétation en la protégeant de l'érosion.
- Les géofilets en fibres de coco ont favorisé une meilleure accroche des semences et ont protégé les jeunes plantules.
- Reprise de la végétation : un taux de recouvrement dépassant les 65 % a été obtenu 1 an après les semis (Figure 3).
- Un inventaire chiroptérologique a été également réalisé sur le site sur une année complète afin d'évaluer l''intérêt des galeries pour les chiroptères tout au long de leur cycle biologique. Les résultats de cet inventaire ont mis en évidence que les galeries étaient fréquentées par deux types de chiroptères : le petit rhinolophe et le grand rhinolophe. Des solutions de mise en sécurité permettant de préserver l'accès aux gîtes pour les chiroptères ont donc été mises en œuvre.

*Figure 3 : Site des Avinières 1 an après phytostabilisation (photo prise par drone, **Techdrone**)*

Conclusions et perspectives

En conclusion, les travaux de phytostabilisation des Avinières constituent une démarche innovante qui a permis d'obtenir, deux ans après le semis, une couverture végétale dense permettant de réduire efficacement les phénomènes d'érosion hydrique et éolienne des stériles miniers de la verse des Avinières.

Un suivi de la zone végétalisée sera effectué jusqu'en 2026 afin de contrôler l'implantation de la végétation et éventuellement d'apporter les corrections nécessaires pour le bon développement de la couverture végétale.

Références

Ambert, P., Guendon, J.-L., & Martin, H., 1987. "Les mines de cuivre préhistoriques de Cabrières (Hérault)". Bulletin de la Société préhistorique française, 84(7) : 193-202.

Angle, J. S., Linacre, N.A., 2005. Metal phytoextraction - A survey of potential risks. *International-Journal-of-Phytoremediation* 7:241-254.

ANR SyMetal, 2010-2015. Rhizostabilisation de déblais miniers à fortes teneurs en métaux par des plantes METALlicoles associées à leurs microorganismes SYMbiotiques

Berti, W R., Cunningham, S D., 2000. Phytostabilization of metals. *In Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment,* Eds I Raskin and B D Ensley. pp 71-88. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Espérou, J.-L., 1992. "Les anciennes mines de cuivre du département de l'Hérault : Étude et perspectives". *Archéologie en Languedoc*, 16 : 45-58.

Frérot, H., Lefèbvre, C., Gruber, W., Collin, C., Dos Santos, A., Escarré, J., 2006. Specific interactions between local metallicolous plants improve the phytostabilization of mine soils. *Plant and Soil* 282: 53–65.

Hong, SM., Candelone, JP., Soutif, M., Boutron, CF., 1996. A reconstruction of changes in copper production and copper emissions to the atmosphere during the past 7000 years. *Science of the Total Environment*, 188:183-193.

Hufford, K. M., & S. J. Mazer., 2003. Plant ecotypes: genetic differentiation in the age of ecological restoration. *Trends-in-Ecology-and-Evolution* 18:147-155.

Jacquemin, P., Arguillat M., Tuphé R., Le Guen S., Boisson J., Pottecher G., Ruttens A., Vangronsveld J., Saunal B., 2006. Une combinaison du confinement des déchets et de la phytostabilisation des sols. *Travaux* 831 : 56-66

Joshi, J., Schmid, B., Caldeira, M. C., Dimitrakopoulos, P. G., Good, J., Harris, R., Hector A., Huss Danell K., Jumpponen A., Minns A., Mulder C. P. H., Pereira J. S., Prinz A., Scherer Lorenzen M., Terry A. C., Troumbis A. Y., Lawton, J. H., 2001. Local adaptation enhances performance of common plant species. *Ecology Letters* 4:536-544.

Soussou, S., Mahieu, S., Brunel, B., Escarré, J., Lebrun, M., Banni, M., Boussetta, H., Cleyet-Marel, JC., 2013. Zinc accumulation patterns in four *Anthyllis vulneraria* subspecies supplemented with mineral nitrogen or grown in the presence of their symbiotic bacteria. *Plant and Soil* 371: 423-434

Remerciements

La mairie de Saint-Laurent-le-Minier, est propriétaire d'une partie des terrains concernés par les travaux de mise en sécurité. Elle est régulièrement informée de l'avancée des opérations et donne les autorisations sur les aspects relevant de son autorité.

Nous tenons à remercier l'ensemble des partenaires qui ont veillé au bon déroulement des travaux.

Sous la Maîtrise d'Ouvrage de l'ADEME (coordination des travaux assurée par Patrick JACQUEMIN et suivi post-travaux par Pierre VIGNAUD), plusieurs acteurs ont collaboré à ce projet. La conception et le suivi des travaux (Maîtrise d'Œuvre) ont été confiés à MICA Environnement, représenté par Pierre ROSSLER, avec l'appui technique des experts de Fertil'Innov Environnement pour la phytostabilisation (Assistant à Maîtrise d'Ouvrage).

La réalisation des travaux a été confiée à l'entreprise MTPS et ses sous-traitants ; la surveillance environnementale, à Antea Group ; et enfin, la coordination de la sécurité et de la protection de la santé, à Alpes Contrôle.

Nous souhaitons exprimer nos remerciements à l'ensemble des partenaires qui ont contribué au bon déroulement de ces travaux.

Quels besoins de refonctionnalisation des sols urbains pour développer l'agriculture de proximité ?

Approche de la Métropole Européenne de Lille

Anne Barbillon[1,2*], Jean-Rémi Mossmann[3], Samuel Coussy[3], Philippe Bataillard[3*], Jamila Bentrar[4], Mathieu Beauvillain[5], Robin Druart[5], Foucauld Watine[6], Pierre Destrailleur[6], Céline Demangeat[7], Samuel Leuchter[7], Constance Laloye[8], Thomas Pommier[8], François Pigaux[8], Valentine Ginard[9], Tanguy Latron[9]

[1,*] : AgroParistech Innovation, 22, place de l'Agronomie, 91120, PALAISEAU, auteur correspondant : anne.barbillon@agroparistech.fr

[2] : Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 22, place de l'Agronomie, 91120, PALAISEAU

[3,*] : BRGM, 3 av. Claude Guillemin - BP 36009 - 45060 ORLÉANS Cedex 2, auteur correspondant : p.bataillard@brgm.fr

[4] : Métropole Européenne de Lille, Direction Nature Agriculture et Environnement, 2 boulevard des Cités Unies, CS 70043, 59 040 Lille cedex

[5] : ID VERDE, 1 rue du Port Fluvial – CS 80065 – 59874 WAMBRECHIES CEDEX

[6] : Les Alchimistes 12 place Saint Hubert 59800 Lille

[7] : La Fabrique de l'Emploi, 33 rue George Potié, 59120, Loos

[8] : SETEC Energie Environnement, Immeuble Central Seine – 42-52 Quai de la Rapée -75583 Paris Cedex 12

[P] : Montachet Expertise et Conseil, 37 rue des Trois Mollettes, 59 000 Lille

Résumé

Le redéveloppement d'une agriculture de proximité en milieu urbain présente de nombreux avantages. Elle crée du lien social, génère des emplois nouveaux et répond à de multiples enjeux environnementaux. Elle ne peut toutefois se faire sans tenir compte des spécificités des sols susceptibles d'accueillir les projets et la présence potentielle d'impacts anthropiques liés aux usages passés. Dans ce contexte, un programme de recherche-action a été élaboré visant la mise en place de parcelles expérimentales au cœur de la ville de Loos (59). Les recherches portent sur la capacité du sol à nourrir l'Homme après remise en fonction et optimisation, et incluent la caractérisation du risque sanitaire en lien avec la présence possible de contaminants.

Introduction

Territoire en mutation, après un passé fortement marqué par son histoire industrielle, la métropole de Lille (MEL) compte 26 quartiers prioritaires dont 9 inscrits dans le Nouveau Programme National de Renouvellement Urbain [1], soit plus de 90 000 habitants. Ces quartiers sont en cours de transformation et constituent des lieux où se construit la ville de demain, souhaitée plus accueillante pour les populations et plus résiliente face aux changements globaux. Parmi les solutions pour atteindre de tels objectifs, figure le développement de l'agriculture urbaine, appuyé par le dispositif Quartiers Fertiles de la Métropole Européenne de Lille, et qui, par la diversité des lieux et des densités, crée du lien social en proposant de nouveaux services aux habitants, est génératrice d'emplois nouveaux et répond à de multiples enjeux sociaux et environnementaux, incluant l'adaptation au changement climatique.

Ce redéveloppement d'une agriculture de proximité pour le territoire métropolitain ne peut toutefois se faire sans tenir compte des spécificités des sols susceptibles d'accueillir les projets et la présence potentielle d'impacts anthropiques liés aux usages passés. Les questions de la fertilité, au sens large, des sols urbains, et de leur possible contamination en lien avec la présence de sources multiples de polluants en contexte urbain (circulation automobile, cheminées d'usine, dépôt de remblais pollués…) demandent des réponses claires avant de démultiplier les projets.

Dans ce contexte, un programme de recherche-action a été élaboré visant la mise en place de parcelles d'études au cœur de la ville de Loos (59), constituées de sols amendés ou construits à partir de ressources locales (argile et compost). Ces parcelles, mises en culture et aménagées par la Fabrique de l'emploi, une Entreprise à but d'Emplois créée en 2017 dans le cadre du dispositif « Territoire Zéro Chômeurs de Longue Durée », co-portée par la Métropole Européenne de Lille et les villes de Loos (59120) et de Tourcoing (59200), sont des lieux d'activités économiques et citoyennes pour le quartier [2]. La recherche-action vise à résoudre des problèmes concrets en renforçant « les dynamiques d'apprentissage collectives, en rupture avec les approches centrées sur l'encadrement des agriculteurs supposés guidés par la seule rationalité technique » [3] [4]. En pratique, les différents protocoles scientifiques sont amendés et finalement co-construits pour que toutes les parties se sentent pleinement concernées et actrices de l'étude réalisée. La préparation des parcelles d'étude, leur mise en culture, la fourniture des amendements, le suivi de certains paramètres et d'indicateurs de la qualité des sols sont également partagés, y compris avec les riverains intéressés par le projet.

Matériel et méthodes

Le protocole de recherche porte sur 2 sites d'études dont les premiers diagnostics ont montré de légers dépassements (pour certains ETM et HAP) des valeurs de référence VASAU 1 (Valeurs d'analyse de la Situation d'Agriculture Urbaine) du guide REFUGE, spécifiques ici au contexte de l'ancienne région Nord Pas de Calais [5]. Il est préconisé dans ce cas la réalisation d'une étude d'imprégnation des légumes cultivés couplée à une étude de risque sanitaire.

Une caractérisation indirecte des 4 fonctions des sols dont dépend particulièrement la production agricole, est réalisée pour les 2 sites. Ces fonctions sont les suivantes :

- Stockage, recyclage et transformation de la Matière Organique (MO),
- Rétention et fourniture d'eau et de nutriments aux organismes du sol et aux végétaux,
- Habitat des organismes du sol et contrôle de la biodiversité,
- Support physique stable pour les végétaux.

Les paramètres et indicateurs retenus pour les caractériser sont présentés dans le Tableau 1. Certains sont mesurés et interprétés dans le cadre d'ateliers faisant intervenir les riverains intéressés par le projet.

		Paramètre	Commentaire
Chimie du sol	1	pH	
	2	Paramètres agronomiques	Carbone organique, P "Olsen", azote Kjeldal, rapport C/N
	3	CEC et cations échangeables	Méthode cobaltihexamine - cation échangeables: Ca, Mg, Na, K
	4	Minéralogie	DRX dont argile avec quantification Rietveld
	5	Calcaire total	
	6	Perte de masse entre 60 et 105°C	Argiles minéralogiques gonflantes
	7	Lixiviation (pack ISDI)	Selon norme NF EN 12457-2
	8	Contaminants (contenu total)	8 ETM + 16 HAP + HCT
	9	Contaminants (dans les végétaux)	ETM
	10	Contaminants (dans les végétaux)	Multiresidus HAP
	11	Teneur en éléments majeurs du sol	Si, Al, Fe, Mn, Ca, Na, K, Mg, P, S
Physique du sol	12	Granulométrie 5 fractions	Après décarbonatation et minéralisation MO
	13	Stabilité des agrégats	Méthode Le Bissonnais
	14	Humidité	
	15	Perméabilité	Infiltrométrie
	16	Capacité de rétention en eau	
	17	Densité apparente	Cylindre
Biologie du sol	18	Respirométrie in situ	Respiromètre ECHO (analyse CO_2)
	19	Tea Bag Index	Turnover du carbone
	20	Biomasse végétale produite	Pesée biomasse humide et sèche
	21	Comptage vers de terre	Protocole moutarde tri manuel ou test bêche
	22	test VESS	Structure du sol
	23	Test de Berlèse	Observation des animaux du sol (macrofaune)
	24	Respirométrie au laboratoire	CO_2

Tableau 1 : Liste des paramètres de caractérisation et de suivi envisagés dans l'étude.

Un état des lieux initial est établi pour les deux sites. Il permet de cibler les fonctions qui doivent être améliorées sur le long terme et d'orienter la recherche des amendements nécessaires. Une fois amendés, les sols sont mis en culture et suivis pendant deux années en appliquant le programme analytique du Tableau 1.

Résultats et discussion

L'étude a débuté fin 2023 et les premières plantations ont été effectuées au printemps 2024. Les diagnostics initiaux des sols ont conduit à l'établissement d'un plan expérimental comprenant 4 parcelles de 4 X 7 m chacune, réparties sur 2 sites jusque-là utilisés comme espaces verts sous végétation herbacée.

Les résultats ont confirmé de légers dépassements en As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn et HAP dans les sols par rapport aux sols agricoles locaux.

Sur le plan de la fertilité, les sols de ces sites (horizon 0 – 20 cm) sont des limons fins, légèrement carbonatés, contenant environ 15% d'argiles granulométriques et 5% de matière organique (Tableau 2). Ils présentent un bon potentiel pour la culture maraichère mais dans l'objectif d'en faire des sols urbains particulièrement résilients, capables de stocker du carbone, des nutriments et de l'eau tout en présentant une bonne capacité d'infiltration, le choix a été fait de les amender avec un matériau argileux en amenant leur teneur en argile à hauteur de 25%. Pour cela, un gisement d'argile a été recherché et identifié à une quinzaine de km du site d'expérimentation (carrière en activité utilisée pour la fabrication de briques) et caractérisé (Tableau 2).

		Paramètres physico-chimiques							
Site - Maille	N*	**Argile** (%)	**Limon** (%)	**Sable** (%)	**Calcaire total** (%)	**MO** (%)	**Résistivité** (ohm.cm)	**pH eau**	**CEC** (cmol +/Kg)
CV - P1	3	16 ± 0,3	73 ± 0,3	11 ± 0,5	3 ± 0,4	4,8 ± 0,03	6810 ± 765	7,6 ± 0,05	14,2 ± 0,3
CV - P2	3	16 ± 1	72 ± 2	13 ± 1	3,2 ± 1,7	5,1 ± 0,1	7124 ± 1016	7,7 ± 0,1	14,2 ± 0,4
DG - P1	3	15 ± 1	66 ± 8	19 ± 8	5,9 ± 5,2	5,3 ± 1,7	7814 ± 513	7,8 ± 0,01	12,8 ± 0,6
DG - P2	3	14 ± 0,1	74 ± 1	12 ± 1	1,1 ± 0,9	3,8 ± 0,5	8047 ± 205	7,7 ± 0,1	12,1 ± 0,2
A1	1	59	37	4	0,2	1,0	364	3,3	22,8

Tableau 2 : Résultats d'analyse agronomique des sols initiaux (CV et DG – 2 échantillons composites de l'horizon 0-20 – 3 répétitions) et de l'argile de carrière prévue pour l'amendement (A1) (légende des couleurs : brun clair=valeur faible, brun moyen=valeur satisfaisante, brun foncé=valeur élevée, brun très foncé=valeur excessive).

Le choix des amendements s'est porté sur des matériaux locaux afin de limiter le plus possible l'empreinte carbone de la filière envisagée. Le compost est issu de la collecte et le traitement local des biodéchets par l'entreprise Les Alchimistes, partenaire du projet. Le choix a porté sur du compost non criblé en raison de son coût inférieur, et surtout, en vue de profiter de l'effet macro structurant des morceaux de bois dans le mélange final. La formation argileuse prélevée pour amender les sols contient environ 25% de smectite, 18% de kaolinite, 16% d'illite et 8% de chlorite (DRX réalisée au BRGM). Les argiles stabilisent la matière organique des sols par association de surface, la rendant moins disponible à la biodégradation. Ces associations renforcent le squelette des sols, augmentent sa microporosité et donc sa capacité de rétention en eau et lui confèrent une plus grande réactivité chimique vis-à-vis des nutriments nécessaires à la croissance des plantes. Il est donc attendu une amélioration significative de la fertilité des sols amendés. Chaque site comporte donc deux parcelles : l'une amendée par des argiles et du compost (non criblé), et l'autre recevant uniquement du compost en proportion identique. L'apport de compost a été calculé pour obtenir un ratio C_{org}/argiles de 1/8, optimal en termes de structure de l'horizon 0-20 cm [6].

L'incorporation des argiles dans le sol est une opération délicate qui a été réalisée en plusieurs étapes. Les argiles, directement issues de la carrière, sont effectivement plastiques, contenant environ 25% d'eau ; il est donc particulièrement difficile de les subdiviser en vue d'obtenir un mélange fin et homogène avec le sol initial et le compost. Elles ont d'abord été déposées en une couche d'environ 10 cm sur le sol à amender, puis recouvertes d'une couche de compost d'épaisseur similaire (Figure 1A). Le tout a ensuite été mélangé à l'aide d'une rotobêche tractée (Figure 1B) avant une homogénéisation et une division des mottes grâce à un motoculteur (Figure 1C).

A: couches d'amendements avant mélange

B: mélange après rotobêche

C: mélange après rotobêche et motoculteur

Figure 1 : Illustrations des étapes d'incorporation des amendements dans le sol

Suffisamment prolongée, cette dernière opération permet de subdiviser les mottes d'argile pour leur conférer une taille maximum de quelques cm. Mais il est, pour le moment, difficile de connaitre précisément la répartition de tailles de ces mottes au sein du mélange. L'objectif de cette préparation mécanique est de réaliser un mélange à haut potentiel d'agrégation, le plus homogène possible. Ce sont à présent les processus biologiques qui sont attendus pour générer des associations organo-minérales à l'échelle moléculaire. La vitesse à laquelle devraient apparaitre ces nouveaux édifices et leur conséquence sur la fonctionnalité des sols amendés constituent deux des questions scientifiques explorées au cours de ce travail.

Les premiers résultats de suivi *in situ* de la respirométrie à l'issue de cette phase d'amendement indiquent que les parcelles avec argiles émettent un peu moins de CO_2 que les parcelles témoin (Figure 2). Ce comportement devra cependant être confirmé dans la durée.

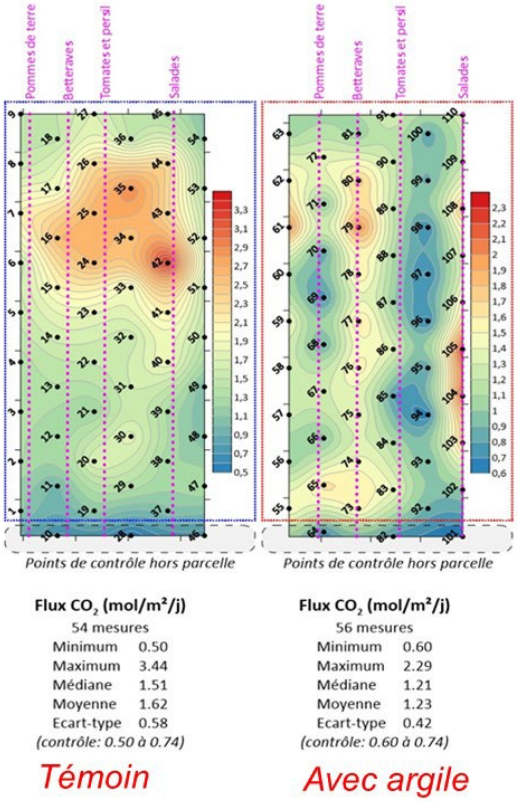

Figure 2 : Flux de CO_2 mesurés sur le site « Cantine Verte » (CV) sur la parcelle-témoin et la parcelle amendée avec argile

Les résultats d'analyse des légumes montrent des teneurs en polluants en moyenne inférieures aux valeurs réglementaires pour le Pb et le Cd, sauf pour le Cd dans les tomates ayant poussées sur un mélange compost/argile d'un des deux sites. Ce résultat, légèrement supérieur à la limite retenue, nécessitera d'être précisé ou infirmé lors de la seconde année de cultures. Pour les autres polluants analysés dans les légumes (Cu, Zn, Hg pour tous les légumes, 16 HAP dans les laitues), les résultats confirment leur présence dans les légumes, sans pouvoir à ce stade statuer du risque sanitaire associé. Ce sont les évaluations quantitatives des risques sanitaires, menées en 2025, qui permettront de l'évaluer. Par ailleurs, suite à cette première année d'analyses dans les légumes, quel que soit le polluant et le légume considéré, il n'y a pas de différence notable de teneurs ni entre les deux sites, ni entre les deux modalités de cultures.

Conclusions et perspectives

Cette étude s'inscrit dans un projet de renouvellement urbain d'envergure aux dimensions sociales, économiques, politiques et environnementales. Les recherches portent sur le sol urbain, objet concret et complexe à travers trois dimensions : sa fonction nourricière, sa capacité à préserver les villes de certains problèmes environnementaux *(inondations, îlots de chaleur, baisse de la biodiversité)* et le potentiel d'emplois et d'activités à créer, utiles aux territoires. D'une part, les données sur le fonctionnement physique, chimique et biologique de ces sols sont en cours d'acquisition et d'autre part, le groupement d'acteurs issu du politique, du milieu de l'entreprise, de l'associatif et de la recherche, poursuit la co-construction des imaginaires de demain pour donner une place ressource aux sols en cœur de villes. Enfin, l'ambition de cette étude visera à comparer l'impact carbone de deux scenarios : l'import classique de terres agricoles excavées à l'extérieur de la MEL vs. la construction de sol à partir de ressources locales.

Références

[1] ANRU, 2014, Le Nouveau Programme National de Renouvellement Urbain - https://www.anru.fr/le-nouveau-programme-national-de-renouvellement-urbain-npnru

[2] Métropole Européenne de Lille - Territoire zéro chômeur de longue durée - https://www.lillemetropole.fr/territoire-zero-chomeurs

[3] Dulcire, Michel, et al. Chapitre 9 - Recherche-action en partenariat et innovation émancipatrice. Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires, édité par Guy Faure et al., Éditions Quæ, 2018, https://books.openedition.org/quae/25461.

[4] Allard-Poesi F. et Perret V. La Recherche-Action. Y. Giordano. Conduire un projet de recherche, une perspective qualitative, EMS, pp. 85-132, 2003. https://hal.science/hal-01490609

[5] AgroParisTech, INRA, 2019, Caractérisation de la contamination des sols urbains destinés à la culture maraîchère et évaluation des risques sanitaires. 59 pages. https://www.inrae.fr/sites/default/files/guide_refuge.pdf

[6] Johannes et al., 2017, Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*,

302, Pages 14-21.

POTAGERS URBAINS ET AMENDEMENTS

Gestion et challenges environnementaux et sanitaires

Aurélie PELFRENE[1*], Karen PERRONNET[2], Valérie BERT[2], Véronique LAGERON[2], Géraldine BIDAR[1], Christophe WATERLOT[1], Elisabeth REMY[3], Brice LOUVEL[1], Sébastien DETRICHE[1], Liliane JEAN-SORO[4,7], Céline PERNIN[1], Thierry LEBEAU[5,6,7], René GUENON[7,8]

[1]Univ. Lille, IMT Nord Europe, Univ. Artois, JUNIA, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-59000 Lille, France, aurelie.pelfrene@junia.com, geraldine.bidar@junia.com, christophe.waterlot@junia.com, brice.louvel@junia.com, sebastien.detriche@junia.com, celine.pernin@univ-lille.fr

[2] Ineris, Unité Impact Sanitaire et Exposition, Direction Sites et Territoires, Parc Technologique Alata, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, karen.perronnet@ineris.fr, valerie.bert@ineris.fr, veronique.lageron@ineris.fr

[3]INRAE, UMR SADAPT, Université Paris-Saclay, elisabeth.remy-inrae@orange.fr

[4]Univ Gustave Eiffel, GERS-LEE, F-44344, Bouguenais, France, liliane.jean-soro@univ-eiffel.fr

[5]LPG-UMR 6112 CNRS-Université de Nantes-Université d'Angers, 2 rue de la Houssinière, F-44322 Nantes Cedex, France

[6]OSUNA, 2 rue de la Houssinière, F-44322 Nantes cedex 3, France

[7]IRSTV-FR CNRS 2488, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, BP 92101, F-44321 Nantes, France

[8]EPHor, Agrocampus Ouest Campus d'Angers, 2 rue Le Nôtre, F-49045 Angers cedex, France

Résumé

L'étude visait à évaluer l'intérêt d'amendements organiques et minéraux pour gérer des sols de potagers urbains présentant des contaminations géogènes et/ou anthropiques. Il s'agissait plus spécifiquement d'évaluer le potentiel de ces amendements pour réduire de façon durable la phytodisponibilité des éléments en trace ainsi que l'exposition des jardiniers et de leur famille via l'ingestion de particules de terre ou de légumes autoproduits et les risques sanitaires associés. Pour déterminer l'intérêt global de l'utilisation des 10 amendements testés, leur impact a été évalué sur des aspects environnementaux, agronomiques et d'exposition humaine. L'étude, réalisée sur trois jardins urbains, a montré que chaque situation est unique et qu'une étude spécifique, de l'expérimentation en pots jusqu'au sol en place, est nécessaire afin de sélectionner un amendement adéquat au contexte pédo-géo-climatique du jardin. Cette démarche a été plutôt concluante avec l'apport de compost pour le site présentant principalement une contamination en As et Pb d'origine géogène, mais reste toutefois limitée car n'entraînant pas de réel bénéfice quant à la réduction des expositions et des risques sanitaires pour le jardinier. La démarche d'apporter un ou des amendements sur un site n'est pas opérationnelle pour l'instant et lorsqu'elle est mise en œuvre, elle doit être réfléchie au cas par cas et selon un programme de surveillance de la qualité des végétaux sur plusieurs années.

Introduction

Le besoin de nature en ville, l'engouement pour le manger sain et le contexte socio-économique difficile ont conduit à sortir le jardinage de la désuétude [1]. Ceci concerne tant les jardins privatifs, le plus souvent attenant aux habitations, que les jardins collectifs. Il est fréquent d'observer ces derniers sur des délaissés urbains, le long d'axes routiers ou ferroviaires, à proximité de sites industriels en activité ou non, ou même sur d'anciennes friches industrielles ou urbaines. Or d'une façon générale, les sols urbains sont des milieux complexes, souvent très hétérogènes et qui peuvent, en fonction de leur histoire et/ou de leur environnement, présenter des qualités agronomiques médiocres et contenir des contaminants d'origines diverses et à des concentrations variables. Outre une contamination géogène, la contamination des sols peut en effet résulter de rejets passés et/ou actuels qu'ils soient d'origine industrielle ou urbaine, ou encore de différentes pratiques culturales des jardiniers. Si les sols de potagers, support de biomasses végétales et de biodiversité, représentent des valeurs foncières, agronomiques, patrimoniales et souvent affectives, les connaissances sur leur degré de contamination, leur qualité bio-physico-chimique, leur impact sur la qualité des légumes autoproduits et consommés restent encore insuffisantes et ceci, quel que soit le statut des potagers. Or, compte tenu des transferts de contaminants dans la chaîne alimentaire, des risques sanitaires liés à la consommation de denrées ne peuvent être écartés.

Parmi les techniques pouvant influer sur le comportement des polluants, notamment métalliques, dans les sols, l'apport de produits naturels ou synthétiques constitue une alternative au remplacement des sols contaminés et vise à réduire la mobilité, la biodisponibilité et plus particulièrement la phytodisponibilité des éléments en trace (ET) [2]. Ainsi, l'usage d'amendements organiques et/ou inorganiques est présenté dans la littérature comme une technique prometteuse. Les études concernant l'évaluation des effets des amendements sur le comportement des ET dans les sols de potagers sont toutefois peu nombreuses. En modifiant les paramètres physico-chimiques des sols, ces amendements peuvent influer sur les activités biologiques des sols, la spéciation des ET et réduire *in fine* la disponibilité environnementale et la biodisponibilité de ces derniers.

Le recours aux amendements comme méthode de gestion de sols de potagers contaminés reste encore assez peu étudié et en particulier dans des conditions *in situ*.

La présente étude avait pour objectif de traiter l'ensemble de la chaîne depuis l'expérimentation jusqu'à l'aide à la décision pour des végétaux de potagers destinés à la consommation humaine. L'enjeu était d'étudier l'intérêt d'amendements, notamment de composts autoproduits et d'amendements minéraux, pour gérer des sols de potagers urbains présentant des contaminations métalliques géogènes et/ou anthropiques ne remettant pas en cause l'usage des jardins potagers.

Matériel et méthodes

Dans l'objectif d'étudier l'intérêt d'amendements organiques et minéraux pour gérer des sols de potagers urbains contaminés en ET et face à la diversité des produits identifiés dans la littérature comme efficace pour réduire la (bio)disponibilité environnementale et/ou toxicologique, des expérimentations *ex situ* en milieu semi-contrôlé ont été réalisées en vue de réduire *in fine* le nombre d'amendements à tester *in situ*. Ces expérimentations *ex situ*, réalisées en 2 temps, ont porté sur 3 terres présentant des contextes géo-pédo-climatiques différents (une terre provenant d'une parcelle d'un jardin collectif à Nantes, une terre provenant d'un jardin privé à Evin-Malmaison et une terre provenant d'une parcelle d'un ancien jardin collectif à Lille) :

- 15 modalités testées (dont 1 témoin non amendé) en expérimentation 1 pour évaluer les amendements sur la disponibilité des ET au regard de deux extractants chimiques : NH_4NO_3 permettant de simuler une extraction (mobilité) des ET à court terme et EDTA pour simuler leur extraction par les plantes à long terme [3] ;
- 7 modalités testées (dont 1 témoin non amendé) en expérimentation 2 pour étudier plus spécifiquement la réponse d'un modèle végétal (la laitue).

Dans le cadre de ces expérimentations *ex situ*, les effets des amendements ont été évalués sur les paramètres physico-chimiques et biologiques, sur la disponibilité environnementale (extractions chimiques), sur la potentialité agronomique des sols déterminée par la biomasse végétale et sur l'exposition humaine au regard de l'accumulation des ET dans la laitue ainsi que la bioaccessibilité orale des ET en lien avec l'ingestion de particules de terre.

Pour déterminer l'intérêt global de l'utilisation de certains amendements en conditions *in situ*, un système de scores a été établi pour prendre en compte l'impact des amendements sur ces aspects (environnemental, agronomique et exposition humaine). Ces scores ont donc été utilisés comme un outil d'aide à la sélection des amendements testés *in situ* sur trois jardins et sur lesquels 5 légumes ont été cultivés (radis, carotte, pomme de terre, laitue et tomate). Les expérimentations *in situ* ont été complétées par une évaluation des risques sanitaires associés à la pratique du jardinage et la consommation de légumes auto-produits, et pour laquelle un scénario « générique » commun a été décliné sur les 3 jardins au moyen du logiciel multimédia MODUL'ERS, développé par l'Ineris.

Résultats et discussion

Au regard des résultats obtenus à l'issue de l'expérimentation *ex situ*, le bilan suivant a été fait et est illustré en Figure 1 :

- pour la terre du jardin de Nantes (avec des concentrations totales géogènes de 32 mg/kg en As, 238 mg/kg en Pb et 77 mg/kg en Zn), les amendements de compost seul ou en mélange avec la zéolite, le terreau de semis et la fleur de chaux sont globalement efficaces, le compost ayant obtenu le score le plus élevé en raison de son efficacité pour réduire la disponibilité de Pb, Zn et As ;
- pour la terre du jardin d'Evin-Malmaison (avec des concentrations totales de 6,3 mg/kg en Cd, 264 mg/kg en Pb et 337 mg/kg en Zn), le compost seul ou en mélange avec la zéolite et la fleur de chaux sont globalement efficaces, la fleur de chaux obtenant le score le plus élevé en raison de sa capacité à réduire la disponibilité de Cd, Pb et Zn ;
- pour la terre du jardin de Lille (avec des concentrations totales de 384 mg/kg en Pb et 399 mg/kg en Zn), tous les amendements testés semblent efficaces. Le compost mélangé à la zéolite a obtenu le meilleur score grâce à ses capacités à réduire la disponibilité de Pb et Zn ; la poudre d'os présente un intérêt également.

Ces résultats ont permis de choisir les amendements suivants pour les expérimentations *in situ (en complément d'un témoin non amendé)* :

- pour le jardin de Nantes : compost, fleur de chaux, terreau de semis ;
- pour le jardin d'Evin-Malmaison : fleur de chaux;
- pour le jardin de Lille : compost seul et en mélange avec la zéolite, poudre d'os, fleur de chaux.

D'une manière générale, l'apport d'amendements a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- aucune diminution des concentrations en Cd (carotte, radis, tomate et pomme de terre sur Evin-Malmaison) et en Pb (carotte sur Lille et Evin-Malmaison) qui étaient supérieures aux teneurs maximales autorisées dans les denrées alimentaires commercialisées sur le marché européen ; une augmentation du transfert des ET (notamment As et Pb sur Nantes) avec l'ajout du terreau de semis et dans une moindre mesure avec la fleur de chaux ;
- absence d'effets notables sur la bioaccessibilité orale des ET dans les sols ;
- absence de réduction significative des indices de risques sanitaires globaux ; et même une augmentation significative des indices de risques sanitaires globaux avec l'apport de fleur de chaux sur le site d'Evin-Malmaison (Quotient de Danger du Cd) et l'apport de terreau de semis sur Nantes (Excès de Risques Individuel de l'As).

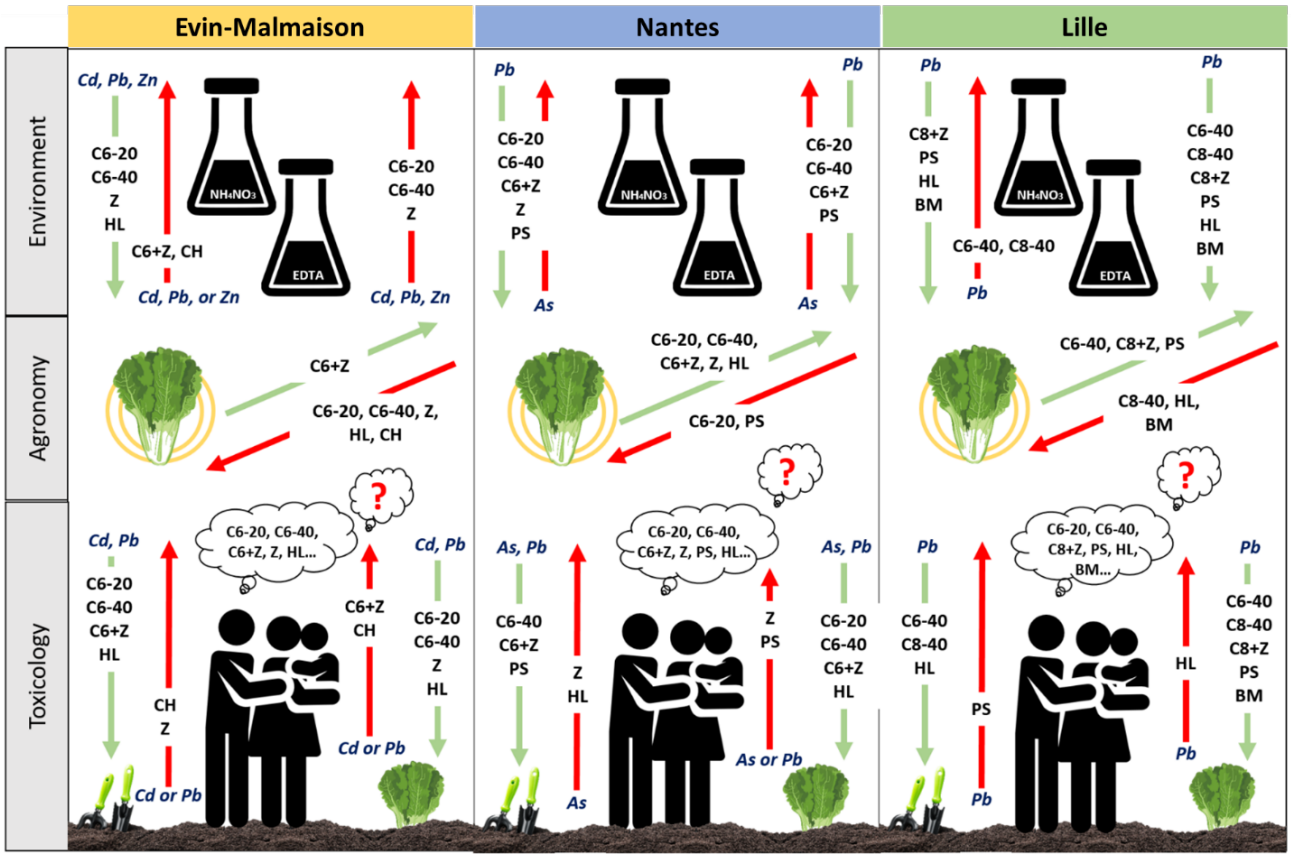

Figure 1. Illustration de l'impact environnemental à court et long termes (évalué avec NH_4NO_3 et EDTA), agronomique (évalué par la biomasse produite) et toxicologique (évalué par la bioaccessibilité orale et le facteur de bioconcentration dans la laitue) des amendements par rapport à leurs témoins plantés respectifs de l'expérimentation 2. C6-20, C6-40 et C8-40 : compost jeune (6 mois) ou mature (8 mois) à 20 ou 40 t/ha ; C6+Z et C8+Z : compost 6 ou 8 mois à 20 t/ha mélangé avec de la zéolite à 10% ; Z : zéolite chabazite ; HL : fleur de chaux ; PS : terreau de semis ; BM : poudre d'os ; CH : corne broyée. La flèche verte indique une réponse favorable à l'amendement. La flèche rouge indique une réponse défavorable induite par l'amendement.

Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus sur les expérimentations *ex situ* ne se sont pas totalement confirmés avec les expérimentations *in situ*, illustrant l'impact du changement d'échelle et des mises en culture. L'étude de ces trois jardins a montré que chaque jardin est unique et qu'une étude spécifique, de l'expérimentation en pots jusqu'au sol en place, est nécessaire afin de sélectionner un amendement adéquat au contexte pédo-géo-climatique du jardin. Cette démarche a été plutôt concluante avec l'apport de compost pour Nantes, un site présentant principalement une contamination en As et Pb d'origine géogène, mais reste toutefois limitée car n'entraînant pas de réel bénéfice quant à la réduction des expositions et des risques sanitaires pour le jardinier.

La démarche d'apporter un ou des amendements sur un site n'est pas opérationnelle pour l'instant et lorsqu'elle est mise en œuvre, elle doit l'être au cas par cas et selon un programme de surveillance sur plusieurs années. La présence de polluants, notamment des ET, dans les sols des jardins potagers en général, qu'ils soient collectifs ou privés, est un problème d'actualité. Rappelons néanmoins tous les bienfaits de ces espaces en termes de liens sociaux, de lieux pédagogiques, de biodiversité, d'économies et tout simplement des lieux favorisant la santé morale et physique. Ces espaces et ces sols sont à préserver car ils rendent de nombreux services écosystémiques. Il est important de poursuivre le développement des moyens de transmission des connaissances acquises vers les associations et les jardiniers amateurs ainsi que les outils de science participative.

Références

[1] ADEME, Douay F., Marot F., Schwartz C. (2019). Jardins potagers : retour sur 30 ans de recherche en connaissance, évaluation et gestion des impacts. Rapport Ademe, 65 pp.

[2] ADEME, Bidar G., Waterlot C., Sahmer K., Pelfrêne A., Pourrut B., Schwartz C., Douay F. (2017). PhytExPPo : Phytodisponibilité des ETM pour les plantes potagères et extrapolations dans la quantification de l'exposition des consommateurs – Rapport, 176 pp.

[3] Schnackenberg A., Bidar G., Bert V., Cannavo P., Détriché S., Douay F., Guenon R., Jean-Soro L., Kohli A., Lebeau T., Perronnet K., Vidal-Beaudet L., Waterlot C., Pelfrêne A. (2022). Effects of inorganic and organic amendments on the predicted bioavailability of As, Cd, Pb and Zn in kitchen garden soils. Advances in Environmental and Engineering Research 3(1):30.

Remerciements

Les auteurs remercient l'ADEME et tout particulièrement Franck Marot pour leur soutien dans le cadre du projet POTAGERS, ainsi que la Ville de Lille et la Ville de Nantes pour les accès aux sites de Bazinghien et de Les Eglantiers et leur accompagnement dans la réalisation du projet.