



Agromine et systèmes photovoltaïques sur friche industrielle

Julien Ancousture, Pierre Leglize, Y.B. Assoa, Emile Benizri

► To cite this version:

Julien Ancousture, Pierre Leglize, Y.B. Assoa, Emile Benizri. Agromine et systèmes photovoltaïques sur friche industrielle. 5eme rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, ademe, Feb 2025, Paris, France. <hal-04947202>

HAL Id: hal-04947202

<https://hal.science/hal-04947202v1>

Submitted on 14 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ETALAB - Open licence

AGROMINE ET SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES SUR FRICHE INDUSTRIELLE

Quel dispositif optimal pour le couplage plantes hyperaccumulatrices et systèmes photovoltaïques ?

Julien ANCOUSTURE^{1,2}, Pierre LEGLIZE¹, Ya Brigitte ASSOA^{2,*}, Emile BENIZRI^{1,*}

¹ : Université de Lorraine, INRAE, Laboratoire Sols et Environnement, 54000 Nancy, France

² : Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, Campus Ines, 73375 Le Bourget du Lac

* contact : ya-brigitte.assoa@cea.fr, emile.benizri@univ-lorraine.fr

Résumé

Les sols de friches industrielles peuvent présenter une contamination en Eléments Traces Métalliques qui limite les services écosystémiques rendus par ces surfaces. Ces zones peuvent être réhabilitées par la mise en place de l'agromine. Cependant, ce processus est trop lent pour être rentable sur le court terme. L'installation de modules photovoltaïques (PV) pourrait améliorer la rentabilité durant la période de bioremédiation. Ainsi, le projet Voltagromine a pour objectif de déterminer le compromis optimal entre la production d'électricité et le développement de plantes hyperaccumulatrices. Pour cela, un premier dispositif expérimental a été mis en place sur un site pilote afin d'évaluer les interactions entre ces deux formes de production pendant environ quatre mois. Ce site pilote comprenait des modules PV monocristallins opaques et bifaciaux semi-transparents sous lesquels des bacs de culture d'une plante hyperaccumulatrice, *Noccaea caerulea* (Nc), étaient disposés en plus de bacs de référence exposés au soleil. Divers paramètres ont été mesurés, tels que la surface de recouvrement, la biomasse végétale sèche de Nc et les températures des modules PV. Concernant les couverts de Nc, les plantes à l'ombre d'un module PV étaient jusqu'à 5,5 fois plus développées que celles sans ombrage. De plus, les couverts de Nc semblaient augmenter le ratio de performance des modules PV de 18%. Des analyses agronomiques et microbiologiques sont en cours afin d'étudier l'impact du couplage sur la qualité des sols.

Introduction

Dans un contexte de dérèglement climatique mondial, l'Union Européenne s'est engagée à atteindre une neutralité carbone d'ici 2050 [1]. Pour cela, l'utilisation d'énergies fossiles doit être réduite au profit des énergies renouvelables. Pour réaliser cette transition énergétique, le développement du photovoltaïque (PV) est prometteur. En France, le PV représente une faible part du mix énergétique annuel estimée à environ 3 %, avec une capacité de production d'environ 15 GW [2, 3]. En conséquence, le ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires avait fixé un objectif de capacité de production totale de 100 GW pour 2050 [4]. Cependant, la production optimale d'énergie électrique par des systèmes PV nécessite la plupart du temps une grande surface. Plusieurs opportunités pour intégrer le PV existent (e.g., les bâtiments, les véhicules), mais seules les installations au sol seraient en mesure de répondre pleinement à cet objectif. Néanmoins, la surface de sol disponible par pays est limitée. Ces dernières années, l'agrovoltisme, qui vise à définir un couplage et un compromis entre l'agriculture et la production d'énergie PV, s'est développé et représente une opportunité pour augmenter la capacité de production d'électricité PV [5]. Ce procédé permet d'optimiser l'espace situé sous les modules PV, souvent inutilisé. Cependant, la mise en place de systèmes PV peut potentiellement artificialiser les sols et influencer le rendement des activités agricoles [6, 7]. De plus, le gouvernement français a fixé un objectif de « Zéro Artificialisation Nette » des espaces Naturels, Agricoles et Forestiers dans le cadre du Plan Biodiversité [8].

Ainsi, une autre opportunité pour développer le PV est de réaliser la production d'énergie sur des sols délaissés, tels que les friches industrielles. En France, la surface de ces sites est de plus de 150 000 ha [9]. Ces zones représentent un potentiel élevé de surfaces disponibles et valorisables. Cependant, les friches industrielles sont des surfaces marquées par d'anciennes activités anthropiques, souvent contaminées par des Eléments en Traces Métalliques (ETMs) et fournissant potentiellement peu de services écosystémiques (e.g., contrôle de l'érosion, stockage du carbone) [10, 11, 12]. Ainsi, ces sites peuvent être réhabilités à l'aide de techniques physico-chimiques ou par l'excavation des sols contaminés [13]. Cependant, ces méthodes sont coûteuses et peu respectueuses de l'environnement, contrairement à la filière de l'agromine, qui couple la phytoextraction des ETMs par des plantes hyperaccumulatrices à un procédé métallurgique spécifique adapté aux bio-minerais récoltés [14, 15].

L'agromine répond aux défis de la gestion de la pollution des friches industrielles, mais ce processus est lent et peu rentable à court terme. Dans le cas de l'agromine d'une friche industrielle, une approche dite écovoltaïque, consistant à valoriser des surfaces actuellement inutilisées sous les modules PV de centrales solaires, pourrait être mise en œuvre [16]. Ainsi, le système PV végétalisé global couplant la production d'électricité PV et l'agromine, appelé Voltagromine, permettrait la génération de revenus grâce à la production d'électricité PV pendant la mise en œuvre du procédé d'agromine.

A long terme, Voltagromine permettrait également de générer des revenus grâce à la valorisation de métaux stratégiques biosourcés, tout en réhabilitant les friches industrielles grâce à l'amélioration du bouquet de services écosystémiques rendus par ces surfaces. L'approche globale de Voltagromine est originale et inexplorée. Cependant, le meilleur compromis entre la production d'électricité PV, le développement de plantes hyperaccumulatrices et la phytoremédiation des sols doit être déterminé. Dans ce cadre, un dispositif expérimental pilote a été mis en place depuis 2023, pour étudier le développement d'une plante hyperaccumulatrice, *Noccaea caerulescens* (Nc), sous des modules PV. Sur ce site, l'impact *in situ* des modules PV sur le développement de Nc et l'impact du couvert végétal de Nc sur la production d'énergie PV est en cours d'évaluation. En parallèle, un modèle numérique thermique et électrique, est en cours de développement. Il permettra de prédire le rendement électrique des modules PV et l'influence du couvert végétal sur la production d'énergie PV. En effet, la présence du couvert végétal pourrait réduire la température du module PV, qui est un paramètre clef de sa performance électrique.

Ce travail présente les résultats majeurs obtenus sur le site pilote concernant l'effet de modules PV sur le développement de plantes hyperaccumulatrices et l'effet du couvert végétal de Nc sur la performance des modules PV.

Matériel et méthodes

Le dispositif expérimental pilote a été mis en place sur le site du CEA à Le Bourget du Lac (Savoie, France), pour une durée de 4 mois (du 13 juillet 2023 au 7 novembre 2023) afin d'évaluer l'effet des modules PV sur la croissance du couvert végétal de Nc et réciproquement l'effet du couvert végétal sur leurs performances électriques. Ce site pilote comprenait des modules PV opaques en silicium monocristallin (Solarworld et Panasonic), ainsi que des modules PV semi-transparents bifaciaux en silicium monocristallin (Jolywood), orientés vers le sud et inclinés à 30°. Sur ce site pilote, 21 bacs de culture de 1 m² contenant chacun de la terre végétale et 49 plants de Nc ont été placés. Sous chaque type des modules PV, 6 bacs de culture ont été installés, respectivement dénommés OP1 et OP2 pour les modules PV opaques Solarworld et Panasonic, et ST pour les modules PV semi-transparents Jolywood. Trois bacs de culture sur les 6 étaient constamment à l'ombre des modules PV (OP1.Sh, OP2.Sh et ST.Sh), tandis que les 3 autres étaient exposés à la fois au soleil et à l'ombre des modules PV au cours de la journée (OP1.Su, OP2.Su et ST.Su). En outre, 3 bacs de culture, sans aucune influence de l'ombre des modules PV, ont été positionnés sur le site et étaient nommés bacs C.

A partir de l'instrumentation installée sur le site, diverses mesures thermiques, aérauliques, électriques et météorologiques ont été réalisées. Les températures des modules PV ont été obtenues à l'aide de thermocouples de type T (JUMO) fixés sous une cellule PV au centre de la face arrière de chaque module PV. Ces mesures ont permis le calcul du ratio de performance (P_r) des modules PV sans couvert végétal sous-jacents ($P_{r.C}$) et avec des couverts végétaux sous-jacents ($P_{r.OP}$) selon l'équation de Kahlid *et al.* [17].

Au niveau du sol des bacs de culture, diverses mesures ont été réalisées incluant la mesure des éléments majeurs et mineurs totaux, la mesure du carbone (C) et de l'azote (N) total, ainsi que du C organique, la mesure des éléments majeurs et mineurs biodisponibles, la mesure du pH, la mesure de la biomasse microbienne (carbonée et azotée), la mesure d'activités enzymatiques microbiennes (arylsulfatase, β -glucosidase, uréase et phosphatase alcaline), ainsi qu'une caractérisation de la diversité bactérienne des sols.

Au niveau des couverts végétaux de Nc, diverses mesures ont été réalisées incluant la biomasse sèche, la surface de recouvrement des bacs, les éléments majeurs et mineurs totaux, la mesure du C et de l'N, des pigments photosynthétiques (chlorophylles, anthocyanes et flavonoïdes). Concernant la biomasse sèche de Nc, elle a été mesurée après récolte (72 h à 40°C) et les surfaces de recouvrement de Nc ont été mesurées à l'aide de photographies prises dans le spectre des longueurs d'onde visibles et de la macro PHENOPSIS (LEPSE-INRAE, France) du logiciel ImageJ.

A partir de la mesure des éléments mineurs totaux de Nc et du sol, les facteurs de bioconcentration (BCF) de Nc ont été déterminés, pour le cadmium (Cd), le nickel (Ni) et le Zinc (Zn) (*i.e.*, les métaux potentiellement hyperaccumulés par Nc), avec le rapport entre la concentration en ETMs dans les parties aériennes de Nc à la récolte et la concentration en ETMs totaux du sol en début d'expérimentation [18]. Un BCF supérieur à 1 indique l'aptitude de la plante à stocker les ETM à des concentrations élevées dans ses parties aériennes à partir de teneurs initiales totales dans les sols plus faibles.

Pour chaque condition de culture OP1.Su, OP1.Sh, ST.Sh et C, un capteur mesurant le flux de photons photosynthétiques (Photosynthetic Photon Flux (PPF)) dans le spectre du rayonnement photosynthétiquement actif (Photosynthetically Active Radiation (PAR)) des couverts végétaux a été installé (Quantum PAR SQ321, Apogee). Ce capteur permet d'évaluer la quantité de photons reçus par le couvert selon les conditions d'ombrage dues aux PV. A partir du PPF mesuré, l'efficacité de photoconversion de l'ensoleillement en biomasse sèche, nommée Radiation Use Efficiency (RUE), a été déterminée sur la durée de l'expérimentation selon l'équation

suivante :

$$RUE (\%) = \left(\frac{\frac{\beta_x}{Z_x} - \frac{\beta_C}{Z_C}}{\frac{\beta_C}{Z_C}} \right) * 100$$

où x correspond aux bacs de culture (*e.g.*, OP1.Su, OP2.Sh), C correspond aux bacs de culture sans l'ombrage des modules PV, β correspond à la biomasse sèche de Nc (en g), Z correspond au pourcentage de transmission du PPF. Dans cette équation, un indice supérieur à 1 correspond à une RUE supérieure au bac de culture C.

Dans cette étude, l'analyse statistique des données obtenues a été réalisée dans l'environnement RStudio (R v.4.0.3) [19]. La normalité des données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk et l'homoscédasticité des variances par le test de Bartlett. Une fois ces conditions remplies, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée en utilisant le test post hoc de Tukey et les différences étaient considérées comme significatives pour une valeur de $p \leq 0,05$.

Résultats et discussion

Les résultats majeurs, à savoir les surfaces de recouvrement et la RUE ainsi que le ratio de performance des modules PV selon leurs températures en face arrière, sont présentés dans la Figure 1 et 2. Les BCF de Nc sont représentés dans le Tableau 1. Concernant les surfaces de recouvrement de Nc après 116 jours de culture, la surface de recouvrement de C était significativement plus faible que celles de OP1.Su et OP2.Su (facteur de 2,8), et que celles de OP1.Sh, OP2.Sh et ST (facteur de 5,5) (Figure 1.A). En outre, les surfaces de recouvrement de OP1.Su (0,134 m²) et OP2.Su (0,135 m²), ainsi que celles de OP1.Sh (0,233 m²) et OP2.Sh (0,223 m²), avaient des valeurs proches. Concernant ST, les surfaces de recouvrement de ST.Su et ST.Sh étaient proches l'une de l'autre (respectivement, 0,234 et 0,222 m²). Ainsi, l'exposition à un ensoleillement direct implique un impact négatif sur le développement des plantes, tandis que les modules PV apparaissent avoir un effet favorable sur le développement des plantes, en réduisant l'exposition à l'ensoleillement direct.

Sur la durée de l'expérimentation, le pourcentage de transmission du PPF au niveau des couverts végétaux était de 100 % pour les bacs de culture C, 51 % pour les bacs de culture ST, 22 % pour les bacs OP1.Sh – OP2.Sh et 10 % pour les bacs OP1.Su – OP2.Su. Après 116 jours de culture, les couverts végétaux C avaient une biomasse sèche 2 à 3 fois inférieure à celle des autres conditions de culture (e.g., 9,3 g contre 18,7 g pour OP1.Su et 29,9 g pour ST.Su). Ces différences étaient significatives entre C et ST.Su. Les couverts végétaux ST.Su avaient la biomasse sèche la plus élevée (i.e., +25,9 % et +37,6 % par rapport à OP2.Sh et C) suivis par OP2.Sh, OP2.Su, ST.Sh, OP1.Sh, OP1.Su et C. D'après le PPF et la biomasse sèche, la RUE la plus élevée des couverts végétaux était celle de OP2.Sh, suivie de celle de OP1.Sh, OP2.Su, OP1.Su, ST.Su et ST.Sh (Figure 1.B). En effet, par rapport à l'ensoleillement reçu par les bacs de culture C, les couverts végétaux de Nc des bacs de culture OP2.Sh avaient converti 21 fois plus efficacement l'ensoleillement reçu en biomasse sèche. Pour les autres bacs de culture, l'efficacité de photoconversion des couverts végétaux était plus de 18 fois supérieure pour OP1.Sh, plus de 9 fois pour OP2.Su, 8 fois pour OP1.Su, 5 fois pour ST.Su et 3 fois pour ST.Sh en comparaison de C. Le RUE était significativement plus élevé pour OP1.Sh et OP2.Sh, en comparaison à l'ensemble des autres conditions. Ainsi, les conditions de culture de Nc sous des modules PV était toujours plus efficace pour convertir l'ensoleillement en biomasse sèche.

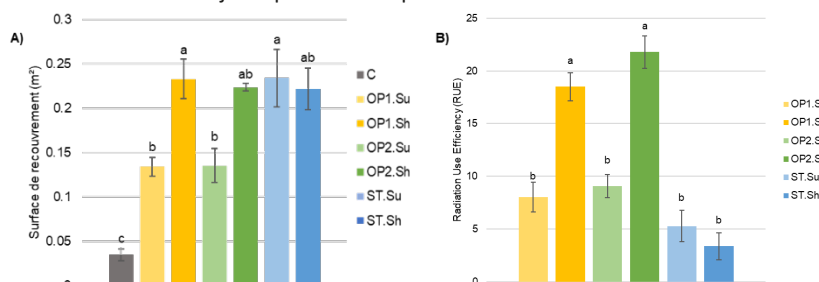


Figure 1 : Développement de Nc à T116 jours. A) Surface de recouvrement de Nc. B) RUE des couverts végétaux positionnés sous les modules PV en comparaison des couverts végétaux des bacs de culture C. La moyenne (n= 3) et \pm l'erreur standard suivie de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les conditions considérées à une valeur $p \leq 0,05$, évaluée par ANOVA avec test post hoc de Tukey

A la fin de l'expérimentation, les BCF de Nc concernant le Cd et le Zn étaient fortement supérieurs à 1 montrant que la capacité de Nc à accumuler ces éléments à partir du sol, n'a pas été affectée par la présence des modules PV (Tableau 1). Concernant le Ni, les BCF étaient tous inférieurs à 1 quel que soit la position des bacs. Globalement, les valeurs de BCF sont proches quel que soit les conditions de culture. La seule différence observée concerne les BCF du cadmium pour OP1.Sh et OP1.Su avec une valeur significativement plus importante pour OP1.Sh. Ceci montre que malgré les différences observées au niveau du développement et de l'état physiologique de Nc, sa capacité à accumuler les métaux n'a pas été modifiée. Cependant, en raison du meilleur développement des couverts végétaux à l'ombre ainsi que sous les modules PV semi-transparents, ceux-ci avaient accumulés jusqu'à 5,5 fois plus de Cd et Zn en comparaisons des couverts végétaux C.

Tableau 1 : Facteur de bioconcentration de Nc à T116 jours. La moyenne (n= 3) et \pm l'erreur standard suivie de lettres différentes indiquent des différences significatives entre les conditions considérées à une valeur $p \leq 0,05$, évaluée par ANOVA avec test post hoc de Tukey

Condition de culture	Cd	Ni	Zn
C	48.05 \pm 7.91 ab	0.64 \pm 0.08 a	43.18 \pm 5.23 a
OP1.Sh	67.34 \pm 7.73 a	0.67 \pm 0.1 a	59.39 \pm 9.18 a
OP1.Su	35.81 \pm 7.68 b	0.46 \pm 0.05 a	42.27 \pm 9.94 a
OP2.Sh	50.3 \pm 1.59 ab	0.43 \pm 0.03 a	38.03 \pm 0.65 a
OP2.Su	53.01 \pm 2.4 ab	0.58 \pm 0.02 a	49.58 \pm 5.79 a
ST.Sh	54.2 \pm 5.91 ab	0.58 \pm 0 a	63.12 \pm 6.65 a
ST.Su	53.77 \pm 4.5 ab	0.66 \pm 0.05 a	63.76 \pm 5.65 a

Dans le cadre du traitement des données de température des modules PV, la Figure 2 présente les résultats obtenus pour les P_r de Pr.C et de Pr.OP. Sur le mois d'octobre, les P_r de Pr.C et de Pr.OP diminuaient avec l'augmentation de la température en face arrière des modules PV. En outre, la moyenne journalière du P_r de Pr.C était de 0,35 et celle de Pr.OP était de 0,42. Ainsi, la présence d'un couvert végétal sous-jacent aux modules PV a augmenté le ratio de performance des modules PV et une amélioration de 18% a été mesurée dans cette étude.

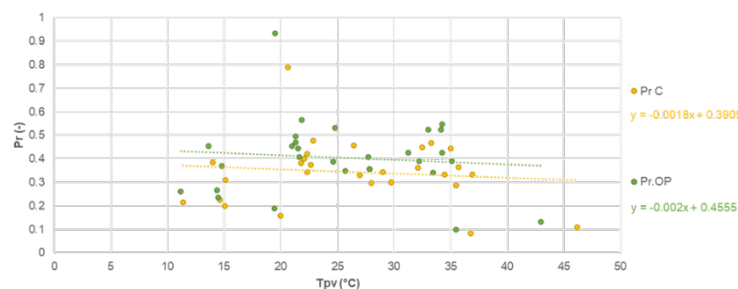


Figure 2 : Ratio de performance des modules PV sur le mois d'octobre selon la température en face arrière des modules PV. Pr.C correspond au module PV sans couvert végétal sous-jacents et Pr.OP correspond au modules PV avec couvert végétal sous-jacents

Conclusions et perspectives

Ces résultats montrent que la culture de *Nc* a été affectée par un ensoleillement direct, alors que la culture sous les modules PV a un effet protecteur sur le développement des couverts végétaux. Parmi les différents systèmes PV, les modules PV bifaciaux semi-transparents fournissent la réduction d'ensoleillement la plus efficace à l'exposition directe au soleil, entraînant une augmentation de la biomasse végétale. Cependant, malgré la quantité la plus faible d'ensoleillement, les couverts végétaux positionnés sous les modules PV opaques ont été les plus efficaces pour convertir l'ensoleillement en biomasse. Pour chaque type de modules PV, l'emplacement ombragé est le plus propice au développement de *Nc*. De plus, la présence de couverts végétaux semble réduire la température en face arrière des modules PV et améliorer de 18% leur ratio de performance. Une première analyse des concentrations en ETMs de *Nc* et du sol montre que les BCF sont globalement similaires quel que soit le positionnement des couverts végétaux par rapport aux modules PV.

En perspectives, l'analyse de différents paramètres mesurés, tels que la teneur en carbone et en azote des sols, ainsi que la diversité bactérienne tellurique permettront de cerner un potentiel effet du couplage entre la production d'électricité PV et l'agromine sur l'amélioration de la qualité physico-chimique et biologique des sols.

Références

- [1] Kuhn, T.E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., Neuhaus, D.H., 2021. Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV). *Energy Build.* 231, 110381. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110381>
- [2] Gestionnaire du réseau de transport. (2021). Production totale. https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/production_totale/
- [3] International Renewable Energy Agency. (2022). Renewable Capacity Statistics 2022. <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>
- [4] Vie publique. (2022). Déclaration de M. Emmanuel Macron, Président de la République, sur la politique de l'énergie, à Belfort le 10 février 2022. <https://www.vie-publique.fr/discours/283773-emmanuel-macron-10022022-politique-de-lenergie>
- [5] Mamun, M.A.A., Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N.A., Aziz, A.A., 2022. A review of research on agrivoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 161, 112351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>
- [6] Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P., 2021. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agron. Sustain. Dev.* 41. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- [7] Fu, J., Li, C.-H., Zhao, J.-R., Ma, L., Liu, T.-X., 2009. Shade-tolerance indices of maize: Selection and evaluation. *Chin. J. Appl. Ecol.* 20, 2705–2709.
- [8] Portail de l'artificialisation des sols. (2023). Parution des données de consommation d'espaces 2009-2022. <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/parution-des-donnees-consommation-espaces-2009-2022>
- [9] Cerema. (2023). Cartofriches : plus de 8300 sites en friches répertoriés et caractérisés, l'API données foncières du Cerema en accès libre. <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cartofriches-plus-8300-sites-friches-repertories>
- [10] Morel, J.L., Chenu, C., Lorenz, K., 2014. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J. Soils Sediments* 15, 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
- [11] Salemaa, M., Vanha-Majamaa, I., Derome, J., 2001. Understorey vegetation along a heavy-metal pollution gradient in SW Finland. *Environ. Pollut.* 112, 339–350. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00150-0)
- [12] Salisbury, A., Gallagher, F.J., Parag, H.A., Meneses-Florián, L., Holzapfel, C., 2021. Plant diversity increases in an urban wildland after four decades of unaided vegetation development in a post-industrial site. *Urban Ecosyst.* 24, 95–111. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01018-x>
- [13] Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Sci. Total Environ.* 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- [14] Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere* 91, 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- [15] Morel, J.-L., 2013. Using plants to “micro-mine” metals. In: <http://www.inra.fr/en/Scientists-Students/Biomass/All-the-news/Using-plants-to-micro-mine-metals>
- [16] Grison, C., Cases, L., Le Moigne M., Hossaert-McKey M., 2021. Photovoltaïsme, agriculture et écologie : de l'agrivoltaïsme à l'écovoltaiïsme, Collection écologie-environnement. ISTE editions Ltd, London SW19 4EU, UK, 172 pages.
- [17] Khalid, A.M., Mitra, I., Warmuth, W., Schacht, V., 2016. Performance ratio—Crucial parameter for grid connected PV plants. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 65, 1139–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.066>
- [18] Van der Ent, A., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Pollard, A.J., Schat, H., 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant Soil* 362, 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1287-3>
- [19] RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>.

Remerciements

Ce travail a été partiellement financé par l'appel à projets 2022 « Compétences recherche de la Région Grand-Est ». Ce travail réalisé dans le cadre de l'INES.2S a été partiellement soutenu par l'Etat français dans le cadre du programme des Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0014-01).