



Avec la participation de Fanny Provent et Anne Barbillon

CONSTRUCTION DE SOL & AGRICULTURE URBAINE

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Contexte



Initié par la Chaire partenariale Agricultures Urbaines de la Fondation AgroParisTech, ce rapport cherche avant tout à documenter l'écosystème d'acteurs scientifiques et techniques travaillant sur la construction de sols à usage alimentaire en ville et à compiler un corpus bibliographique (scientifique ou technique) de travaux réalisés à ce sujet.

L'objectif de ces recherches est de permettre une meilleure compréhension des principales orientations des travaux existant en France et à l'international en matière de construction de sols pour l'agriculture urbaine, ainsi que d'identifier les acteurs-clés dans ce domaine.

Méthode

Ce travail s'est articulé en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons observé les **tendances d'utilisation des mots-clés** liés à la construction de sols en agricultures urbaines dans la presse, les ouvrages grand public et la presse spécialisée. Dans un deuxième temps, nous avons identifié les publications en lien avec notre sujet en consultant les principales bases de recherche scientifiques et techniques. Ce sont un peu plus de **300 publications qui ont été passées en revue** pour aboutir à un **corpus d'étude de 48 publications**. Par la suite, nous avons réalisé une **analyse des liens de co-publication entre les différents auteurs et institutions** de ce corpus. Puis, nous avons identifié et analysé les **7 principaux prismes d'étude des publications sélectionnées**. D'autre part, nous présentons une **cartographie des initiatives locales françaises** en lien avec notre sujet. Enfin, les **principales pistes de recherches identifiées** pour la poursuite des travaux de la Chaire sont présentées en conclusion.

Conclusions

La revue de la littérature réalisée dans ce rapport a permis de mettre en lumière **le faible nombre de publications évaluant la capacité des Technosols construits à être support de cultures alimentaires. Quasiment aucune étude n'a été réalisée sur la qualité sanitaire des légumes produits.** L'étude des Technosols construits est relativement récente et ils ont pour l'instant davantage été étudiés vis-à-vis de leur capacité à être un support de culture pour des plantes ornementales. **Néanmoins au vu des premiers résultats disponibles et du large spectre de matériaux pouvant être envisagé au sein de démarches de construction de sols, il semble que la fonction alimentaire de ces Technosols soit envisageable.**

Il reste néanmoins important d'évaluer ces Technosols construits en tant que support de cultures alimentaires en conditions réelles. En effet, on recense déjà des initiatives locales qui ont ou qui vont prochainement mettre en place des Technosols à vocation alimentaire, **il serait donc intéressant de réaliser un suivi à la fois agronomique et sanitaire de la qualité des Technosols et de leurs productions alimentaires.** De plus, avec la loi AGECE, des volumes importants de déchets alimentaires devront être traités et leur valorisation via des procédés de construction de sols est tout à fait envisageable. **Cependant il reste à mettre en place une évaluation fine de la qualité (notamment sanitaire) de ces nouveaux déchets entrant dans la composition de Technosols construits.**

D'autre part, un autre aspect en lien avec les Technosols construits à visée alimentaire qui reste à étudier est celui de **l'impact des pratiques de maraichage** (et notamment l'apport fréquent de matières organiques) **ainsi que l'impact des plantes** (notamment alimentaires) **sur la pédogénèse de ces Technosols.**

Sur le volet sanitaire, il serait également intéressant **d'évaluer l'intérêt de l'utilisation de la construction de Technosols en agriculture urbaine comme mesure de gestion de la pollution des sols, pour éviter l'apport de terres végétales en provenance de zones rurales** (comme cela est souvent préconisé dans les plans de gestion classiques des bureaux d'études spécialisés).

Un autre axe d'étude des Technosols sur lequel il n'y a pour l'instant que très peu de publications est celui de **l'étude du vieillissement de ces Technosols construits, et en particulier son impact sur leur qualité agronomique.**

Finalement un dernier axe d'étude envisageable concernant les Technosols construits est celui de **l'étude de leur fonction de support de biodiversité.** La biodiversité des sols urbains ne fait l'objet que de peu de publications en comparaison à la biodiversité des sols ruraux, et rares sont les publications qui traitent de celle des Technosols construits.

Introduction	4
I. Définition de la construction de sol et application au cas de l'agriculture urbaine	6
I.1. Le Technosol selon le référentiel international pour les sols	7
I.2. L'anthroposol construit selon le référentiel pédologique français	8
I.3. L'agriculture urbaine comme terrain d'expérimentation pour la construction de sols	9
I.4. Pratiques d'amendements, création de substrat et construction de sols	9
II. Méthodologie	12
II.1. Identification des publications scientifiques et techniques	13
II.2. Analyse des tendances de publications relatives aux sols construits et à l'agriculture urbaine	16
II.3. Cartographie des liens de co-publications	16
II.4. Cartographie des initiatives locales françaises	16
III. Evolution des tendances de publications croisant construction de sols et Agricultures Urbaines	18
IV. Cartographie des réseaux d'acteurs et d'institutions	21
V. Prismes d'étude des sols construits	27
V.1. Etude de la construction de sols au sein de projet d'agriculture urbaine	29
V.2 Etude de la construction de sols à visée alimentaire, hors de projets d'AU	35
VI. Carte des initiatives locales croisant projet d'agricultures urbaines ou à vocation agricole et Technosols construits	40
VII. Conclusion et perspectives de recherche	42



Les villes pourraient-elles contribuer à leur propre approvisionnement alimentaire en créant des sols fertiles à partir des déchets urbains ?

C'est l'un des questionnements émergents au sein des acteurs de l'agriculture urbaine. Cette approche a pour volonté de replacer au cœur du métabolisme urbain le cycle géochimique naturel de retour de la matière organique et minérale aux sols, permettant ainsi aux riverains de produire leur propre nourriture à partir de déchets et, par là même, de réduire les pressions existantes sur les ressources naturelles (et notamment celles sur les sols). De fait, le passé industriel et minier de l'Europe ainsi que son urbanisation croissante ont contribué et contribuent encore aujourd'hui à la dégradation et à la contamination des sols, notamment en périphérie des villes. Des questionnements émergent donc aussi sur la possibilité de valoriser des espaces ouverts contaminés en ville via la récréation de sols en économie circulaire.

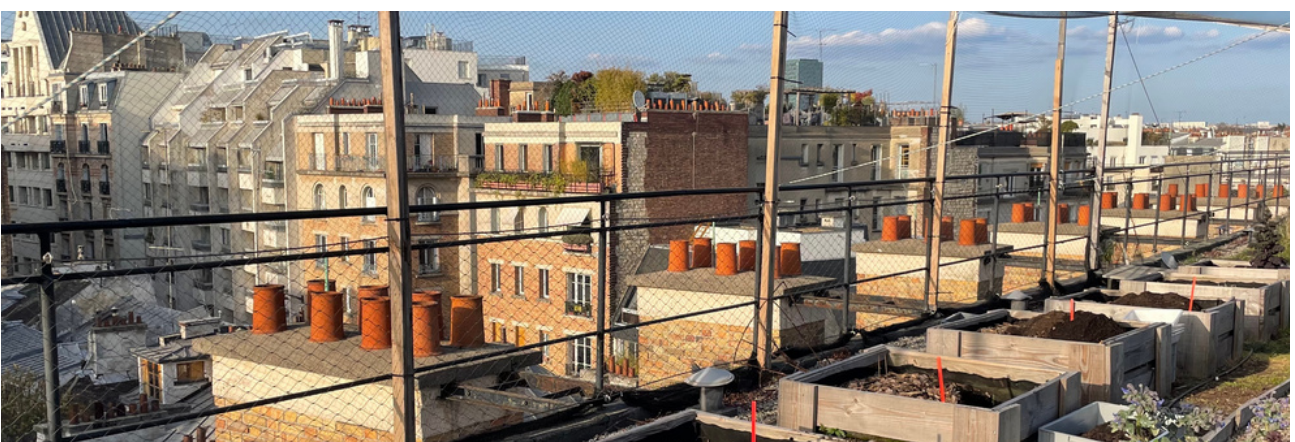
En France et en Europe, la législation évolue peu à peu pour inciter les collectivités à limiter l'étalement urbain, notamment au travers de la densification des villes et de la désimperméabilisation des sols. Ainsi, l'un des objectifs majeurs du plan Biodiversité français est de parvenir à terme à une « zéro artificialisation nette » (ZAN). De son côté, la loi Climat Résilience d'août 2021 vient renforcer cette volonté en fixant 2050 comme date-limite pour l'atteinte de l'objectif ZAN. L'enjeu est donc de préserver les sols naturels et agricoles en périphérie des villes et dans les espaces ruraux. La limitation de la demande en terre végétale des villes est donc un levier puissant pour éviter la spoliation de terres fertiles en périphérie de celles-ci.

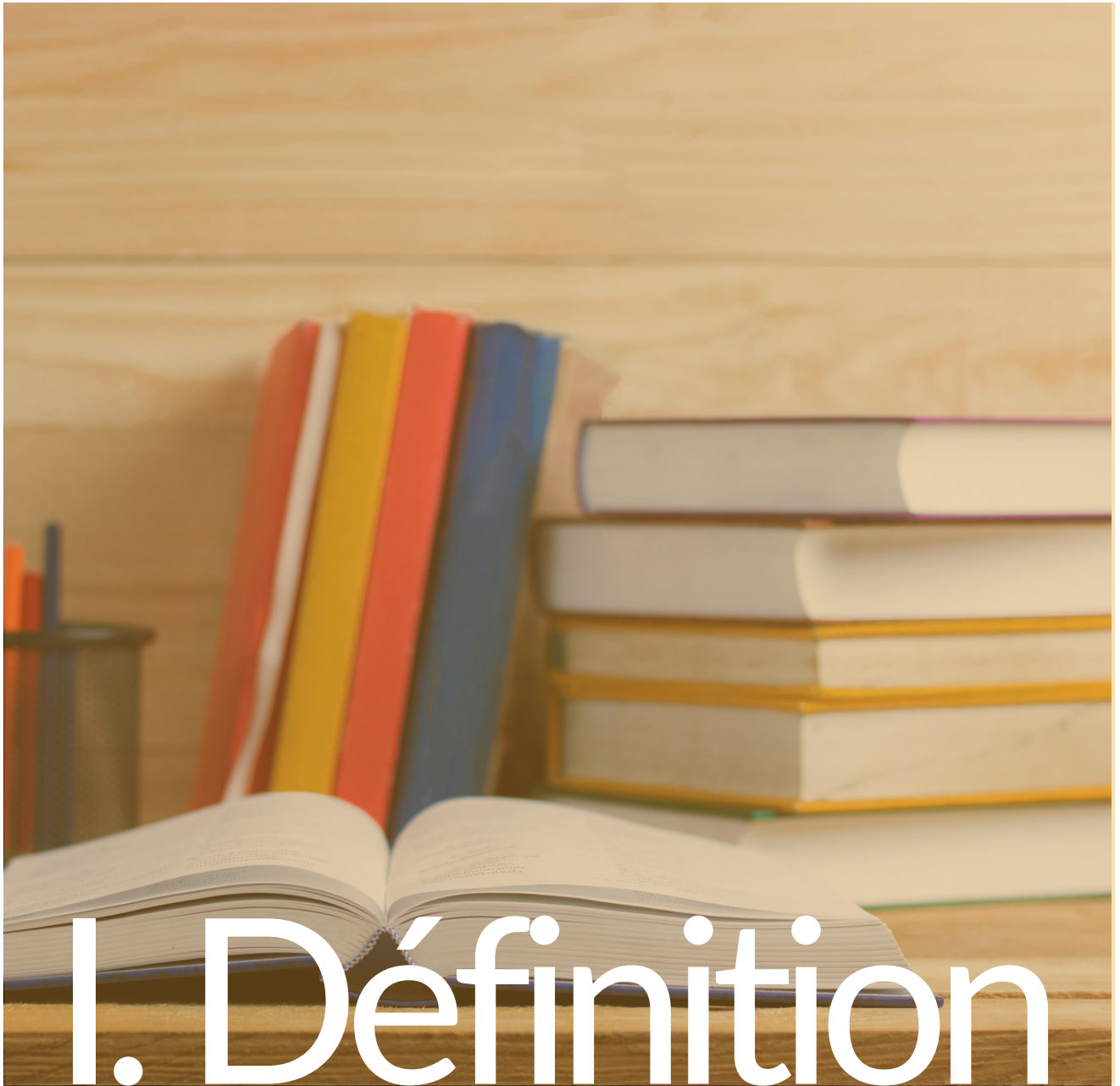
D'autre part, face à la nécessité d'adapter les villes aux changements climatiques, le développement de l'agriculture urbaine a été identifié comme l'une des solutions mobilisables, aux côtés d'autres mesures, telles que la création de parcs urbains ou la conception de bâtiments bioclimatiques par exemple. Le développement de zones fertiles au sein de l'espace urbain devrait donc être encouragé dans le futur que ce soit dans le cadre de projets en pleine terre ou au sein de divers espaces en ville où les sols ne sont pas directement mobilisables (toitures, dalles, friches contaminées, ...). Toutefois il n'est pas souhaitable que ce développement de zones fertiles se fasse via le prélèvement de terres fertiles rurales. En effet, la mise en place de parcelles d'agriculture urbaine ne doit pas compromettre la qualité des écosystèmes périphériques des villes.

A cet égard, la construction de sols permettrait d'explorer de nouvelles manières de mettre en place des projets d'agriculture urbaine, tout en contribuant à la durabilité environnementale des villes ainsi qu'à leur résilience face aux défis climatiques. La construction de sols pour l'agriculture urbaine est donc une solution prometteuse face à la raréfaction des ressources et aux impacts du changement climatique, mais qui se doit d'être appliquée dans une logique de circularité et de préservation des écosystèmes ruraux.

Initié par la Chaire partenariale Agricultures Urbaines de la Fondation AgroParisTech, ce rapport cherche avant tout à documenter l'écosystème d'acteurs scientifiques et techniques travaillant sur la construction de sols à usage alimentaire en ville et à compiler un corpus bibliographique (scientifique ou technique) de travaux réalisés à ce sujet. L'objectif de ces recherches est de permettre une meilleure compréhension des principales orientations des travaux existant en France et à l'international en matière de construction de sols pour l'agriculture urbaine, ainsi que d'identifier les acteurs-clés dans ce domaine.

Ce rapport est organisé de la façon suivante : (1) définition des principaux termes mobilisés, (2) méthodologie employée, (3) analyse des tendances de publications liées à notre sujet d'étude, (4) cartographie des réseaux d'acteurs et d'institutions, (5) analyse du corpus scientifique et technique compilé et (6) cartographie des initiatives locales. En dernière partie (7) sont mises en avant des perspectives de recherche pour la suite des travaux de la Chaire.





I. Définition

de la construction de sol et application
au cas de l'agriculture urbaine

I. Définition de la construction de sol et application au cas de l'agriculture urbaine

En premier lieu, il est important de clarifier la notion de construction de sol, telle qu'elle est envisagée dans ce rapport. En effet, de nombreuses terminologies sont mobilisées par les acteurs de l'aménagement de la ville ainsi que les différentes équipes de chercheurs. L'un des termes les plus courants est celui de « Technosol ».

Toutefois, le terme « Technosol » est de plus en plus assimilé, dans le langage courant, aux sols construits, alors qu'en réalité nous verrons que le Technosol englobe également des catégories de sols bien plus diverses.

I.1. Le Technosol selon le référentiel international pour les sols

La définition de l'International Union of Soil Sciences (IUSS), qui établit un référentiel international pour les sols (World Reference Base for Soil Resources - Anjos et al., 2016), indique que les Technosols sont « *des sols dont les propriétés et la pédogenèse sont dominées par leur origine technique. Ils contiennent une quantité importante d'artefacts (un objet clairement fabriqué ou fortement altéré par l'homme ou extrait de plus grandes profondeurs) ou sont colmatés par un matériau technique dur (matériau dur créé par l'homme et ayant des propriétés différentes d'une roche naturelle) ou contiennent une géomembrane* ». Plus particulièrement, cette définition stipule que ces Technosols sont :

- Des sols contenant plus de 20% d'artefacts dans les 100 premiers centimètres du sol (les artefacts incluant des matériaux tels que des briques, du plastique, etc.) et/ou,
- Des sols présentant une couche imperméable continue en surface ou en profondeur (asphalte, géomembrane, etc).

Les travaux de l'IUSS rapprochent également les Technosols à une catégorie de sol appelée *SUITMAs* (Soils in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas). Un parallèle est souvent effectué entre ces sols de zones anthropisées et le gradient de services écosystémiques qu'ils peuvent fournir.

Il est important de noter que ces « Technosols » incluent donc une gamme de sols beaucoup plus large que celle étudiée dans ce rapport. En effet, selon cette définition, un sol de route asphalté, un sol de parc urbain reconstitué ou une expérimentation de construction de sols à partir de déchets, correspondent tous les trois à des Technosols.

I.2. L'anthroposol construit selon le référentiel pédologique français

Le référentiel pédologique français (RPF - Baize & Girard, 2009), de son côté, définit la notion d'« anthroposol » comme « *des sols fortement modifiés ou fabriqués par l'homme, souvent en milieu urbain mais aussi, dans des conditions particulières, en milieu rural* ». Bien que l'anthroposol du RPF englobe des catégories de sols plus larges que le Technosol de l'IUSS, certaines sous-catégories d'anthroposols décrites permettent d'affiner davantage le concept de Technosol, dont notamment :

- Les anthroposols artificiels¹ qui sont assimilables à des sols de cheminements piétons ou de routes asphaltées. Ils présentent en général des propriétés défavorables à la croissance et au développement des racines des plantes et des arbres en particulier.
- Les anthroposols reconstitués² qui sont assimilables aux sols d'espaces verts, de parcs urbains ou d'alignements d'arbres. Leur objectif est de recréer un sol similaire au sol naturel pour obtenir un sol suffisamment productif. Ils résultent de l'activité humaine en milieu urbain et péri-urbain, par l'utilisation de matériaux pédologiques transportés, remaniés, puis mis en place pour les plantations de végétaux d'ornement.
- Les anthroposols construits³ qui sont le cœur de notre étude. Nés de procédés de génie pédologique, ils permettent notamment la réutilisation de déchets dans des opérations de végétalisation d'espaces dégradés, tels que les sols miniers ou urbains.

¹ Concernant les anthroposols artificiels, le RPF souligne également que ces sols « *sont le plus souvent fortement compactés. La macroporosité y est très faible et les éléments grossiers y sont souvent abondants. Les teneurs en éléments nutritifs sont très faibles.* »

² Pour aller plus loin, le RPF spécifie que ces sols « *sont souvent constitués par des horizons L provenant des couches arables de terrains agricoles, mélangés parfois à la partie supérieure de l'horizon sous-jacent du lieu de prélèvement. Ces matériaux ont donc subi des évolutions pédogénétiques avant leur transport.* »

³ Le RPF indique que ces anthroposols construits « *sont le résultat d'une action volontaire de construction d'un « sol » en utilisant des matériaux technologiques, considérés comme des déchets, pour l'installation d'une végétation. L'objectif est d'obtenir un milieu susceptible d'accueillir rapidement, dans de bonnes conditions physiques, chimiques et biologiques, une végétation capable de jouer à la fois un rôle esthétique (verdure) et un rôle de protection contre l'érosion éolienne et hydrique. Les propriétés physiques et chimiques de l'anthroposol seront susceptibles d'évoluer très rapidement au cours des premières années après sa mise en place.* »

En effet, dans ce rapport nous nous concentrons plus précisément sur des expérimentations scientifiques ou des démonstrateurs en conditions réelles qui intègrent une démarche de construction de sols fertiles dans une logique de circularité des matériaux au sein du métabolisme urbain (et notamment la réutilisation de déchets – organiques comme minéraux - générés par les activités humaines).

Dans ce rapport, nous considérerons les termes « Technosols construits », « sols construits », « anthroposols construits » ou « construction de sols » comme des synonymes.

I.3. L'agriculture urbaine comme terrain d'expérimentation pour la construction de sols

La définition fournie par Moustier et al., 1999 de l'agriculture urbaine est la suivante : « *L'agriculture localisée en ville ou à sa périphérie, dont les produits sont majoritairement destinés à la ville et pour laquelle il existe une alternative entre usage agricole et non agricole des ressources (foncier, eau, main d'œuvre etc.). L'alternative ouvre des concurrences et des complémentarités d'usage* ». Cette définition inclut donc, au sein de l'agriculture urbaine, les projets de jardins collectifs ou pédagogiques à l'égal des projets d'agriculture urbaine professionnelle.

Les différentes formes prises par l'agriculture urbaine sur nos territoires ne constituent pas un frein à l'expérimentation de construction de sols. En effet, de nombreuses initiatives locales ont pu être recensées. Elles confortent l'idée d'une complémentarité des pratiques d'agricultures urbaines avec le fonctionnement du métabolisme urbain.

I.4. Pratiques d'amendements, création de substrat et construction de sols

Toutefois, il convient de distinguer les pratiques d'amendement des sols et les pratiques de construction de sols en agriculture urbaine. Bien que la distinction soit fine, elle est cruciale pour comprendre les différences entre les expérimentations visant à étudier l'impact de combinaisons d'amendements et celles visant à recréer des sols potagers à partir de matériaux variés tels que des terres excavées, des sédiments, des briques, des copeaux de bois, des déchets verts, du marc de café, du compost ou autres résidus urbains. Cette distinction repose en grande partie sur l'importance accordée aux matériaux minéraux lors de la construction de sols.

A l'inverse des pratiques d'amendement qui se concentrent avant tout sur l'apport de matériaux organiques dans les sols, les sols construits sont des sols qui ont fait l'objet d'un travail d'ingénierie pédologique incluant une réflexion sur des matériaux à la fois minéraux (important pour la structure) et organiques (important pour la disponibilité des nutriments).

Dans cette optique-là, on différencie également l'élaboration de substrats de culture qui sont principalement organiques et destinés à un nombre limité de cycles de culture, des Technosols construits qui intègrent une dimension de durabilité et de résistance dans le temps.

Dans ce chapitre, nous venons d'aborder :

Les terminologies liées à la construction de sols à vocation alimentaire en commençant par différencier le terme généraliste de « Technosol » par rapport aux Technosols ou anthroposols construits. Les spécificités des démarches de constructions de sols vis-à-vis des pratiques d'amendement ou de création de substrat horticoles ont également été évoqués.

Le Technosol selon le référentiel international pour les sols

Les conditions pour qualifier un sol de Technosol selon l'International Union of Soil Sciences (IUSS) sont : qu'il contienne **plus de 20% d'artefacts dans les 100 premiers centimètres du sol** (les artefacts incluant des matériaux tels que des briques, du plastique, etc.) **et/ou, que ce sol présente une couche imperméable continue en surface ou en profondeur** (asphalte, géomembrane, etc).

Les « Technosols » selon l'IUSS incluent donc **une gamme de sols beaucoup plus large** que celle étudiée dans ce rapport. En effet, selon cette définition, un sol de route asphalté, un sol de parc urbain reconstitué ou une expérimentation de construction de sols à partir de déchets correspondent tous les trois à des Technosols alors que **ce rapport s'intéresse plus spécifiquement aux démarches de construction de sols fertiles dans une logique de circularité des matériaux au sein du métabolisme urbain.**

L'anthroposol construit selon le référentiel pédologique français

Le référentiel pédologique français (RPF) de son côté, définit la notion d'«anthroposol» comme *«des sols fortement modifiés ou fabriqués par l'homme, souvent en milieu urbain mais aussi, dans des conditions particulières, en milieu rural»*. Bien que l'anthroposol du RPF englobe des catégories de sols plus larges que le Technosol de l'IUSS, **certaines sous-catégories d'anthroposols décrites (comme l'anthroposol artificiel, l'anthroposol reconstitué et l'anthroposol construit) permettent d'affiner davantage le concept de Technosol.**

Le rôle de l'agriculture urbaine comme terrain d'expérimentation pour la construction de sols

Les différentes formes prises par l'agriculture urbaine sur nos territoires ne constituent pas un frein à l'expérimentation de construction de sols. En effet, de nombreuses initiatives locales ont pu être recensées. Elles confortent l'idée d'une complémentarité des pratiques d'agricultures urbaines avec le fonctionnement du métabolisme urbain.

Pratiques d'amendements, création de substrat et construction de sols

A l'inverse des pratiques d'amendement qui se concentrent avant tout sur l'apport de matériaux organiques dans les sols, les sols construits sont des sols qui ont fait l'objet d'un travail d'ingénierie pédologique incluant une réflexion sur des matériaux à la fois minéraux (important pour la structure) et organiques (important pour la disponibilité des nutriments).

Dans cette optique-là, on différencie également l'élaboration de substrats de culture qui sont principalement organiques et destinés à un nombre limité de cycles de culture, des Technosols construits qui intègrent une dimension de durabilité et de résistance dans le temps.



II. Méthodologie

II. Méthodologie

Le présent rapport a pour objectif de réaliser un recensement des acteurs scientifiques et techniques travaillant sur le sujet de la construction de sol en agriculture urbaine (AU) en France, voire à l'international, ainsi qu'un état des lieux des expérimentations et des démonstrateurs de construction de sols en lien avec l'AU.

Pour ce faire, notre travail s'est articulé en plusieurs étapes. Tout d'abord, nous avons identifié les publications en lien avec notre sujet en consultant les principales bases de recherche scientifiques et techniques et les avons compilés au sein d'un corpus d'étude. Ensuite, nous avons réalisé une analyse des tendances de publications relatives aux sols construits et à l'agriculture urbaine ainsi qu'une analyse des liens de co-publication entre les différents auteurs et institutions du corpus de publications rassemblées. Puis, nous avons identifié et analysé les principaux prismes d'étude des publications sélectionnées. Par la suite, nous avons élaboré une cartographie des principales initiatives locales en lien avec notre sujet. Enfin, les principales pistes de recherche identifiées pour la poursuite des travaux de la Chaire sont présentées en conclusion.

II.1 Identification des publications scientifiques et techniques

La recherche de publications scientifiques anglophones s'est réalisée de manière concomitante sur les bases de données Scopus⁴, Web of Science⁵ et Springerlink⁶. La recherche de publications francophones (et en partie anglophones) a été réalisée sur la base de données HAL⁷.

Lors des premières recherches combinant les mots-clés relatifs aux sols construits et ceux relatifs à l'agriculture urbaine (cf. Tableau 1 en page suivante), le nombre d'articles obtenus a été très limité sur Scopus et Web of Science (respectivement 11 et 13 articles). Il a par la suite été décidé d'élargir le spectre de recherche afin d'inclure des mots-clés relatifs à la production de fruits et légumes, en plus des mots-clés relatifs à l'agriculture urbaine. L'objectif visé était d'inclure les études testant la croissance ou l'innocuité de tout produit agricole sur sols construits, même en dehors d'un contexte d'agriculture urbaine.

⁴ scopus.com

⁵ webofscience.com

⁶ link.springer.com

⁷ hal.science

Les titres et les résumés des articles retenus par les moteurs de recherches ont ensuite été passés en revue pour éliminer ceux qui sortaient de la thématique d'étude. De plus, les articles étudiant la culture de produits agricoles dans une optique de phytoremédiation ont également été exclus de l'étude.

Le Tableau 1 ci-dessous récapitule le nombre de résultats rapportés par chaque outil de recherche et le nombre d'articles conservés après l'étape de triage.

Tableau 1. Synthèse des mots-clés recherchés dans les bases de données et du nombre de publications retenues

Outil de recherche	Champs recherchés	Mots-clés recherchés	% d'articles retenus
Scopus	Titres Résumés Mots-clés	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*"))	73% (8 sur 11)
Scopus	Titres Résumés Mots-clés	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*" OR vegetable* OR fruit* OR legume*))	30% (12 sur 40)
Web of Science	Titres Résumés Mots-clés	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* OR "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*")	69% (9 sur 13)
Web of Science	Titres Résumés Mots-clés	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* OR "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*" OR vegetable* OR legume* OR fruit*))	39% (13 sur 33)
Springerlink	Titres Résumés Mots-clés Texte intégral	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* OR "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*")	4% (3 sur 82)
Springerlink	Titres Résumés Mots-clés Texte intégral	((("constructed soil*" OR Technosol* OR technosoil* OR anthroposol* OR anthroposol* OR "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*" OR vegetable* OR legume* OR légume*OR fruit*))	3% (5 sur 190)

⁸ La phytoremédiation consiste à employer des plantes pour traiter les pollutions des sols de subsurface par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation. D'une manière générale, les composés inorganiques sont immobilisés ou extraits alors que les composés organiques sont dégradés (Source : BRGM - RP 58609 - 2010)

Outil de recherche	Champs recherchés	Mots-clés recherchés	% d'articles retenus
HAL	Titres Résumés Mots-clés Texte intégré	((("sol* *construit*" OR "construction de sol*" OR "constructed soil*" OR Technosol* OR technosol* OR anthroposol* OR anthroposol* "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("agriculture* urbaine*" OR "jardin* collectif*" OR "jardin* familia*" OR "jardin* ouvrier*" OR "ferme* urbaine*" OR "production de nourriture" OR "approvisionnement* alimentaire*" OR "production* alimentaire*" OR "urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*"))	28% (17 sur 60)
HAL	Titres Résumé Mots-clés Texte intégré	((("sol* *construit*" OR "construction de sol*" OR "constructed soil*" OR Technosol* OR technosol* OR anthroposol* OR anthroposol* "man-made soil*" OR "manmade soil*" OR "made-by waste* soil*") AND ("agriculture* urbaine*" OR "jardin* collectif*" OR "jardin* familia*" OR "jardin* ouvrier*" OR "ferme* urbaine*" OR "production de nourriture" OR "approvisionnement* alimentaire*" OR "production* alimentaire*" OR "urban agriculture*" OR "urban garden*" OR "urban farm*" OR "food prod*" OR "community garden*" OR "kitchen garden*" OR "agriculture garden*" OR vegetable* OR legume* OR légume*OR fruit*))	22% (17 sur 77)

NB : Quelques doublons de publications ont pu être identifiés entre ces plateformes.

Dans un deuxième temps, la recherche s'est concentrée sur les travaux de thèses françaises sur les bases Theses.fr⁹ et HAL Thèses¹⁰ via les mots-clés suivants : Technosol(s), sol(s) construit(s), anthroposol(s) construit(s) et construction de sol(s).

De la même manière, les titres et les résumés des travaux de thèses retenus ont été passés en revue afin d'éliminer ceux qui s'écartaient de la thématique d'étude.

La liste des publications (articles, thèses, etc.) trouvées via l'interrogation des bases de données a également été complétée par des articles supplémentaires, identifiés dans les sections bibliographiques des articles antérieurs ou par la connaissance de travaux pertinents connus des auteurs de ce rapport.

Ce sont au final 48 publications qui ont été compilées via cette recherche bibliographique qui inclut donc des études relatives aux Technosols construits en contexte d'agriculture urbaine ainsi que des études relatives aux Technosols à vocation alimentaire hors agriculture urbaine.

La liste complète des publications identifiées est disponible dans la section Bibliographie. Elle est également détaillée dans la section V de ce rapport.

⁹ <http://.theses.fr>

¹⁰ <https://theses.hal.science>

II.2 Analyse des tendances de publications relatives aux sols construits et à l'agriculture urbaine

D'une part, la liste de publications compilées à partir des bases de données mentionnées précédemment a été classée en fonction de l'année de publication. L'histogramme récapitulant ces données est disponible dans la section III.

D'autre part, l'outil NgramViewer¹¹ a été mobilisé pour observer les tendances de publication dans les ouvrages « grand public » : il permet notamment de les afficher sous forme de graphiques. Le corpus utilisé est la base de données Google Books sur la période 1800-2019. Différents mots-clés relatifs au sujet de cette étude ont été testés afin d'identifier les évolutions de leurs fréquences d'utilisation depuis 1970.

II.3 Cartographie des liens de co-publications

Afin de mettre en lumière les liens de co-publication au sein du corpus de publications rassemblée, l'outil VOSviewer¹² a été mobilisé. Cet outil permet l'analyse de la production scientifique, en particulier la visualisation de cartes de réseaux et de graphiques d'analyse bibliométrique. Dans notre étude, les données bibliographiques de la liste de publications compilées ont été utilisées pour créer des cartes de réseaux, qui permettent de visualiser les relations entre les auteurs et les institutions publiant sur notre sujet d'étude.

II.4 Cartographie des initiatives locales françaises

Pour terminer, ce sont les initiatives locales françaises (d'acteurs privés, associatifs ou de l'enseignement) qui ont été mises en lumière.

Pour réaliser la compilation de ces expérimentations, pilotes ou démonstrateurs, des recherches ont été effectuées sur le moteur de recherche du média en ligne Agri-city¹³, sur le site web de Plante & Cité¹⁴ ainsi que sur le moteur de recherche Google¹⁵. Les mots-clés suivants ont été testés : Technosol(s), sol(s) construit(s), anthroposol(s) construit(s) et construction de sol(s).

La liste des lauréats du projet ANRU Quartier Fertiles¹⁶ a aussi été passée en revue afin d'identifier des projets en lien avec le sujet de cette étude.

Ils ont par la suite été cartographiés selon leurs localisations géographiques.

¹¹ books.google.com/ngrams

¹² vosviewer.com

¹³ agri-city.info/fr

¹⁴ plante-et-cite.fr

¹⁵ google.com

¹⁶ anru.fr/reseauqf

Dans ce chapitre, nous venons d'aborder :

La méthodologie utilisée pour cette étude s'est divisée en 4 étapes.

1. Compilation d'un corpus de publications scientifiques et techniques

La recherche de publications scientifiques anglophones s'est réalisée de manière concomitante sur les bases de données Scopus, Web of Science et Springerlink. La recherche de publications francophones (et en partie anglophones) a été réalisée sur la base de données HAL. Les travaux de thèses françaises ont également été consultés via l'interrogation des bases Theses.fr et HAL Thèses. Au final ce sont plus de 300 publications qui ont été passées en revue pour aboutir à une liste restreinte de 48 publications. On notera qu'au vu du nombre restreints de publications traitant de Technosols en contexte d'agriculture urbaine, la recherche a également été élargie aux Technosols à vocations alimentaire hors contexte d'agriculture urbaine.

2. Analyse des tendances de publications

L'outil NgramViewer (basé sur le corpus de Google Books) a été mobilisé pour observer les tendances de publication dans les ouvrages « grand public ». Différents mots-clés relatifs au sujet de cette étude y ont été testés afin d'identifier leurs fréquences d'utilisation depuis 1970. D'autre part, la liste de publications compilées à partir des bases de données mentionnées précédemment a été classée en histogramme en fonction de l'année de publication.

3. Cartographie des liens de co-publications

L'outil VOSviewer a été mobilisé pour analyser les données bibliographiques de la liste de publications compilée et pour créer des cartes de réseaux, qui permettent de visualiser les relations entre les auteurs et les institutions publiant sur notre sujet d'étude.

4. Cartographie des initiatives locales françaises

Une cartographie des initiatives locales françaises (d'acteurs privés, associatifs ou de l'enseignement) a été élaborée via la consultation de la presse généraliste et de média en ligne spécialisés tels qu'Agri-city ou Plante & Cité, complété par des recherches sur le moteur de recherche Google. La liste des lauréats du projet ANRU Quartiers Fertiles a aussi été passée en revue afin d'identifier des projets en lien avec le sujet de cette étude.

Références :

scopus.com
webofscience.com
link.springer.com

hal.science
theses.fr
theses.hal.science
books.google.com/ngrams

vosviewer.com
agri-city.info/fr
plante-et-cite.fr
anru.fr/reseauqf



III. Evolution

des tendances de publications

III. Evolution des tendances de publications croisant construction de sols et Agricultures Urbaines

Bien que l'utilisation des termes du champ lexical des « sols construits » reste limitée dans la base de données Google Books, l'analyse de leurs fréquences d'utilisation met en lumière une augmentation de celles-ci, notamment depuis les années 2000. Dans la Figure 1, ci-dessous, sont montrés les résultats pour les termes comptabilisant les fréquences d'utilisation les plus élevées : Technosol(s), anthroposols et constructed soil.

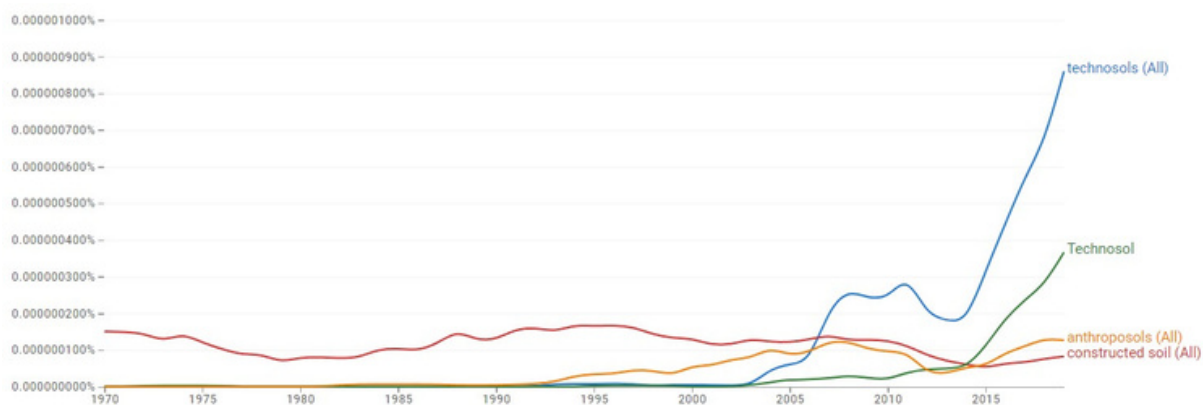


Figure 1. Evolution de la tendance d'utilisation des 4 termes les plus fréquents du champ lexical des sols construits (source : NgramViewer)

En parallèle de cette augmentation d'utilisation des termes relatifs au champ lexical des sols construits, on observe également une augmentation de la fréquence d'utilisation du lexique relatif à l'agriculture urbaine. Sur la Figure 2, ci-dessous, est affiché le terme de chaque champ lexical comptabilisant la plus grande fréquence d'utilisation, soit respectivement « Technosols » et « urban agriculture ».

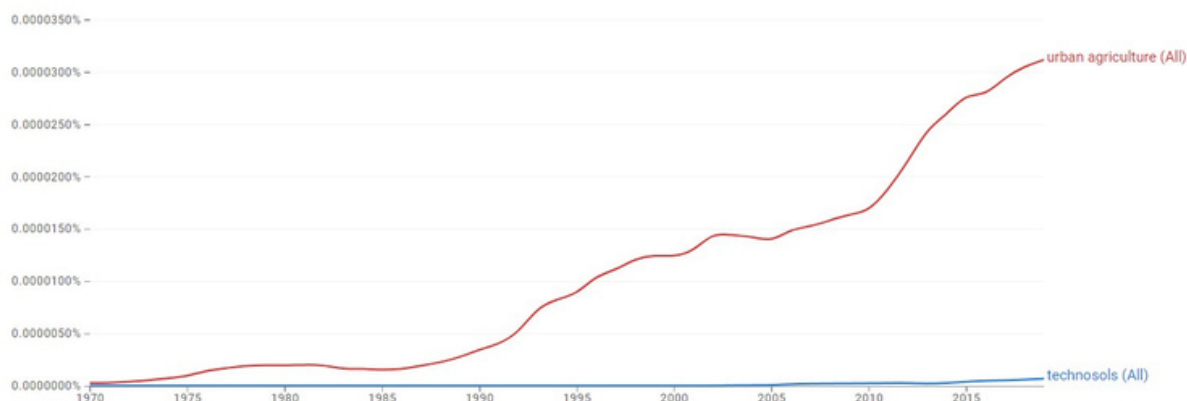


Figure 2. Evolution de la tendance d'utilisation du terme le plus fréquent du champ lexical des sols construits et du champ lexical de l'agriculture urbaine (source : NgramViewer)

Néanmoins, à ce stade l'outil NgramViewer ne permet pas de mettre en évidence des liens de co-utilisation des termes recherchés. Les années de publication du corpus compilé via les recherches sur les bases de données scientifiques pour cette étude ont donc été distribuées au sein de l'histogramme suivant¹⁷ afin d'identifier si une augmentation était également détectable.

Bien que le corpus analysé reste relativement limité, on note une tendance à l'augmentation des publications sur ce sujet entre 2014 et 2022.

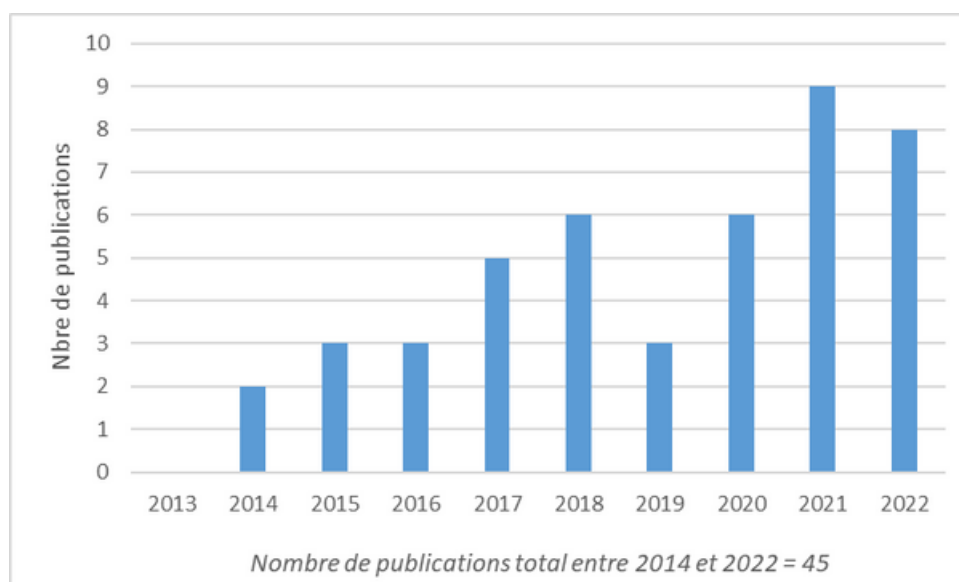


Figure 3. Evolution du nombre de publications par année au sein du corpus étudié

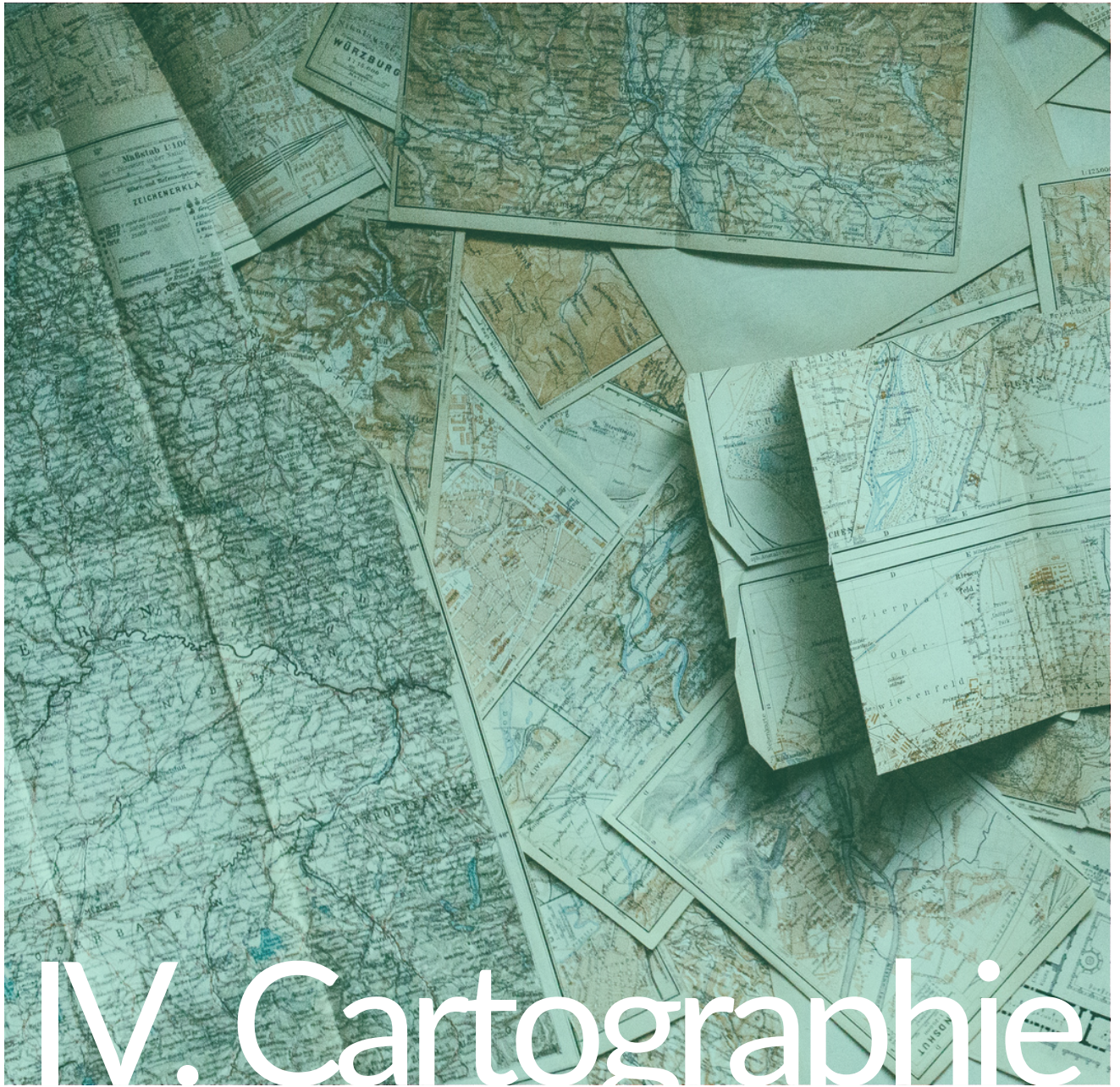
On retiendra que :

Dans les ouvrages « grand public », l'intérêt pour les sujets de construction de sol croît progressivement durant la fin du XXème siècle et le début du XXIème.

En parallèle, les travaux concernant la construction de sols à visée alimentaire n'ont commencé à être publiés que récemment (le premier article de notre corpus datant de 2014). Bien que le corpus analysé reste relativement limité, on note une tendance à l'augmentation des publications sur ce sujet entre 2014 et 2022.

En
Résumé

¹⁷ Les publications postérieures à décembre 2022 ont été écartées sur ce graphique.



IV. Cartographie

des réseaux d'acteurs et d'institutions

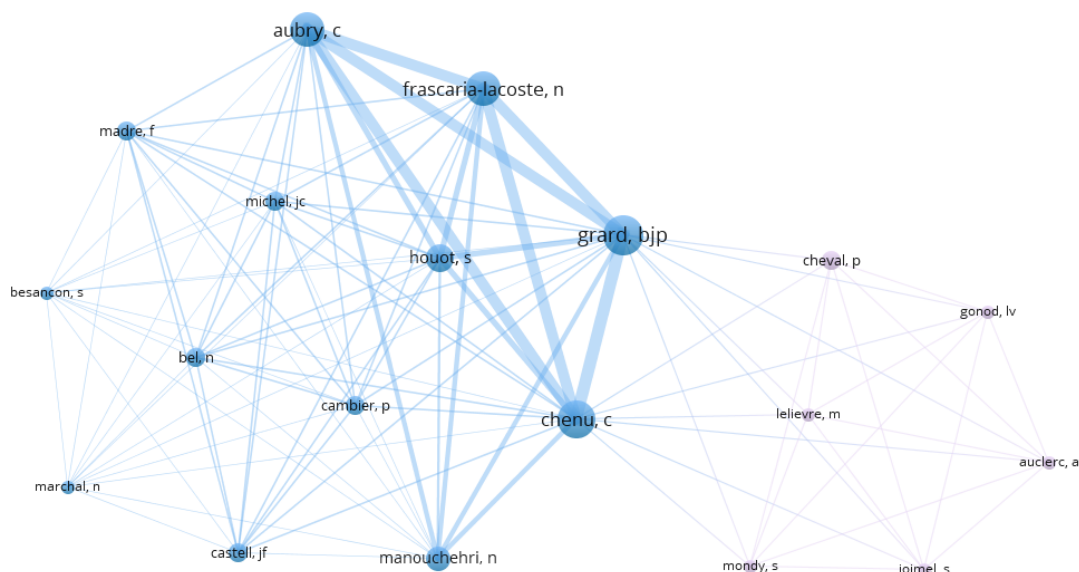


Figure 6. Détail du réseau d'auteurs inclus dans le cluster français principalement liés à l'Université de Paris-Saclay

IV.2. Clusters espagnols et italiens

Le deuxième plus gros cluster détecté dans ce corpus correspond au cluster hispano-italien, en vert sur la Figure 4. Pour le côté italien, on y retrouve notamment l'université de Florence, l'IRET (Research Institute on Terrestrial Ecosystems) et l'université de Padoue. On observe principalement pour la partie espagnole l'université d'Alicante (nommée Miguel Hernandez Elche) et l'université de Barcelone.

Le cluster bleu foncé (Figure 4) est également un cluster espagnol regroupant des organisations basques comme la University of Basque Country et le centre d'études environnementales de la ville de Victoria-Gasteiz.

Le cluster rose (Figure 4) est un cluster italien organisé principalement autour de la région de Piacenza avec Università Cattolica del Sacro Cuore et l'entreprise Ecosistemi. Hors cluster, on note également la présence de l'Université de Turin (en violet).

Les figures en page suivante mettent en avant les liens entre certains auteurs de ces clusters italiens et espagnols.

Pour rappel, les différentes couleurs au sein des 2 figures suivantes mettent en évidence les auteurs co-publiant le plus ensemble. L'épaisseur des liens entre 2 auteurs est proportionnelle au nombre de d'articles co-publiés.

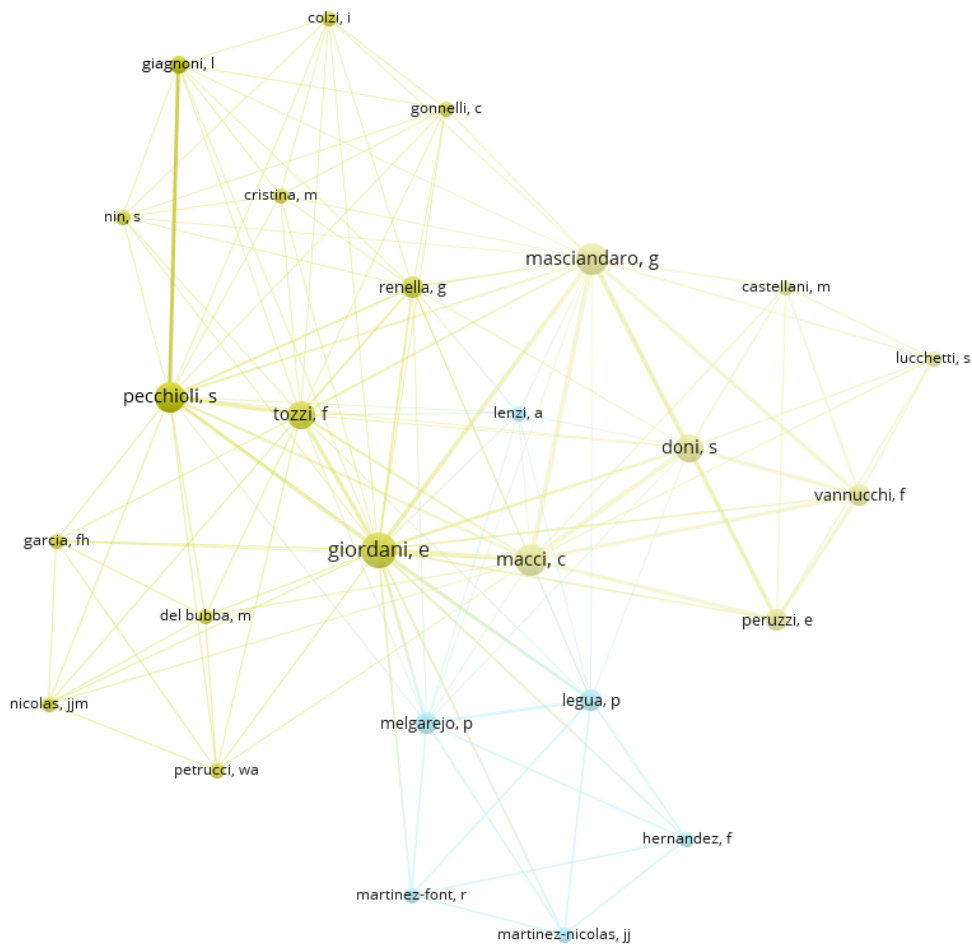


Figure 7. Détail du réseau d'auteurs inclus dans le cluster hispano-italien principalement lié au Research Institute on Terrestrial Ecosystems (CNR-IRET), à la University of Florence et University Miguel Hernandez Elche

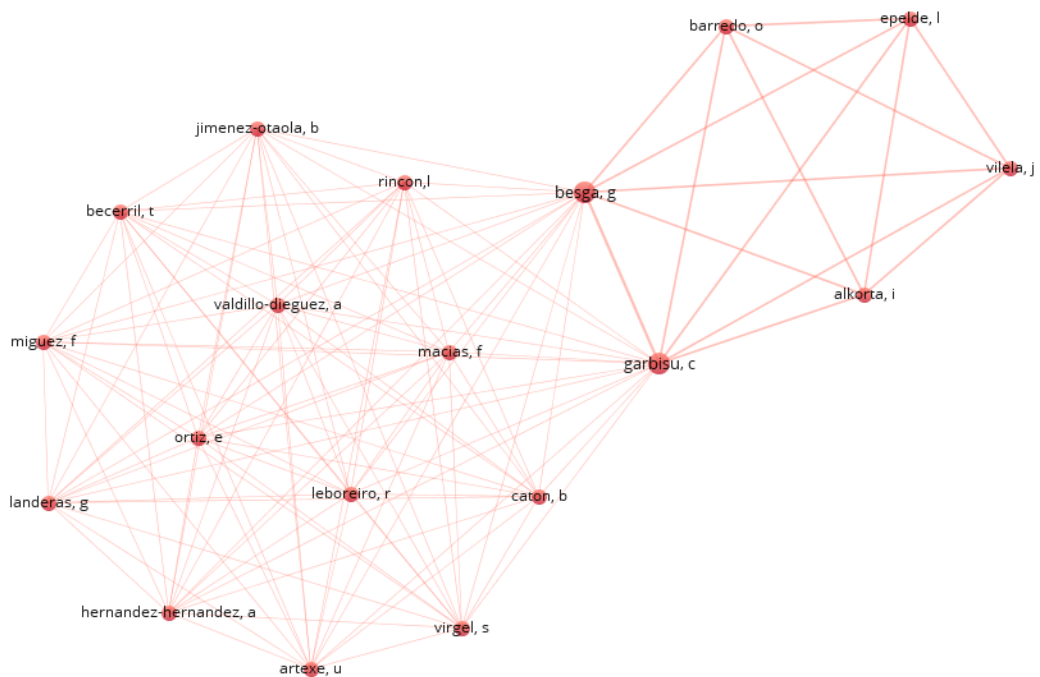


Figure 8. Détail du réseau d'auteurs inclus dans le cluster espagnol principalement liés à la Basque Country University

IV.3. Mexique, Japon, Angleterre et Brésil

On note également la présence, hors cluster, de l'Universidad Nacional Autonoma de Mexico (Mexique), du James Huston Institute (Angleterre), de l'Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brésil) et du Research Institute of Environment, Agriculture & Fisheries de la préfecture d'Osaka (Japon).

En Résumé

On retiendra que :

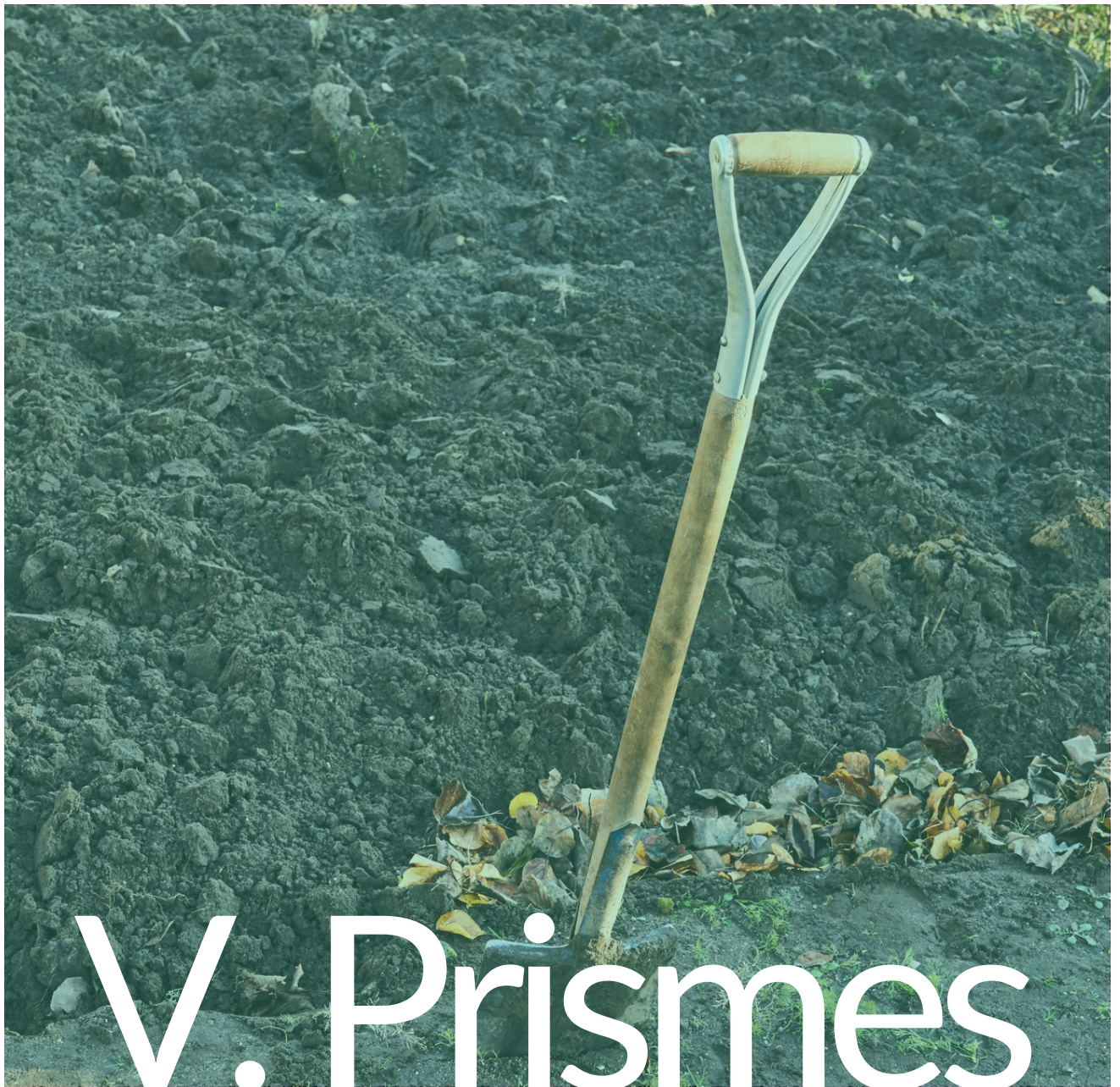
L'analyse des nationalités des institutions ayant publiées ensemble dans le corpus rassemblé pour cette étude met notamment en lumière des coopérations entre la France et les Etats-Unis ainsi qu'entre l'Espagne et l'Italie. D'autres institutions du Mexique, du Japon, d'Angleterre et du Brésil ont également été identifiées au sein du corpus.

Cluster franco-états-unien

Du côté français, les principales institutions présentes sont l'université de Lorraine (englobant le Laboratoire Sols Environnement), l'université Paris-Saclay (englobant AgroParisTech), l'université de Lille (englobant Junia et le Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement), l'université de Bourgogne Franche Comté (englobant AgroSup Dijon) et AgroCampusOuest. Pour le côté états-unien, on observe notamment la City University of New-York (CUNY) incluant le notamment le Brooklyn College, le New York Institute of Soil ainsi que le bureau environnemental de la ville de New-York.

Cluster hispano-italien

Pour le côté italien, on y retrouve notamment l'université de Florence, l'IRET (Research Institute on Terrestrial Ecosystems) et l'université de Padoue. On observe principalement pour la partie espagnole l'université d'Alicante (nommée Miguel Hernandez Elche) et l'université de Barcelone.



V. Prismes

d'étude des sols construits

V. Prismes d'étude des sols construits

Lors de la recherche sur les bases de données pour la compilation du corpus de publications croisant construction de sols et agriculture urbaine, il est apparu très clairement qu'aujourd'hui, les Technosols construits étaient majoritairement étudiés dans une optique de remédiation des anciens sols miniers contaminés et dans une optique de création d'espaces verts (non-alimentaires) en zones urbaines. Néanmoins comme indiqué dans la section III de ce rapport, le nombre de publications concernant l'étude de productions alimentaires sur sols construits semble augmenter progressivement depuis 2014.

Le corpus de 48 publications compilé au printemps 2023 pour ce rapport a été analysé afin de dégager des prismes d'étude communs aux différents groupes d'auteurs et d'institutions identifiés.

Dans un premier temps, quatre prismes d'étude des sols construits ont été identifiés au sein des publications ayant trait à des projets d'agriculture urbaine (AU) :

- Construction de sols dans des projets d'AU en faveur du verdissement des villes (18 publications ou communications),
- Caractérisation des sols construits dans des zones d'AU anciennes (3 publications),
- Construction de sols dans des projets d'AU pour recouvrir des sols urbains contaminés (5 publications ou communications),
- Caractérisation de la biodiversité des sols construits dans des projets d'AU (5 publications ou communications).

Par la suite, la recherche bibliographique a été étendue aux projets de construction de sols à visée agricole hors projets d'AU afin d'obtenir une vision plus globale des études ayant trait à la production alimentaire sur les Technosol construits. Trois autres prismes d'étude ont été identifiés :

- Restauration de sols dégradés par la construction de sols à visée alimentaire (5 publications ou communications),
- Valorisation de sédiments et terres excavées par la construction de sols à visée alimentaire (10 publications ou communications),
- Construction de sols à visée alimentaire sur d'anciens sols miniers contaminés (2 publications ou communications).

Les sous-sections suivantes résument les projets et expérimentations identifiés au sein de ces 7 prismes d'études.

Suite à l'analyse de ces publications, les principales pistes de recherches identifiées pour la poursuite des travaux de la Chaire sont présentées en conclusion de ce rapport.

V.1. Etude de la construction de sols au sein de projets d'agriculture urbaine

V.1.1. Construction de sols dans des projets d'AU en faveur du verdissement des villes

a. Université Paris-Saclay – AgroParisTech – INRAE (France) : Projet T4P

L'un des projets-phares qui a consisté en la construction de Technosols pour un usage d'agriculture urbaine à partir de résidus urbains est le projet T4P (Toit Parisien Productif, Projet Pilote), coordonné par l'Université Paris-Saclay, AgroParisTech et l'INRAE (notamment les UMR ECOSYS et SADAPT). Trois combinaisons de Technosols construits (et une modalité supplémentaire avec l'ajout de vers de terre) ont été suivis durant 5 ans.

Trois articles décrivent la fertilité et l'innocuité sanitaire des légumes et de fruits produits (Grard et al., 2015, Grard et al., 2020) ainsi que les services écosystémiques fournis par ces sols construits productifs sur toitures (Grard et al., 2018).

D'autres documents scientifiques francophones décrivent également cette expérimentation, notamment le mémoire de thèse de Baptiste Grard (2017) et deux posters scientifiques dont l'un a été présenté à la 8ème conférence des SUITMA (Grard et al., 2015) et l'autre à l'AG de 2016 de l'observatoire de recherche en environnement étudiant le recyclage agricole des Produits Résiduaire Organiques (PRO) (Grard et al., 2016). Le projet T4P fait également l'objet d'un court résumé dans l'acte du congrès Agricultures Urbaines Durables de 2017 (Grard, et al., 2018).

b. ASTREDHOR – INRAE – AgroParisTech (France) : Projet TechnAU

Le projet TechnAU, coordonné par l'institut technique ASTREDHOR, visait dans son deuxième volet à intégrer la réutilisation de déchets urbains dans les systèmes de production d'agriculture urbaine.

Un essai de cinq mois, évaluant la croissance de tomates-cerises et de basilics sur 8 combinaisons de Technosol construits, a été mis en place. Les principaux résultats de l'étude, décrits dans la communication de Morel-Chevillet et al., 2022, montrent que certains mélanges de déchets permettent de recréer des substrats productifs, même si ceux-ci présentent des caractéristiques parfois très éloignées des substrats standardisés d'horticulture.

c. Université de Lorraine – Cerema (France) : Projet AgroTechnosol

Le projet AgroTechnosol, coordonnée par le Laboratoire Sols Environnement, a eu pour objectif d'évaluer le potentiel agronomique de Technosols pour la production de légumes comestibles. Le seul document actuellement publié est le court résumé dans l'acte du congrès Agricultures Urbaines Durables de 2017 (Laurette et al., 2018) dans lequel les auteurs indiquent que toutes les espèces de légumes testés ont pu se développer sur les combinaisons de Technosols testées.

d. Universidad Autonoma de Mexico (Mexique)

Une autre étude qui croise l'utilisation de Technosols construits à partir de déchets et un usage d'agriculture urbaine est celle de l'Université Nationale Autonome de Mexico.

Neuf combinaisons de Technosols construits ont été testées pendant 3 mois. Un article (Prado et al., 2020) décrit leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que leurs capacités à être des supports de culture pour des tomates-cerises. L'ensemble des combinaisons testées ont permis le développement des cultures, mais des rendements très différents ont pu être observés en fonction de matériaux utilisés.

D'autre part, trois combinaisons de Technosols construits ont également été testées par la même équipe de chercheurs, deux ans après y avoir mis en place une *milpa*, une culture traditionnelle du Mexique (association de maïs, d'haricots et de courges). Un article, disponible sous forme de pre-print, aborde les résultats de ce pilote sous le prisme de la capacité de ces Technosols construits à séquestrer du carbone (Abbruzzini et al., 2022). D'après les résultats obtenus, les combinaisons testées sembleraient capables de stabiliser au sein de leurs agrégats des quantités significatives de carbone.

e. James Hutton Institute (Grande-Bretagne)

Une autre étude intéressante est celle du James Hutton Institute décrite dans l'article de Coull et al., 2021 qui se positionne dans un contexte de reconstruction de sols en zones urbaines (notamment en présence de sols scellés et/ou contaminés). Quatre combinaisons de Technosols construits ont été évaluées pendant 1 mois vis à vis de leur capacité à être support de germination et de croissance de certains produits agricoles (orge et pois). D'autre part, la capacité d'enracinement de ces plantes ont également été testées pendant 1 autre mois sur deux de ces combinaisons de Technosols construits. De manière cohérente avec les études mentionnées précédemment, la capacité à être support d'enracinement et de croissance pour des produits alimentaires a été confirmée pour les combinaisons de Technosols testées, bien que le temps d'évaluation ait été extrêmement court. Les auteurs soulignent également le besoin de tester la longévité géochimique de ces sols sur des échelles de temps plus longues.

f. Université de Lorraine – City University of New York – INRAE – AgroSup Dijon – Université Paul-Valéry – Columbia University – Peoples’ Friendship University of Russia (France, Etats-Unis et Russie)

Un review-article élaboré principalement par des chercheurs de l’Université de Lorraine (notamment le Laboratoire Sols et Environnement) et du New York City Urban Soil Institute (dépendant de la City University of New York) passe en revue les méthodes mentionnées dans la littérature pour la construction de Technosols en fonction des types d’infrastructures vertes visées (Deeb, Groffman, et al., 2020). L’agriculture urbaine faisant partie des 5 types d’infrastructures urbaines développées dans l’article (les 4 autres types d’infrastructures étant les espaces verts, les arbres d’alignements, les systèmes végétalisés de gestion des eaux pluviales et la restauration des sols dégradés et contaminés), les principales expérimentations documentées dans la littérature sont passées en revue (principalement les expérimentations des projets Siterre, T4P et de la Clean Soil Bank de New York City, toutes trois détaillées dans ce rapport).

Sur ce même sujet, une communication lors du Urban soils Symposium (Deeb et al., 2017) a été réalisé ainsi qu’une communication dans le Eurosoil 2021 virtual congress (Séré et al., 2021) et un article francophone publié dans la revue Techniques de l’ingénieur (Deeb, Blouin, et al., 2020).

g. University Miguel Hernández of Elche – Open University of Cyprus (Espagne et Chypre)

Un deuxième review-article (Rodriguez-Espinosa et al., 2021b) interroge la faisabilité de restaurer le service écosystémique de production alimentaire des sols désimperméabilisés. L’une des solutions mises en avant par les auteurs passe justement par la construction de Technosols. Les auteurs soulignent néanmoins le nombre très restreint d’études portant sur le sujet.

Les auteurs de l’article mentionné dans le paragraphe précédent ont également participé à la rédaction d’un autre review-article (Rodriguez-Espinosa et al., 2021a), mettant en avant la construction de Technosols pour rendre les villes européennes plus résilientes face aux changements climatiques. La mise en place de Technosols pour la création de nouveaux espaces d’agriculture urbaines y était également brièvement évoquée.

h. University of Turin (Italie)

Un quatrième review-article de Fabbri et al., 2021 passe en revue la littérature disponible lors de la rédaction de l’article sur les procédés de construction de sols. Ces procédés devraient permettre, selon les auteurs, de requalifier des sols peu fertiles, compactés, descellés et potentiellement pollués. Les contraintes relatives à l’utilisation de Technosols à des fins de productions alimentaires sont également évoquées.

V.1.2 Caractérisation des sols construits dans des zones d'AU anciennes

a. Research Institute of Environment, Agriculture, and Fisheries (Japon)

Une zone historique d'agriculture urbaine se maintient dans la périphérie d'Osaka au Japon et une partie des sols utilisés sont des sols construits à partir de sols excavés des piémonts. Ces sols ont été historiquement amendés et cultivés sous serre de manière intensive pour la culture de riz mais aussi de légumes.

Un article (Sano et al., 2015) décrit les caractéristiques physico-chimiques de ces sols construits anciens qui, d'après leurs résultats, diffèrent de manière significative de celles des sols agricoles témoins. Ces résultats sont également repris dans un chapitre de l'ouvrage « Anthropogenic Soils in Japan » (Sano & Kongo, 2019).

b. Université de Lorraine (France)

Gwendal Libessart a récemment soutenu sa thèse « Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages » au sein de laquelle une partie est consacrée à la caractérisation pédologique et physico-chimique des sols du Potager du Roi à Versailles, un ancien Technosol construit. Les résultats sont disponibles dans son mémoire de thèse (Libessart, 2022).

V.1.3 Construction de sols dans des projets d'AU pour recouvrir des sols urbains contaminés

a. City University of New York – Columbia University – New York City Mayor's Office of Environmental Remediation – Tulane University – University of Louisiana – Cornell University (Etats-Unis)

L'un des premiers acteurs à avoir étudié la mise en place de Technosols construits comme mesure de gestion de sols contaminés, est le New York Urban Soil Institute (dépendant principalement de la City University of New York). Leur méthode consiste en la construction de bacs de plantation qu'ils remplissent par un mélange de terre excavée (sédiments profonds d'origine glaciaire dans le cas de New-York) et de compost afin de recréer des sols de culture pour les agriculteurs urbains, pour pallier à la contamination généralisée des sols de la ville aux éléments-traces métalliques (ETM).

Trois combinaisons de Technosols construits ont été testés dans 3 community gardens contaminés en ETM pendant 1 an. Dans un premier temps, l'article d'Egendorf et al., 2018 décrit les résultats obtenus en terme d'innocuité sanitaire et de fertilité des Technosols et des fruits et légumes produits.

Pour sa part, l'article de Walsh et al., 2018 détaille le fonctionnement de la Clean Soil Bank de la ville de New York qui fournit les sédiments glaciaires pour ces expérimentations de gestion des sols contaminés.

Un troisième article anglophone (Paltseva et al., 2022) cherche à établir des recommandations claires pour les jardiniers et les agriculteurs urbains vis-à-vis des risques liés aux pratiques d'agriculture urbaines sur sols contaminés ainsi que vis-à-vis des mesures de réduction de l'exposition aux contaminants. Le principe de construction de Technosols mentionné dans l'article d'Egendorf et al., 2018 y est également rappelé.

b. Institut d'écologie et des sciences de l'environnement – Université Paris-Est-Créteil – Conseil départemental du 93 – Lab3S – Halage (France) : Projet IPAUP-93

Ce projet a pour objectif d'améliorer les connaissances sur les sols urbains contaminés de Seine-Saint-Denis et de proposer des techniques de restauration des sols très localisées notamment via la construction de sols fertiles. S'agissant d'un projet de recherche participative, les associations ont activement contribué à la mise en place du protocole expérimental et à sa réalisation.

Pour cela un Technosol construit a été comparé à un simple apport de compost et aux sols mêmes des sites expérimentaux. Durant trois ans, la qualité sanitaire et agronomique de plants de tomates, carottes, oignons, laitue et persil a été évaluée. Une communication a été réalisée au sujet de ce projet (iEES Paris, 2021) et les résultats de ce projet devraient être publiés prochainement.

V.1.4 Caractérisation de la biodiversité des sols construits dans des projets d'AU

a. INRAE – AgroParisTech – Université de Lille – AgroSup Dijon – Université de Lorraine (France)

Une étude, visant à caractériser la biodiversité tellurique et végétale des sols construits sur des toits parisiens en comparant 6 toits productifs et 6 toits extensifs, a été menée par l'UMR ECOSYS (dépendant de l'INRAE et d'AgroParisTech). Le Laboratoire Sols et Environnement (de Lorraine), le laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (de Lille) et AgroSup Dijon en ont également été parties prenantes.. L'article de Joimel et al., 2022 retrace les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Les communautés microbiennes et faunistiques telluriques ainsi que les communautés végétales présentaient notamment des différences significatives entre ces deux types d'habitats.

L'équipe de chercheurs de l'UMR ECOSYS a depuis lancé une thèse qui poursuit l'étude de l'interaction entre biodiversité tellurique et Technosols construits. Il s'agit de la thèse en préparation depuis octobre 2022 de Cyprien Boyer qui se penche notamment sur les méthodes d'inoculation et de colonisation spontanée par la faune du sol au sein de sols construits ainsi que leurs impacts sur ceux-ci.

D'autre part, une autre thèse a été menée par Pénélope Cheval au sein du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement. Elle traite de la construction de Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif avec un focus porté sur l'étude de l'impact de la biodiversité tellurique sur la création, voire l'amélioration des sols construits (Cheval, 2023).

b. IEES - Université Paris-Est-Créteil – Université Paris Cité – INRAE – IRD (France)

Une autre étude s'intéresse à l'impact des vers de terre sur la fertilité de Technosols construits dans l'optique de projets d'agriculture urbaines. Elle a été menée notamment par l'IEES, aussi nommée institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (UMR de l'INRAE, du CNRS, de l'UPEC, de l'IRD et de l'UPC).

Trois combinaisons de Technosols construits, avec ou sans vers de terre, ont été testées sur 3 mono-cultures et 1 co-culture de mesclun (3 types de salades) durant 3 ans. L'article d'Araujo et al., 2022 décrit l'impact de la proportion de compost et de la présence de vers de terre sur la fertilité de ces Technosols construits. D'après leurs résultats, il semblerait notamment que des proportions élevées de compost couplées à la présence de vers de terre augmenteraient significativement la biomasse des cultures mises en place.

La thèse de José Araujo « Rôle de la diversité des vers de terre dans le fonctionnement des sols : application à l'ingénierie pédologique » (Araujo, 2022) détaille également cette expérimentation.

V.2. Etude de la construction de sols à visée alimentaire, hors projets d'AU

Après cette première partie récapitulant les diverses études étudiant les Technosols construits dans une optique de développement de projets d'agriculture urbaine, cette deuxième partie présente des études décrivant des Technosols construits dans une optique de production agricole hors projets d'AU. Cette partie ayant un spectre d'étude plus ample, elle a davantage comme objectif de mettre en lumière des expérimentations de construction de sols à visée alimentaire, qu'à fournir une liste exhaustive d'articles sur ce sujet.

On note que ces publications abordent le sujet des Technosols construits sous trois prismes d'étude : la restauration de sols dégradés, la valorisation de déchets tels que les sédiments et les terres excavées et l'amélioration de la fertilité d'anciens sols miniers contaminés.

Globalement les études suivantes indiquent qu'il est envisageable de réhabiliter des sols dégradés (décapage lors d'opérations d'urbanisme, remblaiement de carrières ou de mines, ...), dans la perspective d'y installer des cultures de plantes alimentaires à condition d'ajuster les matériaux inclus dans la construction de Technosols afin qu'ils répondent aux exigences agronomiques des cultures mises en place. Néanmoins la qualité nutritionnelle et sanitaires des plantes cultivées a pour l'instant rarement été analysée dans ces études.

V.2.1 Restauration de sols dégradés par la construction de sols à visée alimentaire

a. University of Basque Country – Centro de estudios ambientales de Vitoria-Gasteiz (Espagne) : Projet Tecnosuelos de Gardelegi

Un projet croisant Technosols construits et restauration de sols dégradés est celui du Centro de estudios ambientales de la ville de Victoria-Gasteiz en Espagne, mené conjointement avec l'Université du Pays basque.

L'objectif du projet « Tecnosuelos de Gardelegi » est de lutter contre la dégradation des sols de parcelles à urbaniser (décapées de leurs terres végétales de surface) laissées à l'abandon, suite à une crise économique. Six combinaisons de Technosols construits ont été testées vis-à-vis de leur capacité à être support de croissance de végétaux. Les couverts végétaux testés concernaient 4 usages dont un à visée agricole intégrant du colza et du blé. Les résultats sont décrits dans l'article de Barredo et al., 2020. Ils montrent notamment que malgré leur forte hétérogénéité, les Technosols testés étaient relativement appropriés pour les cultures mises en place.

Cette étude a également été documentée via un article d'Herrán Fernández et al., 2016 et au sein du mémoire final du projet (Centro de Estudios Ambientales del ayuntamiento de Victoria-Gasteiz, 2018).

b. Catholic University of the Sacred Heart – m.c.m. Ecositemi (Italie) : Projet New Life

Le projet de recherche NEW LIFE mené par des partenaires privés et publics avait pour objectif de proposer des solutions face à la désertification des sols, notamment dans la région méditerranéenne. Un brevet a été déposé sur la méthode développée, nommée « Reconstitution ».

Deux articles décrivent les résultats d'études menées conjointement par l'entreprise m.c.m. Ecosistemi et la Catholic University of the Sacred Heart, comparant un Technosol construit à un sol anthropisé dégradé d'une ferme locale. Le sol anthropisé dégradé en question était le résultat du remblaiement d'une carrière par des terres excavées de piémonts locaux et de déchets de l'industrie de la canne à sucre. Dans le premier article de Manfredi et al., 2019, la capacité du Technosol construit à être un support de croissance pour des tomates a été évaluée en termes agronomiques durant 3 mois. Dans un deuxième article de Manfredi et al., 2018, ce même Technosol est évalué vis-à-vis de sa capacité à permettre la germination de graines de maïs pendant 16 jours. Dans les deux articles en question, ces résultats ont été comparés au sol anthropisé d'une ferme locale (ayant servi comme l'un des composants du Technosol construit testé), et ont mis en évidence des rendements et des taux de germination plus élevés dans le Technosol construit.

V.2.2 Valorisation de sédiments et de terres excavées via la construction de sols à visée alimentaire

a. Research Institute on Terrestrial Ecosystems (CNR-IRET) - University of Florence - Flora Toscana – Research Center for Horticulture (CREA) – Universitas Miguel Hernandez – Carbon Sink Group – Caliplant – Agro Vivai (Italie – Espagne) : Projets européen HORTISED et SUBSED

Plusieurs expérimentations menées par le CNR-IRET cherchent à valoriser des sédiments de dragage via la construction de Technosols pour des usages en pépinière, en horticulture et dans le BTP. Le projet HORTISED a cherché à valoriser des sédiments marins ayant subi un processus de phytoremédiation et de landfarming¹⁸ pour la culture de laitues, de fraises et grenades.

¹⁸ Le landfarming est une technique de dépollution qui consiste à étaler une faible épaisseur de sols pollués sur un support imperméable et à favoriser, via des techniques agricoles classiques, leur biodégradation aérobie (<https://selecdepol.fr/fiche-technique/landfarming>)

Les paramètres physico-chimiques de deux combinaisons de Technosols ont été caractérisés ainsi que la qualité agronomique et sanitaire des fruits cultivés.

Cinq articles décrivent les résultats de ce projet (Tozzi et al., 2019, Tozzi et al., 2020, Tozzi et al., 2021, Martínez-Nicolás et al., 2021, et Macci et al., 2023) et mettent en avant des rendements relativement similaires entre les Technosols construits et les substrats de culture témoins.

Le projet SUBSED de son côté cherche à démontrer la pertinence d'utiliser ces mêmes sédiments de dragage pour la construction de Technosols destinés à devenir des supports de cultures alimentaires comme l'olive, le citron, le basilic, les myrtilles et des plantes ornementales comme le laurier. Six combinaisons de Technosols sont actuellement en cours d'évaluation. Un article (Macci et al., 2022) résume les premiers résultats du projet SUBSED actuellement disponibles.

b. AgroCampusOuest – Société d'investissement légumière et maraîchère de Basse-Normandie – Chambre d'Agriculture de Bretagne – Shanghai Jiao Tong University (France - Chine)

Une étude concernant la valorisation agricole de sédiments a été réalisée à partir de matériaux du bassin du Mont Saint-Michel, afin de tester des méthodes d'amendements organiques sur des mélanges de sédiments et de terres agricoles. Les paramètres physico-chimiques de douze combinaisons de Technosols construits ont été testés. L'article de Robin et al., 2018 décrit les résultats de ces caractérisations. Bien que les paramètres des différentes combinaisons montrent une certaine hétérogénéité, des taux importants de matière organique couplés à une décompaction des terrains semblent améliorer la résistance des plantes cultivées à la sécheresse par rapport aux parcelles témoins.

c. AgroCampusOuest –IRSTV – Université de Lorraine – Technische Universität Berlin (France - Allemagne) : Projet SITERRE

Le projet SITERRE est un projet de recherche d'envergure nationale (soutenu par l'ADEME) dédié au développement de l'ingénierie pédologique pour la construction de sols en zones urbaines, à partir de résidus urbains (telles que les terres excavées par exemple).

Les auteurs de l'article Rokia et al., 2014 ont notamment étudié les propriétés agronomiques de 25 combinaisons de Technosols construits à partir de différents ratios de déchets et ont abouti à l'élaboration d'un premier outil de modélisation de ces propriétés en fonction des ratios de matériaux combinés lors de la construction d'un Technosol. D'autre part, ces résultats sont aussi détaillés dans le mémoire de la thèse de Sonia Rokia (Rokia, 2014).

Au sein du même projet SITERRE, les auteurs de Vidal-Beaudet et al., 2018 ont également étudié la disponibilité de nutriments et notamment l'agrégation et la disponibilité du phosphore de Technosols construits. Les paramètres agronomiques de quatre combinaisons de Technosols construits ont été évalués durant un essai de 55 jours via l'analyse de la croissance racinaire de colza et de ray-grass.

D'après leurs résultats, la disponibilité et le transfert de phosphore vers les plantes étaient fortement dépendants du type de matière organique présent dans les différentes combinaisons testées.

V.2.3 Construction de sols à visée alimentaire sur d'anciens sols miniers contaminés

a. University of Murcia - Complutense University of Madrid - University of Barcelona (Espagne)

La remise en culture d'anciens sols miniers a été étudiée par des chercheurs espagnols sur des sols présentant des contaminations multiples en éléments-trace métalliques. Trois combinaisons de Technosols construits ont été évaluées vis-à-vis du potentiel transfert d'éléments toxiques dans l'environnement et dans les parties comestibles de trois cultures alimentaires dans un essai qui a duré 5 semaines pour le brocoli et 8 semaines pour la laitue et l'oignon. Les principaux résultats de l'étude sont disponibles dans l'article de [Martínez-Sánchez et al., 2022](#). Ils montrent notamment que l'absorption de contaminants par les plantes reste limitée si elles sont cultivées avec des amendements calcaires, bien que de fortes différences puissent être observées en fonction des variétés étudiées.

b. Universidad Federal Do Rio Grande Do Sul (Brésil)

Une équipe brésilienne étudie la construction de Technosols à partir notamment de déchets de mines de charbon mélangés à d'autres déchets locaux. L'essai a eu une durée d'un an sur des cultures d'avoine et de maïs. Les paramètres physico-chimiques ont été caractérisés ainsi que la qualité nutritionnelle des cultures alimentaires produites. Les principaux résultats de l'étude sont décrits dans l'article de [Firpo et al., 2021](#). Ils mettent notamment en avant la capacité de ces Technosols construits à accélérer la revégétalisation des anciennes zones minières. On notera cependant que l'innocuité sanitaire des parties consommables de l'avoine et du maïs n'a pas été mesurée.

En Résumé

Dans ce chapitre :

Le corpus de 48 publications compilé au printemps 2023 pour cette étude a été analysé afin de dégager des prismes d'étude communs aux différents groupes d'auteurs et d'institutions identifiés.

Quatre prismes d'étude des sols construits ont été identifiés au sein des publications ayant trait avec des projets d'agriculture urbaine (en bleu, gris, orange et jaune dans le graphique ci-dessous).

Par la suite, la recherche bibliographique a été étendue aux projets de construction de sols à visée agricole hors projets d'AU afin d'obtenir une vision plus globale des études ayant trait à la production alimentaire sur les Technosol construits. Trois autres prismes d'étude ont été identifiés (en hachurés bleu clair, bleu foncé et vert dans le graphique ci-dessous).

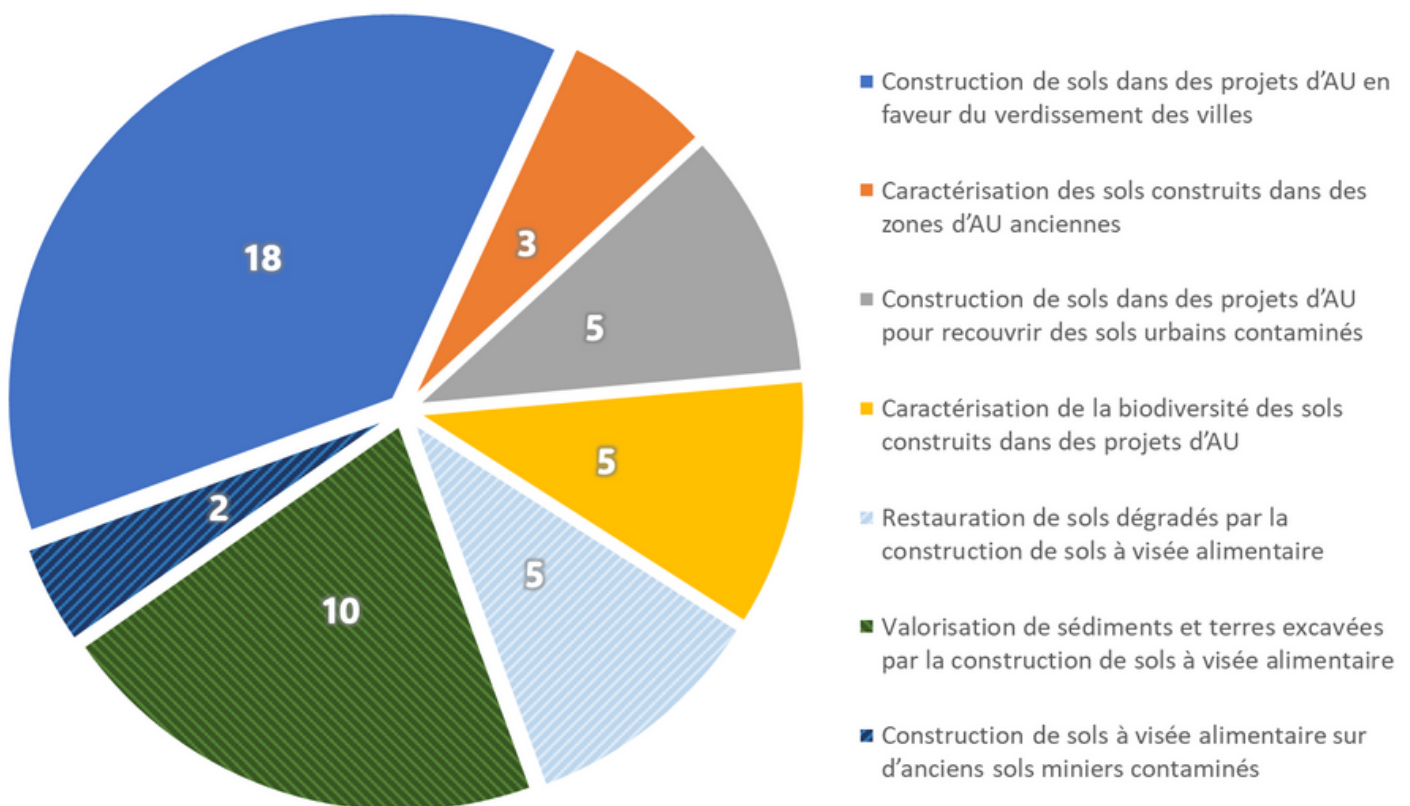


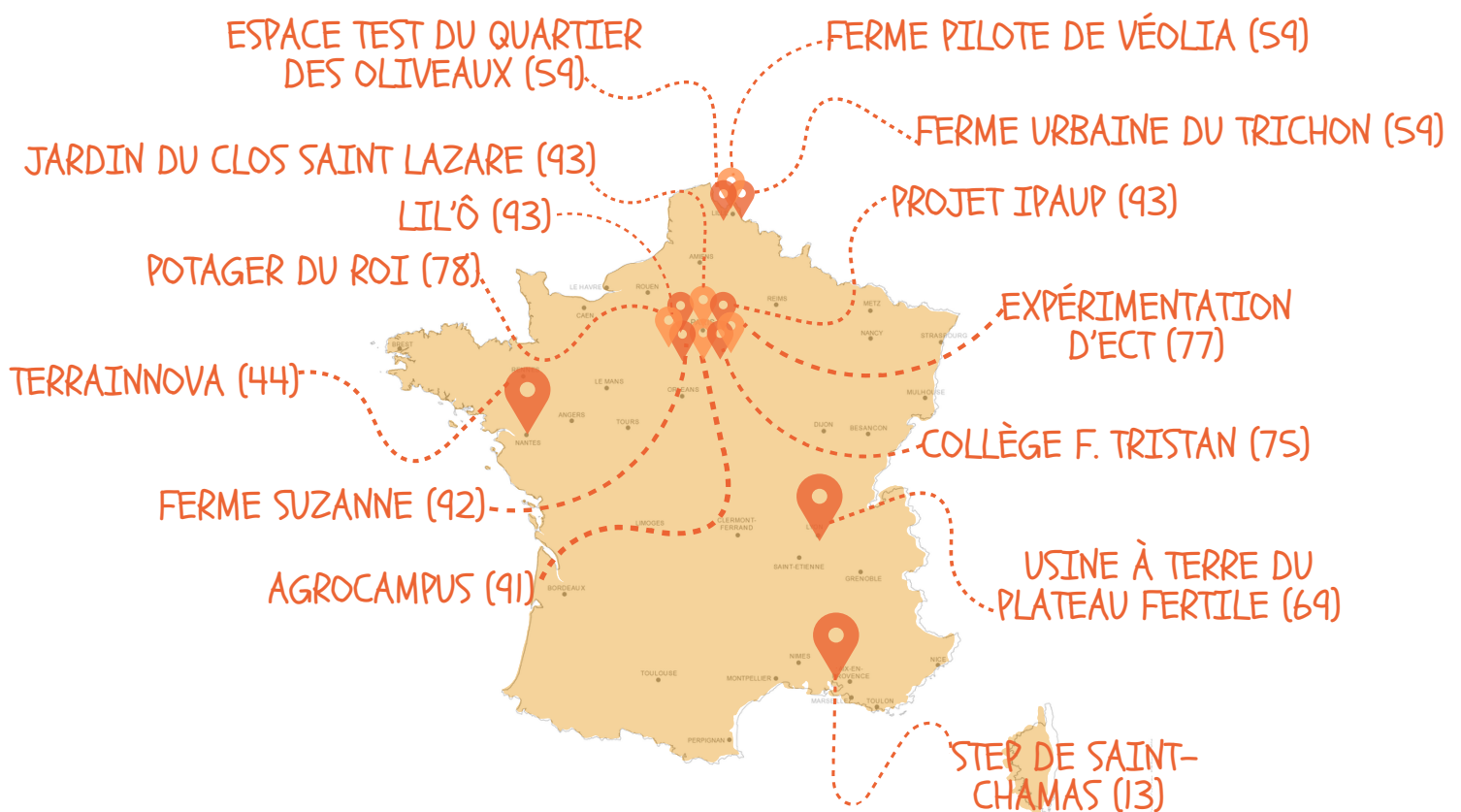
Figure 9. Nombre de publications par prisme d'étude au sein du corpus compilé

V.I. Carte des initiatives locales croisant projet d'agricultures urbaines ou à vocation agricole et construction de Technosols

Dans cette dernière partie, ce sont des initiatives locales françaises (d'acteurs privés, associatifs ou de l'enseignement) qui sont mises en lumière.

Cet inventaire (non-exhaustif) de ces initiatives a été intégré à la cartographie suivante. Les localisations géographiques de chacune de ces initiatives sont accompagnées de courts résumés de leurs actions ou projet.

En
aperçu



Espace test du quartier des Oliveaux – Loos (59)

Acteurs-phares : Entreprise associative visant à favoriser l'insertion professionnelle et la fourniture de services dans les quartiers de Loos et Tourcoing - opération Territoire Zéro Chomeur (La fabrique de l'emploi - Métropole Européenne de Lille)

Projet notoire : Espace test du quartier des Oliveaux pour l'AU intégrant une contrainte : rendre les sols pollués cultivables avec un apport de terre inerte, de matières organiques et la production de compost.

Lil'Ô – Ile Saint Denis (93)

Acteurs-phares : Association visant à mettre en place des projets autour de la résilience et de la transition, notamment sur des sites dégradés (Halage)

Projet notoire : Faiseurs de Terre (en partenariat avec ECT, une entreprise du BTP et Neo-Eco, un bureau d'étude) permet la transformation de terres et bétons de chantiers locaux en Technosols fertiles.

Ferme urbaine du Trichon – Roubaix (59)

Acteurs-phares : Coopérative d'habitants (Le collectif paysan du Trichon)

Projet notoire : Construction d'un sol fertile pour cultures potagères (en partenariat avec Vers de Terre Production, un bureau d'étude) à partir de résidus urbains locaux.

AgroCampus – Palaiseau (91)

Acteurs-phares : Formation en Agronomie et en Environnement (AgroParisTech)

Projet notoire : Etude de Technosols productifs sur toitures dans la continuité du projet de recherche T4P.

Potager du Roi – Versailles (78)

Acteurs-phares : Formation de paysagisme (Ecole Supérieure du Paysage de Versailles)

Projet notoire : Etude du Technosol historique du potager du Roi.

Ferme Suzanne – Issy-les-Moulineaux (92)

Acteurs-phares : Entreprise de conception et d'installation d'écosystèmes potagers en milieu urbain (Cultures en Ville)

Projet notoire : Installation d'une toiture végétalisée productive issues de l'économie circulaire via le substrat 'melting pot' comme couche de fondation (briques, moules, marc de café, fibres de bois) et du Technosol issu du projet de recherche T4P.

Usine à terre du Plateau Fertile – Venissieux (69)

Acteurs-phares : Entreprise de valorisation de terres excavées (Terres fertiles, en partenariat avec Pystiles et Parcs&Sports)

Projet notoire : refertiliser les sols à partir de biodéchets pour végétaliser la nouvelle ZAC dans une logique de trame verte comestible.

TerraInnova – Nantes (44)

Acteurs-phares : Entreprise de valorisation des terres excavées (Terra Innova)

Activité : Permettre la réutilisation des terres riches en matières minérales et/ou organiques, issues des chantiers à proximité, en tant qu'amendement pour améliorer des parcelles agricoles.

Ferme pilote Véolia – Lomme (59)

Acteurs-phares : Entreprise de gestion de l'eau, des déchets et de l'énergie (Véolia)

Projet notoire : Projet de construction de Technosols pour du micro-maraichage à partir de gisements de déchets inertes.

Collège François Tristan – Paris (75)

Acteurs-phares : Association d'entretien et d'animation de jardins potagers (Veni Verdi)

Projet notoire : Démonstrateur de différentes techniques d'AU, notamment la construction de sols.

Expérimentation d'ECT – Annet sur Marne (77)

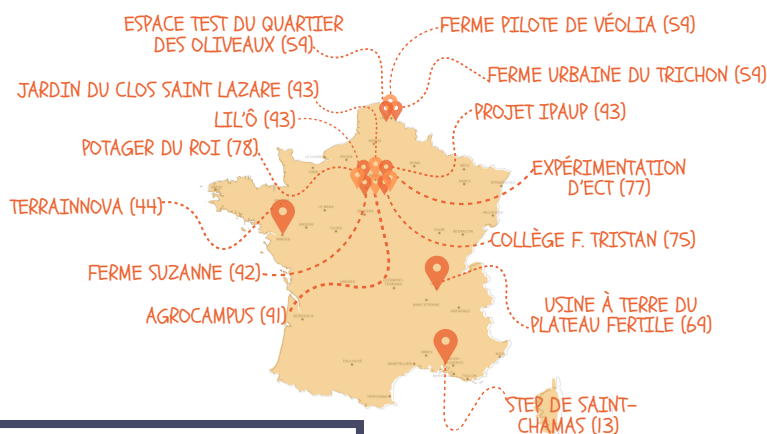
Acteurs-phares : Entreprise spécialisée dans la gestion de terre excavée (ECT)

Projet notoire : Retour à l'agriculture de 3 hectares de remblais.

Jardin du Clos Saint Lazare – Stains (93)

Acteurs-phares : Entreprise de conception et de réalisation de projet d'AU et de végétalisation (Merci Raymond)

Projet notoire : Installation de bacs autonomes et permacoles à partir de déchets organisés en lasagnes.



IPAUP 93 – Seine Saint-Denis (93)

Acteurs-phares : collectif d'acteurs de l'agriculture urbaine (Lab3S, Halage, Lab'Urba, IFRIS, IEES, etc)

Projet notoire : projet de recherche participative qui étudie 2 méthodes de recouvrement (ou amendement) de sols pollués, dont un Technosol, et l'impact sur la qualité sanitaire et agronomique de cultures potagères

STEP de Saint Chammas (13)

Acteurs-phares : Gestionnaire de station de traitement et d'épuration des eaux (Société du Canal de Provence)

Projet notoire : Construction de Technosols à partir de boues sur sols dégradés et mise en place de cultures agricoles.



VII. Conclusion

& perspectives de recherche

VII. Conclusion et perspectives de recherche

La revue de la littérature réalisée dans ce rapport a permis de mettre en lumière le faible nombre de publications scientifiques étudiant la dimension alimentaire des Technosols construits. En effet, l'étude de ces sols construits est relativement récente et ils ont pour l'instant davantage été étudiés vis-à-vis de leur capacité de support de plantes ornementales. Très peu d'études ont été réalisées sur leur capacité à être support de plantes alimentaires et quasiment aucune n'a été réalisée sur la qualité sanitaire des légumes produits. Néanmoins au vu des premiers résultats disponibles et du large spectre de matériaux pouvant être envisagés au sein de démarches de construction de sols, il semble que la fonction alimentaire de ces Technosols soit envisageable. Pour autant, il reste des travaux à mener pour garantir la qualité sanitaire de ces Technosols et celle des produits alimentaires qui y seraient cultivés.

Il reste également important d'évaluer ces Technosols construits en conditions réelles. En effet, la plupart des expérimentations recensées dans cette revue de la littérature ont été réalisées en pots ou en mésocosmes, ce qui induit des biais sur le fonctionnement et l'évolution de ces sols. Cependant on recense déjà des initiatives locales qui ont ou qui vont prochainement mettre en place des Technosols à vocation alimentaire, il serait donc intéressant de suivre ces structures et de réaliser un suivi à la fois agronomique et sanitaire de ces sols construits et de leurs productions alimentaires.

De plus, avec la loi AGEC qui prévoit la généralisation du tri à la source des biodéchets d'ici 2024, des volumes importants de déchets alimentaires devront être traités et leur valorisation via des procédés de construction de sols est tout à fait envisageable. Néanmoins il reste à mettre en place une évaluation fine de la qualité (notamment sanitaire) de ces nouveaux déchets pouvant entrer dans la composition de Technosols construits.

D'autre part, un autre aspect de l'étude des Technosols construits à visée alimentaire qui reste à étudier est celui de l'impact des pratiques de maraichage (et notamment l'apport fréquent de matières organiques) ainsi que l'impact des plantes (notamment alimentaires) sur la pédogénèse de ces Technosols. En effet, ces pratiques agricoles peuvent influencer la formation du complexe argilo-humique au sein de ces sols ainsi que la quantité et la disponibilité de certains éléments nutritifs. De même, le comportement hydrique des sols et leurs capacités de stockage de carbone peuvent également être impactés.

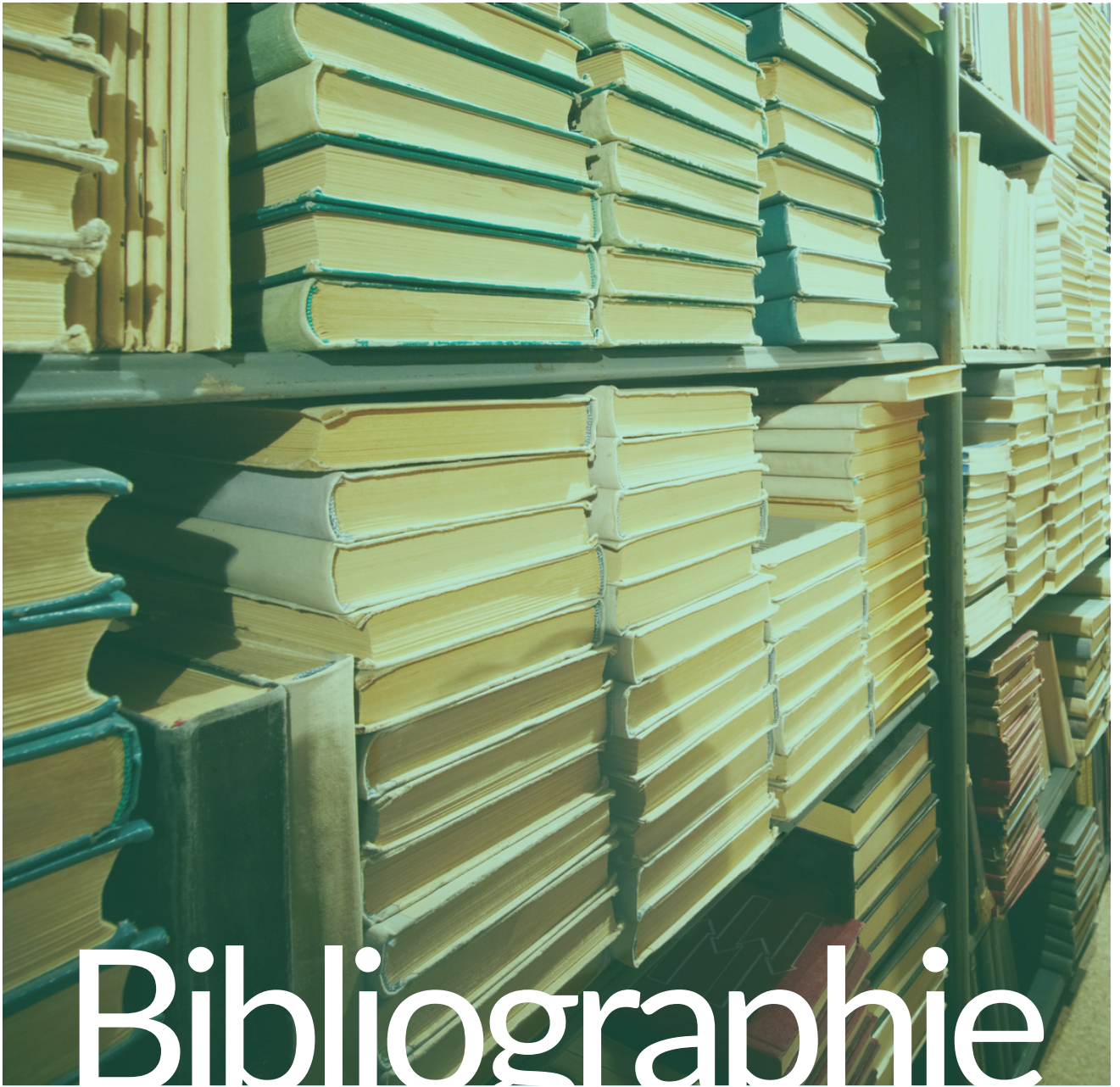
Sur le volet sanitaire, il serait également intéressant d'évaluer la mise en place de sols construits en agriculture urbaine comme mesures de gestion de la pollution des sols, dans le but d'éviter l'apport de terres végétales qui proviennent en général de zones rurales (une mesure fréquemment préconisée dans les plans de gestion classiques des bureaux d'études spécialisés).

En effet, face à des teneurs en polluants modérées, le recouvrement de sols de jardins familiaux ou de parcelles d'AU professionnelles via une démarche de construction de sols pourrait être envisagée pour constituer une barrière au transfert vertical de polluants, atténuant ainsi plusieurs voies d'exposition de l'homme à ces polluants. A ce jour, les seuls résultats disponibles vis-à-vis de cette démarche sont ceux du NYC Urban Soil Institute. Il est à noter que leur dispositif inclut un géotextile, en addition de l'apport de Technosols construits.

Un autre axe d'étude sur lequel il n'y a pour l'instant que très peu de publications est celui de l'étude du vieillissement de ces Technosols construits. Cela découle logiquement du fait que l'étude des sols construits a débuté il y a moins d'une vingtaine d'années (Séré, 2018) et le premier article traitant de leur qualité agronomique date de 2014 (Rokia et al., 2014). Les Technosols construits voient en effet leurs paramètres physico-chimiques et biologiques évoluer très rapidement durant les premières années de leur pédogénèse, cependant quasiment aucune étude n'a été publiée sur les impacts de cette évolution pédologique sur la qualité agronomique de ces Technosols. Pour documenter ce vieillissement, deux approches peuvent être envisagées : d'une part le suivi des Technosols construits mis en place par des acteurs locaux sur le temps long, d'autre part la mise en place d'expérimentations visant à accélérer le vieillissement des Technosols afin d'obtenir plus rapidement des indices sur l'évolution de leurs processus pédologiques.

Finalement un autre axe d'étude envisageable concernant les Technosols construits est celui de l'étude de leur fonction de support de biodiversité. La biodiversité des sols urbains ne fait l'objet de peu de publications en comparaison à la biodiversité des sols ruraux (Guilland et al., 2018), et rares sont les publications qui traitent de celle des Technosols construits. Dans la lignée des travaux entrepris au sein de l'UMR ECOSYS (Université Paris-Saclay), il reste encore beaucoup de travaux à mener pour caractériser la biodiversité tellurique de ces sols bien particuliers.

Les pistes de recherche présentées dans les paragraphes ci-dessus s'articulent notamment avec le troisième axe de la Chaire « Analyser les rôles écologiques des formes d'AU pour en accroître les bénéfiques sur le métabolisme urbain » et ponctuellement avec le premier axe « Produire des aliments pour tous ».



Bibliographie

& annexes

Bibliographie

- Abbruzzini, T. F., Mora, L., Loredo-Jasso, U. U., Vargas, C. P., & Prado, B. (2022). Aggregation and Carbon Stabilization in Constructed Technosols Under an Urban Milpa System [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1938707/v1>
- Anjos, L., Gaistardo, C. C., Deckers, J., Dondeyne, S., Eberhardt, E., Gerasimova, M., Harms, B., Jones, A., Krasilnikov, P., Reinsch, T., Vargas, R., & Zhang, G.-L. (2016). World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91947>
- Araujo, J. H. R., Pando-Bahuon, A., Hartmann, C., Aroui-Boukbida, H., Desjardins, T., & Lerch, T. Z. (2022). Making Green(s) With Black and White : Constructing Soils for Urban Agriculture Using Earthworms, Organic and Mineral Wastes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 884134. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.884134>
- Araujo, J.H.R. (2022). Rôle de la diversité des vers de terre dans le fonctionnement des sols : application à l'ingénierie pédologique. Sciences agricoles. Université Paris-Est Créteil Val-de-Marne - Paris 12. <https://theses.hal.science/tel-04135830>
- Baize, D., & Girard, M.-C. (2009). Référentiel pédologique ([Éd.] 2008). Éd. Quae.
- Barredo, O., Vilela, J., Garbisu, C., Besga, G., Alkorta, I., & Epelde, L. (2020). Technosols made from urban and industrial wastes are a good option for the reclamation of abandoned city plots. *Geoderma*, 377, 114563. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114563>
- Boyer, C. (2022). Recréer des sols fertiles grâce à l'ingénierie écologique [These en préparation, université Paris-Saclay]. <https://www.theses.fr/s350221>
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2010). Quelles techniques pour quels traitements - Analyses coûts-bénéfices. Rapport Final BRGM-RP-58609-FR. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/quelles-techniques-quels-traitements>
- Centro de Estudios Ambientales del ayuntamiento de Victoria-Gasteiz. (2018). Proyecto « Tecnosuelos Gardelegi » : Memoria Final Del Proyecto Tecnosuelos 2018. <https://tecnosuelosgardelegi.blogspot.com/p/memoria-final-del-proyecto-tecnosuelos.html>
- Cheval, P. (2023). Construction de Technosols fonctionnels et fertiles à partir de matériaux, déchets et sous-produits urbains pour un usage en micro-maraîchage bio-intensif. Université de Lille. <https://www.theses.fr/2023ULILR007>
- Coull, M., Butler, B., Hough, R., & Beesley, L. (2021). A Geochemical and Agronomic Evaluation of Technosols Made from Construction and Demolition Fines Mixed with Green Waste Compost. *Agronomy*, 11(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040649>
- Deeb, M., Blouin, M., & Sere, G. (2020). Construire des sols pour végétaliser la ville. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/environnement-securite-th5/genie-ecologique-en-milieu-urbain-42703210/construire-des-sols-pour-vegetaliser-la-ville-ge1069/>
- Deeb, M., Groffman, P., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Walsh, D., Morin, T., Blouin, M., & Séré, G. (2017). Potential ecosystem services provided by constructed Technosols. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13268.30085>
- Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., & Séré, G. (2020). Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations. *SOIL*, 6(2), 413-434. <https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020>

Egendorf, S. P., Cheng, Z., Deeb, M., Flores, V., Paltseva, A., Walsh, D., Groffman, P., & Mielke, H. W. (2018). Constructed soils for mitigating lead (Pb) exposure and promoting urban community gardening : The New York City Clean Soil Bank pilot study. *Landscape and Urban Planning*, 175, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.012>

Fabbri, D., Pizzol, R., Calza, P., Malandrino, M., Gaggero, E., Padoan, E., & Ajmone-Marsan, F. (2021). Constructed Technosols : A Strategy toward a Circular Economy. *Applied Sciences*, 11(8), 3432. <https://doi.org/10.3390/app11083432>

Firpo, B. A., Weiler, J., & Schneider, I. A. H. (2021). Technosol made from coal waste as a strategy to plant growth and environmental control. *Energy Geoscience*, 2(2), 160-166. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.09.006>

Grard, B. (2017). Des Technosols construits à partir de produits résiduaux urbains : Services écosystémiques fournis et évolution [Phdthesis, Université Paris Saclay (COMUE)]. <https://theses.hal.science/tel-01779723>

Grard, B., Bel, N., Marchal, N., Madre, N., Castell, J.-F., Cambier, P., Houot, S., Manouchehri, N., Besancon, S., Michel, J.-C., Chenu, C., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2015). Recycling urban waste as possible use for rooftop vegetable garden. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 3(1), 21-34. <https://hal.science/hal-01198279>

Grard, B., Castell, J.-F., Houot, S., Michel, J.-C., Cambier, P., Bel, N., Madre, F., Aubry, C., Frascaria-Lacoste, N., & Chenu, C. (2015, septembre). Rooftop Gardens and ecosystem services : Beyond food production. <https://hal.science/hal-01831437>

Grard, B., Chenu, C., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2016, octobre). Des PRO sur les toits ? <https://hal.science/hal-01840978>

Grard, B. J.-P., Chenu, C., Houot, S., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2018, juin). L'AU sur les toits en utilisant les déchets urbains : Une première évaluation des services écosystémiques fournis. *Les agricultures urbaines durables : vecteurs de transition écologique : actes du congrès international*. <https://hal.science/hal-01819978>

Grard, B. J.-P., Chenu, C., Manouchehri, N., Houot, S., Frascaria-Lacoste, N., & Aubry, C. (2018). Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0474-2>

Grard, B. J.-P., Manouchehri, N., Aubry, C., Frascaria-Lacoste, N., & Chenu, C. (2020). Potential of Technosols Created with Urban By-Products for Rooftop Edible Production. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3210. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093210>

Guilland, C., Maron, P.-A., Damas, O., & Ranjard, L. (2018). Biodiversity of urban soils for sustainable cities. *Environmental Chemistry Letters*, 16(4), 1267. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>

Herrán Fernández, Á., Lacalle, R. G., Iturritxa Vélez Del Burgo, M. J., Martínez Azkuenaga, M., & Vilela Lozano, J. (2016). First results of Technosols constructed from municipal waste in Vitoria-Gasteiz (Spain). *Spanish Journal of Soil Science*, 6, 1346. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2016.V6.N1.06>

iEES Paris. (2021, juin 25). Projet IPAUP-93 : Ingénierie pédologique pour l'agriculture urbaine participative. iEES Paris. <https://iees-paris.fr/projet-ipaup-93-ingenierie-pedologique-pour-lagriculture-urbaine-participative/>

Joimel, S., Grard, B., Chenu, C., Cheval, P., Mondy, S., Lelièvre, M., Auclerc, A., & Vieublé Gonod, L. (2022). One green roof type, one Technosol, one ecological community. *Ecological Engineering*, 175, 106475. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106475>

Laurette, J., Masfarau, J., Séré, G., Sirguey, C., Claverie, R., Schwager, J., Schwartz, C., & Leglize, P. (2018, juin). *Projet AgroTechnosol : Cultiver des légumes comestibles sur les Technosols. Les agricultures urbaines durables : vecteurs de transition écologique : actes du congrès international*. <https://hal.science/hal-01819978>

Libessart, G. (2022). *Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages* [These de doctorat, Université de Lorraine]. <https://www.theses.fr/2022LORR0120>

Macci, C., Vannucchi, F., Doni, S., Peruzzi, E., Lucchetti, S., Castellani, M., & Masciandaro, G. (2022). Recovery and environmental recycling of sediments : The experience of CNR-IRET Pisa. *Journal of Soils and Sediments*, 22(11), 2865-2872. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03162-7>

Macci, C., Vannucchi, F., Peruzzi, E., Giordani, E., Masciandaro, G., & Doni, S. (2023). Landfarming efficiently recovers marine dredged sediment for pomegranate cultivation. *Journal of Soils and Sediments*, 23(3), 1581-1594. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03436-8>

Manfredi, P., Cassinari, C., Gatti, M., & Trevisan, M. (2019). Growth and yield response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to soil reconstitution technology. *Agrochimica*, 1, 73-83. <https://doi.org/10.12871/00021857201916>

Manfredi, P., Cassinari, C., Salvi, R., Battaglia, R., Marocco, A., & Trevisan, M. (2018). Test on The Effects of Reconstituted Soil on Emergency Speed and Root Growth in Maize. *Contemporary Agriculture*, 67(3-4), 242-248. <https://doi.org/10.1515/contagri-2018-0035>

Martínez-Nicolás, J. J., Legua, P., Hernández, F., Martínez-Font, R., Giordani, E., & Melgarejo, P. (2021). Effect of Phytoremediated Port Sediment as an Agricultural Medium for Pomegranate Cultivation : Mobility of Contaminants in the Plant. *Sustainability*, 13(17), 9661. <https://doi.org/10.3390/su13179661>

Martínez-Sánchez, M. J., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Lopez, S., García-Lorenzo, M. L., Agudo, I., Martínez-Martínez, L. B., Hernández-Pérez, C., & Bech, J. (2022). Uptake of potentially toxic elements by edible plants in experimental mining Technosols : Preliminary assessment. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(5), 1649-1665. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01091-x>

Morel-Chevillet, G., Stapel, O., Galichet, T., & Bessouat, L. (2022). TechnAU - Agricultures Urbaines, de nouveaux défis techniques et sociaux à relever. *Innovations Agronomiques* 85, 347-357. <https://doi.org/10.17180/CIAG-2022-VOL85-ART27>

Moustier, P., Mbaye, A., Bon, H., Guérin, H., & Pagès, J. (1999). « Introduction ». In *Agriculture périurbaine en Afrique subsaharienne : Actes de l'atelier international du 20 au 24 avril 1998*, Montpellier, France. <https://www.semanticscholar.org/paper/Agriculture-p%C3%A9riurbaine-en-Afrique-subsaharienne-%3A-Moustier-Mbaye/751fe6f20589e9a95f931c2fdbaba4d35939538a>

Paltseva, A. A., Cheng, Z., McBride, M., Deeb, M., Egendorf, S. P., & Groffman, P. M. (2022). Legacy Lead in Urban Garden Soils : Communicating Risk and Limiting Exposure. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 873542. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.873542>

Prado, B., Mora, L., Abbruzzini, T., Flores, S., Cram, S., Ortega, P., Navarrete, A., & Siebe, C. (2020). Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3), 237-249. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1583>

Robin, P., Morel, C., Vial, F., Landrain, B., Toudic, A., Li, Y., & Akkal-Corfini, N. (2018). Effect of Three Types of Exogenous Organic Carbon on Soil Organic Matter and Physical Properties of a Sandy Technosol. *Sustainability*, 10(4), 1146. <https://doi.org/10.3390/su10041146>

Rodriguez-Espinosa, T., Navarro-Pedreño, J., Gómez-Lucas, I., Jordán-Vidal, M. M., Bech-Borras, J., & Zorpas, A. A. (2021). Urban areas, human health and technosols for the green deal. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(12), 5065-5086. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00953-8>

Rodriguez-Espinosa, T., Navarro-Pedreño, J., Lucas, I. G., & Belén Almendro-Candel, M. (2021). Land recycling, food security and Technosols. *Journal of Geographical Research*, 4(3), 44-50. <https://doi.org/10.30564/jgr.v4i3.3415>

Rokia, S. (2014). Contribution à la modélisation des processus d'agrégation et de transfert d'éléments nutritifs dans les Technosols construits à partir de déchets (p. 333 p.) [Phdthesis, Université de Lorraine]. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750669>

Rokia, S., Séré, G., Schwartz, C., Deeb, M., Fournier, F., Nehls, T., Damas, O., & Vidal-Beaudet, L. (2014). Modelling agronomic properties of Technosols constructed with urban wastes. *Waste Management*, 34(11), 2155-2162. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.016>

Sano, S., & Kongo, H. (2019). Soils in Greenhouse Plots in an Urban Area. In M. Watanabe & M. Kawahigashi (Éds.), *Anthropogenic Soils in Japan* (p. 165-175). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1753-8_12

Sano, S., Kongo, H., & Uchiyama, T. (2015). Characteristics of man-made soils of greenhouse fields in urban areas, Osaka Prefecture, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(sup1), 123-134. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1050606>

Séré, G. (2018). Mieux connaître la pédogenèse et le fonctionnement des Technosols pour optimiser les services écosystémiques rendus [Thesis, Université de Lorraine, 34 cours Léopold, 54000 Nancy]. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01785605>

Séré, G., Deeb, M., Vidal Beaudet, L., Groffman, P., Blouin, M., Perl Egenderf, S., Vergnes, A., Walsh, D., Morin, T., & Vasenev, V. (2021, août). Review of the last two decades experiences of technosols construction for urban greening. Eurosoil 2021 virtual congress. <https://hal.inrae.fr/hal-03671212>

Tozzi, F., Del Bubba, M., Petrucci, W. A., Pecchioli, S., Macci, C., Hernández García, F., Martínez Nicolás, J. J., & Giordani, E. (2020). Use of a remediated dredged marine sediment as a substrate for food crop cultivation : Sediment characterization and assessment of fruit safety and quality using strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) as model species of contamination transfer. *Chemosphere*, 238, 124651. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.1246517>

Tozzi, F., Pecchioli, S., Renella, G., Melgarejo, P., Legua, P., Macci, C., Doni, S., Masciandaro, G., Giordani, E., & Lenzi, A. (2019). Remediated marine sediment as growing medium for lettuce production : Assessment of agronomic performance and food safety in a pilot experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(13), 5624-5630. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9815>

Tozzi, F., Renella, G., Macci, C., Masciandaro, G., Gonnelli, C., Colzi, I., Giagnoni, L., Pecchioli, S., Nin, S., & Giordani, E. (2021). Agronomic performance and food safety of strawberry cultivated on a remediated sediment. *Science of The Total Environment*, 796, 148803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148803>

Vidal-Beaudet, L., Rokia, S., Nehls, T., & Schwartz, C. (2018). Aggregation and availability of phosphorus in a Technosol constructed from urban wastes. *Journal of Soils and Sediments*, 18(2), 456-466. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1469-3>

Walsh, D., Glass, K., Morris, S., Zhang, H., McRae, I., Anderson, N., Alfieri, A., Egenderf, S. P., Holberton, S., Owrang, S., & Cheng, Z. (2018). Sediment exchange to mitigate pollutant exposure in urban soil. *Journal of Environmental Management*, 214, 354-361. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.013>

Annexe 2 : Réseau d'acteurs détaillé (2/2)

