



**HAL**  
open science

# Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages

Gwendal Libessart

► **To cite this version:**

Gwendal Libessart. Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages. Agronomie. Université de Lorraine, 2022. Français. NNT : 2022LORR0120 . tel-03994394

**HAL Id: tel-03994394**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03994394v1>**

Submitted on 17 Feb 2023

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

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



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES  
UNIVERSITAIRES**

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)  
*(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)*

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

## Université de Lorraine

École doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Naturelles  
Laboratoire Sols et Environnement, UMR 1120 UL-INRAE  
Cerema

# THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du grade de  
Docteur de l'Université de Lorraine en Sciences Agronomiques

## Modélisation prédictive des propriétés des sols urbains basée sur leur historique d'usages

**Gwendal LIBESSART**

Soutenue le 8 juillet 2022

Devant le jury composé de :

<b>Sabine BARLES,</b> Professeur des Universités, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne	Rapporteur
<b>Catherine KELLER,</b> Professeur des Universités, Aix-Marseille Université	Rapporteur
<b>Dominique SCHWARTZ,</b> Professeur des Universités, Université de Strasbourg	Président du jury
<b>Laure VIDAL-BEAUDET,</b> Maître de Conférences, L'Institut Agro Rennes-Angers	Examineur
<b>Philippe BRANCHU,</b> Docteur, Cerema Île-de-France	Encadrant de thèse
<b>Catherine FRANCK-NÉEL,</b> Docteur, Cerema Centre-Est	Encadrant de thèse
<b>Christophe SCHWARTZ,</b> Professeur des Universités, Université de Lorraine	Directeur de thèse



## Remerciements

---

À travers ces quelques lignes, je tenais à remercier l'ensemble des personnes qui ont rendu possible ces travaux et avec qui j'ai partagé cette riche et intense expérience de doctorat.

Je tenais tout d'abord à remercier les membres de mon jury, **Sabine Barles**, **Catherine Keller**, **Dominique Schwartz** et **Laure Vida-Beaudet** de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer mon travail de recherche. Les échanges et remarques que nous avons eus lors de ma soutenance ont été pertinents et très enrichissants.

Je voudrais maintenant remercier mon directeur de thèse **Christophe Schwartz** ainsi que mes deux co-encadrants **Catherine Franck-Néel** et **Philippe Branchu**. Vous avez su me faire confiance dès le début de cette aventure, sans véritablement me connaître. Par votre rigueur scientifique, votre engouement et surtout votre bonne humeur, vous m'avez continuellement motivé et guidé tout au long de ce parcours parfois escarpé. **Christophe**, merci de m'avoir accueilli au sein du LSE, merci d'avoir fait vivre ce projet à travers tes idées et ton audace. Je voulais également te remercier pour la pédagogie dont tu as fait preuve et ta bienveillance. Merci d'avoir mis au profit de ce travail de thèse, tes nombreuses connaissances scientifiques qui m'ont d'ailleurs toujours impressionné. Je te remercie pour ta franchise qui m'a parfois secoué mais qui avec du recul s'est avérée moteur dans la suite de mon travail. **Catherine**, merci pour l'ensemble des connaissances que tu m'as transmis tout au long de ce travail. Tu as su être à l'écoute malgré la distance qui nous séparait. Les nombreuses heures de discussions à travers l'écran m'ont permis de cerner ta capacité d'adaptation, ton émerveillement pour la science, ton esprit critique et surtout ta disponibilité. Merci de t'être investie autant dans ces travaux et ce, du début à la fin que ce soit pour les relectures, les réunions de travail ou encore pour l'ensemble des grands rendez-vous de mon parcours doctoral. **Philippe**, je te remercie de l'accueil que tu m'as réservé au sein du Cerema durant mes 6 premiers mois de thèse, j'en garde de très bons souvenirs. Merci pour ton investissement tout au long de ce travail tant au niveau scientifique qu'au niveau technique. Merci pour ton engagement et ton aide sur l'ensemble de nos sorties terrain au Potager du Roi, dans les jardins des murs à pêches de Montreuil ou encore en forêt domaniale de Verrières. Je te remercie enfin pour ta bienveillance et ton soutien sans faille durant cette thèse.

Merci également aux membres de mon comité de pilotage, **Joël Amossé**, **Francis Douay**, **Christian Thibault** et **André Guillerme** d'avoir participé au suivi et au bon déroulement de ce projet. Merci pour les nombreux échanges scientifiques que nous avons pu avoir lors de ces moments annuels.

L'ensemble de ce projet de recherche n'aurait pas vu le jour sans l'aide indéniable de l'équipe technique du LSE. Je voudrais remercier **Stéphane** pour ton accompagnement sur le terrain et l'apport technique que tu m'as apporté. Merci d'avoir supporté mes moments de stress qui je pense resteront dans les mémoires. Je tenais également à te remercier pour tes précieux conseils et ces nombreuses discussions que nous avons eues lors de divers moments conviviaux. Merci à **Lucas**, pour m'avoir aidé à la préparation des échantillons mais également à la réalisation de mes expériences en laboratoire. J'espère que mes messages du samedi après-midi ne t'ont pas trop dérangé. Merci à **Adeline**, pour tout ce que tu réalises au sein du LSE. Merci pour ta bonne humeur et pour nos nombreux échanges que nous avons eus tout au long de ces 3 années passés au LSE. Merci à **Alain**, pour la gestion du matériel informatique et pour ta disponibilité. Merci à **Malcolm, Séverine et Jean-Claude** pour votre investissement au sein du laboratoire.

Je tenais également à remercier l'ensemble des membres permanents du LSE. Merci à tous, d'avoir rendu le LSE si accueillant, je pense à **Émile, Pierre, Geoffroy, Thibault, Françoise, Apolline, Gaylord, Catherine et Stéphanie**. Merci pour les nombreuses discussions que nous avons eues et vos précieux apports scientifiques.

Un grand merci à **Laëtitia et Romuald** pour leur soutien dans les démarches administratives et surtout pour les nombreuses parties de rigolade que nous avons passées ensemble.

Je voudrais maintenant remercier l'ensemble des collègues du Cerema d'Île-de-France localisés à Trappes. Merci à **Damien, Guillaume, Éric, Sarah, Delphine, Christelle, Amélie, Alexis, Camille, Isabelle, Catherine, Julie, Kenji, David, Élise, William, Cédric et Didier** pour l'accueil chaleureux que vous m'avez réservé durant les 6 premiers mois de thèse passés à vos côtés.

La fin de la rédaction de thèse et la préparation de la soutenance auraient pu se dérouler autrement sans l'aide et le soutien du Cerema Centre-Est de l'Isle d'Abeau. Merci au directeur du département des Transitions Territoriales **Alexandre Bacher** et sa directrice adjointe **Elsa Delcombel** pour avoir accepté de me libérer du temps pour cette fin de thèse. Un grand merci à **Xavier**, mon chef de groupe, pour ton soutien irréprochable durant ces derniers mois. Merci à **Bernard, Frédéric, Clotilde, Joris, Anne-Laure, Lydie, Laurence, Karine, Julie, Gilles, Stéphanie, Aurore, Virginie et Laurent** l'ensemble de mes nouveaux collègues du groupe Environnement pour vos encouragements.

Si ces années de recherches intensives ont été aussi plaisantes et mémorables, c'est indéniablement grâce à mes quatre compagnons d'aventure **Victor, Guillaume, Gabin et Alexis** rencontrés pendant cette thèse. Merci d'avoir été présents dans les moments de doute. Merci également pour les nombreux moments passés hors labo à discuter de tout et de rien autour d'un verre en terrasse ou

encore sur les terrains de volley ou de pétanque. J'ai eu la chance de vous avoir à mes côtés et cette finalité n'aurait pas été aussi belle sans vous.

Je souhaite également remercier tous les doctorants et anciens doctorants du LSE, merci à **Serge, Mithun, Xueqian, Lucie, Emmeline, Sarah, Romane, Dulce, Julien, Serigne et Dani** pour nos nombreux échanges pendant ces moments au laboratoire et pour m'avoir apporté votre bonne humeur quotidienne.

Ces moments de travail ont été associés à des moments de détente passés avec les personnes qui me sont chers. Chaque moment passé en terrasse, sur le sentier de randonnée, sur le terrain de volley ou encore sur le vélo ont été synonymes pour moi d'un regain d'énergie et de motivation qui m'a permis d'aller de l'avant. Pour ces moments, j'aimerais remercier **Alexis** qui a toujours été là pour moi depuis notre douce adolescence. Merci également à **Virgil et Aurélie** pour les moments partagés sur le vélo ou autour d'une bonne carbonade flamande. Merci à **Julia** pour son soutien indéniabte. Un grand merci à **Anne, Ludo, Clémentine, Benjamin, Séverine, Léa, Damien, Loïc et Lilian** pour toutes les sorties, repas et activités partagés à Nancy.

Bien évidemment, ce travail de thèse ne serait pas ce qu'il est sans les encouragements et le soutien de ma famille. Merci à mes parents d'avoir été là dans les moments cruciaux comme celui de la soutenance. Merci également à mon frère de m'avoir soutenu.

Ces derniers mots sont pour **Marie**, ma petite lorraine rencontrée en région lyonnaise. Je tenais à te remercier d'avoir été présente et de m'avoir soutenu comme tu l'as fait. Tu m'as supporté dans le moment le plus stressant de la thèse, je peux donc t'assurer que le meilleur reste à venir.

## Préambule

---

Ce travail de recherche a été financé par le ministère de la Transition écologique (MTE). Il a été mené au sein de la direction territoriale Ile-de-France du Cerema ainsi qu'au sein de l'Université de Lorraine (UL) dans le Laboratoire Sols et Environnement (LSE, UMR 1120 UL-INRAE).

Le Cerema est un établissement public ayant pour objectif d'apporter des connaissances, des savoirs scientifiques et techniques au cœur de projet territoriaux. Il accompagne l'État et les collectivités territoriales pour l'élaboration, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement.

Le LSE est une unité mixte de recherche qui vise à répondre aux questions posées par les pressions anthropiques majeures qui s'exercent sur les sols. Trois axes structurent les activités de ce laboratoire abordant ainsi le développement de la pédologie des milieux très anthropisés, l'agronomie des milieux très anthropisés et les procédés de traitement et de valorisation des milieux très anthropisés.

La thèse s'inscrit dans une dynamique de recherche portée par différents projets financés par l'Ademe, les projets MUSE (« intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme » - 2017-2021) et SUPRA (« Sols Urbains et Projets d'Aménagement » - 2018-2022) respectivement coordonnés par le Cerema et le LSE. Le projet MUSE a pour objectif de développer une méthodologie pour caractériser et cartographier la multifonctionnalité des sols pour l'intégrer dans les plans locaux d'urbanisme intercommunaux. Le projet de recherche SUPRA vise, quant à lui, à amplifier l'acquisition de bases de données sur les sols urbains et à développer un outil d'aide à l'affectation des sols à l'échelle d'une aire urbaine par l'évaluation des services écosystémiques qu'ils rendent.

## Table des matières

---

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>3</b>
<b>PREAMBULE.....</b>	<b>6</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>14</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>18</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>21</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES .....</b>	<b>23</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE I : PRISE EN COMPTE DES SOLS URBAINS DANS L'AMENAGEMENT DES TERRITOIRES : ETAT DES CONNAISSANCES, ENJEUX ET VOIES D'AMELIORATION.....</b>	<b>27</b>
<b>ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES SOLS URBAINS : MISE EN EVIDENCE DE L'INFLUENCE DU FACTEUR HUMAIN.....</b>	<b>27</b>
<b>1. DEFINITIONS, SPECIFICITES ET FONCTIONNALITES DES SOLS URBAINS .....</b>	<b>27</b>
1.1. <i>Notion de sol urbain .....</i>	27
1.1.1. Définition d'un sol.....	27
1.1.2. Définitions géographique et génétique d'un sol urbain .....	27
1.1.3. Définition retenue dans ce manuscrit .....	28
1.2. <i>Spécificités des sols urbains.....</i>	29
1.2.1. Propriétés bio-physico-chimiques globales .....	29
1.2.2. Hétérogénéité des sols urbains .....	30
1.2.3. Difficulté d'échantillonnage et d'accessibilité des sols urbains.....	30
1.2.4. Des sols urbains souvent peu caractérisés et cartographiés .....	30
1.3. <i>Pertinence de la prise en compte de la ressource « sol » en milieu urbain .....</i>	31
1.3.1. Sol et services écosystémiques.....	31
1.3.2. Relations entre services, fonctions et qualité des sols .....	32
1.3.3. Fonctions des sols urbains nécessaires aux zones urbaines et aux citoyens.....	32
1.4. <i>Prise en compte des sols urbains dans l'aménagement du territoire.....</i>	33
1.4.1. Évolution de la prise en compte des sols dans les politiques publiques nationales.....	33
1.4.2. Développement d'outils d'aide à la prédiction de la qualité des sols urbains .....	35
<b>2. LE FACTEUR HUMAIN COMME DETERMINANT DE LA QUALITE DES SOLS URBAINS : NOTIONS CLES ET ETAT DES CONNAISSANCES .....</b>	<b>36</b>
2.1. <i>Spécificité de la pédogenèse en milieu urbain.....</i>	36
2.1.1. Notion de pédogenèse.....	36
2.1.2. Facteurs naturels de formation des sols.....	36
2.2. <i>Facteur humain de la pédogenèse.....</i>	37
2.2.1. Notions clés associées au facteur humain : occupation, usage et pratique humaine .....	38

2.2.2.	Diverses déclinaisons du facteur humain .....	39
2.3.	<i>État des connaissances scientifiques en lien avec le facteur humain</i> .....	40
2.3.1.	Classification pédologique des sols anthropisés.....	40
2.3.2.	Des processus pédologiques plus rapides et plus intenses que dans les sols naturels .....	41
2.3.3.	Facteur humain : facteur dominant la pédogenèse en milieu urbain.....	42
2.3.4.	Un état de connaissance limité concernant le facteur humain .....	43
<b>3.</b>	<b>CONCLUSION : UN FACTEUR HUMAIN ESSENTIEL A INTEGRER</b> .....	<b>43</b>
<b>VERS UNE APPROCHE PREDICTIVE DE LA QUALITE DES SOLS URBAINS : REVUE DES METHODES</b>		
<b>DISPONIBLES POUR INTEGRER ET CARACTERISER LE FACTEUR HUMAIN</b> .....		
<b>45</b>		
<b>1.</b>	<b>DIFFERENTES METHODES DE PRISE EN COMPTE DES CONSEQUENCES DE L'HISTOIRE DES SOLS URBAINS</b>	
<b>SUR LEURS PROPRIETES</b> .....		
<b>45</b>		
1.1.	<i>Méthodes pour intégrer la composante historique des sols urbains</i> .....	45
1.1.1.	Analyse du profil de sol à l'échelle du site .....	45
1.1.2.	Analyse diachronique des cadastres et des photos aériennes, une vision foncière du sol .....	46
1.2.	<i>Détermination des trajectoires historiques à large échelle</i> .....	47
1.2.1.	Évolution des villes : un indicateur de trajectoire historique .....	47
1.2.2.	Défi de la mise en adéquation des échelles spatiales et temporelles .....	48
1.2.3.	Quelques exemples de bases de données d'occupation et d'usage des sols disponibles à large échelle	49
1.2.4.	Limites liées aux résolutions spatiales des bases de données disponibles.....	51
1.3.	<i>Liens entre trajectoires historiques et propriétés bio-physico-chimiques d'un sol urbain</i> 53	
1.3.1.	Propriétés bio-physico-chimiques des sols en lien avec leurs usages actuels .....	53
1.3.2.	Propriétés bio-physico-chimiques du sol en lien avec les usages passés .....	55
1.3.3.	Liens entre pratiques humaines et propriétés du sol .....	56
<b>2.</b>	<b>COMMENT LA PEDOLOGIE EXPERIMENTALE PEUT-ELLE CONTRIBUER A PREDIRE L'EVOLUTION D'UN SOL ?</b>	
<b>57</b>		
2.1.	<i>Bases de la pédologie expérimentale</i> .....	57
2.2.	<i>Méthodes de vieillissement des sols</i> .....	58
2.2.1.	Processus de lixiviation .....	58
2.2.2.	Facteur climatique .....	59
2.3.	<i>Pédologie expérimentale appliquée aux sols anthropisés</i> .....	61
<b>3.</b>	<b>CONCLUSION : DES APPROCHES A COMBINER POUR INTEGRER LE FACTEUR HUMAIN DE LA PEDOGENESE</b>	
<b>URBAINE</b> .....		
<b>62</b>		
<b>QUESTIONNEMENTS SCIENTIFIQUES ET APPROCHE PROPOSEE</b> .....		
<b>64</b>		
<b>CHAPITRE II : CARACTERISATION DU FACTEUR HUMAIN DE LA PEDOGENESE DES SOLS URBAINS</b>		
<b>PAR L'ETUDE DES TRAJECTOIRES HISTORIQUES</b> .....		
<b>67</b>		
<b>1.</b>	<b>PRINCIPE GENERAL</b> .....	<b>67</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIELS UTILISES POUR CARACTERISER LES TRAJECTOIRES HISTORIQUES DES SOLS URBAINS ET LEURS</b>	
<b>PRATIQUES ASSOCIEES</b> .....		
<b>68</b>		
2.1.	<i>Base de données d'occupation et d'usage des sols Corine Land Cover</i> .....	68
2.1.1.	Origine et objectifs.....	68

2.1.2.	Structure et résolution spatiale .....	69
2.1.3.	Base de données CLC des changements d'usage au cours du temps .....	70
2.2.	<i>Base de données Mode d'Occupation des Sols de la région Île-de-France</i> .....	71
2.2.1.	Origine et objectifs.....	71
2.2.2.	Structure et résolution spatiale .....	71
2.3.	<i>Données complémentaires utilisées</i> .....	72
2.3.1.	Photos aériennes mises à disposition par l'Institut national de l'information géographique et forestière .....	72
2.3.2.	Documentation technique sur les pratiques .....	72
<b>3.</b>	<b>METHODES DE CARACTERISATION DES TRAJECTOIRES HISTORIQUES EN MILIEU URBAIN ET DES PRATIQUES ASSOCIEES</b> .....	<b>72</b>
3.1.	<i>Identification des trajectoires historiques des sols urbains pour mieux cerner le facteur humain</i> .....	72
3.1.1.	Principe général .....	72
3.1.2.	Définition de la nomenclature d'usages des sols à analyser .....	73
3.1.3.	Délimitation des unités urbaines .....	75
3.1.4.	Méthode d'analyse des trajectoires historiques des 7 unités urbaines françaises .....	75
3.1.5.	Analyse des trajectoires historiques de l'unité urbaine de Paris .....	76
3.2.	<i>Analyse de la dynamique des sous-usages du MOS dans l'unité urbaine de Paris</i> .....	78
3.3.	<i>Analyse diachronique des photographies aériennes et cartes historiques sur l'unité urbaine de Paris</i> .....	79
3.4.	<i>Identification des pratiques liées aux usages</i> .....	80
<b>4.</b>	<b>RESULTATS</b> .....	<b>81</b>
4.1.	<i>Trajectoires historiques des 7 villes d'études des 30 dernières années</i> .....	81
4.1.1.	Localisation des changements d'usage au sein des unités urbaines .....	81
4.1.2.	Dynamique des changements d'usage au sein des unités urbaines.....	82
4.1.3.	Types de changement d'usage .....	83
4.2.	<i>Trajectoires historiques des sols de l'unité urbaine de Paris</i> .....	83
4.2.1.	Dynamique des changements d'usages au sein de l'unité urbaine de Paris .....	83
4.2.2.	Types de changement d'usage identifiés.....	88
4.2.3.	Nombre de trajectoires historiques identifiées au sein de l'unité urbaine de Paris et nature de ces trajectoires.....	90
4.3.	<i>Analyse de la dynamique des sous-usages de l'unité urbaine de Paris</i> .....	93
4.3.1.	Sous-usages de l'usage « habitat » .....	93
4.3.2.	Sous-usages de l'usage « installation sportive et de loisirs » .....	93
4.3.3.	Sous-usages de l'usage « réseau routier et ferroviaire ».....	93
4.3.4.	Sous-usages de l'usage « terre agricole » .....	94
4.4.	<i>Trajectoires historiques observées par analyse diachronique de photos aériennes et de cartes historiques sur le territoire de l'unité urbaine de Paris</i> .....	94
4.4.1.	Sites urbains situés en zone 1 .....	94
4.4.2.	Sites urbains situés en zone 2 .....	97
4.4.3.	Sites urbains situés en zone 3 .....	100
4.5.	<i>Identification des pratiques liées aux usages</i> .....	103

<b>5. DISCUSSION .....</b>	<b>108</b>
5.1. <i>Des trajectoires historiques comme indicateur des modèles d'urbanisation des villes...</i>	108
5.2. <i>Des trajectoires historiques comme résultante de l'histoire des villes.....</i>	109
5.3. <i>Échelles spatiale et temporelle des données d'occupation et d'usage des sols .....</i>	110
5.4. <i>Vers une pédologie prédictive en milieu urbain par la caractérisation du facteur humain</i>	112
<b>6. CONCLUSION.....</b>	<b>115</b>
<b>CHAPITRE III : MESURES <i>IN SITU</i> DE L'IMPACT DU FACTEUR HUMAIN SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE SOLS URBAINS .....</b>	<b>116</b>
<b>1. PRINCIPE GENERAL.....</b>	<b>116</b>
<b>2. PRESENTATION DES SITES RETENUS .....</b>	<b>117</b>
2.1. <i>Terres industrielles de la station expérimentale de Brabois, Vandœuvre-lès-Nancy (Nti)</i>	117
2.1.1. Justification du choix de site .....	117
2.1.2. Terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt (54310).....	118
2.1.3. Terre industrielle issue de la cokerie de Thionville (57100) .....	118
2.1.4. Terre industrielle issue d'une usine à gaz d'origine confidentielle.....	119
2.2. <i>Potager du Roi de Versailles (V<sub>he</sub>).....</i>	119
2.2.1. Justification du choix de site .....	119
2.2.2. Historique du site et définition de sa trajectoire historique.....	119
2.3. <i>Quartier de Bel Air à Montreuil (M<sub>ah</sub>).....</i>	120
2.3.1. Justification du choix de site .....	120
2.3.2. Historique du site et définition de sa trajectoire historique.....	120
<b>3. METHODE EMPLOYEE .....</b>	<b>122</b>
3.1. <i>Identification d'un sol de référence .....</i>	122
3.1.1. Contexte géologique .....	122
3.1.2. Contexte pédologique.....	122
3.2. <i>Échantillonnage et caractérisation des propriétés des sols des sites d'étude.....</i>	123
3.2.1. Préparation de l'intervention sur site .....	123
3.2.2. Zonage du site d'étude .....	123
3.2.3. Description des profils et échantillonnage des sols.....	124
3.2.4. Préparation des échantillons .....	124
3.2.5. Les propriétés physico-chimiques mesurées .....	124
3.3. <i>Exploitation des résultats .....</i>	125
3.4. <i>Identification des impacts de la trajectoire historique ciblée.....</i>	125
<b>4. RESULTATS .....</b>	<b>126</b>
4.1. <i>Conséquences des trajectoires historiques des terres industrielles de la station expérimentale de Brabois sur les propriétés physico-chimiques des sols .....</i>	126
4.1.1. Identification et caractéristiques du sol de référence pour chaque terre industrielle.....	126
4.1.2. Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des trois terres industrielles (après 21 à 24 années d'abandon en végétation spontanée) .....	127

4.1.3.	Impacts de la trajectoire historique étudiée sur les propriétés physiques et chimiques des sols	136
4.2.	<i>Conséquences des trajectoires historiques du Potager du Roi de Versailles sur les propriétés physico-chimiques des sols</i> .....	140
4.2.1.	Identification et caractéristiques du sol de référence pour le Potager du Roi .....	140
4.2.2.	Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des sols du Potager du Roi de Versailles ..	142
4.2.3.	Impacts des trajectoires historiques étudiées sur les propriétés physiques et chimiques des sols	151
4.3.	<i>Conséquences de la trajectoire historique du site du quartier de Bel Air à Montreuil sur les propriétés physico-chimiques des sols</i> .....	154
4.3.1.	Identification et caractéristiques du sol de référence du site du quartier de Bel Air .....	154
4.3.2.	Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des sols du quartier de Bel Air à Montreuil	155
4.3.3.	Impacts de la trajectoire historique étudiés sur les propriétés physiques et chimiques des sols	161
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION</b> .....	<b>163</b>
5.1.	<i>Lien entre pratiques humaines associées aux trajectoires historiques et propriétés physiques et chimiques observées sur les sols</i> .....	163
5.1.1.	Effets de l'absence d'usage sur les propriétés physico-chimiques des sols industriels.....	163
5.1.2.	Conséquences des pratiques humaines sur les propriétés physico-chimiques des sols du Potager du Roi.....	164
5.1.3.	Pratiques d'urbanisation des sols et leurs conséquences sur les propriétés physiques et chimiques.....	165
5.2.	<i>Des propriétés physiques et chimiques variant selon l'intensité des pratiques appliquées au sol</i>	167
5.3.	<i>De la notion de chronoséquence à la notion d'« anthroposéquence »</i> .....	168
<b>6.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>171</b>
<b>CHAPITRE IV : APPORT DE LA PEDOLOGIE EXPERIMENTALE A LA CONNAISSANCE DE L'EVOLUTION DES SOLS URBAINS SOUMIS A DIFFERENTES PRATIQUES</b> .....		
<b>1.</b>	<b>PRINCIPE GENERAL</b> .....	<b>172</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIELS</b> .....	<b>173</b>
2.1.	<i>Choix du référentiel d'étude</i> .....	173
2.1.1.	Choix expérimental n°1 : l'horizon de surface .....	174
2.1.2.	Choix expérimental n°2 : les pratiques du dernier usage .....	174
2.2.	<i>Sélection des sites supports</i> .....	175
2.3.	<i>Sélection du matériau initial</i> .....	175
2.3.1.	Critères de sélection du matériau initial.....	175
2.3.2.	Identification du matériau initial pour chaque site support .....	176
2.4.	<i>Dispositifs expérimentaux employés</i> .....	177
2.4.1.	Description des dispositifs utilisés .....	177
2.4.2.	Plateforme phytotronique .....	177
<b>3.</b>	<b>METHODES DE VIEILLISSEMENT</b> .....	<b>178</b>

3.1.	<i>Transposition d'une situation réelle en conditions contrôlées de laboratoire</i>	178
3.2.	<i>Méthodes de pédologie expérimentale employées</i>	178
3.2.1.	Facteur climatique	178
3.2.2.	Facteur anthropique	180
3.3.	<i>Plan d'expérience défini pour chaque matériau afin de simuler les différents traitements représentatifs des pratiques humaines</i>	183
3.3.1.	Simulation exclusive du facteur climatique	183
3.3.2.	Simulation d'une seule pratique combinée au facteur climatique	183
3.3.3.	Simulation de l'ensemble des pratiques combiné au facteur climatique	184
3.3.4.	Plan de suivi de l'évolution des paramètres	184
3.3.5.	Mise en place des dispositifs	184
3.4.	<i>Propriétés physiques et chimiques déterminées au cours de l'expérience</i>	185
3.4.1.	Détermination de la couleur	185
3.4.2.	Description de la structure	185
3.4.3.	Détermination de la masse volumique apparente	186
3.4.4.	Paramètres chimiques mesurés	187
<b>4.</b>	<b>RESULTATS</b>	<b>188</b>
4.1.	<i>Évolution de la couleur des sols au cours des expériences de vieillissement</i>	188
4.1.1.	Résultats obtenus pour le sol « PRV »	188
4.1.2.	Résultats obtenus pour le sol BAM	188
4.2.	<i>Évolution de la structure des sols au cours de l'expérience de vieillissement</i>	189
4.2.1.	Résultats obtenus pour le sol « PRV »	189
4.2.2.	Résultats obtenus pour le sol « BAM »	190
4.3.	<i>Évolution de la masse volumique apparente au cours de l'expérience de vieillissement</i>	192
4.3.1.	Résultats obtenus pour le sol « PRV »	192
4.3.2.	Résultats obtenus pour le sol « BAM »	193
4.4.	<i>Analyse de l'influence des pratiques sur les propriétés chimiques des sols</i>	194
4.4.1.	Influence des pratiques associées au site « PRV »	194
4.4.2.	Influence des pratiques associées au site « BAM »	206
<b>5.</b>	<b>DISCUSSION</b>	<b>216</b>
5.1.	<i>Rôle des pratiques humaines sur l'évolution des propriétés physiques des sols et dans les processus pédogénétiques associés</i>	216
5.1.1.	Apports organiques et inorganiques et influence sur la couleur des sols	216
5.1.2.	Impact du compactage et des cycles climatiques sur l'évolution de la structure du sol	216
5.1.3.	Compactage et travail du sol : deux pratiques humaines influençant la masse volumique apparente du sol	218
5.1.4.	Liens entre pratiques, évolution des paramètres physiques et processus / mécanismes mis en œuvre	218
5.2.	<i>Rôle des pratiques humaines sur l'évolution des propriétés chimiques des sols et dans les processus pédogénétiques associés</i>	219
5.2.1.	Apports organique et inorganique : facteur prédominant dans l'évolution des paramètres agronomiques	219
5.2.2.	Influence des pratiques humaines sur la biodisponibilité des éléments métalliques	220

5.2.3. Influence des pratiques humaines sur les teneurs totales métalliques.....	222
5.2.4. Liens entre pratiques, évolution des paramètres chimiques et processus / mécanismes mis en œuvre .....	222
5.3. <i>Simuler l'évolution d'un sol urbain en intégrant les pratiques humaines : une approche innovante</i> .....	225
5.3.1. Combiner facteurs climatique et anthropique pour simuler le vieillissement du sol urbain ...	225
5.3.2. Cohérence entre les tendances d'évolution observées en laboratoire et la réalité de terrain	225
5.3.3. Limites du modèle expérimental proposé .....	226
<b>6. CONCLUSION</b> .....	<b>228</b>
<b>CHAPITRE V : DE LA CONNAISSANCE DE L'HISTORIQUE D'USAGES DES SOLS URBAINS A LEUR CARTOGRAPHIE</b> .....	<b>229</b>
<b>DISCUSSION GENERALE</b> .....	<b>229</b>
<b>1. DISCUSSION GENERALE A PORTEE SCIENTIFIQUE : PROPOSITION D'UNE METHODE DE CARTOGRAPHIE DES « ANTHROPOSEQUENCES » ET DES PROPRIETES POTENTIELLES DES SOLS URBAINS</b> .....	<b>231</b>
1.1. « <i>Anthroposéquence</i> » : une notion à introduire en sciences du sol .....	231
1.2. « <i>Anthroposéquence</i> » : une approche utile à la cartographie prédictive des sols urbains à large échelle .....	231
1.3. <i>Développement de l'approche cartographique basée sur le concept d'« Anthroposéquence »</i> .....	233
1.3.1. Vers une typologie des « anthroposéquences ».....	233
1.3.2. Amélioration de la méthode par le développement de l'analyse historique .....	235
1.4. <i>Vers des cartes thématiques des principales propriétés des horizons de surface des sols urbains</i> .....	236
1.5. <i>Apports scientifiques de l'approche proposée</i> .....	237
<b>2. DISCUSSION GENERALE A PORTEE OPERATIONNELLE : DES ACQUIS SCIENTIFIQUES A L'AIDE A LA DECISION POUR LA PLANIFICATION ET L'AMENAGEMENT URBAIN</b> .....	<b>240</b>
2.1. <i>Proposition d'une approche méthodologique opérationnelle</i> .....	240
2.2. <i>Nécessité d'un changement d'échelle pour une meilleure prise en compte des sols urbains dans les stratégies d'aménagement</i> .....	240
2.3. <i>Des documents d'urbanisme adaptés à la prise en compte des sols urbains à large échelle ?</i> .....	241
2.4. <i>Format de l'approche proposée et adéquation au besoin opérationnel</i> .....	242
<b>3. BILAN : POSITION DE L'APPROCHE PROPOSEE FACE AUX ENJEUX SCIENTIFIQUES ET OPERATIONNELS</b> .	<b>244</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>245</b>
<b>PERSPECTIVES</b> .....	<b>247</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>248</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>269</b>

## Liste des figures

---

<b>FIGURE 1</b> : LES DIFFERENTS TYPES DE SOLS PRESENTS AUTOUR DE LA VILLE DE PARIS ET SA ZONE BLANCHE DEFINISSANT LES SOLS URBAINS. (GROUPEMENT D'INTERET SCIENTIFIQUE SUR LES SOLS (GIS SOL) – RESEAU MIXTE TECHNOLOGIQUE SOLS ET TERRITOIRES, 2019) .....	31
<b>FIGURE 2</b> : ÉVOLUTION DES MESURES EMANANT DE POLITIQUES PUBLIQUES LUTTANT CONTRE L'ARTIFICIALISATION DES SOLS, D'APRES AURAN, AGENCE D'URBANISME DE LA REGION NANTAISE (AURAN, 2020) .....	34
<b>FIGURE 3</b> : ILLUSTRATION DES CONCEPTS D'OCCUPATION, D'USAGE, DE SOUS-USAGE ET DE PRATIQUE HUMAINE.....	39
<b>FIGURE 4</b> : LES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA PEDOGENESE EN MILIEU URBAIN.....	40
<b>FIGURE 5</b> : LES DIFFERENTS TYPES D'ANTHROSOLS, (BAIZE ET GIRARD, 2008).....	41
<b>FIGURE 6</b> : SCHEMA CONCEPTUEL REPRESENTANT LES ETAPES NECESSAIRES A LA CARACTERISATION DU FACTEUR HUMAIN DE LA PEDOGENESE EN MILIEU URBAIN .....	44
<b>FIGURE 7</b> : PROFIL DE SOL TEMOIN D'UNE ACTIVITE INDUSTRIELLE SOUTENUE (HUOT, 2013) .....	46
<b>FIGURE 8</b> : DIFFERENCE DE PRECISION DES OCCUPATIONS ET USAGES DES SOLS EXPLIQUEE PAR LES RESOLUTIONS SPATIALES DES BASES DE DONNEES. A) MODE D'OCCUPATION DES SOLS DE LA REGION PARISIENNE (2017), B) CORINE LAND COVER (2018).....	52
<b>FIGURE 9</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS TOTALES EN HAP (MG.KG-1) AU COURS D'UNE EXPERIMENTATION D'ATTENUATION NATURELLE DE QUATRE TERRES PROVENANT DE SITES INDUSTRIELS CONTAMINES : COKERIES ET USINE A GAZ - A.N : PERIODE D'ATTENUATION NATURELLE D'ENVIRON 10 ANS (OUVRARD ET AL., 2013) .....	55
<b>FIGURE 10</b> : DISPOSITIF DE CHROMATOGRAPHIE ELUTO-FRONTALE (SCHOLTUS <i>ET AL.</i> , 2009) .....	59
<b>FIGURE 11</b> : VARIATION DE LA STABILITE DES AGREGATS SELON DIFFERENTES TAILLES D'AGREGATION APRES DES CYCLES GEL/DEGEL (OZTAS & FAYETORBAY, 2003).....	60
<b>FIGURE 12</b> : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE ADOPTEE DANS CE MANUSCRIT .....	66
<b>FIGURE 13</b> : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE EMPLOYEE POUR FOURNIR DES ELEMENTS DE REPONSES A LA CARACTERISATION DES SOLS URBAINS : CARACTERISATION DES TRAJECTOIRES HISTORIQUES DES SOLS URBAINS ET DES PRATIQUES HUMAINES ASSOCIEES .....	68
<b>FIGURE 14</b> : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA PHOTO-INTERPRETATION (CGDD, FEVRIER 2009).....	69
<b>FIGURE 15</b> : LOCALISATION DES 7 UNITES URBAINES ETUDIEES.....	73
<b>FIGURE 16</b> : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES 3 ZONES D'ETUDE DE L'UNITE URBAIN DE PARIS, FRANCE .....	78
<b>FIGURE 17</b> : LOCALISATION DES DIFFERENTS SITES URBAINS ETUDIES AVEC LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES ET LES CARTES HISTORIQUES AU SEIN DE L'UNITE URBAIN DE PARIS .....	80
<b>FIGURE 18</b> : LOCALISATION DES CHANGEMENTS D'USAGE DE L'UNITE URBAIN DE TOULOUSE AU COURS DES 30 DERNIERES ANNEES.....	82
<b>FIGURE 19</b> : CARTES D'USAGES DES SOLS DE L'UNITE URBAIN DE PARIS EN 1949 (A) ET 2017 (B) .....	85
<b>FIGURE 20</b> : OCCURRENCE DE CHANGEMENTS D'USAGE SUR LE TERRITOIRE DE L'UNITE URBAIN DE PARIS AU COURS DES 70 DERNIERES ANNEES.....	88
<b>FIGURE 21</b> : POURCENTAGE CUMULE DE SURFACE REPRESENTEE PAR LES DIFFERENTES TRAJECTOIRES HISTORIQUES IDENTIFIEES A L'ECHELLE DE L'UNITE URBAIN DE PARIS ET DES 3 ZONES D'ETUDE.....	91
<b>FIGURE 22</b> : ÉVOLUTION HISTORIQUE DU SITE URBAIN SITUÉ DANS LE II <sup>ÈME</sup> ARRONDISSEMENT DE PARIS DE 1740 A NOS JOURS (IGN ; <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">HTTPS://REMONTERLETEMPS.IGN.FR/</a> ).....	96
<b>FIGURE 23</b> : ÉVOLUTION HISTORIQUE DU SITE URBAIN SITUÉ A ASNIERES-SUR-SEINE DE 1740 A NOS JOURS (IGN ; <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">HTTPS://REMONTERLETEMPS.IGN.FR/</a> ).....	99

<b>FIGURE 24</b> : ÉVOLUTION HISTORIQUE DU SITE URBAIN DE NEAUPHLE-LE-CHATEAU DE 1866 A NOS JOURS (IGN ; <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">HTTPS://REMONTERLETEMPS.IGN.FR/</a> ).....	102
<b>FIGURE 25</b> : LES 3 MODES DE CROISSANCE D'UNE VILLE : (A) LA DENSIFICATION, (B) L'EXPANSION EN PERIPHERIE DES ZONES BATIES, (C) LA CROISSANCE PERIPHERIQUE ISOLEE. EN GRIS : ZONE BATIE, EN BLANC : ZONE NON COUVERTE ET EN NOIR : BATI NOUVEAU (SAPENA & RUIZ, 2015).....	109
<b>FIGURE 26</b> : PROPOSITION DE TRAJECTOIRES HISTORIQUES D'USAGES REPRESENTANT L'UNITE URBAINE D'UNE VILLE FRANÇAISE SUR LES 100 DERNIERES ANNEES AINSI QUE LES PRATIQUES ASSOCIEES .....	113
<b>FIGURE 27</b> : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE EMPLOYEE POUR CARACTERISER LES SOLS URBAINS : MESURES <i>IN SITU</i> DE L'IMPACT DU FACTEUR HUMAIN SUR LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLS URBAINS .....	117
<b>FIGURE 28</b> : VUES D'ENSEMBLE DE LA STATION EXPERIMENTALE DE BRABOIS (VANDŒUVRE-LES-NANCY).....	118
<b>FIGURE 29</b> : TRAJECTOIRES HISTORIQUES REPRESENTEES SUR LE SITE DU POTAGER DU ROI DE VERSAILLES .....	120
<b>FIGURE 30</b> : ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS, DU SITE D'ETUDE (POLYGONE BLEU) SITUE DANS LE QUARTIER DE BEL AIR : ZONE AGRICOLE (A), ZONE EN COURS DE CONSTRUCTION (B), ZONE RESIDENTIELLE (C). CES PHOTOGRAPHIES AERIENNES SONT ISSUES DU SITE « REMONTER LE TEMPS » DE L'IGN ( <a href="https://remonterletemps.ign.fr/">HTTPS://REMONTERLETEMPS.IGN.FR/</a> ). .....	121
<b>FIGURE 31</b> : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA METHODE EMPLOYEE .....	125
<b>FIGURE 32</b> : PROFILS DE SOL OBSERVES LORS DE L'ECHANTILLONNAGE DES TROIS TERRES INDUSTRIELLES : PROFIL H <sub>3</sub> (A), PROFIL T <sub>1</sub> (B), PROFIL U <sub>3</sub> (C) .....	128
<b>FIGURE 33</b> : ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES DONNEES ISSUES DES PROFILS (N=9) ET HORIZONS (N=18) DES 3 TYPES DE TERRES INDUSTRIELLES ETUDIEES. ....	134
<b>FIGURE 34</b> : COMPARAISON DES TENEURS (EN G.KG <sup>-1</sup> ) DE CARBONE ORGANIQUE, D'AZOTE TOTAL ET DE PHOSPHORE DISPONIBLE DES TROIS TERRES INDUSTRIELLES ETUDIEES.....	135
<b>FIGURE 35</b> : COMPARAISON DES TENEURS (EN MG.KG <sup>-1</sup> ) EN PLOMB, CADMIUM, ZINC ET CUIVRE DES TROIS TERRES INDUSTRIELLES ETUDIEES .....	135
<b>FIGURE 36</b> : COMPARAISON DES TENEURS MOYENNES D'ARGILES, DE LIMONS ET DE SABLES OBTENUES POUR CHAQUE TERRE INDUSTRIELLE (N=6 = 2 HORIZONS X 3 PROFILS), RELATIVEMENT AUX VALEURS INITIALES MESUREES SUR UN ECHANTILLON UNIQUE MELANGE (EN ROUGE) DE CHAQUE TERRE INDUSTRIELLE .....	137
<b>FIGURE 37</b> : COMPARAISON DES PARAMETRE AGRONOMIQUES (TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE, RATIO C/N ET TENEUR ET CALCAIRE TOTAL) OBTENUES SUR SITE (N=6 = 2 HORIZONS X 3 PROFILS) RELATIVEMENT AUX TENEURS INITIALES (EN ROUGE) DE CHAQUE TERRE INDUSTRIELLE .....	138
<b>FIGURE 38</b> : COMPARAISON DES TENEURS (MG.KG <sup>-1</sup> ) EN ETM (PLOMB, CADMIUM, ZINC ET CUIVRE) OBTENUES SUR SITE (N=6 = 2 HORIZONS X 3 PROFILS) ET DES TENEURS INITIALES DE CHAQUE TERRE INDUSTRIELLE .....	139
<b>FIGURE 39</b> : IDENTIFICATION DE LA COUCHE GEOLOGIQUE SUR LAQUELLE LE SOL INITIAL DU POTAGER DU ROI DE VERSAILLES S'EST DEVELOPPE. Fz : ALLUVIONS MODERNES.....	140
<b>FIGURE 40</b> : PROFILS DE SOL OBSERVES AU POTAGER DU ROI DE VERSAILLES : PROFIL P (A), PROFIL V (B), PROFIL P/V (C) ET PROFIL A (D).....	143
<b>FIGURE 41</b> : CERCLE DE CORRELATION DES VARIABLES PHYSIQUES ET CHIMIQUES ET GRAPHIQUE DE REPRESENTATION DES INDIVIDUS ANALYSES POUR L'ENSEMBLE DES PROFILS (N=4) ET HORIZONS (N=12) OBSERVES SUR LE SITE DU POTAGER DU ROI. ....	148
<b>FIGURE 42</b> : QUANTITES TOTALES DE CARBONE ORGANIQUE, D'AZOTE TOTAL, DE PHOSPHORE OLSEN ET DE CALCAIRE PAR HORIZON ET PAR PROFIL OBSERVE SUR LES 75 PREMIERS CENTIMETRES .....	150
<b>FIGURE 43</b> : QUANTITES TOTALES DE ZINC, DE CADMIUM, DE PLOMB ET DE CUIVRE PAR HORIZON ET PAR PROFIL OBSERVE SUR LES 75 PREMIERS CENTIMETRES.....	151
<b>FIGURE 44</b> : SITE D'ETUDE DU QUARTIER BEL AIR A MONTREUIL.....	155
<b>FIGURE 45</b> : PROFIL DE SOL OBSERVE SUR LE SITE DU QUARTIER DE BEL AIR A MONTREUIL .....	157

<b>FIGURE 46</b> : ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES DONNEES ISSUES DES HORIZONS (N=5) DU PROFIL DE SOL OBSERVE SUR LE SITE DU QUARTIER DE BEL AIR .....	159
<b>FIGURE 47</b> : PROPRIETES AGRONOMIQUES MESUREES TOUT AU LONG DU PROFIL DE SOL OBSERVE SUR LE SITE DU QUARTIER DU BEL AIR.....	160
<b>FIGURE 48</b> : TENEURS EN ELEMENTS TRACES MESUREES TOUT AU LONG DU PROFIL DE SOL OBSERVE SUR LE SITE DU QUARTIER DU BEL AIR.....	161
<b>FIGURE 50</b> : SCHEMA CONCEPTUEL DE LA DEMARCHE SCIENTIFIQUE EMPLOYEE POUR DONNER DES ELEMENTS DE REPONSES A LA CARACTERISATION DES SOLS URBAINS. ÉTAPE 3 : RECOURS A LA PEDOLOGIE EXPERIMENTALE POUR UNE MEILLEURE COMPREHENSION DE L'ÉVOLUTION DES PROPRIETES PHYSIQUES.....	173
<b>FIGURE 51</b> : PROFIL DE LUVISOL DEVELOPPE SUR LIMONS DES PLATEAUX OBSERVE LORS DU PRELEVEMENT DU MATERIAU INITIAL DANS LA FORET DE VERRIERES.....	176
<b>FIGURE 52</b> : SCHEMA DE TRANSPOSITION DE LA SITUATION REELLE CONSIDEREE EN CONDITIONS CONTROLEES DE LABORATOIRE .....	178
<b>FIGURE 53</b> : BLOC DE 42 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX PLACES ALEATOIREMENT AU SEIN DE LA CHAMBRE CLIMATIQUE .....	185
<b>FIGURE 54</b> : SOL EXTRAIT DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL (A GAUCHE) ET DEFINITION DES ELEMENTS COMPOSANT SA SUR-STRUCTURE ET SA SOUS-STRUCTURE (A DROITE) .....	186
<b>FIGURE 55</b> : CHANGEMENT DE COULEUR DES SOLS AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A L'ENSEMBLE DES PRATIQUES ET POUR LES SOLS AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A LA PRATIQUE UNITAIRE « AJOUT DE FUMIER » ET A LA PRATIQUE UNITAIRE « AJOUT DE COMPOST » .....	188
<b>FIGURE 56</b> : CHANGEMENT DE COULEUR CARACTERISE POUR LES SOLS AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A L'ENSEMBLE DES PRATIQUES ET POUR LES SOLS AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A LA PRATIQUE UNITAIRE « AJOUT DE MORTIER ».....	189
<b>FIGURE 57</b> : L'UNITE STRUCTURALE DU SOL « PRV » A L'INSTANT INITIAL (A), REPARTITION DE LA SOUS-STRUCTURE DU SOL INITIAL ENTRE LES MICRO-AGREGATS ET LES PARTICULES APRES TAMISAGE A 200 µM (B).....	189
<b>FIGURE 58</b> : STRUCTURE DU SOL AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A L'INTEGRALITE DES PRATIQUES (V_CLI+ENS) (A), REPARTITION DE LA SOUS-STRUCTURE DU SOL INITIAL ENTRE LES MICRO-AGREGATS ET LES PARTICULES APRES TAMISAGE A 200 µM (B) .....	190
<b>FIGURE 59</b> : STRUCTURE DU SOL « BAM » A L'ETAT INITIAL (A), REPARTITION DE LA SOUS-STRUCTURE DU SOL INITIAL ENTRE LES MICRO-AGREGATS ET LES PARTICULES APRES TAMISAGE A 200 µM (B).....	191
<b>FIGURE 60</b> : STRUCTURE DU SOL AYANT SUBI LES CYCLES CLIMATIQUES COMBINES A L'INTEGRALITE DES PRATIQUES (M_CLI+ENS) (A), REPARTITION DE LA SOUS-STRUCTURE DU SOL INITIAL ENTRE LES MICRO-AGREGATS ET LES PARTICULES APRES TAMISAGE A 200 µM (B) .....	192
<b>FIGURE 61</b> : CERCLE DE CORRELATION DES VARIABLES PHYSIQUES ET CHIMIQUES ANALYSEES POUR L'ENSEMBLE DES TRAITEMENTS (N=81) REALISES ACP REALISEE AVEC RSTUDIO GRACE AUX PACKAGES FACTOMINER ET FACTOEXTRA ET A LA FONCTION FVIZ_PCA_VAR (A). ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES MESURES REALISEES AU COURS DES 10 SEMAINES D'EXPERIENCE EN FONCTION DES DIFFERENTS TRAITEMENTS. ACP REALISEE AVEC L'OUTIL RSTUDIO A L'AIDE DE LA FONCTION PCA() ET FVIZ_PCA_IND () DES PACKAGES FACTOMINER ET FACTOEXTRA (B).....	196
<b>FIGURE 62</b> : ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES MESURES REALISEES AU COURS DES 10 SEMAINES D'EXPERIENCE EN FONCTION DES DIFFERENTS TEMPS DE MESURES. ACP REALISEE AVEC L'OUTIL RSTUDIO A L'AIDE DE LA FONCTION PCA() ET FVIZ_PCA_IND () DES PACKAGES FACTOMINER ET FACTOEXTRA .....	197
<b>FIGURE 63</b> : ÉVOLUTION DU PH AU COURS DU TEMPS EN FONCTION DES NEUF TRAITEMENTS REALISES .....	198
<b>FIGURE 64</b> : ÉVOLUTION DU CARBONE ORGANIQUE AU COURS DU TEMPS EN FONCTION DES NEUF TRAITEMENTS REALISES.....	199

<b>FIGURE 65</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN CUIVRE, NICKEL, PLOMB, ZINC BIODISPONIBLES DU SOL « PVR » SELON LA METHODE D'EXTRACTION AU DTPA .....	201
<b>FIGURE 66</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS TOTALES EN CUIVRE, NICKEL, PLOMB, ZINC AU COURS DU TEMPS POUR LE SOL « PRV ».....	202
<b>FIGURE 67</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN ALUMINIUM, FER, MAGNESIUM ET SODIUM BIODISPONIBLES AU COURS DES EXPERIMENTATIONS POUR LE SOL « PRV ».....	204
<b>FIGURE 68</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN ALUMINIUM, FER, MAGNESIUM ET SODIUM TOTALES AU COURS DES EXPERIMENTATIONS POUR LE SOL « PRV ».....	205
<b>FIGURE 69</b> : CERCLE DE CORRELATION DES VARIABLES PHYSIQUES ET CHIMIQUES ANALYSEES POUR L'ENSEMBLE DES TRAITEMENTS (N=81) REALISES ACP REALISEE AVEC RSTUDIO GRACE AUX PACKAGES FACTOMINER ET FACTOEXTRA ET A LA FONCTION FVIZ_PCA_VAR (A). ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES DES MESURES REALISEES AU COURS DES 10 SEMAINES D'EXPERIENCE EN FONCTION DES DIFFERENTS TRAITEMENTS. ACP REALISEE AVEC L'OUTIL RSTUDIO A L'AIDE DE LA FONCTION PCA() ET FVIZ_PCA_IND () DES PACKAGES FACTOMINER ET FACTOEXTRA (B).....	207
<b>FIGURE 70</b> : ÉVOLUTION DU PH AU COURS DU TEMPS EN FONCTION DES CINQ TRAITEMENTS REALISES.....	208
<b>FIGURE 71</b> : ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN PHOSPHORE OLSEN AU COURS DU TEMPS EN FONCTION DES CINQ TRAITEMENTS REALISES .....	209
<b>FIGURE 72</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN CUIVRE, NICKEL, PLOMB, ZINC BIODISPONIBLES DU SOL « BAM » SELON LA METHODE D'EXTRACTION AU DTPA AU COURS DES EXPERIMENTATIONS (TINITIAL, T1, T2 ET TFINAL).....	211
<b>FIGURE 73</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS TOTALES EN CUIVRE, NICKEL, PLOMB, ZINC AU COURS DES EXPERIMENTATIONS (TINITIAL, T1, T2 ET TFINAL) POUR LE SOL « BAM » .....	212
<b>FIGURE 74</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN ALUMINIUM, FER, MAGNESIUM ET SODIUM BIODISPONIBLES AU COURS DES EXPERIMENTATIONS POUR LE SOL « BAM » .....	214
<b>FIGURE 75</b> : ÉVOLUTION DES TENEURS EN ALUMINIUM, FER, MAGNESIUM ET SODIUM TOTALES AU COURS DES EXPERIMENTATIONS POUR LE SOL « BAM» .....	215
<b>FIGURE 76</b> : PRINCIPAUX RESULTATS DISCUTES DANS LE CHAPITRE V ISSUS DES DIFFERENTES APPROCHES POUR PROPOSER LE DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE PREDICTIVE DES TYPES DE SOLS URBAINS ET DE LEURS PROPRIETES PAR LA CONNAISSANCE DE LEUR TRAJECTOIRE HISTORIQUE .....	230
<b>FIGURE 77</b> : LOCALISATION PREDICTIVE DE TECHNOSOLS AU SEIN DE L'UNITE URBAINE DE PARIS – PRESENCE POTENTIELLE DE TECHNOSOLS DEDUITE D'UNE APPROCHE HISTORIQUE.....	233
<b>FIGURE 78</b> : PREDICTION CARTOGRAPHIQUE DES SOLS SUPPORT D'AGRICULTURE URBAINE POSSEDANT UN PH > 7, UNE TENEUR EN C <sub>ORG</sub> > 20 G.KG <sup>-1</sup> ET UNE TENEUR EN P <sub>OLSEN</sub> > 0.15 G.KG <sup>-1</sup> .....	237
<b>FIGURE 79</b> : LOGIGRAMME DE L'APPROCHE CARTOGRAPHIQUE ET PREDICTIVE DES SOLS URBAINS A LARGE ECHELLE..	240
<b>FIGURE 80</b> : SCHEMA PRESENTANT LE BILAN DES APPORTS DE LA METHODE PROPOSEE SUR LE PLAN SCIENTIFIQUE ET OPERATIONNEL AINSI QUE LES PERSPECTIVES ASSOCIEES.....	244

## Liste des tableaux

---

<b>TABLEAU 1</b> : CARACTERISTIQUES DE QUELQUES OUTILS DE SUIVI D'OCCUPATION ET D'USAGE DES SOLS A L'ECHELLE REGIONALE, (IPR, 2013) .....	51
<b>TABLEAU 2</b> : NOMENCLATURE DE LA BASE DE DONNEES CORINE LAND COVER.....	70
<b>TABLEAU 3</b> : TRANSPOSITION DES DEUX NOMENCLATURES EXISTANTES EN UNE NOMENCLATURE COMMUNE DE REFERENCE .....	74
<b>TABLEAU 4</b> : DECOMPOSITION DES USAGES ETUDIES EN SOUS-USAGES SELON LA NOMENCLATURE MOS EXISTANTE ...	79
<b>TABLEAU 5</b> : PROPORTIONS DES SURFACES AYANT CHANGE D'USAGE AU COURS DES 30 DERNIERES ANNEES DANS CHAQUE UNITE URBAINE ETUDIEE .....	82
<b>TABLEAU 6</b> : PROPORTIONS DES SURFACES DES 7 UNITES URBAINES AYANT CHANGE D'USAGE EN FONCTION DE LEUR OCCURRENCE DE CHANGEMENT D'USAGE .....	83
<b>TABLEAU 7</b> : REPARTITION DES SURFACES DE L'UNITE URBAINE DE PARIS EN FONCTIONS DES USAGES.....	85
<b>TABLEAU 8</b> : OCCURRENCE DES CHANGEMENTS D'USAGES AU SEIN DES 3 ZONES D'ETUDE .....	87
<b>TABLEAU 9</b> : POURCENTAGE DE SURFACES REPRESENTEES PAR LES TRAJECTOIRES HISTORIQUES EN FONCTION DE LEUR USAGE INITIAL ET FINAL : A) ZONE 1 ; B) ZONE 2 ; C) ZONE 3. (F : « FORET » ; A : « TERRE AGRICOLE » ; ZH : « ZONE HUMIDE, SURFACE EN EAU » ; EV : « ESPACE VERT URBAIN » ; C : « CHANTIER, CARRIERE, DECHARGE » ; SL : « INSTALLATION SPORTIVE ET DE LOISIRS » ; T : « RESEAU ROUTIER OU FERROVIAIRE » ; I : « ZONE INDUSTRIELLE, COMMERCIALE, PUBLIQUE OU MILITAIRE » ; H : « HABITAT ») .....	90
<b>TABLEAU 10</b> : LES DIFFERENTES TRAJECTOIRES HISTORIQUES REPRESENTATIVES DES ZONES ETUDIEES SUR LES 70 DERNIERES ANNEES. (F : « FORET » ; A : « TERRE AGRICOLE » ; EV : « ESPACE VERT URBAIN » ; T : « RESEAU ROUTIER OU FERROVIAIRE » ; I : « ZONE INDUSTRIELLE, COMMERCIALE, PUBLIQUE OU MILITAIRE » ; H : « HABITAT »).....	92
<b>TABLEAU 11</b> : ENSEMBLE DES PRATIQUES IDENTIFIEES SELON LEUR OCCUPATION, USAGE ET SOUS-USAGE DU SOL ASSOCIES. ....	104
<b>TABLEAU 12</b> : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES INITIALES DE LA TERRE INDUSTRIELLE ISSUE DE LA COKERIE D'HOMECOURT .....	126
<b>TABLEAU 13</b> : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES INITIALES DE LA TERRE INDUSTRIELLE ISSUE DE LA COKERIE DE THIONVILLE .....	127
<b>TABLEAU 14</b> : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES INITIALES DE LA TERRE INDUSTRIELLE ISSUE DE LA COKERIE D'UNE USINE A GAZ D'ORIGINE CONFIDENTIELLE.....	127
<b>TABLEAU 15</b> : DONNEES GRANULOMETRIQUES ET AGRONOMIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS 2 ET 3 CORRESPONDENT RESPECTIVEMENT AUX HORIZONS INTERMEDIAIRES ET PROFONDS CITES PRECEDEMMENT (CF. 4.1.2.1)).....	131
<b>TABLEAU 16</b> : DONNEES DE CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET EN ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS 2 ET 3 CORRESPONDENT RESPECTIVEMENT AUX HORIZONS INTERMEDIAIRES ET PROFONDS CITES PRECEDEMMENT (CF. 4.1.2.1)) .....	132
<b>TABLEAU 17</b> : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES MOYENNES DES COUCHES DE SURFACE DE 18 FLUVIOSOLS .....	141
<b>TABLEAU 18</b> : ESTIMATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE LA COUCHE DE SURFACE DU SOL INITIAL DU POTAGER DU ROI APRES SA CONSTRUCTION (APPORT DE LIMONS DES PLATEAUX) .....	142

<b>TABLEAU 19</b> : DONNEES GRANULOMETRIQUES ET AGRONOMIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS SONT CLASSES PAR ORDRE DE PROFONDEUR CROISSANT. L'HORIZON 1 REPRESENTE L'HORIZON DE SURFACE DU PROFIL CONSIDERE) .....	146
<b>TABLEAU 20</b> : DONNEES DE CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET EN ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS SONT CLASSES PAR ORDRE DE PROFONDEUR CROISSANT. L'HORIZON 1 REPRESENTE L'HORIZON DE SURFACE DU PROFIL CONSIDERE) .....	146
<b>TABLEAU 21</b> : CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES DES COUCHES DE SURFACES SELON LES DIFFERENTES TRAJECTOIRES HISTORIQUES ETUDIEES MISES EN PARALLELE AVEC LES CARACTERISTIQUES MOYENNES DE LA COUCHE DE SURFACE D'UN FLUVIOSOL .....	152
<b>TABLEAU 22</b> : PROPRIETES AGRONOMIQUES DES HORIZONS DE SURFACE SELON LES DIFFERENTES TRAJECTOIRES HISTORIQUES ETUDIEES MISES EN PARALLELE AVEC LES CARACTERISTIQUES MOYENNES DE LA TERRE DES LIMONS DES PLATEAUX .....	153
<b>TABLEAU 23</b> : ÉLÉMENTS TRACES METALLIQUES DES HORIZONS DE SURFACE SELON LES DIFFERENTES TRAJECTOIRES HISTORIQUES ETUDIEES MISES EN PARALLELE AVEC LES CARACTERISTIQUES MOYENNES DE LA TERRE DES LIMONS DES PLATEAUX .....	154
<b>TABLEAU 24</b> : POINTS DE LA BANQUE DE DONNEES DU SOUS-SOL (BSS) SITUE AUTOUR DU SITE D'ETUDE .....	154
<b>TABLEAU 25</b> : PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES MOYENNES DES COUCHES DE SURFACE DE 12 CALCOSOLS .....	155
<b>TABLEAU 26</b> : DONNEES GRANULOMETRIQUES ET AGRONOMIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS SONT CLASSES PAR ORDRE DE PROFONDEUR CROISSANT. L'HORIZON 1 REPRESENTE L'HORIZON DE SURFACE DU PROFIL CONSIDERE) .....	158
<b>TABLEAU 27</b> : DONNEES DE CONCENTRATIONS EN ELEMENTS MAJEURS ET EN ELEMENTS TRACES METALLIQUES DES DIFFERENTS HORIZONS OBTENUES SUITE A LA PHASE D'ECHANTILLONNAGE SUR SITE. (LES HORIZONS SONT CLASSES PAR ORDRE DE PROFONDEUR CROISSANT. L'HORIZON 1 REPRESENTE L'HORIZON DE SURFACE DU PROFIL CONSIDERE) .....	158
<b>TABLEAU 28</b> : CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES DES HORIZONS DE SURFACE INITIAUX ESTIMES ET FINAUX MESURES SUR SITE .....	162
<b>TABLEAU 29</b> : ÉLÉMENTS TRACES METALLIQUES DE L'HORIZON 5 ET L'HORIZON DE SURFACE ACTUEL.....	162
<b>TABLEAU 30</b> : SEMI QUANTIFICATION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DE CHAQUE HORIZON EN FONCTION DE LA TRAJECTOIRE HISTORIQUE (0 : ABSENT, + : FAIBLE, ++ : MOYEN, +++ : ELEVE).....	170
<b>TABLEAU 31</b> : PRATIQUES IDENTIFIEES ET QUANTIFIEES GRACE AUX ENTRETIENS REALISES .....	180
<b>TABLEAU 32</b> : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX NECESSAIRES A L'EXPERIMENTATION .....	184
<b>TABLEAU 33</b> : PARAMETRES CHIMIQUES MESURES AU COURS DES EXPERIENCES DE VIEILLISSEMENT ET NORMES ASSOCIEES .....	187
<b>TABLEAU 34</b> : ÉVOLUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE EN FONCTION DES NEUFS TRAITEMENTS APPLIQUES AU SOL « PRV » .....	193
<b>TABLEAU 35</b> : ÉVOLUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE EN FONCTION DES CINQ TRAITEMENTS APPLIQUES AU SOL « BAM ».....	193
<b>TABLEAU 36</b> : LIENS ENTRE PRATIQUES, EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DES PROPRIETES PHYSIQUES ET PROCESSUS/MECANISMES IMPLIQUES ( « + » : AUGMENTATION DE LA DONNEE QUANTITATIVE OU CHANGEMENT AMELIORANT LA DONNEE QUALITATIVE AU COURS DU TEMPS; « - » : DIMINUTION DE LA DONNEE QUANTITATIVE OU CHANGEMENT ALTERANT LA DONNEE QUALITATIVE AU COURS DU TEMPS; « 0 » : PAS D'EVOLUTION AU COURS DU TEMPS ; « OUI » : EVOLUTION AU COURS DU TEMPS ; « (+) » : AUGMENTATION OU AMELIORATION DE LA DONNEE QUANTITATIVE OU QUALITATIVE D'APRES LA BIBLIOGRAPHIE).....	219

**TABLEAU 37** : LIENS ENTRE PRATIQUES, EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DES PROPRIETES AGRONOMIQUES ET PROCESSUS/MECANISMES IMPLIQUES (« + » : AUGMENTATION DE LA DONNEE AU COURS DU TEMPS; « - » : DIMINUTION DE LA DONNEE QUANTITATIVE AU COURS DU TEMPS; « 0 » : PAS D'EVOLUTION AU COURS DU TEMPS ; « (+) » : AUGMENTATION OU AMELIORATION DE LA DONNEE QUANTITATIVE D'APRES LA BIBLIOGRAPHIE)..... 223

**TABLEAU 38** : LIENS ENTRE PRATIQUES, EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DES ELEMENTS BIODISPONIBLES ET PROCESSUS/MECANISMES IMPLIQUES (« + » : AUGMENTATION DE LA DONNEE AU COURS DU TEMPS; « - » : DIMINUTION DE LA DONNEE QUANTITATIVE AU COURS DU TEMPS; « 0 » : PAS D'EVOLUTION AU COURS DU TEMPS) ..... 224

**TABLEAU 39** : LIENS ENTRE PRATIQUES, EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DES ELEMENTS TOTAUX ET PROCESSUS/MECANISMES IMPLIQUES (« + » : AUGMENTATION DE LA DONNEE AU COURS DU TEMPS; « - » : DIMINUTION DE LA DONNEE QUANTITATIVE AU COURS DU TEMPS; « 0 » : PAS D'EVOLUTION AU COURS DU TEMPS) ..... 224

## Glossaire

---

**Aire urbaine** : ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclave, formé par un pôle urbain de plus de 10 000 emplois et par sa couronne périurbaine

**Anthroposéquence** : séquence de sols désignant des sols évoluant dans des conditions similaires dont les principales différences observées sont liées à divers usages et pratiques humaines marquant la pédogenèse

**Artéfacts** : substances solides ou liquides qui ont été créées ou considérablement modifiées par l'Homme ; qui ont été amenées en surface par l'activité humaine d'une profondeur à laquelle elles n'étaient pas influencées par les processus de surface

**Artificialisation** : altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage (LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets)

**Atténuation naturelle** : ensemble des mécanismes conduisant sans intervention humaine, à une diminution de la masse, la toxicité, la mobilité, le volume, le flux ou la concentration des polluants dans les sols

**Document d'urbanisme** : document public régissant l'aménagement d'un territoire à une échelle définie et permettant de garantir un équilibre entre le renouvellement urbain, le développement urbain maîtrisé, le développement de l'espace rural et la préservation des espaces affectés aux activités agricoles et forestières et aux espaces naturels

**Éléments grossiers** : constituants minéraux du sol de diamètre supérieur à 2 mm

**Fonction écologique** : interaction entre les composantes biotiques et abiotiques du sol (ex : stockage de carbone)

**Horizon de sol** : couche de sol homogène qui se distingue d'une autre par son état, sa couleur et son fonctionnement

**Large échelle** : représentation cartographique sur un vaste territoire

**Occupation du sol** : description physique de la surface terrestre

**Planification territoriale** : dispositif politique ayant pour objectif la prédiction du contexte et la mise en cohérence des actions, publiques et privées, dans un domaine et/ou un espace, pour une durée et à une échéance déterminée

**Pratique humaine** : opération anthropique imposée au sol

**Profil de sol** : ensemble des horizons d'un sol

**Qualité bio-physico-chimique du sol** : aptitude d'un sol à fonctionner au sein et dans les limites des écosystèmes naturels ou aménagés, afin de maintenir la productivité végétale et animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé humaine et les besoins d'habitation (Doran, 2002 ; Karlen *et al.*, 2003)

**Renaturation** : processus, naturels ou avec l'intervention de l'homme, par lesquels la nature se réinstalle spontanément dans la ville

**Service écosystémique** : bienfaits, directs et indirects, que retirent les sociétés humaines du fonctionnement des écosystèmes (ex : régulation du climat)

**Sol anthropisé** : sol dont les propriétés et la pédogénèse sont dominées par leur modification anthropique, tels que les Anthrosols et les Technosols

**Sol urbain** : sol situé dans une unité urbaine, pouvant être caractérisé par des modifications anthropiques majeures, mais pouvant également faire référence à un sol dont l'historique d'usages est moins impacté par les pratiques humaines

**Trajectoire historique** : succession d'usages et de pratiques humaines décrivant l'historique anthropique d'un sol

**Unité urbaine** : commune ou ensemble de communes présentant une zone de bâti continu (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) qui compte au moins 2 000 habitants (INSEE)

**Usage du sol** : gestion anthropique des différents types d'occupation des sols

## Liste des abréviations et symboles

---

**Al** : Aluminium

**CaCO<sub>3</sub>** : Carbonate de calcium

**Cd** : Cadmium

**CEC** : Capacité d'échange cationique

**Cerema** : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

**CLC** : Corine Land Cover

**Co** : Cobalt

**C<sub>org</sub>** : Carbone organique

**Cr** : Chrome

**Cu** : Cuivre

**DT/DICT** : Déclaration de Travaux / Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux

**DTPA** : Acide Diéthylène Triamine Pentaacétique

**EDTA** : Éthylène Diamine Tétra Acétique

**ETM** : Élément trace métallique

**Fe** : Fer

**HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

**IGCS** : Inventaire, Gestion et Conservation des Sols

**INSEE** : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

**INRAE** : Institut National de la Recherche Agronomique

**Inrap** : Institut national de recherches archéologiques préventives

**LSE** : Laboratoire Sols et Environnement

**Mg** : Magnésium

**Mn** : Manganèse

**MO** : Matière organique

**MTE** : Ministère de la Transition écologique

**MOS** : Mode d'Occupation des Sols

**MVA** : Masse Volumique Apparente

**Ni** : Nickel

**N<sub>tot</sub>** : Azote total

**OAD** : Outil d'Aide à la Décision

**Pb** : Plomb

**PLU** : Plan local d'urbanisme

**PLUi** : Plan local d'urbanisme intercommunal

**P<sub>Olsen</sub>** : Phosphore Olsen

**RRP** : Référenciel Régional Pédologique

**SCoT** : Schéma de cohérence territoriale

**SRADDET** : Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire

**SUITMA** : Soils in urban, industrial, traffic, mining and military areas

**UCM** : Unité de Collecte Minimale

**UCS** : Unités Cartographiques de Sols

**UL** : Université de Lorraine

**WRB** : Word reference base for soil resources

**ZAN** : Zéro Artificialisation Nette

**Zn** : Zinc

## Introduction générale

---

Par ses fonctions de support de végétation, de régulation des cycles biogéochimiques, de réservoir d'eau ou encore de puit de carbone (Blanchart *et al.*, 2017), le sol urbain joue un rôle primordial dans l'adaptation au changement climatique. Il constitue de ce fait un élément majeur à préserver au sein de l'écosystème urbain. Cependant, l'artificialisation croissante des sols, en partie liée à une pression démographique qui ne cesse d'augmenter, dégrade la ressource « Sol » et sa capacité naturelle à fonctionner. Chaque année, on estime à 12 millions d'hectares, la superficie de sols naturels et agricoles impactée par la consommation d'espace dans le monde. En Europe, une superficie plus vaste que la ville de Berlin est consommée pour garantir l'expansion urbaine, soit environ 252 hectares par jour (European Commission, DG Environment, 2011). À l'échelle nationale, entre 20 000 à 30 000 hectares d'espaces naturels et agricoles sont artificialisés en moyenne chaque année (ministère de la Transition écologique, 2021a). L'artificialisation de ces espaces entraîne, en milieu urbain, des désordres environnementaux auxquels les villes sont aujourd'hui confrontées tels que les phénomènes d'îlots de chaleur, la multiplication des inondations, une mauvaise infiltration des eaux pluviales, une dégradation de la qualité de l'air ou encore des problématiques liées à la gestion des déchets (Adelmann, 1998).

Le sol urbain est de ce fait un compartiment clé des écosystèmes urbains car il conditionne le développement durable des villes qui doivent, dès lors, réfléchir à une planification urbaine de préservation de leurs sols. Face à ce constat, un objectif de Zéro Artificialisation Nette (ZAN) des sols a été annoncé pour 2050 par la loi dite Climat et Résilience du 22 août 2021. Le concept d'artificialisation des sols y a été redéfini comme une altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage. Cette définition renvoie à la notion de qualité d'un sol définie comme étant sa capacité à assurer sa multifonctionnalité. Dans ce nouveau contexte législatif répondant aux enjeux urbains existants, la qualité d'un sol devient une notion importante à prendre en compte dans l'aménagement des villes. Cependant, malgré l'émergence d'outils et de méthodologies (*e.g.* Destisol : Cherel *et al.*, 2017 ; UqualiSol-ZU : Keller *et al.*, 2012), les collectivités restent, aujourd'hui, en manque de méthodes opérationnelles et d'informations sur les sols, et tout particulièrement les sols urbains pour prendre en compte leur qualité à l'échelle de l'agglomération ou encore de l'intercommunalité.

L'objectif de cette thèse est de proposer une méthodologie permettant de qualifier l'état actuel des sols en milieu urbain sur la base d'une connaissance de leur trajectoire historique d'usages. L'hypothèse de départ est que les propriétés des sols urbains, généralement anthropisés, s'expliquent par le facteur humain de la pédogenèse, qu'il est possible de résumer en une succession d'usages et de pratiques.

Une approche méthodologique combinant des analyses cartographique et documentaire, *in situ* et *in vitro* est proposée pour évaluer la possibilité d'acquérir des informations prédictives sur les propriétés des sols urbains à large échelle, sur la base de la connaissance des trajectoires historiques des sols. Cette proposition méthodologique, à visée opérationnelle, a pour objectif *in fine* de répondre aux besoins des collectivités urbaines, de prendre en compte l'état de leurs sols pour évaluer les impacts environnementaux de leurs plans et projets d'urbanisme et de développement.

L'état des connaissances et les définitions utiles pour aborder cette problématique et les questions scientifiques associées sont exposés dans le 1<sup>er</sup> chapitre, qui décrit successivement i) les spécificités des sols urbains et la notion de facteur humain de la pédogenèse ; ii) les différentes méthodes de prise en compte de l'historique des sols urbains et de ses conséquences sur les propriétés du sol ; iii) les méthodes de pédologie expérimentale permettant la simulation du vieillissement d'un sol et de comprendre son fonctionnement. Le chapitre II présente ensuite l'étude documentaire et cartographique permettant de caractériser le facteur humain de la pédogenèse des sols urbains à l'échelle de l'unité urbaine au travers des trajectoires historiques représentatives étudiées pour Paris et pour sept autres villes françaises. Le chapitre III, quant à lui, présente une approche d'analyse sur le terrain, caractérisant l'impact *in situ* du facteur humain de quelques trajectoires historiques d'usages sur les propriétés physiques et chimiques des sols. Le chapitre IV, aborde la partie expérimentale de ce travail qui précise les résultats obtenus grâce à des expériences en conditions contrôlées de laboratoire (*in vitro*) simulant le vieillissement d'un sol et évaluant les impacts de succession de pratiques reflétant les trajectoires historiques des sols urbains étudiés. Pour conclure, le chapitre V synthétise l'ensemble des résultats pour proposer une perspective de valorisation opérationnelle, en vue du développement d'une méthodologie prédictive de zonage des sols urbains reposant sur l'analyse cartographique, à large échelle, de leur trajectoire historique.

# Chapitre I : Prise en compte des sols urbains dans l'aménagement des territoires : état des connaissances, enjeux et voies d'amélioration

---

## État des connaissances sur les sols urbains : mise en évidence de l'influence du facteur humain

### 1. Définitions, spécificités et fonctionnalités des sols urbains

#### 1.1. Notion de sol urbain

##### 1.1.1. Définition d'un sol

D'un point de vue général, le sol représente la couche supérieure altérée de la croûte terrestre (Jenny, 1941). Cette définition, très succincte, a ensuite été développée afin d'intégrer le caractère évolutif du sol. Le sol est considéré dans son ensemble comme étant « un milieu évoluant sous l'influence de facteurs actifs aux dépens d'un matériau minéral pour aboutir à un état d'équilibre stable avec la végétation naturelle ; le sol d'abord superficiel s'approfondit progressivement ; peu à peu se différencient des strates successives de couleurs, de texture et de structures différentes appelées horizons ; l'ensemble des horizons constitue le profil » (Duchaufour, 1983). Le sol est un système complexe et vivant, se transformant au cours du temps. Par des transformations généralement de cinétiques lentes, il évolue et se forme en permanence (Duchaufour, 1983). C'est dans ce sens que le mot « sol » sera entendu dans la suite du manuscrit.

##### 1.1.2. Définitions géographique et génétique d'un sol urbain

Le concept de sol urbain est difficile à qualifier. En effet, il n'existe pas de consensus entre les différentes disciplines scientifiques pour le définir précisément. La littérature montre que les acteurs de l'aménagement du territoire et des sciences du sol utilisent deux approches différentes pour décrire cet objet :

- 1) La première approche spatialisée définit les sols urbains en fonction de leur position géographique au sein du territoire. Cette approche repose principalement sur une référence spatiale choisie, de manière réfléchie, pour définir le territoire urbain. Par exemple, certains acteurs de la planification urbaine considèrent que tout sol situé dans une aire urbaine fait

référence à un sol urbain (Blanchart, 2018) où l'aire urbaine est définie comme étant un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclave, formé par un pôle urbain de plus de 10 000 emplois et par sa couronne périurbaine, c'est-à-dire les communes dont 40% de la population active résidente travaillent dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci (INSEE, 2011). D'autres entités urbaines peuvent ainsi être choisies comme référence spatiale comme les limites administratives d'une commune ou d'une intercommunalité.

- 2) La seconde approche est basée sur la genèse du sol et sur son passé anthropique. Les pédologues se sont attachés à définir le sol urbain selon son degré d'anthropisation. Le terme « sol urbain » a été pour la première fois utilisé pour décrire les caractéristiques des sols fortement perturbés dans les zones urbaines (Zemlyanitskiy, 1963). La première définition pédologique est apparue quelques années après, décrivant le sol urbain comme « un sol ayant une couche de surface non agricole et artificielle de plus de 50 cm d'épaisseur qui a été produite par mélange, remplissage ou contamination de la surface du sol dans les zones urbaines et périurbaines » (Bockheim, 1974 ; Craul, 1992). Cette approche relie donc la notion de sol urbain au facteur anthropique. D'ailleurs, certains auteurs utilisent le terme de « sol anthropique » qualifiant les sols dont les principales propriétés et leur comportement sont majoritairement influencés et modifiés par les activités humaines (Capra *et al.*, 2015; Morel *et al.*, 2005).

### *1.1.3. Définition retenue dans ce manuscrit*

Il est proposé dans ce manuscrit de se focaliser sur une définition géographique pour définir l'objet « sol urbain ». Dans l'optique de se focaliser essentiellement sur les sols des villes et d'écarter au maximum les sols naturels ou pseudo-naturels présents en majorité dans les couronnes périurbaines, il a été décidé de restreindre le référentiel spatial en choisissant l'unité urbaine comme référence définissant ainsi le territoire urbain étudié. L'unité urbaine est un référentiel qui est fondé sur la continuité du bâti contrairement à l'aire urbaine qui vise à prendre en compte les territoires liés économiquement ou fonctionnellement à la ville. Définie par l'INSEE comme une commune ou un ensemble de communes présentant une zone de bâti continue (pas de coupure de plus de 200 mètres entre deux constructions) qui compte au moins 2000 habitants (INSEE, n.d.), l'unité urbaine représente donc une plus petite entité que l'aire urbaine et est plus centrée sur les sols des milieux construits.

Dans la suite du manuscrit, **un sol urbain sera donc un sol situé dans une unité urbaine**. Cette définition englobe ainsi un large panel de type de sols allant des sols naturels ou pseudo-naturels jusqu'aux sols fortement anthropisés.

## 1.2. Spécificités des sols urbains

### 1.2.1. Propriétés bio-physico-chimiques globales

Les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols urbains ont fait l'objet de recherches qui ont mis en évidence des caractéristiques générales communes.

En ce qui concerne **les propriétés physiques**, les sols urbains peuvent présenter des valeurs de masse volumique apparente extrêmes, de moins de 0,5 jusqu'à plus de 2 g.cm<sup>-3</sup> (Morel *et al.*, 2005). Ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par le compactage des sols engendré par l'urbanisation. Le compactage réduit en effet la porosité du sol et son aération. Quant aux faibles valeurs, celles-ci peuvent s'expliquer par le fait que les sols urbains contiennent généralement une forte proportion d'éléments grossiers souvent d'origine anthropique et de natures variées (Baumgartl, 1998) diminuant couramment les valeurs de masse volumique apparente. De plus, les sols urbains présentent généralement des structures massives ou au contraire particulières qui s'expliquent par la présence de matériaux technogéniques (Nehls *et al.*, 2012) qui limitent le processus d'agrégation. Les sols présentant des matériaux technogéniques ont donc généralement une plus faible porosité structurale.

Du point de vue **des propriétés chimiques**, le pH des sols urbains est généralement alcalin (Morel *et al.*, 2005). Ceci peut s'expliquer par les fortes teneurs en carbonates présents dans ces sols (Lehmann et Stahr, 2007) et par la présence de nombreux artefacts (*e.g.* béton). Exceptés pour les espaces verts, les sols urbains sont généralement appauvris en éléments minéraux nutritifs majeurs comme le phosphore, l'azote ou encore le potassium (Bradshaw, 1983). En outre, une forte dispersion des valeurs des propriétés chimiques du sol telles que le carbone organique, l'azote total ou encore le phosphore disponible, est observée. Ces propriétés sont associées à une variabilité forte dans les sols urbains caractérisant une hétérogénéité notable (Joimel *et al.*, 2016). Un autre aspect majeur à prendre en compte est la présence de contaminants dans les sols urbains (Wong et Li, 2004 ; El Khalil *et al.*, 2013 ; Rhea *et al.*, 2014; Alqadad, 2017). Les activités humaines modelant ces sols sont en effet à l'origine de pollutions diffuses et ponctuelles (Darmendrail, 1998). Le niveau de contamination de ces sols suit généralement le gradient d'anthropisation des sols (Schwartz *et al.*, 2001, Joimel *et al.*, 2016). Les sols anthropisés sont ainsi caractérisés par des teneurs en métaux relativement fortes issues de diverses pollutions diffuses ou ponctuelles. Les pollutions diffuses proviennent généralement des retombées atmosphériques émanant du réseau routier et des fumées industrielles. Elles peuvent également provenir d'épandages de produits liquides ou solides sur de grandes superficies que l'on peut retrouver en milieu péri-urbain (Barles, 2005). Les pollutions ponctuelles se retrouvent principalement dans des zones de stockage ou de manipulation des matières potentiellement polluantes, comme les zones d'activités industrielles (Schwartz *et al.*, 2015).

**Les caractéristiques biologiques** d'un sol font référence à l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivants participant au bon fonctionnement du sol (Chaussod, 1996). Les sols urbains présentent des caractéristiques biologiques dépendantes de leur couverture et des usages (et de leurs pratiques) qui en sont faits (Joimel *et al.*, 2017). Par exemple, il a été observé une plus forte diversité biologique de collemboles dans les jardins urbains que dans les sols plus anthropisés (Joimel, 2015). De plus, en comparaison avec les sols agricoles et contrairement à ce qui pourrait être attendu, la diversité biologique des sols urbains est supérieure à celle observée dans certains sols d'usage agricole (Joimel *et al.*, 2017).

### *1.2.2. Hétérogénéité des sols urbains*

Même si des traits communs peuvent être définis, les sols urbains n'en sont pas moins hétérogènes. Ces sols sont supports d'usages très variés qui se succèdent souvent dans le temps, ils peuvent être support d'usages résidentiel, industriel, commercial, support d'installation sportive et de loisirs ou encore de production de biomasse. Chaque usage va entraîner des activités humaines différentes qui influencent plus ou moins intensément ces sols, créant ainsi une forte hétérogénéité à la fois verticale et horizontale de leurs propriétés physico-chimiques (Craul, 1992 ; Morel *et al.*, 2005 ; Béchet *et al.*, 2009 ; Cornu *et al.*, 2021).

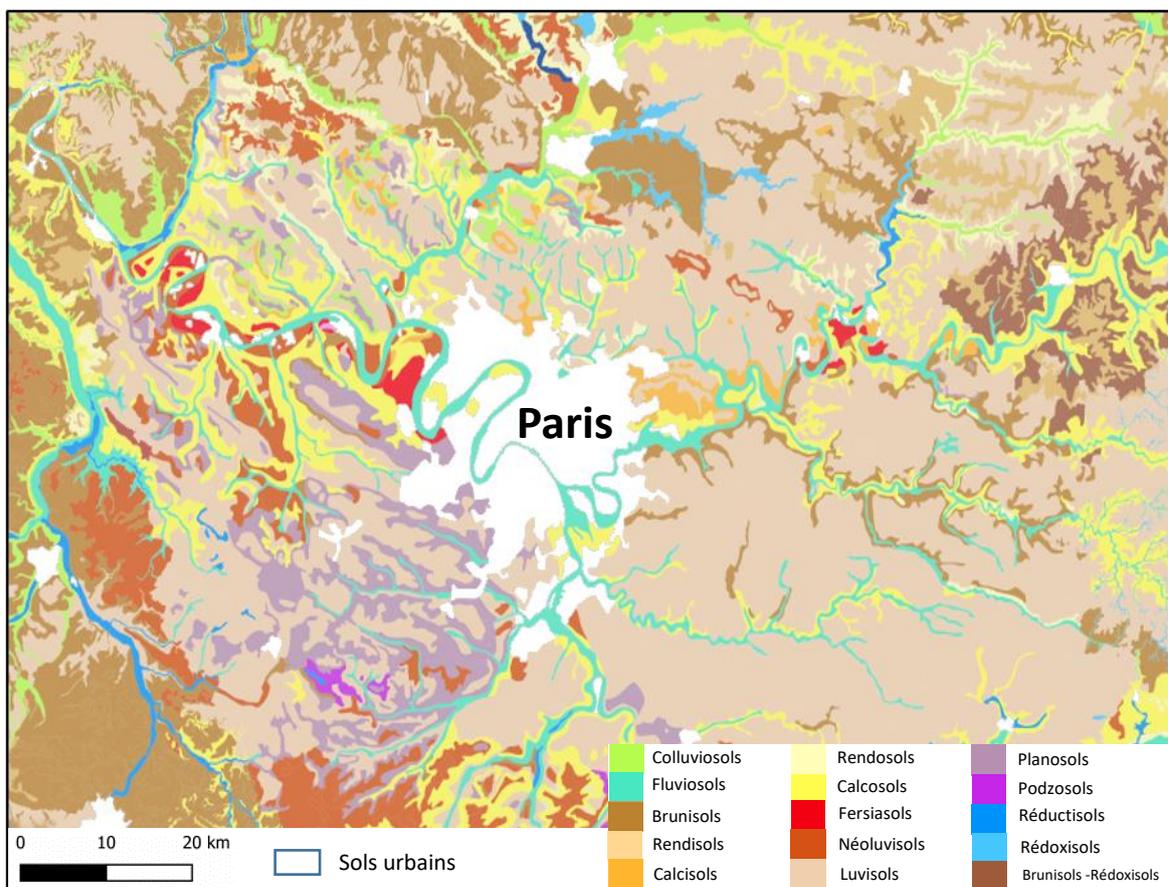
### *1.2.3. Difficulté d'échantillonnage et d'accessibilité des sols urbains*

Cette particularité oblige à multiplier les points d'échantillonnage sur sites pour avoir une vision représentative de ces sols. Cependant, contrairement aux sols naturels, il est souvent beaucoup plus contraignant d'aller échantillonner un sol en milieu urbain (Alqalad, 2017 ; Rhea *et al.*, 2014 ; Wong et Li, 2004). En effet, beaucoup de parcelles urbaines sont des propriétés privées et il est souvent difficile d'obtenir une autorisation d'accès auprès des propriétaires. De plus, de nombreuses formalités administratives sont souvent nécessaires pour garantir l'accès technique à la parcelle (*e.g.* neutralisation de place de stationnement par arrêté municipal, formulaire de déclaration de travaux à proximité de réseau (DT-DICT)).

### *1.2.4. Des sols urbains souvent peu caractérisés et cartographiés*

Du fait de leur hétérogénéité et des difficultés d'accès, il demeure difficile de caractériser, d'échantillonner et de **cartographier les sols urbains à large échelle** (*i.e.* couvrant un territoire étendu) par les méthodes conventionnelles utilisées par les pédologues dans les zones forestières et agricoles (Franck-Néel *et al.*, 2014). Ces derniers s'appuient en effet sur la notion de continuité pédologique fondée sur l'analyse des facteurs naturels de formation des sols. Les zones blanches ou non

cartographiées présentes sur les cartes de sols (Figure 1), témoignent de cette difficulté et/ou du manque d'intérêt à caractériser ces zones (De Kimpe et Morel, 2000).



**Figure 1 : Les différents types de sols présents autour de la ville de Paris et sa zone blanche définissant les sols urbains. (Groupement d'intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) – Réseau Mixte Technologique Sols et Territoires, 2019)**

L'analyse bibliographique montre que les sols urbains sont difficiles à appréhender à large échelle. Pourtant, caractériser ces sols à large échelle permettrait une meilleure prise en compte de leur plurifonctionnalité et des services écosystémiques qu'ils rendent dans la planification de l'aménagement des territoires.

### **1.3. Pertinence de la prise en compte de la ressource « sol » en milieu urbain**

#### *1.3.1. Sol et services écosystémiques*

La notion de service écosystémique est apparue dans les années 70 dans un rapport intitulé Man's Impact on the Global Environment: Assessment and Recommendations for Action (Study of Critical Environmental Problems, 1970). Elle fut ensuite diffusée plus largement par le Millenium Ecosystem

Assessment (MEA) en 2005 (MEA, 2005) où le concept de service écosystémique est défini par « les bénéfices que l'Homme peut tirer des écosystèmes ».

Il existe 4 grands types de services écosystémiques distincts rendus par les sols (Walter *et al.*, 2014) :

- **Le service d'approvisionnement** : le sol est une source de matière première, capable de produire des matières végétales utiles pour la consommation humaine mais également de fournir des matériaux inertes (*e.g.* sable, granulat, terre) servant aux besoins humains.
- **Le service de régulation** : le sol participe à la régulation du climat global, il participe également, entre autres, à la régulation des risques d'inondation car il joue un rôle central dans le cycle de l'eau. Les sols jouent également un rôle majeur dans la régulation de la biodiversité.
- **Le service culturel** : le sol constitue un héritage culturel, il a un rôle de conservation des biens et de mémoire de l'empreinte du passage de l'Homme.
- **Le service support ou service d'auto-entretien** regroupe quant à lui l'ensemble des fonctions nécessaires à la production des autres services. Le sol est par exemple support de biodiversité ce qui lui permet en parallèle d'en assurer sa régulation. Le service de support est parfois intégré dans chacune des trois autres catégories (European Environment Agency, 2011), considérant que ce dernier, peut fournir des services intégrables dans les services d'approvisionnement, de régulation et les services culturels.

### 1.3.2. Relations entre services, fonctions et qualité des sols

Les sols sont capables de fournir des services écosystémiques grâce aux multiples fonctions qu'ils exercent. Ces fonctions sont la résultante des interactions entre les composantes biotiques et abiotiques du sol (Schindelbeck *et al.*, 2008). Elles peuvent être d'ordre physique (*e.g.* diffusion des particules, infiltration de l'eau), biologique (*e.g.* dénitrification) et chimique (*e.g.* transformation des éléments du sol) (Dominati *et al.*, 2010). Cette pluri-fonctionnalité des sols détermine leur qualité définie dans ce manuscrit comme « l'aptitude d'un sol à fonctionner au sein et dans les limites des écosystèmes naturels ou aménagés, afin de maintenir la productivité végétale et animale, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et soutenir la santé humaine et les besoins d'habitation » (Doran, 2002 ; Karlen *et al.*, 2003). Cette aptitude à fonctionner est directement liée aux caractéristiques bio-physico-chimiques du sol.

### 1.3.3. Fonctions des sols urbains nécessaires aux zones urbaines et aux citoyens

Tout comme les sols naturels, les sols urbains peuvent assurer de multiples fonctions écosystémiques (*e.g.* infiltration des eaux pluviales, séquestration de carbone, production de biomasse, stockage de chaleur) (Schwartz *et al.*, 2015). Ces sols multifonctionnels dits de « bonne qualité » jouent un rôle primordial dans le fonctionnement de l'écosystème urbain et participent à répondre ainsi aux enjeux

globaux auxquels les villes sont aujourd'hui exposées tels que la gestion des eaux pluviales, la gestion des déchets, la préservation de la biodiversité et du cadre de vie, la préservation des continuités écologiques dans le cadre des trames verte et bleue, la lutte contre les îlots de chaleurs urbains ou encore contre l'artificialisation des sols. Face à ces nombreux enjeux urbains, il apparaît donc indispensable de préserver les sols urbains multifonctionnels.

#### **1.4. Prise en compte des sols urbains dans l'aménagement du territoire**

##### *1.4.1. Évolution de la prise en compte des sols dans les politiques publiques nationales*

En France, comme à l'échelle européenne, il n'existe pas de cadre juridique spécifique aux sols qui aurait pour objectif, de les protéger en tant que ressource. Le seul texte européen qui considère le sol comme une ressource non renouvelable à protéger est une charte (Charte européenne des sols, 1972). Cependant, si cette charte expose bien les conséquences des pressions anthropiques exercées sur les sols et l'importance de les prendre en compte dans les politiques publiques, elle n'impose pas d'intégrer la protection des sols comme objectif des politiques publiques d'aménagement du territoire au même titre que l'eau ou l'air. En effet, la première étape d'une démarche de préservation des sols serait de définir un cadre juridique opposable considérant le sol comme une ressource vitale. Seuls les sols des « installations classées pour la protection de l'environnement », c'est-à-dire susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances notamment pour la santé et la sécurité des riverains, sont soumis à la législation des installations classées (Livre V du code de l'environnement : Prévention des pollutions des risques et des nuisances, Article L511-1 à L597-2) (Légifrance, 2021a) et également à une politique nationale de gestion des sites et sols pollués. Depuis peu, cette situation est néanmoins en train d'évoluer puisqu'au niveau national la loi « Climat et Résilience » parue en août 2021, a pour objectif de protéger les sols du phénomène d'artificialisation (Légifrance, 2021b). De la même façon à l'échelle Européenne, la Commission a récemment annoncé qu'elle présentera une proposition législative spécifique sur la santé des sols d'ici 2023 (European Commission, 2021).

De plus, il est indéniable que la vision de la ressource « sol » dans les politiques publiques nationales évolue. Jusqu'en 2015, les principales politiques publiques et les quelques législations mises en œuvre, mentionnant la ressource « sol », se sont principalement concentrées sur le potentiel surfacique qu'offre cette ressource (Figure 2). Ces textes considèrent le sol comme une ressource foncière à préserver face à l'étalement urbain pour limiter la décroissance de l'activité agricole et les conséquences socio-économiques de cet étalement. À travers ces textes, le sol n'est en aucun cas perçu par sa capacité multifonctionnelle ou par le potentiel qu'il représente. Cette vision surfacique

des sols a commencé à évoluer en 2018 avec le plan Biodiversité et son objectif stratégique de « Zéro artificialisation nette » (ZAN) qui a, en effet, intégré une vision multifonctionnelle des sols en les considérant comme une ressource à protéger pour reconquérir la biodiversité dans les territoires et assurer le bon fonctionnement de l'écosystème urbain (Figure 2).

Ces nouvelles politiques publiques émergentes, considérant les sols par leurs aspects fonctionnels ne font figure que de feuille de route, puisqu'actuellement, très peu de traductions législatives de ces politiques publiques n'existent, excepté, la loi « Climat et Résilience » parue en août 2021. D'ailleurs, les sols sont très peu considérés dans les différents documents d'urbanisme où une approche très segmentée du sol est généralement produite (Cerema, 2019). Ces observations montrent donc une absence de prise en compte globale du sol dans ces documents et par conséquent un manque de considération fonctionnelle des sols urbains par les acteurs de l'aménagement du territoire. Ce manque d'intérêt pour le sol dans ces documents, peut s'expliquer par le manque de méthodes disponibles pour les qualifier d'une part mais également par un manque de sensibilisation des acteurs concernés d'autre part (Blanchart, 2018).

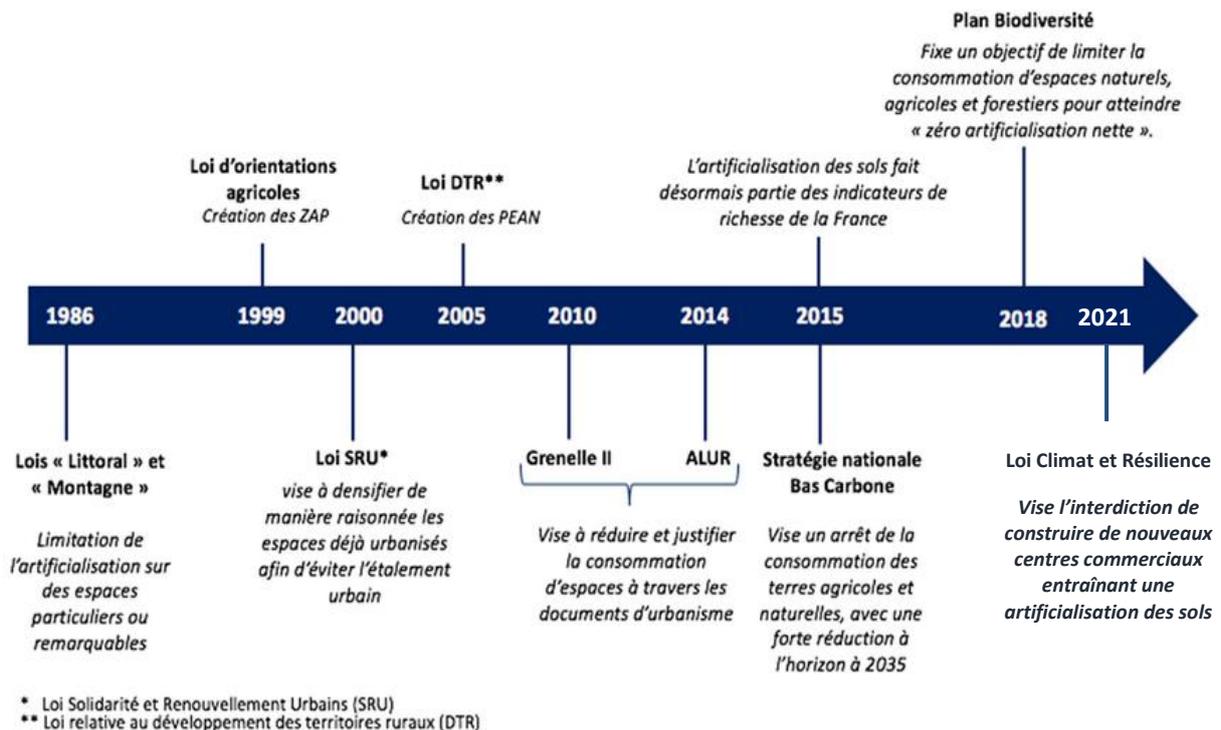


Figure 2 : Évolution des mesures émanant de politiques publiques luttant contre l'artificialisation des sols, d'après AURAN, Agence d'urbanisme de la région Nantaise (AURAN, 2020)

#### 1.4.2. Développement d'outils d'aide à la prédiction de la qualité des sols urbains

Dans la sphère scientifique, de nombreux projets de recherche portant sur l'évaluation de la qualité des sols émergent. Des projets européens (e.g. Urban SMS, 2008) et nationaux (e.g. UqualiSol-Zu, 2012 ; Soilserv, 2016 ; Destisol, 2017) ont été motivés par l'enjeu de la prise en compte de la ressource « sol » dans les politiques d'aménagement du territoire. Pour intégrer plus en amont dans la démarche d'aménagement des indices d'adéquation d'usage du sol au regard de sa multifonctionnalité, le projet UQualiSol-ZU (Keller *et al.*, 2012) a montré qu'il était possible et souhaitable d'intégrer des informations relatives au degré de fonctionnalité des sols sur des cartes à l'échelle des documents d'urbanisme (e.g. PLU). Ce travail, basé sur deux communes du sud de la France, a mis en exergue, quelques incohérences dans le zonage établi au sein du PLU en qualifiant de zone à urbaniser, des parcelles dont les sols avaient une grande capacité plurifonctionnelle. A contrario, ce même document qualifiait de zone naturelle, des parcelles possédant des propriétés bio-physico-chimiques non satisfaisantes pour exercer certaines fonctions naturelles.

Ces projets ont généralement abouti à la création d'outils d'aide à la décision présentant quelques limites d'application dans un contexte urbain. En effet, face à l'hétérogénéité des sols urbains et leur difficulté d'accès, ces outils restent peu adaptés. Les paramètres à prendre en compte pour ces derniers sont souvent peu disponibles à l'échelle de la ville ce qui rend les méthodes difficilement applicables et transposables (Franck-Néel *et al.*, 2012). De plus, l'application de ces méthodes est parfois délicate pour des personnes de collectivités, non spécialistes de la pédologie, et peut également se révéler coûteuse. Deux autres projets de recherche financés par l'Ademe dans lesquels ce travail de doctorat s'intègre, se proposent de répondre à ces problématiques : MUSE (« intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme » - 2017-2021) et SUPRA (« Sols Urbains et Projets d'Aménagement » - 2018-2022). Le projet MUSE a pour objectif de développer une méthodologie pour caractériser et cartographier la qualité des sols d'un territoire afin de pouvoir *in fine* intégrer la qualité des sols dans les documents d'urbanisme. Le projet de recherche SUPRA vise, quant à lui, à amplifier l'acquisition de bases de données sur les sols urbains et à développer un outil d'aide à l'affectation des sols à l'échelle d'une aire urbaine par l'évaluation des services écosystémiques qu'ils rendent.

La prise en compte de la multifonctionnalité des sols urbains est émergente. Bien que des outils soient développés pour qualifier la qualité de ces sols, ils se heurtent encore à la complexité et l'hétérogénéité de ces sols. Il est donc, à l'heure actuelle, encore très difficile de qualifier de manière systématique les sols des zones urbanisées.

## 2. Le facteur humain comme déterminant de la qualité des sols urbains : notions clés et état des connaissances

Pour essayer de répondre à l'enjeu technico-scientifique que représente l'acquisition de données pédologiques en milieu urbain à large échelle, il est important de comprendre le fonctionnement des sols urbains dans leur globalité. Dans cette sous-partie, nous allons nous focaliser sur la littérature s'intéressant à la pédogenèse urbaine et à ses facteurs d'influence.

### 2.1. Spécificité de la pédogenèse en milieu urbain

#### 2.1.1. Notion de pédogenèse

La pédogenèse désigne l'ensemble des processus (physiques, chimiques et biologiques) aboutissant à la formation puis à l'évolution d'un sol. Trois processus fondamentaux participent à cette pédogenèse : l'altération des roches, les phénomènes de transport et d'accumulation des matières solubles et particulaires et les phénomènes de fragmentation liés à un brassage mécanique (Duchaufour, 1983). Les sols se forment à partir d'une roche appelée la roche-mère ou le matériau parental. Par ces processus, cette roche ou matériau superficiel va être transformé, formant de nouveaux minéraux dits secondaires (Duchaufour *et al.*, 2001) qui à leur tour subiront ces mêmes processus. Cette transformation ou pédogenèse forme ainsi le profil du sol et sa différenciation en horizons, et détermine les propriétés bio-physico-chimiques des terres constitutives de ce sol.

#### 2.1.2. Facteurs naturels de formation des sols

Chaque sol possède sa propre identité pédologique puisque les processus de formation vont être influencés par des facteurs naturels interagissant avec le sol (Jenny, 1941). En fonction de la nature et l'intensité de ces facteurs, certains processus vont prédominer et influencer spécifiquement la formation des sols.

**Le climat** est un facteur naturel déterminant pour les sols à l'échelle mondiale. La localisation de certains types de sols est directement dépendante du climat qui impacte les sols en influençant leur pédoclimat. Des cycles d'humidification et de dessiccation, de gel/dégel vont traduire des changements hydriques et de températures liés au climat. La température joue un rôle majeur sur la cinétique des processus bio-physico-chimiques au sein des sols. La vitesse de l'altération chimique peut par exemple doubler avec une augmentation de température de 10°C (Duchaufour *et al.*, 2001). À l'inverse, une température trop basse allant jusqu'au gel peut avoir des conséquences sur la structure du sol (fragmentation, ségrégation des particules, éclatement des horizons de surface). De plus, il a

été montré qu'une faible température ralentit considérablement les processus biologiques du sol en diminuant son activité biologique (Moureaux, 1967 ; Girard *et al.*, 2011).

À une échelle plus régionale, le facteur dominant devient la nature **du matériau parental**. En France par exemple, il existe une forte similitude entre les cartes géologiques régionales et les cartes pédologiques montrant ainsi l'influence de la lithologie à cette échelle.

**La topographie** influence également les processus pédogénétiques à une échelle régionale voire locale. La présence d'une pente par exemple, peut faire varier le taux d'humidité dans les sols et le taux d'érosion, influençant ainsi les processus de formation.

**Les organismes vivants** jouent également un rôle dans la formation du sol. Comme expliqué précédemment, l'activité de ces derniers dépend du pédoclimat mais également de la composante végétale. La faune du sol influence la transformation de la matière organique et l'édification des structures.

**Le temps** constitue un facteur supplémentaire. Lors d'une étude pédologique, l'échelle temporelle est un facteur clé à prendre en compte. Il existe des processus de courte durée (1 à 10 ans), de moyenne durée (10 à 100 ans) et de longue durée (100 à des milliers d'années) (Targulian et Krasilnikov, 2007 ; Cornu *et al.*, 2009). Les processus de courte durée sont les altérations biochimiques (*e.g.* la dégradation de la matière organique, l'évolution de la litière) et physiques (*e.g.* l'évolution de la structure, la porosité). Les processus de moyenne durée concernent l'altération des minéraux les moins résistants, ils concernent également les processus de mobilisation ou de transfert. Les processus de longue durée concernent, quant à eux, les processus d'altération géochimique qui ont lieu plus en profondeur dans le sol, ils concernent les phases minérales les plus résistantes.

L'influence de ces facteurs pédogénétiques est connue et caractérisés pour les sols naturels, peu impactés par l'activité humaine. Ce sont eux qui gouvernent la pédogénèse. Chez les sols urbains, ces processus naturels participent également à leur formation. Cependant, dans certains cas, l'intensité et la concomitance de leurs impacts peuvent être modifiées et perturbées par **le facteur humain** qui devient alors un facteur de pédogénèse supplémentaire à prendre en considération.

## **2.2. Facteur humain de la pédogénèse**

Outre les facteurs naturels de la pédogénèse, présentés ci-dessus, les sols urbains sont influencés par un sixième facteur de formation des sols : le facteur humain (Dudal, 2004 ; Macaire *et al.*, 2006). Tout au long de leur évolution, les sols urbains sont soumis à des perturbations anthropiques plus ou moins intenses. La pédogénèse urbaine est donc rendue plus complexe que celle des sols naturels par l'intégration de ce facteur d'influence.

### 2.2.1. *Notions clés associées au facteur humain : occupation, usage et pratique humaine*

La notion de perturbation anthropique utilisée pour définir le facteur humain dans le paragraphe précédent reste très globale. Différents termes utilisés dans la littérature doivent être présentés pour décrire de manière plus détaillée ce concept (Figure 3), notamment les termes **d'occupation des sols**, **d'usage des sols**, de **sous-usage des sols** et de **pratique humaine**.

Dans la littérature, la notion d'usage est souvent confondue avec la notion d'occupation des sols. Comme le définissent Di Gregorio et Jansen (1997), **l'occupation des sols** correspond à une observation purement physique de la surface terrestre. On parle ainsi de surface enherbée, de surface bâtie, ou encore de surface arborée. **Les usages des sols** sont quant à eux définis comme étant une gestion anthropique des différents types d'occupation des sols (Corgne, 2016). Une surface bâtie peut par exemple abriter une zone industrielle ou une zone résidentielle. Cette notion d'usage d'un sol introduit à son tour la notion de **sous-usage** qui précise l'usage considéré (par exemple une zone résidentielle peut être qualifiée d'habitat individuel ou d'habitat collectif). Ce concept est cependant plus rarement décrit dans les publications scientifiques. Néanmoins, nous proposons d'utiliser ce terme dans le cadre de cette thèse afin de préciser chaque usage en sous-usages et ainsi décrire plus finement la gestion anthropique de la parcelle. Enfin, **les pratiques humaines** sont des opérations anthropiques imposées au sol modifiant ses propriétés. Ces pratiques peuvent être cycliques, intervenant de manière répétitive (*e.g.* amendements organiques, tontes, travail du sol) ou ponctuelles liées à des changements d'usages par exemple (*e.g.* excavation, compactage, apport de remblai) (Thenail et Baudry, 2001).

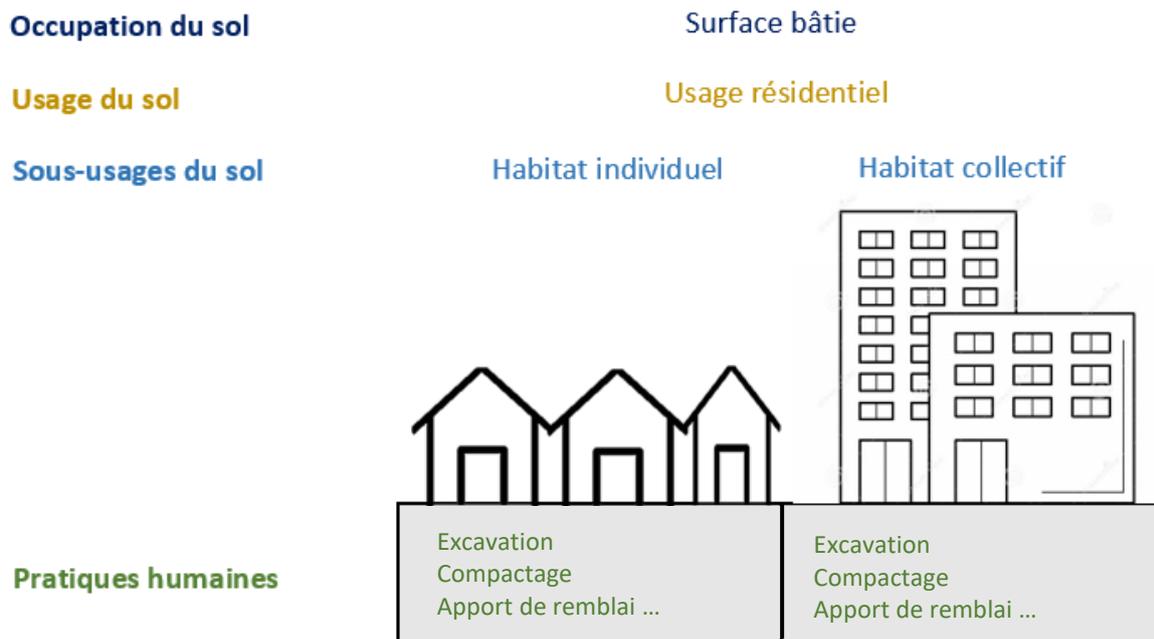


Figure 3 : Illustration des concepts d'occupation, d'usage, de sous-usage et de pratique humaine

### 2.2.2. Diverses déclinaisons du facteur humain

Le facteur humain modifie le système sol par un ensemble de perturbations anthropiques associant :

- Des pratiques humaines **liées à l'usage du sol et aux changements d'usages** définissant sa **trajectoire historique** (*i.e.* succession d'usages). Pour garantir l'ensemble de ses besoins (*e.g.* alimentation, confort, habitat, production, déplacements, loisirs, tourisme), l'Homme va imposer un usage précis au sol pouvant changer au cours du temps. C'est pour garantir l'usage considéré ou un changement d'usage défini, que l'Homme va, par des pratiques humaines spécifiques, modifier les propriétés du sol.
- Des pratiques humaines **indépendantes de l'usage des sols**. Les dépôts sauvages de déchets divers font par exemple partie de cette catégorie. C'est le cas également des activités militaires pouvant fortement perturber les sols d'un point de vue physique mais encore chimique. En effet, les bombardements, l'ouverture de tranchées ou encore l'utilisation de munitions ou de produits chimiques ont fortement impactés les propriétés des sols comme les teneurs en métaux ou la structure des sols (Poszwa *et al.*, 2018, Vidosavljević *et al.*, 2013).
- **Des retombées atmosphériques**. Certains usages (*e.g.* industriel, routier) engendrent sur les sols des pollutions diffuses par retombées atmosphériques. À ce titre, des pollutions en

hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été observées en milieu urbain, impactant l'activité enzymatique des sols (Bielińska *et al.*, 2018 ; Decina *et al.*, 2017).

L'analyse de la littérature permet ainsi de décrire la pédogenèse en milieu urbain et ses multiples facteurs d'influence intégrant de manière atypique le facteur humain (Figure 4).

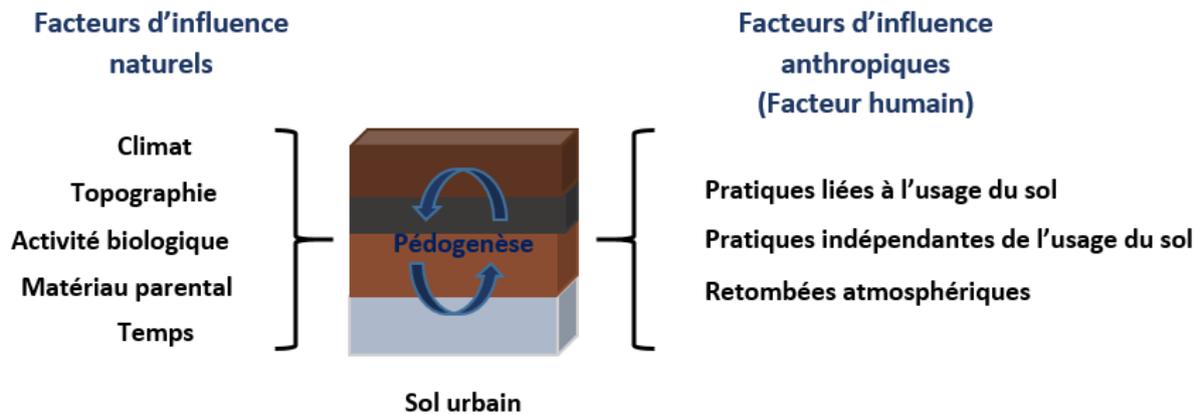


Figure 4 : Les facteurs d'influence de la pédogenèse en milieu urbain

Dans la suite du manuscrit, la notion de facteur humain fera **exclusivement référence à l'ensemble des pratiques humaines liées à la trajectoire historique du sol** qui correspondent aux pratiques les plus récurrentes et impactant majoritairement l'évolution des sols urbains.

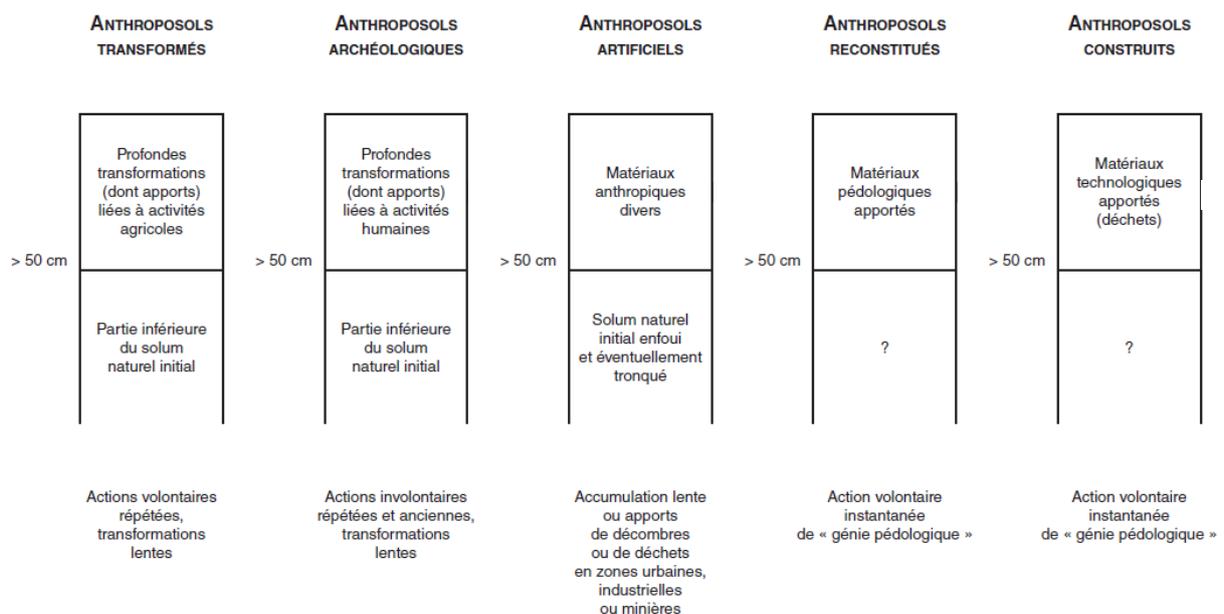
## 2.3. État des connaissances scientifiques en lien avec le facteur humain

### 2.3.1. Classification pédologique des sols anthropisés

Depuis 2005, face à l'augmentation significative de la proportion de sols anthropisés, c'est-à-dire impactés par le facteur humain, le groupe de travail de l'Union Internationale de Sciences du Sol (IUSS) intitulé SUITMA (Soil in Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas) a décidé de reconnaître ces sols comme une catégorie de sols à part entière. Dans la base de référence mondiale de ressources en sols (World reference Base for Soil Resources : WRB), deux catégories de sols font référence à des sols modifiés par les pratiques humaines : les Technosols et les Anthrosols (IUSS Working Group WRB 2014). La première catégorie se réfère aux sols contenant soit (i) plus de 20% d'artefacts, en volume ou en poids, (*i.e.* matériaux créés, modifiés ou amenés par l'Homme) dans les 100 premiers centimètres, soit (ii) une couche imperméable en surface ou en profondeur (*e.g.*, membrane, couche cimentée, indurée, bitumée). Les Anthrosols définissent également des sols formés ou modifiés par des pratiques humaines (*e.g.* addition de matière organique ou de déchets ménagers, irrigation, culture intensive). Ils sont caractérisés par un degré d'anthropisation moins élevé que celui des

Technosols. Au niveau national, les sols modifiés par l'Homme sont classés dans le référentiel pédologique français (RPF) comme Anthrosols (Baize et Girard, 2008). On y distingue 5 classes d'Anthrosols (Figure 5) :

- Les **Anthrosols transformés** sont des sols ayant subis des modifications anthropiques pour améliorer la fertilité et la production des sols sur une épaisseur d'au moins 50 cm.
- Les **Anthrosols artificiels** sont des sols, d'au moins 50 cm, développés sur des matériaux technogéniques (déchets domestiques et industriels, les déblais de mines ou de carrières).
- Les **Anthrosols reconstitués et construits** sont des sols, d'au moins 50 cm, issus d'opérations de « génie pédologique » ayant pour objectif de construire un sol avec des objectifs précis.
- Les **Anthrosols archéologiques** représentent les sols, d'au moins 50 cm, ayant subis d'ancienne activité humaine et contenant plus de 20 %, en volume, de débris d'activités humaines.



**Figure 5 : Les différents types d'Anthrosols, (Baize et Girard, 2008)**

### 2.3.2. Des processus pédologiques plus rapides et plus intenses que dans les sols naturels

Contrairement aux sols naturels, les processus de formation des sols anthropisés sont souvent plus rapides et plus intenses (Zevenbergen *et al.*, 1999 ; ; Rossiter, 2007 ; Séré *et al.*, 2010). Le facteur humain crée un déséquilibre entre les matériaux parentaux et les matériaux anthropiques apportés. Les sols en milieu urbain sont souvent des sols jeunes, composés de terre de remblai, d'apport de

matière organique, minérale ou de matériaux technogéniques encore appelés artéfacts. Par ces pratiques, les sols sont complètement remaniés et leur processus de formation fortement perturbé. Pour retrouver l'équilibre physique et chimique, des processus de formation se mettent alors en place après chacune de ces opérations. Plusieurs exemples peuvent être cités. Il a été démontré que la cinétique des réactions physico-chimiques peut être plus rapide dans les sols construits. Une étude sur des sols à base de sous-produits papetiers (Séré, 2007) a ainsi montré par expérience *in situ* et par expérience en conditions contrôlées en laboratoire que des réactions intervenaient très rapidement suite à un déséquilibre thermodynamique entre les différents compartiments des sols construits et leur environnement. Ainsi, les processus de formation des sols en milieu urbain sont cinétiquement influencés par l'origine et la nature des matériaux apportés et du matériau parental. Du fait de cette vitesse de formation plus élevée, de nouveaux horizons vont se différencier dans les sols urbains en l'espace de quelques mois, voire quelques années (Séré *et al.*, 2010).

### 2.3.3. Facteur humain : facteur dominant la pédogenèse en milieu urbain

Outre le fait qu'il influence la cinétique des processus pédogénétiques, le facteur humain est également globalement responsable de l'état bio-physico-chimique des sols urbains. Les différentes pratiques humaines peuvent en effet, modifier les propriétés de surface mais aussi les caractéristiques plus profondes des sols et notamment le matériel parental. Certaines pratiques sont, en effet, si conséquentes qu'elles peuvent modifier ou stopper totalement les processus naturels se déroulant jusqu'alors. La perturbation anthropique s'apparente donc à une rupture des processus naturels. **L'idée générale qui domine dans le monde scientifique est que le facteur humain s'impose alors comme le facteur prédominant de la pédogenèse en milieu urbain** (Effland et Pouyat, 1997 ; Dudal, 2004 ; Morel *et al.*, 2005 ; Yang et Zhang, 2015).

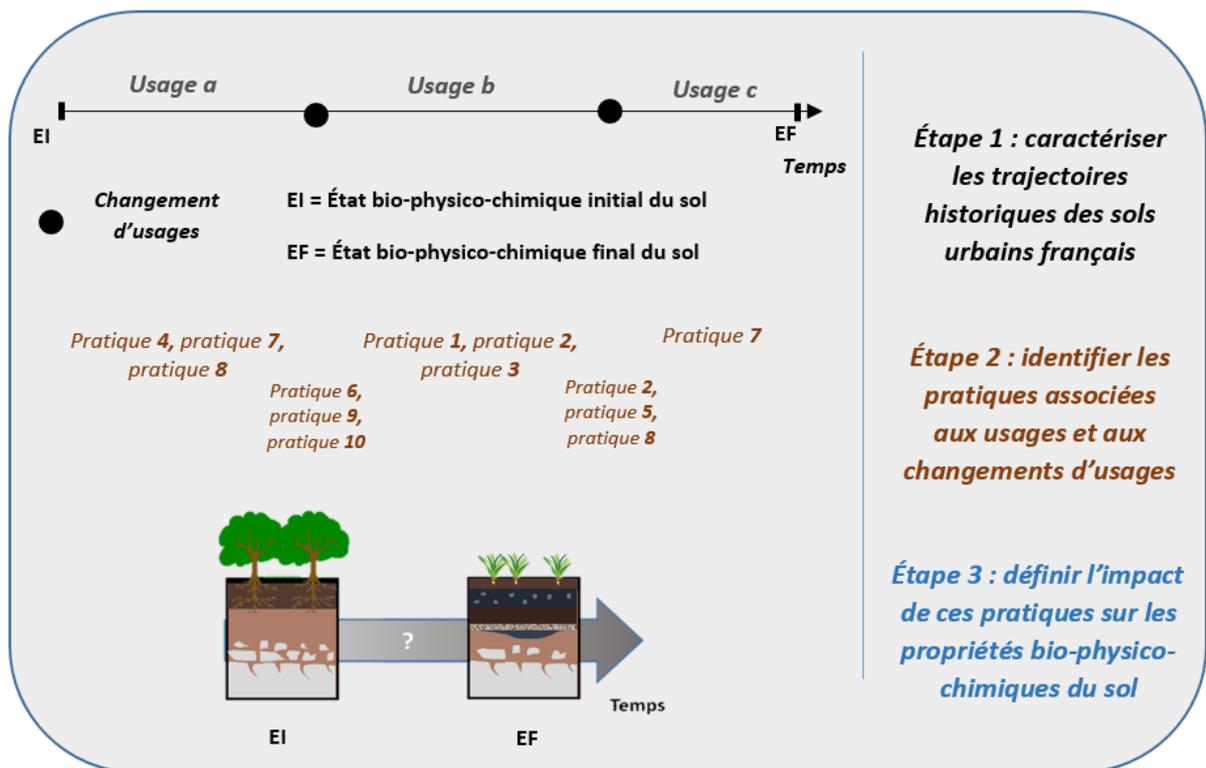
En influençant majoritairement les processus pédogénétiques et leur état bio-physico-chimique, le facteur humain apparaît alors comme un élément essentiel à considérer pour différencier les sols urbains. En effet, en fonction des différentes successions de pratiques humaines subies au cours du temps, dépendantes des trajectoires historiques, il serait possible de catégoriser ces sols et prédire leur état physico-chimique à large échelle. Cependant, les connaissances actuelles sur ce facteur d'influence restent très superficielles, limitant ainsi le développement de toute démarche de caractérisation des sols urbains à large échelle.

#### 2.3.4. *Un état de connaissance limité concernant le facteur humain*

D'après la revue bibliographique réalisée, il semble que ce facteur n'ait jamais été caractérisé de façon précise. Un sol urbain est souvent perçu comme un sol fortement perturbé où de nombreuses pratiques humaines sont concentrées dans le temps et dans l'espace (Lorenz et Kandeler, 2005; Morel *et al.*, 2005; Yang et Zhang, 2015 ; Li *et al.*, 2018), que l'on définit parfois de « pression anthropique » (Milošević *et al.*, 2013). Cette notion, associée à tout sol urbain, englobe l'ensemble des pratiques humaines sans faire de distinction entre-elles. Or, comme cela a été précisé, ces pratiques diffèrent d'un sol à l'autre, selon une trajectoire historique (i.e. leur succession d'usages) précise. Il existe donc encore aujourd'hui un réel manque de connaissance dans la caractérisation et l'identification de ce facteur. En outre, dans l'hypothèse où ce facteur détermine les propriétés et la qualité des sols urbains, il existe un réel besoin de mieux le caractériser, notamment dans une perspective de cartographie prédictive des sols urbains à large échelle.

### **3. Conclusion : un facteur humain essentiel à intégrer**

L'analyse de la bibliographie montre qu'une caractérisation du facteur humain semble être indispensable pour comprendre le fonctionnement des sols urbains. Trois étapes distinctes de caractérisations, au vu des précédentes sous-parties, permettraient de combler ce manque de connaissance. La première serait de caractériser les trajectoires historiques, c'est-à-dire les successions d'usages représentatives de ces sols afin de définir plus précisément, par des éléments tangibles, la notion de facteur humain (Figure 6). La seconde étape serait d'identifier les pratiques associées à ces trajectoires afin de préciser à l'échelle de la pratique ce concept. Enfin, la dernière étape concernerait la caractérisation des impacts de ces trajectoires sur les propriétés bio-physico-chimiques du sol qui permettrait d'avoir une vision complète sur le rôle exact du facteur humain sur la pédogenèse en milieu urbain (Figure 6).



**Figure 6 : Schéma conceptuel représentant les étapes nécessaires à la caractérisation du facteur humain de la pédogenèse en milieu urbain**

L'objet du prochain sous-chapitre est alors d'explorer les méthodes disponibles qui aideraient au développement de la démarche scientifique de caractérisation du facteur humain proposée ci-dessus à l'issue de l'analyse bibliographique exposée dans ce premier sous-chapitre.

# Vers une approche prédictive de la qualité des sols urbains : revue des méthodes disponibles pour intégrer et caractériser le facteur humain

## 1. Différentes méthodes de prise en compte des conséquences de l'histoire des sols urbains sur leurs propriétés

### 1.1. Méthodes pour intégrer la composante historique des sols urbains

L'étude historique apparaît être une approche complémentaire à l'étude pédologique, cruciale pour appréhender les nombreuses ruptures temporelles qui ont affecté la pédogénèse. Prendre en compte l'historique des sols urbains, c'est-à-dire leur trajectoire historique d'usages au cours du temps, pour obtenir des éléments de réponses sur leur fonctionnement est une démarche déjà réalisée à l'échelle de l'îlot urbain ou du site. La revue bibliographique a permis d'identifier plusieurs méthodes permettant de retracer l'historique d'un site.

#### 1.1.1. Analyse du profil de sol à l'échelle du site

L'historique d'un sol peut être appréhendé par l'étude détaillée de son profil. Elle permet, dans certains cas, de déceler différentes ruptures provenant d'un usage spécifique et de classer chronologiquement ces événements. L'analyse du profil de sol est utilisée dans certaines études comme un traceur de la pédogénèse (Huot, 2013). Dans cette étude, réalisée sur un site au passé industriel soutenu, l'observation du profil laisse apparaître une superposition de couches résultant de la décantation des apports successifs de boues sidérurgiques qui se sont sédimentés au cours du temps (Figure 7). L'auteur a notamment réussi à déduire grâce à cette méthode, des procédés industriels différents par observations de nuances de couleurs des différentes couches. L'analyse du profil a donc dans le cadre de ce travail de recherche, permis de mieux appréhender l'histoire industrielle du site étudié.

Cette méthode peut également améliorer les connaissances sur le type de pratiques humaines subies par le sol au cours du temps. L'ouverture de fosses pédologiques a permis de déceler les pratiques majoritaires liées à un usage spécifique. Par cette méthode, il a été mis en évidence par exemple que les sols liés à un usage industriel ont un profil où les couches de surfaces ont été tronquées par des pratiques humaines (Greinert, 2015) précisant ainsi certaines pratiques humaines spécifiques de l'usage industriel.

Au-delà de l'observation macroscopique et physique du profil de sol, des analyses plus fines peuvent être réalisées pour éclairer le passé historique du sol. L'analyse des matières organiques peut en

donner quelques éléments. En effet, en fonction de la forme de la chaîne carbonatée et du type de molécule présente sur cette chaîne, l'origine de la matière organique présente dans le sol peut être déterminée donnant ainsi des indications sur le passé historique du sol (Jeanneau, 2007). L'emploi de méthodes géo-archéologiques impliquant des observations détaillées sur le terrain, et de la micromorphologie, discipline scientifique qui étudie l'organisation microscopique des matériaux constituant les sols et leur éventuel contenu anthropique (*e.g.* os, charbon, verre, excrément) sont également des méthodes pouvant donner des informations sur la trajectoire historique du site sur plusieurs siècles (Devos *et al.*, 2017). En fonction de l'abondance de certains types déchets anthropiques, des conclusions sur d'anciens usages du sol peuvent être, en effet, établies. Grâce à ce panel de méthodes, il serait donc théoriquement possible, à l'échelle du site, de retracer la trajectoire historique d'un sol urbain de son état naturel à actuel.



**Figure 7 : Profil de sol témoin d'une activité industrielle soutenue (Huot, 2013)**

### *1.1.2. Analyse diachronique des cadastres et des photos aériennes, une vision foncière du sol*

L'analyse des cadastres et d'images aéroportées/satellites permet également de connaître l'historique d'un sol sur plusieurs siècles et ceci à une échelle restreinte. Cette analyse renseigne en effet, des anciennes occupations et des anciens usages dont les sols étaient le support. De nombreuses études sur les changements d'occupation et de couverture de sol ont utilisé les cartes historiques

comme principale source d'informations (Hamre *et al.*, 2007). Cette méthode a permis d'étudier les changements structurels à long terme des parcelles boisées par analyse d'anciennes cartes cadastrales (de 1839 à 1843) et de photographies aériennes (de 1938, 1950, 1966, 1975 à 2006) dans la région de la Bohême en République Tchèque (Skaloš et Engstová, 2009). Cette analyse est également utilisée en milieu urbain. Par exemple, l'évolution de l'occupation et de l'usage des sols du plateau de Montreuil, situé en banlieue Est de Paris a été retracée sur plus de 200 ans (Franck-Néel *et al.*, 2014).

L'analyse bibliographique prouve donc la possibilité de retracer la trajectoire historique sur une longue période à l'échelle d'un site. Cependant, dans l'état actuel des connaissances, aucune référence n'a été trouvée sur la faisabilité de déterminer des trajectoires historiques des sols urbains sur une période similaire à large échelle. En effet, les méthodes recensées ne sont pas applicables et transposables à large échelle.

## **1.2. Détermination des trajectoires historiques à large échelle**

### *1.2.1. Évolution des villes : un indicateur de trajectoire historique*

Bien que les méthodes actuelles permettant de retracer l'historique d'un sol ne semblent pas adaptées à un changement d'échelle, il est possible d'obtenir une vision globale des trajectoires historiques des sols urbains par l'étude du développement et de la croissance des villes.

Au Moyen-Age, le nombre de zones urbaines était limité. La population française était essentiellement rurale, vivant de l'activité agricole. Les villes possédaient toutes une organisation semblable, implantées autour d'une place centrale, servant de refuge lors d'évènements hostiles. Ces places centrales étaient protégées par des remparts, éléments caractéristiques des villes médiévales (Héliot et Leduque, 1948). À partir du XVII et XVIII<sup>ème</sup> siècle, les modèles des villes médiévales s'effondrent. La majorité des remparts sont peu à peu détruits de manière à ouvrir la ville qui s'étend en périphérie. Cette dernière devient un lieu de vie où prospère le commerce. Les nouvelles structures urbaines permettent un développement de la productivité et de la croissance économique. Les villes deviennent des lieux de vie proposant des loisirs, de la culture et des lieux de promenades (Réseau Canopé, 2010). Le développement des villes s'accélère au XIX<sup>ème</sup> siècle marqué par les bouleversements de la révolution industrielle. La population urbaine va croître brutalement, les villes vont alors commencer à s'étendre aux alentours créant d'autres entités urbaines. En 1831, le nombre d'unités urbaines en France métropolitaine était estimé à 617 contre 1781 en 1982 (Guérin-Pace et Pumain, 1990). Le XIX<sup>ème</sup> siècle est quant à lui, synonyme d'une grande transformation et d'un grand développement des villes. Les voies de communication se développent par la création de grandes avenues et par la construction de chemin de fer. Les évènements du XX<sup>ème</sup> siècle ont également beaucoup perturbé le développement

de l'urbanisation. Les deux guerres mondiales, et notamment la seconde, ont, en effet, été destructrices pour certaines villes françaises. La reconstruction d'après-guerre constitue alors une étape cruciale, caractérisant l'urbanisation actuelle. La construction des banlieues émerge, c'est le développement des grands ensembles et des espaces péri-urbains. La démographie explose en ville, le travail prospère, « les trente glorieuses » prennent place (Réseau Canopé, 2010). Différentes politiques d'urbanisation ont influencé le développement urbain au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, comme la loi Barre de 1977. Cette loi va marquer un désengagement de l'État de la construction de logements sociaux en accentuant les financements pour les logements individuels. Cette décision marquera de son empreinte la tâche urbaine en favorisant la construction de logement individuel de type pavillonnaire et développant l'étalement urbain. Aujourd'hui, d'autres politiques peuvent influencer les formes urbaines. Le texte de la loi ALUR de 2014 comprend notamment des mesures pour renforcer la densification urbaine dans l'objectif de lutter contre l'artificialisation et le grignotement des sols agricoles.

En considérant cette vision globale d'évolution des villes, on s'aperçoit que les trajectoires historiques sont définies par une succession d'usages dominante. L'étalement urbain qui traduit l'expansion des villes au cours des siècles est associé à une anthropisation des sols passant d'un usage peu anthropisé (*e.g.* agricole, forestier) à un usage très anthropisé (*e.g.* résidentiel, industriel ou commercial). De plus, le centre-ville historique semble être la zone urbaine la plus perturbée en termes de changement d'usage afin de garantir différentes fonctions (*e.g.* défense, économie, loisir). L'étude du développement des villes au cours du temps est donc un moyen de se donner une vision globale des trajectoires historiques d'usages des sols urbains. Cependant, aucune caractérisation précise de ces trajectoires n'a jusqu'alors été présentée ni discutée. Les données cartographiques d'usages existantes pourraient pallier cette difficulté.

### 1.2.2. Défi de la mise en adéquation des échelles spatiales et temporelles

À large échelle (*i.e.* couvrant un territoire étendu), plusieurs bases de données d'occupations et d'usages des sols ont été créées au cours des dernières décennies (Bousquet *et al.*, 2013). Ces bases de données sont souvent géo-référencées en couche vectorielles SIG (Système d'Information Géographique). À leur création, ces bases de données fournissaient des informations d'occupations et d'usages sur une année précise. Puis, ces dernières ont été mises à jour régulièrement, donnant ainsi des informations d'occupations et d'usages des sols à large échelle sur plusieurs millésimes (appelés par la suite jalons). Les méthodes utilisées pour les créer sont basées sur des technologies récentes limitant ainsi le recul dans le temps. En effet, les supports utilisés dans la création de ces données sont des photographies aériennes et/ou satellitaires. Des technologies de pointe doivent être utilisées pour couvrir l'intégralité du territoire étudié et garantir une qualité suffisante à l'interprétation de ces

photographies (IPR, 2013). Les photographies aériennes respectant ces conditions sont produites depuis seulement quelques dizaines d'années, environ 70 ans pour les plus anciennes. Par conséquent, les bases de données d'occupations et d'usages des sols à large échelle sont également limitées à cette période récente.

### *1.2.3. Quelques exemples de bases de données d'occupation et d'usage des sols disponibles à large échelle*

Des bases de données ont été développées suite à un réel besoin de connaissances de l'occupation et l'usage du sol pour accompagner l'évolution des territoires et répondre aux enjeux humains et environnementaux émergents tels que l'artificialisation des terres agricoles, la périurbanisation, la densification urbaine (IPR, 2013).

À l'échelle européenne, de nombreux programmes de suivis de l'occupation et de l'usage des sols sont menés à cette fin. La base de données CORINE Land Cover (CLC) est le résultat de l'un de ces programmes européens. Elle est, sans conteste, la base de données la plus utilisée dans de nombreux articles (Gallego et Bamps, 2008 ; Bousquet *et al.*, 2013 ; Cieślak *et al.*, 2020). CLC est produite sur 39 Etats européens dans le cadre du programme européen de surveillance des terres Copernicus, piloté par l'Agence européenne pour l'environnement. Produite par photo-interprétation d'images satellites cette base de données donne des informations sur l'occupation et l'usage des sols pour les années 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018 selon différents postes définissant sa nomenclature. Cette base de données permet donc de cartographier des unités homogènes d'occupation et d'usage des sols d'une surface minimale de 25 ha. Toujours au niveau européen, face à un besoin de la Commission européenne de disposer d'informations détaillées sur l'occupation et l'usage des sols en villes, l'agence Européenne pour l'environnement a récemment développé la base de données Urban Atlas (UA) qui fournit des informations d'utilisation des sols pour toutes les villes Européennes dont la population est supérieure à 100 000 habitants. Cette base de données permet de cartographier des unités homogènes d'occupation et d'usage des sols d'une surface minimale de 0,25 ha pour les surfaces artificialisées et d'1 ha pour les autres surfaces (Prastacos *et al.*, 2011). UA est seulement déclinée à travers 3 jalons (*i.e.* 2006, 2012 et 2018) non systématiques, c'est-à-dire que certaines villes européennes n'ont été décrites que par 1 ou 2 jalons.

Au niveau national, les bases de données disponibles sont plus localisées. Le LittoMOS (Mode d'Occupation du sol sur le littoral national), produite par le Cerema Normandie-Centre, fournit des données d'occupations et d'usages des sols situés sur les littoraux entre les années 2000 et 2006 (Cerema, 2008). La base de données OCSOL PACA renseigne sur les occupations et usages du sol de l'ancienne région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. Le Mode d'occupation du sol (MOS) est un inventaire numérique des occupations et des usages des sols de l'Île-de-France. Actualisé régulièrement, cette

base de données possède 10 jalons (1949, 1982, 1987, 1990, 1994, 1999, 2003, 2008, 2012 et 2017) représentant ainsi 70 ans d'évolution d'occupations et d'usages du sol. D'anciennes régions administratives françaises ont également développé des outils de suivi d'occupations et d'usages des sols (IPR, 2013), c'est le cas de l'Alsace où une collaboration entre le SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection), les grandes collectivités du Grand Est, les agences d'urbanisme et autres organismes a permis le lancement d'un suivi d'occupations et d'usages du sol régional. Les anciennes régions administratives, telles que le Languedoc-Roussillon, le Nord-Pas-de-Calais et la Picardie, ont également développé leur propre outil plus ou moins approfondi (Tableau 1). Ces travaux sont essentiellement réalisés de manière isolée créant une certaine hétérogénéité entre les régions. Pour répondre à cet inconvénient, l'IGN a annoncé en 2014, la création d'une base de données d'occupations et d'usages des sols à large échelle (OCS GE) afin de créer un cadre de référence homogène permettant les comparaisons entre territoires (IPR, 2013). Cependant, à l'heure actuelle, cette base de données reste partiellement complétée représentant moins de la moitié du territoire. Un travail pour déployer cette base de données sur l'ensemble du territoire national est actuellement en cours.

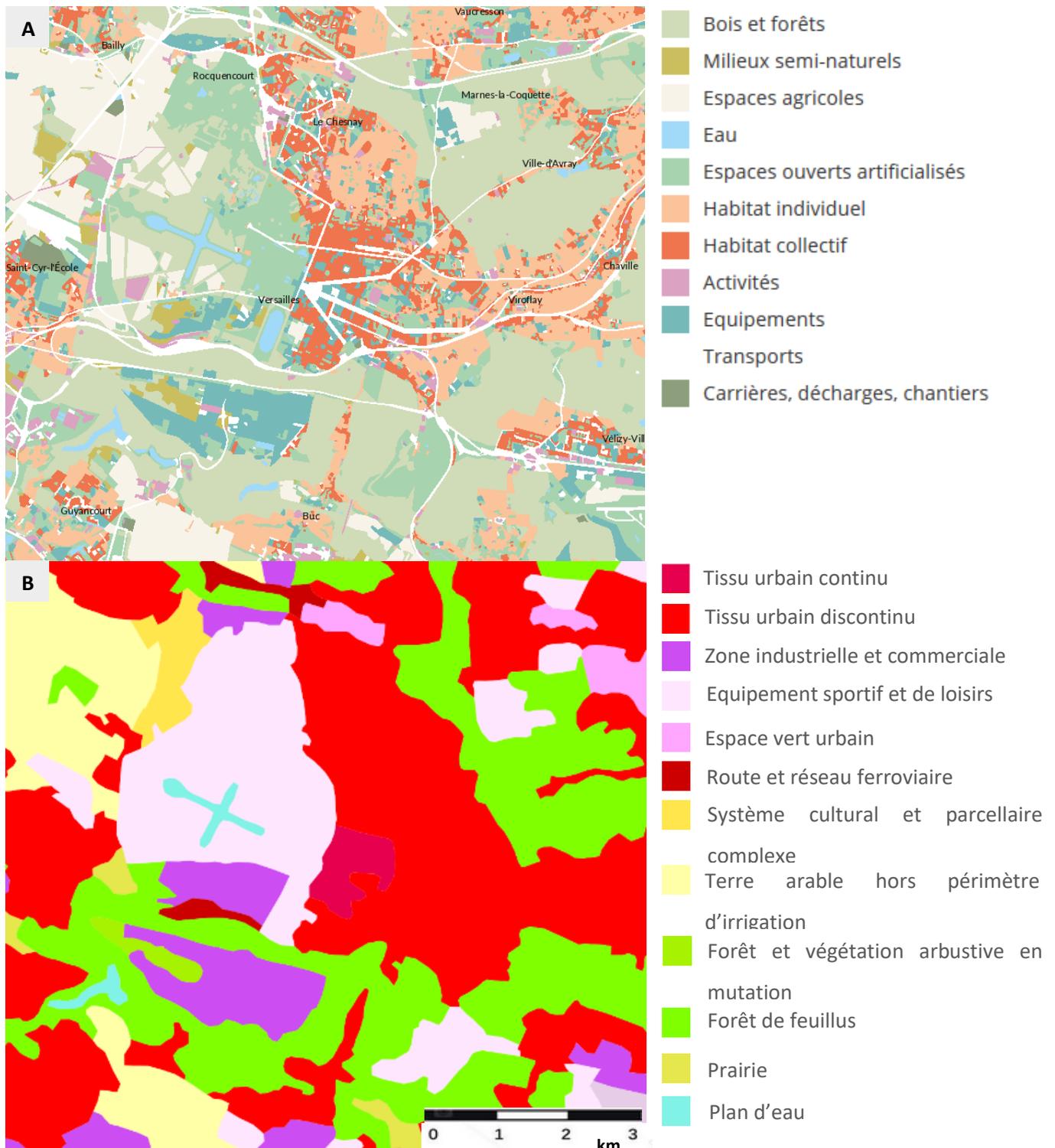
**Tableau 1 : Caractéristiques de quelques outils de suivi d'occupation et d'usage des sols à l'échelle régionale, (IPR, 2013)**

	Alsace	Languedoc-Roussillon	Nord-Pas-de-Calais	Picardie	Provence-Alpes-Côte-d'Azur	Île-de-France
<b>Sources de données</b>	Ortho-photographies aériennes  Images satellites (issues des satellites Landsat 7 ETM+ et SPOT 5)	Images satellites (issues de Landsat 7 ETM+)	Images satellites (issues des satellites Landsat 7 ETM+ et SPOT 5)  Photographies aériennes	Images satellite issues du projet Geosud RapidEye  Photographies aériennes	Images satellites (issues de Landsat 7 ETM+)  Ortho-photographies	Ortho-photographies issues de photographies aériennes
<b>Méthodologie</b>	Photo-interprétation complétés par des données exogènes	Traitement semi-automatique	Photo-interprétation complétés par des données exogènes	Photo-interprétation complétés par des données exogènes	Traitement semi-automatique et photo-interprétation assistée par ordinateur	Photo-interprétation assistée par ordinateur et complétée par des données exogènes
<b>Unité minimale de collecte (résolution spatiale)</b>	Variable selon les postes de nomenclature	25000 m <sup>2</sup>	500 m <sup>2</sup> en zone urbaine  2500m <sup>2</sup> en zone agricole	2500m <sup>2</sup> pour les espaces artificialisés  5000m <sup>2</sup> pour les autres espaces	Entre 500 m <sup>2</sup> et 5000 m <sup>2</sup> selon les postes	625 m <sup>2</sup>
<b>Nomenclature</b>	63 postes	47 postes	52 postes	61 postes	47 postes	81 postes
<b>Échelle d'utilisation</b>	1/10 000	1/50 000	1/25 000	1/14 000	1/50 000 à 1/10000	1/5 000
<b>Jalons disponibles</b>	2000, 2008 et 2012	1999 et 2006	1990, 1998, 2005 et 2009	1992, 2002 et 2010	1999 et 2006	1949, 1982, 1987, 1990, 1994, 1999, 2003, 2008, 2012 et 2017

#### 1.2.4. Limites liées aux résolutions spatiales des bases de données disponibles

La résolution spatiale est un paramètre pertinent dans la conception des bases de données d'occupations et d'usages des sols à large échelle. En effet, celle-ci va définir l'unité minimale de collecte c'est-à-dire, la superficie minimale de détection d'un changement dans l'occupation et l'usage des sols. Le choix de cette résolution découle généralement de contraintes techniques (Bousquet *et al.*, 2013). Généralement la résolution spatiale est fonction de la superficie du territoire étudié (Verburg *et al.*, 2004). La base de données CLC offre ainsi, une résolution spatiale moins bonne (*i.e.* 25 hectares) que les bases de données créées à l'échelle régionale (Tableau 1) créant de fortes

approximations dans l'occupation et l'usage réel du territoire (Figure 8). Une étude qui se veut être précise dans l'information fournie devra donc prendre en considération ce facteur.



**Figure 8: Différence de précision des occupations et usages des sols expliquée par les résolutions spatiales des bases de données. A) Mode d'occupation des sols de la Région Parisienne (2017), B) CORINE Land Cover (2018)**

La détermination des trajectoires historiques des sols urbains à large échelle est une question très peu abordée dans la littérature. Même s'il est évident que retracer ces trajectoires historiques sur plusieurs siècles à large échelle semble ambitieux, il serait néanmoins possible de débiter une caractérisation de ces trajectoires avec les ressources disponibles. En effet, les caractériser sur les dernières décennies, grâce aux bases de données disponibles, serait déjà un premier pas dans la description du facteur humain et la compréhension du fonctionnement des sols urbains.

### **1.3. Liens entre trajectoires historiques et propriétés bio-physico-chimiques d'un sol urbain**

Très peu de connaissances sur les trajectoires historiques des sols urbains et par conséquent sur l'ensemble des pratiques humaines liées à ces trajectoires et leurs impacts physico-chimiques sur les sols sont disponibles. Il existe néanmoins dans la littérature, des informations isolées traitant de l'impact de certains usages et pratiques humaines sur les sols.

#### *1.3.1. Propriétés bio-physico-chimiques des sols en lien avec leurs usages actuels*

La gestion anthropique du sol urbain, qui traduit son usage, influe sur ses propriétés bio-physico-chimiques (voir le paragraphe 1.2.2). Certaines relations entre différents grands usages des sols urbains et leurs propriétés bio-physico-chimiques ont été identifiées :

- L'usage « espace vert »

Les espaces verts sont utiles à l'Homme par les services écosystémiques qu'ils assurent (Heidt et Neef, 2008). La gestion anthropique de ces espaces est le facteur principal qui influence les paramètres biologiques, physiques et chimiques du sol (Tresch *et al.*, 2018). À travers l'étude de 85 jardins dans la ville de Zurich, les auteurs de cette publication montrent que les pratiques humaines telles que le paillage ou l'ajout de compost améliorent l'activité biologique du sol. Au contraire, les pratiques telles que le travail de la terre ou le compactage ont, quant à elles, un effet inverse sur la richesse biologique du sol. Les sols d'espace vert sont souvent associés à une forte teneur en carbone organique, conséquence directe de l'ensemble des pratiques de jardinage associées à cet usage (Tresch *et al.*, 2018). De plus, ils possèdent généralement une structure compacte et une stratification non naturelle puisque ces espaces urbains sont soumis à un piétinement omniprésent impliquant une dégradation des agrégats (Jim, 1998).

- L'usage « résidentiel »

Pour garantir le besoin en logements, de nombreuses surfaces sont imperméabilisées empêchant ces sols de rendre la majorité de leurs services écosystémiques potentiels. Néanmoins l'usage

résidentiel s'accompagne de sols non imperméabilisés sujets à des pratiques humaines. Les espaces enherbés d'accompagnement du bâti en constituent une grande partie (Hedblom *et al.*, 2017). La gestion anthropique des pelouses joue un rôle dans la détermination de l'état physico-chimique du sol (Smith *et al.*, 2018). La fréquence de tonte, la fertilisation apportée ou encore l'irrigation peuvent modifier de manière significative les taux d'azote et de matières organiques dans le sol. Il a été remarqué par exemple que les taux de pertes d'azote gazeux passaient de 8 à 20 % lorsque la quantité de fertilisant apporté passe de 48 à 192 kg N ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>. De plus, il a été montré qu'une accumulation de carbone organique au cours du temps, corrélée à une accumulation de pratique, caractérise ces espaces résidentiels (Zirkle *et al.*, 2011).

- L'usage « industriel »

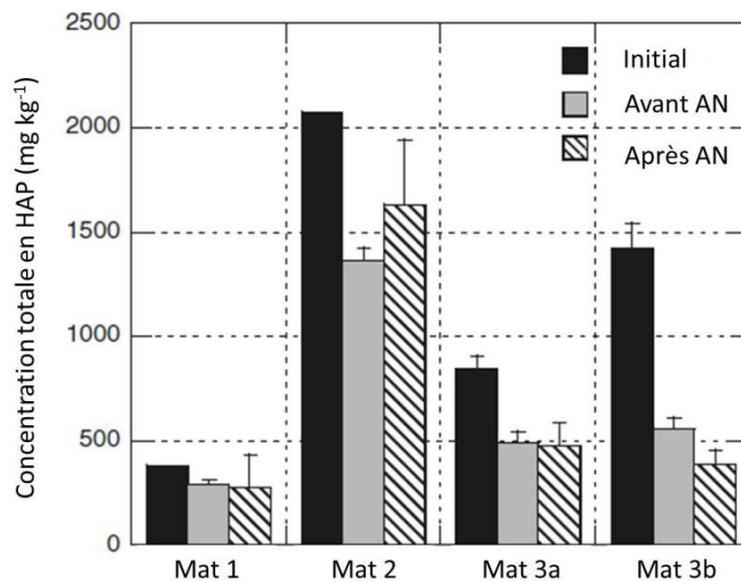
Certaines pratiques associées à l'usage industriel, entraînent une augmentation significative des concentrations en HAP dans le sol (Soukariéh, 2018). De plus, des contaminations en métaux lourds ont été observées dans ces zones. Les teneurs en plomb, en arsenic et en cadmium se sont révélées anormalement élevées dans trois zones industrielles de la ville d'Arak en Iran (Solgi *et al.*, 2012). Cette anomalie a principalement été expliquée par les pratiques humaines spécifiques aux usages industriels (*e.g.* utilisation de peinture, utilisation de détergent dépôt de déchets métallurgiques).

- L'usage « routier et ferroviaire »

Les usages liés aux infrastructures de transport répondent aux besoins de l'Homme de se déplacer et impliquent également des modifications des propriétés bio-physico-chimiques des sols situés sur les accotements de ces infrastructures. Il a été montré que les teneurs en carbone total, en azote total et le taux de matière organique sont plus élevés dans les sols situés sur les accotements que dans les sols éloignés du réseau routier (Park *et al.*, 2010 ; Ghosh *et al.*, 2016). L'intensité des activités anthropiques autour de ces zones de circulation est l'une des raisons apportées à cette observation. Concernant le trafic ferroviaire, l'utilisation de produit phytosanitaire et notamment le désherbage systématique des accotements pour assurer l'usage voulu empêche le développement d'une litière végétale sur ces sols. Cette pratique engendre également de faibles teneurs en carbone organique et en azote total (Lorenz et Kandeler, 2005).

### 1.3.2. Propriétés bio-physico-chimiques du sol en lien avec les usages passés

De manière similaire aux usages actuels, les usages historiques jouent également un rôle dans l'état bio-physico-chimique du sol. Dans la littérature, les impacts d'anciennes activités industrielles sur les sols et leur développement ont été étudiés (Gaberšek et Gosar, 2018 ; Haeseler *et al.*, 1999 ; Li *et al.*, 2013 ; Ouvrard *et al.*, 2013). En Slovénie, d'anciens sols industriels reconvertis en zones résidentielles et commerciales présentent des taux de cuivre, de plomb et de zinc anormalement élevés (Gaberšek et Gosar, 2018). Ces contaminations provenant d'anciennes activités industrielles persistent au fur et à mesure des décennies. Cette problématique apparaît également en Chine où des contaminations en métaux lourds ont été observées dans la ville de Shenyang (Li *et al.*, 2013). De multiples prélèvements situés dans une ancienne zone industrielle y ont montré une contamination en plomb, cuivre, zinc, cadmium et arsenic, causée par les anciennes pratiques industrielles (Li *et al.*, 2013). De plus, de fortes concentrations en HAP ont également été observées dans d'anciennes terres industrielles de cokerie et d'usine à gaz. Ces HAP, malgré une diminution de leur concentration suite à la mise en place d'un procédé d'atténuation naturelle depuis une dizaine d'années (Ouvrard *et al.*, 2013), restent présents à des concentrations élevées dans le sol (Figure 9).



**Figure 9 : Évolution des teneurs totales en HAP (mg.kg-1) au cours d'une expérimentation d'atténuation naturelle de quatre terres provenant de sites industriels contaminés : cokeries et usine à gaz - A.N : période d'atténuation naturelle d'environ 10 ans (Ouvrard et al., 2013)**

L'analyse de la littérature montre donc la pertinence de la prise en compte des anciens usages dans la détermination de l'état bio-physico-chimique des sols urbains. Leur passé influence en effet leur état actuel.

### 1.3.3. Liens entre pratiques humaines et propriétés du sol

Comme mentionné précédemment, les pratiques humaines sont généralement liées à un usage spécifique qui modifie les propriétés du sol. Un sol peut voir sa structure, sa granulométrie, son état hydrique, son pH, son taux de matière organique et d'autres propriétés bio-physico-chimiques changer par l'intermédiaire de ces pratiques. L'analyse de la littérature montre que de nombreuses pratiques ont été étudiées de manière individuelle en évaluant leurs impacts sur les propriétés du sol.

#### - Le compactage

Les sols urbains sont souvent compressés. La masse volumique apparente augmente alors et la macroporosité diminue (De Paul *et al.*, 2005). En conséquence, les volumes disponibles pour l'eau et les gaz dans les sols compressés sont également réduits, engendrant la modification de certains paramètres hydrodynamiques comme la conductivité hydraulique (Horn, 2015). Le compactage sur un sol modifie également sa conductivité thermique (Boukelia *et al.*, 2016). Le volume d'air étant plus réduit, il ne garantit plus sa fonction d'isolant thermique. Ainsi le sol est plus vulnérable aux variations saisonnières du climat. La réduction du volume d'air engendre également des perturbations biologiques puisqu'en conséquence, l'activité des macro et micro-organismes est réduite (Horn, 2015).

#### - L'apport de matériaux technogéniques

L'apport de matériaux issus de la construction ou encore, de chantiers environnants modifie également les propriétés biologiques, physiques et chimiques des sols. En effet, les propriétés chimiques des matériaux technogéniques sont très différentes de celles des sols dans lesquelles ils sont enfouis (Nehls *et al.*, 2012). En grande quantité, ces matériaux peuvent influencer des propriétés chimiques globales des sols. D'ailleurs, des caractéristiques communes des sols urbains peuvent être expliquées par la présence de ces matériaux technogéniques. Le pH plutôt basique des sols urbains est ainsi expliqué dans la littérature par la présence de matériaux carbonatés (Morel *et al.*, 2014).

#### - L'imperméabilisation

L'imperméabilisation des sols est l'une des premières causes de dégradation des sols. Il a par exemple été montré que la mise en place de surfaces imperméables entraîne une diminution de la teneur en carbone organique et de l'activité microbienne du sol (Wei *et al.*, 2013).

#### - L'apport de matières organiques

L'apport de matières organiques, par ajout de compost ou d'amendements organiques par exemple, améliore la stabilité structurale du sol (Dick et McCoy., 1993). En effet, l'ajout de matières organiques favorise l'agrégation des particules minérales en jouant le rôle de liant. La porosité du sol est alors

augmentée, sa structure renforcée améliorant ainsi les propriétés hydriques et la capacité de rétention d'eau du sol, ainsi que sa résistance à l'érosion (Duchaufour *et al.*, 2001). L'ajout de matières organiques dans le sol agit également sur quelques propriétés chimiques du sol. Les matières organiques peuvent en effet, influencer sa capacité d'échange cationique. Elles peuvent également solubiliser ou au contraire complexer les cations métalliques et participent ainsi au cycle biogéochimique des éléments potentiellement toxiques pour les plantes. Par ailleurs, leur dégradation libère les éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes.

L'analyse de la littérature témoigne ici de l'influence des usages et pratiques humaines sur les propriétés des sols. Or, plusieurs études ont identifié l'impact de certains usages et de pratiques associées comme déterminants d'une trajectoire historique du sol. En conséquence, une connaissance plus fine de ces trajectoires et des pratiques associées, devrait permettre de prédire certaines caractéristiques des sols urbains. Cela nécessite toutefois de connaître l'impact global des pratiques humaines sur les caractéristiques des sols urbains. La pédologie expérimentale est l'une des voies possibles pour étudier l'influence au cours du temps des pratiques humaines sur les propriétés physico-chimiques des sols.

## **2. Comment la pédologie expérimentale peut-elle contribuer à prédire l'évolution d'un sol ?**

Vouloir comprendre le fonctionnement et prédire l'évolution d'un sol n'est pas une problématique récente. Les sols naturels et leur pédogenèse ont fait l'objet de nombreuses études pour comprendre plus finement leur fonctionnement. Pour ce faire, des méthodes expérimentales en laboratoire ont été développées (Bockheim et Gennadiyev, 2009). La pédologie expérimentale est devenue un outil de compréhension du fonctionnement des sols naturels. Utiliser cette méthodologie en la transposant aux problématiques liées aux sols urbains pourrait alors s'avérer efficace pour mieux comprendre le lien entre les trajectoires historiques d'usages des sols (et les pratiques associées) avec les propriétés des sols urbains. Dans la suite de cette sous-partie, sont présentées les bases de l'approche de pédologie expérimentale et quelques éléments clés à retenir en vue d'une application à la caractérisation de l'impact du facteur humain sur les propriétés des sols urbains.

### **2.1. Bases de la pédologie expérimentale**

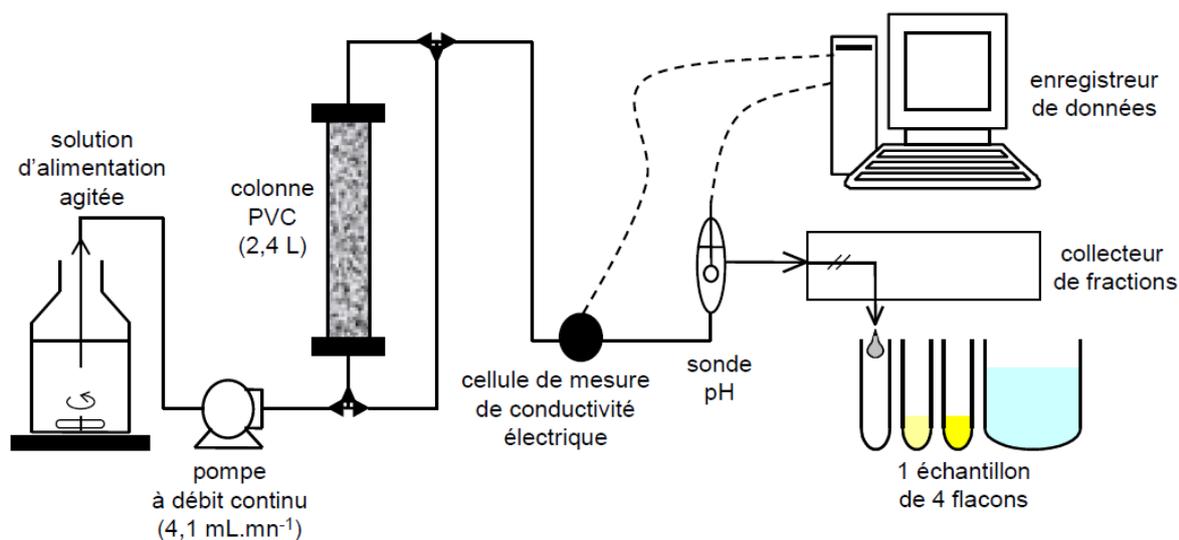
La pédologie expérimentale a été développée dès les années 1950 (Bockheim et Gennadiyev, 2009), pour mieux comprendre les principaux processus pédogénétiques actifs dans les sols naturels. Les temps de mise en œuvre de ces processus sont généralement très longs, leur suivi et leur étude sur le

terrain étant donc rendus très difficiles. La pédologie expérimentale a tout d'abord été utilisée pour simuler *in vitro* ces processus naturels en les accélérant en conditions contrôlées au laboratoire. Ces expériences ont été les prémisses des techniques de vieillissement des sols en laboratoire (Wright et Schnitzer, 1963). Des années 1960 à aujourd'hui, les expériences réalisées ont fourni des éléments de réponse pour comprendre les grands processus naturels. Par exemple, une étude a simulé dans une colonne le processus de podzolisation par lessivage de sol calcaire avec de l'EDTA (Wright et Schnitzer, 1963). Ces expériences ont donc permis de décrire les processus pédogénétiques naturels tels que la podzolisation (Ugolini *et al.*, 1977), la salinisation (Yun *et al.*, 2003), la calcification (Kuzyakov *et al.*, 2006), la cryoturbation (Corte, 1966), l'andolisation (Ugolini *et al.*, 1988) ou encore la ferrallitisation (Pickering, 1962). D'autres expériences se sont, quant à elles, concentrées sur des problématiques plus ciblées. Par exemple, une étude s'est focalisée sur l'altération géochimique des roches cristallines par des simulations expérimentales du cycle de l'eau (Pedro, 1964).

## **2.2. Méthodes de vieillissement des sols**

### *2.2.1. Processus de lixiviation*

Plusieurs méthodes expérimentales de vieillissement des sols sont citées dans la littérature. Le vieillissement par lixiviation fait partie de l'une de ces méthodes qui a été de nombreuses fois utilisée (Scholtus *et al.*, 2009 ; Udovic et Lestan, 2009 ; Wright et Schnitzer, 1963). Ces expériences consistent à placer le sol dans une colonne et d'y faire circuler une solution d'altération de nature connue (Figure 10). Pour mettre en place ces protocoles, le dispositif de chromatographie éluto-frontale est souvent utilisé (Scholtus *et al.*, 2009). Grâce à ce dispositif et au moyen d'une pompe, la solution d'altération est injectée en continu à débit constant pendant une période déterminée. Les lixiviats sont récoltés en sortie de colonne et peuvent être analysés tout au long de l'expérimentation (pH, conductivité, anions, cations majeurs et éléments en traces). Par cette méthode, le sol est vieilli de manière artificielle par lixiviation forcée, c'est-à-dire par extraction des matières solides solubilisées au fur et à mesure de la percolation de la solution d'altération. L'Éthylènediaminetétraacétique, appelé plus communément EDTA, est la solution d'altération la plus utilisée pour ce type d'expériences (Udovic et Lestan, 2009 ; Wright et Schnitzer, 1963). Grâce à cette méthode de vieillissement, un profil de sol podzolisé a été obtenu en laboratoire en plaçant un sol calcaire sous colonne et en le soumettant à 9h de lixiviation par jour pendant 17 mois. Cette même méthode a permis de mieux comprendre les premiers stades de la pédogenèse à partir de matériaux géologiques (Scholtus *et al.*, 2009).



**Figure 10 : Dispositif de chromatographie éluto-frontale (Scholtus *et al.*, 2009)**

### 2.2.2. Facteur climatique

Le forçage climatique est également un outil permettant le vieillissement accéléré des sols au cours d'une expérimentation. Il a pour objectif de simuler les événements climatiques récurrents au cours du temps, à une fréquence accélérée pour induire des effets sur les propriétés du sol. Pour ce faire, des cycles de gel/dégel, de dessiccation/humectation et des périodes à températures plus élevées sont appliqués au sol pour mimer les fluctuations de températures et d'humidité qu'ils subissent au cours du temps (Dagois, 2015 ; Lundquist *et al.*, 1999).

#### 2.2.2.1 Cycles gel/dégel

Le forçage climatique par cycles gel/dégel consiste à faire varier, de façon répétée, la température d'un échantillon de sol en dessous et au-dessus de 0 °C suivant des périodes variables. L'impact de ce facteur climatique a initialement été étudié sur des sols agricoles. Ainsi, des effets sur les processus physiques, chimiques et biologiques ont été mis en évidence.

Les cycles gel/dégel peuvent modifier la stabilité des agrégats (Oztas et Fayetorbay, 2003). En effet, il a été montré que la stabilité d'agrégats de différentes tailles (*i.e.* 0-1 mm, 1-2 mm, 2-4 mm) diminue après une modalité de cycles gel/dégel (figure 11). L'intensité de ces cycles et leur nombre de répétitions influent également sur la stabilité des agrégats (Oztas et Fayetorbay, 2003). Cette alternance gel/dégel joue aussi sur la conductivité hydraulique du sol. Il a été montré que ce paramètre diminue en dessous de 0°C (Burt et Williams, 1976). Cette diminution reste néanmoins fonction du type de sol, de sa teneur en eau, de la taille des particules et de la distribution des pores. En effet, il a

été observé une plus grande diminution de la conductivité des sols sableux que des sols limoneux ou argileux avec la baisse de la température.

Les cycles gel/dégel peuvent également influencer les concentrations en carbone organique, en ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) dissous dans la solution du sol (Yu *et al.*, 2011). Une augmentation de ces concentrations a été observée en parallèle d'une diminution de celle en phosphore total dissous. Cette modalité climatique influence également la disponibilité des polluants. De manière générale, ces cycles semblent entraîner une diminution de la fraction disponible et du taux de minéralisation des polluants organiques au cours du temps (Børresen *et al.*, 2007 ; Eriksson *et al.*, 2001 ; Zhao *et al.*, 2009). Cependant, les effets observés des cycles gel/dégel sur la disponibilité des polluants varient fortement selon les conditions expérimentales.

De plus, l'alternance de gel et dégel affecte les populations microbiennes du sol (Edwards et Cresser, 1992). Là encore, il existe une contradiction sur les effets probables induits. Quand certains auteurs notent une notable diminution de la population microbienne (Soulides et Allison, 1961), d'autres concluent au contraire à l'absence d'effet significatif des cycles gel/dégel sur la biomasse microbienne dans des conditions similaires (Koponen *et al.*, 2006).

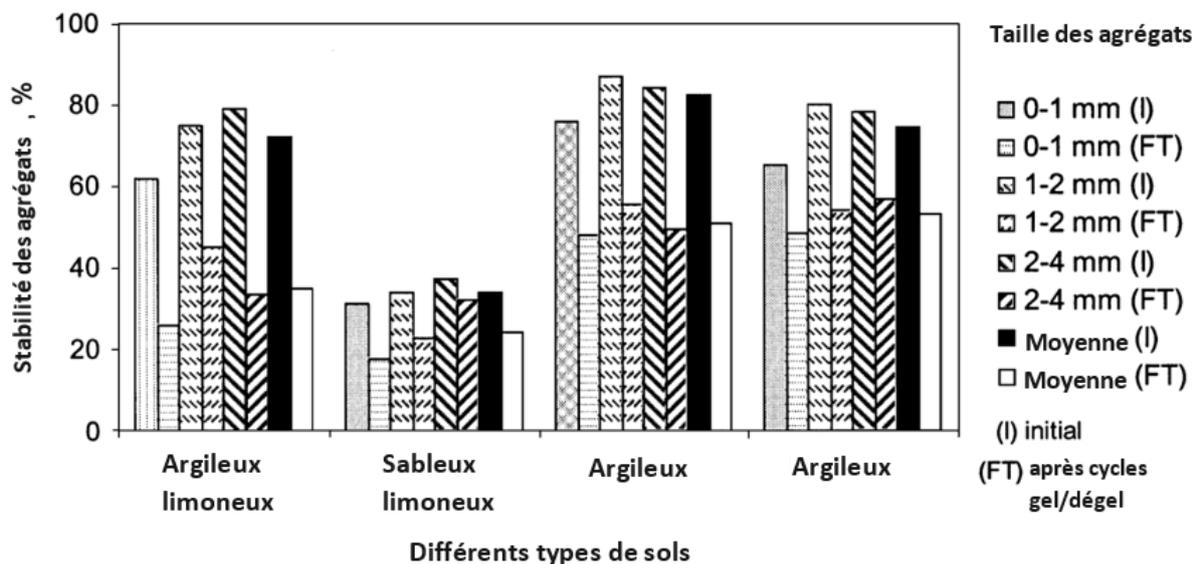


Figure 11 : Variation de la stabilité des agrégats selon différentes tailles d'agrégation après des cycles gel/dégel (Oztas & Fayetorbay, 2003)

#### 2.2.2.2 Cycles humectation/dessiccation

Les cycles humectation/dessiccation sont fondamentaux dans la simulation d'évènements climatiques. En effet, comme les cycles gel/dégel, ils influencent les propriétés biologiques, physiques et chimiques

du sol (Bodner *et al.*, 2013). Cette modalité se traduit en laboratoire par l'humectation d'un échantillon de sol jusqu'à une teneur en eau définie soit de manière arbitraire (Chow *et al.*, 2006), soit en fonction des capacités au champs des sols ou de leur point de flétrissement (White *et al.*, 1998).

L'alternance d'humectation et de dessiccation des sols impacte la structure et la stabilité des agrégats (Seguel et Horn, 2006, Tang *et al.*, 2011). En effet, les cycles humectation/dessiccation engendrent une diminution de la porosité grossière du sol. La résistance des agrégats à la pression d'eau interstitielle du sol, est également influencée par ces cycles. De même que la disponibilité des polluants métalliques (Li *et al.*, 2015). Les résultats indiquent que les régimes hydriques du sol peuvent être un facteur pour réduire la disponibilité des métaux dans le sol. Ces cycles affectent de plus négativement la croissance microbienne dans le sol séché à l'air (Iovieno et Bååth, 2008). Cependant, la réhumidification de ces sols a entraîné une augmentation linéaire de la croissance bactérienne avec le temps montrant une corrélation entre la teneur en eau du sol et sa croissance microbienne.

### 2.2.2.3 Températures élevées

Les périodes de hautes températures peuvent engendrer une accélération des processus de transformation biogéochimiques du sol (Biache *et al.*, 2011). Les hautes températures, c'est-à-dire des températures fixées au-delà de seuils définis arbitrairement (*e.g.* température ambiante), peuvent réduire la bio-accessibilité des métaux lourds. La bioaccessibilité de l'arsenic dans les sols diminue de manière significative au cours du vieillissement à hautes températures (*i.e.* 40°C) (Huang *et al.*, 2016). L'application de ces hautes températures influence également les processus de transformations abiotique des composés organiques comme l'oxydation (Biache *et al.*, 2011).

L'ensemble de ces modalités permettent donc de vieillir de manière accélérée les sols. Cependant, leur mise en œuvre est souvent arbitraire, ne reflétant pas la fréquence réelle de ces événements au cours du temps. Une méthodologie traduisant les données climatiques en données pédoclimatiques a alors été développée pour déterminer le nombre de cycles à imposer au sol pour refléter les conditions climatiques réelles (Dagois, 2015 ; Dagois *et al.*, 2017). Cette méthodologie a notamment permis d'étudier la disponibilité des polluants organiques présents dans les Technosols industriels.

## 2.3. Pédologie expérimentale appliquée aux sols anthropisés

Les expériences de vieillissement en conditions contrôlées au laboratoire ont été appliquées essentiellement sur des sols naturels. Il existe cependant quelques études de vieillissement s'intéressant aux sols anthropiques. Dès 1972, des recherches ont été menées sur les premiers processus d'évolution caractérisant un matériau anthropique en conditions contrôlées (Jocteur-Monrozier, 1972). Une étude plus récente s'est focalisée sur les propriétés des sous-produits papetiers,

produit d'épuration issu du recyclage du papier par mesures contrôlées en laboratoire. Des expérimentations conduites en colonne, ont mis en évidence le rôle de filtre des sous-produits papetiers face à la dynamique des métaux (Séré, 2007). En effet, au cours de cette expérience très peu de transfert de métaux vers d'autres compartiments (*i.e.* eau superficielle ou souterraine, plante) ont été observés. Pratiquer des expérimentations en colonne au laboratoire a donc permis, lors de cette étude, d'estimer le comportement de différents matériaux parents d'origine anthropique et les risques de transferts de métaux dans ces derniers. Par ailleurs, d'autres techniques de vieillissement des matériaux anthropiques ont également été développées. C'est ainsi que la capacité du biochar à adsorber les métaux lourds dans le temps a été mesurée (Xu *et al.*, 2018). Plus récemment, l'évolution des polluants organiques dans un Technosol industriel a été étudiée en lien avec les conditions climatiques (Dagois, 2015).

La pédologie expérimentale s'avère être un outil pertinent dans la compréhension du fonctionnement et de l'évolution des sols. Bien qu'utilisée principalement pour l'étude des sols naturels ou agricoles, cette approche permettrait aussi de mieux comprendre le facteur humain qui s'impose aux sols urbains en reproduisant des séquences de trajectoires historiques de manière accélérée afin de suivre les effets sur les propriétés des sols.

### **3. Conclusion : des approches à combiner pour intégrer le facteur humain de la pédogenèse urbaine**

Pour caractériser le facteur humain de la pédogenèse urbaine (Figure 6) des méthodes et outils d'analyse déjà existants peuvent être développés et adaptés au contexte urbain. En effet, il serait pertinent de réaliser une étude historique des trajectoires historiques d'usages représentatives des milieux urbains et des pratiques en utilisant les données d'occupations et d'usages disponibles à large échelle. Cette analyse apporterait alors de premiers éléments de connaissance pour décrire le facteur humain. Les études identifiant les impacts de certains usages et de certaines pratiques sur les propriétés du sol constituent également des ressources d'informations pour identifier le lien existant entre trajectoire historique d'un sol urbain et ses propriétés physico-chimiques. Cependant, à la vue de la littérature, seules quelques études ciblées abordant l'impact de certains usages et de certaines pratiques existent. Même si elles peuvent apporter des informations pertinentes, ces études ne permettent pas de déduire l'impact global d'une trajectoire historique sur les propriétés du sol.

L'une des difficultés pour déterminer l'impact global d'une trajectoire historique est liée au facteur temps. L'étendue temporelle des trajectoires historiques est disproportionnelle à la durée d'une carrière professionnelle scientifique. Sans référentiel d'étude caractérisant l'état initial du sol, il est

très difficile de suivre *in situ* l'évolution au cours du temps des impacts d'une trajectoire historique sur le sol. Une méthode d'échantillonnage sur site, basée sur les outils de caractérisation de l'historique d'un site et sur l'identification d'un référentiel représentant l'état du sol avant toute intervention humaine, pourrait donc être développée pour identifier l'impact de la trajectoire historique d'un sol. Par ailleurs, la pédologie expérimentale semble être un outil adapté pour combler certaines lacunes de connaissances sur l'effet de successions simples d'usages (ou de pratiques) sur les propriétés du sol. En effet, cette approche encore innovante a fait ses preuves pour analyser des processus pédogénétiques naturels se déroulant sur de longues périodes. Par le développement d'une nouvelle méthodologie, ce type d'approche pourrait être adapté pour mieux appréhender les impacts du facteur humain sur les propriétés des sols urbains, et donc pour aider une transposition de caractérisation de trajectoire historique en une information prédictive sur la qualité de ces sols.

## Questionnements scientifiques et approche proposée

L'hypothèse de ce travail de recherche est que le facteur humain est le déterminant principal des propriétés d'un sol en milieu urbain et donc de sa qualité. Dans ce cadre, la caractérisation du facteur humain ainsi que l'identification de l'impact des trajectoires historiques des sols urbains sur leurs propriétés bio-physico-chimiques constituent les verrous scientifiques à lever afin de développer une première approche de pédologie prédictive en milieu urbain. Les questions scientifiques liées à ce sujet de thèse sont donc les suivantes :

- **Est-il possible de caractériser et de décrire le facteur humain de la pédogenèse en milieu urbain par des éléments tangibles tels que des trajectoires historiques d'usages et de pratiques représentant ces zones urbaines ?**
- **De quelle manière et par quelle méthode identifier les liens existants entre la trajectoire historique d'un sol et ses propriétés physico-chimiques ?**
- **La pédologie expérimentale est-elle un outil adapté pour l'étude de la pédogenèse urbaine et la caractérisation de l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol au cours de sa trajectoire historique ?**
- **Selon l'ensemble des résultats observés, peut-on proposer une approche de caractérisation des sols urbains à large échelle basée sur leur historique d'usages ?**

Pour répondre à ces questions, une démarche scientifique a été développée (Figure 12). Cette démarche est constituée de trois approches complémentaires ainsi que d'une synthèse des principaux résultats obtenus pour proposer une méthodologie permettant de qualifier l'état actuel des sols en milieu urbain sur la base d'une connaissance de leur trajectoire historique d'usages. Les trois approches complémentaires constituent des approches cartographique et documentaire, *in situ* et *in vitro* :

- 1) Une approche cartographique et documentaire développant le concept de facteur humain en caractérisant les trajectoires historiques d'usages des sols urbains français et les pratiques associées.
- 2) Une approche terrain caractérisant l'impact de trois trajectoires historiques représentatives des sols urbains sur les propriétés physico-chimiques des sols.
- 3) Une approche de pédologie expérimentale permettant de comprendre plus finement les processus pédogénétiques impliqués au cours de ces trajectoires historiques et de décrire l'évolution des propriétés physico-chimiques au cours du temps.

Cette revue de la littérature a mis en lumière des manquements scientifiques à la caractérisation des sols urbains. Le **chapitre II** s'attache alors à mieux définir le facteur humain de la pédogenèse qui influence plus ou moins intensément l'état bio-physico-chimique de sols urbains. L'objectif de ce chapitre est de caractériser les trajectoires historiques majoritaires des sols urbains français ainsi que les pratiques humaines associées à ces trajectoires. La question scientifique traduisant cet objectif est la suivante : ***quelles sont les trajectoires historiques et les successions de pratiques représentatives des sols urbains français qui traduisent le facteur humain de la pédogenèse ?***

Déterminer ces trajectoires historiques constitue la première étape dans la démarche de caractérisation des sols urbains à large échelle par la connaissance de leur histoire. La seconde étape vise à évaluer les impacts des trajectoires historiques identifiés sur les propriétés bio-physico-chimiques. Bien que les modifications biologiques de l'état des sols soient l'un des déterminants des propriétés des sols, la démarche scientifique de ce travail de doctorat fait le choix de se focaliser uniquement sur l'impact physico-chimique des trajectoires historiques sur les sols urbains.

Le **chapitre III** de la thèse s'attache, par des mesures *in situ*, à caractériser l'impact physico-chimique sur les sols de trois trajectoires historiques représentatives des sols urbains français. Il s'agit en particulier de répondre à la question scientifique suivante : ***à partir de la connaissance de ces trajectoires historiques, comment, par des mesures in situ, évaluer l'impact de certaines trajectoires historiques sur les propriétés physico-chimiques des sols ?***

L'utilisation de la pédologie expérimentale va ensuite permettre de préciser les résultats obtenus dans le chapitre III. Par des expériences de vieillissement accéléré de sols combinées à des simulations de pratiques humaines, le **chapitre IV** vise à comprendre plus finement l'évolution des propriétés physico-chimiques au cours du temps, engendrée par des successions de pratiques traduisant les trajectoires historiques des sites d'études. Ce chapitre présente un double objectif, à la fois méthodologique et scientifique. Il répond à la question scientifique suivante : ***comment des expériences en conditions contrôlées au laboratoire peuvent, grâce à un vieillissement accéléré des sols et la simulation de successions de pratiques illustrant une trajectoire historique, apporter des précisions sur l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol au cours du temps ?***

Enfin, le **chapitre V** propose une valorisation des résultats obtenus dans les chapitres précédents dans une démarche de cartographie de l'état des sols urbains à l'échelle d'une unité urbaine. Une méthodologie prédictive de zonage des sols urbains par la connaissance de leur trajectoire historique est ainsi proposée. Ce même chapitre propose également une discussion générale sur la faisabilité de l'application de la méthodologie proposée à travers les visions scientifique et opérationnelle.

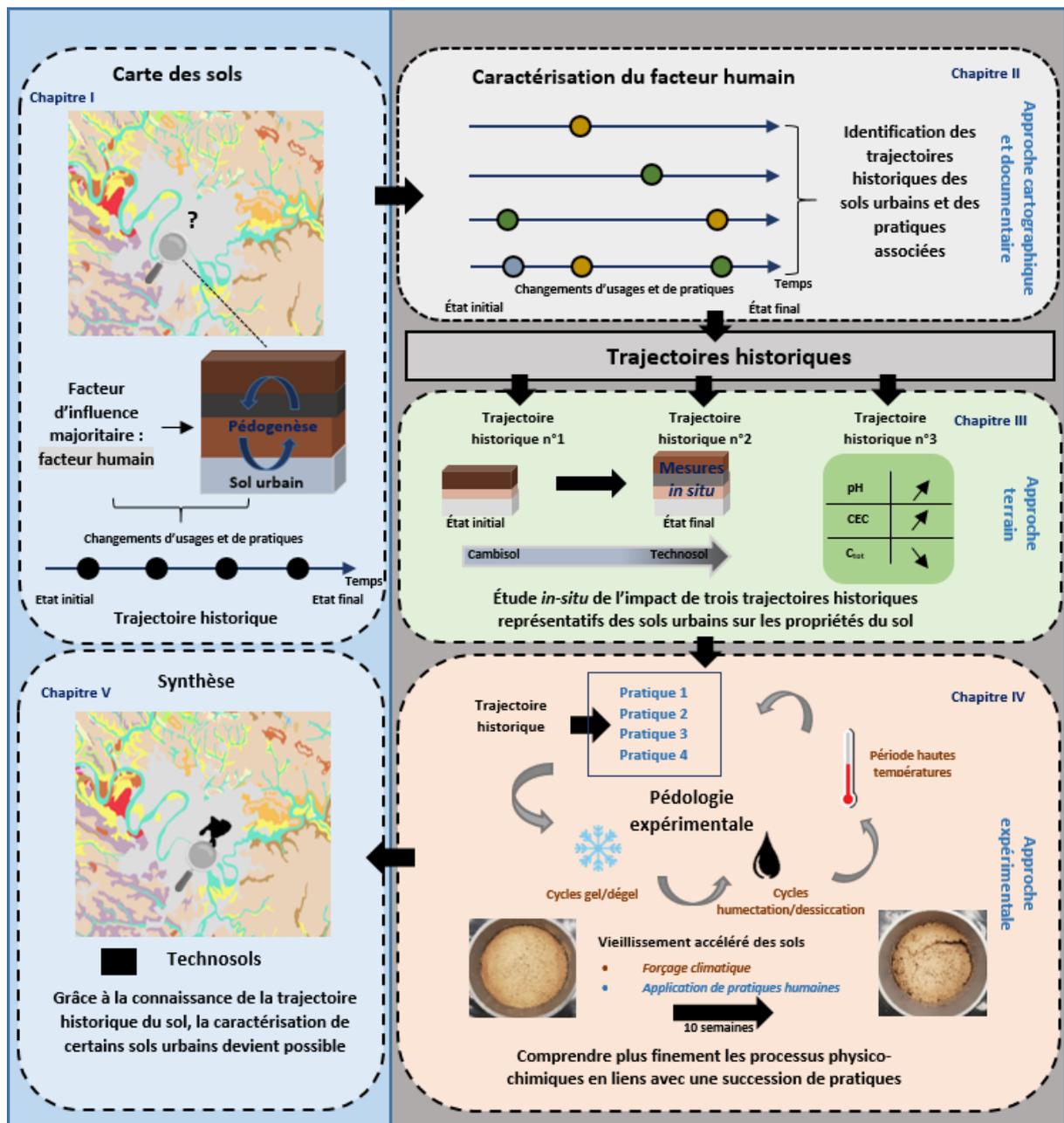


Figure 12 : Schéma conceptuel de la démarche scientifique adoptée dans ce manuscrit

## Chapitre II : Caractérisation du facteur humain de la pédogenèse des sols urbains par l'étude des trajectoires historiques

---

### 1. Principe général

Par des successions d'usages et de pratiques humaines définissant sa trajectoire historique, le sol urbain va subir des modifications plus ou moins fortes de ses propriétés physiques et chimiques. C'est ce qui crée les liens entre le facteur humain de la pédogenèse et les propriétés d'un sol. En contexte urbain, la compréhension de ces liens est primordiale car il est communément fait l'hypothèse que le facteur humain devient prépondérant dans la pédogenèse. Cependant, avant d'aborder l'étude de ces liens, il est incontournable de mieux définir et de mieux caractériser ce facteur humain. Dans l'état actuel des connaissances, la caractérisation du facteur humain reste difficile car cela nécessite une analyse historique des usages des sols et des pratiques. Les trajectoires historiques des sols urbains sont, pour l'heure méconnues, car très peu de connaissances sont acquises concernant la nature de ces trajectoires. Il est donc, aujourd'hui, difficile de définir ce facteur et de surcroît ses conséquences sur les propriétés du sol.

Ce chapitre vise à répondre à cet enjeu par une approche cartographique et documentaire (Figure 13). Son objectif principal est d'éclaircir la notion de facteur humain de la pédogenèse actuellement perçue comme un facteur d'influence intensif et cumulatif. Pour ce faire, deux étapes distinctes de caractérisation ont été mises en œuvre, (i) la caractérisation des trajectoires historiques représentatives des sols urbains français par l'intermédiaire de bases de données existantes d'usages des sols ainsi que par l'analyse historique de quelques sites urbains et (ii) l'identification des pratiques humaines liées aux trajectoires historiques majoritaires identifiées par l'étude de documents techniques et scientifiques.

*NB : Une partie des résultats de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication dans la revue Landscape and Urban Planning (Libessart et al., 2022).*

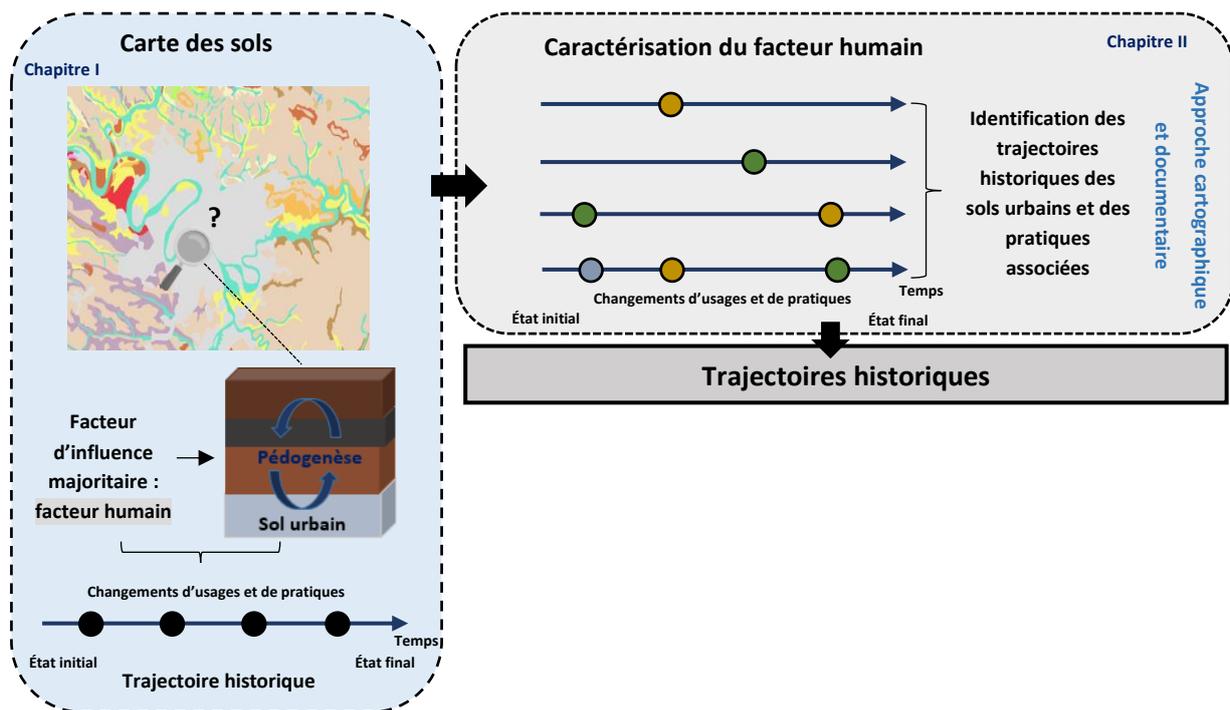


Figure 13 : Schéma conceptuel de la démarche scientifique employée pour fournir des éléments de réponses à la caractérisation des sols urbains : caractérisation des trajectoires historiques des sols urbains et des pratiques humaines associées

## 2. Matériels utilisés pour caractériser les trajectoires historiques des sols urbains et leurs pratiques associées

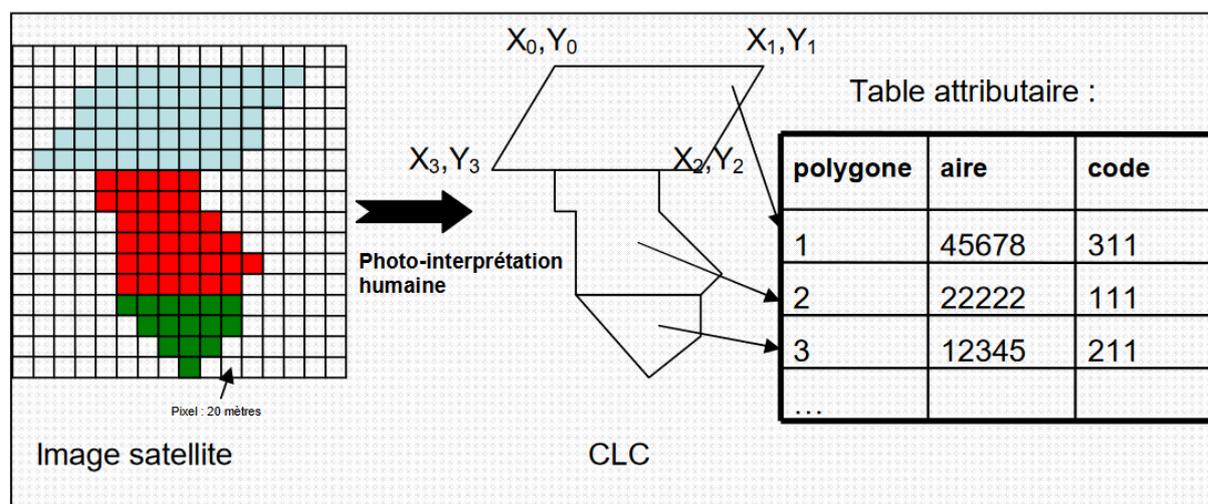
### 2.1. Base de données d'occupation et d'usage des sols Corine Land Cover

#### 2.1.1. Origine et objectifs

Le programme Corine Land Cover (CLC) est un programme européen, coordonné par l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE), qui fournit des informations sur l'occupation et l'usage des sols et ses changements à travers l'Europe. Ces données ont été créées dans l'objectif de soutenir la mise en place de programmes d'actions pour l'environnement à l'échelle de la communauté européenne, comme la protection des écosystèmes, la lutte contre la diminution de la diversité biologique ou encore le suivi des impacts du changement climatique. Initié en 1985 et mis à jour régulièrement, ce programme a permis de créer cinq bases de données d'occupation et d'usage des sols associées chacune à un jalon (1990, 2000, 2006, 2012 et 2018). Ces bases sont de plus associées sous Système d'Information Géographique (SIG) à des couches vectorielles, ce qui permet une visualisation concrète de l'utilisation des sols à l'échelle européenne.

### 2.1.2. Structure et résolution spatiale

Les bases de données CLC sont construites sur une méthodologie basée sur la photo-interprétation qui consiste à retranscrire une image satellite, constituée de pixels de 20 x 20 mètres de précision, en une cartographie vectorielle constituée de polygones caractérisés par une identité, une superficie et un code d'usage du sol leurs sont attribués (Figure 14).



**Figure 14 : Schéma de principe de la photo-interprétation (CGDD, février 2009)**

L'ensemble du territoire étudié est donc découpé en polygones appelés unités surfaciques. Elles sont définies comme une zone dont la couverture terrestre est considérée comme homogène. L'unité surfacique doit représenter une surface significative de terrain. Elle doit être facilement isolable des unités environnantes. La superficie de la plus petite unité surfacique détectée est de 25 hectares définissant ainsi la résolution spatiale de la base de données CLC et son échelle d'utilisation de 1/100 000 (European Environment Agency, 1995).

Le code d'usage du sol attribué à chaque unité surfacique est fonction d'une nomenclature commune permettant aux États européens de disposer d'un même outil de comparaison entre territoire et d'échanger à partir d'un même référentiel. Ainsi, la base de données a été construite selon une nomenclature en 3 niveaux. Elle comprend 5 postes au niveau 1, 15 au niveau 2 et 44 au niveau 3 (Tableau 2).

Tableau 2 : Nomenclature de la base de données CORINE Land Cover

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Surfaces artificialisées	Zone urbanisées	Tissu urbain continu
		Tissu urbain discontinu
	Zone industrielles, commerciales et réseaux de communication	Zones industrielles, commerciales ou publiques
		Réseaux routiers et ferroviaire et espaces associés
		Zones portuaires
	Mines, décharges et chantiers	Aéroports
		Carrières, sablières, mines
		Décharges
	Espaces verts artificialisés	Chantiers
		Espaces verts urbains
Surfaces agricoles	Terres arables	Équipements sportifs et de loisirs
		Terres arables hors périmètres d'irrigation
		Périmètres irrigués en permanence
	Cultures permanentes	Rizières
		Vignobles
		Vergers
	Prairies	Oliveraies
	Zones agricoles hétérogènes	Prairies
		Cultures annuelles associées à des cultures permanentes
		Systèmes culturaux et parcellaires complexes
Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants		
		Territoires agroforestiers
Forêt et milieux semi-naturels	Forêt	Forêts de feuillus
		Forêts de conifères
		Forêts mélangées
	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Pelouse et pâturages naturels
		Landes et broussailles
		Végétation sclérophylle
		Forêt et végétation en mutation
	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	Plages, dunes et sable
		Roches nues
		Végétation clairsemée
Zones incendiées		
		Glaciers et neiges éternelles
Zones humides	Zones humides intérieures	Marais intérieurs
		Tourbières
	Zones humide côtières	Marais maritimes
		Marais salants
		Zones intertidales
Surfaces en eau	Eaux continentales	Cours et voies d'eau
		Plan d'eau
	Eaux maritimes	Lagunes littorales
		Estuaires
		Mers et océans

2.1.3. Base de données CLC des changements d'usage au cours du temps

En plus de fournir des informations sur l'usage des sols à travers le découpage d'unités surfaciques pour les années 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018, le programme CLC est également à l'origine de quatre bases de données de changements d'usage entre ces jalons. Elles permettent d'identifier les unités surfaciques ayant changé d'usage entre deux jalons avec une résolution spatiale de 5 hectares, c'est-à-dire avec une précision plus fine que les bases de données CLC standards.

## **2.2. Base de données Mode d'Occupation des Sols de la région Île-de-France**

### *2.2.1. Origine et objectifs*

La base de données Mode d'Occupation des Sols (MOS) de la région Île-de-France fournit des données d'occupation et d'usage des sols du territoire francilien. Développée et créée par L'Institut Paris Region (IPR), centre d'appui scientifique et technique pour l'élaboration et l'évaluation des politiques publiques de la région Île-de-France, cette base de données a pour objectif initial d'accompagner l'évolution des territoires de la région francilienne dans la construction de nouvelles villes, la périurbanisation et les grands chantiers d'infrastructures. De 1982 à 2017, la base de données MOS regroupait les données d'occupation et d'usage des sols à travers 9 jalons (1982, 1987, 1990, 1994, 1999, 2003, 2008, 2012 et 2017). Ces données ont été complétées en 2019 par le MOS 1949. Ce MOS est issu de l'acquisition de photographies aériennes représentant l'ensemble du territoire francilien auprès de l'IGN. Ainsi, il est aujourd'hui possible, grâce à cette nouvelle version, d'obtenir des données d'occupation et d'usage des sols de la région Île-de-France sur une période de soixante-huit années. Cette base de données est associée sous SIG à une couche vectorielle.

### *2.2.2. Structure et résolution spatiale*

La base de données MOS est construite par photo-interprétation de photographies aériennes. L'unité minimale de collecte pour définir les unités surfaciques lors du travail de photo-interprétation est de 625 m<sup>2</sup> définissant ainsi sa résolution spatiale et son échelle d'utilisation de 1/5 000. Par cette méthode 785 202 unités surfaciques ont été identifiées ; chacune d'entre elles est décrite par un code INSEE, sa surface, son périmètre, et son usage du sol selon les 10 jalons précédemment mentionnés.

La nomenclature utilisée pour définir les données d'occupation et d'usage du MOS 1949, comprend 30 postes. Cette nomenclature correspond à une version adaptée de la nomenclature initiale structurée en 81 postes. En effet, le jalon 1949 ne pouvait pas être retranscrit selon la nomenclature de référence jugée trop précise par rapport à la qualité des photos aériennes réalisées en 1949. Ainsi, pour assurer une comparabilité entre tous les jalons existants, l'IPR a décidé de traduire la nomenclature de 81 postes en une nomenclature de 30 postes (Annexe 1).

## **2.3. Données complémentaires utilisées**

### *2.3.1. Photos aériennes mises à disposition par l'Institut national de l'information géographique et forestière*

Depuis 2016, l'IGN propose un outil pour observer l'évolution du territoire français intitulé « Remonter le temps ». Cet outil propose des cartes et photographies aériennes anciennes et actuelles sur tout le territoire français grâce auxquelles il est possible, à une échelle locale et grâce à un travail minutieux, de retracer l'historique de la couverture et d'usages des sols sur plusieurs siècles. Plus de trois millions de cartes et photographies aériennes sont disponibles comprenant :

- les cartes de Cassini (XVIIIe siècle)
- les cartes minutes originales d'état-major (1825-1866)
- la carte IGN à l'échelle 1 : 50000 (1950)
- les photographies aériennes IGN historiques prises depuis 1919.

### *2.3.2. Documentation technique sur les pratiques*

La documentation technique (*e.g.* cahier des charges, notice, guide technique, rapport de chantier, compte rendu) est une source d'informations essentielles sur les pratiques humaines appliquées au sol lors d'usages et de changements d'usage.

## **3. Méthodes de caractérisation des trajectoires historiques en milieu urbain et des pratiques associées**

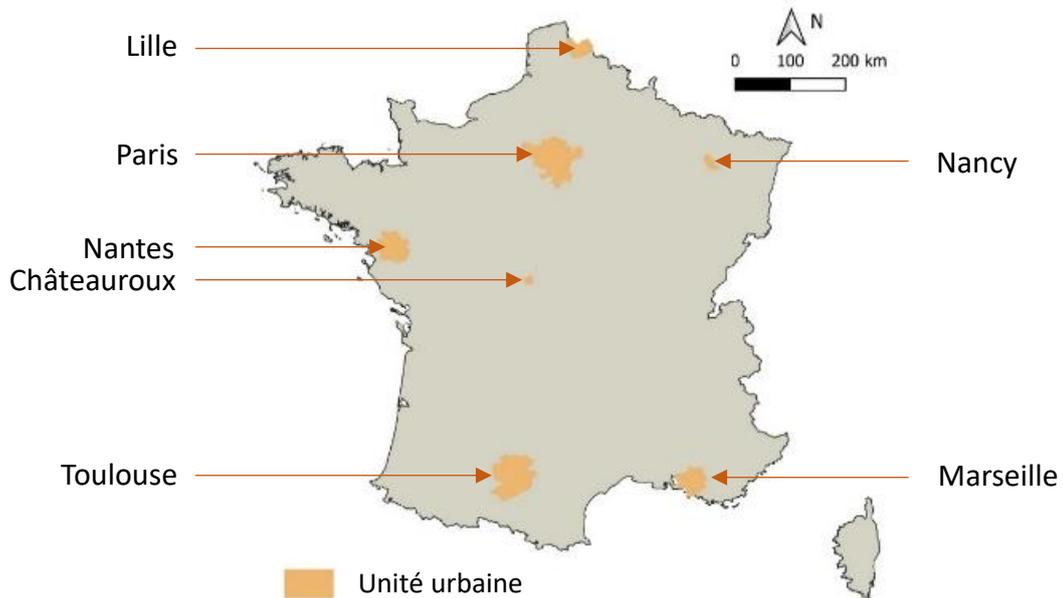
### **3.1. Identification des trajectoires historiques des sols urbains pour mieux cerner le facteur humain**

#### *3.1.1. Principe général*

La caractérisation des trajectoires historiques s'est réalisée en deux temps :

1. La première étape a consisté, grâce à la base de données CLC, en une analyse des successions d'usage des sols sur les 30 dernières années. Ce travail a été réalisé pour l'unité urbaine de sept villes françaises, choisies pour leur répartition sur l'ensemble du territoire, leur taille différente et leur contexte biophysique et socio-économique contrasté, de sorte à représenter la diversité des villes de la France métropolitaine : Châteauroux, Lille, Marseille, Nancy, Nantes, Paris et Toulouse (Figure 15).

2. La seconde étape s'est portée sur une analyse plus précise des successions d'usage des sols de l'unité urbaine de la ville de Paris grâce à la base de données MOS précisant les données d'usage des sols sur les 70 dernières années.



**Figure 15 : Localisation des 7 unités urbaines étudiées**

### *3.1.2. Définition de la nomenclature d'usages des sols à analyser*

Pour décrire les trajectoires historiques des sols urbains, il est nécessaire de transposer les deux nomenclatures d'usage des sols issues des deux bases de données utilisées (CLC et MOS) en une nomenclature commune. Le choix des différents usages composant cette nomenclature s'est reposé sur deux critères :

- La représentativité surfacique de ces usages en milieu urbain.
- La concordance et l'analogie possible de ces usages entre les deux bases de données. En effet, certains usages très spécifiques d'une base de données ne trouvent pas d'équivalent dans la seconde. Des regroupements d'usages ont donc dû être effectués.

Ainsi, neuf usages représentatifs des unités urbaines étudiées ont été sélectionnés pour constituer la nomenclature commune (Tableau 3).

**Tableau 3 : Transposition des deux nomenclatures existantes en une nomenclature commune de référence**

<b>Nomenclature CLC de niveau 3</b>	<b>Nomenclature MOS 1949</b>	<b>Nomenclature de référence</b>
Tissu urbain continu ; Tissu urbain discontinu	Habitat individuel, Habitat collectif ; Habitat rural ; Habitat autre	<b>Habitat</b>
Zones industrielles ou commerciales ; Zones portuaires ; Aéroports	Activités ; équipements ; installations aéroportuaires	<b>Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire</b>
Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés	Emprises routières ; Emprises de transport ferré ; Parcs et stationnement ; Gare routières dépôt	<b>Réseau routier et ferroviaire</b>
Équipements sportifs et de loisirs	Terrains de sport en plein air ; Parcs d'évolution d'équipement sportif ; Golfs ; Hippodromes ; Espaces ouverts à vocation de tourisme et loisirs	<b>Installation sportive et de loisirs</b>
Espaces verts urbains	Espaces verts urbains	<b>Espace vert urbain</b>
Extractions de matériaux ; Décharges ; Chantiers	Carrières, décharges et chantiers ; Autres espaces ouverts	<b>Chantier, carrière, décharge</b>
Marais intérieurs ; Tourbières ; Marais maritimes ; Marais salants ; Zones intertidales ; Cours et voies d'eau ; Plan d'eau ; Lagunes littorales ; Estuaires ; Mers et océans	Eau fermée (étangs, lacs...) ; Cours d'eau	<b>Zone humide, surface en eau</b>
Terres arables hors périmètres d'irrigation ; Périmètres irrigués en permanence ; Rizières ; Vignobles ; Vergers ; Oliveraies ; Prairies ; Systèmes culturaux et parcellaires complexes ; Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants ; Pelouse et pâturages naturels ; Landes et broussailles	Grandes cultures ; Vergers, pépinière ; Maraîchage, horticulture ; Cultures intensives sous serres	<b>Terre agricole</b>
Forêts de feuillus ; Forêts de conifères ; Forêts mélangées ; Territoires agroforestiers ; Végétation sclérophylle ; Forêt et végétation en mutation ; Zones incendiés ; Végétation clairsemée	Bois ou forêt ; Coupes ou clairières en forêt ; Peupleraies ; Milieux semi- naturels	<b>Forêt</b>

### 3.1.3. *Délimitation des unités urbaines*

Les différentes unités urbaines françaises sont définies et cartographiées par l'INSEE. Pour des questions d'accessibilité aux données cartographiques des couches vectorielles de ces unités, il a été décidé de construire pour chaque ville d'étude des référentiels spatiaux équivalents aux unités urbaines à l'aide d'un système d'information géographique -SIG- (logiciel Qgis, version 3.10.1-A Coruña). En utilisant les données CLC 2018 pour les villes de Châteauroux, Lille, Marseille, Nancy, Nantes et Toulouse et les données du MOS 2017 pour la ville de Paris, il a été possible de créer des référentiels spatiaux équivalents. Pour répondre à la définition d'une unité urbaine fixée par l'INSEE, un tampon de 200 mètres a été ajouté sur toutes les zones bâties identifiées (*i.e.* Habitat ; Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire ; Installation sportive et de loisirs). La création de ces tampons a permis d'écarter toutes les zones bâties éloignées de plus de 200 m de la zone bâtie continue principale partant du centre-ville. Le contour de cette zone bâtie continue a ensuite permis d'identifier l'ensemble des unités surfaciques des bases de données utilisées comprises dans ce périmètre et ainsi de définir un référentiel spatial équivalent à l'unité urbaine, pour chaque ville d'étude. À noter que le critère minimal du nombre d'habitants fixé par la définition n'a pas été pris en compte dans la construction de ces référentiels spatiaux.

### 3.1.4. *Méthode d'analyse des trajectoires historiques des 7 unités urbaines françaises*

#### 3.1.4.1 *Transformation des couches vectorielles CLC en couche raster*

Les trajectoires historiques des 7 unités urbaines ont été analysées grâce aux bases de données CLC identifiant les changements d'usage entre deux jalons (*i.e.* entre 1990 et 2000, entre 2000 et 2006, entre 2006 et 2012, entre 2012 et 2018). Le principal inconvénient lorsqu'on utilise ces bases pour une analyse des trajectoires historiques provient de l'indépendance stricte des couches vectorielles associées. En effet, deux unités surfaciques possédant les mêmes caractéristiques et provenant de deux bases de données CLC distinctes ne possèdent aucun attribut commun. L'étude de l'évolution historique des usages au cours du temps est donc rendue difficile. Pour pallier ce problème, les couches vectorielles CLC de chaque jalon ont été rastérisées à l'aide du logiciel Qgis.

#### 3.1.4.2 *Démarche de rastérisation*

L'étape de rastérisation consiste à convertir une couche vectorielle en une couche matricielle. La couche vectorielle d'origine est alors quadrillée et découpée en pixels. Dans le cadre de notre analyse, des pixels de 100 x 100 mètres ont été définis et géo-référencés pour chaque couche vectorielle utilisée. Ainsi, grâce à ce géo-référencement, il a été possible de suivre l'évolution d'usages de chaque pixel sur les 30 dernières années par l'intermédiaire des jalons (*i.e.* 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018) et

d'obtenir des informations sur la représentativité surfacique des différents changements d'usage définissant les trajectoires historiques des sols des 7 villes d'études.

#### *3.1.4.3 Analyse des changements d'usage*

Les données rastérisées ont été traitées grâce à l'outil d'analyse de données RStudio (RStudio Team, 2020). Par cet outil, l'ensemble des bases de données rastérisées issues des données vectorielles CLC ont pu être rassemblées dans une unique base où chaque ligne représente un pixel d'une superficie d'un hectare (*i.e.* 100 x 100m). Chacune de ces lignes renseigne la trajectoire historique des 30 dernières années de la surface considérée, grâce aux informations d'usages fournies pour les années 1990, 2000, 2006, 2012 et 2018. Un code R a été créé afin d'analyser (i) la répartition des surfaces ayant changé d'usage au sein des différentes unités urbaines étudiées au cours des 30 dernières années, (ii) la répartition des surfaces classées en fonction du nombre d'occurrence de changement d'usage et (iii) le type de changement d'usage majoritaire. Un travail cartographique a également été effectué grâce à Qgis, afin de visualiser au sein des 7 unités urbaines étudiées, les surfaces ayant changé d'usage au cours de ces 30 dernières années.

#### *3.1.5. Analyse des trajectoires historiques de l'unité urbaine de Paris*

##### *3.1.5.1 Principe général de l'analyse*

La méthode d'analyse des trajectoires historiques de l'unité urbaine de Paris, réalisée grâce à la base de données CLC a été complétée par la base de données MOS. Cette base de données est structurée pour permettre l'analyse des trajectoires historiques. Chaque unité surfacique, autrement dit chaque ligne de la base de données, est définie par son code INSEE de commune, sa surface, son périmètre et son usage pour les 10 jalons précédemment mentionnés. Ce sont les évolutions de ces usages qui traduisent la trajectoire historique de l'unité surfacique. Une fois les unités surfaciques représentant l'unité urbaine de Paris identifiées, il a été possible en utilisant l'outil RStudio de (i) comparer la distribution des trajectoires historiques avec ou sans changement d'usage du sol au cours 70 dernières années ; (ii) quantifier, parmi les trajectoires historiques avec changement d'usage, celles correspondant à des trajectoires constituées d'un ou plusieurs changements d'usage et (iii) d'identifier les principales trajectoires historiques et le type de changement d'usage majoritaire.

### 3.1.5.2 *Analyse quantitative de la distribution des trajectoires historiques*

L'analyse de la distribution des trajectoires historiques avec ou sans changement d'usage a été réalisée à l'aide de RStudio. Un code a été créé pour classer toutes les unités surfaciques en fonction de leur changement d'usage au cours de ces 70 années. Chaque ligne de la base de données MOS présentant des disparités d'usages pour les années 1949, 1982, 1987, 1990, 1994, 1999, 2003, 2008, 2012 et 2017 a été identifiée, analysée et le nombre de disparités a été compté.

Ainsi, toutes les unités surfaciques ont pu être classées en 5 groupes, selon le nombre de changement d'usage du sol relevé au cours des 70 dernières années :

1. Les unités n'ayant subi aucun changement d'usage du sol
2. les unités ayant subi un seul changement d'usage du sol,
3. les unités ayant subi deux changements d'usage,
4. les unités ayant subi trois changements d'usage,
5. les unités ayant subi quatre ou plus de changements d'usage.

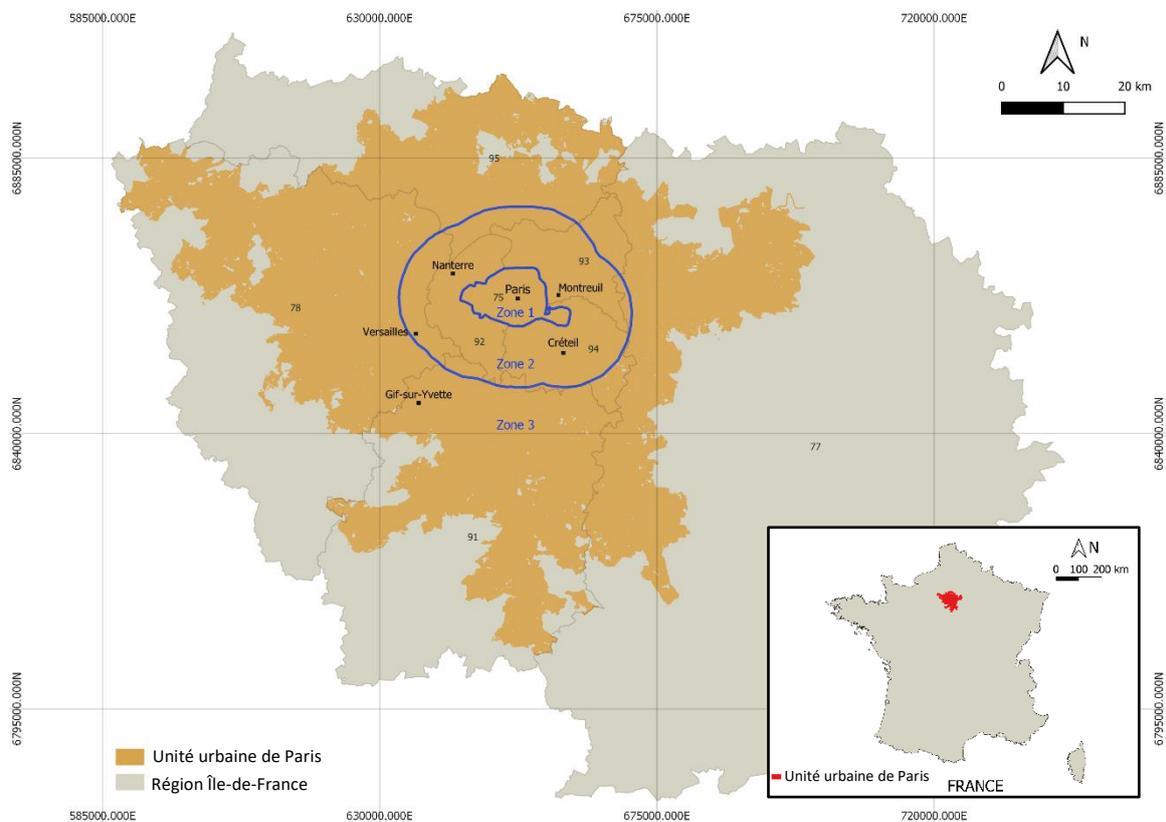
Un autre code R-Studio a été créé pour analyser séparément chaque ligne de la base de données MOS, afin d'isoler, dans une matrice, toutes les trajectoires historiques des sols différentes identifiées au cours des 70 dernières années dans la zone urbaine de Paris. Ce code a ainsi permis de préciser, pour chaque trajectoire historique identifiée, leur représentativité spatiale par rapport à la surface de l'unité urbaine de Paris, et le nombre d'unités surfaciques présentant cette trajectoire historique.

### 3.1.5.3 *Analyse spatiale des changements d'usage du sol*

Une analyse géographique utilisant l'outil SIG, Qgis, complète les analyses quantitatives à l'échelle de l'unité urbaine. Cette étude complémentaire a permis de cartographier la répartition spatiale des unités surfaciques selon trois critères : i) leur évolution au cours des 70 dernières années, ii) leur nombre de changements d'usage au cours du temps et iii) la nature de leur trajectoire historique.

Ces différentes analyses géographiques ont été effectuées au sein de 3 zones distinctes découpant l'unité urbaine de Paris. La première représente le cœur historique de la ville de Paris défini par ses contours administratifs (zone 1). La deuxième est une bande de 10 km de largeur tracée autour de la première zone (zone 2). Elle correspond globalement à ce que l'on désigne couramment par petite couronne. Cette zone a pour caractéristique d'avoir été largement urbanisée au cours du 20ème siècle. Enfin, la troisième zone comprend le reste des surfaces composant l'unité urbaine (zone 3), situées dans ce qu'on appelle la grande couronne de Paris. Elle comprend des zones plus rurales, bien que

certains centres urbains se soient développés à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle et au début du 21<sup>ème</sup> siècle (e.g. Évry, Marne-la-Vallée, Saint-Quentin-en-Yvelines) (Figure 16).



**Figure 16 : Localisation géographique des 3 zones d'étude de l'unité urbaine de Paris, France**

### 3.2. Analyse de la dynamique des sous-usages du MOS dans l'unité urbaine de Paris

Au sein d'un même usage, les sols peuvent être affectés par un changement de sous-usage. Ces changements donnent un niveau supplémentaire de précision des trajectoires historiques des sols urbains et de ce fait, du facteur humain. L'analyse des changements de sous-usages a été effectuée grâce à la base de données MOS sur les 70 dernières années pour quatre types d'usage : Habitat, Installation sportive et de loisirs, Réseau routier et ferroviaire, Terre agricole. Ces usages ont été décomposés en sous-usages selon la nomenclature MOS existante (Tableau 4). La dynamique des changements de sous-usage de ces quatre usages a ainsi pu être analysée au cours des 70 dernières années au sein de l'unité urbaine de Paris. Par l'intermédiaire de l'outil R Studio, les sols ayant subi des changements de sous-usage ont été identifiés et quantifiés pour l'unité urbaine mais également pour les trois zones d'étude. De plus, les changements de sous-usage majoritaires caractérisant les 4 usages étudiés ont été identifiés.

**Tableau 4 : Décomposition des usages étudiés en sous-usages selon la nomenclature MOS existante**

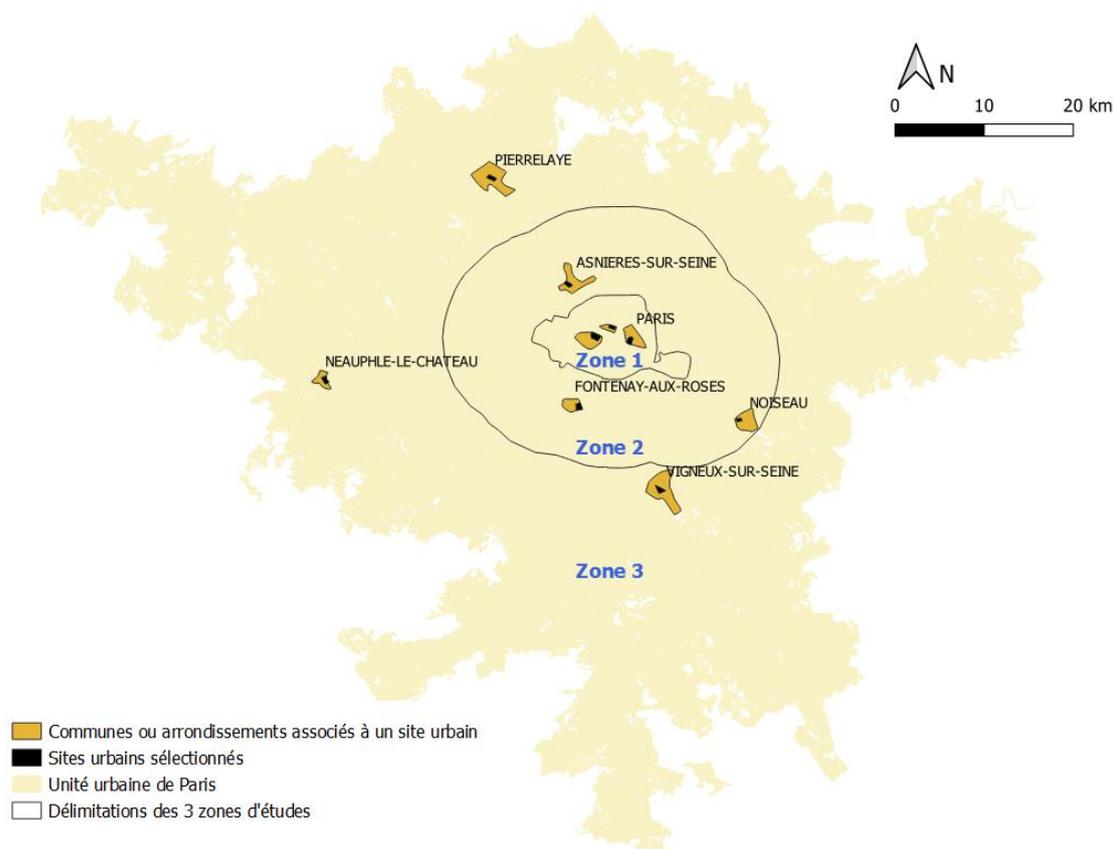
Usages	Sous-usages (MOS, 30 postes)	Descriptions du MOS
<b>Habitat</b>	Habitat individuel	Lotissements et constructions individuelles
	Habitat collectif	Habitat R+4 à R+12 et plus
	Habitat rural	Bâtiments espacés, de 1 à 2 niveaux, exceptionnellement 3
	Habitat autre	hôtel, prison, couvent, auberges de jeunes, maisons de retraites
<b>Installation sportive et de loisirs</b>	Terrain de sport en plein air	Terrains en plein air ( <i>e.g.</i> terrains de football, athlétisme, rugby)
	Parcs d'équipement sportif	Piste de rollers, piste de cross, stand de tir découvert
	Golf Hippodrome	
	Espace ouvert à vocation de tourisme et loisirs	Camping, parc animalier, parc d'attraction
<b>Réseau routier et ferroviaire</b>	Emprise de transport ferré	Voie ferrée, gare
	Emprise routière	Route
	Parcs de stationnement	Parking
	Gare routière, dépôt	
<b>Terre agricole</b>	Grande culture	Terre labourée, prairie
	Verger, pépinière	
	Maraîchage, horticulture	
	Culture intensive sous serre	

### **3.3. Analyse diachronique des photographies aériennes et cartes historiques sur l'unité urbaine de Paris**

Les photographies aériennes et les cartes historiques disponibles sur le site de l'IGN « Remonter le temps » ont permis une analyse complémentaire aux précédentes. En effet, grâce à une analyse diachronique de ces documents, les trajectoires historiques de sites urbains spécifiques ont pu être retracées sur une plus longue période que celle des 70 ans de la base de données MOS précédemment utilisée. Dans chacune des zones d'études découpant l'unité urbaine de Paris, trois sites urbains de quelques dizaines d'hectares ont été sélectionnés de manière aléatoire (Figure 17):

- Pour la zone 1, les trois sites étudiés sont situés dans trois arrondissements différents de la ville de Paris : 2<sup>ème</sup> (75002) ; 7<sup>ème</sup> (75007) et 11<sup>ème</sup> arrondissement (75011),
- Pour la zone 2, les trois sites étudiés sont situés dans les communes de Asnières-sur-Seine (92600), Fontenay-aux-Roses (92260) et Noisieux (94053),
- Pour la zone 3 les sites sont dans les communes de Neauphle-le-Château (78640), Pierrelaye (95220) et Vigneux-sur-Seine (91270).

Les trajectoires historiques de chacun de ces sites urbains a ensuite été analysé par l’observation des cartes historiques et des photographies aériennes disponibles. La période d’analyse varie de 150 à 280 ans selon les dates de campagnes de photos aériennes et l’existence des cartes historiques qui diffèrent selon les zones.



**Figure 17 : Localisation des différents sites urbains étudiés avec les photographies aériennes et les cartes historiques au sein de l'unité urbaine de Paris**

### 3.4. Identification des pratiques liées aux usages

Les pratiques associées aux différents usages des sols urbains repérés ont été identifiés par lecture de documents techniques et scientifiques. Ces documents ont été identifiés et recueillis via une recherche sur internet.

Des entretiens ont également permis de compléter les pratiques de certains usages moins documentés, comme les pratiques liées aux espaces verts urbains. Deux personnes qualifiées sur ces questions ont été interviewées :

- Un responsable de service espaces verts de la Métropole du Grand Nancy

- Un responsable des cultures du Potager du Roi de Versailles

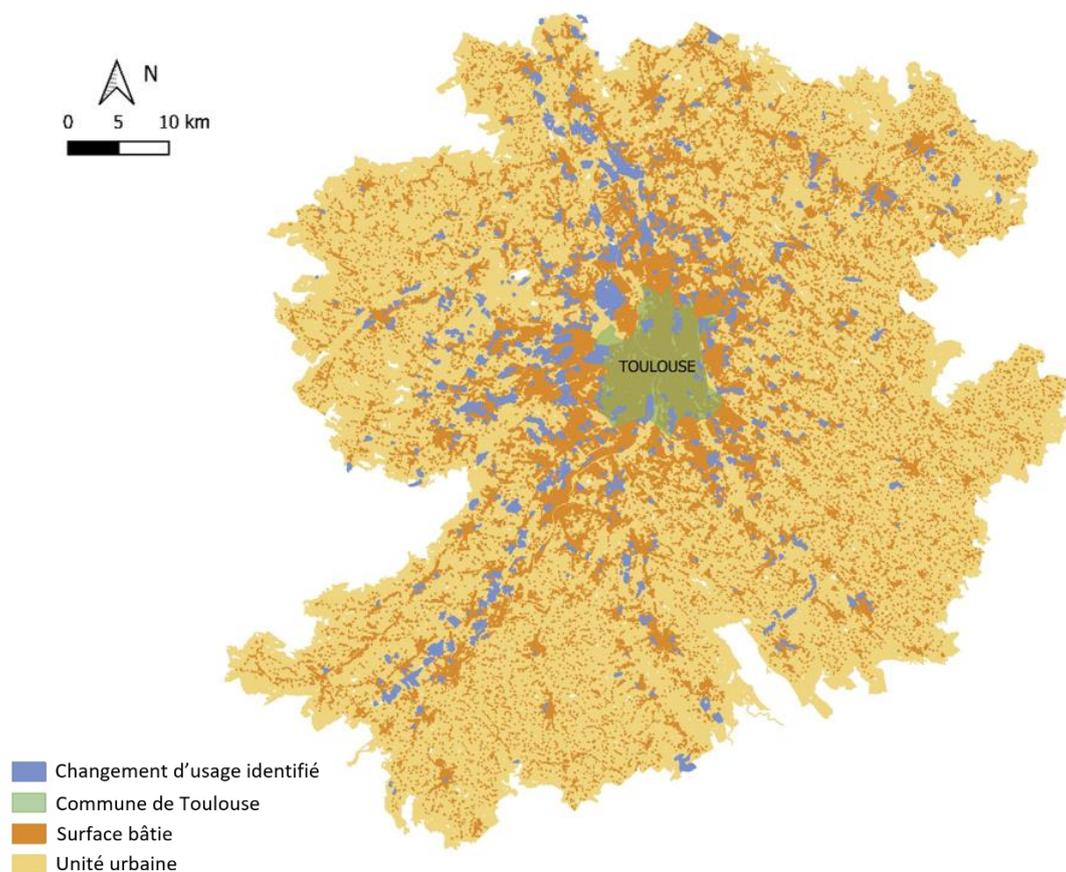
Ainsi, une liste de pratiques illustrant majoritairement chaque usage étudié a été éditée.

## **4. Résultats**

### **4.1. Trajectoires historiques des 7 villes d'études des 30 dernières années**

#### *4.1.1. Localisation des changements d'usage au sein des unités urbaines*

La localisation des surfaces ayant changé d'usage au cours des 30 dernières années est similaire au sein des 7 unités urbaines étudiées. En effet, les changements d'usage n'affectent que très peu le cœur des villes étudiées (Figure 18 et annexe 2). Ces derniers sont principalement localisés en banlieues des villes. La lecture des cartes des 7 unités urbaines étudiées montre que ces changements d'usage sont d'ailleurs principalement localisés à proximité des zones bâties, qui elles-mêmes se développent autour d'axes structurants comme les cours d'eau ou encore les grands axes routiers. Par exemple, le travail d'identification des changements d'usage de la ville de Toulouse (Figure 18) montre une localisation de ces changements à proximité des zones bâties représentées en orange, qui elles-mêmes se développent autour des axes routiers et autoroutiers comme l'A64 en direction du sud-ouest, l'A61 en direction du sud-est ou encore l'A62 en direction du nord-ouest.



**Figure 18 : Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Toulouse au cours des 30 dernières années**

#### 4.1.2. Dynamique des changements d'usage au sein des unités urbaines

Au cours des 30 dernières années, les surfaces ayant changé d'usage, identifiées grâce aux bases de données CLC, ne représentent qu'un faible pourcentage des superficies des unités urbaines étudiées. Moins de 5 % de leur superficie est affectée par des changements d'usage. Durant ces 30 dernières années la majorité des surfaces des unités urbaines ont donc conservé le même usage (Tableau 5).

**Tableau 5 : Proportions des surfaces ayant changé d'usage au cours des 30 dernières années dans chaque unité urbaine étudiée**

		Nancy	Paris	Nantes	Lille	Toulouse	Châteauroux	Marseille
Pourcentage de surfaces de l'unité urbaine (%)	Sans changement d'usage	96	96	98	96	97	95	97
	Avec changement d'usage	4	4	2	4	3	5	3

Les surfaces ayant changé d'usage au sein des unités urbaines ont subi majoritairement (> 80 %) un seul changement au cours de la période étudiée (Tableau 6). Les surfaces ayant changé plus d'une fois d'usage sont essentiellement représentées par celles ayant changé 2 fois d'usages puisque très peu de sols ont subi 3 ou 4 changements d'usage au sein des unités urbaines.

**Tableau 6 : Proportions des surfaces des 7 unités urbaines ayant changé d'usage en fonction de leur occurrence de changement d'usage**

		Nancy	Paris	Nantes	Lille	Toulouse	Châteauroux	Marseille
Pourcentage de surfaces de l'unité urbaine ayant changé d'usage (%)	1 changement d'usage	81	85	93	91	89	96	85
	2 changements d'usage	16	14	7	9	11	3	15
	3 ou 4 changements d'usage	3	1	0	0	0	1	0

#### 4.1.3. Types de changement d'usage

Les types de changement d'usage identifiés sont également similaires pour les 7 unités urbaines et reflètent, pour la majorité, le processus d'urbanisation. En effet, de grandes surfaces de sols agricoles sont consommées au profit d'usages tels que l'« habitat » ou encore l'usage « industriel, commercial, public ou militaire ». Ainsi au sein de l'unité urbaine de Châteauroux, 60 % des surfaces ayant changé d'usage traduisent une urbanisation du territoire. Les changements d'usage traduisant une renaturation des sols, c'est-à-dire un retour à un usage forestier ou agricole à partir d'un usage « habitat » ou « industriel, commercial, public ou militaire », sont quant à eux très peu représentés dans la majorité des unités urbaines (*i.e.* en moyenne moins de 3 % des changements d'usage).

## 4.2. Trajectoires historiques des sols de l'unité urbaine de Paris

### 4.2.1. Dynamique des changements d'usages au sein de l'unité urbaine de Paris

#### 4.2.1.1 Dynamique générale d'évolution des usages des sols de l'unité urbaine de Paris

Entre 1949 et 2017, la morphologie de l'unité urbaine de Paris a considérablement évolué (Figure 19). En 1949, les principaux usages du sol étaient agricoles, forestiers et résidentiels avec respectivement

56,9 %, 22,7 % et 9,1 % de la surface totale. En 2017, ces usages sont restés prédominants (Tableau 7) mais dans des proportions différentes (*i.e.* 31,0 % ; 21,6 % ; 20,5 %).

De 1949 à 2017, parmi tous les usages étudiés, seules les surfaces agricoles et les surfaces forestières ont été réduites, respectivement de 45,6 % et 5,1 %. À l'inverse, les superficies représentant tous les autres usages n'ont cessé d'augmenter au fil du temps. À l'exception des surfaces représentant l'usage « Chantier, carrière, décharge » et l'usage « Espace vert urbain » qui ont, quant à elles, toutes deux fluctuées. Les zones d'installations sportives et de loisirs ont connu le plus fort taux d'augmentation de surface (*i.e.* 467,9 %), alors que les surfaces représentant les usages « Réseau routier ou ferroviaire », « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire » et « Habitat » ont connu une croissance relative trois fois plus faible (*i.e.* respectivement 170,8 ; 159,3 et 124,5 %). Les zones résidentielles représentent la plus forte augmentation de surface avec plus de 50 000 hectares ajoutés entre 1949 et 2017. Il est clair que l'ensemble de ces observations traduisent ce qui est communément couvert par les concepts d'urbanisation et de consommation des terres agricoles.

#### *4.2.1.2 Dynamique générale d'évolution plus intense avant 1982*

La distribution des surfaces associées aux usages étudiés montre des dynamiques d'évolution différentes dans le temps. En effet, sur le même intervalle de temps (*i.e.* environ 35 ans), le taux de décroissance annuel est plus important pour les surfaces agricoles entre 1949 et 1982 (0,98 %/an), qu'entre 1982 et 2017 (0,55 %/an). De la même façon, les surfaces associées aux zones résidentielles ont clairement augmenté entre 1949 et 1982 (2,48 %/an), tandis que la période 1982-2017 est marquée par une augmentation plus faible (0,62 %/an).

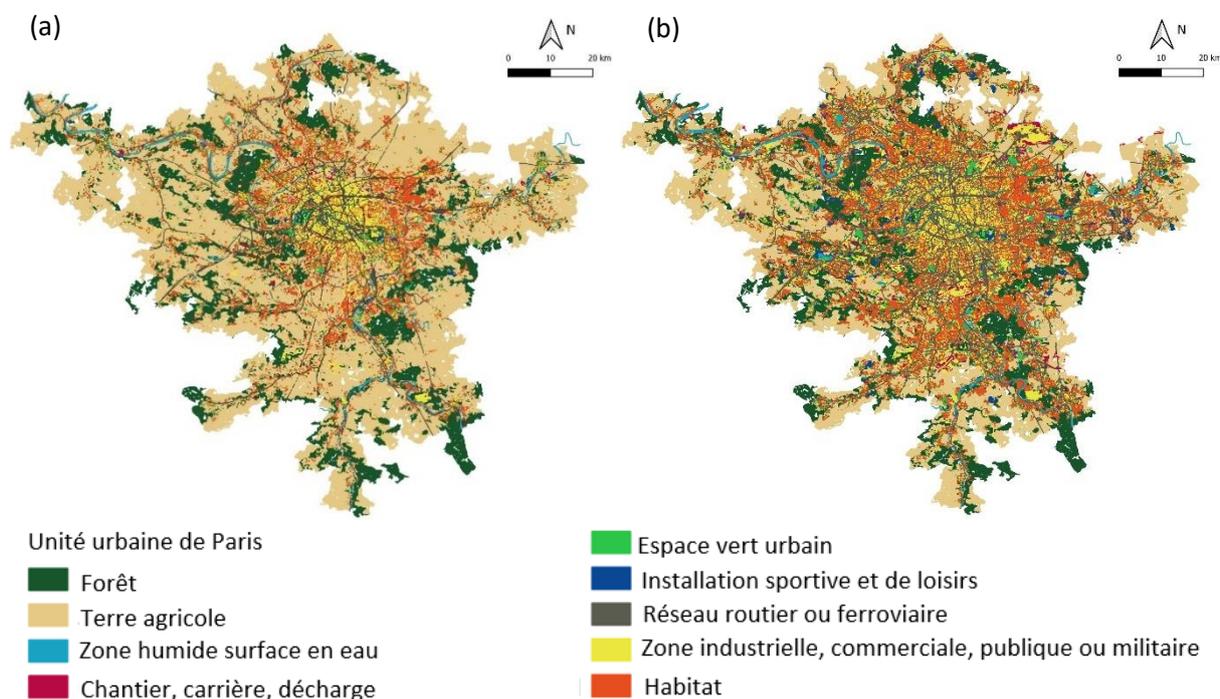


Figure 19 : Cartes d'usages des sols de l'unité urbaine de Paris en 1949 (a) et 2017 (b)

Tableau 7 : Répartition des surfaces de l'unité urbaine de Paris en fonctions des usages

Usages des sols (%)	1949	1982	1987	1990	1994	1999	2003	2008	2012	2017
Forêt	22,7	22,4	22,2	22,0	21,8	21,2	21,3	21,7	21,7	21,6
Terre agricole	56,9	38,4	37,2	36,0	34,8	33,7	32,9	31,6	31,3	31,0
Zone humide, surface en eau	1,4	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Espace vert urbain	2,8	5,9	6,1	6,1	6,3	6,3	6,3	6,3	6,2	6,2
Chantier, carrière, décharge	1,4	3,0	2,6	3,1	2,9	3,2	3,0	3,1	3,1	3,2
Installation sportive et de loisirs	0,3	1,3	1,4	1,7	1,9	1,9	1,9	2,0	1,9	1,9
Réseau routier ou ferroviaire	1,8	3,8	4,0	4,1	4,3	4,5	4,7	4,8	4,8	4,9
Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire	3,5	6,8	7,2	7,4	7,8	8,2	8,5	8,7	8,9	9,0
Habitat	9,2	16,6	17,5	17,9	18,4	19,2	19,5	20,0	20,3	20,5

#### 4.2.1.3 Répartition des surfaces ayant changé d'usage au sein de l'unité urbaine de Paris

Sur l'ensemble du référentiel de l'unité urbaine de Paris, 104 397 unités surfaciques n'ont pas changé d'usage au cours des 70 dernières années, ce qui représente 63,7 % de la surface totale (282 107 ha). En comparaison, 325 078 unités surfaciques ayant subi au moins un changement d'usage (36,3 % de la

surface, 161 059 ha) ont été dénombrés. La superficie moyenne des unités surfaciques sans changement d'usage est de 2,70 ha contre 0,50 ha pour celles ayant subi au moins un changement. La zone 1 a été la moins concernée par les changements d'usage au cours des 70 dernières années avec seulement 23,9 % de sa superficie totale soumise à au moins un changement (soit 4929 / 9964 unités surfaciques) (Figure 20). 76,1 % de sa superficie totale a donc été épargnée par ces changements durant les 70 dernières années. Ces surfaces, décrivant une trajectoire historique composée d'un seul usage, sont majoritairement représentées par les usages « Habitat », « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire » et « Réseau routier ou ferroviaire » (représentant respectivement 32, 15 et 8 % de la superficie de la zone 1). Les zones périphériques (2 et 3) ont, quant à elles, été soumises à plus de changements d'usage avec respectivement 50,1 % et 33,8 % de leur surface totale ayant changé d'usage (c'est-à-dire Zone 2 : 95 693 / 125 259 unités surfaciques et Zone 3 : 225 848 / 296 386 unités surfaciques). Par conséquent, la zone 2 a été la plus touchée par les changements d'usage des sols entre 1949 et 2017. Dans ces zones, les surfaces n'ayant pas changé d'usage au cours du temps sont majoritairement représentées par les usages « Habitat » et « Forêt » pour la zone 2 (représentant respectivement 24 et 8 % de sa superficie) et les usages « Terre agricole », « Forêt » et « Habitat » pour la zone 3 (représentant respectivement 37, 21 et 4 % de sa superficie).

La densité spatiale moyenne des unités surfaciques affectées par un changement d'usage au cours des 70 années a été étudiée afin de décrire la distribution spatiale de ces unités pour chacune des zones. La densité moyenne, correspondant au nombre d'entités par unité de surface, diffère selon la zone étudiée. En moyenne, 47, 125 et 62 unités surfaciques affectées par au moins un changement d'usage ont été dénombrées pour 100 hectares, respectivement pour les zones 1, 2 et 3. Les unités surfaciques de la zone 1 sont donc plus dispersées que celles des autres zones puisque l'ensemble de ces unités ont une surface moyenne similaire pour chaque zone. Dans la zone 2, les unités surfaciques sont réparties de manière plus dense (Figure 19). Enfin, dans la zone 3, les unités surfaciques sont réparties de manière plus hétérogène, laissant de grandes zones sans changement d'usage. En effet, les unités surfaciques de la zone 3 ayant changé d'usage, sont plus concentrées autour des axes majeurs de circulation et des cours d'eau. De plus, les grands projets de développement urbain, tels que la construction de l'aéroport international Charles de Gaulle, expliquent également cette hétérogénéité.

#### 4.2.1.4 Occurrence des changements d'usage au cours du temps

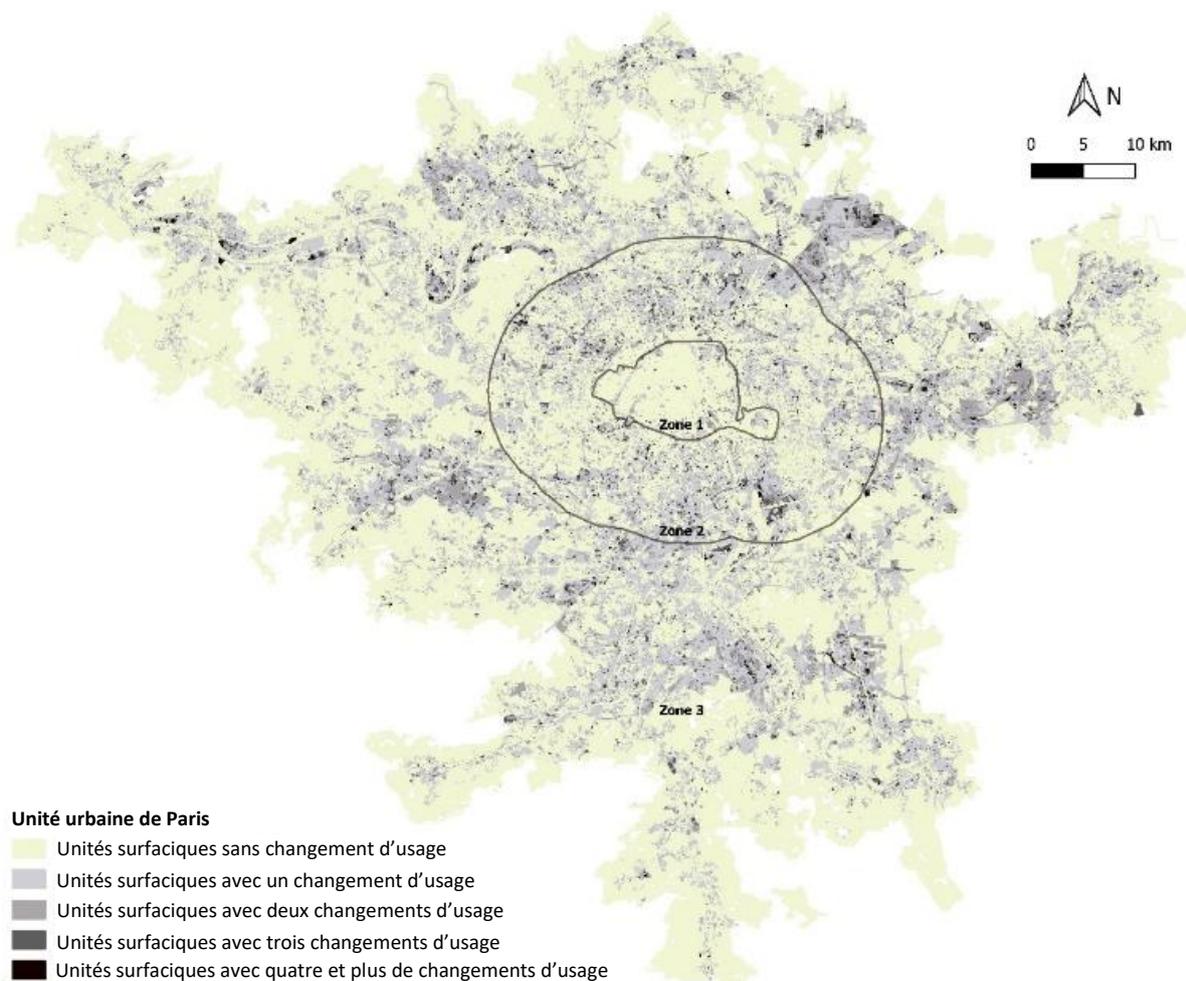
Les unités surfaciques ayant changé d'usage au cours des 70 dernières années ont été analysées afin de connaître leur occurrence de changement d'usage (Figure 20). À l'échelle de l'unité urbaine, 190 907 unités surfaciques ont changé une seule fois d'usage au cours des 7 dernières décennies, ce qui représente 70,4 % de la totalité des surfaces ayant changé d'usage. En comparaison, 97 064 unités

surfaciques ayant subi deux changements d'usage au cours des 70 dernières années ont été dénombrées, (représentant 23,0 % des surfaces affectées par des changements d'utilisation des sols). Enfin, 30 688 et 6 419 unités surfaciques ont respectivement subi trois et quatre ou plus changements d'usage (soit respectivement 5,5 et 1,1 % des zones affectées par les changements d'affectation des sol).

Le tableau 8 et la figure 20 résument les occurrences de changement d'usage obtenues à partir des analyses quantitatives et spatiales. Aucune différence n'est observée entre les trois zones d'étude. La grande majorité des unités surfaciques qui ont changé d'usage au fil du temps ont une trajectoire historique composée d'un seul changement d'usage. Les trajectoires historiques composées de deux changements représentent environ 20 % de la totalité des surfaces ayant changées d'usage. Enfin, les trajectoires historiques comportant trois changements d'affectation des sols ou plus représentent une minorité au sein des zones étudiées (entre 4 et 8 %).

**Tableau 8 : Occurrence des changements d'usages au sein des 3 zones d'étude**

<b>Zone géographique</b>	<b>Nombre de changements d'usage</b>	<b>Nombre d'unités surfaciques</b>	<b>Pourcentage de surface de sol ayant changé d'usage (%)</b>
<b>Zone 1</b>	Un	2862	64,3
	Deux	1583	25,9
	Trois	412	4,0
	Quatre et plus	72	0,7
<b>Zone 2</b>	Un	56520	71,8
	Deux	26390	20,6
	Trois	10587	6,4
	Quatre et plus	2196	1,2
<b>Zone 3</b>	Un	132433	69,9
	Deux	69197	23,7
	Trois	19819	5,3
	Quatre et plus	4166	1,1



**Figure 20 : Occurrence de changements d'usage sur le territoire de l'unité urbaine de Paris au cours des 70 dernières années**

#### 4.2.2. Types de changement d'usage identifiés

Les résultats suivants concernent uniquement les unités surfaciques ayant connu au moins un changement d'usage au cours des 70 dernières années. Dans l'objectif de les caractériser, une répartition par zone des types de trajectoire historique a été effectuée en fonction de leur usage initial en 1949 et leur état final en 2017 (Tableau 9).

Ces résultats montrent que le type de changement d'usage des sols dépend de la zone considérée. Dans la zone 1, la plupart des changements d'usage sont caractérisés par la conversion d'une surface bâtie en une autre (représentées par les usages « Installation sportive et de loisirs » ; « Réseau routier ou ferroviaire » ; « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire » et « Habitat »). 44,7 % de ces zones qui ont changé d'affectation des sols étaient initialement sous l'usage « industriel, commercial, public et militaire » et 21,9 % de ces zones ont été converties en usage « habitat ». La transformation de 8,7 % de ces zones en usage « espace vert urbain » est également à noter. Par ailleurs, peu de zones non construites (« forêt » et « terre agricole ») ont été transformées au sein de

cette zone (Tableau 9). Ayant besoin d'espace pour se développer, la ville n'a pas eu d'autre solution que de se reconstruire sur elle-même dans cette zone.

Dans la zone 2, 61,5 % des surfaces qui ont changé d'usage étaient initialement des terres agricoles. Une grande partie de ces surfaces a été transformée en « habitat » et en « industrie, commerce, établissement public ou militaire » avec respectivement 21,7 % et 15,1 % (Tableau 9). Comme dans la zone 1, certaines zones déjà bâties ont été converties en d'autres zones bâties. Environ 10 % des surfaces étudiées sont ainsi concernées par ce processus. Ces données illustrent que la zone 2 est touchée à la fois par le phénomène d'étalement urbain au détriment de grandes surfaces agricoles, mais également le phénomène de renouvellement et de densification urbaine.

Dans la zone 3, la consommation de forêts et de terres agricoles au profit de surfaces bâties est plus importante que celle observée en zone 2. Au cours des 7 dernières décennies, les unités surfaciques de la zone 3 ayant changé d'usage étaient principalement des terres agricoles. Elles ont été majoritairement transformées pour évoluer vers un usage « habitat » ou un usage « industriel, commercial, public ou militaire ». Néanmoins, un pourcentage conséquent (soit 10,1 %) de ces terres initialement agricoles de la zone 3 a aussi été transformé en espace forestier traduisant une tendance à la reforestation des sols en périphérie de l'unité urbaine de Paris.

**Tableau 9 : Pourcentage de surfaces représentées par les trajectoires historiques en fonction de leur usage initial et final : a) zone 1 ; b) zone 2 ; c) zone 3. (F : « Forêt » ; A : « Terre agricole » ; ZH : « Zone humide, surface en eau » ; EV : « Espace vert urbain » ; C : « Chantier, carrière, décharge » ; SL : « Installation sportive et de loisirs » ; T : « Réseau routier ou ferroviaire » ; I : « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire » ; H : « Habitat »)**

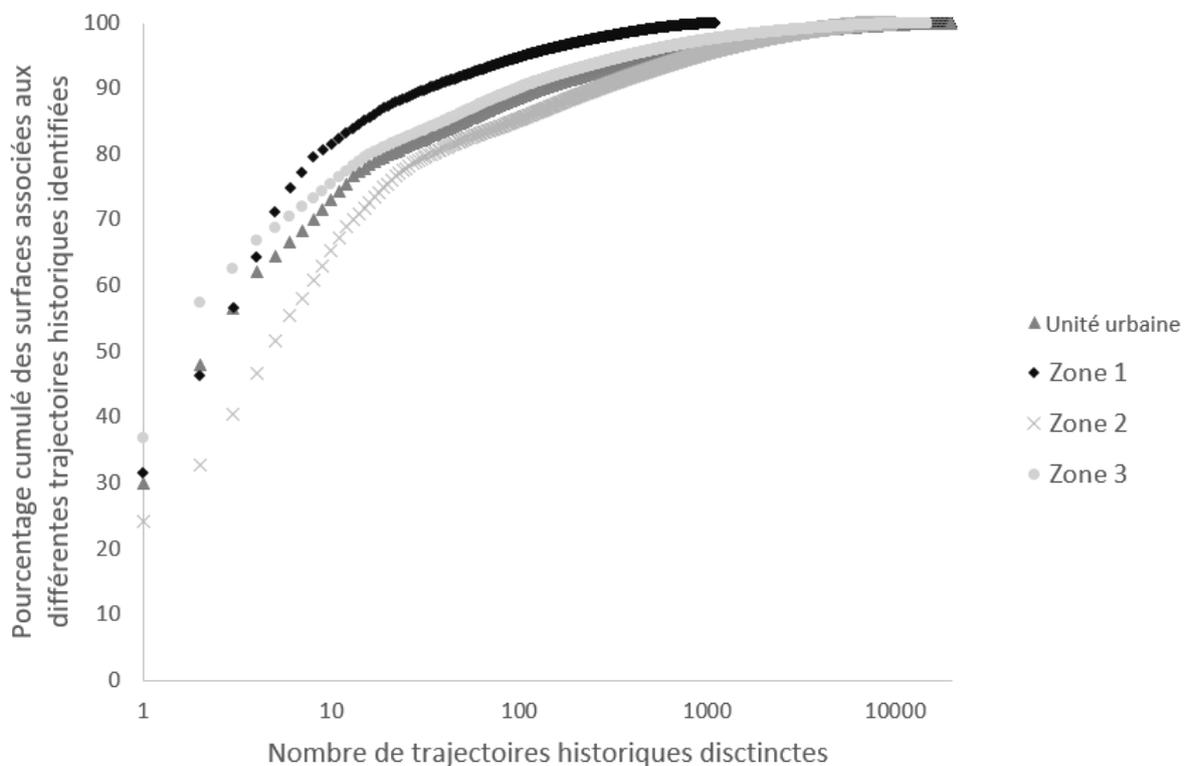
		Usage final									Total (%)
		F	A	ZH	EV	C	SL	T	I	H	
Usage initial	F	0,13	0,04	0,01	2,21	0,01	0,16	0,96	0,23	0,04	<b>3,79</b>
	A	0,14	0,20	0,02	0,32	0,06	0,24	0,25	0,04	0,08	<b>1,35</b>
	ZH	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,11	0,04	0,00	<b>0,21</b>
	EV	0,51	0,00	0,02	1,24	0,38	1,89	2,30	3,45	2,36	<b>12,15</b>
	C	0,19	0,01	0,01	2,59	0,23	2,77	4,46	5,56	3,27	<b>19,09</b>
	SL	0,01	0,00	0,03	0,25	0,13	1,01	0,21	0,92	0,12	<b>2,68</b>
	T	0,00	0,00	≈0,00	1,61	0,79	0,09	0,41	3,83	1,92	<b>8,65</b>
	I	0,76	0,02	0,13	8,68	0,97	2,22	4,08	6,01	21,86	<b>44,73</b>
	H	≈0,00	0,00	0,00	1,62	0,13	0,14	0,56	3,03	1,86	<b>7,34</b>
<b>Total (%)</b>		<b>1,74</b>	<b>0,27</b>	<b>0,23</b>	<b>18,57</b>	<b>2,70</b>	<b>8,52</b>	<b>13,34</b>	<b>23,11</b>	<b>31,51</b>	
		Usage final									Total (%)
		F	A	ZH	EV	C	SL	T	I	H	
Usage initial	F	0,24	0,06	0,10	2,22	0,61	0,38	0,93	1,92	4,36	<b>10,82</b>
	A	2,35	0,35	0,44	7,96	4,47	2,48	6,62	15,12	21,67	<b>61,46</b>
	ZH	0,02	≈0,00	0,01	0,09	0,04	0,03	0,09	0,20	0,03	<b>0,51</b>
	EV	0,06	0,01	0,02	0,19	0,16	0,21	0,48	1,16	2,79	<b>5,08</b>
	C	0,10	0,05	0,05	0,67	0,43	0,41	0,71	2,74	2,10	<b>7,26</b>
	SL	≈0,00	≈0,00	≈0,00	0,09	0,07	0,05	0,07	0,24	0,07	<b>0,59</b>
	T	0,01	≈0,00	≈0,0	0,05	0,19	0,01	0,12	0,28	0,10	<b>0,75</b>
	I	0,06	0,02	0,02	0,87	1,17	0,17	1,15	2,03	3,22	<b>8,71</b>
	H	0,02	0,01	≈0,00	0,65	0,42	0,08	1,05	1,63	0,93	<b>4,79</b>
<b>Total (%)</b>		<b>2,86</b>	<b>0,50</b>	<b>0,64</b>	<b>12,79</b>	<b>7,56</b>	<b>3,82</b>	<b>11,22</b>	<b>25,32</b>	<b>35,27</b>	
		Usage final									Total (%)
		F	A	ZH	EV	C	SL	T	I	H	
Usage initial	F	0,94	0,95	0,40	2,61	0,63	0,90	0,85	1,80	4,40	<b>13,48</b>
	A	10,11	2,47	1,20	9,30	7,32	3,71	6,67	13,59	25,35	<b>79,72</b>
	ZH	0,04	≈0,00	≈0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,01	<b>0,17</b>
	EV	0,18	0,06	0,02	0,09	0,09	0,07	0,15	0,30	1,76	<b>2,72</b>
	C	0,34	0,04	0,05	0,15	0,13	0,04	0,11	0,38	0,50	<b>1,74</b>
	SL	0,01	≈0,00	≈0,00	0,01	0,01	≈0,00	≈0,00	0,02	0,02	<b>0,07</b>
	T	0,02	≈0,00	≈0,00	0,01	0,05	≈0,00	0,01	0,04	0,03	<b>0,16</b>
	I	0,06	0,01	≈0,00	0,11	0,32	0,01	0,13	0,14	0,31	<b>1,09</b>
	H	0,05	0,02	≈0,00	0,12	0,06	0,01	0,12	0,24	0,17	<b>0,79</b>
<b>Total (%)</b>		<b>11,75</b>	<b>3,55</b>	<b>1,67</b>	<b>12,43</b>	<b>8,63</b>	<b>4,75</b>	<b>8,06</b>	<b>16,55</b>	<b>32,55</b>	

#### 4.2.3. Nombre de trajectoires historiques identifiées au sein de l'unité urbaine de Paris et nature de ces trajectoires

L'ensemble de ces analyses quantitatives et qualitatives traduisent la diversité des trajectoires historiques des usages des sols de l'unité urbaine de Paris. Au total et à cette échelle, 19 764 trajectoires historiques différentes ont été identifiées sur les 70 dernières années. 1 099, 9 339 et

14 729 trajectoires historiques différentes ont été comptabilisées respectivement pour les zones 1, 2 et 3.

Ce nombre conséquent de trajectoires historiques suggère la complexité du facteur humain dans la pédogenèse des sols en milieu urbain. Cependant, en analysant les superficies associées à ces trajectoires, on observe qu'un nombre restreint de trajectoires historiques représente une très grande majorité de la surface totale de l'unité urbaine de Paris. La figure 21 représente le pourcentage cumulé de surface représentée par les différentes trajectoires historiques identifiées à l'échelle de l'unité urbaine et des 3 zones d'étude. Plus de 80 % de la surface de la zone 1 est concerné par au maximum 10 trajectoires historiques différentes. Les autres zones sont plus dynamiques en termes d'aménagement puisqu'il faut davantage de trajectoires historiques pour couvrir 80 % de leur surface (34 pour la zone 2 et 17 pour la zone 3).



**Figure 21 : Pourcentage cumulé de surface représentée par les différentes trajectoires historiques identifiées à l'échelle de l'unité urbaine de Paris et des 3 zones d'étude**

L'analyse détaillée des cinq premières trajectoires historiques définissant en majorité les surfaces de chaque zone d'étude, montre que les trajectoires dominantes sont représentées par un seul usage sur la période étudiée (Tableau 10). Il en ressort, de plus, différents usages du sol en fonction des zones prédéfinies. Dans la zone 1, les trajectoires historiques les plus étendues correspondent à des trajectoires mono-usage définies par les usages « Habitat », « Zone industrielle, commerciale, publique

ou militaire" ou « Réseau routier ou ferroviaire. Dans les zones 2 et 3, les trajectoires mono-usage restent dominantes mais définies par des usages différents comme les usages « Habitat » et « Forêt » pour la zone 2 et les usages « Terre agricole » et « Forêt » pour la zone 3. De plus, parmi ces trajectoires, deux d'entre elles indiquent un changement d'usage des sols entre 1949 et 1982 et définissent les zones 2 et 3. Elles représentent l'urbanisation des sols agricoles vers de l'habitat et vers de l'industrie ou des commerces.

L'analyse des trajectoires historiques de chaque zone, expliquant plus de 50% de leur surface, reflète leur dynamique d'urbanisation depuis 70 ans. En effet, la zone 1, caractérisée par des trajectoires historiques mono-usage, apparaît comme une zone fortement urbanisée et moins dynamique en termes de changements d'usage que les deux autres zones. À l'inverse, la zone 3 semble être plus rurale, avec de grandes surfaces de forêts et de terres agricoles. La zone 2 est, quant à elle, une zone en transition. En effet, déjà fortement urbanisée avant 1949, des surfaces agricoles y sont encore consommées au profit de l'urbanisation.

**Tableau 10 : Les différentes trajectoires historiques représentatives des zones étudiées sur les 70 dernières années. (F : « Forêt » ; A : « Terre agricole » ; EV : « Espace vert urbain » ; T : « Réseau routier ou ferroviaire » ; I : « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire » ; H : « Habitat »)**

	Trajectoires historiques d'usages										Surface représentée (%)
	1949	1982	1987	1990	1994	1999	2003	2008	2012	2017	
Unité urbaine de Paris	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	30,0
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	18,1
	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	8,5
	A	H	H	H	H	H	H	H	H	H	5,6
	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	2,3
Zone 1	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	31,7
	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	14,7
	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	10,4
	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	EV	7,6
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	6,8
Zone 2	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	24,3
	A	H	H	H	H	H	H	H	H	H	8,6
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	7,6
	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	6,3
	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	4,8
Zone 3	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	36,8
	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	20,7
	A	H	H	H	H	H	H	H	H	H	5,1
	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	4,4
	A	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1,9

### **4.3. Analyse de la dynamique des sous-usages de l'unité urbaine de Paris**

#### *4.3.1. Sous-usages de l'usage « habitat »*

Les unités surfaciques d'usage « habitat » ayant changé de sous-usage sont peu représentatives, ne couvrant que 0,3 % de la surface de l'unité urbaine. L'analyse de ces unités surfaciques montre tout de même un changement de sous-usage majoritaire, le passage d'un « habitat individuel » à un « habitat collectif », traduisant la densification de l'habitat. 45 % des surfaces ayant changé de sous-usage sont concernées par ce type de changement. L'analyse effectuée met également en avant, qu'en majorité, il ne se produit qu'un seul changement de sous-usage au sein de ces trajectoires historiques liées à l'usage « habitat ».

Le résultat est semblable en zone 1. Très peu d'unités surfaciques d'usage « habitat » sont concernées par des changements de sous-usages (*i.e.* 0,09 %) et le changement majoritaire de sous-usage est le passage d'un « habitat individuel » à un « habitat collectif ». Des résultats analogues ont également été obtenus pour la zone 2. En zone 3, même si les unités surfaciques d'usage « habitat » avec changements de sous-usages sont également peu représentées, un autre type de changement de sous-usage apparaît, à savoir le passage d'un « habitat rural » à un « habitat individuel ».

#### *4.3.2. Sous-usages de l'usage « installation sportive et de loisirs »*

Les changements de sous-usage au sein de l'usage « installation sportive et de loisirs » sont également très peu représentatifs de la superficie de l'unité urbaine de Paris. Les unités surfaciques concernées ne représentent en effet que 0,04 % de la superficie totale de l'unité urbaine de Paris.

Ce résultat est également observé pour les 3 zones d'études. En zone 1, le changement majoritaire représentant le plus de surface correspond au passage d'un « hippodrome » à un « terrain de sport en plein air ». En zone 2 et 3, le type de changement de sous-usage majoritaire est fortement influencé par les diverses constructions de golfs en périphérie de la ville de Paris durant ces 70 dernières années. Ces constructions sont traduites par le passage d'un « parc d'équipements sportifs » ou d'un « hippodrome » vers un « golf ».

#### *4.3.3. Sous-usages de l'usage « réseau routier et ferroviaire »*

Les unités surfaciques correspondant à un changement de sous-usage au sein de l'usage « réseau routier et ferroviaire » sont également très peu représentatives de l'ensemble des trajectoires historiques étudiées. Leur surface ne représente que 0,04 % de la superficie totale du territoire.

Concernant l'analyse réalisée sur les 3 zones d'études, cette dernière montre plusieurs changements de sous-usage principaux qui traduisent le passage d'une « emprise de transport ferré » vers une « emprise routière » ou vers un « parc de stationnement ». Ce résultat illustre la diminution du maillage du réseau ferré en ville, au profit de la route

#### *4.3.4. Sous-usages de l'usage « terre agricole »*

Les changements de sous-usages au sein de l'usage « terre agricole » sont plus fréquents et plus représentatifs de la superficie de l'unité urbaine de Paris. En effet, ils représentent 2,0 % de la superficie totale de l'unité urbaine. Pour une unité surfacique donnée, ces changements de sous-usage se sont principalement produits une seule fois au cours des 70 dernières années. 74 % des surfaces concernées par ces changements sont des surfaces marquées par un seul changement de sous-usage. Cependant, certaines unités surfaciques ont, tout de même, changé jusqu'à 5 fois de sous-usages au cours des 70 dernières années.

L'analyse des changements de sous-usage par zones montre une très faible proportion d'unités surfaciques ayant changé de sous-usage agricole au sein de la zone 1, probablement en raison de la faible présence de sols agricoles dans cette zone. Dans les zones 2 et 3, ces changements sont plus nombreux. Les changements majoritaires dans ces zones illustrent le passage d'une zone de maraîchage ou d'horticulture vers une zone de grandes cultures. Ce changement s'est majoritairement effectué entre les années 1949 et 1982 témoignant un fort développement de l'agriculture intensive durant cette période.

### **4.4. Trajectoires historiques observées par analyse diachronique de photos aériennes et de cartes historiques sur le territoire de l'unité urbaine de Paris**

#### *4.4.1. Sites urbains situés en zone 1*

L'analyse diachronique des photos aériennes et des cartes historiques des 3 sites urbains sélectionnés aléatoirement dans la zone 1 (Paris intramuros) illustre le caractère bâti des sols dès le 18<sup>ème</sup> siècle. Bien que des restructurations majeures (*i.e.* construction de grands boulevards) ont été observées entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle, l'analyse de ces sites a globalement montré une certaine mémoire de l'agencement des îlots urbains et des bâtiments au cours du temps. Ces résultats complètent ainsi les résultats précédemment observés par l'analyse de la base de données MOS. De plus, ils permettent de les confirmer. En effet, lors des dernières décennies, les sites d'études ont très peu changé d'usage illustrant ainsi les résultats avancés lors de l'analyse des trajectoires historiques sur les 70 dernières années de l'unité urbaine de Paris. De plus, les changements d'usages identifiés lors de ces

observations illustrent le phénomène de reconstruction de la ville sur elle-même mis en évidence précédemment.

- **Site urbain du II<sup>ème</sup> arrondissement de Paris (zone 1)**

Le site urbain intramuros étudié est localisé au sein des limites de deux quartiers administratifs du II<sup>ème</sup> arrondissement de Paris : Bonne Nouvelle et Mail. D'une superficie d'environ 25 ha, la trajectoire historique de ce site a été retracée depuis 1740 grâce à l'analyse des photos aériennes et de cartes historiques.

En observant les photographies aériennes de 1935 à nos jours, nous constatons que l'agencement général du site urbain est resté identique au cours du temps. Les mêmes routes et les mêmes îlots urbains sont présents sur l'ensemble des photographies. Seuls quelques bâtiments ont subi des modifications de structure mais ces événements restent très anecdotiques au regard des images observées. L'analyse complémentaire des cartes historiques d'état-major et de Cassini montre que cette zone urbaine était déjà bâtie en 1740. De plus, la carte minute d'état-major montre la présence à cette époque d'un agencement similaire à celui observé aujourd'hui (Figure 22).

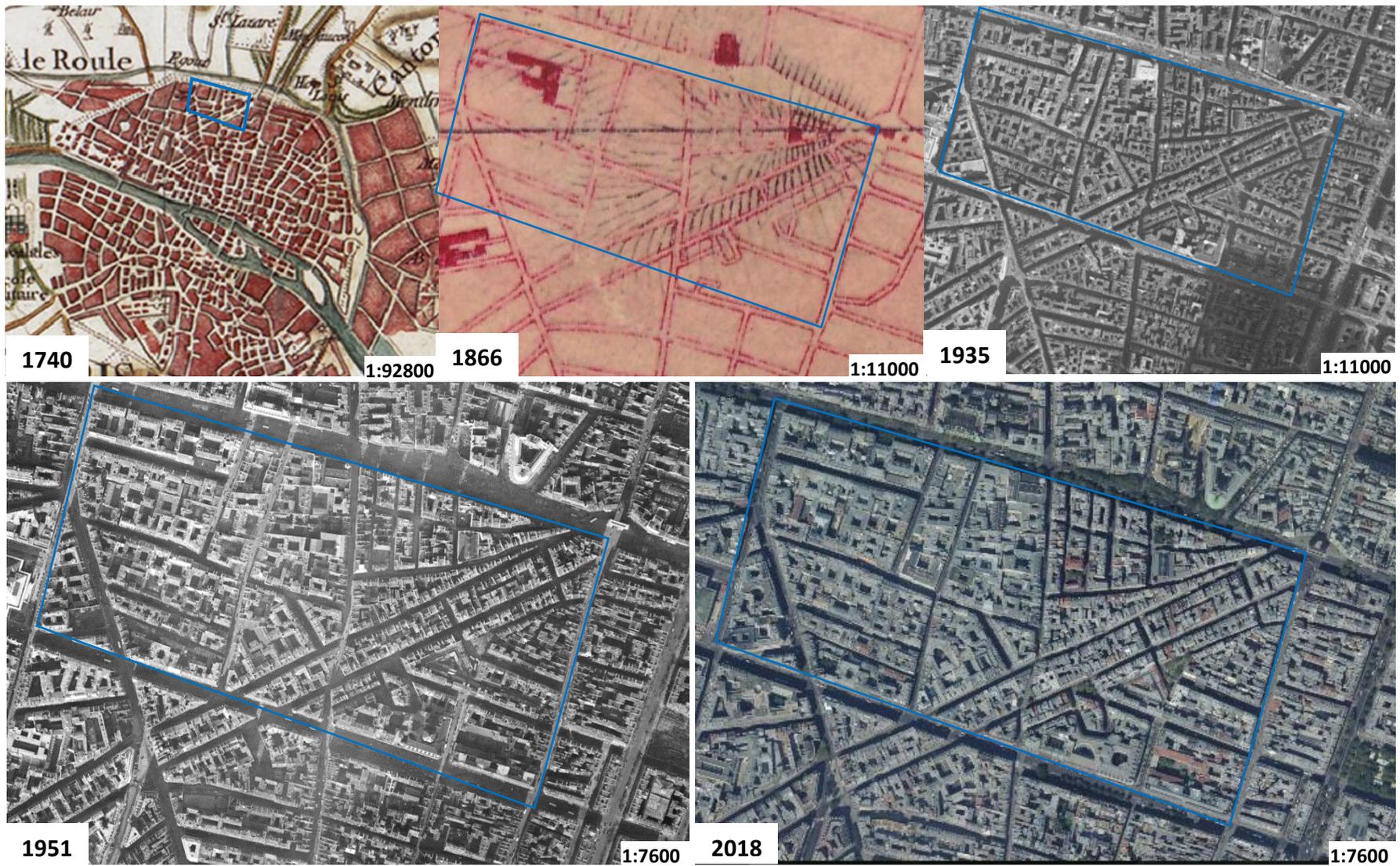


Figure 22 : Évolution historique du site urbain situé dans le II<sup>ème</sup> arrondissement de Paris de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)

- **Site urbain du VII arrondissement de Paris (zone 1)**

Le deuxième site urbain intramuros étudié se trouve au sein des quartiers les Invalides et Saint Thomas d'Aquin dans le VII arrondissement de Paris. D'une superficie de 55 hectares, ce site englobe certains monuments historiques comme le Palais Bourbon et le musée d'Orsay.

L'analyse des photographies aériennes réalisée depuis 1935, permet de conclure à des résultats similaires à l'analyse précédente. En effet, un agencement identique est de nouveau retrouvé entre la photographie aérienne de 1935 et celle de 2018. De même, les principaux changements observés concernent la structure de certains bâtiments qui ont subi quelques modifications, par ajout d'une extension adjacentes ou au contraire par destruction d'annexe liée au bâtiment. Ce phénomène reste cependant très marginal par rapport au caractère statique du site au cours du temps. L'analyse des cartes historiques relève que la superficie étudiée était déjà bâtie en 1740 et qu'au XIXème siècle l'agencement général du site était déjà proche de celui qu'on peut observer aujourd'hui. À noter tout de même, la construction du Boulevard Saint-Germain traversant de part en part le site d'étude entre 1866 et 1935. Ce boulevard a, en effet, été construit par Haussmann plus précisément entre 1866 et 1877. Cette construction a engendré des changements d'usage liés à la destruction de bâtiments au profit d'une infrastructure routière (Annexe 3).

- **Site urbain du XI arrondissement de Paris (zone 1)**

Le troisième site urbain intramuros étudié, d'une superficie de 46 hectares, est inclus au sein de deux quartiers administratifs du XI arrondissement de Paris : Roquette et Sainte Marguerite.

Les photographies aériennes montrent, là encore, un agencement similaire du site urbain étudié de 1944 à 2018. En effet, les routes et les îlots urbains dessinent une morphologie identique entre ces deux dates. Cependant, contrairement aux deux autres sites intramuros sélectionnés où seuls quelques bâtiments avaient été modifiés, ce site urbain a, quant à lui, subi des changements d'usages au sein de ses îlots. L'îlot Sud a en effet, été témoin d'un projet d'aménagement entre 1973 et 2018 avec construction de logements collectifs. De plus, ce même îlot a également été modifié entre 1944 et 1973, des habitations ont été détruites pour laisser place à une installation sportive et de loisirs. On retrouve également des changements d'usages au sein de l'îlot Est du site étudié. Les autres îlots, quant à eux, ne semblent pas avoir été affectés par des changements majeurs entre 1944 et 2018. En outre, l'analyse des cartes historiques, notamment la carte d'état-major, semble montrer une implantation des îlots semblable à celle que l'on peut actuellement observer (Annexe 3).

#### *4.4.2. Sites urbains situés en zone 2*

Les trajectoires historiques des sites urbains situés dans la zone 2, caractérisant la petite couronne de Paris, illustrent majoritairement l'urbanisation des terres agricoles. Pour créer de l'habitat individuel ou collectif, les terres agricoles vont être transformées par des pratiques humaines. La période d'urbanisation, dans le cas des 3 études de cas concrets, est dépendante de la distance les séparant du pôle d'attractivité qui est la ville de Paris. Plus le site est éloigné de ce pôle, plus l'urbanisation de la zone semble s'effectuer tardivement. De plus, l'ensemble des surfaces observées semble avoir subi essentiellement un seul changement d'usage au cours de la période étudiée. Ces observations réalisées grâce à ces analyses photographiques et cartographiques viennent renforcer les résultats obtenus par l'analyse des trajectoires historiques de l'unité urbaine de Paris sur les 70 dernières années.

- **Site urbain d'Asnières-sur-Seine (zone 2)**

Le site d'étude d'Asnières-sur-Seine (département des Hauts de Seine) d'une superficie de 32 hectares est situé à proximité de la zone 1. L'analyse des photographies aériennes et des cartes historiques révèle que ce site a été urbanisé entre 1866 et 1923 avec une transformation des surfaces agricoles donnant place, majoritairement, à un usage habitat et plus précisément à un sous-usage d'habitat individuel. Cette période correspond à une croissance démographique forte de la ville d'Asnières-sur-Seine pendant laquelle le nombre d'habitants a été multiplié par 9. Ce phénomène s'explique par l'emplacement géographique de la ville qui est située à proximité immédiate de la ville de Paris, pôle d'attractivité majeur. Après 1923, certaines surfaces ont changé d'usage mais ces dernières ne représentent qu'une minorité de la surface totale étudiée (Figure 23).

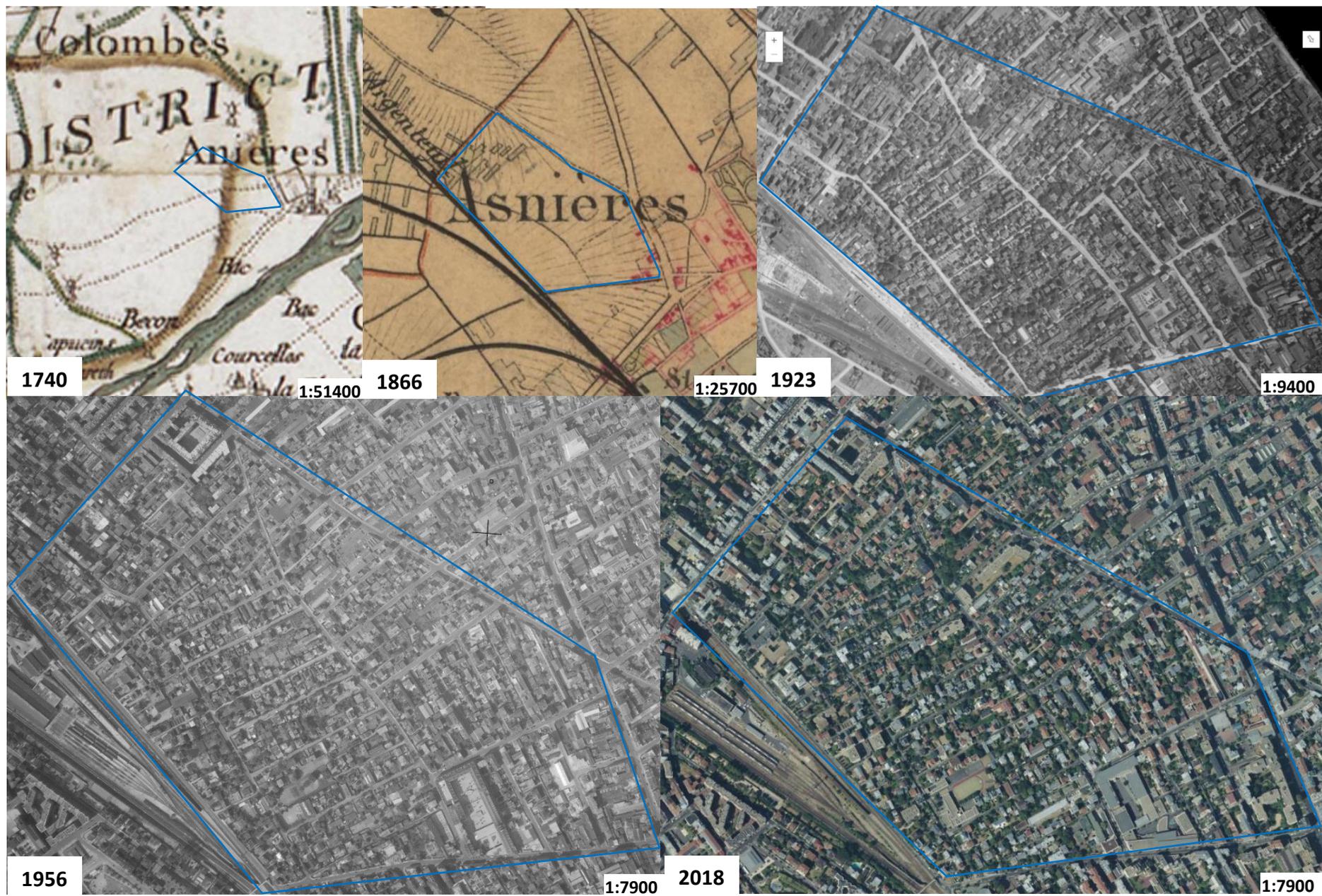


Figure 23 : Évolution historique du site urbain situé à Asnières-sur-Seine de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)

- **Site urbain de Fontenay-aux-Roses (zone 2)**

Situé dans la commune de Fontenay-aux-Roses (département des Hauts de Seine), ce site urbain fait une superficie de 40 hectares. Comme pour Asnières-sur-Seine, ce site témoigne de la consommation des terres agricoles par l'urbanisation. De 1866 à nos jours, cette zone initialement agricole a subi les conséquences de l'accroissement de la commune de Fontenay-aux-Roses, où des sols ont été transformés afin d'assurer un sous-usage habitat individuel et collectif (Annexe 3). Ces changements d'usage de l'agricole vers l'habitat se sont réalisés progressivement jusqu'à une urbanisation de toutes les parcelles agricoles en 1971. L'analyse des photographies aériennes montre qu'une fois urbanisées, ces parcelles ne sont plus soumises à de nouveaux changements d'usage et restent en usage habitat.

- **Site urbain de Noisieu (zone 2)**

Le site urbain de Noisieu (département du Val-de-Marne), d'une superficie de 19 hectares s'est également urbanisé vers les années 1970. L'urbanisation plus tardive de ce site peut s'expliquer par son éloignement à la ville de Paris, qui reste un pôle d'attractivité dans ce secteur. Ce phénomène illustre le grignotement continu des terres agricoles vers les périphéries. Les principaux changements d'usage identifiés illustrent le passage d'une zone agricole vers une zone de sous-usage d'habitat individuel (Annexe 3).

#### *4.4.3. Sites urbains situés en zone 3*

Les trajectoires historiques observées à travers les sites urbains de la zone 3 sont très similaires à celles observées en zone 2. En effet, en majorité, ces trajectoires illustrent l'urbanisation des sols agricoles dans le temps, conséquence de l'extension de la ville ou de la commune. Ces trajectoires sont essentiellement composées d'un seul changement d'usage des sols traduisant le passage d'une zone agricole à une zone d'habitation. De nouveau, ces observations renforcent les résultats obtenus par analyse de la base de données MOS. La singularité néanmoins observée entre les 2 zones provient de la différence de dynamique d'urbanisation entre celles-ci avec une rapidité et une intensité d'urbanisation plus marquée en petite couronne qu'en grande couronne de Paris.

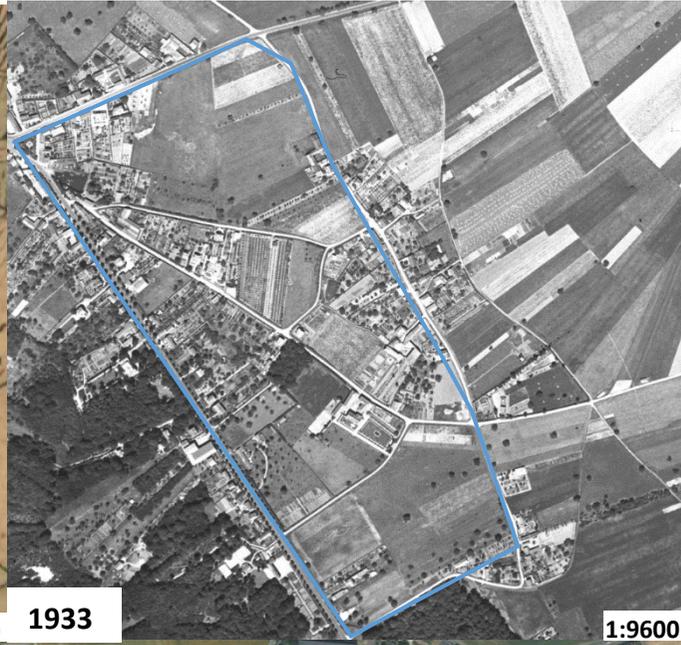
- **Site urbain de Neauphle-le-Château (zone 3)**

Le site urbain étudié de 35 hectares se situe dans la commune de Neauphle-le-Château (département des Yvelines). Localisé en périphérie du cœur historique de la commune, la zone retenue était composée d'habitations dès 1866. La première photographie aérienne de 1933 montre que l'emplacement où se trouvaient ces bâtiments est toujours urbanisé et s'est agrandi. Un grignotement progressif des terres agricoles autour de ces zones bâties s'est produit. Ce grignotement s'est intensifié dans les années 80 jusqu'à une urbanisation totale des zones agricole dans les années 2010. Ces

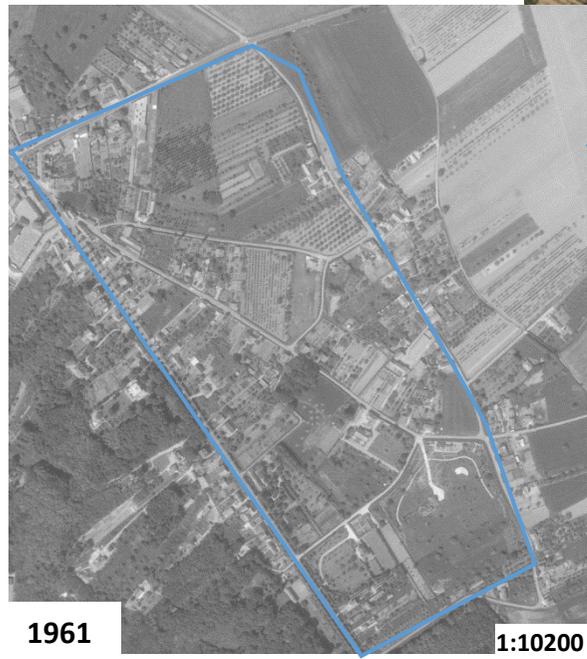
observations illustrent l'accroissement de la commune de Neauphle-le-Château au cours du temps. Ces consommations de terres agricoles sont analogues au site urbain situé dans la zone 2, même si, pour ce cas d'étude elles semblent impacter moins de surfaces agricoles (Figure 24).



1866



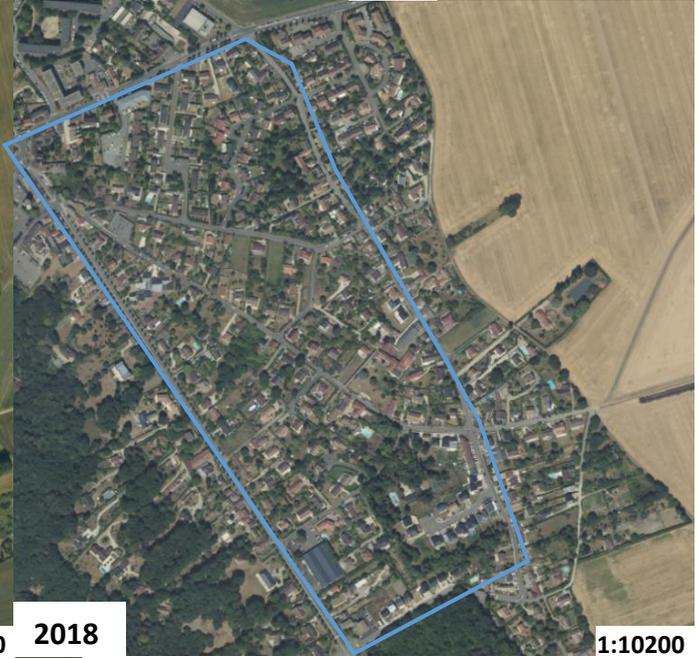
1933



1961



1987



2018

1:10200

Figure 24 : Évolution historique du site urbain de Neauphle-le-Château de 1866 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)

- **Site urbain de Vigneux-sur-Seine (zone 3)**

D'une superficie de 35 hectares, le site urbain de Vigneux-sur-Seine (département de l'Essonne), était jusque dans les années 1965 composé de terres agricoles. L'accroissement de la ville a finalement impacté ce site urbain où ces surfaces agricoles ont été transformées pour assurer un usage d'habitat collectif. Aujourd'hui ces surfaces assurent toujours cet usage. Un seul changement d'usage s'est donc produit sur ces surfaces au cours des deux derniers siècles (Annexe 3).

- **Site urbain de Pierrelaye (zone 3)**

Le site urbain de Pierrelaye (département du Val d'Oise), de 39 hectares de superficie, possède une trajectoire historique similaire au site urbain de Neauphle-le-Château. En effet, quelques habitations composant le cœur historique de la commune de Pierrelaye étaient bâties sur ce site urbain dès 1844. Par la suite, l'urbanisation de la zone s'est faite très progressivement. Une différence notable entre ces deux sites est tout de même à souligner. L'intégralité des terres agricoles n'est pas urbanisée, des surfaces cultivées sont encore présentes sur ce site. Cette observation peut de nouveau illustrer une urbanisation moins intensive des sites urbains de la zone 3 par rapport aux sites de la zone 2 (Annexe 3).

#### **4.5. Identification des pratiques liées aux usages**

L'ensemble des pratiques humaines identifiées par lecture de documents techniques et scientifiques a été résumé dans le tableau 11. Ce tableau classe les pratiques selon les notions clés associées au facteur humain défini dans le Chapitre I (*i.e.* occupation, usage, sous-usage, pratique). Seules les pratiques impactant les sols non imperméabilisés ont été identifiées.

**Tableau 11 : Ensemble des pratiques identifiées selon leur occupation, usage et sous-usage du sol associés.**

Occupations	Usages	Sous-usages	Pratiques	Références
Surface arborée	Forêt		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage par passages d'engin</li> <li>- Orniérage du sol par le passage d'engin</li> <li>- Scalpage des couches superficielles du sol par le passage d'engin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ONF, 2009</li> <li>- ONF, 2021</li> </ul>
Surface à végétation rase	Terre agricole	Grande culture annuelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail de la terre par labour, déchaumage, désherbage</li> <li>- Compactage du sol par passages d'engin</li> <li>- Semis</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> <li>- Apport de matière organique (fumier, lisier, fiente avec litière...)</li> <li>- Chaulage des sols</li> <li>- Irrigation</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Traitement fongicide</li> <li>- Traitement insecticide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chambre d'agriculture Bourgogne, 2015</li> <li>- Chambre d'agriculture région Alsace, 2015</li> <li>- Chambre d'agriculture Champagne-Ardenne, 2017</li> <li>- IRSTEA, 2011</li> </ul>
		Verger, vigne	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage des allées par passages d'engin et piétinements</li> <li>- Travail du sol situé sous le rang</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> <li>- Apport de matière organique (fumier, lisier, fiente avec litière...)</li> <li>- Tonte mécanique des inter-rangs ou travail du sol des inter-rangs</li> <li>- Irrigation</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Traitement fongicide</li> <li>- Traitement insecticide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agreste, 2021</li> <li>- Agreste, 2017</li> <li>- Frebourg Agro Ressources, 2019</li> <li>- Covigner, 2018</li> </ul>
		Maraîchage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail de la terre (charrue, herse rotative)</li> <li>- Compactage du sol par le passage d'engin</li> <li>- Semis ou plantation</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> <li>- Apport de matière organique (fumier, compost)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chambre d'agriculture Loire Atlantique, 2013</li> <li>- SolAB, 2011</li> <li>- GRAB, 2018</li> </ul>

Surface bâtie	Habitat		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irrigation</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Traitement fongicide</li> <li>- Traitement insecticide</li> </ul>	
		Pâturage, prairie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par passages d'engin</li> <li>- Hersage et aération du sol</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> <li>- Apport de matière organique</li> <li>- Chaulage des sols</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Fauche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- AFPP, n.d</li> <li>- Chambre d'agriculture Moselle, n.d</li> </ul>
		Surface enherbée	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> <li>- Fauche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laille &amp; Cheval, 2019</li> <li>- Entretien avec le chef du service Espaces verts et Patrimoine arboré de la métropole du Grand Nancy</li> </ul>
	Espace vert urbain	Parc ornemental	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail du sol</li> <li>- Semis et plantation</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Désherbage mécanique ou manuel</li> <li>- Irrigation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CAUE de Meurthe-et-Moselle, n.d</li> <li>- Entretien avec le chef du service Espaces verts et Patrimoine arboré de la métropole du Grand Nancy</li> </ul>
		Potager, jardin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail de la terre</li> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Semis ou plantation</li> <li>- Apport de fertilisant (Azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> <li>- Apport de matière organique (fumier, compost)</li> <li>- Irrigation</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Traitement fongicide</li> <li>- Traitement insecticide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pluvinage &amp; Weber, 1992</li> <li>- Entretien avec la responsable des cultures du Potager du Roi de Versailles</li> </ul>
		habitat individuel et rural	<p>→ <b>Surface enherbée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> <li>- Irrigation</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> </ul> <p>→ <b>Jardin, potager</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Travail de la terre (bêchage, fraiseuse, motoculteur)</li> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Semis ou plantation</li> <li>- Apport de fertilisant (azote, phosphore, potassium)</li> <li>- Apport d'oligo-éléments</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trammell <i>et al.</i>, 2017</li> <li>- Huyler <i>et al.</i>, 2014</li> <li>- Pluvinage &amp; Weber, 1992</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apport de matière organique (fumier, compost)</li> <li>- Irrigation</li> <li>- Traitement herbicide</li> <li>- Traitement fongicide</li> <li>- Traitement insecticide</li> </ul>	
		Habitat collectif	<p>→ <b>Surface enherbée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> <li>- Apport de fertilisant (Azote, phosphore, potassium)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Smith <i>et al.</i>, 2018</li> <li>- Entretien avec une gestionnaire d'habitat collectif auprès de la société cdc-habitat</li> </ul>
	Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire	Industrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par passages d'engin</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> <li>- Fauche</li> <li>- Apport de matière anthropique pour le fonctionnement de l'industrie, l'accessibilité (gravats, remblai ...)</li> <li>- Dépôt de résidus industriels</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huot, 2013</li> <li>- Zanetti, 2018</li> <li>- Séré, 2007</li> </ul>
		Commerce	<p>→ <b>Surface enherbée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par visite et lecture des sites internet des sociétés d'entretien d'espaces verts</li> </ul>
Installations sportive et de loisirs	Publique / militaire		<p>→ <b>Surface enherbée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> <li>- Fauche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entretien avec le chef du service Espaces verts et Patrimoine arboré de la métropole du Grand Nancy</li> </ul>
		Golf	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ramassage</li> <li>- Apport de fertilisant</li> <li>- Traitements phytosanitaires (désherbage)</li> <li>- Aération du sol par outil mécanique</li> <li>- irrigation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par visite et lecture des sites internet des sociétés d'entretien d'espaces verts (<i>i.e.</i> Paysalia)</li> <li>- Mygolfmedia, 2020</li> </ul>
	Hippodrome	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ramassage</li> <li>- Apport de fertilisant</li> <li>- Traitements phytosanitaires (désherbage)</li> <li>- Aération du sol par outil mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>France galop, 2005</li> </ul>	
	Autres installations	<p>→ <b>Surface enherbée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par piétinements</li> <li>- Tonte de l'herbe avec ou sans ramassage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par visite et lecture des sites internet des sociétés d'entretien d'espaces verts</li> </ul>	

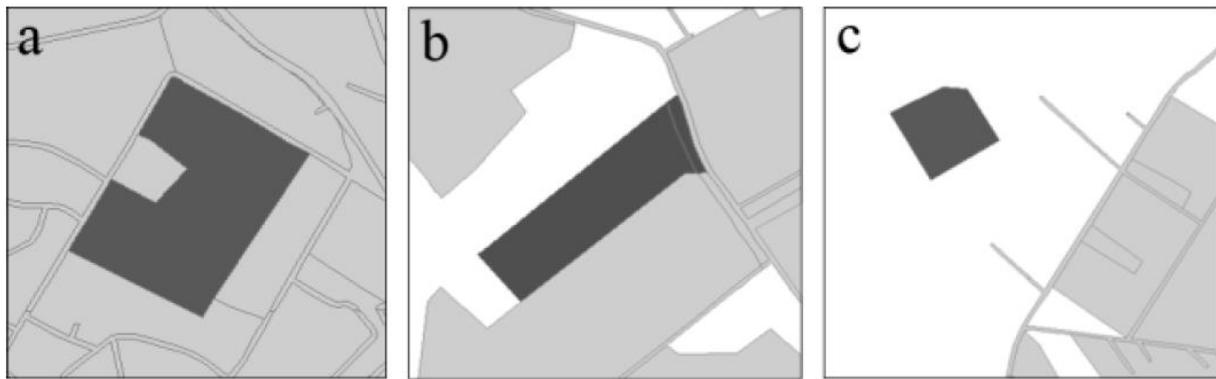
	Réseau routier et ferroviaire	Réseau ferroviaire	<p>→ <b>Bas-côté</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactage du sol par passages d'engin</li> <li>- Fauche, débroussaillage</li> <li>- Traitement herbicide</li> </ul>	SNCF Réseau, n.d.
		Réseau routier	<p>→ <b>Bas-côté</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fauche, débroussaillage</li> <li>- Curage des fossés</li> <li>- Apport de chlorure de sodium</li> </ul>	Morin & Bizet, 2020
Surface nue	Chantier, Carrière, décharge	Chantier de construction d'un bâtiment (habitation, entrepôt, bâtiment public)	<p>→ <b>Surface non imperméabilisée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavation de la terre végétale</li> <li>- Terrassement</li> <li>- Nivellement par compactage</li> <li>- Apport de matériaux anthropiques dans le sol (béton, plastique, verre, brique ...)</li> <li>- Excavation de terre par l'ouverture d'une tranchée pour l'installation des réseaux</li> <li>- Apport de matériaux exogènes (remblai)</li> <li>- Apport de terre végétale en fin de chantier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Documents techniques → Décomposition du Prix Global et Forfaitaire (DPGF) d'un chantier de construction d'un centre d'accueil et de loisirs. (DPGF, 2017)</li> <li>→ Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) d'un chantier de construction d'un bâtiment communal (CCTP, 2018a)</li> <li>→ Cahier des Clauses Techniques Particulières d'un chantier de construction de 19 logements collectifs (CCTP, 2005)</li> <li>- Vidéos publicitaires d'entreprise de construction de bâtiment</li> </ul>
		Chantier de construction d'une infrastructure routière	<p>→ <b>Surface non imperméabilisée</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavation de la terre végétale</li> <li>- Terrassement</li> <li>- Apport de remblai</li> <li>- Nivellement par compactage</li> </ul>	CETE, 1998

		Chantier de construction d'espaces verts	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terrassement</li> <li>- Compactage par passages d'engin</li> <li>- Excavation des terres de surface</li> <li>- Ajout de terre végétale</li> </ul>	- Guide pour l'aménagement de l'entretien des espaces verts. (GEM-EF, 2000)
		Carrière	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavation de la terre végétale qui est stockée pour la remise en état du site</li> <li>- Destruction de la roche mère</li> </ul>	UNICEM, 2011
		Décharge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excavation des terres pour enfouir le casier collecteur de déchets</li> <li>- Compactage par passages d'engin</li> <li>- Ajout de terre végétale</li> </ul>	Plateforme Re-Sources, 2017

## 5. Discussion

### 5.1. Des trajectoires historiques comme indicateur des modèles d'urbanisation des villes

L'urbanisation est un phénomène touchant toutes les villes mondiales. Ce processus traduisant le développement des villes, souvent au détriment d'espaces naturels ou de terres agricoles, a un impact conséquent sur la biodiversité et les écosystèmes environnants qui a fait l'objet de plusieurs études (Herrmann *et al.*, 2020 ; Thornton, 1991 ; Zhang *et al.*, 2020). Afin de mieux préciser ces impacts, certaines études se sont attachées à comprendre les schémas spatio-temporels de changement d'usage des sols associés à l'urbanisation. Plusieurs hypothèses concernant ces schémas ont été formulées. L'une de ces hypothèses définit l'urbanisation comme un processus en deux étapes alternant les phénomènes de diffusion et de coalescence des zones bâties au cours de la croissance urbaine (Dietzel *et al.*, 2005). Par la suite, d'autres études ont montré que le phénomène d'urbanisation pouvait être plus complexe et nécessitait une description plus précise des trois modes de croissance opérant simultanément avec des degrés d'implication variables selon les périodes (Figure 25) : la densification, l'expansion en périphérie des zones bâties et la croissance périphérique isolée (Hoffhine Wilson *et al.*, 2003 ; Nong, 2014 ; Sapena & Ruiz, 2015 ; Sun *et al.*, 2013).



**Figure 25 : Les 3 modes de croissance d'une ville : (a) la densification, (b) l'expansion en périphérie des zones bâties, (c) la croissance périphérique isolée. En gris : zone bâtie, en blanc : zone non couverte et en noir : bâti nouveau (Sapena & Ruiz, 2015)**

Ces schémas spatio-temporels de changement d'usage des sols reflètent différentes trajectoires historiques auxquelles les sols sont soumis, notamment en centre-ville. En effet, il a été mis en évidence pour plusieurs villes européennes comme Berne, Lausanne, Zurich ou Rome que les centres-villes étaient moins affectés par les changements d'usage que leurs périphéries (Bosch & Chenal, 2019 ; Sapena & Ruiz, 2015). Ce résultat confirme donc nos observations concernant la faible dynamique de changements d'usage au cœur de la ville de Paris (zone 1). Néanmoins d'autres points mis en avant par ces modèles peuvent être discutés. En effet, certaines études ont montré que le mode de croissance le plus courant au cœur de la ville est la densification des espaces (Nong, 2014 ; Sun et al., 2013), où des espaces urbains encore non artificialisés sont urbanisés. Bien qu'existant, la densification ne reflète pas la dynamique de développement du centre-ville de Paris. En effet, les résultats obtenus par nos analyses montrent que les changements d'usage des sols dans ces zones sont principalement représentés par des changements d'usage d'une zone bâtie à une autre. Cette différence de résultat provient vraisemblablement de la distinction choisie pour décrire les zones bâties. Dans les études décrivant les modèles d'urbanisation, les classes " zone urbaine " ou " bâtie " définissent souvent l'ensemble des zones urbaines, ce qui engendre une sous-estimation de la réalité des changements d'usage du sol. En effet, regrouper toutes les zones bâties en une seule catégorie ne permet pas de distinguer les changements d'usage des sols d'une zone bâtie à une autre et donc de cerner précisément les dynamiques de changement d'usage.

## **5.2. Des trajectoires historiques comme résultante de l'histoire des villes**

Au-delà du centre-ville, on assiste à un étalement urbain continu des zones bâties dans les zones 2 et 3. Cela se traduit par le grignotement progressif de nombreuses surfaces agricoles pour laisser place à des logements, des industries ou des commerces. Ce phénomène d'étalement urbain a souvent été mis en évidence dans de nombreuses villes mondiales (Bosch & Chenal, 2019 ; Deng et al., 2009 ; Nong,

2014 ; Rojas et al., 2019). L'étalement urbain monocentrique caractérisé par une consommation progressive des terres agricoles depuis le centre urbain est un phénomène courant mais ne caractérise pas toutes les villes mondiales (Néchet, 2011). En effet, d'autres villes peuvent se développer de manière polycentrique sans aucun centre urbain distinct. Ces villes sont appelées les " edge-cities " - la ville de Manchester en est un exemple. Parmi les 7 villes étudiées, la localisation des changements d'usage suggère une telle tendance polycentrique de l'urbanisation à Lille et dans une moindre mesure à Nancy et à Toulouse, où des pôles urbains apparaissent le long des cours d'eau et des axes routiers.

S'agissant de Paris, l'expansion monocentrique s'explique bien par son histoire. Paris s'est développée au-delà de ses frontières historiques (zone 1) à partir du XIXe siècle (Montel, 2012). Son développement a été influencé par la révolution industrielle, l'entre-deux-guerres puis les Trente Glorieuses, périodes au cours desquelles les politiques d'aménagement (e.g. la politique des grands ensembles (Fourcaut, 2006), les événements économiques et sociétaux (e.g. la périphérisation de l'industrie ; Antoni, 2010) et les progrès technologiques (e.g. l'évolution des transports ; Antoni, 2010) ont déterminé l'urbanisation des zones 2 et 3. Quelques facteurs précédemment cités sont perçus à travers certains résultats de notre étude. Les différentes dynamiques des changements d'usage du sol observées entre 1949-1982 et 1982-2017 peuvent, par exemple, s'expliquer par certaines politiques de développement urbain telles que la politique des grands ensembles ou le programme des villes nouvelles mis en place entre 1949-1982.

### **5.3. Échelles spatiale et temporelle des données d'occupation et d'usage des sols**

Même si des conclusions similaires des analyses CLC et MOS peuvent être tirées concernant la localisation des changements d'usage, leur occurrence et leur type, il existe quelques nuances dans les résultats de ces analyses. Ces nuances peuvent s'expliquer par les échelles spatiales et temporelles de ces bases de données. En effet, ces deux facteurs s'avèrent déterminants dans la pertinence et la précision des résultats.

L'échelle spatiale est définie par la superficie totale du référentiel étudié ainsi que par sa résolution spatiale qui désigne la taille de l'unité de collecte minimale (UCM). En général, ces deux notions sont liées. Les études à large échelle utilisent souvent une résolution plus grossière (Verburg et al., 2004). Le travail effectué sur l'unité urbaine de Paris par l'intermédiaire des données MOS est basé sur une surface de plusieurs centaines de milliers d'hectares (443 166 hectares) et une UCM de 625 m<sup>2</sup>. Cette résolution est plus fine que celle de la base de données CLC, dont l'UCM est de 25 ha. Cette différence de résolution spatiale s'explique par des référentiels d'études totalement différents entre la base de données MOS (échelle régionale) et CLC (échelle européenne). Bousquet *et al.* (2013) ont d'ailleurs discuté de la pertinence de la résolution de CLC en montrant que cette base de données n'est pas la

plus adaptée pour une étude très fine de changement d'usage des sols. En effet, sa résolution ne permet pas d'identifier certains changements d'usage inférieurs à l'UCM. Ce point de discussion reste néanmoins valable pour toute les bases de données d'usages des sols puisque même si la résolution spatiale de la base de données MOS est plus fine, les changements d'usage de superficie inférieure à son UCM n'ont pas été considérés lors de notre analyse. Ceci reste évidemment une limite au travail proposé.

Si l'influence de l'échelle spatiale et de sa résolution sur les résultats a souvent été discutée (Schmit et al., 2006 ; Veldkamp & Lambin, 2001), très peu d'articles scientifiques discutent, en revanche, de l'influence de l'échelle temporelle pour analyser des successions d'usages des sols. Cette dernière est définie par la période étudiée et par les pas de temps existant entre les différents jalons de données. Or, la période d'analyse et le pas de temps (ou périodicité) des données sont deux déterminants des résultats d'analyse des trajectoires historiques des sols urbains. Malheureusement, le choix de l'échelle temporelle est généralement limité par la disponibilité des données (Dietzel et al., 2005 ; Sapena & Ruiz, 2015). Il existe très peu de données historiques d'usages des sols à large échelle, c'est-à-dire à notre échelle d'étude. Les données remontant à plus de 50 ans sont rarement disponibles. Ce manque de données impacte également les différents jalons possibles à analyser ainsi que l'intervalle de temps entre ces jalons. Dans ce travail d'analyse des trajectoires historiques de l'unité urbaine de Paris, la période étudiée est de 70 ans. Cette période se classe parmi les plus longues jamais analysée à large échelle. En ce qui concerne l'intervalle de temps entre les jalons, en raison du manque de données, un grand écart existe entre le 1er et le 2ème jalon, c'est-à-dire 33 ans. Les autres jalons sont quant à eux espacés de 5 ans. Il existe donc une distorsion d'analyse entre les 33 premières années durant lesquelles les changements d'usages n'ont pas pu être identifiés, et la période suivante pour laquelle les changements d'usages ont pu être suivis. Cette limite n'est que rarement discutée dans les études des changements d'usages des sols. Par exemple, Zhang et al. (2020) évaluent les impacts des changements d'usage des sols sur la qualité des habitats, en étudiant ces changements à l'aide de jalons espacés d'environ 20 ans. Grâce aux progrès technologiques, en particulier de numérisation et d'interprétation des photographies aériennes ou de cartes, les bases de données d'usages des sols sont progressivement complétées par de nouveaux jalons, améliorant ainsi l'échelle temporelle d'analyse. Néanmoins, le biais induit par le manque de disponibilité de données anciennes reste toutefois à modérer dans la mesure où l'ensemble de nos résultats montre que, dans la majorité des cas, les sols urbains n'ont pas connu de changement d'usage ou alors un seul changement au cours des dernières décennies.

#### **5.4. Vers une pédologie prédictive en milieu urbain par la caractérisation du facteur humain**

Un sol urbain est souvent perçu comme un sol très perturbé par de multiples successions d'usages et par conséquent, par de multiples pratiques humaines associées à ces usages au cours du temps. Ces pratiques sont, de plus, communément définies comme intenses et concentrées dans le temps et dans l'espace (Li *et al.*, 2018; Lorenz & Kandeler, 2005; Morel *et al.*, 2005; Yang and Zhang, 2015). Elles ne sont que très peu décrites dans la littérature et sont souvent englobées dans la notion générale de pression anthropique appliquée au sol (Douay *et al.*, 2008) qui traduit ce que nous avons défini comme le facteur humain de la pédogenèse des sols urbains. Ce chapitre présente une manière rationnelle de décrire des systèmes de successions d'usages, sous-usages et de pratiques associées permettant de caractériser d'une façon plus approfondie ce facteur humain.

Différents types de trajectoires historique d'usages ont été mis en évidence au cours de ce travail. Les analyses réalisées sur les bases de données et les analyses complémentaires ont montré que la majorité des trajectoires historiques décrites au sein des unités urbaines traduisent un mono-usage du sol au cours des périodes étudiées. Ces trajectoires représentées par un seul usage sont caractérisées par les usages « Habitat » et « Zone industrielle, commerciale, publique ou militaire" en centre-ville et par les usages « Habitat », « Terre agricole » et « Forêt » en périphérie. De plus, quand un changement d'usage s'opère, il traduit généralement l'urbanisation d'un sol agricole. En outre, il a été remarqué que lorsque les sols sont urbanisés, ils restent généralement sous le même usage au cours des décennies qui suivent. Le centre-ville souvent qualifié comme une zone très dynamique en termes de changement d'usage n'est que très peu impacté par ces événements au cours de ce dernier siècle. Contrairement à ce qui est classiquement décrit (Schwartz *et al.*, 2015), la plupart des sols urbains ne sont donc pas issus d'importantes superpositions d'usages. Ainsi, grâce à l'ensemble du travail établi dans ce chapitre, il est possible de proposer, sur le dernier siècle, 4 trajectoires représentatives de l'unité urbaine d'une ville française ainsi que leurs pratiques humaines associées (Figure 26).

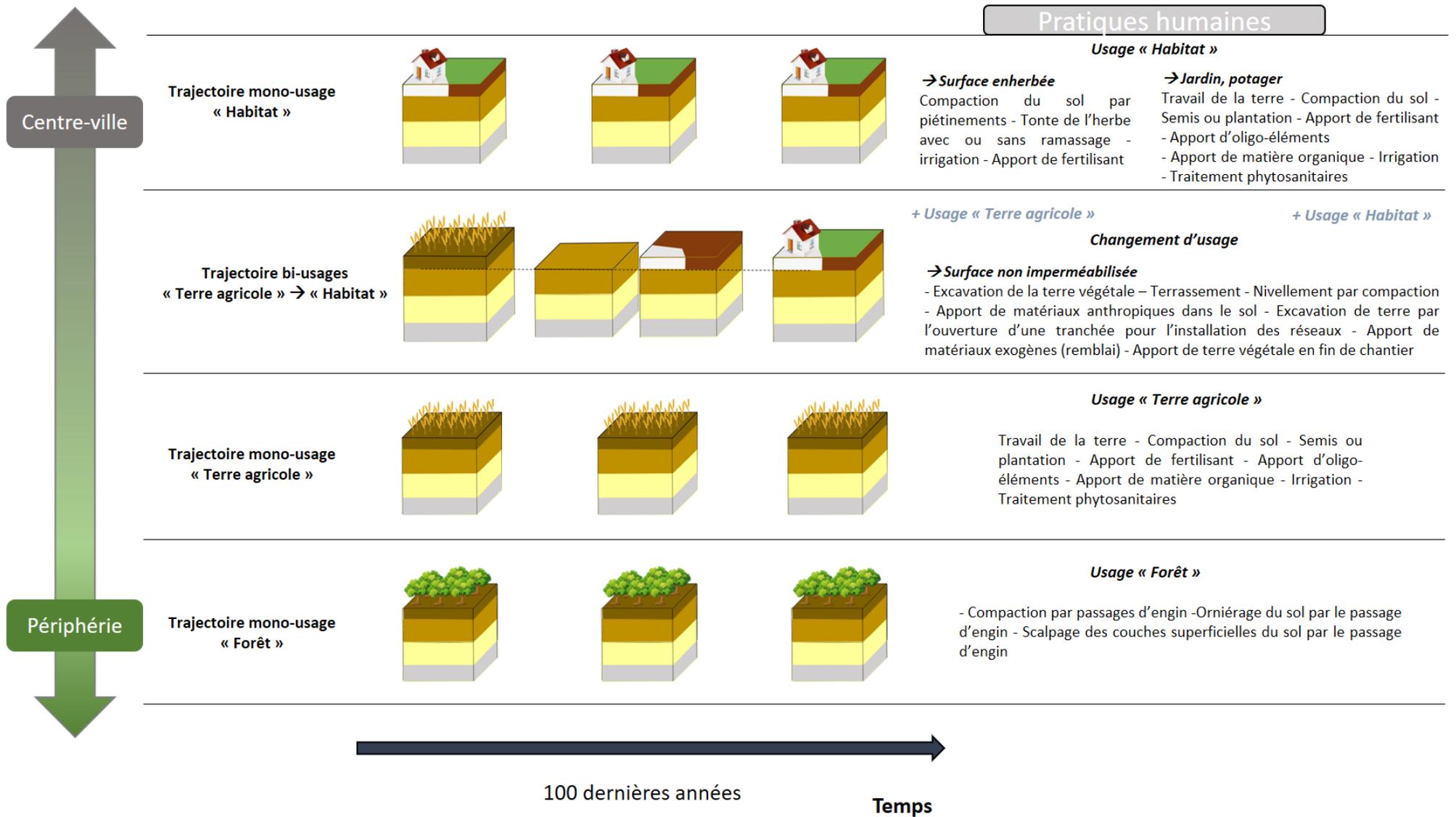


Figure 26 : Proposition de trajectoires historiques d'usages représentant l'unité urbaine d'une ville française sur les 100 dernières années ainsi que les pratiques associées

L'identification des trajectoires historiques, ainsi que des pratiques humaines associées, est un premier pas vers une caractérisation du facteur humain. Or, moyennant l'hypothèse que ce facteur explique les principales caractéristiques bio-physico-chimiques du sol (Blanchart, 2018, Lehmann & Stahr, 2007), chaque sol urbain de trajectoire historique d'usages et de pratiques similaires devrait présenter des caractéristiques semblables. La caractérisation du facteur humain de la pédogenèse des sols urbains, par l'analyse de leur trajectoire historique d'usages, constitue ainsi le préalable indispensable vers une approche de cartographie prédictive à large échelle des propriétés des sols urbains.

## 6. Conclusion

Ce travail représente une première étape dans la caractérisation du facteur humain. Il permet d'apporter des connaissances nouvelles sur ce facteur d'influence spécifique aux sols des milieux urbains. Par une description des trajectoires historiques et une traduction de ces trajectoires en pratiques humaines, la nature de la pression anthropique sur les sols urbains a été affinée et précisée. L'ensemble des analyses a révélé des trajectoires historiques au sein des unités urbaines qui correspondaient le plus souvent à un mono-usage du sol. De plus, les trajectoires avec changement d'usage, sont majoritairement composées d'un seul changement au cours des différentes périodes étudiées (30 à 70 ans). La nature des changements d'usage est dépendante de leur localisation par rapport au centre-ville et traduit la dynamique d'urbanisation. Le faible nombre de trajectoires historiques nécessaire pour décrire la majorité de la superficie d'une unité urbaine laisse envisager la possibilité de réaliser un zonage préliminaire des sols urbains en fonction de ces trajectoires. Dans un objectif de pédologie prédictive, l'enjeu est maintenant d'associer à ces trajectoires d'usages et de pratiques les impacts physico-chimiques qu'elles engendrent sur les sols. À ce titre, des travaux d'évaluation de ces impacts sont nécessaires afin (i) d'apporter des connaissances supplémentaires sur les liens existants entre trajectoire historique des sols et leurs propriétés physico-chimiques, (ii) de pouvoir différencier les sols urbains à large échelle en fonction de leur trajectoire historique et leur état physico-chimique.

Ces réflexions conduisent alors à se poser les deux questions scientifiques suivantes :

- Comment évaluer l'impact d'une trajectoire historique au cours du temps sur les propriétés physico-chimiques du sol ?
- Quels liens existent-ils entre la trajectoire historique d'un sol et ses propriétés physico-chimiques ?

# Chapitre III : Mesures *in situ* de l'impact du facteur humain sur les propriétés physico-chimiques de sols urbains

---

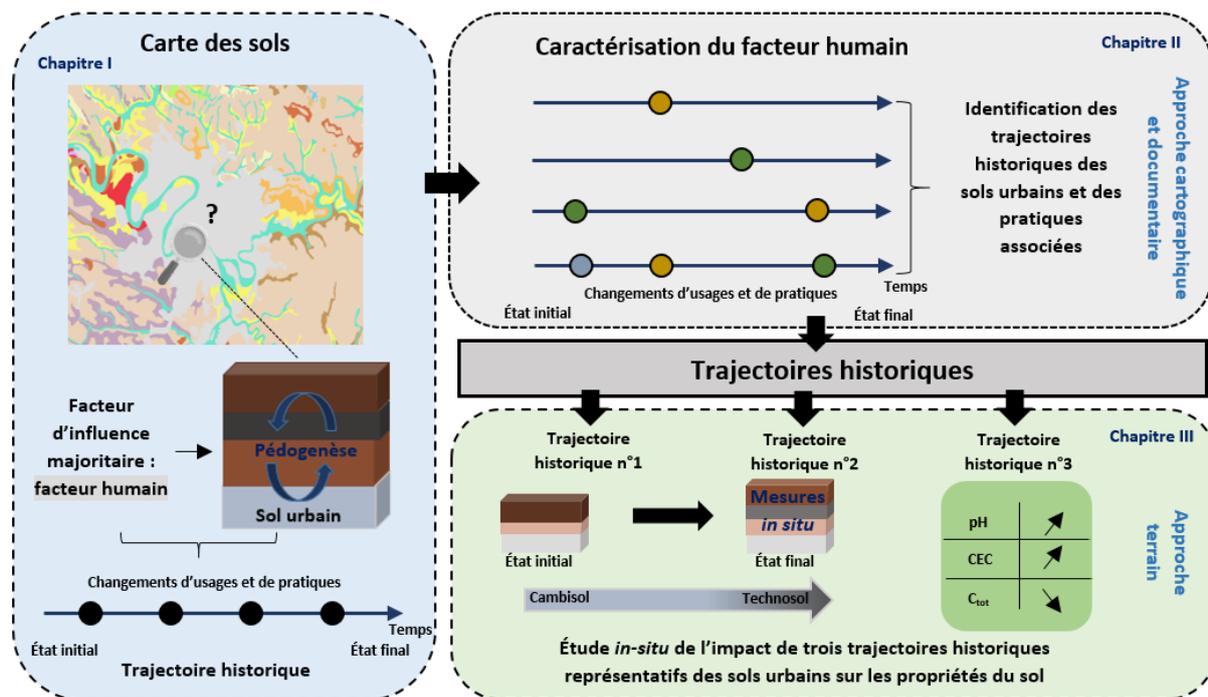
## 1. Principe général

L'analyse des trajectoires historiques et des pratiques associées a permis de mieux appréhender le facteur humain. L'objectif de ce chapitre est maintenant de décrire et d'évaluer, par une approche de terrain avec des mesures *in situ* (Figure 27), l'impact de ces trajectoires sur les propriétés physico-chimiques des sols urbains.

Ainsi, une méthode de caractérisation de ces impacts a été développée et illustrée pour trois trajectoires historiques représentatives des sols urbains français. Cette méthode de caractérisation comprend 3 étapes distinctes : (i) l'identification d'un sol de référence pour caractériser l'état initial, (ii) l'échantillonnage et la caractérisation des propriétés des sols sur site et (iii) la déduction de l'impact sur les propriétés physico-chimiques du sol en fonction de la trajectoire historique étudiée.

Les trois trajectoires historiques retenues dans cette démarche ont été choisies pour répondre à des enjeux ciblés et à des problématiques se situant au cœur de certaines politiques d'aménagement (péri)urbain :

- ➔ La première trajectoire historique choisie se focalise sur les espaces de friche industrielle. L'étude de cette trajectoire apporte des éléments de réponse aux enjeux sanitaires et environnementaux liés à la gestion des sites et sols pollués. Les friches industrielles constituent, en effet, des zones d'intérêts pour les aménageurs dans un contexte de raréfaction des surfaces disponibles en ville.
- ➔ La seconde trajectoire étudiée cible les espaces urbains destinés à l'agriculture urbaine. Ces espaces présentent des enjeux sanitaires forts liés à la consommation des produits et à la présence du public dans ces zones.
- ➔ La troisième trajectoire se veut représentative de l'artificialisation croissante des terres agricoles. Il a été constaté que la majorité des surfaces de sols urbain ayant changé d'usages dans les dernières décennies est passée d'un usage agricole à un usage résidentiel dans les 6 villes françaises étudiées comme dans l'unité urbaine de Paris (cf. chapitre II). Dans le contexte du plan biodiversité et de sa stratégie du zéro artificialisation nette, l'étude d'une telle trajectoire « agricole -> bâti » apparaît donc judicieuse.



**Figure 27 : Schéma conceptuel de la démarche scientifique employée pour caractériser les sols urbains : mesures *in situ* de l'impact du facteur humain sur les propriétés physico-chimiques des sols urbains**

## 2. Présentation des sites retenus

Les sites retenus ont été choisis pour répondre aux enjeux urbains décrits précédemment mais aussi en raison de leur facilité d'accès et d'une connaissance préalable de l'historique d'usages de ces sols.

### 2.1. Terres industrielles de la station expérimentale de Brabois, Vandœuvre-lès-Nancy (Nti)

#### 2.1.1. Justification du choix de site

La station expérimentale de Brabois est située à Vandœuvre-lès-Nancy dans le département de la Meurthe-et-Moselle (54). Cette station, créée de 1996 à 1999, est composée de 60 bacs lysimétriques contenant 3 terres industrielles d'origines différentes (Figure 28). Ces terres sont issues de deux anciennes cokeries et d'une ancienne usine à gaz. Des expériences de phytoremédiation et de bioremédiation ont été pratiquées sur ces terres durant les premiers mois suivant leur installation. À la suite de ces expériences et jusqu'à aujourd'hui, l'intégralité des bacs lysimétriques ont été laissés sous couvert végétal spontané sans aucune intervention humaine, soit durant près de 25 ans. Ce site, avec ses différents lysimètres, illustre donc une trajectoire historique de type friche industrielle abandonnée.

Cette station expérimentale a également été choisie en raison du suivi expérimental qui y a été mené depuis son installation.



**Figure 28 : Vues d'ensemble de la station expérimentale de Brabois (Vandœuvre-lès-Nancy)**

#### *2.1.2. Terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt (54310)*

La première terre industrielle analysée est issue de l'ancienne cokerie d'Homécourt qui a cessé son activité en 1981. Au total, 3 tonnes de terre d'horizon de surface ont été prélevées sur cette friche industrielle. Après un tamisage à 50 mm et une homogénéisation, cette terre a ensuite été installée, de manière totalement aléatoire, dans 24 bacs lysimétriques en PVC (L 80 x l 60 x h 40 cm) au cours de l'année 1996. À cette époque, un échantillon homogène de cette terre a également été prélevé et ses propriétés physico-chimiques avaient été caractérisées. Un suivi complémentaire des propriétés physiques et chimiques de cette terre industrielle a été effectué près de 20 ans après en 2015 à l'issue d'un projet doctoral (Dagois, 2015). L'ensemble des données acquises a montré que cette terre présente des contaminations en HAP et en métaux.

#### *2.1.3. Terre industrielle issue de la cokerie de Thionville (57100)*

La deuxième terre industrielle étudiée est issue de l'ancienne cokerie de Thionville, ayant cessé ses activités en 1974. Elle a été installée, en 1999, dans 12 bacs lysimétriques en PVC (L 80 x l 60 x h 40 cm) de manière aléatoire. Prélevée au sein de l'horizon de surface de la friche, cette terre a été tamisée à 20 mm et homogénéisée au cours de son installation. Des analyses visant à préciser les propriétés physico-chimiques de ces terres ont été effectuées en 1999 et en 2015. Ces terres présentent également des contaminations en HAP et en métaux.

#### *2.1.4. Terre industrielle issue d'une usine à gaz d'origine confidentielle*

La troisième terre industrielle a été prélevée au sein d'une ancienne usine à gaz dont la localisation est confidentielle. 12 bacs lysimétriques en PVC (L 80 x l 60 x h 40 cm) remplis de manière aléatoire avec cette terre tamisée à 50 mm ont été installés en 1998. Ces terres ont la particularité d'avoir été chaulées (*i.e.* à hauteur de 2% massiques) au cours de leur installation pour des raisons expérimentales. De la même manière que pour les deux précédentes terres industrielles, un échantillon de cette terre a été caractérisé lors de sa mise en œuvre, puis une caractérisation des propriétés des terres contenues dans les 12 lysimètres a été réalisée en 2015. Cette terre présente des contaminations en HAP et en métaux.

## **2.2. Potager du Roi de Versailles (V<sub>he</sub>)**

### *2.2.1. Justification du choix de site*

Le Potager du Roi de Versailles, situé dans le département des Yvelines (78), est un site classé monument historique et jardin remarquable. Conçu au XVII<sup>ème</sup> siècle pour fournir la table du roi de France en fruits et en légumes, ses usages ont perduré jusqu'à aujourd'hui. Ce jardin, réalisé entre 1678 et 1683, a la particularité d'être très documenté depuis cette époque (construction, suivi des pratiques). Ce site possède une trajectoire historique représentative des espaces verts urbains destinés à un usage d'agriculture urbaine.

### *2.2.2. Historique du site et définition de sa trajectoire historique*

Les recherches historiques ont montré que le Potager du Roi a été construit sur un pré marécageux (De la Quintinie, 1680). Lors de sa construction, le sol naturel initial a été assaini par ajouts successifs de remblais impliquant une rupture brutale de la pédogenèse en place. Le premier remblai apporté est issu de la construction de la pièce d'eau des Suisses où des travaux d'aménagement se sont déroulés en parallèle de la construction du Potager du Roi. Une couche de 3 à 4 mètres d'alluvions et de sables de Fontainebleau a alors été apportée pour assainir le site. Dans l'objectif de fertiliser le sol, une seconde couche d'épaisseur inconnue de limons des plateaux issus de la colline de Satory, située à proximité du site, a été ajoutée. Ces travaux ont donc finalement recréé un nouveau sol qui a été le support de différentes pratiques d'agriculture urbaine jusqu'à aujourd'hui. Différentes successions de pratiques représentant des trajectoires historiques différentes ont pris place pour gérer les cultures potagères, d'arbres fruitiers, d'alternances de ces cultures et assurer le déplacement au sein du site grâce à des « allées » (Figure 29).

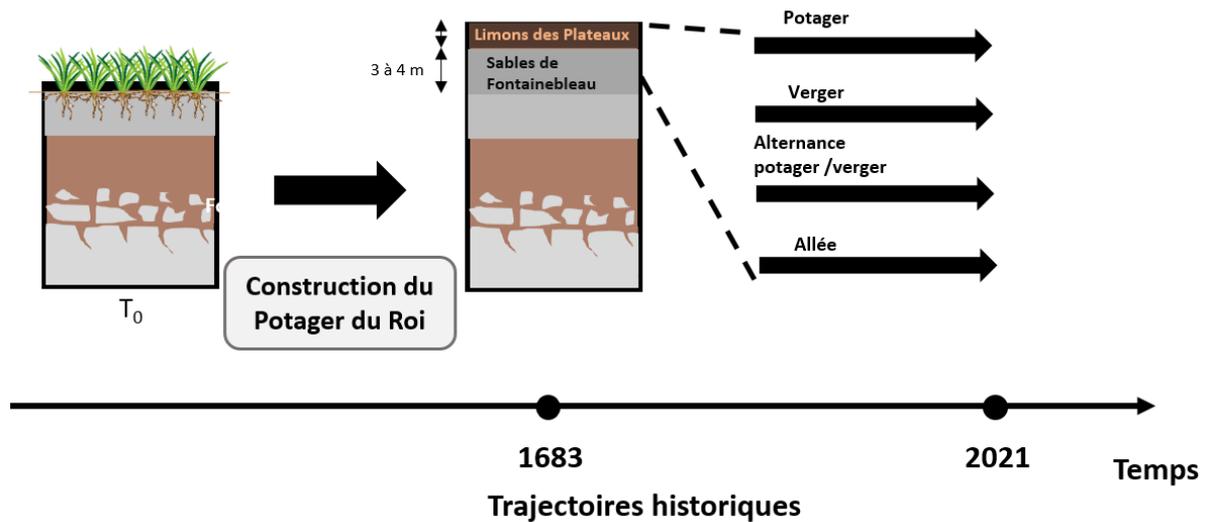


Figure 29 : Trajectoires historiques représentées sur le site du Potager du Roi de Versailles

## 2.3. Quartier de Bel Air à Montreuil ( $M_{ah}$ )

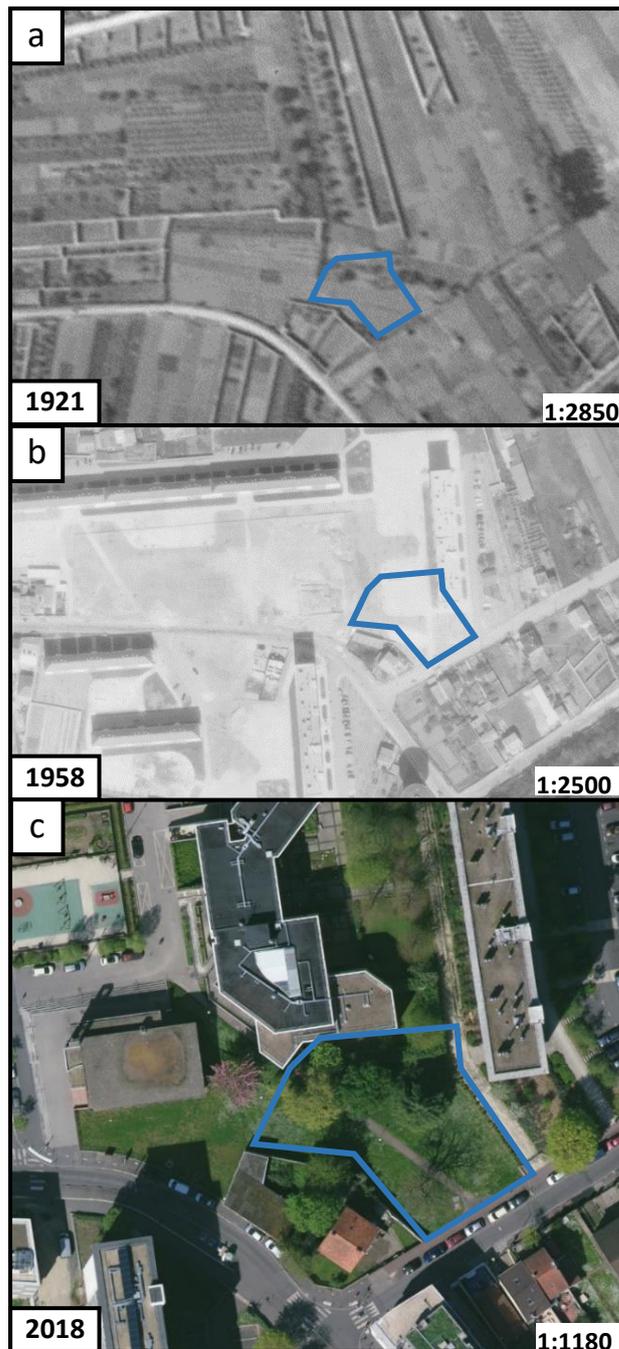
### 2.3.1. Justification du choix de site

Le site d'étude du quartier du Bel Air se situe dans la commune de Montreuil dans le département de Seine-Saint-Denis (93) en petite couronne de la ville de Paris. Ce site, autrefois dédié à l'agriculture a été urbanisé par de l'habitat collectif au milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. Il reflète ainsi l'urbanisation des terres agricoles.

### 2.3.2. Historique du site et définition de sa trajectoire historique

Les recherches historiques effectuées grâce à une analyse de photographies aériennes via le site « Remonter le temps » de l'IGN (<https://remonterletemps.ign.fr/>), montrent que le site d'étude est passé d'un usage agricole à un usage habitat en 1958. Le site a alors subi de profondes transformations pour devenir une zone résidentielle d'habitat collectif présente encore aujourd'hui (Figure 30). Au sein de cette zone, une surface non imperméabilisée au cours des travaux d'aménagement a été identifiée. Cette surface constituera dans la suite du manuscrit la zone d'étude du quartier de Bel Air.

La trajectoire du site du quartier de Bel Air est une trajectoire ayant donc connu un seul changement d'usage qui illustre le passage d'une terre agricole vers une zone résidentielle. Cette trajectoire représente les plus grandes surfaces de sols urbains ayant changé d'usage au cours des dernières décennies dans les villes françaises (cf. chapitre 2).



**Figure 30 : Évolution au cours du temps, du site d'étude (polygone bleu) situé dans le quartier de Bel Air : zone agricole (a), zone en cours de construction (b), zone résidentielle (c). Ces photographies aériennes sont issues du site « Remonter le temps » de l'IGN (<https://remonterletemps.ign.fr/>)**

### 3. Méthode employée

La méthode employée pour caractériser les impacts d'une trajectoire historique sur les propriétés physiques et chimiques des sols a été développée puis appliquée sur les trois sites d'études précédemment décrits. Cette méthode est composée de quatre étapes distinctes de travail, présentées par la suite.

#### 3.1. Identification d'un sol de référence

Pour évaluer l'impact de la trajectoire historique étudiée sur les propriétés physico-chimiques du sol, l'identification d'un sol de référence ( $T_0$ ) est essentielle. Ce  $T_0$  représente le type de sol présent sur le site à l'état initial, c'est-à-dire au départ de la trajectoire historique étudiée. Cet état initial est caractérisé par une dynamique pédologique antérieure (anthropique ou non). Pour l'identifier, une approche géologique combinée à une approche pédologique est nécessaire.

##### 3.1.1. Contexte géologique

La première étape dans la détermination du  $T_0$  est l'étude géologique du site. Cette étude permet de déterminer le matériau parental sur lequel le sol se développe naturellement au cours du temps. La géologie des sols en France est connue sur l'ensemble du territoire français. Le *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* (BRGM) met ainsi librement à disposition (i) la carte géologique du territoire national à l'échelle 1/50000 via le site infoterre et (ii) la Banque du Sous-Sol (BSS) qui répertorie et fournit des informations dont des coupes géologiques issus d'ouvrages et travaux souterrains. Ces sources de données permettent ainsi de déterminer la géologie du site étudié.

##### 3.1.2. Contexte pédologique

La seconde étape dans la détermination du  $T_0$  est de caractériser le type de sol se développant sur la couche géologique précédemment identifiée. Hors zone urbaine, le groupement d'intérêt scientifique sur les sols (GIS Sol) via son programme inventaire, gestion et conservation des sols (IGCS) gère à l'échelle nationale les référentiels régionaux pédologiques (RRP). La carte des sols associée aux RRP est composée d'Unités Cartographiques de Sols (UCS) qui spatialisent les types de sols majoritaires caractérisant la couverture pédologique pour un type de substrat géologique donné et un contexte défini (*e.g.* topographie, hydrographie). Ces UCS n'existent, malheureusement, pas en milieu urbain. Néanmoins, par analogie avec les UCS présentes dans des conditions géomorphologiques similaires au site d'étude, il est possible de proposer, en milieu urbain, un type de sol probable, développé sur la couche géologique précédemment identifiée.

### 3.2. Échantillonnage et caractérisation des propriétés des sols des sites d'étude

Les propriétés physico-chimiques actuelles des sols en place ont été déterminées grâce à des prélèvements *in situ*. Ainsi, des campagnes de descriptions, d'échantillonnages et de caractérisation des propriétés physico-chimiques des sols ont permis de définir l'état du sol à l'issue de la trajectoire historique étudiée.

Ces campagnes d'investigation sur site ont fait l'objet d'un cadrage méthodologique en s'inspirant de travaux scientifiques préalables réalisés en zone urbaine (Blanchart, 2018). Les méthodes de prélèvements de la pédologie classique ont ainsi été adaptés au contexte urbain.

#### 3.2.1. Préparation de l'intervention sur site

En milieu urbain, les sites choisis pour les prélèvements sont souvent difficiles d'accès. Les autorisations d'accès aux sites sont ainsi difficiles à obtenir car la plupart des parcelles urbaines sont des parcelles privées dont les propriétaires peuvent se montrer réticents vis à vis d'investigations souvent invasives (creusement de fosses pédologiques, réalisation de sondages à la tarière). De plus, l'environnement urbain est parfois très dense compliquant ainsi l'accessibilité au site. Il est, en effet, parfois difficile voire impossible d'y faire acheminer le matériel nécessaire (*e.g.* mini pelle) pour observer et échantillonner les sols sur le site ciblé. Pour anticiper ces difficultés, il est possible de recourir à des démarches administratives. Des arrêtés municipaux peuvent être édités pour faciliter l'accès à la parcelle en neutralisant des places de stationnement par exemple. Une anticipation de plusieurs semaines est nécessaire dès lors que les travaux sont réalisés à proximité de réseaux aériens ou souterrains. En effet, dans ce cas récurrent en milieu urbain, il est obligatoire d'effectuer une déclaration de projet de travaux (DT) et une déclaration d'intention de commencement de travaux (DICT) afin d'identifier la présence de réseaux et canalisations sur ou à proximité du site et d'informer leurs gestionnaires de la réalisation de sondages et/ou fosses.

#### 3.2.2. Zonage du site d'étude

Avant toute intervention, il est pertinent de cerner l'hétérogénéité spatiale du site. En effet, au sein d'un même site, des zones peuvent posséder des propriétés physico-chimiques différentes. Cette hétérogénéité peut s'expliquer par les différentes pratiques qu'un sol peut subir au sein d'un même usage. Pour identifier ces zones, une étude documentaire, complétée par des observations sur site, a été réalisée afin de rassembler les données géologiques, topographiques et historiques du site. Plusieurs sondages à la tarière ont également été effectués afin d'identifier ces zones.

### 3.2.3. Description des profils et échantillonnage des sols

Sur chaque zone identifiée, il est recommandé si possible, de réaliser trois sondages (répétitions). Ces sondages peuvent être effectués par ouverture de fosse pédologique (méthode destructive) ou par prélèvement à la tarière (méthode non destructive). Le sondage par fosse pédologique permet d'obtenir plus d'informations sur le fonctionnement et l'état des sols en place, de visualiser plus facilement les différents horizons et d'avoir accès à différents indicateurs auxquels le sondage à la tarière ne permet pas d'avoir accès (e.g. densité apparente, taux d'éléments grossiers, d'artéfacts, densité racinaire, traces d'hydromorphie, structure).

Pour chaque sondage, une description de profil de sol est réalisée. Ces informations sont accompagnées des propriétés morphologiques du profil de sol (e.g. structure, texture, activité biologique, degré de compaction), des caractéristiques de la zone d'étude (e.g. pourcentage de couverture végétale, espèces végétales présentes) et des conditions climatiques lors de la campagne de prélèvements.

Un échantillon moyen d'horizon est prélevé pour analyse. De plus, sur chaque fosse pédologique ouverte, un cylindre 251 cm<sup>3</sup> de sol a été prélevé par horizon observé et ramené au laboratoire pour une mesure de masse volumique apparente selon la norme NF X 31-511.

### 3.2.4. Préparation des échantillons

Chaque échantillon prélevé est séché à l'air pendant 48 heures puis tamisé à 2 mm afin de séparer la fraction fine de la fraction grossière.

### 3.2.5. Les propriétés physico-chimiques mesurées

Les mesures physico-chimiques réalisées sur la fraction fine de chaque échantillon correspondent à la caractérisation du pH, de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations échangeables, des teneurs en carbone (C), azote (N), phosphore « disponible » ( $P_{\text{Olsen}}$ ), des éléments majeurs (e.g. calcium (Ca), potassium (K), magnésium (Mg), sodium (Na), manganèse (Mn), fer (Fe), aluminium (Al)) et des éléments traces (e.g. cuivre (Cu), zinc (Zn), plomb (Pb), nickel (Ni), cadmium (Cd)). Ces mesures chimiques ont été complétées par une analyse granulométrique et une mesure de la conductivité électrique des sols. L'ensemble de ces mesures a été effectué par le Laboratoire d'Analyse des Sols (INRAE, Arras). Les normes et protocoles utilisés pour réaliser l'ensemble de ces mesures sont renseignés en annexe (Annexe 4).

### 3.3. Exploitation des résultats

L'ensemble des résultats d'analyses physico-chimiques a été interprété à l'aide de l'outil Rstudio. Les analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées à l'aide des fonctions `PCA()`, `fviz_pca_var()` et `fviz_pca_ind()` des packages `FactoMineR` et `factoextra`. La significativité des différences de moyennes entre les modalités a été testée grâce à des tests d'analyse de la variance (ANOVA) réalisés à l'aide la fonction `aov()` du package « stats ». Des diagrammes en boîte à moustache ont été réalisées grâce à la fonction `ggboxplot()` du package « ggpubr ». La valeur centrale d'une boîte à moustaches correspond à la médiane des valeurs considérées, les bords horizontaux du rectangle correspondent au 1<sup>er</sup> et 3<sup>ème</sup> quartile. Enfin les extrémités des moustaches correspondent aux valeurs extrêmes non aberrantes.

### 3.4. Identification des impacts de la trajectoire historique ciblée

Par la connaissance des caractéristiques pédologiques des sols de référence  $T_0$  à travers une revue de la littérature, il est possible d'évaluer l'impact de la trajectoire historique étudiée sur les propriétés physico-chimiques des sols. En les comparant avec les résultats obtenus suite aux investigations et aux prélèvements effectués sur site, des tendances d'évolution des paramètres physico-chimiques sont obtenues. Cette évolution est considérée comme étant la résultante de la trajectoire historique étudiée. L'impact global des activités humaines sur les propriétés du sol est ainsi identifié.

L'ensemble la méthode décrite est résumé par un schéma conceptuel (Figure 31).

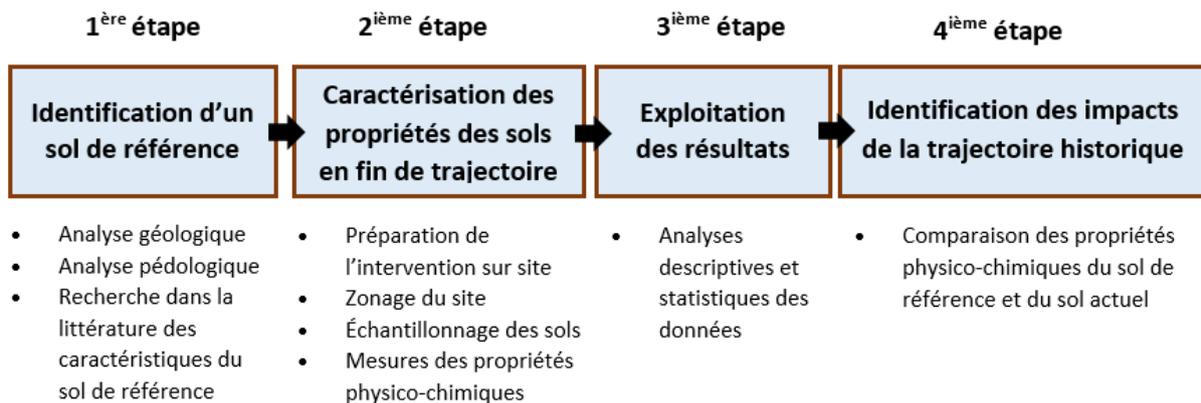


Figure 31 : Schéma conceptuel de la méthode employée

## 4. Résultats

### 4.1. Conséquences des trajectoires historiques des terres industrielles de la station expérimentale de Brabois sur les propriétés physico-chimiques des sols

#### 4.1.1. Identification et caractéristiques du sol de référence pour chaque terre industrielle

Le site d'étude de la station expérimentale de Brabois présente la particularité d'être constitué de matériaux déplacés de leur environnement initial. Ces matériaux ont été soumis à de fortes perturbations lors de leur mise en œuvre. De plus, leur délocalisation a impliqué une rupture brutale de la pédogenèse. Depuis près de 25 ans, de nouveaux sols se sont développés. En raison du manque de précisions quant à la reconstitution de ces sols en lysimètres, la méthode initialement décrite pour identifier le sol initial n'a pas pu être appliquée.

Ce sont les analyses initiales des paramètres physico-chimiques réalisées lors de la mise en place des terres dans les lysimètres qui ont servi à définir les référentiels respectifs. Les principales caractéristiques physico-chimiques des trois terres industrielles mises en place dans les lysimètres et étudiées sont résumées ci-dessous (Tableaux 12, 13 et 14). Ces caractéristiques regroupent la granulométrie (taux en argiles, limons et sables), les propriétés agronomiques (pH, CEC, taux en matière organique, en carbone organique, en azote organique, rapport C/N et taux en carbonate de calcium total), la teneur en fer total et en éléments traces métalliques (ETM).

**Tableau 12 : Propriétés physico-chimiques initiales de la terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>org</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
6,2	18,8	75,0	8,8	9,0	492,7	285,8	4,71	60,0	147,0
Éléments totaux majeurs			Éléments traces métalliques						
Fer			Cd	Cu	Pb	Ni	Zn		
g.100g <sup>-1</sup>			mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>		
20,8			1,44	33,0	319,0	60,8	1340,0		

**Tableau 13 : Propriétés physico-chimiques initiales de la terre industrielle issue de la cokerie de Thionville**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>org</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
11,5	37,7	50,8	8,1	8,1	108,7	63,2	2,3	27,5	64,0
Éléments traces métalliques									
Cr	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn				
mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>				
74,4	11,96	135,0	998,9	59,4	2849,0				

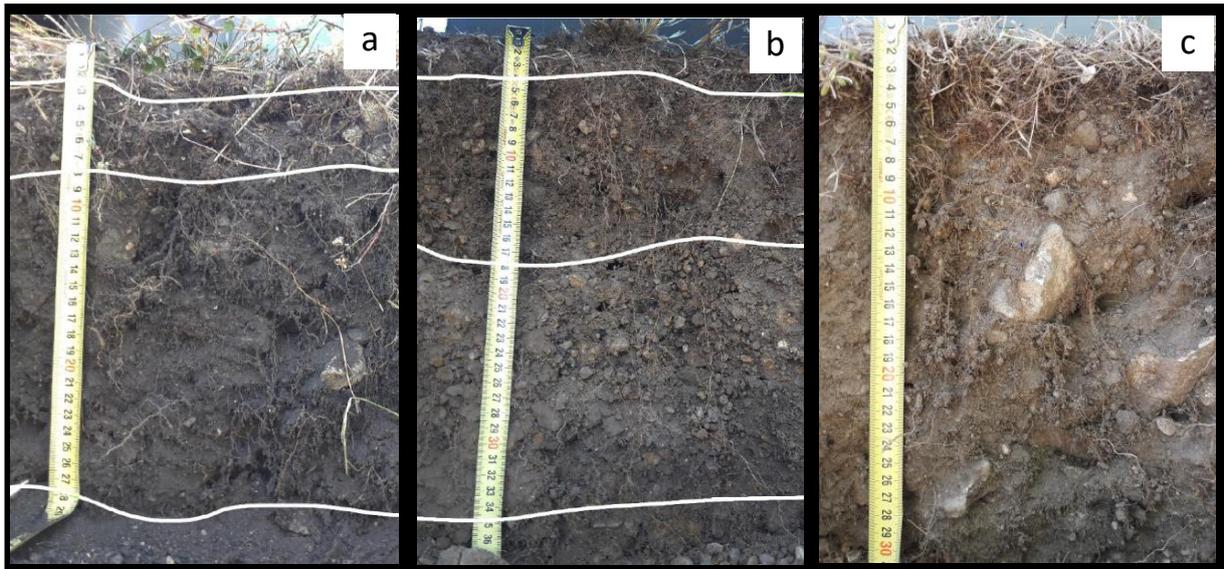
**Tableau 14 : Propriétés physico-chimiques initiales de la terre industrielle issue de la cokerie d'une usine à gaz d'origine confidentielle**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>org</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
10,8	20,7	68,5	8,3	8,30	88,4	51,4	1,2	42,5	209,0
Éléments traces métalliques									
Cr	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn				
mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>				
33,1	0,7	56,0	236,0	25,4	226,0				

#### 4.1.2. Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des trois terres industrielles (après 21 à 24 années d'abandon en végétation spontanée)

##### 4.1.2.1 Description des profils de sols

Au total, grâce à une coupe verticale de 9 bacs lysimétriques, 9 profils de sols ont pu être observés, soit 3 profils par terre industrielle étudiée nommé H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> pour les profils de sols issus de la cokerie d'Homécourt, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub> pour les profils de sols issus de la cokerie de Thionville et enfin, U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> et U<sub>3</sub> pour les profils de sols issus de l'usine à gaz (Figure 32).



**Figure 32 : Profils de sol observés lors de l'échantillonnage des trois terres industrielles : profil H<sub>3</sub> (a), profil T<sub>1</sub> (b), profil U<sub>3</sub> (c)**

L'observation de chaque profil de sol a mis en évidence des distinctions claires de différents horizons. Une pédogenèse s'est donc mise en place au fil du temps depuis l'installation de ces terres en bacs lysimétriques il y a plus de 21 ans. Trois couches ont été observées sur chacun des 9 profils de sol étudiés d'une profondeur commune de 30 cm.

Les profils H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> présentent des caractéristiques similaires. Ils ont une couleur uniforme « brun foncé » tout au long de la profondeur. La texture des horizons observés est sableuse. L'horizon de surface de ces trois profils est un horizon organique de faible épaisseur (*i.e.* quelques centimètres) dans lequel les débris de végétaux plus ou moins dégradés se sont accumulés. L'horizon intermédiaire est constitué à la fois de matière organique transformée et de matière minérale. Son épaisseur varie entre 6 et 10 cm entre H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub>. Enfin le 3<sup>ème</sup> horizon qui correspond à l'horizon le plus profond est essentiellement constitué de matière minérale. Son épaisseur varie entre 18 et 22 cm. Pour les 3 profils, les limites entre horizons ne sont pas marquées par des variations de couleur mais par des variations de densité racinaire et de structure. En effet, l'horizon de surface et l'horizon intermédiaire possèdent une forte densité racinaire par rapport à l'horizon le plus profond. De plus, l'horizon de surface présente une structure grumeleuse dans les 3 profils, tandis que l'horizon intermédiaire et l'horizon profond présentent une structure grumeleuse à particulaire. Concernant la compacité, les horizons de sols observés présentent une compacité caractérisée de moyenne à forte et croissante en fonction de la profondeur. La compacité de l'horizon de surface est décrite comme moyenne tandis que la compaction des deux autres horizons plus profonds est caractérisée comme forte. A contrario, l'activité biologique des horizons observés décroît en fonction de la profondeur. L'horizon de surface présente une forte activité biologique tandis que les horizons plus profonds présentent une activité biologique faible. La répartition des éléments grossiers est homogène sur les horizons intermédiaires

et profonds, avec des taux de l'ordre de 30 à 40 %. Ces éléments grossiers sont majoritairement d'origine anthropique. Aucune trace d'hydromorphie n'a été observée. Enfin, une odeur caractéristique d'une contamination aux polluants organiques de type HAP se dégage au sein des trois profils observés.

Les trois profils T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub> présentent également des caractéristiques similaires entre eux. Les horizons de sol observés présentent une couleur uniforme sur l'ensemble des trois profils, qualifiée de « brun clair » et une texture sablo-limoneuse. Une structure grumeleuse, identique à l'ensemble de ces horizons a été observée. La couche de surface de ces trois profils représente l'horizon organique composé de végétaux plus ou moins dégradés. Cet horizon a une épaisseur variant de 2 à 4 cm. L'horizon intermédiaire est composé de fractions organiques dégradées mais également de matière minérale. Il possède une épaisseur variant de 13 à 18 cm. L'horizon profond est quant à lui composé uniquement de matière minérale. Pour les 3 profils, les limites entre horizons sont marquées par des variations de densité racinaire. L'horizon de surface et l'horizon intermédiaire possèdent une densité racinaire développée, contrairement à l'horizon profond qui possède une densité racinaire très faible. La compacité suit la même tendance que celle observée sur les profils H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub>, elle semble croître en fonction de la profondeur d'horizon. Pour l'activité biologique la tendance est à la décroissance avec la profondeur. Les éléments grossiers, majoritairement d'origine anthropique, sont répartis uniformément sur l'intégralité des profils avec néanmoins une proportion légèrement plus faible pour les couches de surface. Enfin de légères traces de rouille ont été observées au niveau de l'horizon profond des trois profils et une odeur caractéristique d'une pollution organique de type HAP a également été détectée sur l'ensemble des horizons composant ces profils.

Les profils U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> et U<sub>3</sub> présentent également des caractéristiques similaires entre eux d'après les observations réalisées sur le terrain. La couleur décrivant les horizons observés est le « brun-gris ». La structure des différents horizons est identique et est qualifiée de grumeleuse. L'horizon de surface de ces trois profils est de faible épaisseur (*i.e.* quelques centimètres), et est constitué de végétaux plus ou moins dégradés. L'horizon intermédiaire est composé de matière organique et de matière minérale, d'une épaisseur variant de 12 à 19 cm. L'absence de matière organique au sein de l'horizon profond est une caractéristique commune des trois profils. Les limites entre horizons sont marquées par des variations de densité racinaire et de texture. En effet, l'horizon de surface et l'horizon intermédiaire possèdent une densité racinaire développée, contrairement à l'horizon profond qui possède une densité racinaire très faible. De plus, la texture est qualifiée de sableuse pour l'horizon de surface et de sablo-limoneuse pour les horizons intermédiaire et profond. De la même façon que pour les profils H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>3</sub> et T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> et T<sub>3</sub>, la compacité augmente avec la profondeur de l'horizon étudié. La compacité de l'horizon de surface est qualifiée de faible, celle de l'horizon intermédiaire est qualifiée de moyenne et celle de l'horizon profond est qualifiée de forte. L'activité biologique décroît en fonction de la

profondeur. Les éléments grossiers sont répartis uniformément dans les horizons intermédiaire et profond. Ces éléments grossiers sont majoritairement d'origine anthropique. Un pourcentage de représentation de ces éléments grossiers plus faible est observé sur l'horizon de surface. Enfin, aucune trace d'hydromorphie n'est observée sur ces horizons et une odeur caractéristique d'une pollution organique de type HAP est détectée sur l'ensemble des profils U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> et U<sub>3</sub>.

#### *4.1.2.2 Description des propriétés physiques et chimiques des terres industrielles*

Pour des raisons techniques et pour l'ensemble des 9 profils, les horizons de surface d'épaisseur centimétrique et présentant une densité racinaire forte n'ont pas été échantillonnés ni caractérisés. L'échantillonnage et la caractérisation des propriétés physiques et chimiques se sont donc portés sur les horizons intermédiaires et profonds des 9 profils de sol.

- **Approche descriptive des résultats obtenus sur site**

Les tableaux 15 et 16 présentent les résultats obtenus suite à cette phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés de chaque horizon observé. Ces tableaux ne sont cependant pas exhaustifs, l'ensemble des données complémentaires est présenté en annexe (Annexe 5).

**Tableau 15 : Données granulométriques et agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons 2 et 3 correspondent respectivement aux horizons intermédiaires et profonds cités précédemment (cf. 4.1.2.1))**

Profils	Horizons	Granulométrie					Propriétés agronomiques				
		Argiles g.kg <sup>-1</sup>	Limons fins g.kg <sup>-1</sup>	Limons grossiers g.kg <sup>-1</sup>	Sables fins g.kg <sup>-1</sup>	Sables grossiers g.kg <sup>-1</sup>	pH	C <sub>org</sub> g.kg <sup>-1</sup>	N <sub>tot</sub> g.kg <sup>-1</sup>	P <sub>Olsen</sub> g.kg <sup>-1</sup>	CEC cmol+.kg <sup>-1</sup>
<b>H1</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	129,6	115,1	165,4	274,9	315,1	8,1	250,1	4,0	1,3E-02	11,5
	<b>3 (8-30cm)</b>	96,4	120,0	159,2	273,5	350,9	8,2	266,4	3,6	2,2E-02	8,9
<b>H2</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	120,9	128,8	159,0	281,1	310,2	8,0	290,8	5,0	1,2E-02	11,2
	<b>3 (8-30cm)</b>	103,0	112,0	156,8	278,8	349,4	8,2	293,9	4,2	2,1E-02	8,3
<b>H3</b>	<b>2 (2-12cm)</b>	120,3	108,0	151,4	263,9	356,3	7,9	289,0	5,0	9,3E-02	12,7
	<b>3 (12-30cm)</b>	105,7	117,0	141,7	270,0	365,6	8,3	255,4	3,6	3,2E-02	8,9
<b>T1</b>	<b>2 (4-18cm)</b>	269,9	234,9	214,7	141,3	139,2	8,4	64,2	1,6	1,4E-02	17,8
	<b>3 (18-30cm)</b>	305,7	221,6	200,6	120,8	151,3	8,1	69,7	2,7	2,3E-02	22,4
<b>T2</b>	<b>2 (2-20cm)</b>	301,5	230,4	217,6	114,6	135,9	8,2	52,2	1,6	2,2E-02	17,4
	<b>3 (20-30cm)</b>	282,5	228,1	213,2	124,7	151,4	8,4	61,5	1,6	1,7E-02	16,8
<b>T3</b>	<b>2 (4-17cm)</b>	307,4	228,4	211,6	121,1	131,6	8,2	66,6	2,2	2,6E-02	19,8
	<b>3 (17-30cm)</b>	252,4	265,2	229,9	105,9	146,5	8,4	57,7	1,5	2,1E-02	17,5
<b>U1</b>	<b>2 (3-15cm)</b>	154,8	67,5	59,5	195,8	522,5	8,4	55,3	1,5	1,0E-02	12,4
	<b>3 (15-30cm)</b>	149,8	67,5	54,0	183,5	545,2	8,6	47,9	1,1	1,3E-02	11,0
<b>U2</b>	<b>2 (4-16cm)</b>	158,3	63,1	56,6	207,2	514,8	8,5	46,7	1,3	7,3E-03	12,6
	<b>3 (16-30cm)</b>	151,3	65,4	52,6	198,7	532,1	8,6	49,6	1,1	9,7E-03	11,7
<b>U3</b>	<b>2 (4-23cm)</b>	169,9	66,9	65,6	225,2	472,3	8,5	44,2	1,2	1,4E-02	12,3
	<b>3 (23-30cm)</b>	161,0	62,8	60,2	208,1	507,9	8,6	46,8	1,1	6,0E-03	11,6

**Tableau 16 : Données de concentrations en éléments majeurs et en éléments traces métalliques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons 2 et 3 correspondent respectivement aux horizons intermédiaires et profonds cités précédemment (cf. 4.1.2.1))**

Profils	Horizons	Éléments majeurs					Éléments traces métalliques				
		Al	Ca	Fe	K	P	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
		g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>				
<b>H1</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	3,4	10,5	9,7	0,5	2,5E-01	1,2	53,3	43,8	161,0	312,4
	<b>3 (8-30cm)</b>	3,4	11,0	9,2	0,5	2,5E-01	1,3	67,2	40,1	272,1	281,1
<b>H2</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	2,8	8,2	10,9	0,4	2,8E-01	1,4	58,3	46,9	166,2	380,4
	<b>3 (8-30cm)</b>	2,8	8,7	10,0	0,4	2,8E-01	1,5	73,8	46,7	180,4	341,0
<b>H3</b>	<b>2 (2-12cm)</b>	3,2	9,4	9,8	0,4	3,8E-01	1,5	100,4	44,6	176,8	380,1
	<b>3 (12-30cm)</b>	3,3	10,5	10,0	0,5	2,8E-01	1,4	67,0	42,6	146,5	323,1
<b>T1</b>	<b>2 (4-18cm)</b>	5,4	6,3	8,9	1,2	1,6E-01	6,0	105,3	54,4	678,3	1716,4
	<b>3 (18-30cm)</b>	5,3	5,3	8,7	1,2	1,6E-01	5,4	101,5	50,0	635,1	1709,8
<b>T2</b>	<b>2 (2-20cm)</b>	5,6	5,6	8,8	1,3	1,6E-01	5,4	104,4	54,7	663,4	1792,3
	<b>3 (20-30cm)</b>	5,3	6,0	8,8	1,2	1,6E-01	7,1	156,3	50,9	680,9	1698,1
<b>T3</b>	<b>2 (4-17cm)</b>	5,5	5,1	8,5	1,3	1,6E-01	5,3	103,4	52,0	658,5	1644,6
	<b>3 (17-30cm)</b>	5,4	6,0	9,1	1,2	1,6E-01	6,8	122,7	50,8	730,0	1753,3
<b>U1</b>	<b>2 (3-15cm)</b>	2,7	10,2	1,9	0,9	7,1E-02	0,6	55,3	13,9	226,5	163,6
	<b>3 (15-30cm)</b>	2,7	10,3	2,0	0,9	6,7E-02	0,8	56,6	23,5	230,8	255,3
<b>U2</b>	<b>2 (4-16cm)</b>	2,4	8,8	1,7	0,9	5,9E-02	0,6	51,4	20,9	201,4	215,4
	<b>3 (16-30cm)</b>	2,6	9,3	1,9	0,9	6,2E-02	0,7	55,9	22,5	203,1	222,6
<b>U3</b>	<b>2 (4-23cm)</b>	2,5	9,4	1,8	0,9	6,7E-02	0,7	56,6	21,2	207,4	234,6
	<b>3 (23-30cm)</b>	2,6	9,5	1,9	0,9	6,2E-02	0,7	55,0	24,5	225,9	245,5

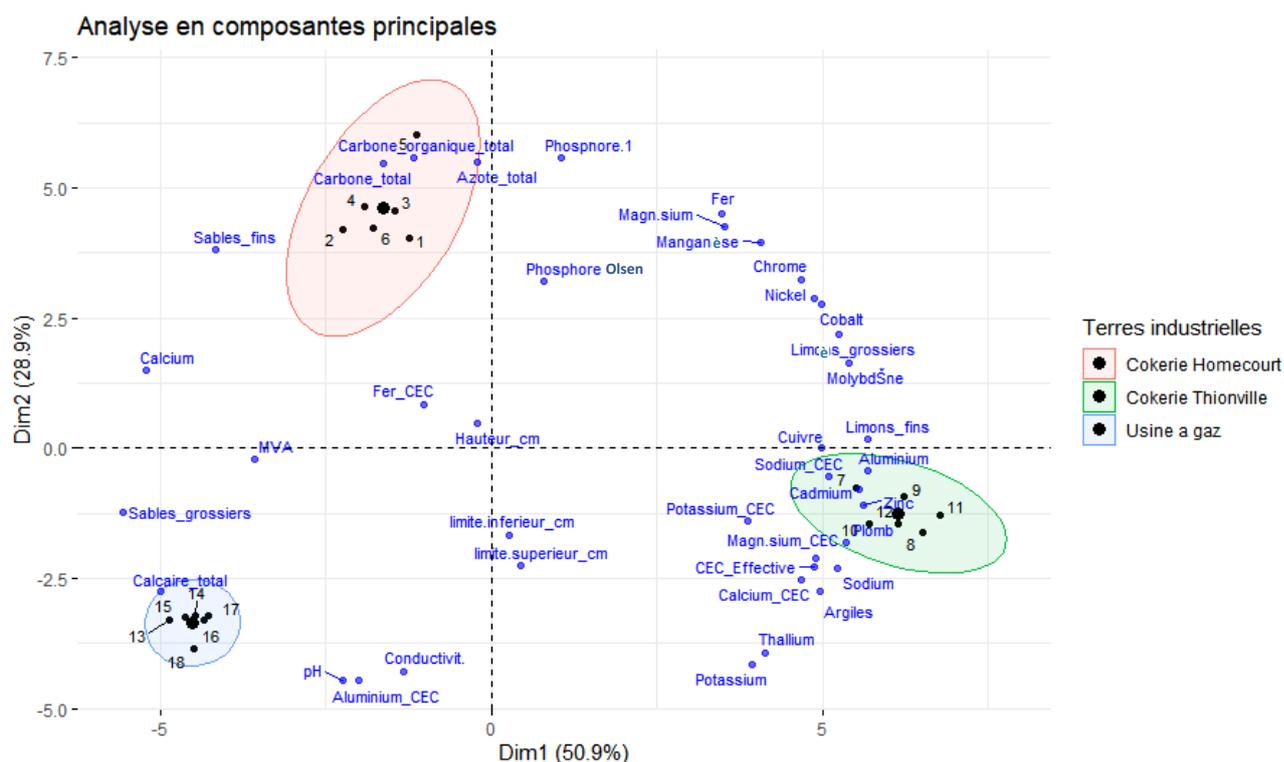
- **Approche détaillée des résultats obtenus sur site**

Les deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les paramètres physiques et chimiques de l'ensemble des horizons échantillonnés expliquent 79,8% de la variabilité totale (Figure 33). Situées proche de l'origine, certaines variables ne participent pas à expliquer les caractéristiques des sols étudiés dans la représentation de ces 2 axes. C'est le cas de la quantité de cation Fe<sup>2+</sup> échangeable (« Fer\_CEC »), la hauteur des horizons identifiés (« Hauteur\_cm ») et la profondeur des limites supérieures et inférieures des horizons (« limite.inférieur\_cm » et « limite.supérieur\_cm »). Les variables telles que la masse volumique apparente (« MVA »), les taux en sables grossiers, en aluminium, en calcium, en zinc, en plomb, en cadmium, en cuivre et en sodium (« Sables\_grossiers », « Aluminium », « Calcium », « Zinc », « Plomb », « Cadmium », « Cuivre » et « Sodium ») sont principalement expliquées par l'axe principal horizontal (50,9 % de variance exprimée). A contrario, les variables telles que le taux en carbone organique total, en azote total, en

phosphore, la conductivité, la quantité de cation  $Al^{3+}$  échangeable et le pH (« Carbone\_organique\_total », « Azote\_total », « Phosphore », « Conductivité », « Aluminium\_CEC » et « pH ») semblent principalement expliquées par le second axe principal vertical (28,9% de variance exprimée).

Cette représentation des variables renseigne également sur certaines corrélations. D'après cette ACP le carbone organique, l'azote total et le phosphore semblent être corrélés positivement. Par contre, il apparaît une corrélation négative de ces paramètres avec la conductivité, le pH et la quantité de cation  $Al^{3+}$  échangeable. Quelques éléments traces semblent être corrélés positivement comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le zinc. Ces éléments sont à l'inverse corrélés négativement avec le calcium, les sables grossiers et la MVA.

La juxtaposition de la représentation des individus au graphe de représentation des variables permet de définir les variables expliquant les caractéristiques principales de ces individus (Figure 33). Trois regroupements d'individus de faible variabilité sont représentés. Chaque groupe d'individus représente une terre industrielle étudiée. La représentation de ces individus montre donc que les trois terres industrielles se distinguent par certaines de leurs caractéristiques physico-chimiques. Pour la cokerie d'Homécourt, le regroupement semble lié à la teneur en carbone organique, en azote total et en phosphore. Pour la cokerie de Thionville le regroupement s'effectue autour des teneurs de certains ETM comme le plomb, le zinc ou encore le cadmium. Enfin pour ce qui est de l'usine à gaz le regroupement s'expliquerait essentiellement par la teneur en calcaire totale.



**Figure 33 : Analyse en composantes principales des données issues des profils (n=9) et horizons (n=18) des 3 types de terres industrielles étudiées.**

Les tests statistiques réalisés sur les teneurs en carbone organique et en azote total de la terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt montrent que ces teneurs sont significativement supérieures à celle des autres terres industrielles (Figure 34). Cette terre possède une teneur de 274,3 g.kg<sup>-1</sup>, ce qui correspond à une teneur environ 5 fois plus élevée que les teneurs moyennes des autres terres industrielles. Il en est de même pour la teneur en azote en moyenne de 4,24 g.kg<sup>-1</sup>, soit une teneur environ 2 fois plus élevée que celle des autres terres. En revanche, avec une moyenne de 0,03 g.kg<sup>-1</sup>, la teneur en phosphore Olsen de la terre issue de la cokerie d'Homécourt n'est pas significativement différente des autres teneurs mesurées pour les deux autres terres industrielles.

Concernant les teneurs en ETM, la terre issue de l'ancienne cokerie de Thionville se démarque puisque, d'après les tests statistiques réalisés, les teneurs en plomb, cadmium, zinc et cuivre sont significativement supérieures à celles des deux autres terres industrielles (Figure 35). De plus, une différence statistiquement significative est observée pour les teneurs en cadmium et en zinc entre la terre issue de la cokerie d'Homécourt et la terre issue de l'usine à gaz.

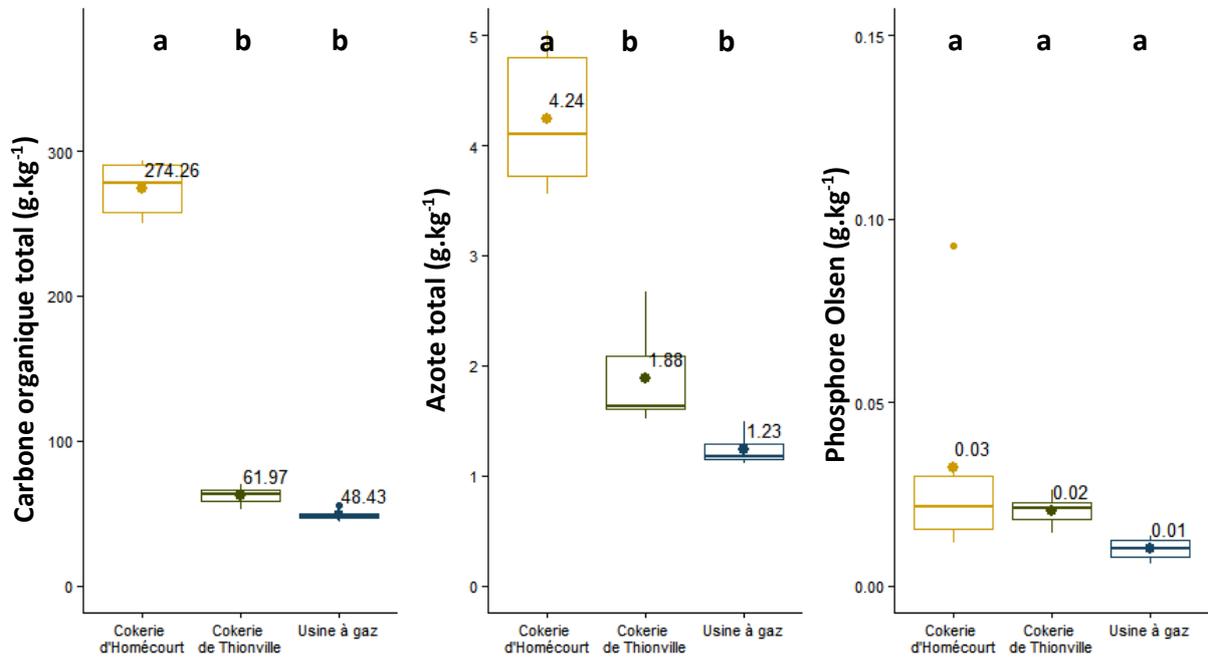


Figure 34 : Comparaison des teneurs (en  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) de carbone organique, d'azote total et de phosphore disponible des trois terres industrielles étudiées.

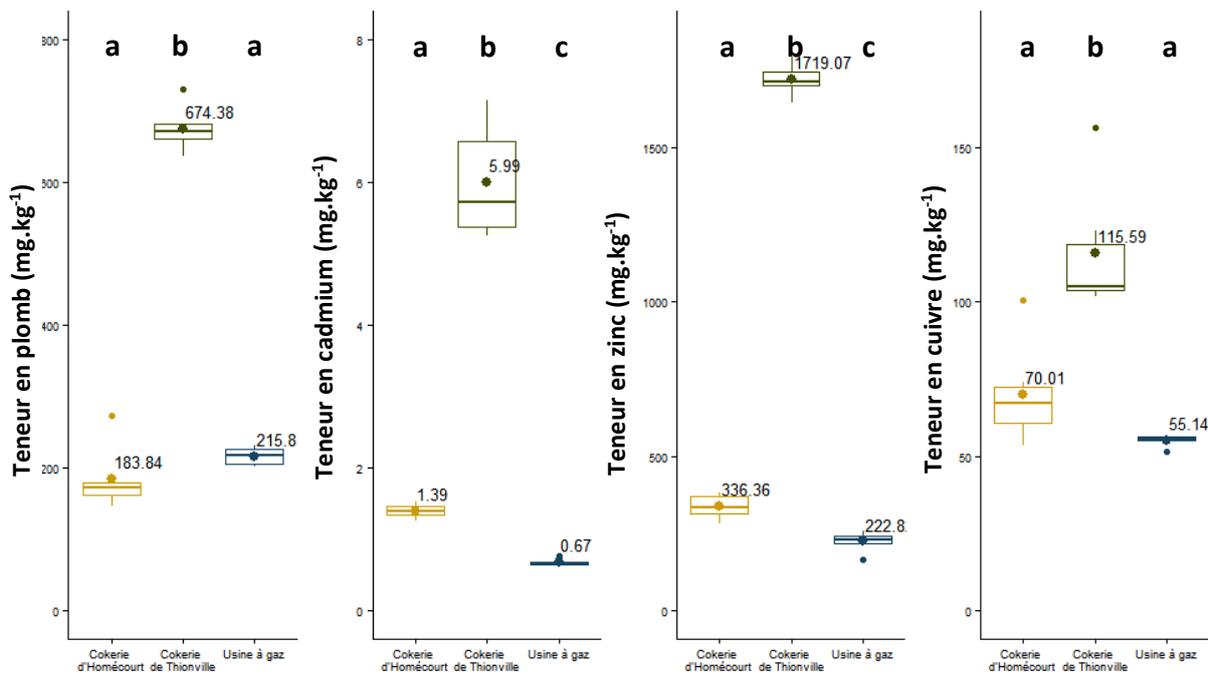


Figure 35 : Comparaison des teneurs (en  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) en plomb, cadmium, zinc et cuivre des trois terres industrielles étudiées

#### 4.1.3. Impacts de la trajectoire historique étudiée sur les propriétés physiques et chimiques des sols

Grâce au  $T_0$  identifié pour chaque terre industrielle, il est possible d'évaluer l'impact de la trajectoire historique de chaque terre industrielle par différence entre les mesures réalisées sur les 9 profils et celles effectuées au moment de la mise en œuvre de l'expérimentation. Les trois terres industrielles ont pour point commun d'avoir été laissées sous végétation spontanée depuis plus de 20 années. Les résultats suivants permettent donc d'illustrer les impacts physico-chimiques engendrés par une trajectoire d'industrialisation du sol puis d'abandon vers une friche industrielle avec reprise spontanée de végétation.

##### 4.1.3.1 Effet de la trajectoire étudiée sur la granulométrie des trois terres industrielles

Chaque teneur granulométrique moyenne des terres industrielles ( $n=6$ ) a été comparée à la teneur initiale connue (Figure 36). Une diminution de la fraction sableuse (*i.e.* fraction comprise entre 2 et 0,05 mm) a été observée pour les deux terres de cokeries. La fraction sableuse de la terre issue de l'usine à gaz est quant à elle restée stable. Une augmentation des teneurs en limons (*i.e.* fraction comprise entre 0,02 et 0,002 mm) des deux terres de cokeries ont été observées au cours du temps. A contrario, une légère diminution de cette teneur a été obtenue pour la terre issue d'usine à gaz. Une augmentation générale des teneurs en argiles (*i.e.* fraction comprise entre 0,002 à 0 mm) a quant à elle été observée.

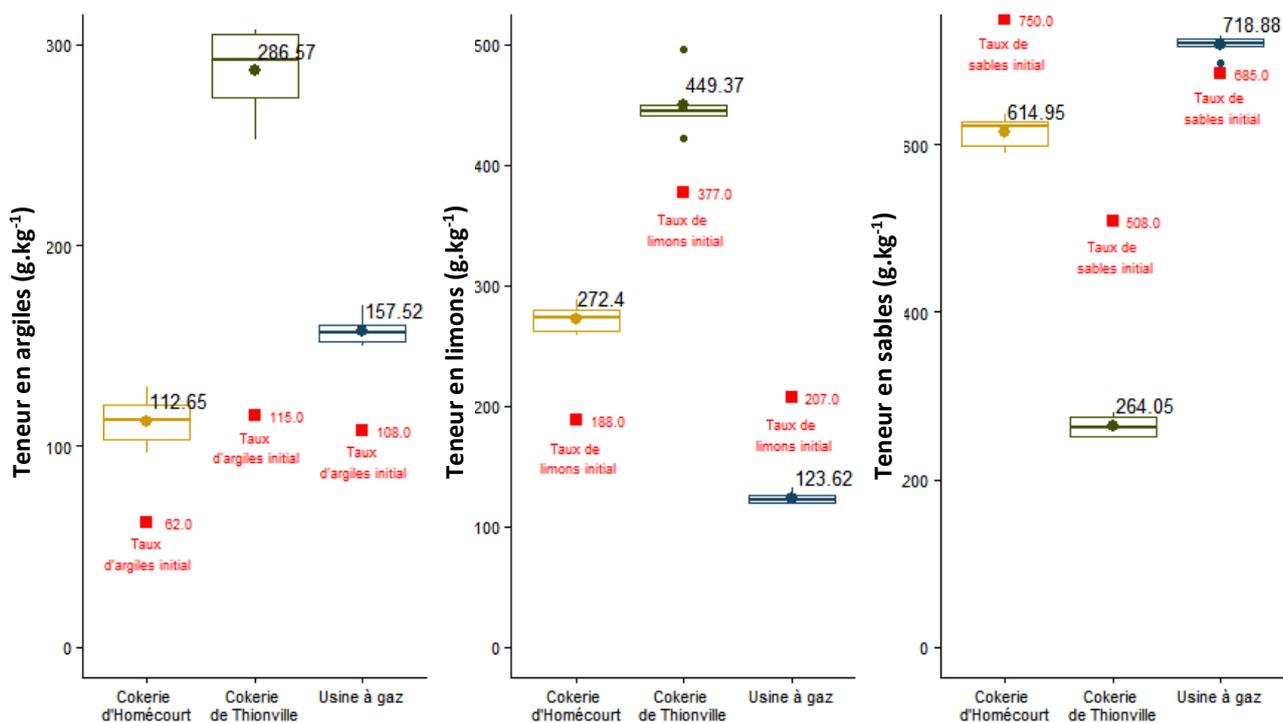


Figure 36 : Comparaison des teneurs moyennes d'argiles, de limons et de sables obtenues pour chaque terre industrielle (n=6 = 2 horizons x 3 profils), relativement aux valeurs initiales mesurées sur un échantillon unique mélangé (en rouge) de chaque terre industrielle

#### 4.1.3.2 Effet de la trajectoire étudiée sur les paramètres agronomiques des trois terres industrielles

La comparaison des paramètres agronomiques entre l'état initial et final montre globalement très peu de différences (Figure 37). Aucune tendance nette n'est détectée pour le pH. Seules quelques variations de quelques dixièmes d'unités sont mesurées. Une tendance plus nette est obtenue pour la CEC, qui augmente de quelques unités pour les terres industrielles de la cokerie de Thionville et de l'usine à gaz. Une augmentation moyenne plus faible de 1,26 cmol.kg<sup>-1</sup> caractérise la terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt. Le carbone organique et le rapport C/N décrivent la même tendance qui traduit une stabilisation de ces paramètres au cours du temps. Les valeurs correspondant à l'état initial de ces paramètres sont en effet, très proches des valeurs finales mesurées sur les trois terres industrielles. Enfin la teneur de calcaire total des sols présente des variations différentes selon les terres industrielles. Une diminution de cette teneur est observée pour les terres issues des cokeries d'Homécourt et de Thionville au cours du temps. A contrario la teneur de calcaire du sol issu de l'usine à gaz a augmenté.

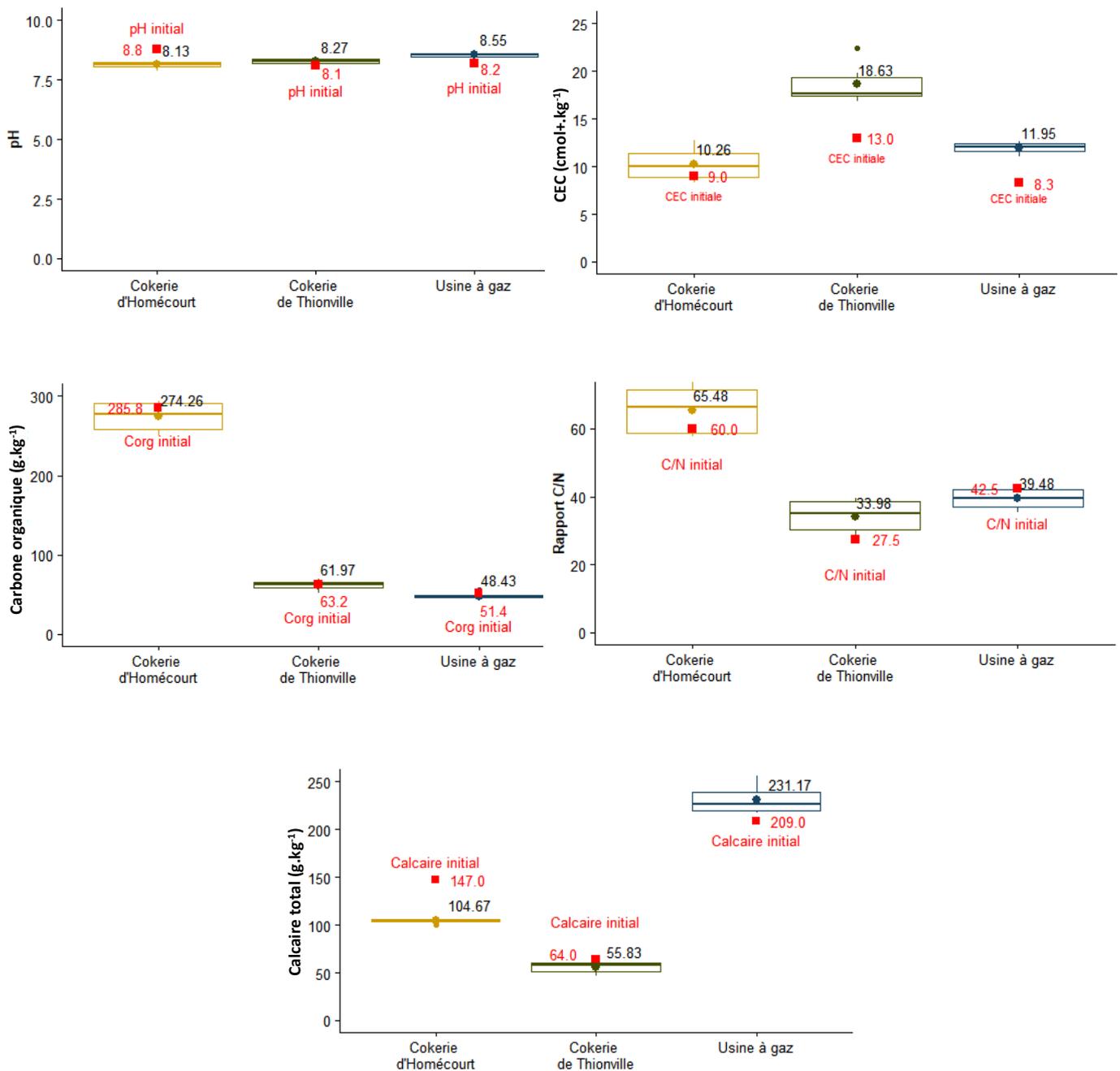


Figure 37 : Comparaison des paramètres agronomiques (teneurs en carbone organique, ratio C/N et teneur et calcaire total) obtenues sur site (n=6 = 2 horizons x 3 profils) relativement aux teneurs initiales (en rouge) de chaque terre industrielle

#### 4.1.3.3 Effet de la trajectoire étudiée sur les ETM des trois terres industrielles

Les teneurs en métaux (*i.e.* Pb, Cd, Cu, Zn) initiales et actuelles mesurées sur le sol issu de l'usine à gaz sont très similaires (Figure 38). A contrario, ces teneurs actuelles mesurées sur les deux sols d'anciennes cokeries pour le plomb et le zinc sont significativement plus faibles par rapport aux teneurs initiales. La quantité de cadmium de la terre issue de la cokerie de Thionville a également nettement diminué. À noter, qu'une tendance inverse est observée pour les teneurs en cuivre des terres de cokeries. En effet, une augmentation de cette teneur est observée pour la terre de cokerie d'Homécourt, tandis que nous observons une diminution de cette teneur pour la terre de cokerie de Thionville.

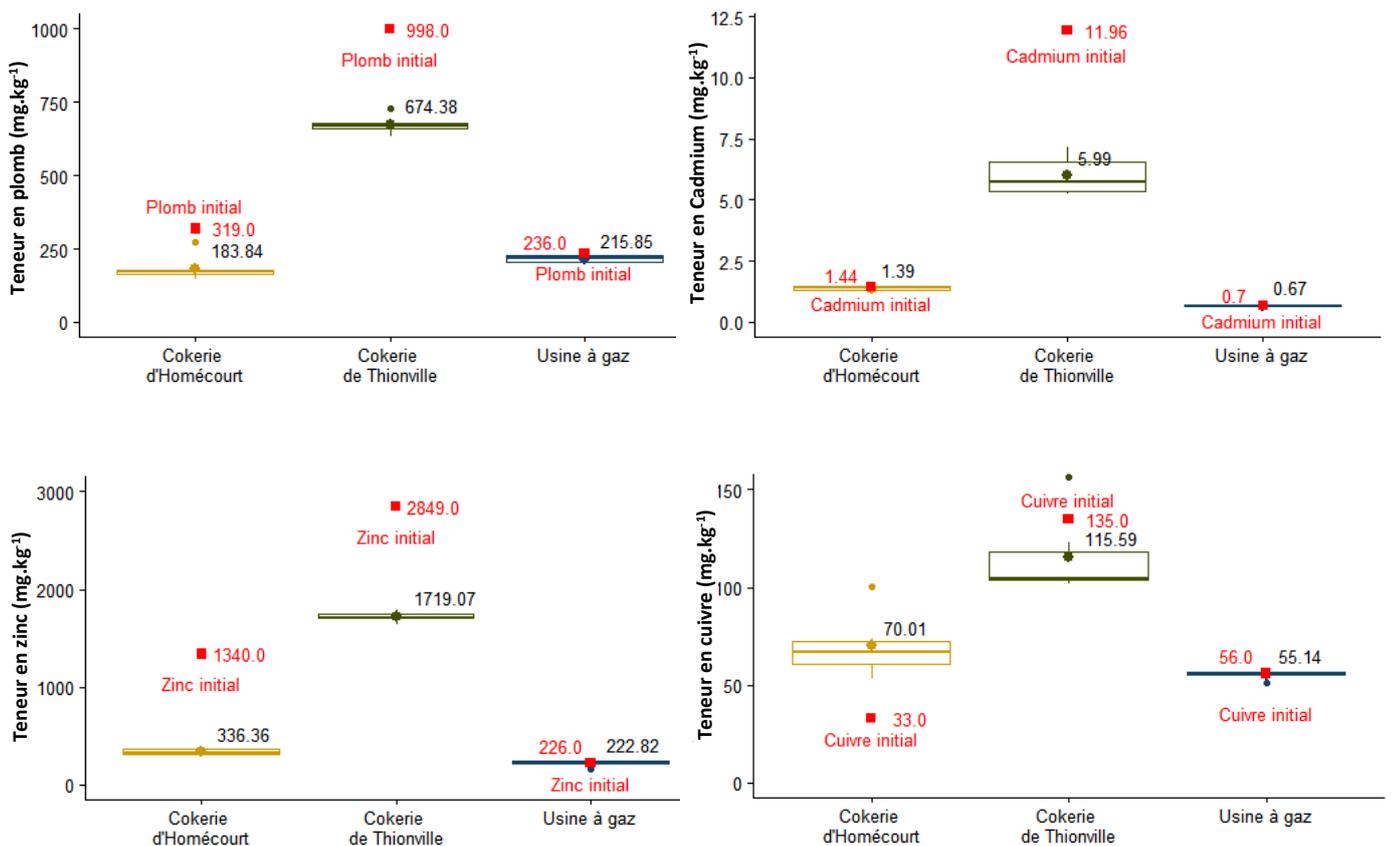


Figure 38 : Comparaison des teneurs (mg.kg<sup>-1</sup>) en ETM (plomb, cadmium, zinc et cuivre) obtenues sur site (n=6 = 2 horizons x 3 profils) et des teneurs initiales de chaque terre industrielle

## 4.2. Conséquences des trajectoires historiques du Potager du Roi de Versailles sur les propriétés physico-chimiques des sols

### 4.2.1. Identification et caractéristiques du sol de référence pour le Potager du Roi

L'étude du contexte géologique du site a permis de préciser la couche sur laquelle le sol initial, présent avant la construction du potager, s'est développé. D'après la carte géologique au 1/50 000 (feuille de Versailles) du BRGM, le sol initialement en place se serait développé sur des alluvions modernes (Figure 39) décrites dans la notice géologique comme constituées d'argiles fines ou sableuses, grises ou noirâtres avec amas de tourbes.

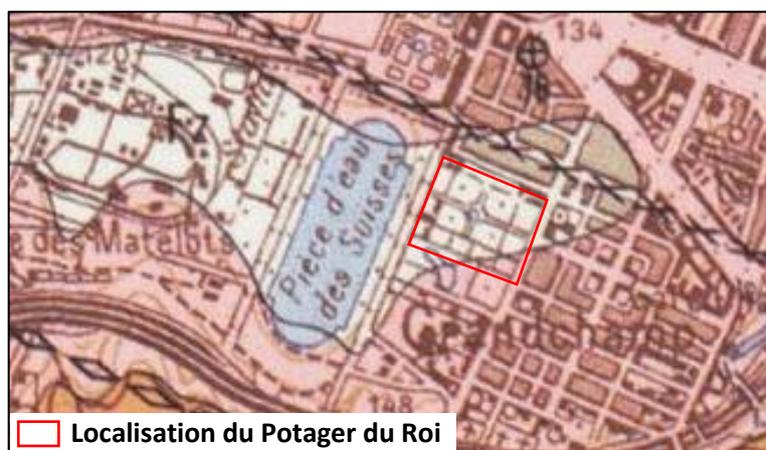


Figure 39 : Identification de la couche géologique sur laquelle le sol initial du Potager du Roi de Versailles s'est développé. Fz : alluvions modernes

Cette formation superficielle recouvre la formation Oligocène des sables de Fontainebleau. Les fiches décrivant les Unités Cartographiques de Sol (UCS) du Référentiel Régional Pédologique (1 / 250 000) a permis, quant à elle, de prédire le type de sol initial se développant sur ces alluvions modernes. La fiche UCS n°102 (Annexe 8) décrit les types de sols se développant dans des conditions similaires aux conditions présentes au sein du Potager du Roi. Ce sont les fluviosols qui représentent majoritairement les sols se développant sur ce type de formation géologique alluvionnaire.

Les caractéristiques générales des fluviosols ont été obtenues grâce à une lecture bibliographique. Une moyenne de quelques propriétés physico-chimiques des horizons de surface de 18 fluviosols différents, principalement localisés sous couvert forestier, a été extraite de cette analyse bibliographique (Chambre d'agriculture Charente-Maritime, 2014 ; Gajic *et al.*, 2006 ; Głąb et Gondrec, 2013 ; Głąb et Gondrec, 2014 ; Parat *et al.*, 2005 ; Riehl *et al.*, 2010). Ces moyennes serviront donc de référence  $T_0$  pour la suite de l'étude (Tableau 17).

**Tableau 17 : Propriétés physico-chimiques moyennes des couches de surface de 18 fluvisols**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3 tot</sub>
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
19,4	42,0	38,6	6,9	17,0	63,9	28,3	2,2	15,7	311,0
Écart type									
17,8	21,8	31,0	1,2	13,4	19,7	14,1	0,9	7,9	196,6

Les études historiques ont montré qu'un apport massif de remblai a été réalisé au-dessus de ce sol initial lors de la construction du Potager du Roi, modifiant ainsi, totalement les propriétés de l'horizon de surface du sol en place (De la Quintinie, 1680). Des alluvions modernes et sables de Fontainebleau auraient été apportés sur le sol suite au creusement de la « pièce d'eau des suisses » puis afin d'enrichir ces matériaux, des sols des limons des plateaux issus de sols agricoles du plateau de Satory auraient été apportés en surface. Pour préciser l'état initial du Potager post-construction, le choix a été fait de se baser sur la caractérisation d'un sol analogue au sol utilisé pour fertiliser le site. Des sols de limons des Plateaux ont donc été prélevés sur une fosse réalisée à la pioche dans la forêt domaniale de Verrières le Buisson (Essonne) à une dizaine de kilomètres du site d'étude en novembre 2020. Le prélèvement s'est effectué sur les 50 premiers centimètres de sol en écartant la litière forestière. La terre prélevée a fait l'objet de caractérisations physico-chimiques. Les propriétés obtenues à l'issue de cette caractérisation (Tableau 18) constituent l'état initial hypothétique post-construction du Potager du Roi. Ce choix et cette prise de position restent néanmoins discutables car certaines incertitudes n'ont pas pu être levées par les recherches historiques antérieures :

- Nous ne savons pas précisément si ces limons ont été mélangés ou mis en dépôt sur les premiers remblais alluvionnaires
- Nous ignorons quel horizon de sol limoneux des plateaux a été rapporté au Potager.

**Tableau 18 : Estimation des propriétés physico-chimiques de la couche de surface du sol initial du Potager du Roi après sa construction (apport de limons des plateaux)**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g. kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
21,6	73,1	5,3	4,9	8,5	19,1	11,1	0,8	14,2	< 1
Éléments totaux majeurs									
Al	Ca	Fe	Mg	Mn	K	Na	P		
g.100g <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>		
4,6	0,3	2,4	0,4	618,7	0,03	0,7	1,5		
Éléments traces métalliques									
Cr	Co	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	As		
mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>		
71,2	9,5	10,9	26,1	22,1	54,6	0,1	9,9		

#### 4.2.2. Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des sols du Potager du Roi de Versailles

##### 4.2.2.1 Description des profils des fosses pédologiques

Quatre trajectoires historiques distinctes ont été identifiées au sein du Potager du Roi de Versailles lors de l'étude historique du site. Le site a ainsi été subdivisé en plusieurs zones correspondant à des pratiques différentes en lien avec des usages différents (*i.e.* potager, verger, alternance potager/verger et allée, *cf.* Figure 29). Quatre fosses pédologiques ont été creusées, en mars 2018, pour illustrer ces quatre trajectoires historiques différentes. Dans la suite de ce travail, le « profil P » désignera le profil de la fosse pédologique creusée au sein d'une parcelle ayant depuis sa création servi à la culture de légumes (*i.e.* potager), le « profil V » celui de la parcelle réservée à la culture de fruits (*i.e.* verger), le « profil P/V » désignera le profil observé sur la parcelle qui a subi une alternance de culture potager/verger et enfin le « profil A » désignera le profil associé à la fonction d'allée assurant le déplacement au sein du potager (Figure 40).



**Figure 40 : Profils de sol observés au Potager du Roi de Versailles : profil P (a), profil V (b), profil P/V (c) et profil A (d)**

L'ouverture de la fosse correspondant au « profil P » sur 75 cm de profondeur a été perturbée par la présence de la nappe phréatique à environ 55 cm. Le « profil P » possède deux horizons distincts. Le premier horizon mesure 40 cm d'épaisseur et est très humifère. Il possède une couleur brune. Sa structure a été caractérisée de polyédrique à grumeleuse et sa texture de limono-argileuse. Le second horizon observé (de 40 à 75 cm de profondeur) présente une couleur plus claire, beige. Sa structure a été qualifiée de polyédrique et sa texture d'argilo-limoneuse. En termes de compacité ces deux

horizons ont une compacité très faible. Une riche activité biologique est également observée au sein de ces horizons. La teneur en éléments grossiers a été estimée entre 2 et 4 % au sein de ces horizons. Quelques éléments anthropiques ont été observés dans l'horizon de surface comme du plastique, de la brique, des morceaux de terre cuite ou encore de la céramique. Ces éléments grossiers sont d'origine naturelle pour le second horizon (*i.e.* galet, charbon). Quelques traces d'hydromorphie sont présentes sur ce profil. Enfin, aucune trace de pollution et aucune odeur n'a été détectée.

Trois horizons distincts ont été observés au sein du « profil V » d'une profondeur de 90 cm. L'horizon de surface, d'une épaisseur de 15 à 20 cm, est caractérisé par une couleur brune. Sa structure a été caractérisée de grumeleuse et sa texture d'argilo limoneuse. Le second horizon d'une épaisseur de 52 cm a une couleur qualifiée d'un mélange ocre et brun. Elle possède une structure grumeleuse et une texture argilo limoneuse. La couleur du troisième horizon est définie comme un mélange d'ocre et de beige. Sa structure est caractérisée comme polyédrique et sa texture de limono-argilo-sableuse. Les horizons ont été qualifiés de plus compactes que ceux du « profil P ». Les deux premiers horizons ont une compacité moyenne tandis que l'horizon le plus profond possède une compacité forte. L'activité biologique a été qualifiée de forte pour le premier horizon, de moyenne pour le second et de faible pour le troisième horizon. De faibles pourcentages d'éléments grossiers ont été identifiés au sein de ces horizons. Quelques éléments anthropiques ont été caractérisés dans les deux premiers horizons comme de la céramique, du verre ou de la terre cuite. Seuls des éléments d'origine naturelle ont été trouvés au sein du troisième horizon. Quelques traces d'hydromorphie ont également été observées en profondeur du profil. Enfin aucune trace de pollution et aucune odeur n'ont été relevées au sein de ce « profil V ».

L'observation du « profil P/V » a permis de distinguer deux horizons sur une profondeur de 70 cm. De même que pour le « profil P », l'analyse et l'observation de ce profil ont été perturbées par la présence de la nappe phréatique à environ 70 cm de la surface. Le premier horizon, d'une épaisseur de 15 cm, est caractérisé par une couleur brune. Sa structure est qualifiée de grumeleuse et sa texture de limono-argileuse. Le second horizon est légèrement plus clair que l'horizon de surface. Sa structure et sa texture sont identiques à celles du premier horizon. Concernant la compacité des deux horizons, celle-ci a été considérée faible. Une forte activité biologique caractérise l'horizon de surface. Le second horizon possède quant à lui, une activité biologique moyenne. Une présence d'éléments grossiers de l'ordre de 2 % a été observée au sein de ces deux horizons. Des éléments grossiers d'origine anthropique ou naturelle ont été identifiés. De plus, quelques traces d'hydromorphie ont été retrouvés en profondeur de la fosse pédologique. Enfin, aucune trace de pollution et aucune odeur n'a été identifiée le long de ce « profil P/V ».

Cinq horizons différents ont été observés au sein du « profil A » d'une profondeur de 100 centimètres. En partant de l'horizon de surface jusqu'à l'horizon profond, ces horizons ont respectivement une épaisseur de 13, 13, 9, 28 et plus de 37 cm. Leur couleur respective est contrastée allant de la couleur brune pour le premier horizon au beige-blanc pour le quatrième. La structure de ces couches varie également, la structure de l'horizon de surface est qualifiée de grumeleuse, de grumeleuse à particulaire pour les horizons intermédiaires et de particulaire pour l'horizon le plus profond. Excepté pour l'horizon de surface d'une texture limono-argilo-sableuse, les textures des autres horizons sont majoritairement sableuses. En ce qui concerne la compacité, celle-ci a été définie de « moyenne » pour les deux premiers horizons, de forte pour le troisième et quatrième horizon et de faible pour l'horizon le plus profond. L'activité biologique a été considérée comme très importante pour les deux premiers horizons, importante pour le troisième et faible pour le quatrième et cinquième horizon. De fortes proportions d'éléments grossiers ont été identifiées pour l'horizon de surface et le quatrième horizon avec respectivement 20 et 70%. Ces éléments grossiers sont d'origines naturelle ou anthropique (*i.e.* cailloux, charbon, céramique, terre cuite). Des traces d'oxydo-réduction ont été observées sur les trois horizons les plus profonds. Enfin aucune pollution n'a été décelée et aucune odeur n'a été perçue tout au long de ce profil.

#### 4.2.2.2 *Description des propriétés physiques et chimiques des sols du Potager du Roi*

- **Approche descriptive des résultats obtenus sur site**

Les tableaux 19 et 20 présentent les résultats obtenus suite à la phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés de chaque horizon observé. Ces tableaux ne sont pas exhaustifs, l'ensemble des données complémentaires est présenté en annexe (Annexe 6).

**Tableau 19 : Données granulométriques et agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Profils	Horizons	Granulométrie					Propriétés agronomiques				
		Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	pH	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	P <sub>Olsen</sub>	CEC
		g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	cmol+.kg <sup>-1</sup>				
<b>Profil A</b>	1 (0-13cm)	116,1	90,6	154,8	406,3	232,2	7,3	31,2	1,6	0,3	9,9
	2 (13-26cm)	121,4	67,4	110,0	551,9	149,4	7,9	6,5	0,5	0,2	6,5
	3 (26-35cm)	134,3	57,9	100,2	616,7	90,9	8,1	3,9	0,4	0,2	7,1
	4 (35-63cm)	188,0	60,2	84,8	574,9	92,1	7,6	5,9	0,5	0,3	7,7
	5 (63-100cm)	108,9	61,5	85,7	572,6	171,4	8,2	1,7	0,2	0,1	6,7
<b>Profil P</b>	1 (0-40cm)	178,2	146,6	226,1	342,2	106,9	7,3	32,1	2,6	0,5	18,1
	2 (40-75cm)	234,5	190,6	321,1	211,0	42,8	7,4	13,1	1,4	0,5	15,2
<b>Profil P/V</b>	1 (0-15cm)	155,3	159,3	281,6	316,6	87,2	6,9	38,6	2,8	0,3	17,5
	2 (15-100cm)	174,6	170,5	276,5	287,6	90,8	7,2	20,6	1,2	0,5	13,0
<b>Profil V</b>	1 (0-17cm)	145,7	125,6	233,2	364,8	130,7	7,4	21,1	1,4	0,2	11,6
	2 (17-72cm)	156,6	131,3	217,2	367,7	127,3	7,4	16,5	1,1	0,4	11,2
	3 (72-90cm)	138,4	119,4	206,6	469,4	66,2	7,4	6,5	0,7	0,3	9,1

**Tableau 20 : Données de concentrations en éléments majeurs et en éléments traces métalliques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Profils	Horizons	Éléments majeurs					Éléments traces métalliques				
		Al	Ca	Fe	K	P	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
		g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>				
<b>Profil A</b>	1 (0-13cm)	2,2	1,3	1,3	0,9	0,3	1,6E-01	60,3	13,7	145,0	86,3
	2 (13-26cm)	2,2	1,9	1,1	0,9	0,2	6,1E-02	18,6	9,2	107,0	33,9
	3 (26-35cm)	2,4	1,5	1,2	1,1	0,1	5,2E-02	16,0	9,4	88,1	29,7
	4 (35-63cm)	2,1	7,6	1,1	0,9	0,2	9,5E-02	18,1	9,4	105,0	32,7
	5 (63-100cm)	2,0	0,5	1,0	0,9	0,1	2,7E-02	5,7	8,0	16,5	20,4
<b>Profil P</b>	1 (0-40cm)	2,9	1,6	1,6	1,1	0,6	3,0E-01	82,3	16,9	186,0	136,0
	2 (40-75cm)	3,7	1,4	2,0	1,3	0,5	1,5E-01	38,2	20,7	102,0	76,6
<b>Profil P/V</b>	1 (0-15cm)	2,8	0,8	1,6	1,1	0,4	4,2E-01	392,0	17,1	303,0	177,0
	2 (15-100cm)	3,2	1,0	1,9	1,2	0,4	1,5E-01	84,6	18,0	170,0	98,0
<b>Profil V</b>	1 (0-17cm)	2,8	0,7	1,6	1,1	0,3	2,3E-01	236,0	16,2	263,0	141,0
	2 (17-72cm)	3,0	0,9	1,7	1,1	0,3	1,4E-01	84,7	16,8	180,0	98,4
	3 (72-90cm)	3,1	0,5	1,6	1,2	0,2	7,4E-02	22,2	13,7	82,1	41,5

- **Approche détaillée des résultats obtenus sur site**

Les deux premières dimensions de l'analyse en composante principale (ACP) effectuée sur les paramètres physiques et chimiques de l'ensemble des couches échantillonnées explique 67,9% de la variabilité totale (Figure 41).

L'axe principal horizontal expliquant 51,0% de la variabilité du jeu de données, permet de discriminer l'ensemble des sols étudiés. Les individus représentant les points d'échantillonnage réalisées pour chaque horizon du « profil A » (*i.e.* référencés « 1 », « 2 », « 3 », « 4 » et « 5 » sur la Figure 41) sont statistiquement corrélés à une teneur en sables fins (« Sables.fins »), à une masse volumique apparente (« MVA »), à une présence d'éléments grossiers (« elements\_grossiers »), à une compacité (« compacite ») et à un pH (« pH ») supérieur aux autres profils de sol étudiés. À l'inverse, les individus représentant le « profil P » (*i.e.* référencés « 9 » et « 10 » sur la Figure 41) sont associés à une CEC (« CEC »), aux teneurs en limons grossiers et fins (« Limons.fins », « Limons.grossiers »), ainsi qu'à des teneurs en nickel, cobalt, manganèse, phosphore, sodium et fer (« Nickel », « Cobalt », « Manganèse », « Phosphore », « Sodium » et « Fer ») plus élevées que chez les autres profils étudiés. Entre ces deux extrémités se trouvent les individus représentant le « profil V » et le « profil P/V » (*i.e.* référencés « 6 », « 7 » et « 8 » pour le « profil V » et « 11 », « 12 » pour le « profil P/V » sur la Figure 41).

Le second axe vertical explique 16,9% de la variabilité totale. Il permet de discriminer les individus en fonction de la profondeur du point d'échantillonnage. En effet, les points de prélèvement des horizons de surface sont représentés par les individus (*i.e.* « 1 », « 6 », « 9 » et « 11 ») situés plus bas sur cet axe que les individus des horizons intermédiaires (*i.e.* 2, 3 et 7) et que les individus des horizons profonds (*i.e.* 5, 8, 10 et 12). Les horizons de surface sont caractérisés par un rapport C/N statistiquement supérieur aux rapport C/N des horizons intermédiaires et profonds, les horizons profonds sont, quant à eux caractérisés par la présence de traces d'hydromorphie.

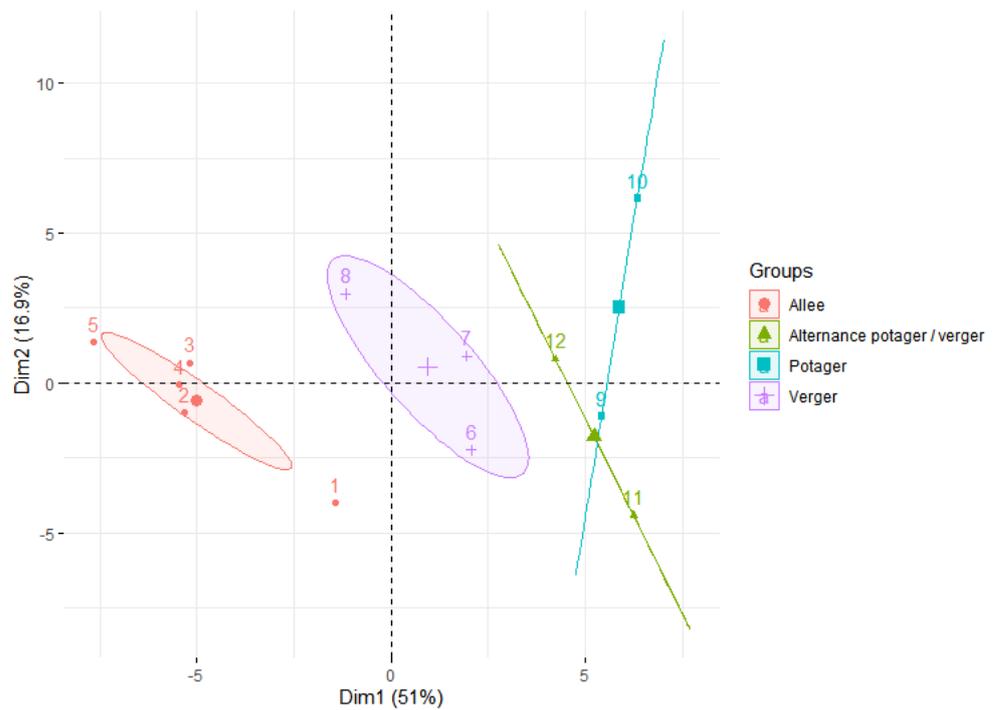
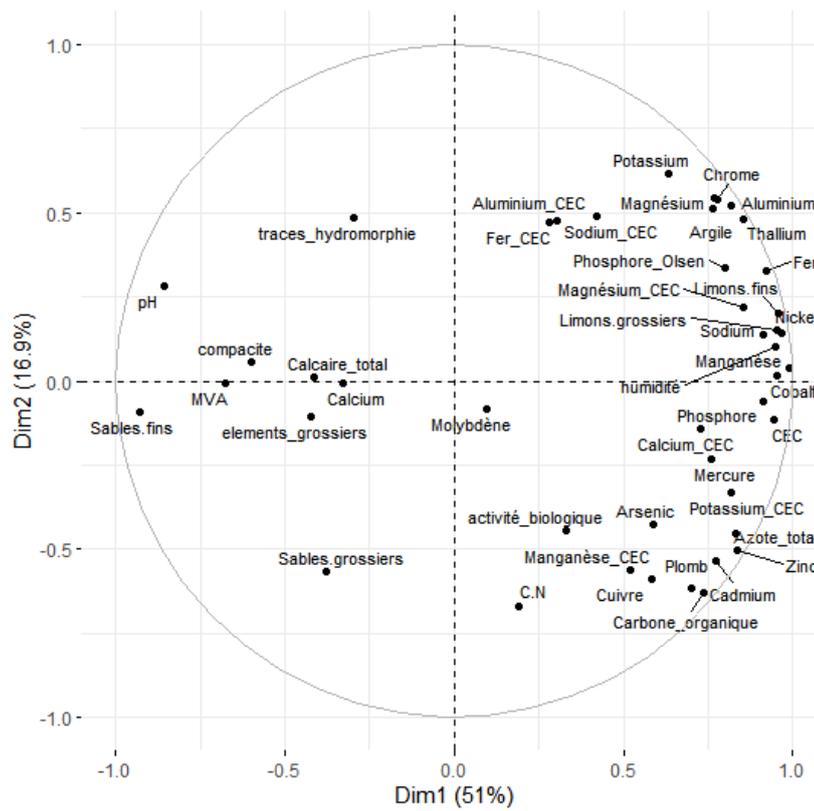
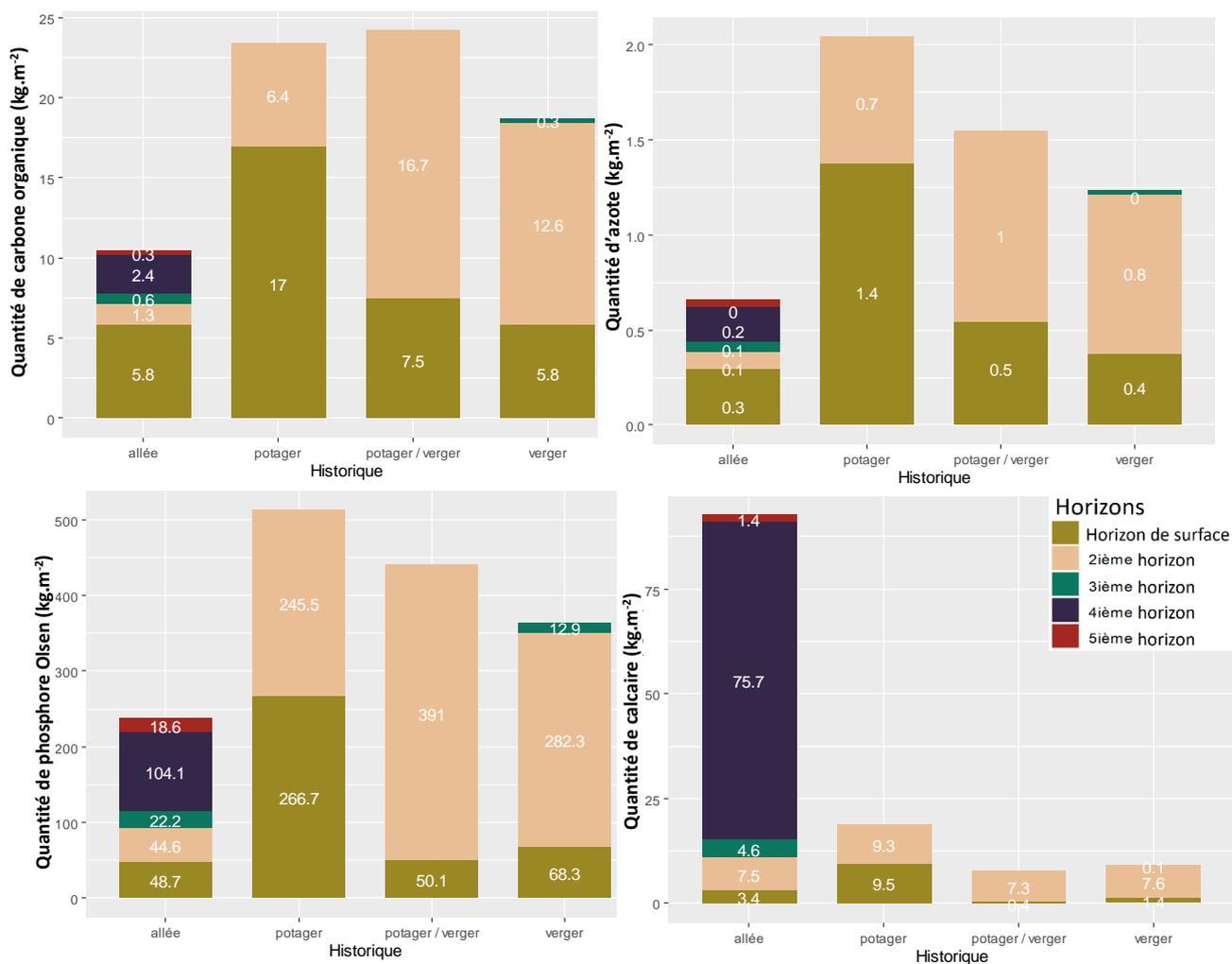


Figure 41 : Cercle de corrélation des variables physiques et chimiques et graphique de représentation des individus analysés pour l'ensemble des profils (n=4) et horizons (n=12) observés sur le site du Potager du Roi.

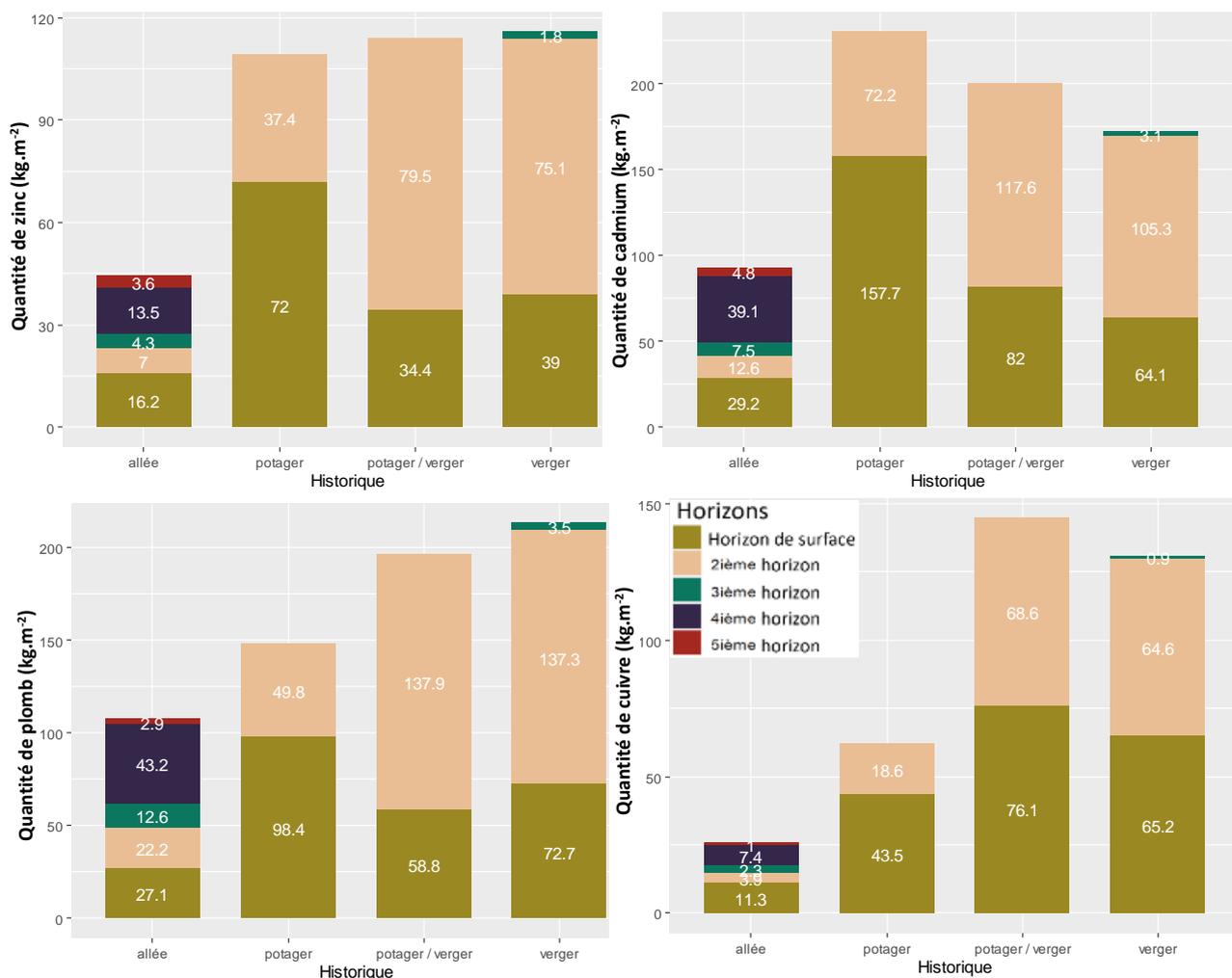
Les propriétés chimiques mesurées sur site sont différentes selon la trajectoire historique étudiée. L'étude des quantités totales de chaque élément chimique par horizon et par profil d'une profondeur totale de 75 cm illustre ces différences. Dans les paragraphes suivants, on désignera par quantité totale la masse totale de l'élément chimique étudié contenu dans un volume défini représentant une surface d'un m<sup>2</sup> et une profondeur de 75 cm qui est la profondeur de référence choisie pour l'étude de chaque profil. Ces quantités totales sont calculées grâce à la connaissance des teneurs en éléments et de la masse volumique apparente de chaque horizon. Ainsi, il a été possible de préciser ces quantités totales par le calcul des quantités contenues dans chaque horizon identifié (Figure 42).

Les quantités totales de carbone organique, d'azote total, de phosphore Olsen et de calcaire différent en fonction des différentes trajectoires historiques (Figure 42). Nous observons une quantité totale de carbone organique, d'azote total et de phosphore Olsen plus faible au sein du « profil A » qu'au sein des autres profils de sol étudiés. A contrario, une quantité totale élevée de calcaire a été observée au sein de ce profil, expliqué majoritairement par une forte teneur en calcaire contenue dans l'horizon 4. Ces quantités totales de calcaire sont beaucoup plus faibles au sein des autres profils. Les résultats obtenus mettent en avant une décroissance des quantités totales d'azote total et de phosphore Olsen en fonction de la trajectoire historique étudiée. Les quantités de ces éléments chimiques sont, en effet, plus élevées au sein du « profil P », qu'au sein du « profil P/V » pour le quel ces quantités sont supérieures à celles calculées pour le « profil V ». Cette décroissance n'a pas été mise en évidence pour le carbone organique où une quantité totale similaire de ce paramètre est obtenue pour le « profil P » et le « profil P/V ». Néanmoins, nous obtenons tout de même une quantité totale de carbone organique plus faible pour le « profil V ».



**Figure 42 : Quantités totales de carbone organique, d'azote total, de phosphore Olsen et de calcaire par horizon et par profil observé sur les 75 premiers centimètres**

Les quantités totales de zinc, cadmium, plomb et cuivre diffèrent également selon la trajectoire historique étudiée (Figure 43). De faibles quantités totales de ces métaux sont observées au sein du « profil A » par rapport aux autres profils de sol. Un gradient similaire des quantités totales est de nouveau observé pour le zinc, le cadmium et le plomb. Une croissance de la quantité totale de zinc et de plomb est observée entre le « profil P », le « profil P/V » et le « profil V ». Il existe donc une plus forte quantité de plomb dans le sol, au sein du verger qu'au sein du potager. A contrario une diminution des quantités totales de cadmium est observée entre le « profil P », le « profil P/V » et le « profil V », c'est-à-dire que des quantités plus élevées de cadmium sont observées au sein du potager qu'au sein du verger. Les quantités totales de cuivre ne suivent pas le gradient précédent décrit. Cependant, il est quand même à noter que de plus fortes quantités de cuivre sont présentes dans les sols ayant servi à l'arboriculture.



**Figure 43 : Quantités totales de zinc, de cadmium, de plomb et de cuivre par horizon et par profil observé sur les 75 premiers centimètres**

#### 4.2.3. Impacts des trajectoires historiques étudiées sur les propriétés physiques et chimiques des sols

Les caractéristiques moyennes des couches de surface obtenues par l'étude de 18 fluvisols principalement localisés sous couvert forestier permettent de prédire l'état physico-chimique du sol initial avant toute intervention humaine, c'est-à-dire avant la construction du potager du Roi. En comparant ces propriétés avec les propriétés actuelles des sols issus des différentes trajectoires historiques, il est possible de caractériser l'influence de ces trajectoires sur les propriétés des sols des couches de surface (Tableau 21).

Les différentes trajectoires influencent les propriétés chimiques du sol de manières différentes. Le pH du sol ne présente pas d'évolution majeure entre l'état initial et les différents états finaux quelle que soit la trajectoire historique suivie. La CEC diminue pour les trajectoires historiques « potager/verger »,

« verger » et « allée » par rapport à la CEC initiale. Une CEC légèrement supérieure à la CEC initiale est néanmoins observée pour la trajectoire « potager ». Pour le carbone organique une augmentation de sa teneur a été observée pour les trajectoires historiques « potager », « potager/verger » et « allée » par rapport à la teneur initiale. A contrario, une légère diminution de la teneur en carbone organique a été observée pour la trajectoire historique « verger ». Concernant le rapport C/N, une diminution de ce rapport a été observée pour les trajectoires « potager » et « potager/verger » tandis qu'une augmentation de plus de 4 unités a été observé pour la trajectoire « allée ». Enfin une différence notable est observée entre les taux de  $\text{CaCO}_3$  tot. Ces taux sont en effet beaucoup plus faibles à l'issu de l'ensemble des trajectoires historiques étudiées que le taux initial.

**Tableau 21 : Caractéristiques agronomiques des couches de surfaces selon les différentes trajectoires historiques étudiées mises en parallèle avec les caractéristiques moyennes de la couche de surface d'un fluvisol**

Historique	Granulométrie			Propriétés agronomiques						
	Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
	%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
<b>Fluvisols</b>	19,4	42,0	38,6	6,9	17,0	63,9	28,3	2,2	15,7	311,0
<b>Potager</b>	17,8	37,3	44,9	7,3	18,1	55,5	32,1	2,6	12,3	18,0
<b>Potager / verger</b>	15,5	44,1	40,4	6,9	17,5	66,8	38,6	2,8	13,8	2,0
<b>Verger</b>	14,6	35,9	49,5	7,4	11,6	36,5	21,1	1,4	15,6	5,0
<b>Allée</b>	11,6	24,5	63,9	7,3	9,9	53,9	31,2	1,6	20,0	18,0

Pour compléter ces résultats, une comparaison entre les propriétés du matériau ayant servi à remblayer le site lors de sa construction (*i.e.* limons des plateaux) et les propriétés actuelles des sols de surface a également été effectuée. Cette analyse a permis de préciser les conséquences des différentes pratiques d'agriculture urbaine exercées au sein du Potager du Roi pendant plus de 3 siècles sur les propriétés agronomiques mais également sur les teneurs en métaux (Tableaux 22 et 23).

Depuis sa construction, les propriétés agronomiques des horizons de surface du Potager du Roi ont évolué. La granulométrie actuelle du site a une fraction plus sableuse qu'elle ne l'était lors de la mise en place du Potager du Roi. De plus, nous pouvons remarquer que les différentes successions de pratiques culturales (*i.e.* « potager », « potager/verger », « verger » et « allée ») améliorent de manière générale les propriétés agronomiques initiales telles que le pH, la CEC, la teneur en carbone organique et en azote totale (Tableau 22).

Les teneurs en cuivre, en plomb, en nickel, en zinc et en cadmium des sols actuels sont, dans leur ensemble, plus élevées que les teneurs initiales. Les quatre trajectoires historiques étudiées ont eu pour conséquence d'augmenter les teneurs de ces métaux au cours du temps à travers les pratiques humaines qui leur sont associées. Seules les teneurs en arsenic fluctuent. En effet, une diminution de ces teneurs, par rapport à la teneur initiale, a été observée pour les trajectoires historiques « potager » et « allée » tandis qu'une augmentation de plus de 10mg.kg<sup>-1</sup> a été relevée pour les trajectoires « potager/verger » et « verger ». Si nous comparons les trajectoires historiques entre elles et leurs conséquences sur les teneurs en métaux, nous remarquons que les surfaces du Potager du Roi actuellement en allée ont accumulé moins de métaux que les autres surfaces de ce site. Les surfaces actuellement arboricoles où qui ont été auparavant arboricoles ont quant à elles, accumulé le plus de métaux au sein de leur horizon de surface.

**Tableau 22 : Propriétés agronomiques des horizons de surface selon les différentes trajectoires historiques étudiées mises en parallèle avec les caractéristiques moyennes de la terre des limons des plateaux**

Historique	Granulométrie			Propriétés agronomiques						
	Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
	%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
<b>Limons des plateaux</b>	21,6	73,1	5,3	4,9	8,5	19,1	11,1	0,8	14,2	< 1
<b>Potager</b>	17,8	37,3	44,9	7,3	18,1	55,5	32,1	2,6	12,3	18,0
<b>Potager / verger</b>	15,5	44,1	40,4	6,9	17,5	66,8	38,6	2,8	13,8	2,0
<b>Verger</b>	14,6	35,9	49,6	7,4	11,6	36,5	21,1	1,4	15,6	5,0
<b>Allée</b>	11,6	24,5	63,9	7,3	9,9	53,9	31,2	1,6	20,0	18,0

**Tableau 23 : Éléments traces métalliques des horizons de surface selon les différentes trajectoires historiques étudiées mises en parallèle avec les caractéristiques moyennes de la terre des limons des plateaux**

Historique	Éléments traces métalliques					
	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	As
	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>
<b>Limons des plateaux</b>	10,9	26,1	22,1	54,6	0,1	9,9
<b>Potager</b>	82,6	186,0	16,9	136,0	0,3	8,13
<b>Potager / verger</b>	392,0	303,0	17,1	177,0	0,4	21,7
<b>Verger</b>	236,0	263,0	16,2	141,0	0,2	21,2
<b>Allée</b>	60,3	145,0	13,7	86,3	0,2	6,76

### 4.3. Conséquences de la trajectoire historique du site du quartier de Bel Air à Montreuil sur les propriétés physico-chimiques des sols

#### 4.3.1. Identification et caractéristiques du sol de référence du site du quartier de Bel Air

L'analyse de la carte géologique 1/50000 du BRGM montre que le sol initial du site du quartier de Bel Air s'est développé sur la formation Oligocène du calcaire de Brie. De plus, le recours à la documentation géologique de cinq ouvrages souterrains ou travaux souterrains répertoriés dans la BSS, situés autour du site d'étude, confirme cette lithologie (Tableau 24). À noter que ces sondages décrivent une épaisseur de remblai plus ou moins importante au-dessus de la formation du calcaire de Brie, illustrant le facteur anthropique lié aux changements d'usage des sols.

**Tableau 24 : Points de la banque de données du sous-sol (BSS) situé autour du site d'étude**

Points BSS	Couche géologique de surface	Profondeur
<b>BSS000PGNY</b>	Calcaire de Brie (STAMPIEN INFERIEUR)	De 1,5 à 2 m
<b>BSOOOPGNX</b>	Calcaire de Brie (STAMPIEN INFERIEUR)	De 0,5 à 5,7 m
<b>BSOOOPGWX</b>	Calcaire de Brie (STAMPIEN INFERIEUR)	De 0,4 à 2,1 m
<b>BSOOOPGJA</b>	Calcaire de Brie (SANNOSIEN)	De 0 à 2.2 m
<b>BSOOOPGJB</b>	Calcaire de Brie, Marne blanche (SANNOSIEN)	De 3 à 3,2 m

D'après la fiche d'unité cartographique des sols n°10 (annexe 9), les sols se développant sur cette couche géologique dans des conditions similaires au site d'étude sont des Calcosols. Les propriétés usuelles de l'horizon de surface ont été déterminées par l'analyse de 12 Calcosols ayant évolué sous couvert forestier dont les propriétés sont issues d'une revue bibliographique (Landry *et al.*, 2005 ;

Baize et Girard, 2008 ; Chambre d'agriculture Charente-Maritime, 2014 ; Véquaud *et al.*, 2021). Ces valeurs serviront de référence pour évaluer l'impact de la trajectoire historique étudiée correspondant à la transformation d'une zone agricole vers une zone résidentielle (Tableau 25).

**Tableau 25 : Propriétés physico-chimiques moyennes des couches de surface de 12 calcosols**

Granulométrie			Propriétés agronomiques						
Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
27.4	40.1	32.5	7.1	18.1	58.5	55.5	5.0	10.6	250
Écart type									
9.5	9.8	11.7	0.7	6.0	4.9	22.3	1.7	1.7	96.2

#### 4.3.2. Caractéristiques physiques et chimiques actuelles des sols du quartier de Bel Air à Montreuil

##### 4.3.2.1 Description de la fosse pédologique

Pour des raisons techniques et du faible espace disponible au sein de cette zone, une seule fosse pédologique a été ouverte sur une zone homogène sur le site du quartier de Bel Air (Figure 44).



**Figure 44 : Site d'étude du quartier Bel Air à Montreuil**

Le premier horizon, situé entre 0 et 5 cm de profondeur, est de couleur brune. Sa structure est grumeleuse et sa texture est qualifiée de limono-sableuse. Sa compacité et son activité biologique sont faibles. Cet horizon présente un taux d'enracinement élevé. Un taux d'éléments grossiers de 10 % y a été estimé. Ces éléments grossiers sont essentiellement constitués d'artéfacts (plastique, verre, la céramique et quelques éléments métalliques). Aucune trace de pollution ni d'hydromorphie n'a été observée sur cet horizon de surface.

Le second horizon, situé entre 5 et 15 cm de profondeur, est de couleur brune-beige. Sa structure est qualifiée de grumeleuse et sa texture de sablo-limoneuse. Sa compacité est moyenne et son activité biologique également. Son taux d'enracinement est plus faible que celui de l'horizon de surface. Les éléments grossiers sont moins représentés avec un taux de l'ordre de 5 %. Des artefacts y ont été retrouvés de natures similaires à l'horizon de surface. Aucune trace de pollution et d'hydromorphie n'a été détectée au sein de cet horizon.

Le troisième horizon, situé entre 15 et 45 cm de profondeur, est de couleur grise-blanche. Sa structure est particulière et sa texture est sableuse. Sa compacité est très élevée et son activité biologique est très faible voire nulle. Un taux élevé de 80 % d'éléments grossiers a été identifié au sein de cet horizon. Ces éléments grossiers sont de natures anthropique et naturelle. Du plastique, du verre, de la brique, des éléments métalliques y ont été retrouvés ainsi que des cailloux et des roches naturelles. Aucune trace de pollution ni de trace d'hydromorphie n'a été identifiée au sein de cet horizon.

Le quatrième horizon, situé entre 45 et 70 cm, est de couleur grise-noire. Sa structure est particulière et sa texture est sablo argileuse. Sa compacité a été qualifiée de moyenne à forte et son activité biologique de faible. Un taux de 30 % d'éléments grossiers de natures anthropique et naturelle a été identifié au sein de cette couche. De la brique, de la céramique du verre ont ainsi été retrouvés. De même que pour les horizons précédents, aucune trace de pollution ni d'hydromorphie n'a été retrouvée.

Le cinquième horizon, situé entre 70 et 85 cm de profondeur, a été qualifié de couleur ocre. Sa structure a été définie comme particulière et sa texture de sablo argileuse. Sa compacité a été qualifiée d'élevée et son activité biologique de moyenne. Un taux de 5% d'éléments grossiers a été identifié au sein de cet horizon, exclusivement constitués d'éléments grossiers naturels. Ces éléments ont réagi au test HCl ce qui signifie qu'ils sont de nature calcaire. Aucune trace d'hydromorphie ni de pollution n'a été observée.

Le sixième horizon, débutant à 85 cm de profondeur, est constitué par la roche mère sur lequel le sol s'est développé. Cette roche est de nature calcaire puisqu'une effervescence à l'HCl a été observée sur un échantillon de cette roche.



**Figure 45 : Profil de sol observé sur le site du quartier de Bel Air à Montreuil**

#### *4.3.2.2 Description des propriétés physiques et chimiques des sols du quartier de Bel Air à Montreuil*

Les mesures physico-chimiques ont été réalisées pour chaque horizon identifié, excepté pour l'horizon 6 représentant le matériau parental.

- Approche descriptive des résultats obtenus sur site

Les tableaux 26 et 27 présentent les résultats obtenus suite à la phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés de chaque horizon observé. Ces tableaux ne sont pas exhaustifs, l'ensemble des données complémentaires est présenté en annexe (Annexe 7).

**Tableau 26 : Données granulométriques et agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Horizons	Granulométrie					Propriétés agronomiques				
	Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	pH	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	P <sub>lsen</sub>	CEC
	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	cmol+.kg <sup>-1</sup>				
<b>1 (0-5cm)</b>	233.0	138.3	195.4	125.0	308.3	7.9	34.9	2.6	6.4E-02	21.0
<b>2 (5-15cm)</b>	238.6	139.6	189.1	156.1	276.6	8.3	18.3	1.4	2.3E-02	16.8
<b>3 (15-45cm)</b>	205.8	85.3	101.1	191.2	416.6	8.4	25.5	1.1	1.7E-02	16.0
<b>4 (45-70cm)</b>	160.2	85.2	114.0	197.1	443.5	8.2	38.2	1.4	5.4E-02	16.8
<b>5 (70-85cm)</b>	148.2	86.3	119.8	225.4	420.3	8.4	10.3	0.6	2.3E-02	13.1

**Tableau 27 : Données de concentrations en éléments majeurs et en éléments traces métalliques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Horizons	Éléments majeurs					Éléments traces métalliques				
	Al	Ca	Fe	K	P	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>				
<b>1 (0-5cm)</b>	2.6	7.2	1.6	9.6E-01	1.2E-01	0.4	55.7	18.7	124.8	170.0
<b>2 (5-15cm)</b>	2.8	8.7	1.7	1.0E+00	8.9E-02	0.4	44.6	18.9	88.9	120.4
<b>3 (15-45cm)</b>	2.6	7.6	1.8	9.7E-01	1.1E-01	0.3	103.1	21.2	243.2	180.9
<b>4 (45-70cm)</b>	2.9	1.8	2.1	1.0E+00	1.4E-01	0.4	152.8	29.5	497.5	336.2
<b>5 (70-85cm)</b>	2.2	0.9	1.4	9.5E-01	4.7E-02	0.1	32.4	14.0	75.9	54.1

- Approche détaillée des résultats obtenus sur site

Les deux premières dimensions de l'ACP réalisée sur les paramètres physiques et chimiques de l'ensemble des horizons échantillonnés expliquent 82,1% de la variabilité totale (Figure 46). Les variables telles que les limites inférieures et supérieures des horizons (« limite\_inferieur » et « limite\_superieur »), la CEC (« CEC »), la teneur en azote total (« Azote\_total »), la teneur en carbone total (« Carbone\_total »), la quantité de cations Ca<sup>2+</sup> échangeable (« Calcium\_CEC ») et l'humidité (« Humidit. ») sont principalement expliquées par l'axe principal horizontal (46,5% de variance exprimée). A contrario, les variables telles que la teneur en cuivre, nickel, zinc, plomb, arsenic et fer (« Cuivre », « Nickel », « Zinc », « Plomb », « Arsenic » et « Fer ») ainsi que la MVA (« MVA ») semblent principalement expliquées par le second axe principal vertical (35,6% de variance exprimée).

Cette représentation des variables renseigne également sur certaines corrélations. D'après cette ACP le carbone organique, l'azote total et le phosphore semblent être corrélés positivement. Par contre, il apparaît une corrélation négative de ces paramètres avec le pH et la teneur en sables fins

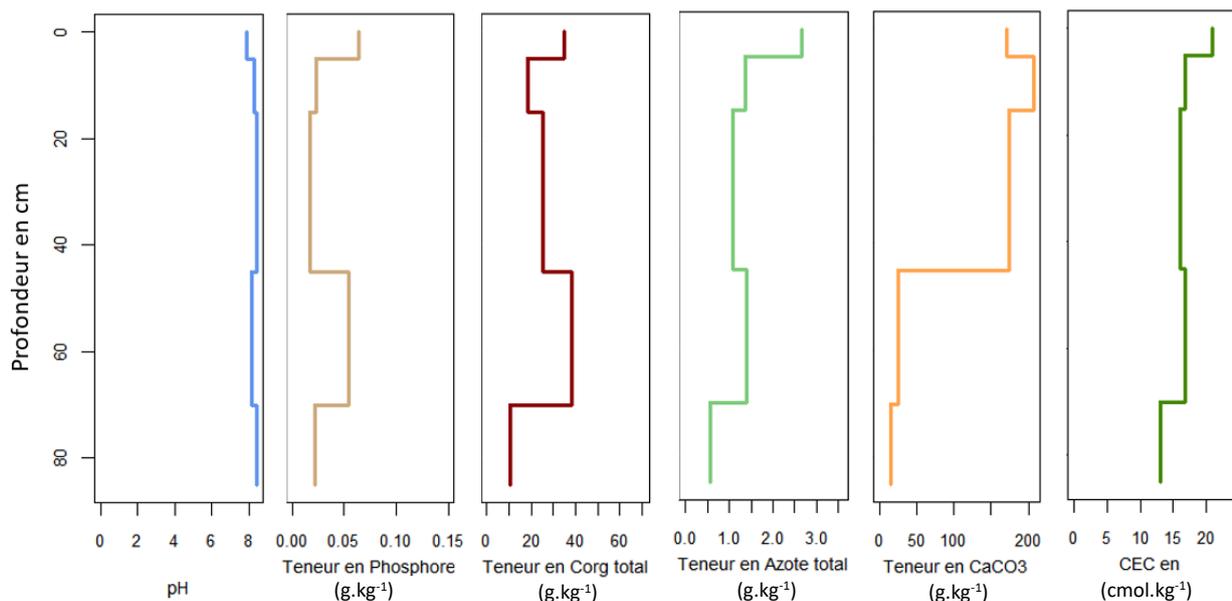
(« Sables\_fins »). Cette ACP montre également que quelques éléments traces semblent être corrélés positivement comme le plomb, le cadmium, le cuivre, le zinc et le fer.

La juxtaposition de la représentation des individus (*i.e.* horizons observés) au graphe de représentation des variables permet de définir les variables expliquant les caractéristiques principales de ces individus (Figure 46). Les horizons 1 et 2 sont, d'après cette ACP, principalement expliqués par les mêmes variables comme la teneur en argiles (« Argiles »), les teneurs en limons fins et grossiers (« Limons\_fins », « Limons\_grossiers ») ou encore la teneur en calcaire (« Calcaire\_total »). Les caractéristiques granulométriques de ces deux horizons sont donc très similaires ainsi que leur teneur en calcaire. Les caractéristiques physico-chimiques de l'horizon 3 sont expliquées par les variables représentant les teneurs en sables fins et grossiers (« Sables\_grossiers ») et le rapport C/N (« C.N »). Les propriétés de l'horizon 4 sont quant à elles expliquées par les teneurs en métaux tels que le cuivre, le nickel, le plomb ou encore le zinc. Enfin l'horizon 5 de la fosse observée est plutôt caractérisé par la masse volumique apparente.



**Figure 46: Analyse en composantes principales des données issues des horizons (n=5) du profil de sol observé sur le site du quartier de Bel Air**

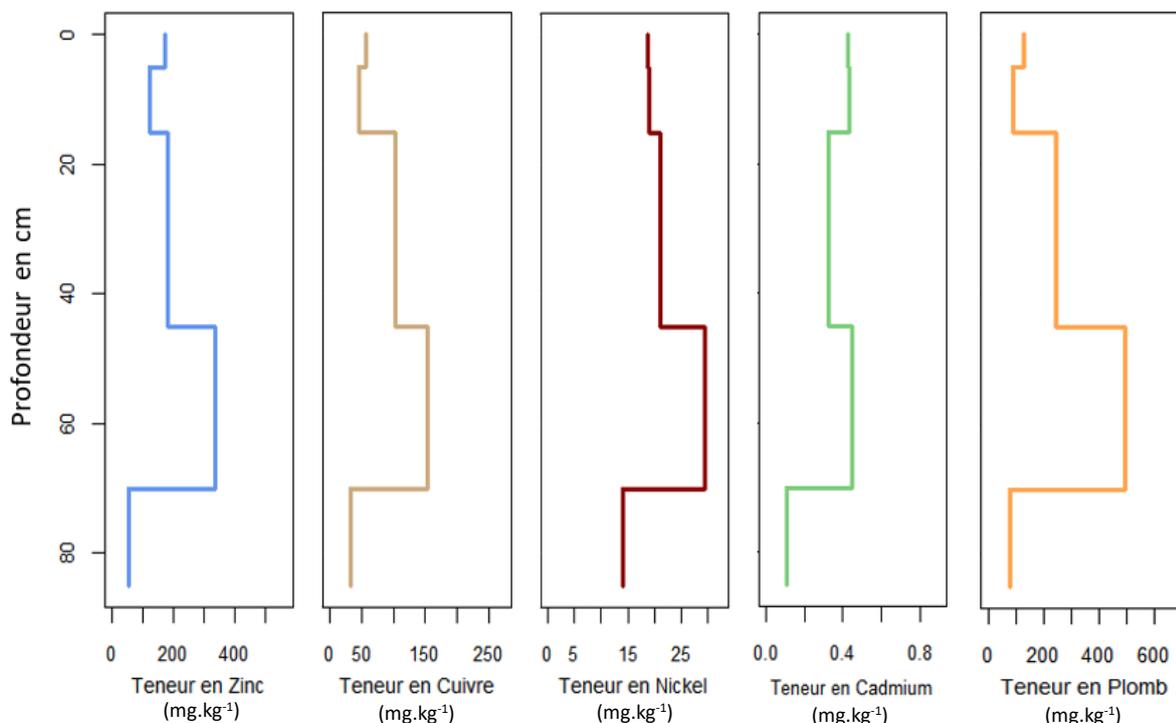
Tous les horizons du sol ont un pH basique avec des valeurs variant de 7,7 à 8,4 (Figure 47). Les autres propriétés agronomiques mesurées tout au long du profil mettent, quant à elles, en évidence des disparités au sein des cinq horizons étudiés. Les teneurs en phosphore Olsen et en carbone organique total suivent une tendance similaire tout au long du profil. Les teneurs les plus élevées en ces éléments sont observées en surface mais aussi sur le quatrième horizon localisé entre 45 et 70 cm de profondeur. Elles sont respectivement deux fois et cinq fois plus élevées que les teneurs mesurées sur l'horizon le plus profond, c'est-à-dire l'horizon situé entre 70 et 85 cm. Les teneurs en azote suivent également la même tendance à la seule exception que les teneurs en azote de l'horizon de surface sont deux fois plus élevées que celles observées au sein du quatrième horizon. Concernant le CaCO<sub>3</sub> total, des teneurs élevées sont observées sur les trois horizons supérieurs avec une concentration moyenne de 184 g.kg<sup>-1</sup>, soit 8 fois plus élevée que la concentration moyenne des deux autres horizons (*i.e.* 20 g.kg<sup>-1</sup>). La CEC varie, quant à elle, de 21 cmol+.kg<sup>-1</sup> pour l'horizon de surface à 13,1 cmol+.kg<sup>-1</sup> pour l'horizon situé entre 70 et 85 cm.



**Figure 47 : Propriétés agronomiques mesurées tout au long du profil de sol observé sur le site du quartier du Bel Air**

La distribution des teneurs en éléments traces est identique pour chaque élément tout au long du profil (Figure 48). L'horizon 5, le plus profond, situé entre 70 et 85 cm possède des teneurs plus faibles en zinc, cuivre, nickel, cadmium et plomb que les autres horizons constituant le profil. L'horizon 4, entre 45 et 70 cm de profondeur, est celui qui possède les teneurs en éléments traces les plus élevées au sein du profil. De fortes teneurs en plomb (*i.e.* 498 mg.kg<sup>-1</sup>), en cuivre (*i.e.* 153 mg.kg<sup>-1</sup>) et en zinc

(i.e.  $336 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) y sont mesurées. Les teneurs mesurées sur les horizons supérieurs sont, quant à elles, globalement moins élevées que celles de l'horizon 4. Parmi ces trois horizons supérieurs, les teneurs en métaux de l'horizon 3 sont majoritairement plus élevées que celles mesurées sur les horizons 1 et 2.



**Figure 48 : Teneurs en éléments traces mesurées tout au long du profil de sol observé sur le site du quartier du Bel Air**

#### 4.3.3. Impacts de la trajectoire historique étudiés sur les propriétés physiques et chimiques des sols

Les caractéristiques moyennes de la couche de surface obtenues par l'analyse de 12 calcosols, sol de référence de ce site d'étude, permettent d'estimer l'impact de la trajectoire historique étudiée sur l'horizon de surface (Tableau 28). Le passage d'une zone agricole à une zone résidentielle, trajectoire représentative des sols urbains français, n'a pas d'impact, dans ce cas d'étude, sur la granulométrie de la couche de surface du site. En effet, malgré une teneur actuelle en sables plus élevée et une teneur en limons plus faible, ces changements ne sont pas assez conséquents pour que les textures définies dans le triangle des textures soient modifiées. En ce qui concerne les propriétés chimiques, le paramètre pH du sol a légèrement augmenté, de même que sa CEC. Une diminution de la teneur en carbone organique totale et de l'azote total sont également observées. Le rapport C/N a légèrement augmenté mais reste inférieur à 15 ce qui signifie que la minéralisation de la matière organique

s'effectue efficacement. Enfin le taux total de CaCO<sub>3</sub> a légèrement diminué entre l'état initial du sol et son état final.

**Tableau 28 : Caractéristiques agronomiques des horizons de surface initiaux estimés et finaux mesurés sur site**

Historique	Granulométrie			Propriétés agronomiques						
	Argiles	Limons	Sables	pH	CEC	MO	C <sub>org</sub>	N <sub>tot</sub>	C/N	CaCO <sub>3</sub> tot
	%	%	%	-	cmol.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>
<b>Calcosols</b>	27,4	40,1	32,5	7,1	18,1	58,5	55,5	5,0	10,6	250,0
<b>Horizon de surface caractérisé sur site</b>	23,3	33,3	43,3	7,9	21,0	60,3	34,9	2,6	13,2	171,0

Concernant les impacts de la trajectoire historique sur les ETM, il est possible de les estimer en considérant que les teneurs de l'horizon 5 mesurées sur site soient semblables aux teneurs de l'horizon de surface du sol initial présent avant toute activité humaine. En effet, l'horizon 5 semble être un horizon naturel, préservé des activités humaines, qui s'est développé sur la roche mère en place à travers les différents facteurs d'influence naturels. De plus, les teneurs en métaux d'un sol naturel sont très souvent induits par les propriétés de la roche mère. On peut alors supposer que les teneurs en éléments traces de l'horizon 5 sont très proches de l'horizon de surface naturel autrefois en place, avant toute intervention humaine. Grâce à cette analogie et par comparaison avec les teneurs en ETM obtenues sur l'horizon de surface (Tableau 29), nous pouvons estimer les conséquences de la trajectoire historique sur ces éléments. Les résultats montrent que les teneurs en ETM sont plus élevées au sein de l'horizon de surface. La trajectoire historique étudiée semble donc engendrer une augmentation des ETM en surface au cours du temps.

**Tableau 29 : Éléments traces métalliques de l'horizon 5 et l'horizon de surface actuel**

Historique	Éléments traces métalliques					
	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	As
	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>
<b>Horizon 5</b>	32,3	75,9	14,0	54,0	0,1	8,8
<b>Sol de surface caractérisé sur site</b>	55,7	124,8	18,7	167,0	0,4	10,2

## 5. Discussion

### 5.1. Lien entre pratiques humaines associées aux trajectoires historiques et propriétés physiques et chimiques observées sur les sols

#### 5.1.1. Effets de l'absence d'usage sur les propriétés physico-chimiques des sols industriels

La trajectoire historique étudiée via les lysimètres de terres industrielles présente la singularité de caractériser une inactivité des pratiques humaines durant plus de 20 ans. Ce site reflète ainsi par le biais de trois terres industrielles différentes, les évolutions des propriétés physiques et chimiques des sols de surface d'une friche industrielle au cours du temps. Ces terres ont évolué dans leur distribution granulométrique avec des teneurs en argile qui ont augmenté au détriment de la fraction sableuse. Cette tendance diffère des tendances observées au sein du dispositif national mis en place et suivi par l'INRAE de Versailles qui permet de suivre les propriétés physiques et chimiques de 42 parcelles de terres naturelles depuis 1929 (Pernes-Debuyser *et al.*, 2003). En effet, les teneurs en argiles des parcelles témoins n'ayant subi aucune pratique depuis cette date n'ont, quant à elles, pas évolué au cours du temps.

En ce qui concerne l'évolution des teneurs en ETM de ces terres industrielles, des diminutions des teneurs en zinc et en plomb ont été observées pour les terres issues d'anciennes cokeries. De même qu'une diminution de la teneur en cadmium de la terre issue de l'ancienne cokerie de Thionville a également été observée. Ce résultat peut surprendre, en effet, les diminutions des teneurs en ETM ne semblent pas être récurrentes dans la littérature qui s'accorde sur une stabilité de ces teneurs au cours du temps au sein de friche industrielle. Sur un site comparable à notre site d'étude, c'est-à-dire sur une friche industrielle laissée en végétation spontanée pendant 48 ans, aucune évolution des teneurs en cuivre, plomb, zinc et arsenic n'a été montrée (Salisbury *et al.*, 2017). Les résultats observés sur notre cas d'étude suggèrent donc que ces métaux étaient très biodisponibles (Violante *et al.*, 2007), c'est-à-dire que la possibilité de transfert de ces métaux vers les eaux ou vers les plantes était élevée lors de la constitution des lysimètres. Cependant dans l'état actuel et malgré ces diminutions, les teneurs en métaux de ces terres restent néanmoins très élevées dépassant les médianes nationales calculées par le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) sur l'ensemble des sols de surface du territoire français (Gis Sol, 2011). Ces médianes sont en effet largement dépassées pour le plomb (*i.e.* 27,9 mg.kg<sup>-1</sup>), le cuivre (*i.e.* 13,9 mg.kg<sup>-1</sup>) et le zinc (*i.e.* 63,6 mg.kg<sup>-1</sup>).

Enfin la stabilité des propriétés agronomiques tels que le pH, le carbone organique ou le C/N de ces terres depuis leur installation avait également été soulignée lors d'une précédente étude réalisée sur

ces terres industrielles (Dagois, 2015). À noter, que la stabilité du rapport C/N des trois terres industrielles au cours du temps montre la présence d'éléments carbonés très peu dégradables, ce qui est typique des éléments organiques d'origine anthropique issus d'une ancienne activité industrielle (Huot, 2013).

Les résultats obtenus sur ce site ont donc globalement montré que, sans intervention humaine, les principales caractéristiques physiques et chimiques d'une friche industrielle restent inchangées au cours du temps. Les problématiques liées aux pollutions métalliques mais également organiques caractérisant majoritairement ces surfaces semblent donc persister au cours de l'évolution du sol.

### 5.1.2. *Conséquences des pratiques humaines sur les propriétés physico-chimiques des sols du Potager du Roi*

Les résultats obtenus grâce à la comparaison des propriétés moyennes de la couche de surface d'un fluvisol évoluant sous couvert forestier et des propriétés actuelles des couches de surface du Potager du roi illustrent les conséquences globales de l'activité humaine sur les propriétés agronomiques du sol naturel initialement en place (Tableau 21). Malgré une forte perturbation de la pédogenèse initiale lors de la construction du Potager du Roi, les propriétés de ces deux référentiels décrivent de bonnes capacités agronomiques. Leur teneur en carbone organique respective ( $> 21,1 \text{ g.kg}^{-1}$ ) est par exemple plus élevée que chez les sols agricoles évaluée à  $14,9 \text{ g.kg}^{-1}$  (Joimel *et al.*, 2016). Ce résultat montre donc que les pratiques humaines décrivant la trajectoire historique d'un site peuvent préserver les propriétés agronomiques du sol naturel initial au cours du temps. Des variations entre les propriétés de l'état initial et les états finaux mesurés sur site ont néanmoins été observées. Les différences de teneur en carbone organique total du sol ayant accueilli un historique « verger » (2,1%), du sol ayant accueilli un historique « potager » (3,2%) et du sol initial évoluant sous un couvert forestier (2,8%) ont déjà été mises en avant dans la littérature (Joimel *et al.*, 2016). En effet, une différence significative de cette teneur avait été observée entre un sol utilisé en arboriculture possédant une teneur en carbone organique plus faible que les teneurs des sols de jardins partagés et forestiers. La diminution de la teneur en azote observée sur le sol de verger (0,14%) par rapport aux autres sols étudiés (*i.e.* potager : 0,26% et fluvisol : 0,22%) est également un résultat identifié dans la littérature (Joimel *et al.*, 2017).

Les résultats obtenus grâce à la comparaison des propriétés moyennes des limons des plateaux illustrent les conséquences globales des différentes pratiques d'agriculture urbaine sur les propriétés agronomiques et métalliques de l'horizon de surface du sol tel qu'il était post-construction (Tableaux 22 et 23). Nous remarquons que selon nos hypothèses, les propriétés agronomiques du Potager du Roi post-construction était bien plus faibles que les propriétés agronomiques du sol naturel initialement en place, cependant les pratiques d'agriculture urbaine les ont améliorées au cours du temps jusqu'à

atteindre des niveaux de fertilité très satisfaisants. Néanmoins, la croissance globale des propriétés agronomiques au cours du temps varie selon la succession de pratiques appliquées au sol. Au sein du site du Potager du Roi et d'après les propos de la responsable des cultures de ce potager, le sol d'historique « potager » a été soumis à une pratique d'amendement organique plus régulière et en quantité plus importante que le sol d'historique « verger » au cours du temps, expliquant ainsi la teneur en carbone organique plus élevée pour les sols de potager. Il en va de même pour les pratiques de fertilisation expliquant le doublement de la teneur en azote dans les sols de potager.

Les teneurs en ETM, plus élevées à l'issue des différentes trajectoires historiques étudiées, illustrent un résultat majeur de l'étude. En effet, même s'il est bien connu que le fond géochimique est susceptible d'alimenter le sol en éléments traces métalliques (De Miguel *et al.*, 1999 ; Boularbah *et al.*, 2006), il apparaît que certaines activités humaines contribuent à l'augmentation des teneurs en ETM dans les horizons des sols cultivés. Différentes références bibliographiques citent ainsi des teneurs élevées en cuivre, en plomb ou encore en zinc au sein des potagers et vergers urbains au niveau national (Jean-Soro *et al.*, 2015 ; Joimel *et al.*, 2017) mais également au niveau international (Béchet *et al.*, 2018). Là encore, les conséquences des trajectoires historiques étudiées sur les teneurs en ETM sont expliquées par les pratiques définissant ces trajectoires. Les apports en fertilisant minéral fréquemment réalisés autrefois au sein du Potager du Roi constituent un élément d'explication. Il a été montré que cette pratique influence positivement les teneurs en ETM, notamment les teneurs en cadmium, cuivre, plomb et zinc (Czarnecki & Düring, 2015). L'application de produits phytosanitaires autrefois utilisés au Potager du Roi explique également ces hautes teneurs en ETM. Les teneurs en cuivre plus élevées dans le verger sont principalement expliquées par une application plus fréquente de bouille bordelaise au sein des vergers du Potager du Roi. Ce phénomène est connu dans la littérature (Joimel *et al.*, 2017 ; Katsoulas *et al.*, 2020). Les teneurs en cuivre sont, en effet, généralement plus élevées au sein des vergers qu'au sein des potagers.

### *5.1.3. Pratiques d'urbanisation des sols et leurs conséquences sur les propriétés physiques et chimiques*

L'analyse du profil de sol obtenu sur le site du quartier du Bel Air à Montreuil montre des résultats très variés en fonction des horizons observés. L'ensemble des pratiques associées à la trajectoire historique identifiée dans le chapitre II, permet d'expliquer plus en détails les résultats obtenus. En effet, les propriétés observées associées à la connaissance de la trajectoire historique du site permettent d'associer à chaque horizon pédologique des pratiques passées expliquant leur état actuel.

Les horizons 6 et 5 observés lors de l'étude du profil ne présentent pas de trace d'activités humaines. En effet aucune contamination, aucun artefact n'a été retrouvé dans ces horizons. Ils représentent

donc le sol initialement en place qui s'est développé au cours du temps par les facteurs d'influence naturels. Le premier usage associé à la trajectoire historique du site est l'usage agricole.

L'horizon 4 présente de nombreuses caractéristiques physiques et chimiques laissant penser que cet horizon était autrefois l'horizon de surface cultivé. La première caractéristique est visuelle. Elle se manifeste par une limite de couleur nette entre cet horizon et l'horizon 5. Cette couleur s'apparente à celle de la couche de labour typique des sols agricoles (Liu *et al.*, 2005) qui se forme lors d'un travail régulier du sol. Les teneurs des paramètres agronomiques de cette couche plus élevées que dans l'horizon 5 laissent penser à un amendement organique et une fertilisation du sol lors de l'usage agricole. De plus les fortes teneurs en ETM sont également des caractéristiques observées dans les sols agricoles cultivés avec des pratiques régulières d'amendement et de fertilisation (Huang *et al.*, 2007). Les concentrations élevées présentes dans l'horizon 4 pourraient alors s'expliquer par les pratiques d'épandages des boues et gadoues sur les terres agricoles proches de Paris qui se sont succédées au cours du temps (Chaoui-Derieux, 2018). Des échantillons de l'horizon de surface prélevés sur un site encore dédié à un usage de production de biomasse (jardin potager) et qui a fait l'objet d'épandages de boues et de gadoues issues de la ville de Paris présentent en effet des caractéristiques se rapprochant de celles de l'horizon 4.

L'horizon 3 pourrait correspondre à un remblai apporté au cours du changement d'usage de la trajectoire historique décrite. Cette interprétation se justifie par son taux élevé d'éléments grossiers constitués principalement d'artefacts mais aussi par les différences nettes que présentent ses propriétés chimiques par rapport à l'horizon 4 sous-jacent. De plus, la compacité jugée « très élevée » de ce troisième horizon suggère une compaction lors du terrassement de ce remblai, ce qui est également une pratique que l'on retrouve lors d'un changement d'usage de ce type selon les résultats du chapitre II.

Les propriétés de l'horizon 2, nous font également penser que cette terre a été apportée. En effet, la granulométrie et notamment la fraction sableuse, très distincte de cet horizon, ainsi que l'ensemble des autres propriétés chimiques, évoquent une terre végétale apportée au-dessus du remblai afin de végétaliser le site.

Enfin, l'horizon de surface s'est formé au cours du temps à travers les facteurs d'influence naturels et les pratiques humaines liées à l'usage habitat. Les caractéristiques du site, comme des teneurs élevées en carbone organique et d'azote total dans le sol, peuvent en effet s'approcher de celles typiques des pelouses urbaines (Smith *et al.*, 2018). Malheureusement, la comparaison des propriétés de surface estimées du sol initial avec les propriétés de l'horizon de surface actuel montre tout de même pour ce dernier, une dégradation des paramètres de fertilité. Cette diminution est tout de même à relativiser

puisque, d'après Joimel et al (2017), les teneurs en carbone organique total (3,5%) et en azote total (0,26%) demeurent supérieures aux teneurs médianes des sols forestiers (*i.e.* 2,7% ; 0,17%, respectivement) et agricoles (*i.e.* 2,5% ; 0,24%, respectivement).

L'ensemble des résultats met donc en avant que l'anthropisation des sols au cours de cette trajectoire historique peut induire une bonne fertilité du sol, en surface. En contrepartie, les horizons plus profonds peuvent présenter des contaminations inorganiques liées aux pratiques passées comme l'épandage de boues urbaines. Les horizons 4 et 3 présentent par exemple des teneurs en éléments traces qui dépassent les médianes nationales calculées par le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS ; Gis Sol, 2011). La teneur en plomb de l'horizon 4 est environ 17 fois plus élevée que la médiane définie par le RMQS. De même que pour sa forte teneur en cuivre dépassant d'environ 11 fois la médiane nationale et équivalente aux teneurs des sols viticoles connus pour des pollutions liées au cuivre. L'horizon 3 possède, quant à lui, des teneurs en ETM moins élevées que l'horizon 4 mais qui restent tout de même non négligeables. En effet, la teneur en plomb de cet horizon (*i.e.* 243 mg.kg<sup>-1</sup>) est également au-dessus de la médiane nationale. De même pour sa teneur en cuivre de 103 mg.kg<sup>-1</sup>.

## **5.2. Des propriétés physiques et chimiques variant selon l'intensité des pratiques appliquées au sol**

Les résultats obtenus ont mis en avant la pertinence de la prise en compte de l'intensité des pratiques appliquées au sol durant la trajectoire historique étudiée. Cette notion définit la fréquence d'application de la pratique (*e.g.* journalière, mensuelle, unique) ainsi que son importance qui peut être quantitative (*e.g.* masse totale apportée) ou qualitative (*e.g.* faible, élevée).

Le site du Potager du Roi illustre relativement bien cette réflexion à travers ses différentes trajectoires historiques. En effet, les parcelles dont l'historique a été qualifié de potager, de verger ou d'une alternance de potager/verger ont globalement subi les mêmes pratiques tout au long de leur évolution pendant près de 300 ans, à savoir des pratiques d'amendement organique, de fertilisation, de travail du sol, d'irrigation et d'apport de produit phytosanitaire (Agreste, 2021 ; Chambre d'agriculture Loire Atlantique, 2013). D'après un entretien réalisé avec la responsable des cultures du Potager du Roi, le principal facteur qui différencie leur trajectoire historique est l'intensité des pratiques appliquées. Cette différence d'intensité expliquerait donc le gradient observé sur les quantités totales de certaines substances ou éléments et la discrimination des individus représentant ces trois trajectoires selon l'axe 1 de l'ACP présentée (Figure 41). Pour illustrer ces propos, la fertilisation des sols par engrais chimique était autrefois une pratique plus fréquente et quantitativement plus importante au sein des potagers relativement aux vergers. Même si cette pratique est plus modérée depuis quelques années, le sol a gardé en mémoire cette fertilisation accrue pratiquée autrefois de manière courante.

Ce point de discussion pourrait expliquer pourquoi les individus représentant les terres industrielles issues de deux cokeries distinctes sont statistiquement discriminés dans l'ACP (Figure 33) alors qu'ils représentent la même trajectoire historique. Les propriétés de la terre industrielle issue de la cokerie d'Homécourt, corrélées aux variables « carbone\_total » et « azote\_total » avec un rapport C/N qui est resté élevé en 25 ans, suggèrent une contamination en carbone organique. Les propriétés de la terre industrielle issue de la cokerie de Thionville, corrélées aux variables « cuivre », « cadmium », « plomb » et « zinc » traduisent plutôt une contamination inorganique en éléments traces métalliques. Ces deux pollutions sont typiques des sols de cokeries (Hou *et al.*, 2015 ; Hu *et al.*, 2021 ; Huot, 2013). D'ailleurs, l'observation plus précise des résultats montre que les deux terres de cokeries sont contaminées par ces deux pollutions. En effet, même si une contamination organique forte caractérise la terre de cokerie issue d'Homécourt, cette dernière possède également de hautes teneurs en éléments traces métalliques (Figure 34). De même pour la terre de cokerie de Thionville qui présente une pollution inorganique mais également organique. Des intensités différentes de pratiques exercées au sein des industries de cokerie, pourraient donc expliquer la présence de ces deux pollutions plus ou moins prononcées. Cette théorie reste néanmoins hypothétique, des recherches plus poussées sur les pratiques exactes de chaque cokerie pourraient permettre de vérifier et de valider ou non ces propos.

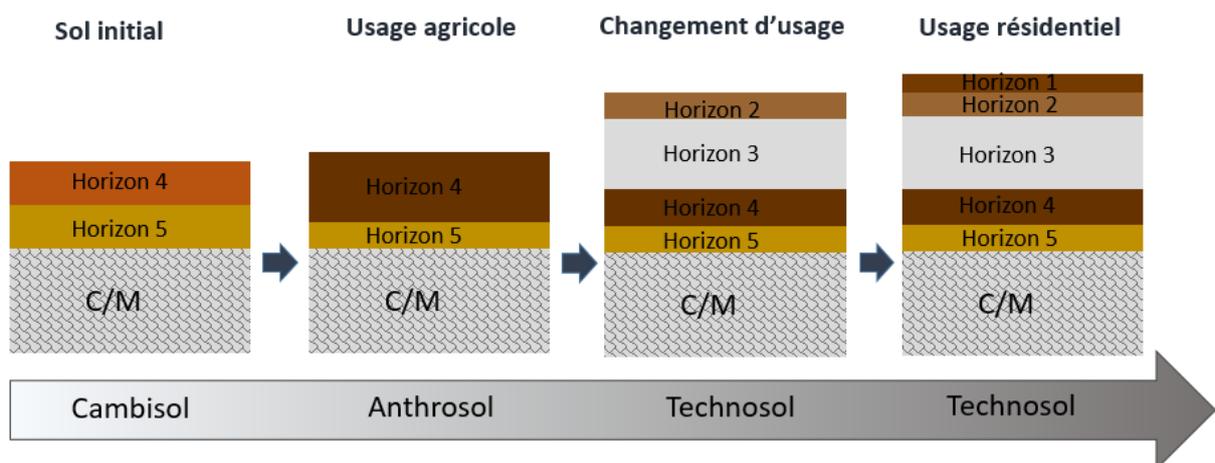
### **5.3. De la notion de chronoséquence à la notion d'« anthroposéquence »**

En pédologie, la notion de chronoquénence est souvent utilisée pour définir une séquence de sols décrivant les phénomènes pédogénétiques au cours du temps. Plus précisément dans la littérature, une chronoséquence est définie comme une séquence de sols développés dans des conditions similaires (*i.e.* sur des matériaux parentaux et un relief identiques et sous l'influence de facteurs naturels climatiques et biotiques constants) et dont les principales différences observées sont expliquées uniquement par la variable temps (Huggett, 1998 ; Stevens & Walker, 1970). Aucune autre variable que l'âge du sol ne change entre les différents sols associés à une chronoséquence. Cette notion est souvent mobilisée dans l'observation des évolutions des sols au cours du temps et la compréhension des processus pédogénétiques naturels décrivant ces évolutions (Richardson *et al.*, 2004 ; Jones *et al.*, 2008 ; Bernasconi *et al.*, 2011).

Décrire l'évolution des sols urbains en se basant sur cette notion pourrait constituer une approche intéressante. En effet, réussir à établir une relation entre une séquence de sols décrivant une trajectoire d'historique d'usages de ces sols pourrait permettre de mieux comprendre l'impact de ces trajectoires sur la qualité des sols et plus généralement sur la pédogenèse urbaine. Pour ce faire, la notion de chronoséquence doit être développée en y intégrant le facteur humain comme nouvelle variable à la description des séquences de sols. Les séquences de sols correspondraient alors à des sols

évoluant dans des conditions similaires dont les principales différences observées seraient liées à divers usages et pratiques humaines marquant la pédogenèse. Cette approche descriptive innovante qui fait le lien entre l'évolution d'un sol urbain et sa trajectoire historique du facteur humain sur les sols sera appelée dans la suite du manuscrit une « anthroposéquence ».

Les résultats obtenus au sein du site du quartier Bel Air permettent de décrire une première « anthroposéquence » liée à la trajectoire historique illustrant le passage d'une zone agricole à une zone résidentielle. L'ensemble des résultats et des interprétations permettent en effet de lier la trajectoire historique à des propriétés générales des horizons observés mais également à une structure type de profil de sol qualifiant de surcroît le type de sol (Figure 49 et Tableau 30). Il est, en effet, possible de déduire l'évolution des types de sol selon la trajectoire historique étudiée traduit par le passage d'un sol naturel associé à un Calcisol (*i.e.* Cambisol selon la WRB) à un sol plus anthropisé qualifié d'Anthrosol suite à un usage agricole intensif puis à un Technosol à la suite du changement d'usage apportant plus de 20 % d'artefacts sur les 100 premiers centimètres.



**Figure 49 : « Anthroposéquence » de la trajectoire historique d'usages illustrant le passage d'un sol naturel à une zone agricole puis à une zone résidentielle**

**Tableau 30 : Semi quantification des propriétés physico-chimiques de chaque horizon en fonction de la trajectoire historique (0 : absent, + : faible, ++ : moyen, +++ : élevé)**

		Horizon	Trajectoire historique			
			Sol initial	Usage agricole	Changement d'usage	Usage résidentiel
Propriété physique	Artéfacts	1				++
		2			++	++
		3			+++	+++
		4	0	+	+	+
		5	0	0	0	0
Propriétés chimiques	Carbone organique	1				+++
		2			+	+
		3			++	++
		4	+	+++	+++	+++
		5	+	+	+	+
	Éléments traces métalliques	1				++
		2			+	+
		3			++	++
		4	+	+++	+++	+++
		5	+	+	+	+

Les « anthroposéquences » pourraient constituer un outil intéressant pour décrire l'évolution des sols urbains. Décrire l'ensemble des trajectoires historiques représentatives des milieux urbains par une typologie d'« anthroposéquences » fournirait des informations utiles à la prédiction de la qualité des sols urbains basée sur leur historique d'usages.

## 6. Conclusion

Les sols peuvent, au cours du temps, être perturbés et transformés par les pratiques humaines associées à des trajectoires historiques, modifiant ainsi leurs propriétés physico-chimiques. Pour les trajectoires n'impliquant pas de pratique humaine, ces propriétés évoluent peu. La connaissance de la trajectoire historique d'un site ainsi que les pratiques associées permettent donc de fournir une image globale de l'état physique et chimique du sol. L'impact des pratiques humaines sur les propriétés du sol semble de plus, être dépendant de l'intensité des pratiques. L'ensemble des résultats observés sur site confirme donc le réel intérêt d'étudier le lien entre la trajectoire historique d'un site et son état physico-chimique actuel. Cette approche encore très peu développée à l'heure actuelle pourrait être portée par le développement d'un nouvel concept : l'« anthroposéquence ».

Par ailleurs, l'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre, obtenu par des mesures in-situ des propriétés des sols, représente l'impact global d'un ensemble de pratiques appliquées lors d'une trajectoire historique. À ce titre, ce système nécessiterait des investigations plus approfondies afin de comprendre plus finement l'impact de chaque pratique sur les propriétés du sol au cours du temps mais également leur rôle parmi l'ensemble de ces pratiques. La pédologie expérimentale semble être, ici, un outil susceptible de répondre à ces questionnements.

Ces résultats conduisent alors à deux nouvelles questions relatives à ce travail de doctorat :

- *Comment par des expériences en conditions contrôlées en laboratoire peut-on apporter des précisions sur l'évolution des propriétés physico-chimiques du sol au cours du temps ?*
- Quelles sont les pratiques des trajectoires historiques étudiées déterminantes pour les propriétés intrinsèques des sols ?

## Chapitre IV : Apport de la pédologie expérimentale à la connaissance de l'évolution des sols urbains soumis à différentes pratiques

---

### 1. Principe général

La description et la compréhension des effets de divers usages et pratiques humaines sur le fonctionnement et l'évolution des sols urbains peuvent être atteints via diverses approches. L'une d'entre elles, illustrée dans le chapitre III, a permis d'identifier les impacts d'une trajectoire historique à partir de la caractérisation de l'état initial du sol supposé ou mesuré et de l'état final observé, après plusieurs dizaines, voire centaines d'années d'évolution. Cependant, ces deux points de caractérisation sont des instantanés ne renseignant pas sur les étapes successives d'évolution des propriétés des sols au cours du temps en lien avec les usages et pratiques appliqués au sol. Décrire la dynamique de ces propriétés pourrait permettre de préciser la nature et l'intensité de l'effet de chaque pratique sur les propriétés des sols. Cette approche permettrait aussi de décrire plus en détail les processus pédogénétiques relevant du facteur humain impliqués au cours du temps.

L'objectif de ce chapitre est alors de mobiliser les concepts de pédologie expérimentale afin d'expliquer les effets d'usages et de pratiques humaines liés à une trajectoire historique sur des processus pédogénétiques en milieu urbain (Figure 50). Les principales étapes de cette démarche sont de : (i) caractériser les effets de chaque pratique et les effets combinés de ces pratiques humaines sur les propriétés des sols au cours du temps, (ii) au sein de ces pratiques contrastées, d'identifier les pratiques influençant majoritairement l'état physico-chimique des sols urbains en identifiant les pratiques ayant le plus d'impact et (iii) de décrire les processus pédogénétiques se déroulant durant la trajectoire historique étudiée. Pour ce faire, une expérimentation de forçage ou de vieillissement accéléré en laboratoire, combinant facteurs climatique et anthropique a été réalisée. Cette expérimentation a consisté à appliquer à un échantillon de terre appelé matériau initial, une succession de pratiques de manière accélérée ainsi que des modalités climatiques simulant le vieillissement d'une terre sous un climat donné : alternances gel/dégel, humectation/dessiccation ou encore périodes à température élevée.

Un tel protocole de simulation de trajectoires historiques par vieillissement accéléré des sols en laboratoire est novateur et ouvre la voie, du point de vue méthodologique, à d'autres expérimentations.

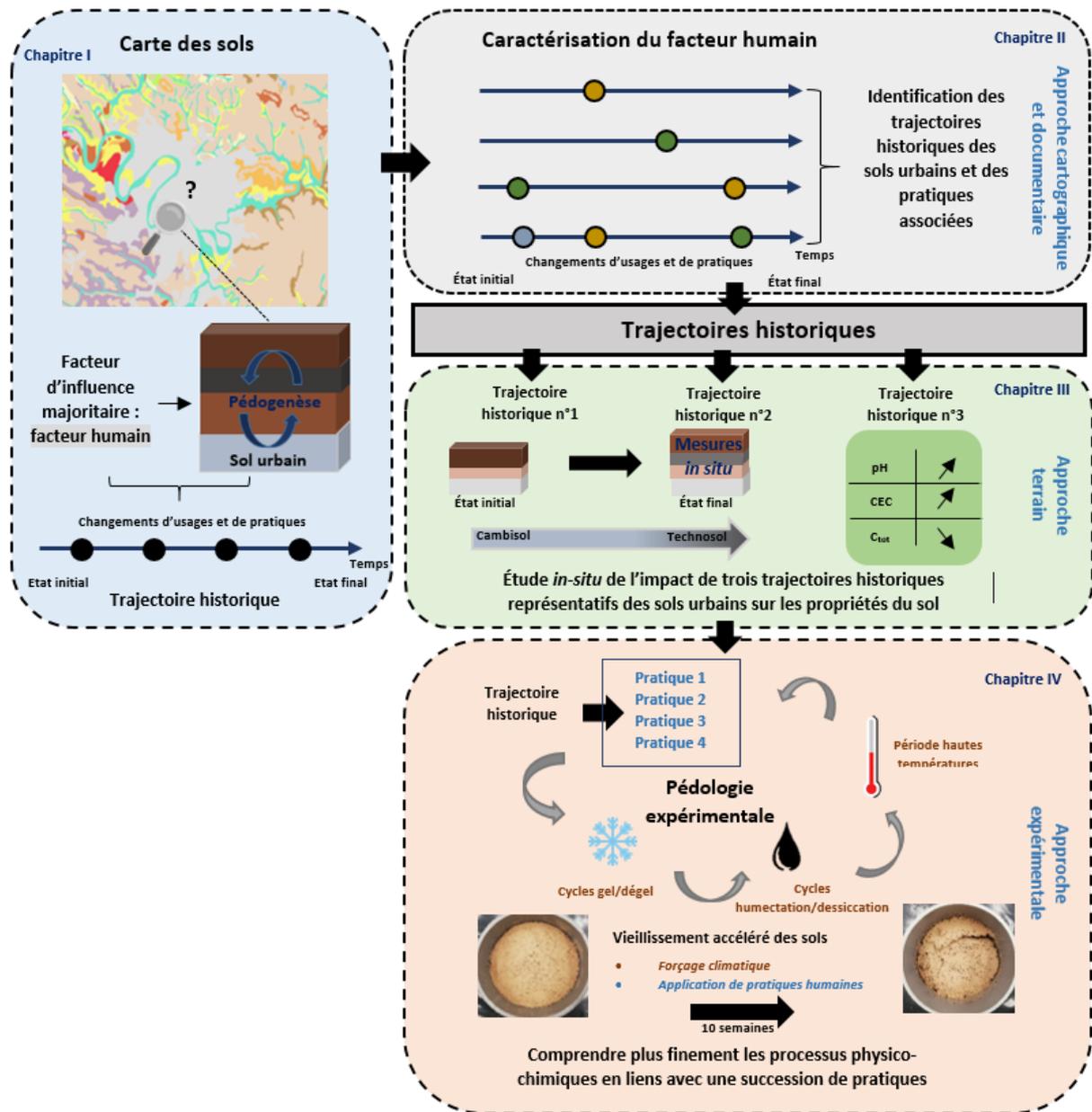


Figure 50 : Schéma conceptuel de la démarche scientifique employée pour donner des éléments de réponses à la caractérisation des sols urbains. Étape 3 : recours à la pédologie expérimentale pour une meilleure compréhension de l'évolution des propriétés physiques

## 2. Matériels

### 2.1. Choix du référentiel d'étude

Le référentiel d'étude permet de préciser et de borner le périmètre des expériences en laboratoire avec en particulier :

- les horizons de sol sur lesquels portent les expérimentations,

- la séquence ou partie de la trajectoire historique à simuler par forçage expérimental en conditions contrôlées.

### *2.1.1. Choix expérimental n°1 : l'horizon de surface*

Un profil de sol peut être fortement modifié tout au long d'une trajectoire historique. L'ensemble des horizons d'un sol représente un système au fonctionnement complexe. Il est parfois préférable, dans le cadre d'expériences au laboratoire, de se concentrer sur une partie du système. Compte tenu des objectifs visés, il a été choisi de se concentrer sur un horizon ou un ensemble d'horizons fortement et fréquemment influencés par les pratiques humaines.

La littérature s'accorde sur le fait que les impacts sur les propriétés physiques et chimiques engendrés par les pratiques humaines s'exercent en premier lieu sur les premiers centimètres de la profondeur du sol (Nguyen *et al.*, 2013 ; Johnston *et al.*, 2016). L'horizon de surface constitue en effet l'interface entre le sol et l'atmosphère et représente généralement la couche la plus modifiée par le facteur humain. Par sa position particulière d'interface, l'horizon de surface est en outre directement soumis aux changements climatiques et donc aux variations des paramètres pédoclimatiques, acteurs du vieillissement naturel du sol (Dagois, 2015). Il a alors été décidé de définir **l'horizon de surface** comme support des expériences de forçage en laboratoire.

### *2.1.2. Choix expérimental n°2 : les pratiques du dernier usage*

Des questions peuvent également se poser sur la séquence de la trajectoire historique à simuler. Est-il pertinent de simuler l'intégralité de la trajectoire ? La simulation d'une partie de la trajectoire est-elle suffisante pour atteindre les objectifs visés ?

Un changement d'usage peut entraîner des pratiques impactant fortement le sol et la pédogenèse. L'horizon de surface est parfois enterré sous des matériaux d'apport ou au contraire décapé. Les trois sites d'études ont ainsi été impactés par ces pratiques modifiant totalement la nature de l'horizon de surface lors des changements d'usage. L'horizon excavé ou recouvert devient ainsi difficile voire impossible à étudier en conditions contrôlées de laboratoire. Compte tenu du fait que l'horizon de surface ait été défini comme couche de référence et afin de simplifier le système expérimental, **seul le dernier usage de la trajectoire historique a été simulé** au cours des expériences de vieillissement. Ce choix expérimental implique donc que les expérimentations cherchent à simuler, non pas l'ensemble de la trajectoire historique, mais les diverses pratiques liées au dernier usage du sol.

## 2.2. Sélection des sites supports

Les choix expérimentaux conditionnent le choix des sites d'étude. En effet, par ces critères d'approche, certains sites retenus pour la phase terrain ne répondent plus au cadre conceptuel des expériences de forçage en laboratoire. C'est le cas des terres industrielles de la station expérimentale du LSE (Vandoeuvre-lès-Nancy, Brabois). En termes de dernier usage, le site a eu le statut de friche industrielle pendant une vingtaine d'année, sans qu'aucune pratique humaine particulière n'ait été appliquée. Comme la simulation de cet usage en laboratoire se traduirait uniquement par des successions de cycles climatiques liés au vieillissement naturel, il a été décidé de se focaliser sur les deux autres sites étudiés sur le terrain, en analysant :

- le dernier usage de la trajectoire historique du Potager du Roi concernant le secteur exploité en continu en jardin potager depuis sa création,
- le dernier usage de la trajectoire historique du site du quartier de Bel Air de Montreuil.

## 2.3. Sélection du matériau initial

Le matériau initial correspond à l'échantillon de terre sur lequel vont s'appliquer les protocoles de forçage en laboratoire. Le choix de ce matériau est une étape clé dans la mise en œuvre du protocole expérimental. Il s'agit donc de préciser les critères de sélection permettant d'identifier le matériau initial le plus adapté aux objectifs expérimentaux.

### 2.3.1. Critères de sélection du matériau initial

Les choix expérimentaux faits précédemment induisent les critères de sélection du matériau initial suivants :

- être représentatif de l'horizon de surface du profil de sol,
- être représentatif du sol tel qu'il était après le dernier changement d'usage.

Ces critères ne prennent cependant pas en compte la réalité de terrain. En effet, le vieillissement naturel du sol reste inéluctable. Depuis le dernier changement d'usage, le matériau d'origine, c'est-à-dire **le matériau représentant la couche superficielle juste après le dernier changement d'usage**, a vieilli et ses propriétés physico-chimiques ont pu évoluer en lien avec le régime climatique (Ouvrard *et al.*, 2009 ; Dagois, 2015). Il est donc impossible d'identifier un matériau initial strictement identique au matériau d'origine.

Pour pallier ce problème, il est nécessaire d'identifier un analogue au matériau recherché. L'analogue idéal correspondrait au matériau représentant la couche superficielle du sol après changement d'usage et vieilli uniquement par les effets climatiques. Cependant, cet analogue est difficile à trouver

en milieu urbain car le matériau d'origine a généralement subi d'autres pratiques humaines au cours du temps.

### 2.3.2. Identification du matériau initial pour chaque site support

#### 2.3.2.1 Matériau initial utilisé pour le Potager du Roi

Le matériau initial recherché pour le site du Potager du Roi correspond au sol utilisé lors de sa création, entre 1678 et 1683. D'après les recherches historiques sur le site, la terre de surface initialement introduite lors de la construction du Potager du Roi est issue de la colline de Satory recouverte par des Limons des Plateaux (cf. Chapitre III). Nos investigations pour le prélèvement de cette terre se sont donc portées dans le secteur de la colline de Satory. Cependant, le prélèvement de ce matériau initial n'a pas pu s'effectuer sur cette colline en raison du développement de l'activité urbaine perturbant ce matériau mais également de l'implantation d'une zone militaire compromettant aujourd'hui l'accès. Les Limons des Plateaux ont donc été prélevés à une dizaine de kilomètres du site du Potager du Roi dans la Forêt de Verrières. Cette terre, qui s'est développée dans des conditions similaires, sous couvert forestier, est issue d'un sol très analogue au sol utilisé lors de la reconstitution de sol sur le site du Potager du Roi. Lors du prélèvement, une fosse pédologique a été ouverte dans l'objectif d'identifier le matériau recherché (Figure 51). Puis un échantillon moyen de l'ensemble du profil exceptée la couche organique, a été prélevé. Ces terres ont été définies comme matériau initial utilisé au cours des expérimentations pour le site du Potager du Roi de Versailles, que l'on appellera « PRV » dans la suite du manuscrit.



**Figure 51 : Profil de Luvisol développé sur Limons des Plateaux observé lors du prélèvement du matériau initial dans la Forêt de Verrières**

### 2.3.2.2 *Matériau initial utilisé pour le site du quartier de Bel Air*

L'objectif premier d'identification du matériau initial du site du quartier de Bel Air était de trouver un analogue à la terre végétale apportée sur le site lors du changement d'usage. Pendant les travaux d'aménagement, les terres végétales excavées sont parfois stockées et réintroduites en fin d'opérations sur les zones susceptibles d'être végétalisées (CCTP, 2018b). Elles peuvent également être issues de parcelles voisines où d'autres travaux d'aménagement ont lieu (CCTP, 2005). Face à ce constat, il a été décidé de prélever de la terre de surface de parcelles des Murs à Pêches de Montreuil voisines du site n'ayant pas été urbanisées et faisant l'objet d'un usage agricole (agriculture urbaine). Ces terres constituent le matériau initial utilisé dans les expérimentations pour le site du quartier de Bel Air, que l'on appellera « BAM » dans la suite du manuscrit.

## 2.4. Dispositifs expérimentaux employés

### 2.4.1. *Description des dispositifs utilisés*

Les expérimentations ont été mises en œuvre dans des dispositifs cylindriques en PVC (10 cm de diamètre et hauteur variant de 9 à 14 cm selon les différentes modalités expérimentales) duquel un fond non étanche en PVC a été soudé à la base afin de maintenir la terre en place. De plus, un géotextile rigide en nylon de mailles de 500 micromètres de côté a été installé au fond des dispositifs afin d'éviter les pertes de terre au niveau de la soudure. Les dispositifs ont été dimensionnés pour disposer d'un volume de terre suffisant pour les expériences de vieillissement pour pouvoir y appliquer les pratiques humaines liées à la trajectoire historique étudiée et aussi adapter l'ensemble des dispositifs à l'espace disponible.

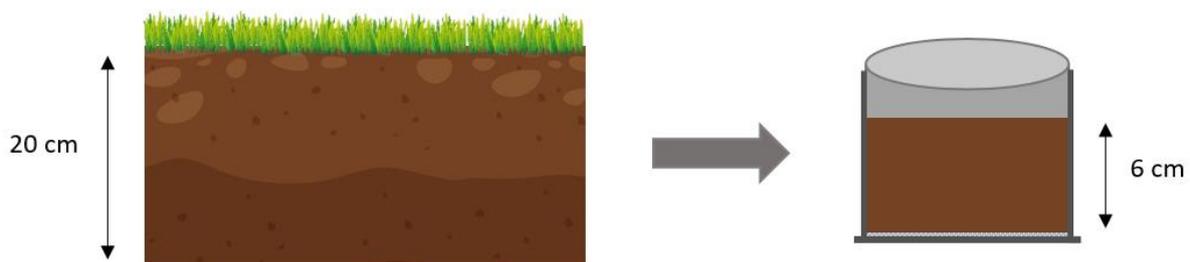
### 2.4.2. *Plateforme phytotronique*

Les expérimentations se sont déroulées dans une chambre climatique mise à disposition par la Plateforme Expérimentale Phytotronique de Lorraine (PEPLor). Les dispositifs expérimentaux ont ainsi été placés dans des conditions similaires tout au long de l'expérience de vieillissement. Les cycles climatiques, notamment les différences de températures imposées (cf. partie 3.2.1), ont été appliqués grâce aux capacités de la chambre climatique pouvant passer d'une température négative à positive et atteindre de hautes températures. L'ensemble des expérimentations a été réalisé dans l'obscurité.

### 3. Méthodes de vieillissement

#### 3.1. Transposition d'une situation réelle en conditions contrôlées de laboratoire

Reproduire une situation réelle en conditions contrôlées de laboratoire nécessite une description détaillée du système transposé. Il a été décidé de retranscrire en laboratoire le vieillissement accéléré des 20 premiers centimètres du sol. Ainsi, les matériaux initiaux prélevés pour les sites PRV et BAM ont été séchés à l'air libre, tamisés à 2 mm, homogénéisés et introduits dans les dispositifs expérimentaux de manière à obtenir une masse volumique apparente de  $1,2 \text{ g/cm}^3$  sur une hauteur de 6 cm (Figure 52).



**Figure 52 : Schéma de transposition de la situation réelle considérée en conditions contrôlées de laboratoire**

#### 3.2. Méthodes de pédologie expérimentale employées

La méthode de vieillissement des sols simulant une partie de leur trajectoire historique s'est basée sur deux facteurs d'influence de la pédogenèse en milieu urbain : le climat et les pratiques anthropiques. Grâce à la combinaison de ces deux facteurs, le matériau initial va être vieilli de manière accélérée en lui imposant des cycles climatiques et des pratiques humaines retraçant la partie de la trajectoire historique du sol simulée.

##### 3.2.1. Facteur climatique

Le climat est un facteur majeur de la pédogenèse. Les conditions climatiques (en particulier les précipitations, les périodes de forte chaleur et de gel) ne sont pas sans conséquence sur l'état et le fonctionnement du sol puisqu'ils viennent modifier certains paramètres intrinsèques comme sa température et sa teneur en eau. Ces variations hydriques et thermiques définissent ainsi le pédoclimat d'un sol. Les séquences climatiques imposées au sol pour simuler son vieillissement consistent alors à retranscrire ces variations par des cycles de gel/dégel, d'humification/dessiccation et des périodes à hautes températures ( $> 28^\circ\text{C}$ ) définis dans le Chapitre I.

Pour imposer ces cycles climatiques au sol, il a été nécessaire d'en quantifier l'intensité. En effet, chaque type de climat implique des conditions particulières et donc des pédoclimats différents. Un travail de traduction des données atmosphériques en données pédoclimatiques caractérisant le climat océanique dégradé, correspondant au climat de nos sites d'étude, a donc été réalisé. Ce travail s'est appuyé sur la méthodologie développée par Dagois *et al.*, 2017. Ainsi, dix années de conditions météorologiques de la région parisienne de 2003 à 2013 ont été traduites en données pédoclimatiques grâce au logiciel Hydrus 1D (version 4.16 – Šimůnek *et al.*, 2013). Les résultats du modèle ont ainsi permis de quantifier les cycles climatiques à imposer au sol correspondant à un climat océanique dégradé. Sur une année, 5 cycles gel/dégel, 6 cycles d'humectation/dessiccation et 1 journée chaude ont été identifiés.

La méthode de transposition de ces cycles climatiques en laboratoire a également été définie. L'expérimentation a pour objectif de simuler dix ans de vieillissement avec une contrainte de temps de dix semaines d'expérimentation. En d'autres termes, chaque semaine d'expérimentation doit représenter une année climatique. Pour des raisons techniques et pratiques, il n'a pas été possible de simuler l'intégralité des cycles climatiques annuels en une semaine d'expérimentation. Il a alors été décidé de réduire, de manière proportionnelle, le nombre de cycles à simuler. Ainsi, trois cycles gel/dégel et d'humectation/dessiccation avec une journée chaude ont été reconstitués pour une semaine d'expérimentation.

Dans le détail, pendant une semaine d'expérimentation la séquence climatique imposée au sol se traduit par :

- une humectation des terres à 70 % de la capacité au champ,
- 3 cycles successifs de gel/dégel. Chaque cycle, d'une durée de 16h a consisté à exposer les sols à une température de -4°C pendant 8h et à une température de 10°C pendant les 8h suivantes,
- un séchage des terres pendant 48h à une température de 24°C,
- une humectation des terres à 70 % de la capacité au champ,
- un séchage pendant 24h à une température de 28°C.

Ce protocole de vieillissement est directement inspiré de celui utilisé par Dagois (2015). Au total, dix cycles climatiques correspondant à la description ci-dessus ont été appliqués pour simuler un vieillissement de 10 ans du sol en 70 jours d'expérience en laboratoire.

### 3.2.2. Facteur anthropique

Afin de simuler le facteur anthropique et être au plus proche de la réalité de terrain, des enquêtes ont été réalisées auprès des responsables des sites, la responsable des cultures du Potager du Roi de Versailles et la responsable du site du quartier de Bel Air. Ces enquêtes ont permis de préciser et quantifier les pratiques appliquées au sol au cours du temps (Tableau 31).

**Tableau 31 : Pratiques identifiées et quantifiées grâce aux entretiens réalisés**

Site	Pratiques appliquées / Quantité estimée / Fréquence estimée
Potager du Roi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• amendement organique par ajout de fumier (300 kg. are<sup>-1</sup> ; pratique très courante autrefois, aujourd'hui réduite à 1 fois tous les 4 ans)</li> <li>• amendement organique par ajout de compost de déchets verts (300 kg/are ; pratique apparue dans les dernières décennies appliquée 1 fois tous les 4 ans)</li> <li>• apport de fertilisant par utilisation d'engrais chimique (NPK : environ 100 g.m<sup>-2</sup> ; pratique systématique de l'après-guerre, cette pratique a été abandonnée depuis une dizaine d'années)</li> <li>• apport de produits phytosanitaires (i.e. fongicide, herbicide, insecticide), selon les doses recommandées respectives pour chaque produit</li> <li>• travail du sol (2 à 3 fois par an)</li> <li>• irrigation (pratique effectuée sur les jeunes pousses, plusieurs fois par an)</li> <li>• compactage par piétinement</li> </ul>
Site du quartier de Bel Air	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tonte d'herbe avec ramassage (2 fois par an)</li> <li>• compactage par piétinement</li> <li>• apport/présence de matériaux anthropiques (pratique associée au changement d'usage, non mentionnée lors de l'entretien mais observée sur site)</li> </ul>

Une retranscription de l'ensemble de ces pratiques en conditions contrôlées de laboratoire a été réalisée. Ainsi, les pratiques identifiées ont été adaptées, de manière la plus réaliste possible, aux dispositifs expérimentaux retenus.

- **Amendement organique par ajout de fumier**

Le fumier utilisé pour l'expérimentation est un fumier de cheval acheté dans le commerce. Sa composition chimique a été déterminée par des mesures réalisées au laboratoire Sols et Environnement et est détaillée en annexe (Annexe 10). La quantité réelle apportée de 300 kg. are<sup>-1</sup> de masse fraîche a été transposée aux dispositifs expérimentaux. En fonction de la surface des dispositifs et tenant compte du fait que les 6 cm de profondeur de terre contenue dans ces dispositifs représentent les 20 premiers cm du sol, il a été calculé que 6,10 g de matière fraîche doivent être

apportés pour simuler cette pratique. Cette masse a été calculée par les principes de similitudes en appliquant un rapport de 6/20<sup>e</sup> à la masse de fumier à apporter. Le fumier a été séché en étuve (50°C) et tamisé à 2 mm pour écarter les fractions grossières afin d'assurer une répétabilité dans l'application et de contrôler les masses exactes apportées. Ainsi, la simulation d'apport de fumier a consisté à ajouter 3,61g de matière sèche de fumier de manière homogène sur l'ensemble du volume de terre contenu dans chaque dispositif. Cette opération a été répétée toutes les 2 semaines pour correspondre à la fréquence réelle d'application.

- **Amendement organique par ajout de compost de déchet verts**

Le compost de déchets verts utilisé dans le cadre de cette expérience est issu de la station Écopôle (83120), spécialisée dans la revalorisation des déchets verts et produits forestiers. Sa composition chimique a également été déterminée au sein du LSE et est précisée en annexe 10. De même que pour la pratique d'ajout de fumier, la quantité réelle de matière fraîche apportée au Potager du Roi a été transposée aux dispositifs expérimentaux. De plus, pour les mêmes raisons pratiques, le compost a été séché en étuve (50°C) et tamisé à 2 mm pour éliminer toutes les fractions grossières.

Ainsi, 4,10 g de compost sec ont été incorporés de manière homogène sur l'ensemble du volume de terre pour simuler la pratique d'amendement organique par ajout de compost de déchets verts. Cette opération a été réalisée une semaine sur deux en alternant avec la pratique d'amendement en fumier.

- **Apport de fertilisant par utilisation d'engrais chimique (NPK)**

L'engrais chimique utilisé pour les expériences est un engrais NPK (8-10-23). Sa composition chimique a été déterminée au LSE et est précisée en annexe 10. Cet engrais, sous forme de granulés, a été broyé à 2 mm. L'objectif de ce broyage était d'accélérer sa décomposition. La quantité à appliquer a également été estimée en fonction des dispositifs expérimentaux et des principes de similitudes.

Ramenée à la surface des dispositifs, l'ajout d'engrais NPK correspond à 0,2 g. L'engrais broyé a été ajouté de manière homogène sur l'ensemble du volume de terre des dispositifs. Cette pratique a été renouvelée toutes les semaines, de sorte à simuler un amendement annuel.

- **Apport de produit phytosanitaire**

Il a été décidé de se focaliser sur un seul produit phytosanitaire utilisé au Potager du Roi : la bouillie bordelaise. La bouillie bordelaise utilisée a été achetée dans le commerce. Le produit brut possède une teneur en cuivre de 200 g.kg<sup>-1</sup>. La dose recommandée par la notice d'utilisation a été prise comme dose de référence, soit 25 kg.ha<sup>-1</sup> de produit brut. Cette dose a également été adaptée aux conditions de l'expérimentation de la même manière que les pratiques précédentes.

Ainsi, par l'intermédiaire d'un micro-pulvérisateur, 5,20 mg de produit brut dilué dans 0,200 mL d'eau déminéralisée ont été ajoutés sur la surface du sol afin de simuler la pratique d'ajout de produit phytosanitaire. Cette opération a été réalisée une fois par semaine.

- **Travail du sol**

Le travail du sol a été simulé par transvasement de l'intégralité du volume de terre du dispositif dans un sac plastique aux dimensions adaptées (20 x 27 cm). Le mélange du contenu par retournements (*i.e.* 5 répétitions) a alors été réalisé pour simuler le travail de la terre. Les agrégats de grandes tailles constitués lors du vieillissement ont été cassés lors de cette opération. À noter que cette opération était appliquée lors de l'ajout de fumier, de compost et d'engrais afin de bien homogénéiser l'ensemble du système. Une fois le mélange terminé, l'intégralité du contenu du sac plastique a été transvasée dans le dispositif expérimental sans tassement. Cette opération a été appliquée 1 fois par semaine.

- **Irrigation**

La pratique d'irrigation a été simulée par un arrosage permettant au sol d'atteindre la capacité au champ, soit un taux d'humidité de 28,4 % et 24,5 % respectivement pour les sites PRV et BAM. Ces teneurs en eau ont été contrôlées grâce à un système de pesée de chaque dispositif avant et après arrosage.

Ces arrosages intensifs ont été réalisés sur la surface de sol contenu dans les dispositifs par simulation de pluie fine avec de l'eau déminéralisée, une fois par semaine.

- **Compactage par piétinement**

La simulation d'un compactage par piétinement a consisté à reproduire le pas d'une personne d'un poids moyen de 70 kg. Afin de prendre en compte le facteur d'échelle entre la réalité et le dispositif, une masse de 3 kg a été utilisée pour simuler ce piétinement dans les dispositifs. Cette masse de 3 kg a été appliquée de manière contrôlée sur toute la surface de sol des dispositifs expérimentaux. Pour cela, la masse était lâchée d'une hauteur de 3 cm pour simuler l'inertie d'un corps humain en mouvement. Cette opération a été renouvelée deux fois par semaine.

- **Tonte d'herbe avec ramassage**

La lecture de la littérature a permis d'estimer la masse d'herbe par m<sup>2</sup> déposée sur le sol lors d'une tonte avec ramassage (Karl *et al.*, 2001 ; Nataningtyas *et al.*, 2017). Une référence de 7 g.m<sup>-2</sup> d'herbe sèche a ainsi été estimée. L'herbe utilisée pour l'expérience provient d'un site enherbé situé sur le campus de Brabois à Vandœuvre-lès-Nancy. Cette herbe a été séchée en étuve (50°C) et broyée à 2 mm. Sa composition chimique a été déterminée et est précisée en annexe (Annexe 10)

Une masse de 0,015 g d'herbe séchée a été déposée en surface des sols contenus dans les dispositifs. Cette opération simule ainsi deux tontes annuelles. Elle a été réalisée 1 fois par semaine sur les dispositifs expérimentaux.

- **Apport/présence de matériaux anthropiques**

Pour traduire la présence de matériaux anthropiques, du mortier a été ajouté. Il représente un artefact fréquemment retrouvé dans des sols urbains. Le mortier utilisé a été fabriqué en laboratoire. Il est composé de 0,3 kg de ciment, 1,8 kg de sable et 0,2 L d'eau. Une fois séché (après 72 h), le mortier a été broyé à 2 mm afin d'accélérer les processus pédogénétiques associés à la présence de cet artefact. Sa composition chimique complète a été déterminée au sein du laboratoire (Annexe 10). Un mélange homogène de sol et de mortier (5% v/v) a été introduit initialement dans les dispositifs expérimentaux. Aucun apport de mortier supplémentaire n'a été réalisé.

### **3.3. Plan d'expérience défini pour chaque matériau afin de simuler les différents traitements représentatifs des pratiques humaines**

Afin de répondre aux objectifs visés, les expériences de vieillissement ont été décomposées en différents traitements. Ces traitements sont imposés aux deux matériaux initiaux précédemment identifiés (PRV et BAM).

#### *3.3.1. Simulation exclusive du facteur climatique*

Le premier traitement a consisté à la simulation du facteur climatique. Les sols initiaux identifiés pour les deux sites supports, ont été exclusivement soumis aux cycles climatiques précédemment cités, durant 10 semaines. Ce traitement a servi de référence aux expérimentations. Il a permis, dans les conditions expérimentales définies, de connaître l'effet climatique induit au cours du temps par les successions de cycles gel/dégel, humectation/dessiccation et de haute température sur les propriétés physiques et chimiques des deux matériaux initiaux.

#### *3.3.2. Simulation d'une seule pratique combinée au facteur climatique*

Pour chacune des 7 pratiques associées au PRV et des 3 associées au site BAM, une expérience de vieillissement a été réalisée pour caractériser l'impact individuel de chaque pratique au cours du temps. Ces expériences réalisées sur chaque matériau initial combinent pratique et facteur climatique afin d'identifier et quantifier l'effet de la pratique sur les paramètres physiques et chimiques mesurés au cours des 10 semaines d'expérience.

### 3.3.3. Simulation de l'ensemble des pratiques combiné au facteur climatique

La simulation de l'ensemble des pratiques décrivant le dernier usage de la trajectoire historique de chaque site combiné au facteur climatique a pour objectif d'identifier l'impact de la synergie de ces pratiques sur les propriétés physiques et chimiques du sol. Ces expérimentations ont permis d'identifier plus précisément l'influence du facteur humain sur les propriétés des sols au cours du temps et de préciser les résultats obtenus sur le terrain.

### 3.3.4. Plan de suivi de l'évolution des paramètres

Pour l'ensemble de ces traitements, le suivi temporel des paramètres physiques et chimiques des sols placés dans les dispositifs expérimentaux a été réalisé en quatre temps (tableau 32). Une caractérisation des propriétés a été effectuée à l'état initial sur un échantillon homogène prélevé en triplicata représentant l'ensemble des dispositifs mis en place. Une caractérisation de l'état final des propriétés de chaque dispositif, c'est-à-dire à la fin des 10 semaines d'expérience a également été effectuée. De plus, afin de pouvoir suivre l'évolution des différents paramètres des sols, deux mesures intermédiaires ont été effectuées à l'issue de la 4<sup>ème</sup> et de la 7<sup>ème</sup> semaine d'expériences notées respectivement T1 et T2. Pour chacune de ces étapes de caractérisation T1, T2 et T<sub>final</sub> et pour chaque traitement, 3 répétitions expérimentales ont été réalisées impliquant le sacrifice de 3 dispositifs lors des mesures des propriétés physico-chimiques (Tableau 32). Les sols sacrifiés sont alors chacun récupéré dans un sac plastique étiqueté, homogénéisés et séchés à l'étuve (50°C) pendant 48 h.

**Tableau 32 : Dispositifs expérimentaux nécessaires à l'expérimentation**

Sols	Traitements	Nombres de dispositifs			Total
		T1	T2	T <sub>final</sub>	
<b>PRV</b>	Simulation exclusive du facteur climatique	3	3	3	9
	Simulation d'une seule pratique combinée au facteur climatique	3*7 pratiques	3*7 pratiques	3*7 pratiques	63
	Simulation de l'ensemble des pratiques combiné au facteur climatique	3	3	3	9
<b>BAM</b>	Simulation exclusive du facteur climatique	3	3	3	9
	Simulation d'une seule pratique combinée au facteur climatique	3*3 pratiques	3*3 pratiques	3*3 pratiques	27
	Simulation de l'ensemble des pratiques combiné au facteur climatique	3	3	3	9
<b>Total</b>		42	42	42	126

### 3.3.5. Mise en place des dispositifs

Au total, 126 dispositifs expérimentaux ont été répartis en trois blocs de 42 dispositifs répartis de manière aléatoire par randomisation dans la chambre phytotronique (Figure 53).



**Figure 53 : Bloc de 42 dispositifs expérimentaux placés aléatoirement au sein de la chambre climatique**

### **3.4. Propriétés physiques et chimiques déterminées au cours de l'expérience**

#### *3.4.1. Détermination de la couleur*

L'évolution de la couleur du sol avant ( $T_{initial}$ ) et après vieillissement ( $T_{final}$ ) a été étudiée pour chaque traitement suivant la charte Munsell, référence internationale pour la classification des couleurs des sols.

#### *3.4.2. Description de la structure*

La structure d'un sol est définie comme le mode d'agencement de ses constituants organo-minéraux. Elle est le résultat de l'association des particules minérales et organiques présentes dans le sol que l'on appelle agrégat. Les sous- et sur-structures du sol ont été décrites au cours des expérimentations. Ces descriptions ont pour objectif de décrire les effets des cycles climatiques et des pratiques sur la structure du sol au cours du vieillissement accéléré. Pour ce faire, les sous- et sur-structures des sols ont été décrites à l'instant initial et à l'instant final de l'expérimentation grâce à un système de fond

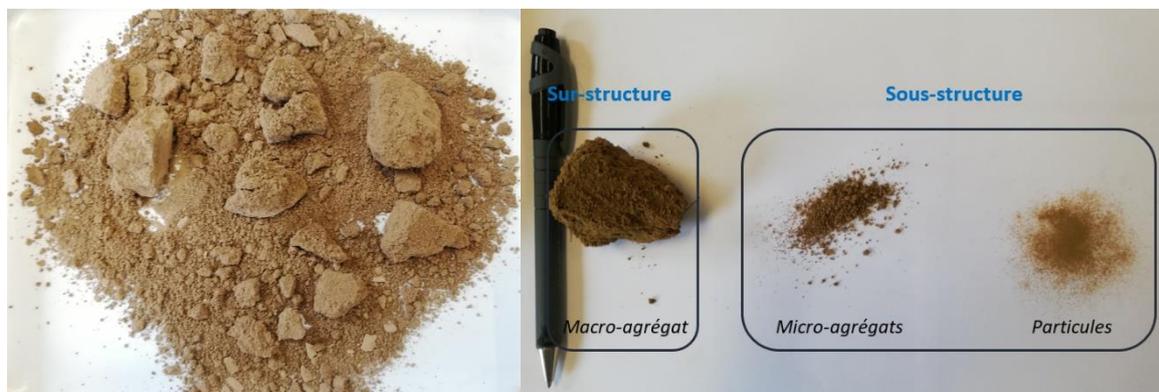
coulissant qui a été installé sur certains dispositifs afin de pouvoir sortir le sol sans en perturber la structure (Figure 54).

La sous-structure correspond aux micro-agrégats et aux particules de sol, de taille inférieure au millimètre. Les micro-agrégats ont été étudiés sous deux aspects :

- leur degré de cohésion (*i.e.* intensité d'agrégation) et leur forme de structure (forme du micro-agrégat),
- La proportion de micro-agrégats et de particules a été estimée en séparant les deux fractions par tamisage à 200  $\mu\text{m}$  à sec, sur trois répétitions, d'un millilitre de sol sous échantillonné lors de l'analyse de la sous-structure.

La sur-structure correspond aux macro-agrégats de taille supérieure à un millimètre. Ces derniers ont été étudiés sous trois aspects :

- Leur proportion au sein de l'unité structurale déterminée par un graphique d'estimation des pourcentages surfaciques (Annexe 11)
- leur degré de cohésion (*i.e.* intensité d'agrégation),
- leur classe (*i.e.* taille moyenne des agrégats),
- leur forme de structure (forme des agrégats).



**Figure 54 : Sol extrait du dispositif expérimental (à gauche) et définition des éléments composant sa sur-structure et sa sous-structure (à droite)**

### 3.4.3. Détermination de la masse volumique apparente

Au cours de l'ensemble des expériences, un suivi de la masse volumique apparente (MVA) a été effectué tout au long des 10 semaines d'expériences grâce à la mesure hebdomadaire de la profondeur

de sol contenu dans les dispositifs (et donc son volume, le sol des dispositifs étant plan) et de la détermination à  $T_{initial}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_{final}$  de la masse de sol sec :

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse de sol sec}}{\text{Volume}}$$

Où la masse volumique apparente s'exprime en  $\text{g.cm}^{-3}$ , la masse de sol sec en g et le volume de sol en  $\text{cm}^3$ .

#### 3.4.4. Paramètres chimiques mesurés

Plusieurs paramètres chimiques ont été mesurés tout au long des 10 semaines d'expérience à  $T_{initial}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  et à  $T_{final}$  pour chaque traitement appliqué. L'ensemble de ces paramètres a été mesuré au LSE (Tableau 33).

**Tableau 33 : Paramètres chimiques mesurés au cours des expériences de vieillissement et normes associées**

Paramètres chimiques	Normes utilisées
$\text{pH}_{\text{eau}}$	NF ISO 10390
capacité d'échange cationique (CEC)	NF ISO 23470
carbone organique total (C) / Azote total (N)	NF ISO 10694 / NF ISO13878
phosphore disponible ( $\text{P}_{\text{Olsen}}$ )	NF ISO 11263
extraction des éléments en traces du sol par une solution tamponnée d'acide diéthylène triamine pentaacétique (DTPA) (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Zn)	NF ISO 14870 / NF ISO 22036
éléments majeurs extrait à l'eau régale (Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, S)	NF ISO 11446 / NF ISO 22036
éléments traces métalliques extrait à l'eau régale (As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)	NF ISO 11446 / NF ISO 22036

L'exploitation des résultats s'est faite sous la forme de traitements statistiques des données. Des outils statistiques tels que des analyses de variance (ANOVA), des tests de Kruskal-Wallis, des tests de Tukey ou encore des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées grâce à RStudio et aux packages Ade4, FactoMineR et factoextra. Les principaux résultats obtenus grâce à ces données sont présentés sous forme de graphes représentant l'évolution de chaque paramètre au cours de l'expérimentation en fonction de chaque traitement appliqué. Ces graphiques sont complétés d'une analyse de variance (ANOVA) qui indique si les évolutions observées sont statistiquement significatives ( $p\text{-value} < 0,05$ ) ou non ( $p\text{-value} \geq 0,05$ ) et d'un test de Tukey qui permet d'indiquer, par des lettres, les groupes de mesures statistiquement différents. Dans le cas où les conditions d'homogénéité des variances et de normalité des populations étudiées nécessaires à l'ANOVA ne sont pas satisfaites, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été effectué.

## 4. Résultats

### 4.1. Évolution de la couleur des sols au cours des expériences de vieillissement

#### 4.1.1. Résultats obtenus pour le sol « PRV »

La couleur du sol « PRV », ayant exclusivement subi les cycles climatiques (V\_Cli) au cours des 10 semaines d'expériences (HUE 10 YR 6/4, d'après le code Munsell) n'a pas varié lors du processus de vieillissement. Ce même résultat a été observé pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés à la pratique individuelle de compactage (V\_Cli+compac), d'irrigation (V\_Cli+irr), d'ajout de produit phytosanitaire (V\_Cli+ph), de travail de sol (V\_Cli+tra) et d'ajout d'engrais (V\_Cli+eng). Un changement de couleur (passage de HUE 10 YR 6/4 à HUE 10 YR 5/4) a par contre été observé pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés aux pratiques individuelles d'ajout de fumier (V\_Cli+fum) et d'ajout de compost (V\_Cli+compost) et à l'ensemble des pratiques associées au « PRV » (V\_Cli+ens). Ce changement illustre une légère brunification du sol au cours du temps (Figure 55).

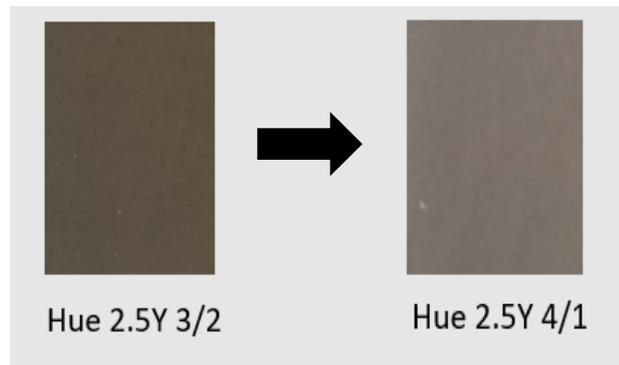


**Figure 55 : Changement de couleur des sols ayant subi les cycles climatiques combinés à l'ensemble des pratiques et pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés à la pratique unitaire « ajout de fumier » et à la pratique unitaire « ajout de compost »**

#### 4.1.2. Résultats obtenus pour le sol BAM

Le sol « BAM », ayant subi exclusivement les cycles climatiques (M\_Cli) n'a pas présenté d'évolution de couleur au cours de l'expérimentation (Hue 2.5 Y 3/2). Ce résultat a également été observé pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés à la pratique individuelle de compactage (M\_Cli+compac) et d'ajout d'herbe (M\_Cli+herb). *A contrario*, un changement de couleur a été observé pour le sol ayant subi les cycles climatiques combinés à la pratique individuelle d'ajout de mortier (M\_Cli+mor) et à l'ensemble des pratiques associées au site « BAM » (M\_Cli+ens). Le changement de

couleur identifié est codifié par le passage de « Hue 2.5 Y 3/2 » à « Hue 2.5 Y 4/1 », le sol est devenu plus grisâtre au cours du temps (Figure 56).



**Figure 56 : Changement de couleur caractérisé pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés à l'ensemble des pratiques et pour les sols ayant subi les cycles climatiques combinés à la pratique unitaire « ajout de mortier »**

## **4.2. Évolution de la structure des sols au cours de l'expérience de vieillissement**

### *4.2.1. Résultats obtenus pour le sol « PRV »*

Le sol à l'instant initial présente une sur-structure peu développée. En effet, les macro-agrégats ne représentent que 10% de l'unité structurale du sol. Les macro-agrégats ont été qualifiés de très friables en raison d'un degré d'agrégation très faible. Leur taille moyenne est pluri-centimétrique de l'ordre de 1 à 2 cm et leur forme a été qualifiée de polyédrique sphérique. Concernant la sous-structure, la répartition entre les micro-agrégats et les particules de sol est de respectivement 40 et 60 %. Les micro-agrégats ont un degré d'agrégation élevé, difficilement friable et une forme polyédrique sphérique identique aux macro-agrégats (Figure 57).



**Figure 57 : L'unité structurale du sol « PRV » à l'instant initial (a), répartition de la sous-structure du sol initial entre les micro-agrégats et les particules après tamisage à 200 µm (b)**

La structure du sol V\_Cli+ens en fin d'expérience a présenté de légères différences (Figure 58). Les macro-agrégats représentent 30 % de l'unité structurale. De plus, leur degré d'agrégation est plus élevé. Les macro-agrégats sont donc moins friables. Leur taille moyenne est d'environ 4 cm soit plus élevée que la taille moyenne des macro-agrégats du sol représentant l'instant initial. Leur forme a également été modifiée puisqu'elle a été caractérisée de polyédrique anguleuse au lieu de polyédrique sphérique, en début d'essai. Des évolutions ont également été observées pour la sous-structure du sol dans la répartition des micro-agrégats par rapport aux particules de sol estimée respectivement à 80 % et 20 %. Le degré de cohésion des micro-agrégats et leur forme n'ont quant à eux pas été modifiés au cours des expériences de vieillissement.



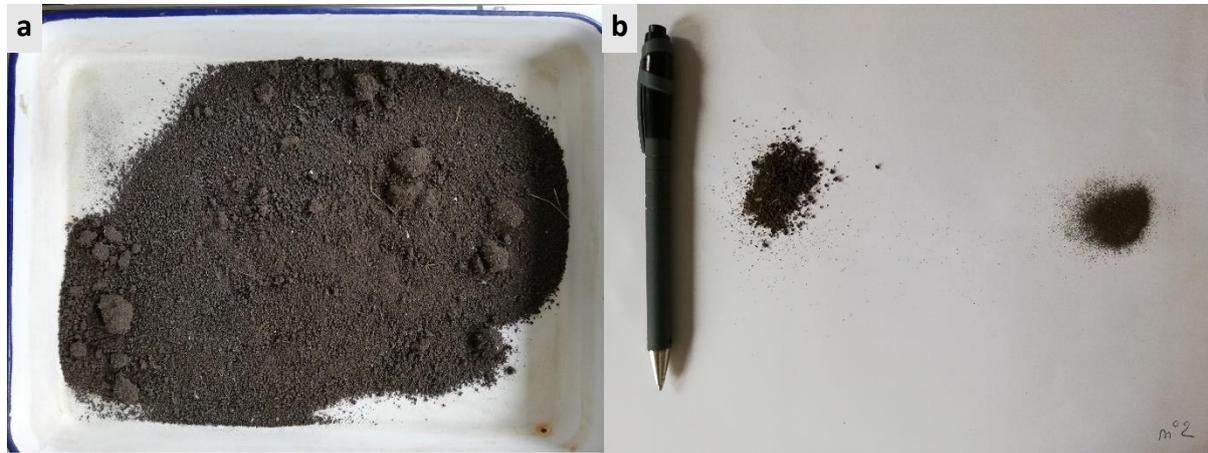
**Figure 58 : Structure du sol ayant subi les cycles climatiques combinés à l'intégralité des pratiques (V\_Cli+ens) (a), répartition de la sous-structure du sol initial entre les micro-agrégats et les particules après tamisage à 200 µm (b)**

D'autres traitements ont eu pour effet une évolution de la structure du sol. Le sol V\_Cli+compac a été caractérisé par une sur-structure singulière car les macro-agrégats présents dans ce sol ont un degré d'agrégation très élevé et une taille moyenne plus importante que l'ensemble des sols observés. De plus, une différence dans la répartition de la sous-structure a été observée entre les sols V\_Cli, V\_Cli+compac, V\_Cli+irr, V\_Cli+ph et les autres sols. En effet, il semblerait que les sols précédemment cités n'ayant pas été perturbés par un travail de sol au cours de l'expérience ont une proportion plus élevée de micro-agrégats, relativement aux particules (Annexe 12).

#### 4.2.2. Résultats obtenus pour le sol « BAM »

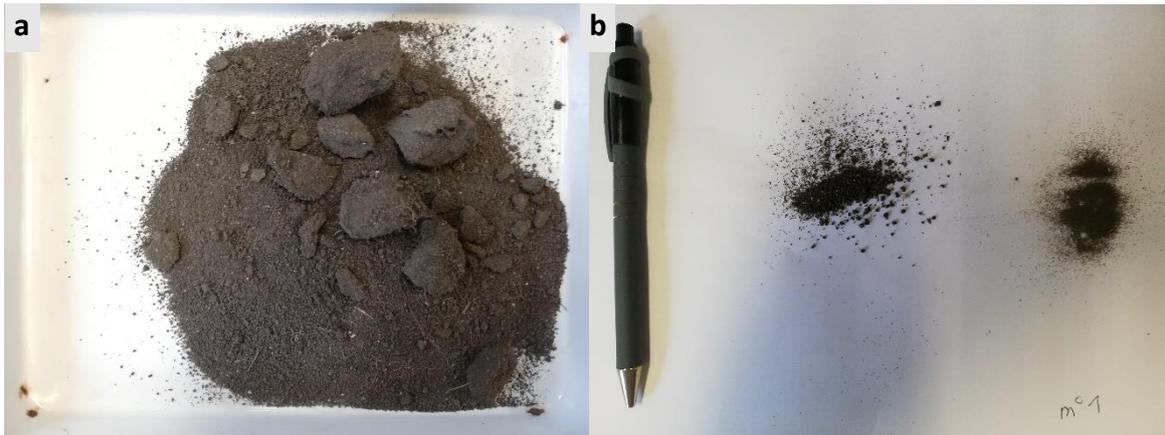
La structure initiale du sol « BAM » présente également une sur-structure peu développée. Les macro-agrégats représentent seulement 5% de l'unité structurale. Leur degré d'agrégation a été qualifié de faible et leur taille moyenne est pluri-centimétrique, de l'ordre de 1 à 2cm. La forme des macro-

agrégats a été qualifiée de sphérique. Concernant la sous-structure, la répartition entre les micro-agrégats et les particules de sol est respectivement de 60 et 40 %. Les micro-agrégats ont été qualifiés de difficilement cassables en lien avec un degré d'agrégation élevé, et leur forme de polyédrique sphérique (Figure 59).



**Figure 59 : Structure du sol « BAM » à l'état initial (a), répartition de la sous-structure du sol initial entre les micro-agrégats et les particules après tamisage à 200 µm (b)**

La structure du sol M\_Cli+ens présente de légères différences avec la structure initiale, notamment en ce qui concerne la sur-structure. Les macros-agrégats représentent 40 % de l'unité structurale contre 5% pour la sur-structure initiale. De plus, leur degré d'agrégation, leur taille moyenne et leur forme ont évolué au cours de l'expérience. Les macros-agrégats sont ainsi devenus moins friables. Leur taille a augmenté pour atteindre de l'ordre de 3 à 4 cm. Enfin leur forme a été qualifiée de polyédrique, au lieu de sphérique initialement. Aucune différence notable n'a cependant été identifiée concernant la sous-structure. La répartition entre les micro-agrégats et les particules n'a pas évolué (Figure 60).



**Figure 60 : Structure du sol ayant subi les cycles climatiques combinés à l'intégralité des pratiques (M\_Cli+ens) (a), répartition de la sous-structure du sol initial entre les micro-agrégats et les particules après tamisage à 200 µm (b)**

Les structures de sol correspondant aux autres traitements ont également été étudiées. Pour l'intégralité des traitements, les mêmes changements de sur-structure ont été observés entre la structure initiale et le sol M\_Cli+ens, avec des macro-agrégats moins friables, de taille plus grande et de forme polyédrique (Annexe 12).

### **4.3. Évolution de la masse volumique apparente au cours de l'expérience de vieillissement**

#### *4.3.1. Résultats obtenus pour le sol « PRV »*

Certaines pratiques imposées aux sols ont eu des impacts sur la masse volumique apparente (MVA) (Tableau 34). Au cours des 10 semaines de vieillissement et en prenant en compte l'intégralité des traitements, la masse volumique apparente, initialement fixée à  $1,20 \text{ g.cm}^{-3}$  a varié pour atteindre des valeurs allant de  $0,85$  à  $1,31 \text{ g.cm}^{-3}$  selon les traitements. Les MVA les plus élevées sont associées à la pratique de compactage. Une augmentation de ce paramètre a été observée pour le sol « V\_Cli+compac » montrant que le compactage accroît la MVA au cours du temps. Les MVA les moins élevées sont associées aux pratiques de travail de sol, d'ajout d'engrais, de fumier et de compost. Rappelons que pour appliquer ces pratiques et simuler la réalité du terrain, le sol est sorti de son dispositif expérimental et est homogénéisé. Il est ensuite remis dans son dispositif sans tassement, ce qui explique la diminution de la MVA au cours du temps. Ce résultat est également observé pour le sol « V\_Cli+ens ».

**Tableau 34 : Évolution de la masse volumique apparente en fonction des neuf traitements appliqués au sol « PRV »**

Traitements	Masse volumique apparente (g.cm <sup>-3</sup> )							
	T <sub>initial</sub>		T1		T2		T <sub>final</sub>	
	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type
V_Cli	1,20	0,01	1,19	0,01	1,20	0	1,19	0,01
V_Cli+compac	1,20	0,01	1,30	0,01	1,31	0	1,31	0,01
V_Cli+compost	1,20	0,02	0,84	0,02	0,84	0,02	0,79	0,02
V_Cli+eng	1,20	0,03	0,88	0,03	0,86	0,03	0,89	0,03
V_Cli+ens	1,20	0,05	1,02	0,05	0,97	0,01	0,88	1,4 <sup>E</sup> -16
V_Cli+fum	1,20	0,04	0,91	0,04	0,82	0,01	0,82	0,01
V_Cli+irr	1,20	0	1,18	0	1,18	0	1,18	0
V_Cli+ph	1,20	0,01	1,19	0,01	1,19	0,01	1,20	0
V_Cli+tra	1,20	0,03	0,88	0,03	0,86	0,02	0,85	0,01

#### 4.3.2. Résultats obtenus pour le sol « BAM »

L'analyse de la MVA au cours du temps sur le sol « BAM » montre plusieurs évolutions en fonction des traitements appliqués (Tableau 35). La MVA mesurée varie selon les différents traitements entre 1,15 et 1,20 g.cm<sup>-3</sup>. Le sol « M\_Cli » présente une légère diminution de la MVA au cours du temps. Ce résultat montre que le vieillissement climatique aurait un impact sur ce paramètre. Une tendance similaire est également observée sur les sols «M\_Cli+mor » et « M\_Cli+herb ». Cette légère diminution de la MVA ne serait donc pas expliquée par les pratiques anthropiques mais plutôt, d'après les résultats par les cycles climatiques. Enfin une stabilisation de la MVA au cours des expérimentations a été observée pour les sols « M\_Cli+compac » et M\_Cli+ens ». Ces sols ont subi un compactage deux fois par semaine et les résultats montrent que cette pratique semble avoir compensé les effets climatiques sur la MVA du sol.

**Tableau 35 : Évolution de la masse volumique apparente en fonction des cinq traitements appliqués au sol « BAM »**

Traitements	Masse volumique apparente g.cm <sup>-3</sup>							
	T <sub>initial</sub>		T <sub>initial</sub>		T <sub>initial</sub>		T <sub>initial</sub>	
	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type
M_Cli	1,20	0	1,16	0	1,16	0,01	1,16	0,01
M_Cli+mor	1,20	0	1,16	0	1,15	0,01	1,16	0
M_Cli+compac	1,20	0,02	1,20	0,02	1,20	0,02	1,20	0
V_Cli+ens	1,20	0,02	1,20	0,02	1,20	0,01	1,19	0,01
V_Cli+herb	1,20	0	1,16	0	1,16	0	1,17	0,01

## 4.4. Analyse de l'influence des pratiques sur les propriétés chimiques des sols

### 4.4.1. Influence des pratiques associées au site « PRV »

#### 4.4.1.1 Résultats généraux du vieillissement expérimental du sol « PRV »

L'ensemble des mesures réalisées aux instants intermédiaires T1, T2 et à l'instant final, c'est-à-dire après 10 semaines d'expériences de simulation de vieillissement ont été représentées à travers une analyse en composantes principales (ACP). À ces mesures a été ajoutée les trois mesures (= répétitions) physico-chimiques réalisées sur le matériau initial utilisé. Ces mesures représentent l'état initial de chaque traitement et sont représentées en rouge sur la figure (Figure 61b). Les deux premières dimensions de l'analyse en composante principale (ACP) effectuée sur les paramètres physiques et chimiques mesurées explique 52,3 % de la variabilité totale (Figure 61). Les variables telles que le nickel biodisponible (« Ni\_DTPA »), le plomb biodisponible (« Pb\_DTPA »), la masse volumique apparente (« MVA »), le phosphore Olsen (« POlsen »), la capacité d'échange cationique (« CEC »), le carbone organique (« C\_org »), le magnésium et le sodium biodisponibles (« Mg\_DTPA » ; « Na\_DTPA ») sont principalement expliquées par l'axe horizontal expliquant 39,9% de la variabilité. *A contrario*, les variables telles que la teneur en fer total (« Fe\_MAJ »), en aluminium total (« Al\_MAJ »), le Zn<sup>2+</sup> échangeable (« Zn\_CEC ») ou encore la teneur en Arsenic (« As\_Min ») semblent principalement expliquées par l'axe vertical expliquant 12,4 % de la variabilité.

Concernant l'étude des individus de cette ACP (Figure 61b), des différences majeures sont observées entre les individus représentant les différents traitements. Le sol « V\_Cli+ens » ayant, pour rappel, subi les cycles climatiques combinés à l'ensemble des pratiques identifiées au Potager du Roi, est représenté par des individus très éloignés de l'état initial et qui se répartissent selon l'axe 1. Les individus représentant les sols V\_Cli+ens sont corrélés positivement avec certaines variables telles que le carbone total (« C\_Tot »), le carbone organique (« C\_org »), la capacité d'échange cationique (« CEC ») et le phosphore Olsen disponible (« POlsen »), montrant ainsi de bonnes potentialités agronomiques. *A contrario* ces individus semblent être corrélés négativement à la masse volumique apparente (MVA).

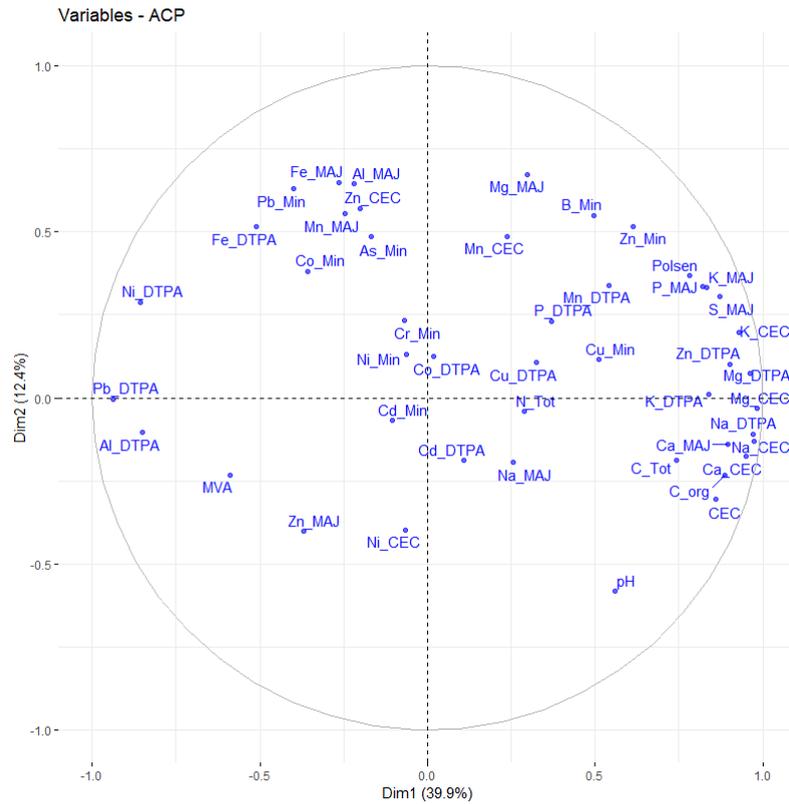
D'autres sols se démarquent des propriétés de l'état initial du sol comme les sols « V\_Cli+fum », « V\_Cli+compost » et V\_Cli+engrais ». Les sols ayant subi les amendements organiques associés au facteur climatique semblent être corrélés à la variable pH tandis que les sols associés à la pratique d'amendement d'engrais chimique NPK combinée au facteur climatique semblent être au contraire corrélés négativement à cette variable.

Le sol « V\_Cli » possède des propriétés similaires aux propriétés de l'état initial car les individus le représentant sont très proches de l'individu représentant l'état initial du sol. Les autres traitements

« V\_Cli\_tra », « V\_Cli\_compac », « V\_Cli\_irr » et « V\_Cli\_ph » ont des individus également situés à proximité de l'état initial répartis selon l'axe vertical. L'ACP montre donc que ces traitements ont des effets plus mesurés sur les propriétés des sols.

Les individus ont également été représentés en fonction des étapes de caractérisation  $T_{initial}$ , T1, T2 et  $T_{final}$  (Figure 62). Cette représentation montre qu'il existe une évolution dans le temps des propriétés des sols pour chaque traitement étudié. En effet, par exemple, les individus « V\_Cli+ens » sont de plus en plus éloignés de l'état initial en fonction de leur temps de mesure. Ce résultat montre donc que les propriétés des sols évoluent au fur et à mesure de l'expérimentation. Cette observation a également été effectuée pour les individus représentant les traitements « V\_Cli+fum », « V\_Cli+compost » et « V\_Cli+engrais ».

a)



b) Analyse en composantes principales

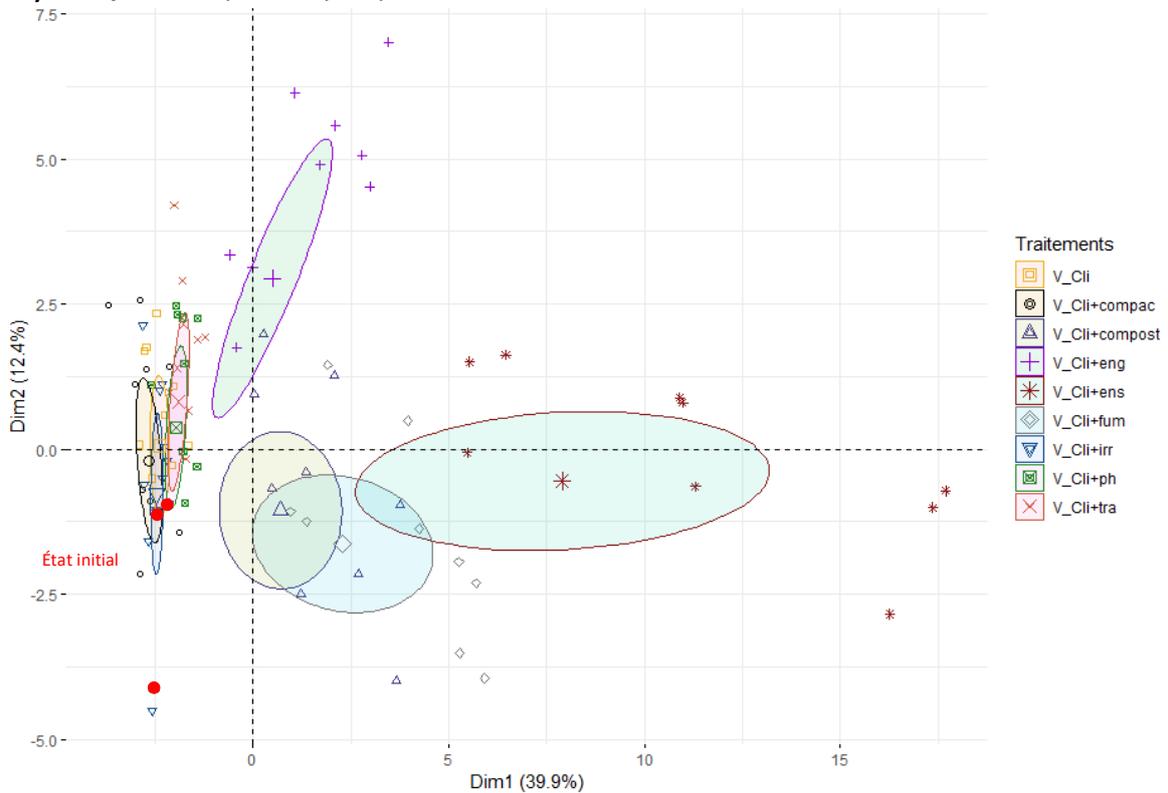


Figure 61 : Cercle de corrélation des variables physiques et chimiques analysées pour l'ensemble des traitements (n=81) réalisés ACP réalisée avec RStudio grâce aux packages FactoMineR et factoextra et à la fonction fviz\_pca\_var (a). Analyse en composantes principales des mesures réalisées au cours

des 10 semaines d'expérience en fonction des différents traitements. ACP réalisée avec l'outil RStudio à l'aide de la fonction PCA() et fviz\_pca\_ind () des packages FactoMineR et factoextra (b)

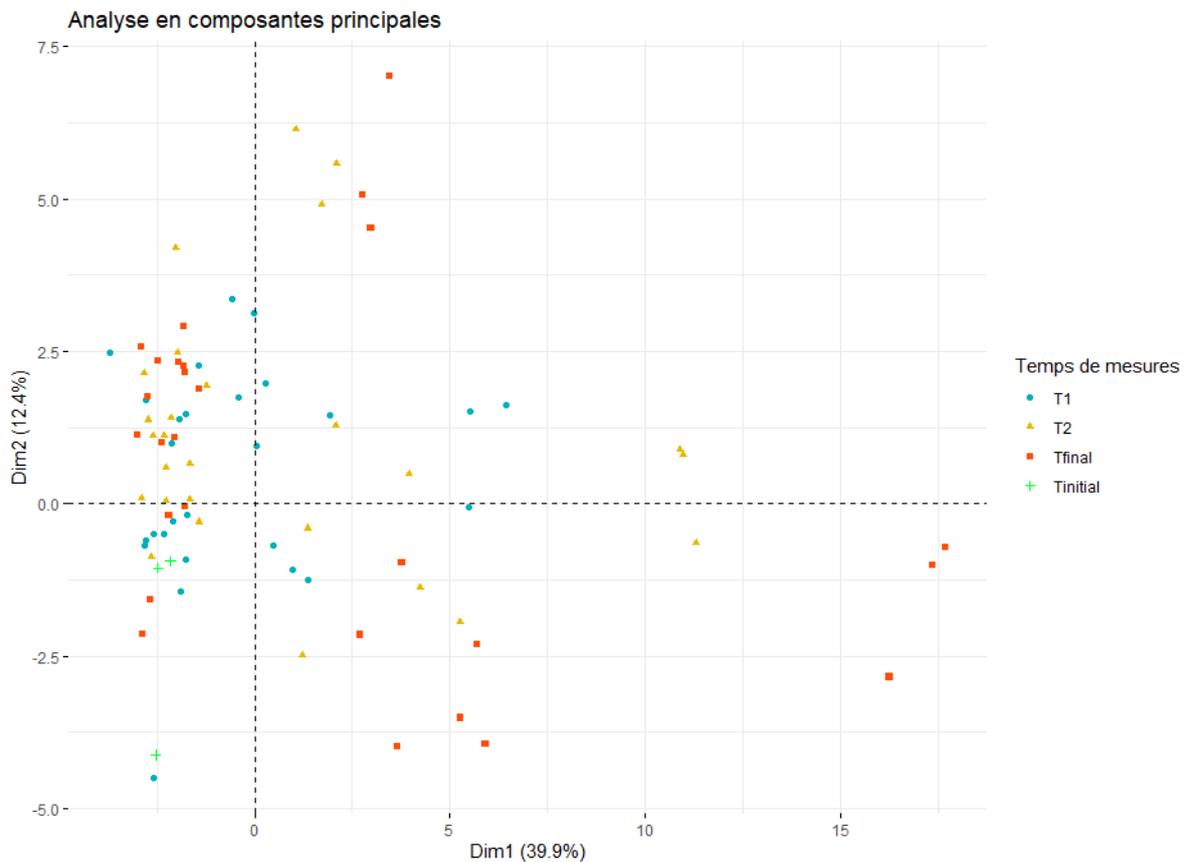


Figure 62 : Analyse en composantes principales des mesures réalisées au cours des 10 semaines d'expérience en fonction des différents temps de mesures. ACP réalisée avec l'outil RStudio à l'aide de la fonction PCA() et fviz\_pca\_ind () des packages FactoMineR et factoextra

#### 4.4.1.2. Influence des pratiques sur les propriétés agronomiques du sol « PRV »

Les mesures de pH réalisées tout au long des expériences de vieillissement ont été retranscrites en fonction des différents traitements sous forme graphique tout en faisant figurer le résultat du test ANOVA (Figure 63). Des différences très significatives ont été observées dans l'évolution des pH des sols « V\_Cli+compost » et « V\_Cli+fum » caractérisée par une augmentation au cours du temps. À l'inverse, une diminution du pH du sol « V\_Cli+eng » au cours du temps a été observée. Les pH des sols « V\_Cli », « V\_Cli+compac », « V\_Cli+irr », « V\_Cli+ph » et « V\_Cli+tra » présentent, quant à eux, des tendances similaires au cours du temps, caractérisées par une légère diminution d'environ 0,1 unité qui ne montre pas de tendance nette d'évolution au cours du temps. Malgré un effet antagoniste de ces pratiques sur le pH du sol, il a été observé une augmentation nette de plus de 2 unités au cours du

temps pour le pH du sol « V\_Cli+ens » qui a subi l'ensemble des pratiques.



**Figure 63 : Évolution du pH au cours du temps en fonction des neuf traitements réalisés**

Sur les mêmes bases graphiques, l'évolution de la teneur en carbone organique au cours du temps et en fonction des différents traitements (Figure 64) a été représentée. Les pratiques d'ajout de compost et de fumier semblent être deux facteurs expliquant l'augmentation significative de la teneur en carbone organique du sol « V\_Cli+ens » puisque seuls les sols « V\_Cli+compost » et « V\_Cli+fum » ont vu leur teneur en carbone organique augmenter au cours des 10 semaines d'expérience. Les autres traitements réalisés ne semblent pas, quant à eux, impacter les teneurs en carbone organique.

Les résultats obtenus pour le phosphore Olsen disponible et la CEC sont présentés en annexe (Annexe 13). Une augmentation de la teneur en  $P_{Olsen}$  a été observée pour le sol « V\_Cli+ens ». L'ajout d'engrais est la pratique responsable de cette augmentation puisqu'elle est la seule à induire une augmentation significative de la teneur en  $P_{Olsen}$  au cours du temps. Concernant la CEC, une augmentation significative de ce paramètre a également été observée pour le sol « V\_Cli+ens ». Cette augmentation serait principalement liée aux amendements organiques de fumier et de compost.



Figure 64 : Évolution du carbone organique au cours du temps en fonction des neuf traitements réalisés

#### 4.4.1.3 Influence des pratiques humaines sur les éléments traces métalliques du sol « PVR »

L'analyse par extraction au DTPA évalue la biodisponibilité des éléments présents dans le sol. Le résultat de cette analyse montre des différences dans la biodisponibilité de certains métaux en fonction des différents traitements appliqués au sol. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du plomb (Pb) et du zinc (Zn) (Figure 65). Les teneurs en Cu biodisponible ne présentent aucune évolution significative au cours du temps pour les sols « V\_Cli », « V\_Cli+compac », « V\_Cli+irr » et « V\_Cli+tra ». Une très légère diminution de la teneur en Cu biodisponible a été observée pour les sols, « V\_Cli+compost », « V\_Cli+eng » et « V\_Cli+fum ». *A contrario*, une augmentation significative de cette teneur a été observée sur les sols « V\_Cli+ph » et « V\_Cli+ens ». L'ajout de bouillie bordelaise sur les sols a eu pour conséquence d'augmenter la teneur en Cu disponible. À noter que malgré un apport de bouillie bordelaise identique aux cours des expériences, une augmentation moins prononcée de la teneur en Cu disponible a été observée pour le sol « V\_Cli+ens » par rapport au sol « V\_Cli+ph ». Ce résultat met en avant une synergie entre l'ensemble des pratiques jouant un rôle d'atténuation sur la teneur en Cu biodisponible. Les teneurs en Ni et en Zn disponibles sont, quant à elles, influencées par les pratiques d'amendement organique. En effet, les sols « V\_Cli+compost » et « V\_Cli+fum » ont vu leur teneur en Ni diminuer et leur teneur en Zn augmenter au cours du temps. En conséquence, les

mêmes variations ont été observées pour le sol « V\_Cli+ens ». La teneur en Pb disponible varie également selon les traitements appliqués au sol. Une diminution significative de cette teneur a été observée pour le sol « V\_Cli+eng » et « V\_Cli+fum ». L'ajout d'engrais et l'amendement en fumier réduiraient donc la biodisponibilité du Pb. La diminution de cette teneur a également été observée pour le sol « V\_Cli+ens ».

Les résultats obtenus suite à l'analyse des teneurs totales de ces éléments complètent les résultats précédents (Figure 66). La teneur totale en Cu au cours du temps a augmenté pour les sols « V\_Cli+ph » et « V\_Cli+ens ». Cette augmentation significative est une conséquence directe de l'ajout de bouillie bordelaise appliquée dans ces deux traitements. Les valeurs similaires de la teneur totale en Cu obtenues pour ces deux traitements prouvent qu'un apport identique en cuivre a été effectué au cours de l'expérience. Les teneurs totales des éléments Ni, Pb et Zn n'ont, quant à elles, pas évolué au cours du temps pour l'ensemble des traitements effectués. Ce résultat confirme que les variations des teneurs en ces métaux biodisponibles, observées précédemment (Figure 65) sont des conséquences directes des pratiques humaines. Les amendements organiques réduisent donc la biodisponibilité du Ni au cours du temps. Ces amendements vont également avoir un rôle dans la diminution de la teneur en Pb biodisponible ainsi que l'ajout d'engrais chimique (NPK). Enfin, ces résultats montrent que ces trois pratiques jouent également un rôle dans l'augmentation de la biodisponibilité du Zn sans augmenter la teneur totale de cet élément.

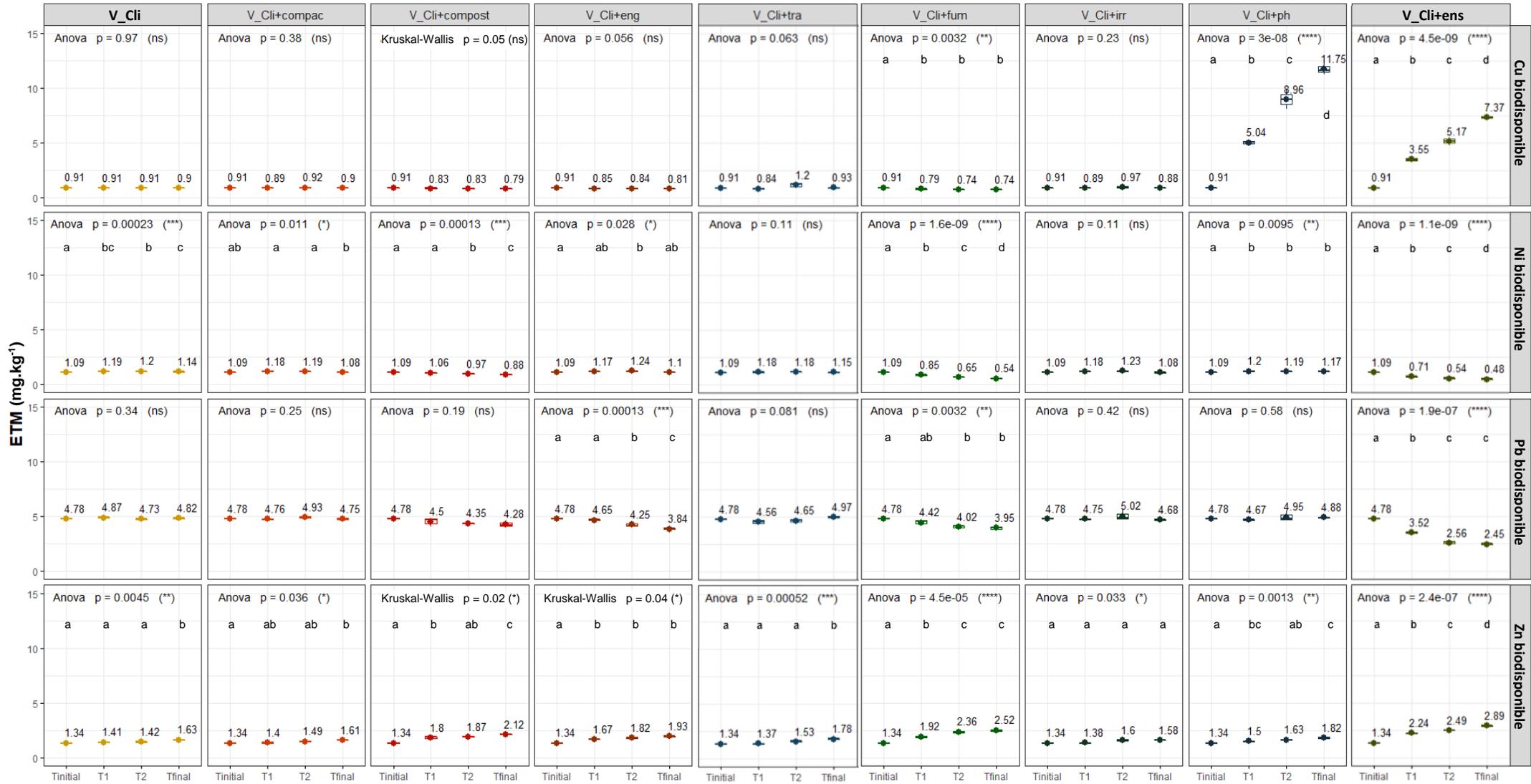


Figure 65 : Évolution des teneurs en cuivre, nickel, plomb, zinc biodisponibles du sol « PVR » selon la méthode d'extraction au DTPA

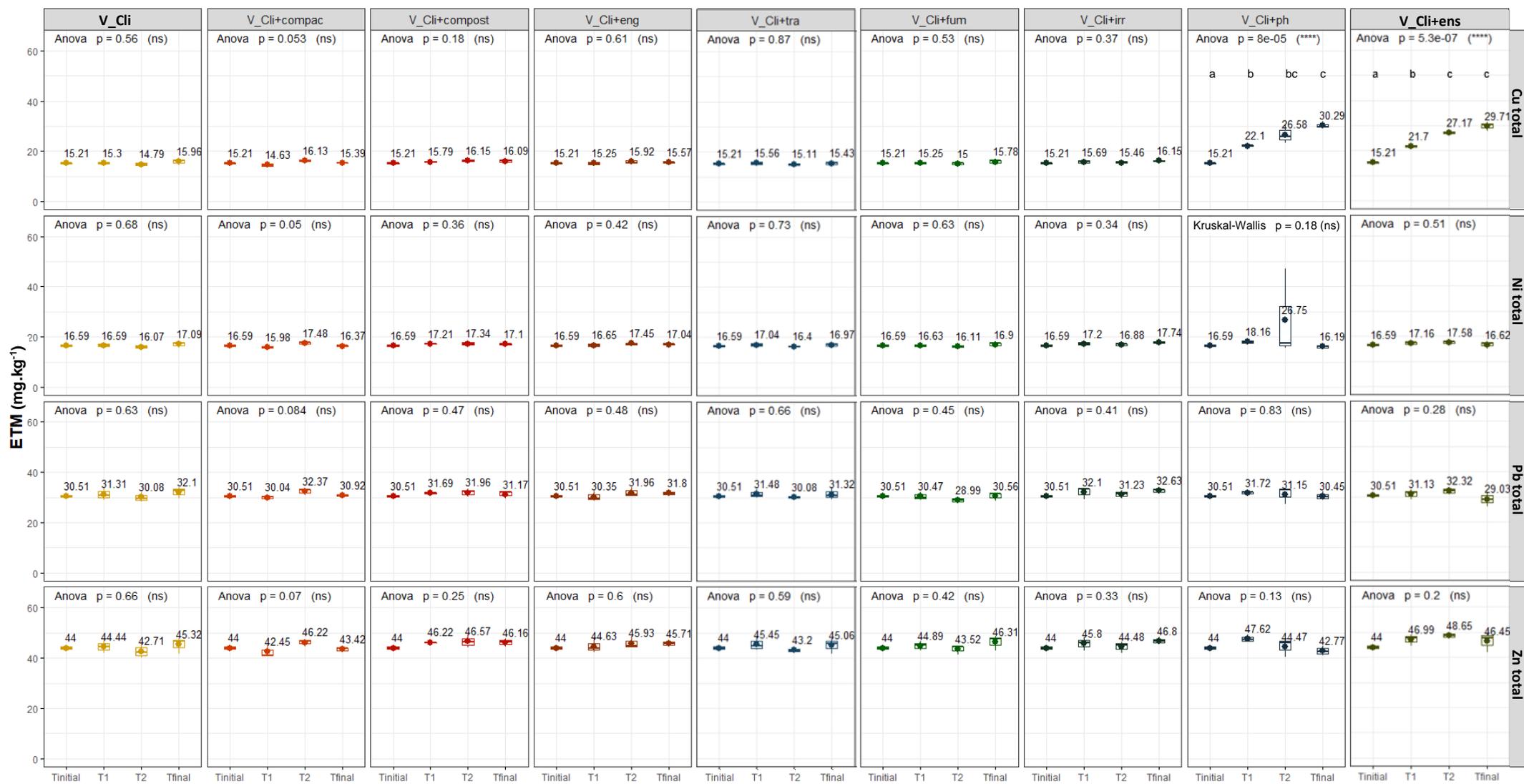


Figure 66 : Évolution des teneurs totales en cuivre, nickel, plomb, zinc au cours du temps pour le sol « PRV »

#### 4.4.1.4. Influence des pratiques humaines sur les éléments majeurs

Une analyse similaire à l'analyse précédente a été effectuée sur les teneurs biodisponibles et totales en éléments majeurs du sol PRV (Figure 67). La biodisponibilité de l'aluminium diminue de manière généralisée pour l'ensemble des traitements au cours du temps. Ces diminutions sont statistiquement significatives exceptés pour les sols « V\_Cli+irr » et « V\_Cli+tra ». Les résultats obtenus sur le sol « V\_Cli » montrent que les cycles de gel/dégel, de dessiccation et d'humectation, et de hautes températures ont un effet sur la biodisponibilité de l'aluminium. Cet effet serait, de plus, accentué par certaines pratiques comme l'ajout de compost, de fumier et d'engrais. La combinaison de l'ensemble de ces pratiques sur le sol « V\_Cli+ens » réduit encore plus drastiquement la biodisponibilité de l'aluminium, de  $53,2 \text{ mg.kg}^{-1}$ ,  $T_{\text{initial}}$  à  $4,08 \text{ mg.kg}^{-1}$  à  $T_{\text{final}}$ . Concernant la biodisponibilité de l'élément Fe, aucune tendance d'évolution n'a été observée pour les sols « V\_Cli », « V\_Cli+compac », « V\_Cli+compost », « V\_Cli+fum », « V\_Cli+irr », « V\_Cli+ph » et « V\_Cli+tra ». Par contre une augmentation significative de la biodisponibilité du fer a été observée lors d'ajout d'engrais NPK. A *contrario* la teneur en fer biodisponible du sol « V\_Cli+ens » a diminuée au cours du temps d'environ  $20 \text{ mg.kg}^{-1}$  par rapport à la teneur initiale de  $78 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Seules les pratiques d'ajout d'engrais et d'amendement organique en compost et en fumier ont un impact sur la biodisponibilité du magnésium. Une augmentation des teneurs a été observée pour ces trois traitements, ainsi que sur le sol « V\_Cli+ens » où une augmentation plus nette a été observée. La biodisponibilité du sodium dépend également des pratiques d'ajout d'engrais et d'amendement organique. Une augmentation de sa biodisponibilité a été observée sur les sols correspondants ainsi que sur le sol « V\_Cli+ens ».

L'analyse des teneurs totales en éléments majeurs montre que la teneur en aluminium ne varie pas au cours du temps (Figure 68). Ces mêmes observations s'appliquent aux éléments Fe, Mg et Na, malgré des différences statistiques entre les moyennes observées pour certains traitements. Cette homogénéité des teneurs totales vient confirmer le rôle précédemment décrit, des cycles climatiques et des pratiques imposées au sol dans la biodisponibilité des éléments observés.

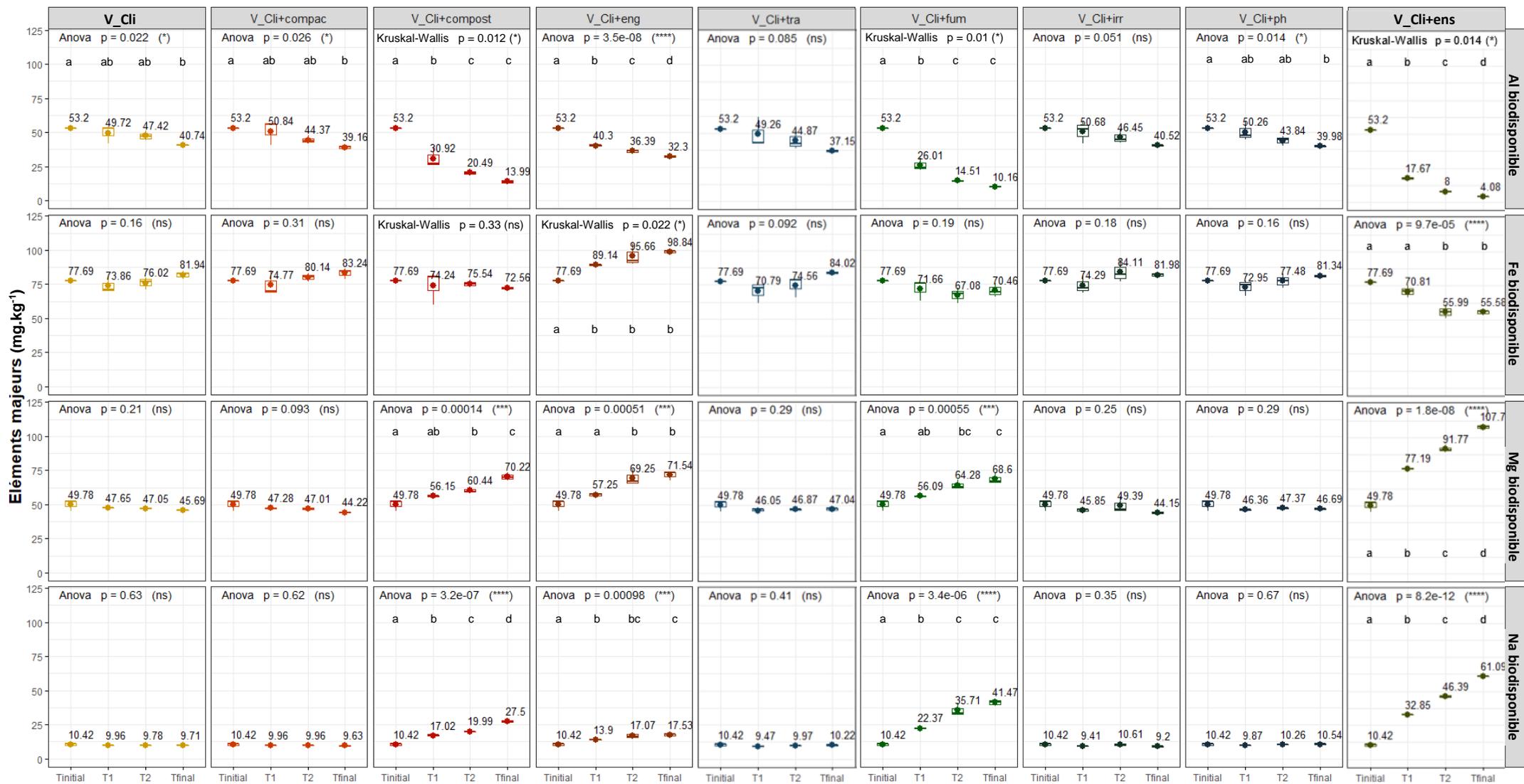


Figure 67 : Évolution des teneurs en aluminium, fer, magnésium et sodium biodisponibles au cours des expérimentations pour le sol « PRV »

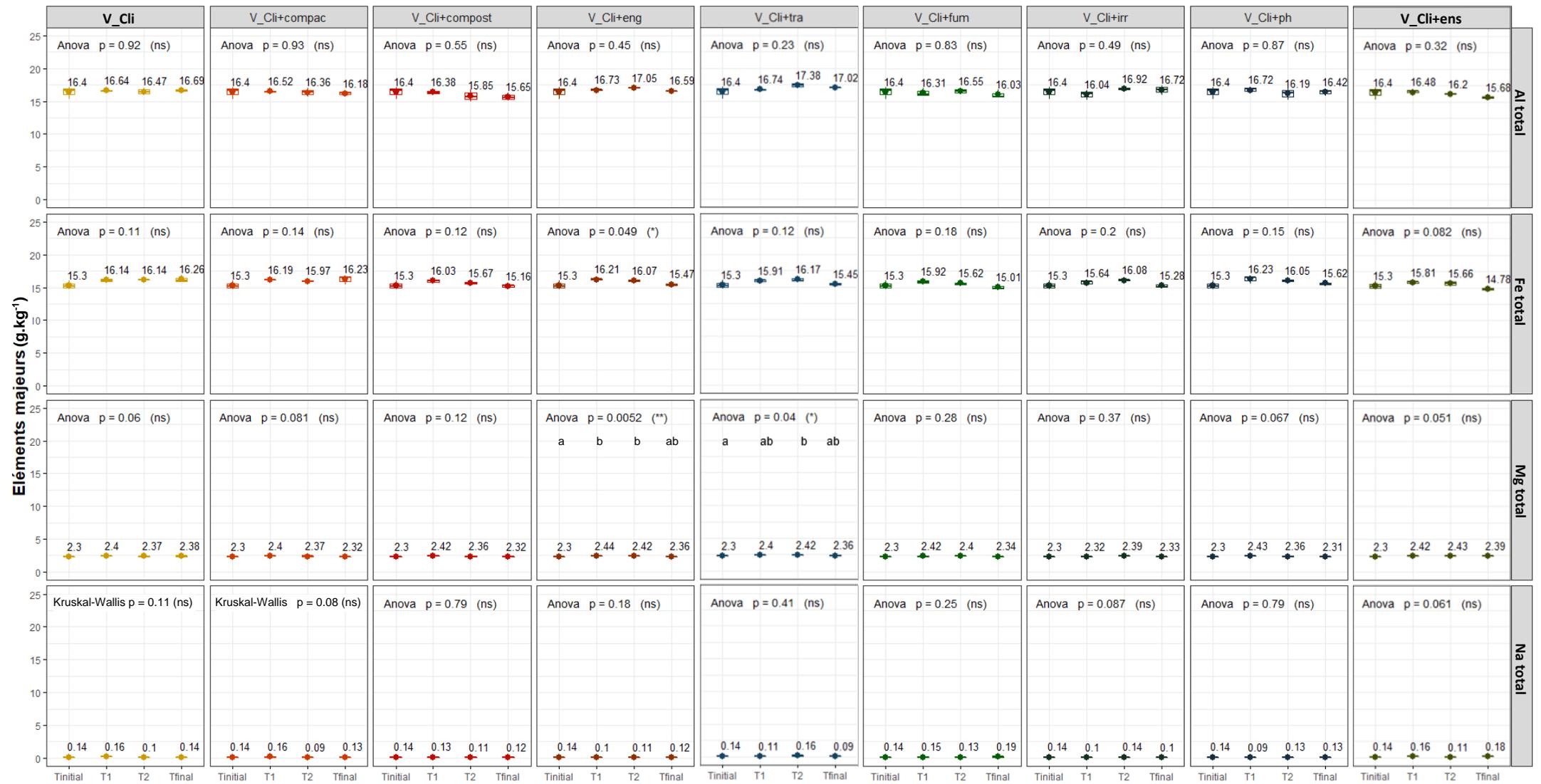


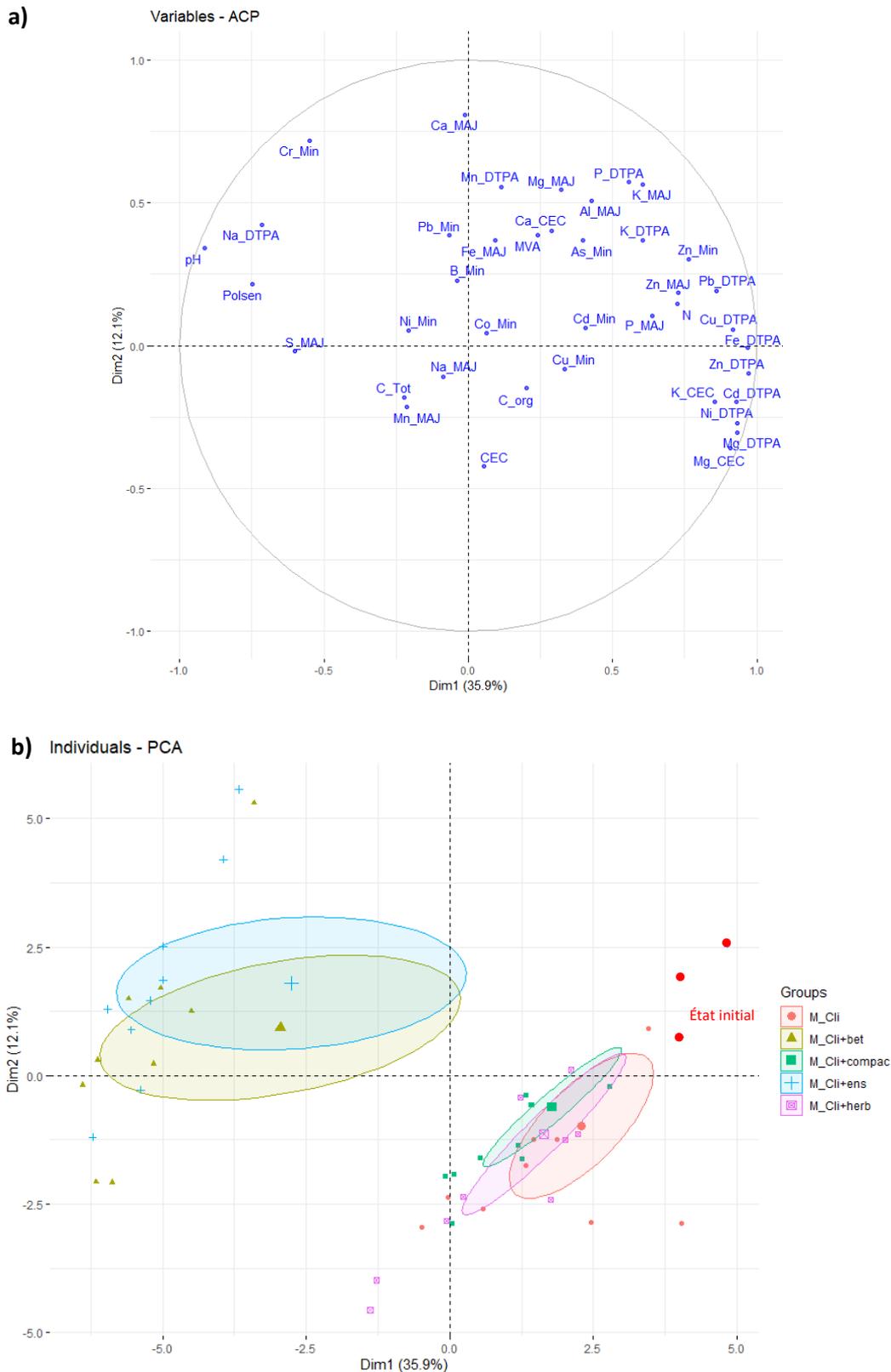
Figure 68 : Évolution des teneurs en aluminium, fer, magnésium et sodium totales au cours des expérimentations pour le sol « PRV »

#### 4.4.2. Influence des pratiques associées au site « BAM »

##### 4.4.2.1 Résultats généraux du vieillissement expérimental du sol « BAM »

L'ensemble des mesures réalisées aux instants intermédiaires T1, T2 et à l'instant final a été analysé à travers une ACP. À ces mesures a été ajoutée les trois mesures (= répétitions) physico-chimiques réalisées sur le matériau initial utilisé. Ces mesures représentent l'état initial de chaque traitement et sont représentées en rouge sur la figure (Figure 69b). Les deux premières dimensions de l'analyse en composante principale (ACP) effectuée sur les paramètres physiques et chimiques mesurées explique 48,0 % de la variabilité totale du nuage de points représentés (Figure 69). La représentation des variables physiques et chimiques dans le cercle de corrélations (Figure 69a) indique que de nombreuses variables sont expliquées par les deux premières dimensions de cette ACP puisqu'elles sont éloignées de l'origine (0,0). Les variables telles que le pH, le phosphore Olsen disponible ( $P_{\text{Olsen}}$ ), le magnésium, le fer et le nickel biodisponibles (« Mg\_DTPA », « Fe\_DTPA », « Ni\_DTPA ») sont principalement expliquées par l'axe horizontal expliquant 35,9 % de la variabilité. *A contrario*, les variables telles que la CEC, la teneur en fer total (« Fe\_MAJ »), en magnésium total (« Mg\_MAJ »), en calcium total (« Ca\_MAJ ») ou encore la teneur trace en plomb (« Pb\_Min ») semblent principalement expliquées par l'axe vertical expliquant 12,1 % de la variabilité.

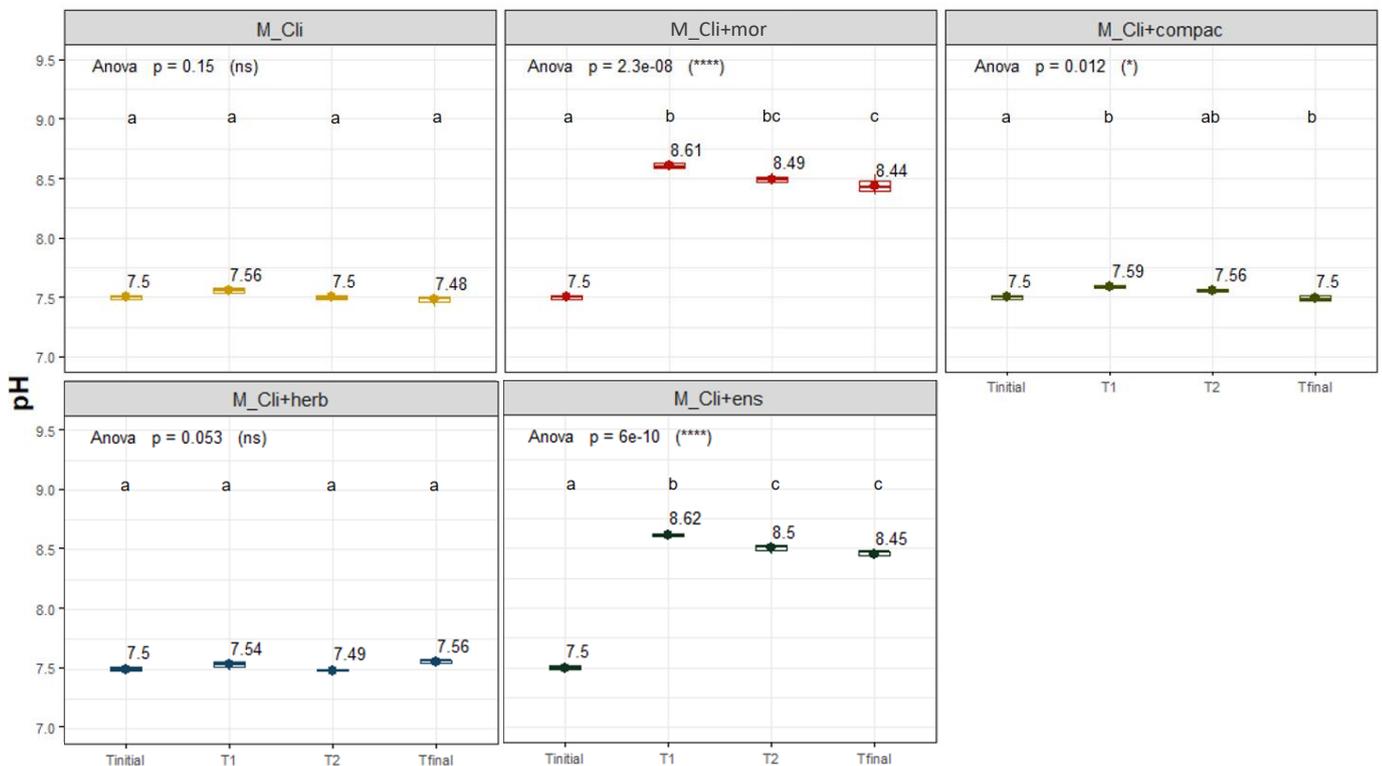
Concernant l'étude des individus (Figure 69b), deux groupes très distincts d'individus se sont distingués par leur représentation selon les deux premières composantes de l'ACP. Le groupe d'individus de gauche a des propriétés chimiques corrélées aux variables telles que le pH,  $P_{\text{Olsen}}$  et sodium biodisponible. Il est représenté par les traitements « M\_Cli+ens » et « M\_Cli+mor ». Le groupe d'individus de droite a des propriétés chimiques corrélées à la teneur de carbone total (« C\_Tot ») et à la CEC. Il est représenté par les traitements « M\_Cli+compac », « M\_Cli+herb » et « M\_Cli ». Les résultats montrent des différences notables dans les propriétés physico-chimiques de ces deux groupes. De plus, l'observation de la répartition de ces individus montre que l'ajout de mortier semble être la pratique qui influence majoritairement les propriétés des sols pour le traitement regroupant l'ensemble des pratiques : « M\_Cli+ens ».



**Figure 69 : Cercle de corrélation des variables physiques et chimiques analysées pour l'ensemble des traitements (n=81) réalisés ACP réalisée avec RStudio grâce aux packages FactoMineR et factoextra et à la fonction fviz\_pca\_var (a). Analyse en composantes principales des mesures réalisées au cours des 10 semaines d'expérience en fonction des différents traitements. ACP réalisée avec l'outil RStudio à l'aide de la fonction PCA() et fviz\_pca\_ind () des packages FactoMineR et factoextra (b)**

#### 4.4.2.2 Influence des pratiques sur les propriétés agronomiques du sol « BAM »

La simulation exclusive des cycles climatiques n'impacte pas le pH au cours du temps au vu des résultats obtenus sur le sol « M\_Cli ». De même que pour l'ajout de d'herbe et le compactage. La pratique d'ajout de mortier augmente fortement le pH du sol de plus d'une unité de pH (Figure 70). L'évolution de ce paramètre sur le sol « M\_Cli+mor » décrit une tendance similaire à l'évolution observée sur le sol « M\_Cli+ens ». Cette pratique semble donc être prédominante dans la détermination du pH par rapport à l'ensemble des pratiques appliquées. Ces résultats montrent également que lors d'un apport de mortier le pH du sol augmente brusquement puis diminue progressivement, vraisemblablement jusqu'à un seuil qui n'a pas pu être identifié en raison de la durée insuffisante de l'expérience.



**Figure 70 : Évolution du pH au cours du temps en fonction des cinq traitements réalisés**

L'ajout de mortier, malgré sa teneur intrinsèque en  $P_{Olsen}$  très faible ( $21 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) influence aussi significativement l'évolution de la teneur en  $P_{Olsen}$  au cours du temps (Figure 71). Les résultats obtenus pour les autres traitements ne montrent aucune influence sur ce paramètre. Cependant, ces propos restent tout de même à nuancer au vu de la grande variabilité de mesures obtenues pour la teneur en  $P_{Olsen}$  au temps intermédiaire 2, à l'exception du traitement M\_Cli+mor.

De plus, les teneurs en  $C_{org}$  et la CEC mesurées ne montrent aucune évolution significative au cours du temps pour l'ensemble des traitements réalisés (Annexe 14).

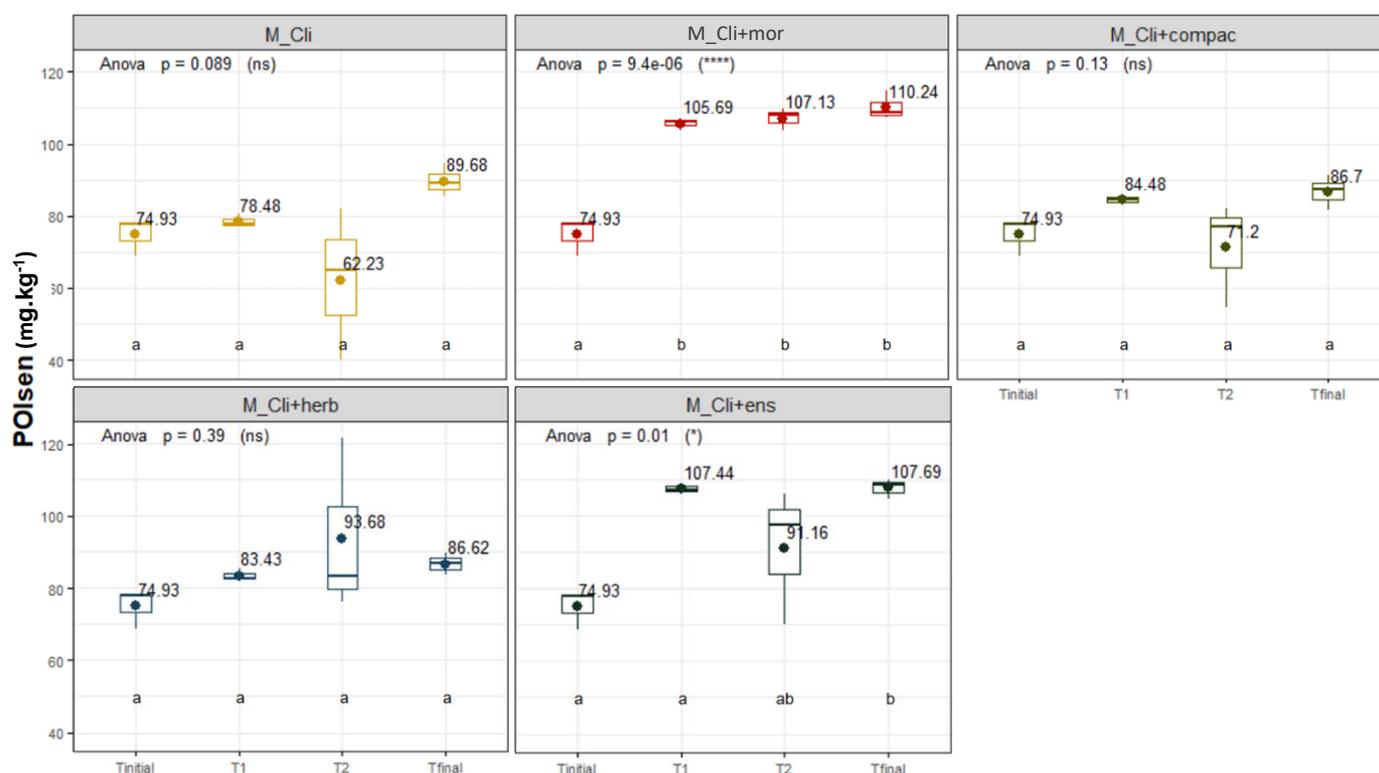


Figure 71 : Évolution de la teneur en phosphore Olsen au cours du temps en fonction des cinq traitements réalisés

#### 4.4.2.3 Influence des pratiques sur les éléments traces métalliques du sol « BAM »

L'étude de la biodisponibilité des éléments traces métalliques montre que la teneur en cuivre diminue légèrement pour les sols « M\_Cli », « M\_Cli+herb » et « M\_Cli+compac » sans que la différence soit statistiquement significative pour les deux premiers sols cités (Figure 72). En revanche, une baisse significative de cette teneur a été mesurée pour les sols « M\_Cli+mor » et « M\_Cli+ens ». L'apport de mortier diminue donc la biodisponibilité du cuivre. Une très faible teneur en nickel biodisponible a été mesurée tout au long des différents traitements. Pour ces faibles teneurs, une légère diminution d'environ  $0,4 \text{ mg.kg}^{-1}$  a été détectée et qualifiée de statistiquement significative pour les sols « M\_Cli+mor » et M\_Cli+ens ». Concernant le Pb, de fortes teneurs biodisponibles d'environ  $60 \text{ mg/kg}$  ont été mesurées. Les résultats montrent qu'aucune évolution significative a été observée pour les sols « M\_Cli+herb » et « M\_Cli » contrairement aux sols représentant les pratiques d'ajout de mortier et de compactage où une diminution est observée. D'après les résultats, le mortier aurait également un rôle dans la diminution de la biodisponibilité du Zn au cours du temps. À noter également

l'observation d'une légère baisse de cette teneur pour les sols « M\_Cli », « M\_Cli+herb » et « M\_Cli+compac ». Une baisse significative de la teneur en Zn biodisponible a été mesurée pour les sols « M\_Cli+mor » et « M\_Cli+ens ». Il est donc clair que l'apport de mortier diminue la biodisponibilité des éléments métalliques observés.

Les teneurs totales de ces éléments métalliques montrent globalement aucune tendance nette dans leur évolution (Figure 73). Concernant le Cu, certaines moyennes au cours du temps ont été qualifiées de statistiquement différentes selon les ANOVA réalisées (« M\_Cli\_mor » et « M\_Cli+ens »), dans ce cas précis ces différences ne semblent pas traduire la réalité d'un effet mais plutôt une variabilité des mesures. Les autres traitements ne montrent quant à eux aucune évolution statistiquement significative des teneurs totales en Cu, Zn, Ni, et Pb. S'agissant des teneurs en plomb, on relève de grandes variabilités de mesures entre répliques expérimentaux qui limitent l'identification de tendances d'évolution. Pour le zinc, les moyennes statistiquement différentes selon les ANOVA réalisées (« M\_Cli\_mor », « M\_Cli+compac » et « M\_Cli+env ») semblent également décrire les variabilités de mesures et non des effets liés à une pratique.

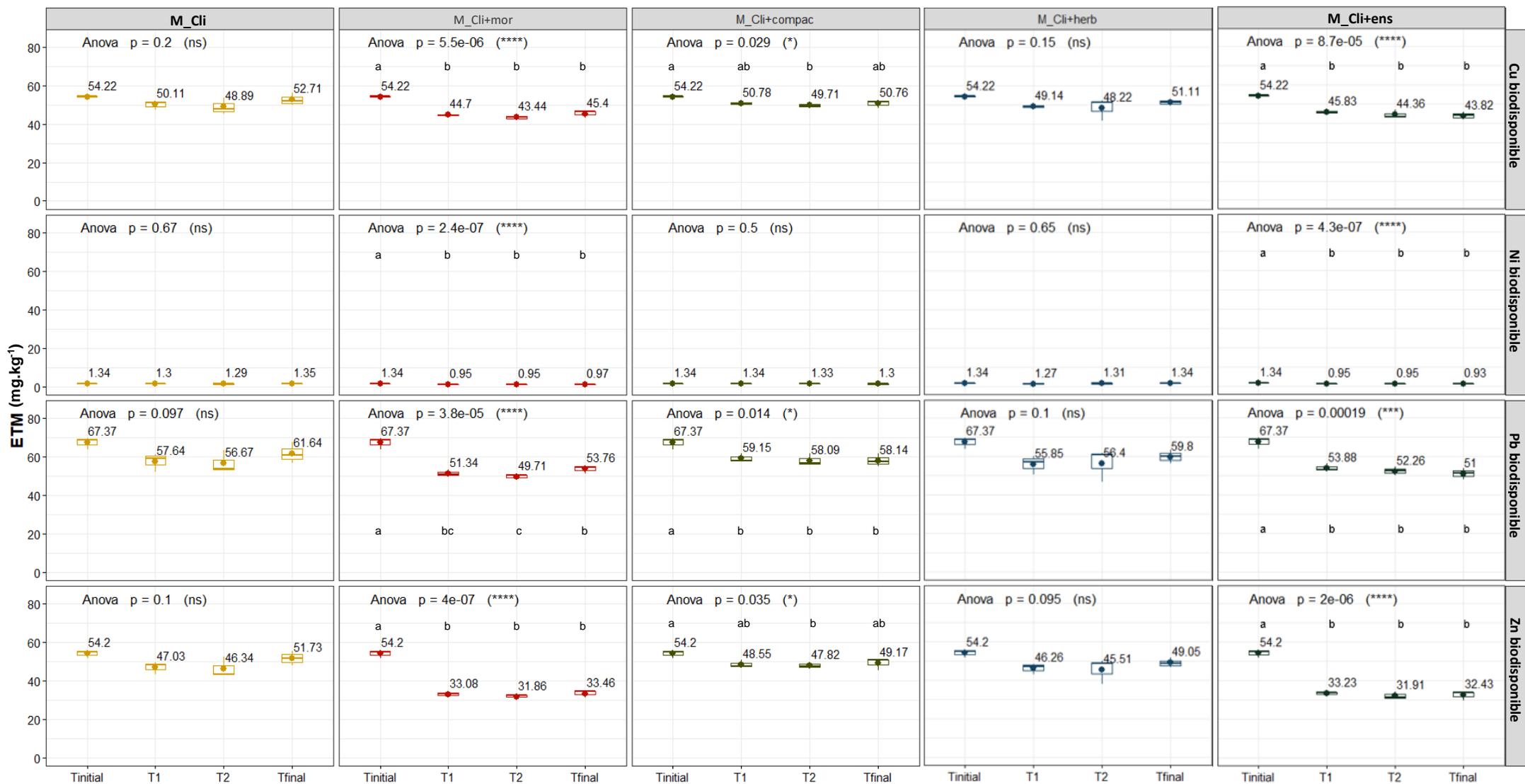


Figure 72 : Évolution des teneurs en cuivre, nickel, plomb, zinc biodisponibles du sol « BAM » selon la méthode d'extraction au DTPA au cours des expérimentations (Tinitial, T1, T2 et Tfinal)

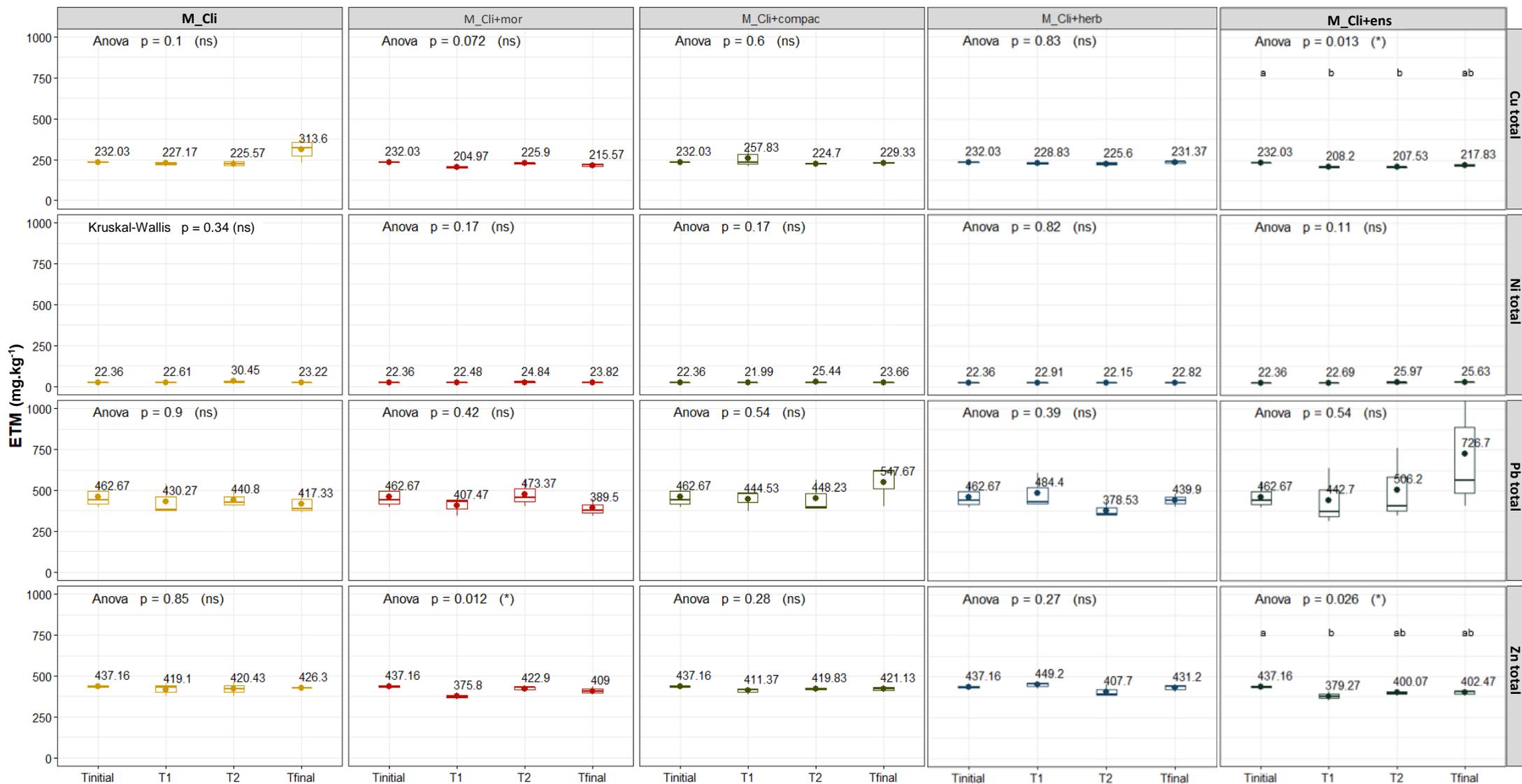


Figure 73 : Évolution des teneurs totales en cuivre, nickel, plomb, zinc au cours des expérimentations (Tinitial, T1, T2 et Tfinal) pour le sol « BAM »

#### 4.4.2.4 *Influence des pratiques sur les éléments majeurs du sol « BAM »*

La biodisponibilité des éléments totaux varie selon les pratiques appliquées au sol (Figure 74). Concernant le fer, les résultats montrent une influence de l'ajout de mortier sur sa biodisponibilité. En effet, une baisse d'environ  $15 \text{ mg.kg}^{-1}$  de la teneur en fer disponible a été observée pour les sols « M\_Cli+mor » et M\_Cli+ens ». Des tendances similaires sont observées pour le magnésium. Les résultats montrent que sa biodisponibilité est influencée par la pratique d'ajout de mortier. Une baisse d'environ  $25 \text{ mg.kg}^{-1}$  de la teneur des sols « M\_Cli+mor » et M\_Cli+ens » a été observée. La biodisponibilité de l'élément manganèse semble, quant à elle, non impactée par les pratiques humaines exercées. Enfin les résultats obtenus concernant la biodisponibilité de l'élément sodium montrent là encore, une influence de l'ajout de mortier dans le sol. En effet, une légère augmentation de la teneur en sodium disponible a été observée et qualifiée de statistiquement significative. Cette augmentation apparaît dès l'ajout du mortier entre l'instant initial et l'instant T1 et est de l'ordre de  $1 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Ces résultats montrent donc que l'apport de mortier est une pratique influençant la biodisponibilité des éléments majeurs notamment celle du fer, du magnésium et du sodium.

Concernant les teneurs totales en ces éléments, aucune tendance d'augmentation ou de diminution n'est observée au cours du temps et en fonction des différents traitements (Figure 75).

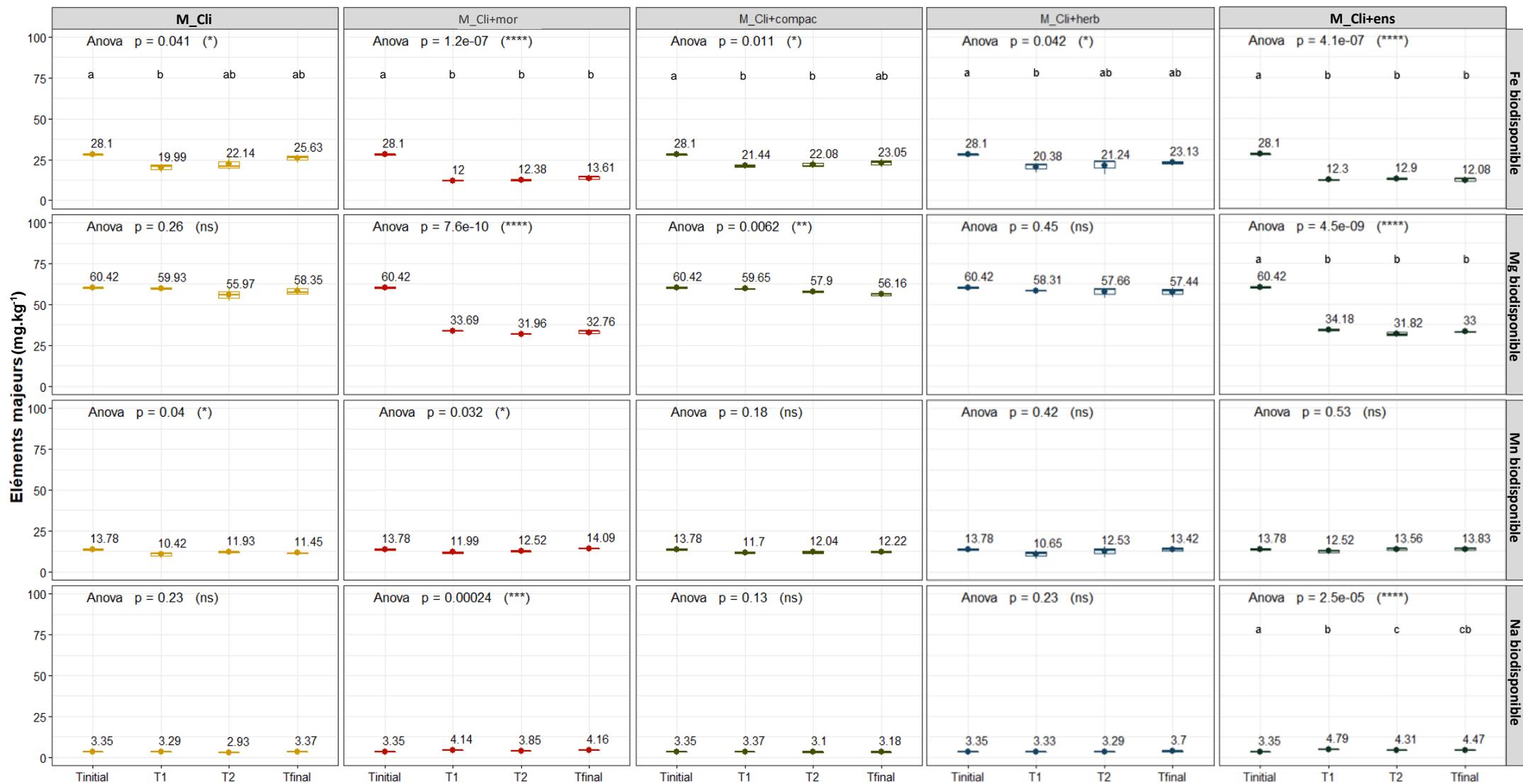


Figure 74 : Évolution des teneurs en aluminium, fer, magnésium et sodium biodisponibles au cours des expérimentations pour le sol « BAM »

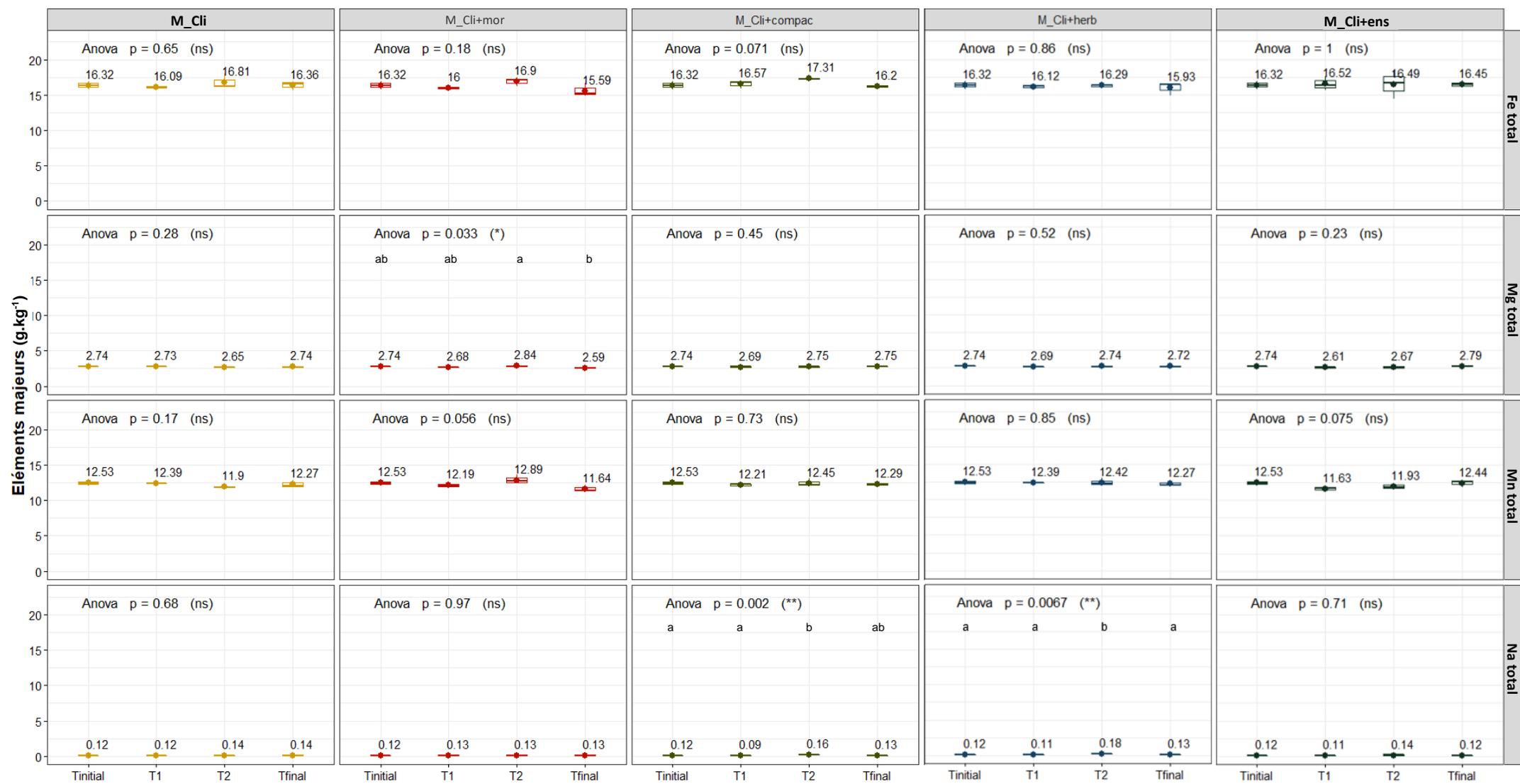


Figure 75 : Évolution des teneurs en aluminium, fer, magnésium et sodium totales au cours des expérimentations pour le sol « BAM »

## 5. Discussion

### 5.1. Rôle des pratiques humaines sur l'évolution des propriétés physiques des sols et dans les processus pédogénétiques associés

#### 5.1.1. Apports organiques et inorganiques et influence sur la couleur des sols

Les pratiques d'amendement organique de compost et de fumier ont un rôle dans le changement de couleur (*i.e.* coloration brune) du sol « PRV » mis en avant au cours des expérimentations. L'analyse de la littérature confirme ce résultat. En effet, ces amendements vont influencer la teneur en matière organique qui est corrélée à la couleur des sols (Schulze et al., 1993). Plus un sol est brun/noir, plus sa teneur en matière organique est élevée. Cette relation est d'ailleurs vérifiée si nous comparons les couleurs des matériaux initiaux (« PRV » et « BAM ») avec leurs teneurs en matière organique respective. Le sol « BAM », d'une couleur plus noire, possède une teneur en matière organique environ 7 fois supérieure au sol « PRV ». Par l'intermédiaire de cette relation, des auteurs ont mis au point des outils semi-quantitatifs d'estimation des teneurs en matière organique des sols grâce à l'identification de leur couleur (Steinhardt et Franzmeier, 1979). *A contrario*, aucune relation mise en évidence dans la littérature ne peut expliquer le changement de couleur observé pour l'échantillon « BAM » à la suite d'ajout de mortier. Bien que les sols de couleur grisâtre possèdent souvent des taux d'artefacts élevés (Blanchart, 2018), aucune relation entre la nuance de gris d'un sol et son taux d'artefact n'existe dans la littérature. Ce point doit tout de même être nuancé. En effet, la méthode d'application du mortier broyé à 2 mm lors de cette expérience reflète très peu la réalité de terrain et reste donc discutable pour une analyse de la couleur.

#### 5.1.2. Impact du compactage et des cycles climatiques sur l'évolution de la structure du sol

L'ensemble des traitements réalisés ont eu un impact sur la sur-structure des échantillons de sol. Le degré de cohésion (*i.e.* intensité d'agrégation) et la classe (*i.e.* taille moyenne des agrégats) des macro-agrégats ont, en effet, augmentés pour quasi tous les traitements mis en œuvre au cours de l'expérience. Le facteur commun à l'ensemble de ces traitements expliquant ces modifications, est le vieillissement climatique imposé à ces sols. Les cycles gel/dégel, d'humectation/dessiccation et les périodes à hautes températures simulant le vieillissement climatique ont donc favorisé l'agrégation des sols. L'analyse de la littérature montre cependant un effet antagoniste entre les cycles gel/dégel et les cycles d'humectation/dessiccation sur les macro-agrégats, selon les types de sol et leurs constituants. Les cycles gel/dégel seuls engendrent une diminution de leur taille et de leur stabilité

pour des sols présentant initialement une stabilité structurale élevée (Edwards *et al.*, 1991 ; Oztas et Fayetorbay, 2003). Les cycles d'humectation/dessiccation, en lien avec l'activité microbienne des sols et des amendements organiques, favorisent, quant à eux, le processus d'agrégation en augmentant la taille des macro-agrégats ainsi que leur stabilité dans des sols limoneux arides, initialement peu cohésif (Deneff *et al.*, 2001). Wagner *et al.* (2007) font le même constat sur des échantillons composites de divers sols australiens. Ils montrent comment la teneur en argile et surtout la nature des minéraux argileux, avec des apports de paille sèche, favorisent la macro-agrégation rapide des sols lors d'un unique cycle d'humectation/dessiccation. Il existe donc une synergie entre les apports de résidus végétaux ou d'amendement organiques et les cycles d'humectation/dessiccation pour améliorer la stabilité structurale d'un sol initialement friable. Cette différence structurale entre un sol amendé ou non n'a cependant pas pu être observé au cours de nos expériences car le travail du sol imposé lors de chaque amendement organique a fortement perturbé les processus d'agrégation. En revanche, le rôle conjoint des argiles et des alternances d'humectation/dessiccation, à l'origine du gonflement/retrait du sol et de la formation de macro-agrégats plus anguleux a été mis en évidence par les différentes formes d'agrégation observées entre l'état initial (*i.e.* polyédrique sphérique) et final (*i.e.* polyédrique/polyédrique anguleux) des sols. Malgré les effets antagonistes des cycles gel/dégel et d'humectation/dessiccation, le processus d'agrégation engendré par les cycles d'humectation/dessiccation reste donc prédominant dans l'évolution de la sur-structure des sols.

L'évolution de la sous-structure observée principalement sur le sol « PRV » peut être expliquée par les cycles gel/dégel qui ont un effet positif sur l'augmentation de la taille des micro-agrégats inférieurs à 0,5 mm (Edwards *et al.*, 1991). La diminution de la proportion des particules par rapport aux micro-agrégats observées sur des sols non perturbés par un travail du sol au cours du temps serait donc expliquée par ces cycles gel/dégels en parallèle des cycles d'humectation/dessiccation propice au processus d'agrégation. De plus, il a été remarqué que la pratique de compactage a également un effet non négligeable sur la sous-structure puisque les sols compactés au cours de l'expérimentation possèdent une proportion en particules plus faibles que la proportion en particules initiale. Lorsque le sol est soumis à une charge, des changements se produisent dans la sous-structure (Kooistra et Tovey, 1994). Il a été montré dans la littérature que l'application d'une charge peut modifier la disposition des particules. Les matériaux fins vont alors être comprimés entre les grains de sable et de limon plus gros impactant ainsi la sous-structure.

Partant d'un sol déstructuré, l'expérimentation montre donc qu'un effet sur les sous/sur –structures est visible après la simulation de quelques cycles climatiques et de pratiques humaines comme le compactage. Ces résultats ouvrent des perspectives de travail sur l'importance des cycles climatiques

et des pratiques pour redonner ou maintenir des services/fonctions essentiels des sols comme leur capacité à infiltrer l'eau ou encore leur résistance à l'érosion.

### *5.1.3. Compactage et travail du sol : deux pratiques humaines influençant la masse volumique apparente du sol*

Certaines pratiques anthropiques comme le compactage et le travail du sol ont des effets antagonistes sur la MVA. Le compactage des sols agricoles est une préoccupation pour de nombreux agronomes. Elle est connue pour altérer la structure du sol, limiter l'infiltration de l'eau (Gregory *et al.*, 2006) et de l'air et donc réduire la profondeur d'enracinement et la densité racinaire (Nawaz *et al.*, 2013). Ces conséquences perçues en milieu rural mais aussi urbain sont liées à une baisse de la porosité du sol et une augmentation de sa MVA (Gupta *et al.*, 1989 ; Uchida *et al.*, 2008 ; Nawaz *et al.*, 2013). Selon leurs caractéristiques, en particulier leur texture, teneur en éléments grossiers et le degré de cohésion des agrégats, les sols développent leur propre résistance au compactage. Il a été observé que certains sols, notamment ceux possédant une forte teneur en  $C_{org}$  et une faible teneur en argile, vont avoir une meilleure résistance à la compaction (Smith *et al.*, 1997). L'étude de l'évolution de la MVA des sols « PRV » et « BAM » corroborent cette observation. En effet, malgré une intensité de compactage similaire, le sol « BAM » a beaucoup mieux résisté à cette pratique. Ce résultat peut donc s'expliquer par sa teneur en  $C_{org}$  plus élevée (BAM : 64,3 g.kg<sup>-1</sup> ; PRV : 9,5 g.kg<sup>-1</sup>) et sa teneur en argile plus faible par rapport au sol « PRV » (BAM : 186 g.kg<sup>-1</sup> ; PRV : 216 g.kg<sup>-1</sup>). L'objectif de la pratique de travail du sol, souvent utilisée en agriculture traditionnelle et urbaine, est de décompacter la couche de surface (Osunbitan *et al.*, 2005) et donc de diminuer la MVA des sols. Associée à la pratique de compactage, elle réduirait significativement l'impact du compactage sur la MVA du sol selon les résultats observés pour le sol V\_Cli+ens.

### *5.1.4. Liens entre pratiques, évolution des paramètres physiques et processus / mécanismes mis en œuvre*

Le travail expérimental présenté a permis de mieux cerner les pratiques humaines influençant les propriétés physiques des sols ainsi que les processus pédogénétiques mis en œuvre au cours du temps. Deux grands types de pratiques semblent se distinguer (i) les apports organiques et inorganiques et (ii) les pratiques perturbant directement l'agencement des sols comme les pratiques de compactage et de travail du sol. L'ensemble de ces informations est résumé dans le Tableau 36 retranscrivant l'effet individuel de chaque pratique sur les propriétés physiques des sols mais également la résultante de ces effets individuels sur l'évolution des propriétés physiques au sein des usages étudiés.

**Tableau 36 : Liens entre pratiques, évolution au cours du temps des propriétés physiques et processus/mécanismes impliqués ( « + » : augmentation de la donnée quantitative ou changement améliorant la donnée qualitative au cours du temps; « - » : diminution de la donnée quantitative ou changement altérant la donnée qualitative au cours du temps; « 0 » : pas d'évolution au cours du temps ; « oui » : évolution au cours du temps ; « (+) » : augmentation ou amélioration de la donnée quantitative ou qualitative d'après la bibliographie)**

Pratiques	Évolution au cours du temps			Processus/mécanismes impliqués	Pratiques	Évolution au cours du temps		
	Couleur	Structure	MVA			Couleur	Structure	MVA
Compactage	0	+	+	agrégation - diminution de la porosité	Ensemble de pratiques liées à l'usage « Potager »	+	+	+
Irrigation	0	0	0					
Compost	oui	(+)	0	coloration brune				
Fumier	oui	(+)	0	coloration brune				
NPK	0	0	0					
Pesticide	0	0	0					
Travail du sol	0	-	-	désagrégation - augmentation de la porosité				
Compactage	0	+	+	agrégation/ diminution de la porosité	Ensemble de pratiques liées à l'usage « résidentiel »	+	+	+
Ajout d'herbe	0	0	0					
Ajout de mortier	oui	0	0	coloration grisâtre				

## 5.2. Rôle des pratiques humaines sur l'évolution des propriétés chimiques des sols et dans les processus pédogénétiques associés

### 5.2.1. Apports organique et inorganique : facteur prédominant dans l'évolution des paramètres agronomiques

Les paramètres agronomiques étudiés ont été principalement influencés par les apports d'engrais minéraux (NPK), les amendements organiques de fumier et de compost et par l'apport de mortier. L'apport d'engrais chimique NPK a eu pour conséquence d'augmenter la teneur en  $P_{Olsen}$  et de diminuer le pH du sol. Cette dernière observation peut s'expliquer par l'ajout d'azote apporté en partie sous forme d'azote ammoniacal ( $NH_3-N$ ) susceptible de diminuer le pH en libérant des protons  $H^+$  dans le sol par le processus de nitrification (Radulov *et al.*, 2011 ; Ge *et al.*, 2018).

Les amendements en fumier et en compost ont eu pour effet d'augmenter le pH d'environ 0,5 unité au cours du temps. Cette augmentation est généralement observée pour des sols acides (Angelova *et al.*, 2013 ; Ch'ng *et al.*, 2014) tels que PRV et BAM. Les variations de pH par amendements organiques semblent être moins marquées lorsque le pH du sol atteint la neutralité (Ozlu et Kumar, 2018). L'évolution croissante du pH observée dans nos expérimentations s'explique alors par l'apport de  $C_{org}$  et par les liaisons chimiques de cette matière organique avec les autres constituants du sol. En effet, en se stabilisant le  $C_{org}$  va former des complexes argilo-humiques capables d'adsorber les cations présents dans le sol, dont les ions  $H^+$ . La présence de ces complexes explique également l'augmentation de la capacité d'échange cationique (CEC) qui a été mise en évidence par ailleurs (Saviozzi *et al.*, 1999 ; Diacono et Montemurro, 2010 ; Angelova *et al.*, 2013). De plus, l'augmentation de la teneur en  $P_{Olsen}$  confirme les résultats décrits dans la littérature (Etsès *et al.*, 2014 ; Soria *et al.*, 2021).

L'apport d'herbe au cours du temps n'a pas d'impact sur la teneur en  $C_{org}$  selon les résultats de nos expériences. Ce résultat n'est pas représentatif de ce qui est classiquement observé dans la littérature. En effet, Kauer *et al.*, (2013) ont mis en évidence une augmentation de la teneur  $C_{org}$  sur l'horizon de surface du sol suite à l'apport de résidu d'herbe pendant 5 années d'expérience *in situ*. L'augmentation du  $C_{org}$  induit par cette pratique est d'ailleurs l'une des explications de l'augmentation du stock du carbone des sols de surface enherbé en milieu urbain (Huyler *et al.*, 2014).

L'apport de mortier influence l'évolution des propriétés agronomiques du sol et plus particulièrement le pH et le phosphore assimilable. L'augmentation nette du pH après ajout de mortier peut en particulier expliquer le phénomène d'alcalinisation des sols provoqué par la présence du ciment (Rodd *et al.*, 2004 ; Rokia *et al.*, 2014) qui au cours de son hydratation, va former de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ) responsable de ce phénomène.

### 5.2.2. Influence des pratiques humaines sur la biodisponibilité des éléments métalliques

Au cours des expériences en conditions contrôlées, des variations de la biodisponibilité de nombreux éléments métalliques ont été mesurées, indiquant des changements dans les propriétés du sol. Selon Perrono (1999), quatre facteurs chimiques et physiques principaux orientent les conditions de mobilité des métaux :

1. Le pH du sol est le facteur souvent qualifié de déterminant concernant la mobilité des métaux (Chuan *et al.*, 1995 ; Walker *et al.*, 2003). L'augmentation du pH entraîne une diminution de la mobilité des métaux. En effet, par pertes d'ions  $H^+$ , le sol va adsorber des cations métalliques pour équilibrer ces charges jouant de ce fait un rôle sur la biodisponibilité des métaux.

L'augmentation du pH observé pour les sols « V\_Cli+ens », « V\_Cli+compost » et « V\_Cli+fum » expliquerait donc la diminution de la biodisponibilité des éléments métalliques comme Ni, Pb, Fe et Al. De même, l'augmentation de pH observée pour les sols « M\_Cli+env » et « M\_Cli\_mor » expliquerait la diminution de la biodisponibilité des éléments comme Cu, Ni, Pb, Zn, Fe et Mg. *A contrario*, la diminution du pH mesurée pour le sol « V\_Cli+eng » explique l'augmentation de la biodisponibilité de Fe au cours du temps.

2. Le potentiel d'oxydo-réduction du sol joue également un rôle dans la biodisponibilité des métaux (Chuan *et al.*, 1995 ; Perrono, 1999). Ce potentiel est influencé par le degré d'aération du sol et la consommation d'oxygène liée à la dégradation de la matière organique. Plus un sol est oxygéné par l'intermédiaire de pratiques humaines par exemple (*e.g.* le travail du sol), plus le milieu aura un pouvoir oxydant. À l'inverse, plus le sol est soumis à des pratiques humaines (*e.g.* le compactage) et à des événements climatiques (*e.g.* précipitations massives) réduisant l'oxygénation du sol, plus le milieu aura un pouvoir réducteur. Ces conditions vont donc influencer la mobilité des métaux puisque les formes réduites et oxydées de chaque élément métallique ont une mobilité qui leur est propre (Förstner, 1985). L'existence de couples redox pourrait en partie expliquer la légère diminution des teneurs biodisponibles de Cu, Pb et Zn observée pour le sol « BAM » si nous considérons que la mise en dispositif des sols et les cycles climatiques imposés aient rendu le milieu plus réducteur. En effet, ces éléments chimiques possèdent une mobilité plus faible sous forme réduite impliquant ainsi une diminution de leur biodisponibilité. Ces variations de conditions oxydo-réductrice impliquées par l'expérience de vieillissements pourraient également expliquer la diminution de Al disponible au cours du temps.
3. Les oxyhydroxydes de fer et de manganèse vont également avoir un rôle prédominant dans la biodisponibilité des métaux (Chuan *et al.*, 1995). Ces oxyhydroxydes peuvent en effet, capter les cations métalliques lors de leur précipitation. Le rôle de ces complexes dans la biodisponibilité des métaux va être dépendant de leur proportion et donc de la constitution du sol. De plus, la complexation de ces oxyhydroxydes est très dépendant du pouvoir oxydant du sol. En milieu réducteur, ces complexes ont tendance à se dissoudre, augmentant ainsi la biodisponibilité des métaux dans le sol. La dissolution de ces complexes pourrait expliquer quelques variations de la biodisponibilité de certains métaux. En effet, en considérant que la mise en dispositif des sols et les cycles climatiques imposés ont rendu le milieu plus réducteur, nous pouvons expliquer la légère augmentation de la biodisponibilité du Zn observée pour le sol « PRV ».
4. Les teneurs en argile (Otunola et Ololade, 2020) et en  $C_{org}$  (Saviozzi *et al.*, 1999 ; Walker *et al.*, 2003) modifient également la biodisponibilité des métaux. L'ajout de compost et de fumier

entraînant une augmentation de la teneur en matière organique diminue la biodisponibilité des métaux (Chiang *et al.*, 2001 ; Eneji *et al.*, 2003). Ce point expliquerait donc les différences de biodisponibilité de Cu observées entre les sols « V\_Cli+ens » et « V\_Cli+ph » où la mobilité du Cu a été qualifiée de plus faible sur le sol amendé en matière organique. Par ailleurs, il a été montré que par le biais de ces amendements, les résidus organiques peuvent également relacher du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), du sodium ( $\text{Na}^+$ ) et du potassium ( $\text{K}^+$ ) (Ranjbar et Jalali, 2012.), résultats que nous avons d'ailleurs observés au cours de ces expériences.

Ces quatre facteurs influençant la biodisponibilité des métaux sont très dépendants des pratiques humaines. Les pratiques d'amendement organique, inorganique, de compactage ou de travail de sol jouent donc un rôle indirect sur la biodisponibilité des métaux.

### 5.2.3. Influence des pratiques humaines sur les teneurs totales métalliques

Les résultats concernant les teneurs totales en éléments métalliques étudiés n'ont montré que très peu d'évolution excepté pour Cu où l'ajout de bouillie bordelaise a entraîné une augmentation. Les autres amendements organiques et inorganiques n'ont pas engendré d'accumulation de métaux, ce qui est très rarement observé dans la littérature. En effet, Baldantoni *et al.*, 2010 ont montré qu'un amendement de compost avait des effets sur les teneurs totales en Cd et en Zn. Une augmentation de ces teneurs durant 3 années d'apport a été observé sur deux sols limoneux sableux et argileux de la région Campanie en Italie. De plus, il a également été montré qu'une majorité de composts de déchets municipaux était sujet à augmenter les teneurs totales des éléments métalliques des sols (Smith, 2009). L'accumulation de métaux dans les sols par ajout de fumier est quant à elle plus discutée. Un ajout de fumier sur un site expérimental n'implique pas nécessairement une augmentation des teneurs métalliques totales. Santos *et al.*, (2010) ont montré qu'un apport annuel de fumier sur trois années n'implique pas d'augmentation des teneurs en Pb, Zn ou encore Cu. Par ailleurs, Il a également été montré que l'apport d'engrais minéral NPK peut également induire des accumulations de métaux dans les sols (Mantovi *et al.*, 2005), résultats n'ayant pas été mis en avant dans les expériences de vieillissement.

### 5.2.4. Liens entre pratiques, évolution des paramètres chimiques et processus / mécanismes mis en œuvre

Le travail expérimental présenté a permis de mieux cerner les pratiques humaines influençant les propriétés chimiques des sols ainsi que les processus pédogénétiques mis en œuvre au cours du temps. Les Tableaux 37, 38 et 39 retranscrivent l'effet individuel de chaque pratique sur les propriétés

chimiques des sols mais également la résultante de ces effets individuels sur l'évolution des propriétés chimiques au sein des usages étudiés. Ces tableaux mettent en évidence l'existence d'effets antagonistes entre les pratiques. Lorsque nous les combinons, une ou plusieurs de ces pratiques vont prédominer et imposer leur effet. C'est le cas des amendements organiques qui combinés à l'ajout d'engrais NPK vont imposer leur effet d'augmentation sur le paramètre pH. Un cas particulier est également observé concernant la biodisponibilité du Fe. En effet, selon les résultats obtenus l'ajout d'engrais NPK augmenterait la biodisponibilité du Fe. Or la résultante de l'ensemble des pratiques montre au contraire une diminution de cette biodisponibilité. Ce résultat peut s'expliquer par un impact plus important des amendements organiques sur la diminution de la biodisponibilité du Fe lorsqu'ils sont combinés que lorsqu'ils sont appliqués de manière individuelle. Par ailleurs, l'augmentation de la biodisponibilité de Cu et Mg observés lors de la combinaison de l'ensemble des pratiques liées à l'usage « Potager » montrent que la composition chimique des différents apports (*i.e.* engrais NPK, fumier, bouillie bordelaise) peut influencer majoritairement la biodisponibilité des éléments. En résumé, les apports organiques et inorganiques sont les pratiques humaines ayant un rôle prédominant dans l'évolution des paramètres chimiques des sols au cours du temps.

**Tableau 37 : Liens entre pratiques, évolution au cours du temps des propriétés agronomiques et processus/mécanismes impliqués (« + » : augmentation de la donnée au cours du temps; « - » : diminution de la donnée quantitative au cours du temps; « 0 » : pas d'évolution au cours du temps ; « (+) » : augmentation ou amélioration de la donnée quantitative d'après la bibliographie)**

Pratiques	Évolution au cours du temps				Processus/mécanismes impliqués	Pratiques	Évolution au cours du temps			
	pH	C <sub>org</sub>	CEC	P <sub>Olsen</sub>			pH	C <sub>org</sub>	CEC	P <sub>Olsen</sub>
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « Potager »	+	+	+	+
Irrigation	0	0	0	0						
Compost	+	+	+	+	formation de complexes argilo-humiques, accumulation de C <sub>org</sub> et de P <sub>Olsen</sub>					
Fumier	+	+	+	+	formation de complexes argilo-humiques, accumulation de C <sub>org</sub> et de P <sub>Olsen</sub>					
NPK	-	0	0	+	nitrification, acidification, accumulation de P <sub>Olsen</sub>					
Pesticide	0	0	0	0						
Travail du sol	0	0	0	0						
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « résidentiel »	+	0	0	+
Ajout d'herbe	0	(+)	0	0						
Ajout de mortier	+	0	0	+	alcalinisation, accumulation de P <sub>Olsen</sub>					

**Tableau 38 : Liens entre pratiques, évolution au cours du temps des éléments biodisponibles et processus/mécanismes impliqués (« + » : augmentation de la donnée au cours du temps; « - » : diminution de la donnée quantitative au cours du temps; « 0 » : pas d'évolution au cours du temps)**

Pratiques	Évolution au cours du temps (éléments biodisponibles)				Processus/mécanismes impliqués	Pratiques	Évolution au cours du temps (éléments biodisponibles)			
	Cu	Pb	Fe	Mg			Cu	Pb	Fe	Mg
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « Potager »	+	-	-	+
Irrigation	0	0	0	0						
Compost	0	0	0	+	accumulation Mg					
Fumier	-	-	0	+	adsorption cation métallique, accumulation Mg					
NPK	0	-	+	+	adsorption cation métallique, accumulation de Fe et Mg					
Pesticide	+	0	0	0	accumulation Cu					
Travail du sol	0	0	0	0						
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « résidentiel »	-	-	-	-
Ajout d'herbe	0	0	0	0						
Ajout de mortier	-	-	-	-	adsorption cation métallique					

**Tableau 39 : Liens entre pratiques, évolution au cours du temps des éléments totaux et processus/mécanismes impliqués (« + » : augmentation de la donnée au cours du temps; « - » : diminution de la donnée quantitative au cours du temps; « 0 » : pas d'évolution au cours du temps)**

Pratiques	Évolution au cours du temps (élément totaux)				Processus/mécanismes impliqués	Pratiques	Évolution au cours du temps (éléments totaux)			
	Cu	Pb	Fe	Mg			Cu	Pb	Fe	Mg
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « Potager »	+	0	0	0
Irrigation	0	0	0	0						
Compost	0	0	0	0						
Fumier	0	0	0	0						
NPK	0	0	0	0						
Pesticide	+	0	0	0	accumulation Cu					
Travail du sol	0	0	0	0						
Compactage	0	0	0	0		Ensemble de pratiques liées à l'usage « résidentiel »	0	0	0	0
Ajout d'herbe	0	0	0	0						
Ajout de mortier	0	0	0	0						

### 5.3. Simuler l'évolution d'un sol urbain en intégrant les pratiques humaines : une approche innovante

#### 5.3.1. Combiner facteurs climatique et anthropique pour simuler le vieillissement du sol urbain

La méthode proposée combinant deux facteurs d'influence pour simuler la trajectoire historique d'un sol est une approche innovante. Même si l'analyse de la littérature montre l'existence d'articles récents combinant ces deux facteurs (Ahmad *et al.*, 2018 ; Juing *et al.*, 2018 ; Xu *et al.*, 2018), aucune publication ne décrit tout ou partie de la trajectoire historique d'un sol à partir d'essais de laboratoire. En effet, les travaux identifiés n'utilisent la combinaison de ces deux facteurs que pour évaluer l'évolution à long terme de propriétés des sols très ciblées. De plus, le vieillissement en laboratoire sous influence climatique est simulé par des périodes d'incubation ou des cycles climatiques ne reflétant pas la réalité du terrain. Ainsi, Juing *et al.*, 2018 ont étudié l'effet du biochar et ses interactions sur le  $C_{org}$  du sol par des expériences d'incubation sur plus de 3 ans durant lesquelles les sols ont été placés dans l'obscurité à 25°C et à 60% de leur capacité au champs. Une autre étude s'est focalisée sur les effets du vieillissement d'engrais organiques et inorganiques sur le fractionnement du P dans un sol sablo-calcaire vieilli par incubation (Ahmad *et al.*, 2018). Un vieillissement par cycles climatiques a été proposé par Xu *et al.* (2018), étudiant l'impact d'un amendement en biochar et son rôle dans la biodisponibilité du Cd au cours de 25 cycles gel/dégel et 25 cycles d'humectation/dessiccation. Dans ce cas, le facteur climatique n'a pas retranscrit une réalité climatique puisque, de manière non réaliste, des températures extrêmes ont été imposées pour effectuer ces cycles (*i.e.* -20°C / 20°C pour le cycle gel/dégel, et 60 °C pour le cycle d'humectation/dessiccation). En résumé, la méthode proposée constitue donc une vraie avancée méthodologique de pédologie expérimentale par rapport à ce qui est classiquement proposé.

#### 5.3.2. Cohérence entre les tendances d'évolution observées en laboratoire et la réalité de terrain

L'approche de pédologie expérimentale que nous avons menée au laboratoire reflète-t-elle vraiment la réalité de terrain ? Les évolutions décrites au cours des expériences de vieillissement et les mesures réalisées sur le terrain montrent une cohérence entre ces deux approches. En effet, certaines propriétés physiques et chimiques évoluent lors des essais de forçage pour tendre vers des valeurs mesurées sur sites. Par exemple, l'augmentation du pH sur un sol support d'agriculture urbaine ayant subi toutes pratiques combinées (*i.e.* de 4,97 à 6,07 au cours de 10 semaines d'expérience) tend à s'approcher de la valeur actuelle mesurée *in situ* (*i.e.* 7,3). Cette correspondance entre teneurs simulées et observées est également vérifiée pour  $C_{org}$ ,  $P_{Olsen}$  et  $Cu_{tot}$ . Concernant  $C_{org}$  d'une teneur

initiale de  $9,51 \text{ g.kg}^{-1}$ , les pratiques humaines associées aux cycles climatiques ont eu pour conséquence d'augmenter progressivement la teneur à  $22,93 \text{ g.kg}^{-1}$  tendant donc vers la valeur mesurée sur site de  $32,10 \text{ g.kg}^{-1}$ . De plus, l'analyse de la littérature montre que les dynamiques d'évolution des teneurs mesurées en laboratoire sont identiques à celles mesurées sur site. Une expérience consistant à amender un sol *in situ* avec du fumier ( $200 \text{ kg.are}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ) (Gerzabek *et al.*, 1997) a montré une évolution de la teneur en  $C_{\text{org}}$  ( $30,1 \text{ g.kg}^{-1}$  en 37 ans d'expérience) du même ordre de grandeur que nos résultats ( $7,64 \text{ g.kg}^{-1}$  en 10 ans de vieillissement soient  $28,27 \text{ g.kg}^{-1}$  en 37 ans de vieillissement).

Des rapprochements entre l'évolution des paramètres au cours des 10 semaines d'expériences et la réalité de terrain peuvent également être mis en avant pour le matériau initial « BAM ». Même s'il paraît peu probable que le sol « BAM » soit le sol réellement utilisé pour mettre en place l'horizon de surface du site du quartier de Bel Air au vu des différences des propriétés chimiques observées, des tendances d'évolution peuvent néanmoins être identifiées. L'augmentation du  $P_{\text{Olsen}}$  observé au cours de l'expérience pourrait expliquer la teneur élevée de la couche de surface observée sur site. De même que l'augmentation du pH au cours du temps.

### 5.3.3. Limites du modèle expérimental proposé

Le système expérimental proposé n'a pas pour objectif de reproduire intégralement l'ensemble des processus de l'écosystème complexe que représente le sol. Certains processus comme les processus de lessivage et de lixiviation n'ont pas été pris en considération dans ces expériences. Ces processus jouent un rôle dans la biodisponibilité de certains métaux (Li *et al.*, 2011). Ce rôle est néanmoins à nuancer face aux autres facteurs d'influence puisque les concentrations lixiviées des métaux lourds ne représentent généralement qu'une faible proportion des concentrations totales (Dijkstra *et al.*, 2004). De plus, l'ensemble des mécanismes biochimiques associés au développement des plantes n'a pas été pris en considération. La consommation de nutriments par les plantes appauvrit le sol au cours du temps lorsque les végétaux sont exportés (Colombi *et al.*, 2021 ; Shen *et al.*, 2011). De plus, il a été montré que des tensioactifs contenus dans le mucilage des plantes modifient l'environnement biophysique de la rhizosphère et donc du sol formé et influencé par le développement racinaire (Read *et al.*, 2003). La biodisponibilité des métaux du sol peut également être influencée par les plantes (Walker *et al.*, 2003). Ces mécanismes n'ont pas été mis en évidence au cours de ces expériences. Néanmoins pour compléter en perspective le travail expérimental sur cet aspect, des modèles existants pourraient être utilisés pour simuler la consommation de nutriments de certaines plantes. Le modèle CENTURY a par exemple, été développé pour simuler les interactions se produisant dans l'écosystème plante-sol (Parton *et al.*, 2001). La production végétale, la dynamique du carbone et des

nutriments du sol, ainsi que les variations de teneur en eau et de température du sol sont ainsi prédites par ce modèle selon des conditions fixées (i.e. paramètres du sol, pratiques humaines). Enfin, l'activité des organismes du sol et notamment des microorganismes participant à leur formation et à leur fonctionnement (i.e. décomposition de la matière organique, recyclage des nutriments, absorption des éléments par les racines) n'a pas été favorisée par les conditions expérimentales. Il a été prouvé que la biomasse microbienne des sols était fortement impactée par les cycles de gel/dégel (Sorensen *et al.*, 2018). En effet, une corrélation entre la fréquence des cycles de gel/dégel du sol en hiver et la diminution de la biomasse microbienne que son taux d'activité a été identifiée. L'activité microbienne semble être corrélée à la température puisque des températures positives très basses impliquent une faible activité microbologique, contrairement aux températures plus élevées (Moureaux, 1967). L'humidité du sol est également un facteur impactant cette activité, les sols secs et détrempés ne possèdent pas les conditions nécessaires au bon développement de l'activité microbienne (Iovieno et Bååth, 2008). Globalement, il a été montré que l'humidité idéale se situe entre 60 et 80% de la capacité maximale de rétention du sol. L'enchaînement des cycles de gel/dégel, de dessiccation/humectation a donc perturbé l'ensemble des processus microbiologiques au cours de ces expérimentations.

Malgré ces limites, les atouts de l'approche de pédologie expérimentale proposée restent indéniables. La prise en compte des processus de lessivage/lixiviation, des mécanismes biochimiques associés au développement des plantes et de l'activité des micro-organismes n'ont pas empêché de mettre en évidence certains résultats et mécanismes que l'on retrouve sur site. De plus, le changement de structure engendré par le processus d'agrégation observé au cours du vieillissement montre que malgré ces manquements, le sol a bien évolué.

## 6. Conclusion

Les expériences contrôlées en laboratoire ont permis de compléter les analyses réalisées sur site. Grâce à cette méthode innovante de vieillissement, les effets unitaires de chaque pratique et leur rôle dans l'évolution des propriétés physiques et chimiques au cours du temps ont pu être caractérisés et quantifiés. Il a ainsi été montré qu'il pouvait exister des différences significatives d'évolution des propriétés physiques et chimiques entre les différents traitements appliqués au sol. Dans certains cas, pour une trajectoire historique donnée, l'effet individuel d'une pratique peut être contraire aux résultats obtenus pour l'effet de l'ensemble des pratiques. Même si le système expérimental proposé ne prend pas en considération l'ensemble des facteurs influençant les propriétés des sols, les résultats obtenus montrent des similitudes avec les études *in situ*. Ces expériences ont donc une réelle connexion avec la réalité du terrain. Par ailleurs, le développement et la généralisation du concept et du modèle proposé pourrait répondre aux besoins d'une caractérisation des impacts du facteur humain. En effet, une multiplication de ce type d'essais pour des sols initiaux et des pratiques contrastés pourrait permettre de proposer une typologie des effets de pratiques et d'usages sur des sols en milieu urbain (sous des aspects qualitatifs et quantitatifs).

Cette approche expérimentale vient compléter les deux approches précédentes par un changement de vision et des changements d'échelles spatiale et temporelle. À partir d'une approche territoriale puis d'une approche spécifique de terrain, cette nouvelle approche vient affiner l'échelle d'observation en s'intéressant au sol et à ses constituants. L'intégralité des connaissances acquises au cours de ce travail de recherche mérite d'être valorisée par le développement de méthodologie prédictive de zonage des sols urbains par la connaissance de leur trajectoire historique. Cette remarque scientifique va être au cœur du développement du Chapitre V.

## Chapitre V : De la connaissance de l'historique d'usages des sols urbains à leur cartographie

---

### Discussion générale

Les approches complémentaires proposées dans ce manuscrit et les connaissances acquises permettent (i) de comprendre la dynamique d'évolution d'usages des sols caractérisant le facteur humain de la pédogenèse urbaine, (ii) d'identifier *in situ* l'impact de ce facteur sur les propriétés physico-chimiques des sols urbains et (iii) de renseigner, par des expériences de pédologie expérimentale, l'évolution des propriétés des sols au cours d'une séquence historique.

Dans cette discussion générale, les principaux résultats acquis (Figure 76) par ces différentes approches, sont confrontés et comparés aux acquis de la littérature et analysés afin de proposer une approche méthodologique opérationnelle pour prédire les types de sols urbains et leurs propriétés à partir de la connaissance de leur trajectoire historique d'usages.

À cette fin, ce chapitre se structure en deux parties :

- 1) une discussion scientifique, qui s'attache à confronter les résultats de la thèse à ceux de la littérature, en vue de développer une cartographie prédictive des types de sols urbains et de leurs propriétés fondée sur la connaissance de leur trajectoire historique ;
- 2) une discussion sur les retombées opérationnelles d'une telle approche pour aider les acteurs de l'aménagement des territoires à mieux prendre en compte les sols et les orienter vers des stratégies d'aménagement plus respectueuses de la ressource « sol ».

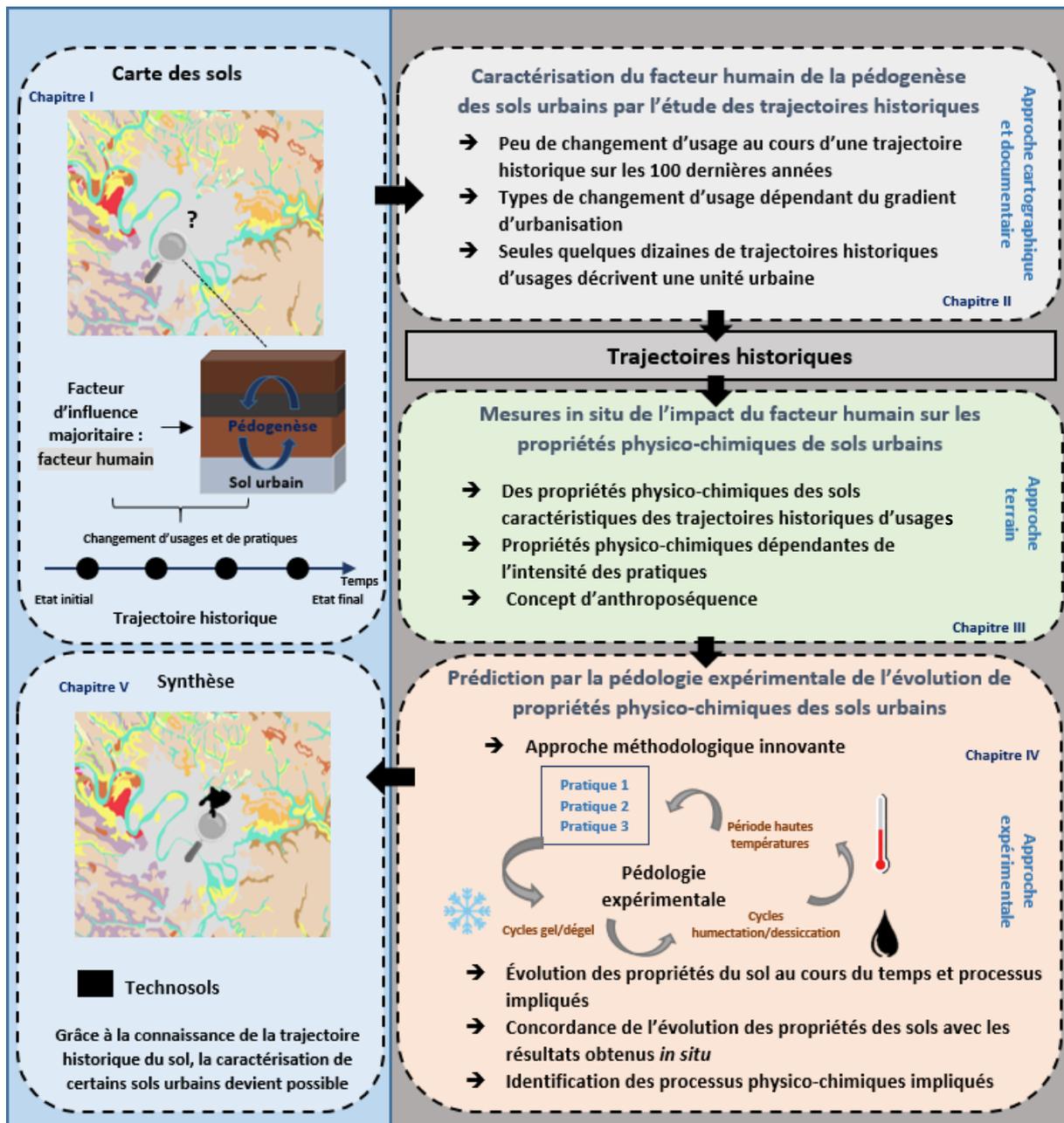


Figure 76 : Principaux résultats discutés dans le chapitre V issus des différentes approches pour proposer le développement d'une méthodologie prédictive des types de sols urbains et de leurs propriétés par la connaissance de leur trajectoire historique

## **1. Discussion générale à portée scientifique : proposition d'une méthode de cartographie des « anthroposéquences » et des propriétés potentielles des sols urbains**

### **1.1. « Anthroposéquence » : une notion à introduire en sciences du sol**

Décrire les sols en milieu urbain par la connaissance de leur trajectoire historique est une approche nouvelle. Aucune méthodologie, ni aucun outil n'existe actuellement pour faire le lien entre l'état d'un sol et sa trajectoire historique d'usages. Pourtant, il a été montré que les pratiques humaines associées aux trajectoires historiques peuvent induire des changements radicaux dans les propriétés des sols et leur fonctionnement (Greinert, 2015). Introduire le concept d'« anthroposéquence » en sciences du sol (*i.e.* une séquence de sols désignant des sols évoluant dans des conditions similaires dont les principales différences observées sont liées à divers usages et pratiques humaines marquant la pédogenèse (cf. Chapitre II)) permettrait donc de répondre à ces enjeux en caractérisant les liens existants entre le facteur pédogénétique anthropique et l'état des sols en milieu urbain. Ainsi, cette approche répondrait aux besoins scientifiques actuels d'acquisition de données relatives aux sols urbains à large échelle et du manque d'outils et de méthodes disponibles pour ce faire. L'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail de recherche montre, de plus, que le développement et la mise en œuvre de cette approche est possible à l'échelle de l'unité urbaine car le nombre de trajectoires historiques d'usages décrivant en majorité la superficie d'un tel territoire n'est que de quelques dizaines (Libessart *et al.*, 2022). Par conséquent, il serait possible de traduire l'analyse des trajectoires historiques d'une unité urbaine en « anthroposéquences » et ainsi apporter des connaissances supplémentaires sur l'état des sols à large échelle.

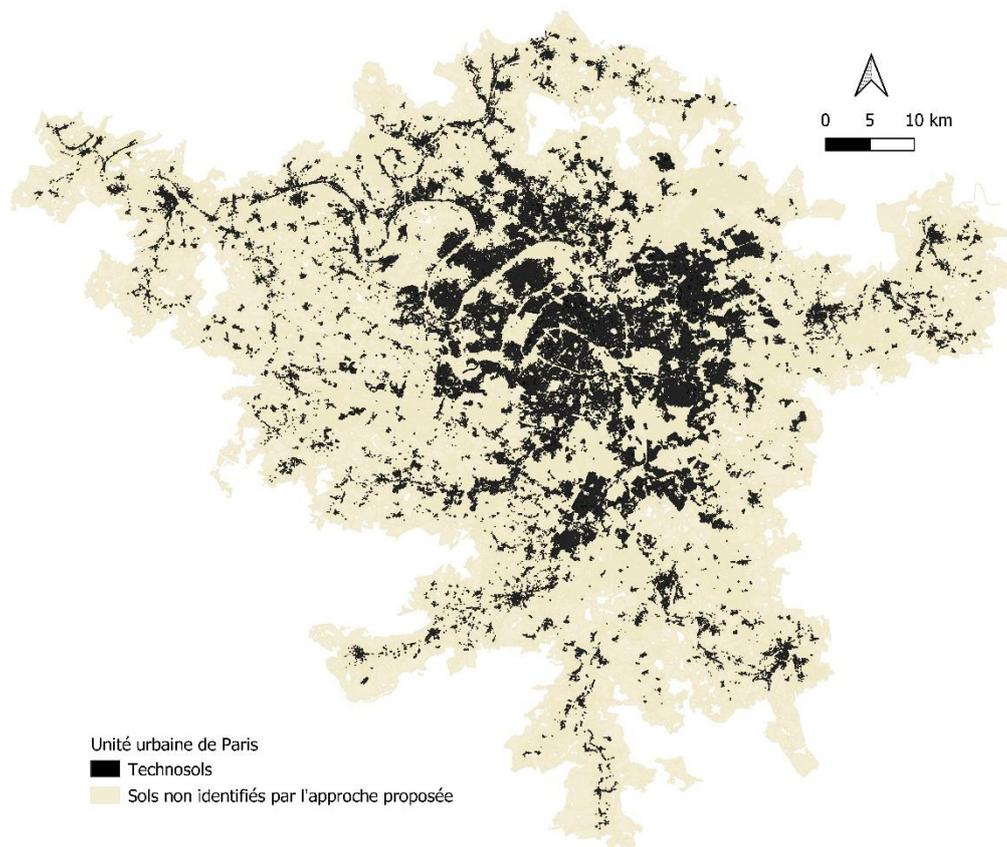
Dans ce sens, la nécessité de faire valoir cette notion en sciences du sol et plus particulièrement dans l'étude des sols urbains, apparaît être pertinent, tout comme le sont les notions de chronoséquence (*i.e.* succession de sols en un même lieu résultant du paramètre temps) et de toposéquence (*i.e.* succession de sols à un temps donné résultant du relief) pour décrire les sols naturels.

### **1.2. « Anthroposéquence » : une approche utile à la cartographie prédictive des sols urbains à large échelle**

Associer à chaque trajectoire historique une « anthroposéquence » caractérisant l'évolution du type de sol au cours du temps pourrait permettre de qualifier les sols urbains à large échelle. Par la connaissance de la trajectoire historique d'un sol, puis sa traduction en « anthroposéquence », il a été montré qu'il est possible de prédire *a minima* le type de sol urbain qui en résulte. Les résultats de ce

travail de recherche ont par exemple permis d'associer une « anthroposéquence » à une trajectoire historique représentative des sols urbains correspondant au passage d'un usage agricole à un usage résidentiel. Cette « anthroposéquence » montre que le sol initial s'est transformé en un Technosol sous l'influence de processus pédogénétiques spécifiques à cette trajectoire historique. Par cette approche, il serait donc possible de prédire la présence de Technosols, quel que soit le type de sol initialement présent, au sein de l'unité urbaine et de les cartographier (Figure 77). Les sols potentiellement identifiés comme étant des Technosols sur la carte représentent des sols ayant été le siège de cette trajectoire historique au cours des 70 dernières années. De plus, comme l'approche cartographique présentée dans le Chapitre II a montré une forte consommation des terres agricoles et une faible occurrence de changement d'usage au cours du temps, nous avons fait l'hypothèse que les surfaces restées sous usage habitat durant les 70 dernières années avaient connu un seul changement d'usage, de l'agriculture vers l'habitat. Ces surfaces ont donc été associées à un Technosol.

Cette cartographie de présence potentielle de Technosols vient compléter la carte des sols du référentiel pédologique régional d'Ile-de-France (voir Chapitre I, Figure 1). En effet, elle précise le type de sol se trouvant dans les zones blanches, qui, pour rappel, indiquent les zones urbanisées où aucune donnée pédologique n'est disponible à ce jour. De plus, cette carte vient également préciser certains types de sols déjà identifiés par la carte des sols. En effet, cette dernière identifie les différents types de sols en considérant majoritairement les facteurs pédogénétiques d'ordre naturels (Messant *et al.*, 2021) et prenant très peu en compte le facteur humain. Cette démarche montre alors qu'en juxtaposant le facteur humain et le type de sol initial naturel (avant urbanisation), il est possible de repérer les zones où le sol a été modifié au cours du temps. La juxtaposition de ces deux cartes fournit de manière complémentaire une vision globale de l'impact du facteur humain, du degré d'anthropisation des sols urbains et du mode de développement de la ville sur les sols naturels.



**Figure 77 : Localisation prédictive de Technosols au sein de l'unité urbaine de Paris – présence potentielle de Technosols déduite d'une approche historique**

### **1.3. Développement de l'approche cartographique basée sur le concept d' « Anthroposéquence »**

#### *1.3.1. Vers une typologie des « anthroposéquences »*

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit propose une méthode innovante de prédiction des types de sol urbains à large échelle par l'identification d'« anthroposéquences ». Cependant, ce travail méthodologique mérite d'être approfondi et de gagner en généralité. Dans une perspective à moyen termes, il serait intéressant de confronter cette approche à d'autres contextes et à d'autres trajectoires historiques représentatives des unités urbaines pour développer la méthode et aboutir à des cartes des sols en milieu urbain. Par ailleurs, il serait également intéressant de préciser le travail effectué pour une « anthroposéquence ». En effet, pour une trajectoire historique donnée, des pratiques humaines particulières peuvent modifier différemment l'évolution du type de sol au cours du temps et par conséquent l'« anthroposéquence » associée à cette trajectoire. Une même trajectoire historique peut alors être décrite par plusieurs « anthroposéquences », résultantes d'une succession de pratiques humaines différentes. Pour les identifier, un travail de prospection sur le terrain est

nécessaire. Multiplier les observations *in situ* décrivant une même trajectoire historique permettrait ainsi de quantifier le nombre d'« anthroposéquences » existantes ainsi que d'évaluer leur occurrence. Pour ce faire, l'ouverture et la description de fosses pédologiques sur des sols ayant subi une même trajectoire semble être une étape incontournable. Si cette méthodologie induit un coût et un travail de terrain conséquents, ces contraintes pourraient être réduites en tirant profit des chantiers des zones urbaines, à l'instar de ce qui est effectué par l'Inrap (Institut national de recherches archéologiques préventives) en matière d'analyse du patrimoine archéologique des sols. En effet, ce type de contexte offrirait l'opportunité de décrire un profil de sol sans surcoût et grâce à une approche historique complémentaire d'aider à identifier les « anthroposéquences ». Cependant, l'intérêt d'une telle description dépend aussi du protocole adopté pour lequel il serait indispensable de fixer un cahier des charges ou une charte de description.

Pour compléter cette perspective de prospection *in situ*, l'utilisation de bases de données disponibles regroupant les observations pédologiques réalisées en milieu urbain semble également être un moyen de définir des types d'« anthroposéquence ». En effet, en complétant les informations contenues dans ces bases de données par une approche historique, elles pourraient constituer une ressource non négligeable d'informations aidant à décrire des « anthroposéquences » pour une trajectoire historique donnée. En France, plusieurs bases de données de sols urbains existent. La base de Données des analyses de Sols Urbains (BDSolU), développée par le BRGM et l'ADEME, bancarise des analyses de sols prélevés en milieu urbain depuis 2010 (BRGM, 2016). La base de données DoneSol développée par INRAE, qui regroupe les données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) possède également quelques résultats d'investigations réalisées en milieu urbain (INRAE Infosol, 2014) via le RMQS. S'y ajoutent des bases de données centralisées à l'échelle universitaire. Ces bases de données convergent d'ailleurs dans le cadre du projet ADEME-SUPRA. Au-delà de ces bases de données, certains secteurs de métropoles actuels, historiquement agricoles, disposent de cartes de qualité agronomiques des sols. C'est le cas par exemple de la carte agronomique des environs de Paris (Vincey, 1897) ou celle du secteur de Montreuil au nord-est de l'unité urbaine de Paris datant de la même époque. Ce type de cartes reste néanmoins dispersé, d'époques diverses et très inégalement renseigné.

Par cette multiplication d'observations en milieu urbain, une probabilité d'occurrence entre les différentes « anthroposéquences » identifiées pour une trajectoire donnée permettra ensuite d'améliorer la précision des cartes de prédiction des types de sols en milieu urbain. Par exemple, les sols ayant subi une trajectoire historique décrite par 3 « anthroposéquences », seront décrits pour 75 % d'entre eux par l'« anthroposéquence » n°1, 15 % d'entre eux par l'« anthroposéquence » n°2 et enfin 10 % d'entre eux par la dernière « anthroposéquence ». Ce système de probabilité d'occurrence

est d'ailleurs utilisé pour décrire les Unité cartographiques de sols (UCS) dans les différents Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) où selon des facteurs naturels d'influence homogènes (*i.e.* morphologie, géologie et climat), une probabilité d'occurrence de type de sol est définie (Messant *et al.*, 2021). Sur un plan scientifique, il serait intéressant de poursuivre la démarche sur une zone urbaine pilote, selon des facteurs historiques d'usage, en comparant des paramètres pédologiques pour tester les résultats et mieux définir les limites, champs d'application et marges d'incertitude des résultats obtenus par une telle approche.

### 1.3.2. Amélioration de la méthode par le développement de l'analyse historique

Développer l'analyse historique sur des périodes plus longues serait également un moyen d'améliorer la précision des cartes de types de sols urbains proposées à large échelle. En effet, caractériser des trajectoires historiques sur une plus longue période permettrait des prédictions plus fiables. Même si un sol est identifié comme ayant subi un changement d'usage de l'agriculture vers l'habitat au cours des 70 dernières années, il est probable qu'un autre changement d'usage soit intervenu avant cette période, pouvant ainsi modifier l'« anthroposéquence » et fausser la prédiction réalisée.

Sur de longues périodes, il reste cependant difficile d'obtenir des informations d'usages des sols à large échelle (Liu *et al.*, 2004) comme celle utilisée dans le cadre de la thèse : l'unité urbaine. Ces données sont souvent issues de photographies aériennes ou d'images satellites, c'est-à-dire issues de technologies récentes développées depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle. Par conséquent, les études d'usage et de changements d'usage menées à large échelle se résument souvent à des périodes de quelques dizaines d'années (Liu *et al.*, 2004 ; Zhang *et al.*, 2020). Les données plus anciennes d'usages et de changements d'usages des sols sont issues de documents historiques aux échelles plus localisées et aux résolutions souvent plus grossières (Tian *et al.*, 2014), ce qui limite généralement les études à large échelle. Néanmoins, certaines études scientifiques donnent accès à des périodes plus longues en combinant analyse des documents historiques disponibles et analyse de données issues de photographies aériennes et/ou d'image satellites. Ainsi, des dynamiques d'évolution des sols ont pu être étudiées depuis les années 1800 (Franck-Néel *et al.*, 2014, Tian *et al.*, 2014) voire depuis les années 1730 avec le développement de l'Atlas de la nature à Paris et sa proche banlieue (Apur, 2018).

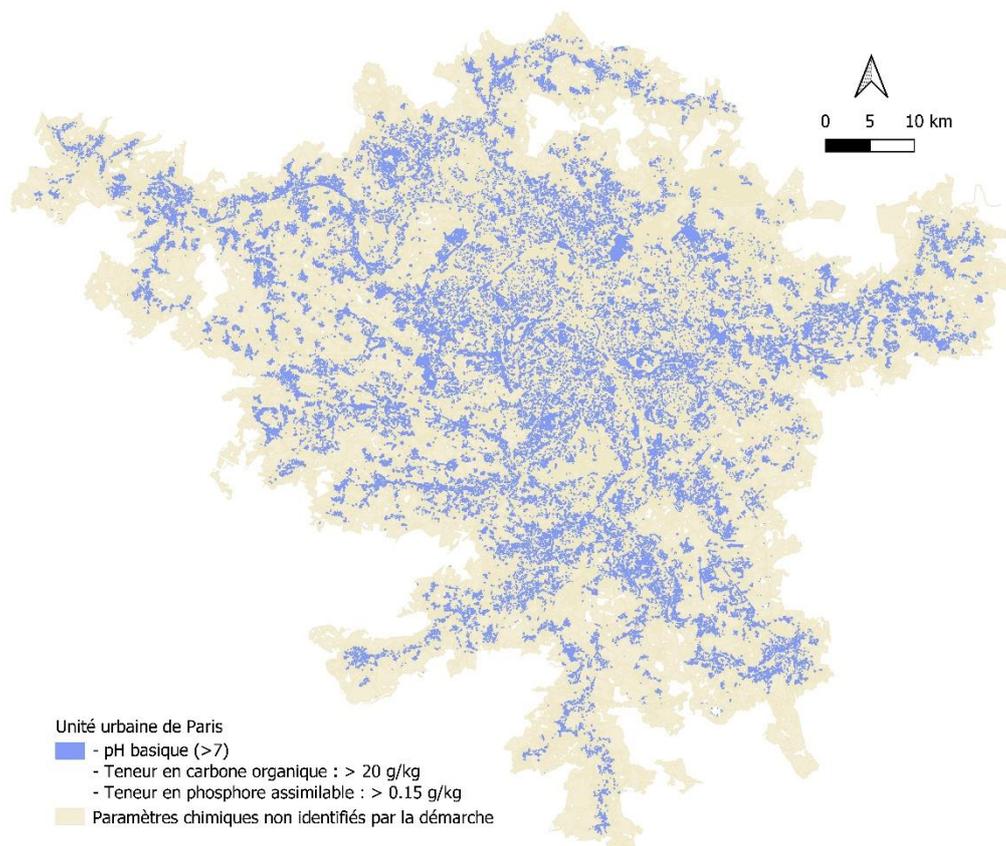
En perspective, un travail complémentaire pourrait alors être réalisé pour compléter les résultats obtenus et les trajectoires historiques sur des périodes plus longues (i) en utilisant les documents historiques disponibles ou encore (iii) en se référant aux travaux d'archéologie préventive menés en milieu urbain :

- Certaines villes possèdent des cartes historiques renseignant des différentes occupations des sols au sein de leur centre-ville pouvant aider à préciser les trajectoires historiques. Grâce à ces cartes, il est en effet possible d'évaluer si un sol était, il y a plusieurs siècles, sous couvert forestier, sous végétation rase ou encore en espace bâti. Le centre-ville de Paris est décrit par ce type de carte depuis l'an 500, documents disponibles et consultables en ligne (Wikimedia common, n.d.). D'autres villes comme Nancy, Nantes ou encore Toulouse possèdent également des cartes d'évolution de l'occupation de leur centre-ville au cours du temps. Ce travail reste tout de même chronophage car il nécessite un géoréférencement complet de l'ensemble de ces cartes et un découpage de ces cartes en entités homogènes d'occupation des sols.
- Les études d'archéologie préventive menées en milieu urbain peuvent également fournir des informations locales sur les usages et pratiques passées. L'analyse des terres noires (*i.e.* sédiments urbains) permet, par exemple, de comprendre leur origine et de surcroît la nature des activités domestiques ou artisanales d'il y a plusieurs siècles (Borderie, 2011). La condition pour une telle exploitation de ces données serait de mener un travail spécifique de transposition des nomenclatures de descriptions des sols entre archéologues et pédologues.

#### **1.4. Vers des cartes thématiques des principales propriétés des horizons de surface des sols urbains**

Les approches de terrain et de pédologie expérimentale menées au cours de cette thèse, ont montré que l'impact du facteur humain sur les propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface des sols urbains était principalement influencé par les pratiques actuelles imposées au sol. En effet, du fait de pratiques anthropiques, certains paramètres du sol tendent vers des valeurs spécifiques pouvant être estimées par ces types d'approches. Ainsi, les résultats mettent en avant que les pratiques que subit un sol support d'agriculture urbaine, tendent à imposer aux terres de surface un pH basique (*i.e.*  $>7$ ), des teneurs élevées en carbone organique (*i.e.*  $> 20 \text{ g.kg}^{-1}$ ) et en phosphore assimilable (*i.e.*  $> 0,15 \text{ g.kg}^{-1}$ ). Ces valeurs sont plus élevées que les moyennes mesurées sur les sols agricoles. Des résultats similaires ont par ailleurs été trouvés dans la littérature. Par exemple, dans le cadre du projet JASSUR (Jardins Associatifs Urbains et Villes Durables : Pratiques, Fonctions et Risques mené entre 2012 et 2016), les horizons de surface de 104 jardins situés en milieu urbain montrent un pH moyen de 7,6 et des teneurs moyennes en carbone organique et en phosphore assimilable, respectivement de  $26,2 \text{ g.kg}^{-1}$  et  $0,18 \text{ g.kg}^{-1}$  supérieures à celles de sols agricoles (Joimel *et al.*, 2016). Il a également été montré que les propriétés chimiques des sols de 85 jardins urbains de la ville de Zurich étaient principalement influencées par les pratiques humaines actuelles (Tresch *et al.*, 2018) renforçant de ce fait, les résultats

mis en avant dans nos travaux. À partir de l'ensemble de ces observations, il est donc possible d'estimer semi-quantitativement les propriétés agronomiques de certains sols urbains et de les cartographier à l'échelle de l'unité urbaine de Paris en identifiant les surfaces actuellement dédiées à l'agriculture urbaine (Figure 78), c'est-à-dire les surfaces sous usage d'espaces verts urbains selon la nomenclature 30 postes du MOS (Annexe 1). Sur la base des expériences et des mesures réalisées, des fourchettes de valeurs ont été attribuées à différents paramètres :  $\text{pH} > 7$  ;  $\text{C}_{\text{org}} > 20 \text{ g.kg}^{-1}$  ;  $\text{P}_{\text{Olsen}} > 0,15 \text{ g.kg}^{-1}$ .



**Figure 78 : Prédiction cartographique des sols support d'agriculture urbaine possédant un  $\text{pH} > 7$ , une teneur en  $\text{C}_{\text{org}} > 20 \text{ g.kg}^{-1}$  et une teneur en  $\text{P}_{\text{Olsen}} > 0.15 \text{ g.kg}^{-1}$**

### 1.5. Apports scientifiques de l'approche proposée

L'un des apports majeurs de ce travail de recherche est de proposer une méthode de caractérisation des sols urbains qui permettra, à terme, de prédire les types de sols urbains et de renseigner quelques propriétés de ces sols sans nécessiter de prélèvement ni de mesures *in situ* ou au laboratoire. L'acquisition de telles informations prédictives de la qualité de ces sols sans intervention sur site est une avancée scientifique innovante. En effet, à l'heure actuelle, de nombreux outils d'aide à la décision (OAD) de préservation des sols sont dépendant de la disponibilité de ces données qui n'est pas systématique. Il est en effet parfois difficile d'acquérir de la donnée sur les propriétés des sols urbains

car les sondages et les prélèvements sur site restent souvent des opérations très coûteuses et contraignantes (Franck-Néel *et al.*, 2014). Cette difficulté d'accès à ces données est donc souvent un frein dans la mise en place de ces outils d'aide à la décision. Par ailleurs, l'approche que nous proposons intègre de manière innovante la caractérisation des sols urbains à travers une vision dynamique de ces sols. Ils sont très couramment caractérisés par des mesures les qualifiant à l'instant *t*, centrées sur les fonctions qu'ils exercent, décrivant ainsi une vision statique de l'état des sols. En intégrant l'historique d'usages des sols et en proposant une démarche expérimentale de suivi des propriétés des sols au cours du temps, nous transformons cette vision en une vision dynamique qui permet d'accéder à la prédiction de grands traits de caractéristiques physico-chimiques sur les horizons de surfaces des sols mais également sur les horizons plus profonds grâce à l'identification d'« Anthroposéquences ».

L'ensemble de ces avancées scientifiques repose tout de même sur notre hypothèse de départ qui est de dire que les propriétés physiques et chimiques des sols urbains sont principalement déterminées par le facteur humain de la pédogenèse. Même si la majorité des résultats obtenus au cours de ce travail de recherche confirment cette hypothèse, il convient de rester critique par rapport à ces avancées scientifiques. En effet, cette approche mérite encore d'être développée en multipliant les sites d'études pour gagner en généralité et de conclure de manière définitive sur l'hypothèse de départ. De plus, l'identification sur site d'une « Anthroposéquence » peut parfois s'avérer difficile en raison des contraintes naturelles (*e.g.* nappe phréatique située à faible profondeur, remblai trop épais) pouvant ainsi limiter le développement de cette méthode. Par ailleurs, ce travail basé sur l'historique d'usages des sols a été mené à l'échelle de villes françaises qui possèdent un historique lié à un contexte national français. Ces mêmes travaux menés dans un autre pays, même voisin de la France, pourraient donner des résultats différents si l'évolution et le développement des villes diffèrent de ceux des villes françaises.

Bien que des incertitudes persistent à l'issue de ce travail de recherche, les nouvelles connaissances acquises sur le fonctionnement et le développement des sols urbains restent très cohérents avec celles acquises récemment par certains projets de recherche finalisée tels que SUPRA et MUSE (projets de recherches financés par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projet GRAINE et le programme MODEVAL-URBA, 2018-2021, respectivement pour SUPRA et MUSE). Par les différents apports scientifiques précédemment cités, ces travaux viennent alimenter et compléter ces projets et aident à faire avancer les collectifs de recherche. L'OAD proposé par SUPRA permettant aux gestionnaires de sites urbains de mieux prendre en compte les sols dans les projets d'aménagement se base par exemple sur des données obtenues sur site. La méthode proposée pourrait alors faciliter le développement de cet OAD par la prédiction des propriétés des sols sans intervenir sur le terrain. Le projet MUSE, quant à lui, a

développé au sein de l'enveloppe urbaine une approche basée sur le concept de « pleine terre » pour prédire la capacité potentielle des sols urbains à exercer des fonctions sans mesure *in situ* (Branchu et al., 2021). Cette approche lie la capacité d'un sol à exercer des fonctions à sa profondeur estimée par le type de végétation s'y développant. En résumé, plus un sol est épais, plus il est susceptible d'exercer des fonctions et d'être qualifié de sol répondant au concept de « pleine terre ». L'apport complémentaire de la méthode proposée dans ce manuscrit à cette approche « pleine terre » serait donc de développer des indicateurs de pollution des sols urbains qui ne sont pas abordés dans le projet MUSE. En effet, l'étude d'une « Anthroposéquence » peut fournir des indicateurs de pollution liés à la trajectoire historique du sol. Cet apport complémentaire répondrait ainsi, aux remarques émanant des collectivités sur le manque d'un volet pollution des sols urbains dans la méthode développée par le projet MUSE.

## 2. Discussion générale à portée opérationnelle : des acquis scientifiques à l'aide à la décision pour la planification et l'aménagement urbain

### 2.1. Proposition d'une approche méthodologique opérationnelle

Nos travaux montrent que, par la connaissance de l'historique d'usages des sols, il est possible d'établir à large échelle un zonage des sols urbains en fonction de l'« anthroposéquence » suivie. En développant à moyen terme cette approche, il serait alors possible d'accéder à des cartes thématiques opérationnelles caractérisant les sols urbains pour des propriétés choisies. L'approche générale proposée s'effectue en 4 étapes (Figure 79). Elle repose sur (i) un recueil de données d'occupations et d'usages des sols et de cartes historiques relatif au territoire d'étude, sur (ii) une analyse des trajectoires historiques de ce territoire, (iii) sur des fonctions de transfert qu'il reste à développer pour faire les liens entre la trajectoire historique d'un sol et son « anthroposéquence » grâce notamment à des analyses de terrain et de pédologie expérimentale et sur (iv) la production de cartes thématiques prédictives opérationnelles des sols urbains à large échelle.

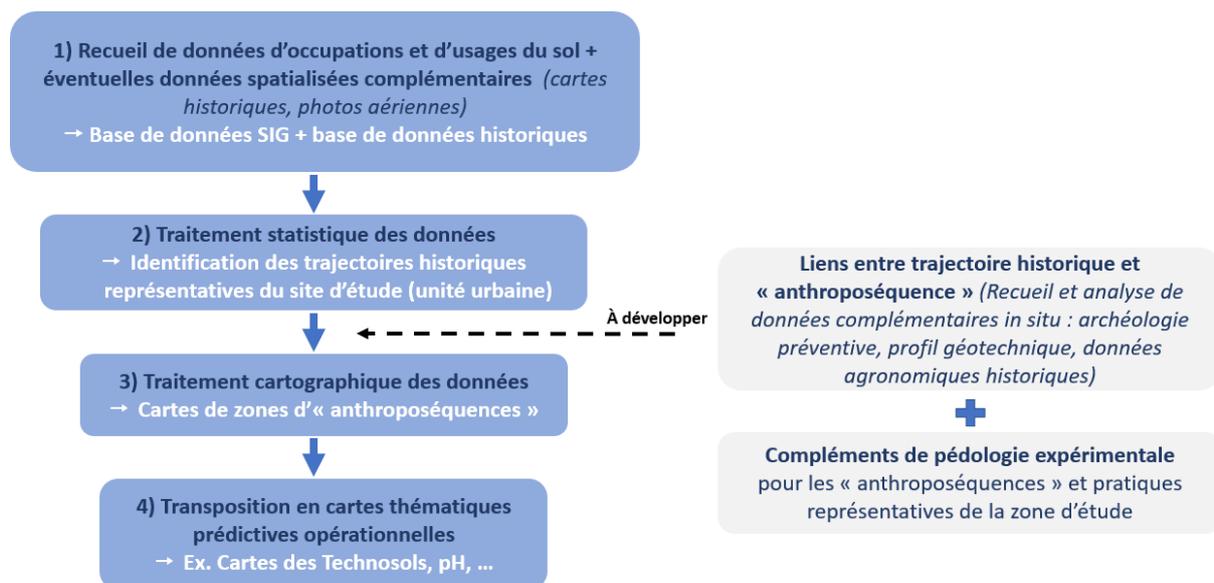


Figure 79 : Logigramme de l'approche cartographique et prédictive des sols urbains à large échelle

### 2.2. Nécessité d'un changement d'échelle pour une meilleure prise en compte des sols urbains dans les stratégies d'aménagement

Décrire l'état des sols urbains et leur fonctionnalité à l'échelle de la parcelle est aujourd'hui réalisable grâce aux développements d'outils d'aide à l'aménagement ou à la décision. L'outil Destisol, par exemple, a été développé à l'attention des aménageurs pour orienter l'usage des sols à l'échelle d'un site de projet (Cherel et al., 2017). Si ces méthodes, souvent basées sur des mesures *in situ* sont en

effet utilisables à l'échelle locale, elles ne peuvent élargir leur échelle d'application. En effet, ces méthodes sont difficilement généralisables en raison de la forte hétérogénéité des sols urbains, rendant ainsi difficile toute application à large échelle. Pourtant, prendre en compte les sols urbains à large échelle devient un besoin essentiel pour l'ensemble des acteurs de l'aménagement du territoire. En effet, les différentes politiques publiques vont inciter progressivement les acteurs de la planification urbaine à avoir une vision globale de l'état des sols. Plus particulièrement, la stratégie du « Zéro Artificialisation Nette » (ZAN) introduite dans la Loi dite Climat & résilience d'août 2021 impose aux collectivités d'éviter au maximum ce processus ou le cas échéant, de le réduire et le compenser afin de protéger la ressource « Sol » et sa multifonctionnalité. Dans cette optique, et afin de réduire l'artificialisation des sols en préservant les sols fonctionnels et en re-fonctionnalisant par de la désartificialisation et de la renaturation les sols dégradés, il est primordial de connaître l'état des sols à large échelle. La politique de la « Trame verte et Bleue » (TVB, 2010) mise en place par les lois Grenelle visant à maintenir et à reconstituer un réseau d'échanges et de continuités écologiques pour que les espèces animales et végétales puissent assurer leur cycle de vie, est également un exemple de politique où des connaissances de l'état des sols sur l'ensemble des territoires sont requises. Sur le même concept, la politique de « Trame Brune » visant à préserver la connectivité et l'intégrité physique, chimique et biologique des sols nécessite également une connaissance en amont de l'état des sols. Dans ce contexte qui s'ajoute aux fortes demandes sociales et environnementales pour plus de nature en ville, les notions de désimperméabilisation et de renaturation des sols deviennent également sources de discussions dans la planification territoriale. Ces concepts ont alors besoin d'outils et de données à large échelle pour identifier les sols à renaturer en priorité. Cette approche a d'ailleurs fait l'objet d'un projet mené par le Cerema où des cartes à l'échelle de l'unité urbaine de Paris indiquant les espaces artificialisés potentiellement renaturables ont été construites (Neaud *et al.*, 2021). Face à ces constats, il devient donc évident que la prise en compte des sols urbains à large échelle devient un élément incontournable dans la planification urbaine.

### **2.3. Des documents d'urbanisme adaptés à la prise en compte des sols urbains à large échelle ?**

Les documents de planification urbaine sont-ils adaptés au besoin émergent d'une prise en compte des sols urbains à large échelle ? Cette question est légitime dans la mesure où pour intégrer des outils de prédiction de l'état des sols urbains à large échelle, il est primordial d'avoir des stratégies d'aménagement adaptées émanant de ces documents de planification. En France, la planification urbaine repose sur différents documents d'urbanisme qui interviennent à plusieurs échelles territoriales. Le document ayant la plus large échelle d'application est le Schéma Régional

d'Aménagement et de Développement Durable et d'égalité des Territoires (SRADDET) qui à l'échelle régionale, précise les stratégies, les objectifs et les règles fixés par la Région dans les différents domaines de l'aménagement du territoire (ministère de la Transition écologique, 2021b). À une échelle plus restreinte, le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) sert d'outil de conception et de mise en œuvre d'une planification stratégique à l'échelle de l'unité urbaine, d'un bassin de vie ou encore d'un bassin d'emploi. Il est destiné à servir de cadre de référence pour les différentes politiques sectorielles, notamment celles centrées sur les questions d'organisation de l'espace et d'urbanisme, d'habitat, de mobilités, d'aménagement commercial, d'environnement, dont celles de la biodiversité, de l'énergie et du climat (Ministère de la transition écologique, 2021c). Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ou le Plan Local d'Urbanisme intercommunal (PLUi) visent à quant à eux à orienter l'aménagement du territoire et à mettre en cohérence ses différents enjeux à l'échelle de la commune ou de l'intercommunalité (Ministère de la transition écologique, 2021d). L'ensemble de ces documents intègre les stratégies régionales énoncées dans le SRADDET puisque l'intégralité des mesures prises dans le SCoT ou encore dans le PLU(i) doit être compatible avec ces stratégies régionales. De la même façon les objectifs ZAN seront déclinés de l'échelle régionale puis à l'échelle communale (du SradDET au SCoT puis au PLU).

Cette interconnexion signifie donc que l'intégration de l'état des sols urbains à large échelle dans les documents d'urbanisme devra être avant tout décidée au niveau régional. Une fois ces stratégies intégrées, l'approche décrite dans ce manuscrit pourra servir d'outil d'aide à la décision pour orienter les stratégies et les orientations d'aménagement des documents aux échelles d'applications plus restreintes. Ainsi, les documents composant le SCoT, c'est-à-dire le projet d'aménagement et de développement durable (PADD) qui présente le projet politique stratégique et prospectif sur 10 à 25 ans et le Document d'Orientations et d'Objectifs (DOO), pourront grâce à l'intégration de cette approche prendre en compte l'état des sols dans leur globalité et orienter en fonction leurs stratégies. De même que le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD), les orientations d'aménagement et de programmations (OAP) du PLU(i) pourront également être orientées en fonction des données et des informations décrites par cette méthodologie (Keller *et al.*, 2012, Branchu *et al.*, 2021). Bien que des stratégies globales régionales doivent être proposées au niveau du SRADDET, les documents d'urbanisme tels que le SCoT ou encore le PLU(i) semblent donc être des outils de planification adaptés pour l'intégration d'outils de prédictions de l'état des sols urbains à large échelle tels que nous les proposons.

#### **2.4. Format de l'approche proposée et adéquation au besoin opérationnel**

Est-il envisageable d'intégrer l'approche présentée dans la thèse dans les documents d'urbanisme tels que le SCoT ou encore le PLU(i) ? Sous quel format doit-elle être présentée pour qu'elle soit comprise

et utilisée par le plus grand nombre d'acteurs ? Ces questions opérationnelles sont le socle commun à de nombreux projets scientifiques en cours mais également à ce projet doctoral. À travers l'élaboration de projets comme SUPRA et MUSE, financés par l'ADEME, une volonté forte émerge au sein de la sphère scientifique pour développer des outils d'aide à la décision permettant une meilleure prise en compte des sols dans les stratégies d'aménagement du territoire et ceci à large échelle. Dans cette optique, il est tout d'abord essentiel de connaître l'avis des acteurs de l'aménagement sur ces questions.

Dans le cadre du projet MUSE visant à intégrer la multifonctionnalité des sols dans les documents d'urbanisme et notamment le PLU(i) (Branchu *et al.*, 2021 ; Franck-Néel *et al.*, 2021), 19 acteurs de l'aménagement ont répondu à un questionnaire ayant pour but de connaître l'intérêt qu'ils portaient à la ressource Sol, les outils qu'ils avaient à leur disposition pour prendre en compte cette ressource et sous quelle forme ils aimeraient disposer d'outils qualifiant les sols à large échelle afin de se les approprier plus facilement. L'enquête a révélé un manque d'outil de prise en compte de sols à large échelle, ce qui a également été mis en évidence par ailleurs, en particulier dans le projet SUPRA (Blanchart, 2018 ; Boithias *et al.*, 2019 ; Schwartz *et al.*, 2022). En plus d'un déficit d'outils d'aide à la décision, les collectivités considèrent qu'elles ont un manque de temps et de moyens humains pour appliquer et utiliser de telles approches et les retranscrire sur leur territoire. Dans ce contexte, il est donc primordial d'adapter ces nouvelles approches afin qu'elles soient facilement appropriables par les différents acteurs. Les résultats de l'enquête réalisée dans MUSE ont montré qu'un support cartographique était le plus approprié. Ce support facilite en effet la compréhension des données et leur visualisation. De plus, d'après les acteurs de la planification il est préférable d'adapter et de traduire ces données avec un vocabulaire adapté, c'est-à-dire en enjeux urbains. Il est en effet parfois difficile pour ces acteurs de la planification de transcrire des données pédologiques brutes en termes d'enjeux de développement durable.

Face à ce constat, la méthodologie proposée semble donc être appropriée aux besoins opérationnels d'informations à large échelle sur la ressource « Sol » puisque son support cartographique répond aux intérêts des aménageurs. Il serait d'ailleurs utile de mener un déploiement opérationnel de la méthode proposée en y impliquant des collectivités afin qu'elles puissent apporter un regard critique sur cette méthode. Par ailleurs, l'ensemble des informations disponibles à large échelle émanant des projets (*i.e.* MUSE, SUPRA) et de ce projet doctoral donne une vision macroscopique de l'état des sols permettant ainsi aux acteurs de la planification urbaine d'identifier facilement au sein des territoires, les secteurs comportant des sols multifonctionnels.

### 3. Bilan : position de l'approche proposée face aux enjeux scientifiques et opérationnels

La Figure 80 résume les différents apports scientifiques et opérationnels de la méthode proposée et les perspectives associées. La caractérisation des sols urbains par l'analyse de leur « Anthroposéquence » apporte des acquis scientifiques complémentaires aux approches existantes. En effet, cette démarche propose de s'affranchir du besoin systématique de données issues d'investigations menées *in situ* pour qualifier les sols urbains tout en répondant aux besoins opérationnels relevés par les acteurs de la planification urbaine.

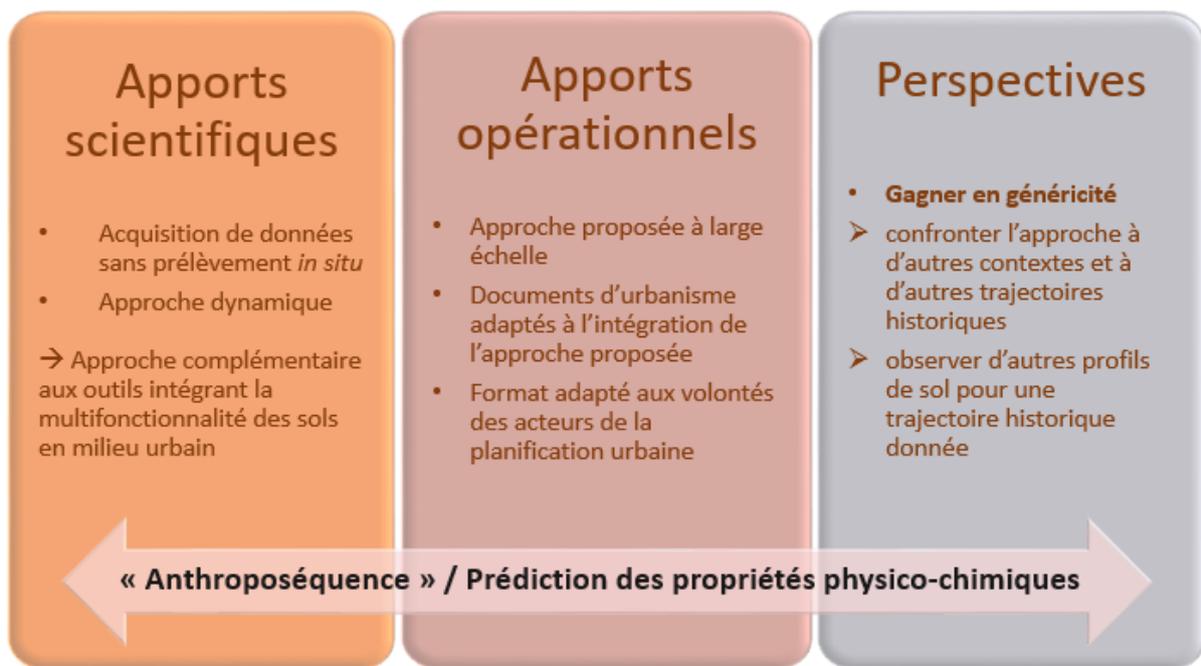


Figure 80 : Schéma présentant le bilan des apports de la méthode proposée sur le plan scientifique et opérationnel ainsi que les perspectives associées

## Conclusion générale

---

Nos travaux sur les sols urbains ont été largement motivés par la problématique d'artificialisation des sols et les enjeux de préservation de couvertures pédologiques fonctionnelles au sein des milieux (péri)urbains. Face à une anthropisation croissante des sols, des outils d'aide à la décision doivent être développés pour prendre en compte les sols dans les stratégies d'aménagement et dans la planification urbaine à large échelle. Pour ce faire, de nouvelles méthodologies doivent être pensées pour lever les verrous scientifiques à la détermination et la caractérisation du facteur humain déterminant les propriétés des sols urbains à large échelle. C'est pourquoi, nos travaux de thèse ont creusé la piste d'un lien existant entre la trajectoire historique d'usages d'un sol et ses propriétés physiques et chimiques afin d'essayer de lever ces verrous. L'approche méthodologique employée a combiné 3 niveaux d'analyse des sols urbains : i) l'analyse cartographique à large échelle des trajectoires historiques d'usage des sols urbains, ii) l'analyse *in situ* de profils de sol représentant 3 types de trajectoires historiques représentatifs, iii) l'analyse expérimentale des impacts de pratiques associées à ces trajectoires.

Tout d'abord, les résultats de l'analyse documentaire et cartographique permettent de comprendre comment se manifeste au cours du temps le facteur humain et de le caractériser par l'étude de trajectoires historiques d'usages. À l'échelle de l'unité urbaine et sur les dernières décennies, il a été montré qu'une vingtaine de trajectoires historiques suffirait à expliquer plus de 80 % de la superficie de ce référentiel. Ce résultat majeur montre donc que le facteur humain peut être caractérisé en éléments tangibles que l'on peut définir en successions de pratiques humaines traduisant les trajectoires historiques identifiées. Encore aujourd'hui, de nombreux pédologues estiment l'impact humain sur les sols urbains comme étant une accumulation d'usages et de pratiques se succédant de manière intensive dans le temps et dans l'espace, sans cohérence ni logique précises. Nos résultats ont, au contraire, fait la démonstration d'une typologie de caractérisation du facteur humain. Les surfaces ayant changé d'usages ne sont pas majoritaires à l'échelle d'une unité urbaine. De plus, lorsqu'une parcelle change d'usage, cette dernière n'est généralement le siège que d'un seul changement d'usage au cours des dernières décennies. Les trajectoires historiques de sols durant cette période sont donc facilement caractérisables, ainsi que les pratiques humaines associées, puisque des pratiques spécifiques à chaque usage et changement d'usage peuvent être également identifiées. Ces connaissances supplémentaires acquises sur la description du facteur humain ont permis d'aborder l'étude de son impact sur les propriétés physiques et chimiques des sols.

À ce titre, l'étude *in situ* réalisée dans le cadre de ce travail de recherche s'est concentrée sur trois trajectoires historiques à enjeux pour les acteurs de la planification urbaine. Grâce à l'identification d'un sol initial, c'est-à-dire d'un sol représentant le sol tel qu'il était avant toute intervention humaine, il est possible d'évaluer l'impact d'une trajectoire historique sur les propriétés physiques et chimiques du sol. Sur l'ensemble des trajectoires étudiées, des contaminations en métaux ainsi qu'une augmentation du taux d'artefacts ont été identifiées comme des conséquences communes de l'impact du facteur humain sur les propriétés physico-chimiques des trois sites étudiés. L'approche *in situ* a également permis de développer et d'illustrer le concept d'« Anthroposéquence » faisant le lien entre trajectoire historique d'un sol et impacts sur ses propriétés physico-chimiques. D'autres effets sur les sols, spécifiques aux trajectoires historiques étudiées ont été identifiés grâce à la méthode proposée et analysés plus finement par des expériences *in vitro*.

Ainsi, une démarche expérimentale innovante de simulation de vieillissement de sol a été menée au cours d'une troisième approche complémentaire. Ces expériences ont révélé et mis en évidence des processus pédogénétiques non identifiés lors de l'observation de terrain, comme les processus d'agrégation ou encore les processus d'oxydation et de réduction. Une évolution des propriétés physiques et chimiques sous influence des pratiques associées aux trajectoires historiques étudiées a également pu être identifiée et comparée aux résultats *in situ*. Cette comparaison a d'ailleurs montré que les résultats obtenus au laboratoire allaient dans le même sens que ceux obtenus sur site, prouvant ainsi une certaine cohérence de la méthode expérimentale utilisée.

L'ensemble des résultats obtenus grâce à cette démarche scientifique a permis *in fine*, de proposer une méthodologie de cartographie prédictive des types de sols urbains et de leur état physico-chimique à large échelle. Bien que nous restions encore dans les prémises de cette méthodologie qui ne demande qu'à monter en généralité et être validée, ce travail scientifique a néanmoins permis d'apporter des connaissances supplémentaires à l'identification des sols urbains et à compléter certains aspects manquants aux outils d'évaluation de la qualité des sols déjà existants. En effet, par sa méthode d'identification sans mesure *in situ* et par l'intégration d'une vision dynamique pour évaluer l'état des sols urbains, la démarche proposée apporte une plus-value évidente aux outils actuels.

## Perspectives

---

Si nous avons apporté des réponses aux questions scientifiques qui se posaient au préalable, de nouvelles aspérités sont apparues au fil des réflexions et vont constituer les perspectives de ce travail de recherche. La méthodologie proposée reste évidemment à approfondir et à valider avant d'aborder les aspects opérationnels. Il aurait été intéressant de pouvoir analyser et approfondir certaines trajectoires historiques majoritaires comme la succession d'usages « agricole → habitat » pour identifier différentes « anthroposéquences » en recherchant par exemple des sites avec un historique de bâti différent (*e.g.* maison individuelle construite au XIX<sup>ème</sup> siècle, immeuble construit début XX<sup>ème</sup> siècle). Ces analyses auraient pu être réalisées sur le plateau de Montreuil où ont été identifiées des zones habitées depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle, d'autres aménagées au cours du XIX<sup>ème</sup> et d'autres ré-aménagées après la seconde guerre mondiale jusqu'à aujourd'hui. Différentes « anthroposéquences » pourraient alors être mises en évidence en fonction des époques de constructions étudiées.

Cependant, l'identification des « anthroposéquences » et l'utilisation de la pédologie expérimentale pour renseigner l'effet de pratiques ciblées sont des étapes longues à mettre en œuvre. Pour ce faire et dans ce contexte, il semblerait opportun d'avoir recours à des connaissances et savoir-faire issus d'autres champs disciplinaires tels que l'archéologie, l'histoire et plus précisément l'histoire du développement des villes ou encore la sociologie afin de compléter et de consolider l'intégralité des résultats obtenus. En effet, rassembler et confronter l'ensemble des connaissances acquises de manière indépendante dans chacune de ces disciplines, serait une source d'informations pertinente au développement d'outils et de méthodologies de caractérisation des sols urbains à large échelle par la connaissance de leur trajectoire historique d'usages. Ces outils seraient alors plus robustes et permettraient de mieux répondre aux enjeux émergents liés à la politique publique du ZAN.

## Références bibliographiques

---

- Adelmann, G.W., 1998. Reworking the landscape, Chicago style. *The Hastings Center Report*, 28. p.6-11. SICI : 0093-0334(199811 /12)28 :6<S6 :RTLCS>2.OZU ;2-Q.
- AFPF, n.d. Entretien mécanique des prairies. Pourquoi ? Comment ? Et pour quels bénéfices ? Association Francophone pour la Prairie et les Fourrages. [en ligne]. [https://afpf-asso.fr/\\_objects/tao\\_medias/file/guide-entretien-20022020-erratum-3814.pdf?1582190193](https://afpf-asso.fr/_objects/tao_medias/file/guide-entretien-20022020-erratum-3814.pdf?1582190193).
- Agreste, 2017. Enquête : Pratiques culturelles en arboriculture. Campagne 2015. [en ligne]. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/ChdAgr245/cd245bsva.pdf>.
- Agreste, 2021. Enquête, Pratiques phytosanitaires en arboriculture 2012. [en ligne]. [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8\\_IFT-phytofruits\\_2018.pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2108/cd2021-8_IFT-phytofruits_2018.pdf).
- Ahmad, Munir, Ahmad, Mahtab, El-Naggar, A.H., Usman, A.R.A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., Elfaki, J., Al-Faraj, A., Al-Wabel, M.I., 2018. Aging Effects of Organic and Inorganic Fertilizers on Phosphorus Fractionation in a Calcareous Sandy Loam Soil. *Pedosphere* 28, 873–883. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60363-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60363-1).
- Alqadad, A., 2017. Smart system for safe and optimal soil investigation in urban areas. *Undergr. Space*, 2, 220-226. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2017.10.003>.
- Angelova, V.R., Akova, V.I., Artinova, N.S., Ivanov, K.I., 2013. The Effect of Organic Amendments on Soil Chemical Characteristics 14. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 19(5):958-971.
- Antoni, J.-P., 2010. L'étalement urbain. Gabriel Wackermann. *La France en villes*, Ellipses, pp.164-176. hal-01075776.
- AURAN, 2020. Huit questions pour décrypter l'objectif de « zéro artificialisation nette ». [en ligne] consulté le 22 juillet 2021. (<https://www.auran.org/dossiers/8-questions-pour-decrypter-lobjectif-de-zero-artificialisation-nette>).
- Baize, D., Girard, M.-C., 2008. Référentiel pédologique, 2008 435.
- Baldantoni, D., Leone, A., Iovieno, P., Morra, L., Zaccardelli, M., Alfani, A., 2010. Total and available soil trace element concentrations in two Mediterranean agricultural systems treated with municipal waste compost or conventional mineral fertilizers. *Chemosphere* 80, 1006–1013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.033>.
- Barles, S., 2005. Experts contre experts : les champs d'épandage de la ville de Paris dans les années 1870. *Société française d'histoire urbaine*, 2005/3 n°14, p. 65-80.
- Baumgartl, T., 1998. Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils. *Soil & Tillage Research* 47, 51-59.
- Béchet, B., Carré, F., Florentin, L., Leyval C., Montanarella, L., Morel, J.L., Raimbault, G., Rodriguez, F., Rossignol, J.P., Schwartz, C., 2009. Caractéristiques et fonctionnement des sols urbains. In : Chevery C. et Gascuel, C., (EDS.), *Sous les pavés la terre*, Omniscience, Montreuil, 45-74.

- Béchet, B., Joimel, S., Jean-Soro, L., Hursthouse, A., Agboola, A., Leitão, T.E., Costa, H., do Rosário Cameira, M., Le Guern, C., Schwartz, C., Lebeau, T., 2018. Spatial variability of trace elements in allotment gardens of four European cities: assessments at city, garden, and plot scale. *J Soils Sediments* 18, 391–406. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1515-1>.
- Bernasconi, S.M., Bauder, A., Bourdon, B., Brunner, I., Bünemann, E., Chris, I., Derungs, N., Edwards, P., Farinotti, D., Frey, B., Frossard, E., Furrer, G., Gierga, M., Göransson, H., Gülland, K., Hagedorn, F., Hajdas, I., Hindshaw, R., Ivy-Ochs, S., Jansa, J., Jonas, T., Kiczka, M., Kretzschmar, R., Lemarchand, E., Luster, J., Magnusson, J., Mitchell, E.A.D., Venterink, H.O., Plötze, M., Reynolds, B., Smittenberg, R.H., Stähli, M., Tamburini, F., Tipper, E.T., Wacker, L., Welc, M., Wiederhold, J.G., Zeyer, J., Zimmermann, S., Zumsteg, A., 2011. Chemical and Biological Gradients along the Damma Glacier Soil Chronosequence, Switzerland. *Vadose Zone Journal* 10, 867–883. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0129>.
- Biache, C., Ghislain, T., Faure, P., Mansuy-Huault, L., 2011. Low temperature oxidation of a coking plant soil organic matter and its major constituents: An experimental approach to simulate a long term evolution. *Journal of Hazardous Materials* 188, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.102>.
- Bielińska, J., Futa, B., Ukalska-Jaruga, A., Weber, J., Chmielewski, S., Wesółowska, S., Mocek-Plóćiniak, A., Patkowski, K., Mielnik, L., 2018. Mutual relations between PAHs derived from atmospheric deposition, enzymatic activity, and humic substances in soils of differently urbanized areas. *J. Soils Sediment.* 18, 2682–2691.
- Blanchart, A., Séré, G., Cherel, J., Warot, G., Stas, M., Consales, J.N., Schwartz, C., 2017. Contribution des sols à la production de services écosystémiques en milieu urbain - une revue. *Environnement Urbain / Urban Environment*, Institut national de la recherche scientifique - Réseau Villes Régions Monde, 2017, 11. hal-02959918.
- Blanchart, A., 2018. Vers une prise en compte des potentialités des sols dans la planification territoriale et l'urbanisme opérationnel. *Agronomie*. Université de Lorraine. Français. (NNT : 2018LORR0203). (tel-02075744)
- Bockheim, J.G., 1974. Nature and properties of highly-disturbed urban soils, Philadelphia, Pennsylvania. Division S-5, Soil Genesis, Morphology and Classification, Annual Meeting of the Soil Science Society of America. Chicago, IL.
- Bockheim, J.G., Gennadiyev, A.N., 2009. The value of controlled experiments in studying soil-forming processes: A review. *Geoderma* 152, 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.019>.
- Bodner, G., Scholl, P., Kaul, H.-P., 2013. Field quantification of wetting–drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution. *Soil and Tillage Research* 133, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.006>.
- Boithias, L., Lamari, S., Blanchart, A., Poyat, Y., Moulin, J., Béchet, B., Marseille, F., Schwartz, C., Branchu, P., 2019. Intégration des fonctions des sols dans les documents d'urbanisme : vision des acteurs du territoire. Poster ; Rencontres Sites et Sols pollués de l'Ademe (26 novembre 2019). Repris dans <https://www.cerema.fr/fr/actualites/fonctions-sols-documents-urbanisme-quelle-vision-acteurs>.
- Borderie, Q., 2011. L'espace urbain entre Antiquité et Moyen Âge, analyse géoarchéologique des terres noires : études de cas. *Archéologie et Préhistoire*. Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, 2011. Français. (tel-00672422).

- Børresen, M.H., Barnes, D.L., Rike, A.G., 2007. Repeated freeze–thaw cycles and their effects on mineralization of hexadecane and phenanthrene in cold climate soils. *Cold Regions Science and Technology* 49, 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.02.001>.
- Bosch, M., Chenal, J., 2019. Spatiotemporal patterns of urbanization in three Swiss urban agglomerations: insights from landscape metrics, growth modes and fractal analysis. *Landscape Ecol.* 35, 879–891. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-00985-y>.
- Boukelia, A., Rosin-Paumier, S., Masrouri, F., Leborgne, T., 2016. Stockage de chaleur dans les sols compactés. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. [En ligne] consulté le 27 février 2019. (<https://jngg2016.sciencesconf.org/81519/document>).
- Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Morel, J.L., 2006. Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils. *Chemosphere*, 63. p.802-810. DOI : 10.1016/j.chemosphere.2005.07.079.
- Bousquet, A., Couderchet, L., Gassiat, A., Hautdidier, B., 2013. Les résolutions des bases de données occupation du sol et la mesure du changement. *L'Espace géographique*, 42, 61-76. <https://doi.org/10.3917/eg.421.0061>.
- Bradshaw, A.D., 1983. The construction of ecosystems, *Journal of Applied Ecology*, 20, 1-17.
- Branchu, P., Marseille, F., Béchet, B., Bessière, J.-P., Boithias, L, Duvigneau, C., Genesco, P., Keller, C., Lambert, M.-L., Laroche, B., Le Guern, C., Lemot, A., Métois, R., Néel, C., Sheriff, R., 2021. MUSE. Intégrer la multifonctionnalité dans les documents d'urbanisme. 155 pages.
- BRGM, 2016. Fonds pédo-géochimiques anthropisés en milieu urbains. [en ligne]. [http://www.bdsolu.fr/sites/default/files/upload/documents/fgu\\_fr\\_08.2016.pdf](http://www.bdsolu.fr/sites/default/files/upload/documents/fgu_fr_08.2016.pdf).
- Burt, T.P., Williams, P.I., 1976. Hydraulic conductivity in frozen soils. *Earth Surf. Process.* 1: 349-360.
- Capra, G.F., Ganga, A., Grilli, E., Vacca, S., Buondonno, A., 2015. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. *J Soils Sediments* 15, 1602–1618. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1110-x>.
- CAUE, n.d. Guide pratique pour une gestion optimisée et durable des espaces verts communaux. Conseil d'Architecture d'Urbanisme et de l'Environnement de Meurthe-et-Moselle (CAUE). [en ligne]. [http://meurthe-et-moselle.fr/sites/default/files/Page%20Service/PDF/guide\\_gestion\\_optimisee\\_durable\\_espaces\\_verts\\_communaux\\_CAUE54\\_oct2015.pdf](http://meurthe-et-moselle.fr/sites/default/files/Page%20Service/PDF/guide_gestion_optimisee_durable_espaces_verts_communaux_CAUE54_oct2015.pdf).
- CCTP, 2005. 19 logements collectifs locatifs, 130-132 rue de Verdun 94500 Champigny-sur-Marne, Résidence « LE CEDRE ». [en ligne]. <http://bgrec.free.fr/Cours/TEB%20-%20Terminale/CCF%20TEB/March%E9-CCTP-01-%20Gros%20Ouvre.pdf>.
- CCTP, 2018a. Opération : construction d'un bâtiment communal avec commerces, cabinet médical et logement locatif social. [en ligne]. [http://cdn2\\_3.reseaudescommunes.fr/cities/287/documents/tr336el4wlvdqk8.pdf](http://cdn2_3.reseaudescommunes.fr/cities/287/documents/tr336el4wlvdqk8.pdf).
- CCTP, 2018b. Aménagement du lavoir à Barbechat, Divatte-sur-Loire (44). [en ligne]. [http://cdn1\\_3.reseaudesvilles.fr/cities/292/documents/dhmp0pp5xvffiw3.pdf](http://cdn1_3.reseaudesvilles.fr/cities/292/documents/dhmp0pp5xvffiw3.pdf).
- Cerema, 2008. NORMANDIE CENTRE – Pôle Littoral Nomenclature pour la nouvelle base de données de l'occupation du sol du littoral 2000-2006. Paris : MEDDE, Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature. [en ligne] consulté le 04 août 2021, ([http://www.geolittoral.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/Nomenclature\\_LittoMos\\_cle68478b.pdf](http://www.geolittoral.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/Nomenclature_LittoMos_cle68478b.pdf)).

- Cerema, 2019. Quelle prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme? [en ligne] consulté le 24 juillet 2021, ([https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/03/rapport\\_sofyane\\_versionpour\\_édition.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/03/rapport_sofyane_versionpour_édition.pdf)).
- CETE, 1998. Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées communautaires. [en ligne]. [https://www.grandlyon.com/fileadmin/user\\_upload/media/pdf/voirie/20091118\\_gl\\_voirie\\_guide\\_conception\\_structures\\_de\\_chaussees.pdf](https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/20091118_gl_voirie_guide_conception_structures_de_chaussees.pdf).
- Chambre d'agriculture Bourgogne, 2015. Le chaulage. [en ligne]. [https://bourgognefranche-comte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Bourgogne-Franche-Comte/CDA71/07\\_2015\\_Chaulage.pdf](https://bourgognefranche-comte.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Bourgogne-Franche-Comte/CDA71/07_2015_Chaulage.pdf).
- Chambre d'agriculture Champagne-Ardenne, 2017. Guide technique : Agriculture Intégrée. [en ligne]. [https://aube.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Grand-Est/10\\_Guide\\_Technique\\_agriculture\\_integree\\_-\\_internet.pdf](https://aube.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/10_Guide_Technique_agriculture_integree_-_internet.pdf).
- Chambre d'agriculture Charente-Maritime, 2014. Topologie pédologique des sols de Charente-Maritime : proposition de profils de référence. [en ligne]. [https://operaconnaissances.chambres-agriculture.fr/doc\\_num.php?explnum\\_id=147968](https://operaconnaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=147968).
- Chambre d'agriculture Loire atlantique, 2013. Charte pour la prise en compte de l'agriculture dans l'aménagement du territoire. Volet maraîchage. [en ligne]. [https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Pays\\_de\\_la\\_Loire/022\\_Inst-Pays-de-la-loire/RUBR-Etre-acteur-du-territoire/charte\\_agriculture\\_aménagement\\_territoire\\_volet\\_maraichage\\_44\\_201308.pdf](https://pays-de-la-loire.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Pays_de_la_Loire/022_Inst-Pays-de-la-loire/RUBR-Etre-acteur-du-territoire/charte_agriculture_aménagement_territoire_volet_maraichage_44_201308.pdf).
- Chambre d'agriculture Moselle, n.d. La fertilisation des prairies. [en ligne]. [https://moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Grand-Est/038\\_Inst-Moselle/RUBR1\\_productions\\_agricoles/Productions\\_vegetales/11\\_Fiche\\_Fertilisation.pdf](https://moselle.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/038_Inst-Moselle/RUBR1_productions_agricoles/Productions_vegetales/11_Fiche_Fertilisation.pdf).
- Chambre d'agriculture région Alsace, 2015. Guide technique : Fertilisation des grandes cultures. [en ligne]. [https://alsace.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Grand-Est/Alsace\\_fertilisation\\_grandes\\_cultures\\_guide\\_Alsace.pdf](https://alsace.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/Alsace_fertilisation_grandes_cultures_guide_Alsace.pdf).
- Chaoui-Derieux, D., 2018. Boues et gadoues à la pelle. nda 25–32. <https://doi.org/10.4000/nda.3967>.
- Charte européenne des sols, 1972. [en ligne] consulté le 3 septembre 2021, (<https://rm.coe.int/CoERMPublicCommonSearchServices/DisplayDCTMContent?documentId=09000016804e57ea>).
- Chaussod, R., 1996. La qualité biologique des sols: Evaluation et implications. *Etude et Gestion des Sols*, 3 (4), 261-278.
- Cherel, J., Séré, G., Boithias, L., Warot, G., Schwartz, C., Morandas, P., 2017. Destisol : Les sols, une opportunité pour un aménagement durable (56 pages).
- Chiang K.Y., Yoi S.D., Lin H.N., Wang K.S., 2001. Stabilization of heavy metals in sewage sludge composting process. *Water Sci Technol.* 44(10):95-100. PMID: 11794689.
- Ch'ng, H.Y., Ahmed, O.H., Majid, N.M.Ab., 2014. Improving Phosphorus Availability in an Acid Soil Using Organic Amendments Produced from Agroindustrial Wastes. *The Scientific World Journal* 2014, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2014/506356>.

- Chow, A.T., Tanji, K.K., Gao, S., Dahlgren, R.A., 2006. Temperature, water content and wet–dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 477–488. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.005>.
- Chuan, M.C., Shu, G.Y., Liu, J.C., 1995. Solubility of heavy metals in a contaminated soil: Effects of redox potential and pH. *Water Air Soil Pollut* 90, 543–556. <https://doi.org/10.1007/BF00282668>.
- Cieślak, I., Biłozor, A., Szuniewicz, K., 2020. The Use of the CORINE Land Cover (CLC) Database for Analyzing Urban Sprawl. *Remote Sens.* 12, 282. <https://doi.org/10.3390/rs12020282>.
- Colombi, T., Chakrawal, A., Herrmann, A.M., 2021. Carbon supply–consumption balance in plant roots: effects of carbon use efficiency and root anatomical plasticity. *New Phytol* *nph.17598*. <https://doi.org/10.1111/nph.17598>.
- Corgne, S., 2016. Etude des changements d’occupation et d’usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d’informations. *Géographie*. Université Rennes 2 2014.<tel-01240394>.
- Cornu, S., Montagne, D., Vasconcelos, P.M., 2009. Dating constituent formation in soils to determine rates of soil processes: A review. *Geoderma* 153, 293-303. Doi: 10.1016/j.geoderma.2009.08.006.
- Cornu, S., Keller, C., Béchet, B., Delolme, C., Schwartz, C., Vidal-Beaudet, L., 2021. Pedological characteristics of artificialized soils: A snapshot. *Geoderma* 401, 115321. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115321>
- Corte, A.E., 1966. Particle sorting by repeated freezing and thawing. *Biul. Peryglac.* 15, 175–240.
- Covigneron, 2018. Viticulture : le calendrier de la vigne. [en ligne]. <https://www.covigneron.com/calendrier-de-la-vigne/>.
- Craul, 1992. *Urban soil in landscape design*. John Wiley & Sons. 416p. ISBN : 978-0-471-80598-4.
- Czarnecki, S., Düring, R.-A., 2015. Influence of long-term mineral fertilization on metal contents and properties of soil samples taken from different locations in Hesse, Germany. *SOIL* 1, 23–33. <https://doi.org/10.5194/soil-1-23-2015>.
- Dagois, R., 2015. Vers une modélisation du statut de polluants organiques de Technosols sous influences climatiques contrastées. *Sciences agricoles*. Université de Lorraine, 2015. Français. (NNT : 2015LORR0333). (tel-01752335)
- Dagois, R., Faure, P., Bataillard, P., Bouzouidja, R., Coussy, S., Leguédois, S., Enjelvin, N., Schwartz, C., 2017. From atmospheric- to pedo-climate modeling in Technosols: A global scale approach. *Geoderma* 301, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.011>.
- Darmendrail, D., 1998. Typologie des sites pollués. *Géologues* 128, 12-14.
- Decina, S.M., Templer, P.H., Hutyra, L.R., Gately, C.K., Rao, P., 2017. Variability, drivers, and effects of atmospheric nitrogen inputs across an urban area: Emerging patterns among human activities, the atmosphere, and soils. *Sci Total Environ.* 609:1524-1534. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.166. Epub 2017 Aug 8. PMID: 28800694.
- De Kimpe, C.R.; Morel, C., 2000. "Urban soil management: A growing concern". *Soil Science*, 165(1), pp. 31-40. DOI: 10.1097/00010694-200001000-00005.
- De la Quintinie, 1680. Instructions pour les jardins fruitiers et potagers. Avec un traité des Orangers suivi de quelques réflexions sur l’agriculture. [en ligne]. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k619796.image>.

- De Miguel, M., Llamas, J.F., Chacon, E., Mazadiego, L.F., 1999. Sources and pathways of trace element in urban environment: a multielemental qualitative approach. *Science of Total Environment*, 235. p.355-357. DOI : 10.1016/S0048-9697(99)00234-X.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S.D., Elliott, E.T., Merckx, R., Paustian, K., 2001. Influence of dry±wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology* 13. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00076-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00076-1) \t "\_blank" \o "Persistent link using digital object identifier.
- Deng, J.S., Wang, K., Hong, Y., Qi, J.G., 2009. Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landsc. Urban Plan.* 92, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.001>.
- De Paul, M.A., Bailly, M., 2005. Effets de la compaction des sols forestiers. [En ligne] consulté le 27 février 2019. ([https://www.inforet.org/IMG/pdf/fw76\\_48-57-2.pdf](https://www.inforet.org/IMG/pdf/fw76_48-57-2.pdf)).
- Devos, Y., Nicosia, C., Vrydaghs, L., Speleers, L., van der Valk, Jan., Marinova, E., Claes, B., Albert, R.M., Esteban, I., Ball, T.B., Court-Picon, M., Degraeve, A. 2017. An integrated study of Dark Earth from the alluvial valley of the Senne river (Brussels, Belgium). *Quaternary International* 460:175-197.
- Diacono, M., Montemurro, F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 401–422. <https://doi.org/10.1051/agro/2009040>.
- Dick, W.A., McCoy, E.L., 1993. Enhancing soil fertility by addition of compost. In: H.A.J. Hoitink and H.M. Keener, (eds.), *Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological and Utilization Aspects*, pp 622-644. Renaissance Publications, Worthington, Ohio.
- Dietzel, C., Herold, M., Hemphill, J.J., Clarke, K.C., 2005. Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: Empirical links to urban theory. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 19, 175–195. <https://doi.org/10.1080/13658810410001713407>.
- Di Gregorio, A., J.M.Jansen, L., 1998. A new concept for a land cover classification system. *Proceedings of the Earth observation and Environmental information*, 10.
- Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Comans, R.N.J., 2004. Leaching of Heavy Metals from Contaminated Soils: An Experimental and Modeling Study. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4390–4395. <https://doi.org/10.1021/es049885v>.
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69. p.1858-1868. DOI : 10.1016/j.ecolecon.2010.05.002.
- Doran, J.W., 2002. Soil health and global sustainability: Translating science into practice. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 88. p.119-127. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00246-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00246-8).
- Douay, F., Pruvot, C., Roussel, H., Ciesielski, H., Fourrier, H., Proix, N., Waterlot, C., 2008. Contamination of Urban Soils in an Area of Northern France Polluted by Dust Emissions of Two Smelters. *Water Air Soil Pollut* 188, 247–260. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9541-7>.
- DPGF, 2017. Construction d'un centre d'accueil et de loisirs-Saleilles. Lot n°01 Gros-œuvre. [en ligne]. <https://www.saleilles.fr/wp-content/uploads/2018/01/Lot-1-DPGF-Gros-oeuvre.pdf>.
- Duchaufour, P., 1983. *Pédologie 1. Pédogénèse et Classification*, Masson. ed.
- Duchaufour, P., Faivre, P., Poulenard, J., Gury, M., 2001. *Introduction à la science du sol. Sols, végétation et environnement*. 7ième édition, 2018, DUNOD.

- Dudal, R., 2004. The sixth factor of soil formation. Intitute for land ans water management, K.U.Leuven, Vital Decosterstraat 102, B-3000 Leuven, Belgium.
- Edwards, A.C., Cresser, M.S., 1992. Freezing and Its Effect on Chemical and Biological Properties of Soil, in: Lal, R., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Restoration, Advances in Soil Science*. Springer New York, New York, NY, pp. 59–79. .
- Edwards, L.M., 1991. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils. *Journal of Soil Science* 42, 193–204. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00401.x>.
- Effland, W.R., Pouyat, R.V., 1997. The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas 13. *Urban Ecosystems* 1, 217–228. <https://doi.org/10.1023/A:1018535813797>.
- El Khalil, H., Schwartz, C., El Hamniani, O., Kubiniok, J., Morel, JL., Boularbah, A., 2013. Distribution of major elements and trace metals as indicators of technosolisation of urban and suburban soils. *Journal of Soils and Sediments*, 13. p.519-530. DOI : 10.1007/s11368-012-0594-x.
- Eneji, A.E., Honna, T., Yamamoto, S., Masuda, T., Endo, T., Irshad, M., 2003. The relationship between total and available heavy metals in composted manure. *J Sustain Agric* ;23:125-34. [https://doi.org/10.1300/J064v23n01\\_09](https://doi.org/10.1300/J064v23n01_09).
- Eriksson, M., Ka, J.-O., Mohn, W.W., 2001. Effects of Low Temperature and Freeze-Thaw Cycles on Hydrocarbon Biodegradation in Arctic Tundra Soil. *Appl Environ Microbiol* 67, 5107–5112. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.11.5107-5112.2001>.
- Etsè, A., Sanonka, T., Kokou, S., Magnoudéwa, B.B., Kokou, D., Koffi, K.A., Gado, T., Gnon, B., 2014. Etude de la disponibilité du phosphore assimilable des composts de déchets urbains dans deux sols différents. *European Scientific Journal*, ESJ, 10(6). <https://doi.org/10.19044/esj.2014.v10n6p%p>.
- European Commission, 2021. EU soil strategy for 2030. [en ligne]. [https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030\\_en](https://ec.europa.eu/environment/publications/eu-soil-strategy-2030_en).
- European Commission, DG Environement, 2011. Overview of best pratices for limiting soil sealing or mitigating its effects in EU-27. Brussels : European Communities.
- European Environment Agency, 1995. CORINE Land Cover. [en ligne] Consulté le 3 février 2021 (<https://www.eea.europa.eu/publications/CORO-landcover>).
- Förstner, U., 1985. Chemicals forms and reactivities of metals in sediments in "chemical methods for assessing bio-available metals in sludges and soil", Leschber R., Davis R.D., L'Hermite P., CEC, Elsevier Applied Science publishers, 1-30.
- Fourcaut, A., 2006. Les grands ensembles ont-ils été conçus comme des villes nouvelles ? *Hist. Urbaine* n° 17, vol. 3, p. 7-25. . 7. <https://doi.org/10.3917/rhu.017.0007>.
- France Galop, 2005. Synthèse de l'étude des pistes en gazon des hippodromes de France Galop. [en ligne]. <https://docplayer.fr/6950216-Synthese-de-l-etude-des-pistes-en-gazon-des-hippodromes-de-france-galop.html>.
- Franck-Néel, C., Delcour, P., Dumont, E., 2012. Les indicateurs de qualités des sols existants sont-ils adaptés aux sols urbains ?. *PSUR (Préservation des sols en milieu Urbain et Routier)*, Centre d'Études Techniques de l'Équipement, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. (<http://actions-incitatives.ifsttar.fr/fileadmin/uploads/recherches/seminaires/>).

- Franck-Néel, C., Borst, W., Diome, C., Branchu, P., 2014. Mapping the land use history for protection of soils in urban planning what reliable scales in time and space. *J Soils Sediments* 15, 1687–1704 (2015). <https://doi.org/10.1007>.
- Franck-Néel, C., Boithias, L., Duplanil, E., Duvigneau, C., Le Guern, C., Métois, R., Béchet, B., Marseille, F., Branchu P., 2021. Qualité des sols et urbanisme. Construire une méthodologie adaptée aux besoins des territoires et favoriser son appropriation, 111 pages.
- Frebourg Agro Ressources, 2019. Expertise de sol du 25/07/2019. [en ligne]. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi2mtC5gqHzAhUMlxQKHyaEBLgQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sobac.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fupload%2Fagriculture%2FProfils\\_de\\_sol%2F2019\\_07\\_25\\_profil\\_chobet\\_vigne\\_11\\_p\\_pages.pdf&usq=AOvVaw2tFuXpvj4I6i0ZwlATr12M](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi2mtC5gqHzAhUMlxQKHyaEBLgQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sobac.fr%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fupload%2Fagriculture%2FProfils_de_sol%2F2019_07_25_profil_chobet_vigne_11_p_pages.pdf&usq=AOvVaw2tFuXpvj4I6i0ZwlATr12M)
- Gaberšek, M., Gosar, M., 2018. Geochemistry of urban soil in the industrial town of Maribor, Slovenia. *Journal of Geochemical Exploration* 187, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.001>.
- Gajic, B., Dugalic, G., Djurovic, N., 2006. Comparison of soil organic matter content, aggregate composition and water stability of gleyic fluvisol from adjacent forest and cultivated areas. *Agron. Res.* 4 (2), 499-508.
- Gallego, J., Bamps, K., 2008. Using CORINE land cover and the point survey LUCAS for area estimation, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 10, Issue 4, Pages 467-475, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.11.001>.
- Ge, S., Zhu, Z., Jiang, Y., 2018. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001002>.
- GEM-EF, 2000. Guide pour l'aménagement et l'entretien des espaces verts. Edition 2000. [https://www.economie.gouv.fr/files/directions\\_services/daj/marches\\_publics/oeap/gem/ARCHIVE-5726/5726.pdf?v=1580282598](https://www.economie.gouv.fr/files/directions_services/daj/marches_publics/oeap/gem/ARCHIVE-5726/5726.pdf?v=1580282598).
- Gerzabek, M.H., Pichlmayer, F., Kirchmann, H., Haberhauer, G., 1997. The response of soil organic matter to manure amendments in a long-term experiment at Ultuna, Sweden. *European Journal of Soil Science* 48, 273–282. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1997.tb00547.x>.
- Ghosh, S., Scharenbroch, B.C., Ow, L.F., 2016. Soil organic carbon distribution in roadside soils of Singapore. *Chemosphere* 165, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.028>.
- Girard, M.C., Schvartz, C., Jabiol, B., 2011. Etude des sols. Description, cartographie, utilisation. Livre, édition DUNOD.
- Gis Sol, 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.
- Głąb, T., Gondek, K., 2013. The Influence of Soil Compaction on Chemical Properties of Mollic Fluvisol Soil under Lucerne (*Medicago sativa* L.). *Polish Journal of Environmental Studies* 22(1):107-113.
- Głąb, T., Gondek, K., 2014. The influence of soil compaction and N fertilization on physico-chemical properties of Mollic Fluvisol soil under red clover/grass mixture. *Geoderma* 226–227, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.021>.
- GRAB, Védie, H., Des pistes pour limiter la compaction des sols en maraîchage. [en ligne]. [https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Provence-Alpes-Cote\\_d\\_Azur/020\\_Inst\\_Paca/CRA\\_PACA/Images/EVENEMENTS\\_ACTUALITE/salons\\_pros\\_ren](https://paca.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Provence-Alpes-Cote_d_Azur/020_Inst_Paca/CRA_PACA/Images/EVENEMENTS_ACTUALITE/salons_pros_ren)

contres\_acheteurs/tech\_\_\_bio/conference\_2018/sol\_2.H.Vedie\_GRAB\_Compaction\_maraic hage.pdf.

- Gregory, J.H., Dukes, M.D., Jones, P.H., Miller, G.L., 2006. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation* 61, 117.
- Greinert, A., 2015. The heterogeneity of urban soils in the light of their properties. *J Soils Sediments* 15, 1725–1737. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-1054-6>.
- Groupeement d'Intérêt Scientifique sur les Sols et Réseau Mixte Technologique Sols et Territoire, 2019. Carte des sols. [en ligne]. <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>.
- Guérin-Pace F., Pumain D., 1990. 150 ans de croissance urbaine. In: *Economie et statistique*, n°230, Communes, métropoles, régions : l'espace français. pp. 5-16; doi : <https://doi.org/10.3406/estat.1990.5426>.
- Gupta, S.C., Sharma, P.P., DeFranchi, S.A., 1989. Compaction Effects on Soil Structure, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 311–338. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60528-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60528-3).
- Haeseler, F., Blanchet, D., Druelle, V., Werner, P., Vandecasteele, J.-P., 1999. Analytical characterization of contaminated soils from former manufactured gas plants. *Environ. Sci. Technol.* 33, 825–830. doi:10.1021/es9805829.
- Hamre, L.N., Domaas, S.T., Austad, I., Rydgren, K., 2007. Land-cover and structural changes in a western Norwegian cultural landscape since 1865, based on an old cadastral map and a field survey. *Landscape Ecol* 22, 1563–1574. <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9154-y>.
- Hedblom, M., Lindberg, F., Vogel, E., Wissman, J., Ahrné, K., 2017. Estimating urban lawn cover in space and time: Case studies in three Swedish cities. *Urban Ecosyst* 20, 1109–1119. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0658-1>.
- Heidt, V., Neef, M., 2008. Benefits of urban green space for improving urban climate. In: Carreiro MM, Song Y- C, Wu J, editors. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives*. New York: Springer. pp. 84–96.
- Héliot, P., Leduque A., 1948. Les fortifications de Montreuil-sur-Mer au Moyen Age. In: *Revue du Nord*, tome 30, n°118-119, Avril-septembre 1948. pp. 157-183 ; doi : <https://doi.org/10.3406/rnord.1948.1942>.
- Herrmann, D.L., Schifman, L.A., Shuster, W.D., 2020. Urbanization drives convergence in soil profile texture and carbon content. *Env. Res Lett* 15 114001. DOI: 10.1088/1748-9326/abb00.
- Hoffhine Wilson, E., Hurd, J.D., Civco, D.L., Prisloe, M.P., Arnold, C., 2003. Development of a geospatial model to quantify, describe and map urban growth. *Remote Sens. Environ.* 86, 275–285. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00074-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00074-9).
- Horn, R., 2015. Soil compaction and consequences of soil deformation on changes in soil functions. Institute for Plant Nutrition and Soil Science.
- Hou, W., Zhang, Le, Li, Y., Zhang, Lihong, Li, S., Ji, L., Dan, S., 2015. Distribution and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from a Typical Contaminated Urban Coking Sites in Shenyang City. *Bull Environ Contam Toxicol* 95, 815–821. <https://doi.org/10.1007/s00128-015-1677-3>.
- Hu, J., Chen, W., Zhao, Z.-Q., Lu, R., Cui, M., Dai, W., Ma, W., Feng, X., Wan, X., Wang, N., 2021. Source tracing of potentially toxic elements in soils around a typical coking plant in an industrial area in northern China. *Science of The Total Environment* 151091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151091>.

- Huang, G., Chen, Z., Wang, J., 2016. Impact of temperature on the aging mechanisms of arsenic in soils: fractionation and bioaccessibility. *Environ Sci Pollut Res* 23, 4594–4601. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5701-2>.
- Huang, S.S., Liao, Q.L., Hua, M., Wu, X.M., Bi, K.S., Yan, C.Y., Chen, B., Zhang, X.Y., 2007. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China. *Chemosphere* 67, 2148–2155. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.043>.
- Huggett, R.J., 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *CATENA* 32, 155–172. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00053-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00053-8).
- Huot, H., 2013. Formation, fonctionnement et évolution d'un Technosol sur des boues sidérurgiques. *Sciences agronomiques*.
- Huyler, A., Chappelka, A.H., Prior, S.A., Somers, G.L., 2014. Drivers of soil carbon in residential 'pure lawns' in Auburn, Alabama. *Urban Ecosyst* 17, 205–219. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0294-3>.
- INRAE Infosol, 2014. Dictionnaire de données. [en ligne]. <https://dw3.gissol.fr/fichiers/dictionnaire-donesol-igcs-2014-05-01.pdf>.
- INSEE, n.d. Chapitre 1, les unités urbaines. [en ligne] Consulté le 12 février 2019 (<http://www.insee.fr/fichier/imet129-b-chapitre1.pdf>).
- INSEE, 2011. Le nouveau zonage en aires urbaines de 2010. INSEE, 1374. [En ligne] Consulté le 12 février 2019 (<http://www.insee.fr/fr/ffc/ipweb/ip1374/ip1374.pdf>).
- Iovieno, P., Bååth, E., 2008. Effect of drying and rewetting on bacterial growth rates in soil: Rewetting and bacterial growth in soil. *FEMS Microbiology Ecology* 65, 400–407. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00524.x>.
- IPR, 2013. Les Cahiers. Mos 1982-2012, Volume 1, Du ciel à la carte.
- IRSTEA, Chitrit, J-J., Gautronneau, Y., 2011. Pratiques agricoles et fertilité des sols en France. [en ligne]. [https://aube.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/National/FAL\\_commun/publications/Grand-Est/10\\_Guide\\_Technique\\_agriculture\\_integree\\_-\\_internet.pdf](https://aube.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Grand-Est/10_Guide_Technique_agriculture_integree_-_internet.pdf).
- IUSS Working Group WRB, 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.
- Jeanneau, L., 2007. Approche moléculaire quantitative appliquée à l'étude du transfert de micropolluants organiques à la confluence entre la Fensch et la Moselle (France). Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Jean-Soro, L., Le Guern, C., Bechet, B., Lebeau, T., Ringoard, M.-F., 2015. Origin of trace elements in an urban garden in Nantes, France. *J Soils Sediments* 15, 1802–1812. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0952-y>.
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology, McGraw-Hill, p.
- Jim, C.Y., 1998. Physical and chemical properties of a Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth 11. *Urban Ecosystems* 2, 171–181. <https://doi.org/10.1023/A:1009585700191>.
- Jocteur-Monrozier, 1972. Formation de sol sur boues résiduaires provenant de la fabrication de la soude et du carbonate de sodium. Etude de reconnaissance. Faculté de l'Université de Nancy I, 34.

- Johnston, M.R., Balster, N.J., Zhu, J., 2016. Impact of Residential Prairie Gardens on the Physical Properties of Urban Soil in Madison, Wisconsin, *Journal of Environment Quality*. DOI: 10.2134/jeq2015.02.0093.
- Joimel, S., 2015. Biodiversité et caractéristiques physicochimiques des sols de jardins associatifs urbains français. Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, 293 p.
- Joimel, S., Cortet, J., Jolivet, C.C., Saby, N.P.A., Chenot, E.D., Branchu, P., Consalès, J.N., Lefort, C., Morel, J.L., Schwartz, C., 2016. Physico-chemical characteristics of topsoil for contrasted forest, agricultural, urban and industrial land uses in France. *Sci. Total Environ.* 545–546:40–47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.035>.
- Joimel, S., Schwartz, C., Hedde, M., Kiyota, S., Krogh, P.H., Nahmani, J., Pérès, G., Vernoges, A., Cortet, J., 2017. Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality. *Science of the Total Environment*, n°584/585, p. 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>.
- Jones, M.L.M., Sowerby, A., Williams, D.L., Jones, R.E., 2008. Factors controlling soil development in sand dunes: evidence from a coastal dune soil chronosequence. *Plant Soil* 307, 219–234. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9601-9>.
- Karl, T., Jordan, A., Lindinger, W., 2001. On-Line Analysis of Reactive VOCs from Urban Lawn Mowing. *Environmental Science & Technology* / VOL. 35, NO. 14, 2001. <https://doi.org/10.1021/es010637y>.
- Karlen, D.L., Ditzler, C.A., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114. p.145-156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9).
- Kauer, K., Kölli, R., Viiralt, R., Köster, T., Noormets, M., Laidna, T., Keres, I., Parol, A., Varul, T., Selge, A., Raave, H., 2013. Effect of Cut Plant Residue Management and Fertilization on the Dry-Matter Yield of Swards and on Carbon Content of Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44, 205–218. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.736304>.
- Katsoulas, N., Løes, A.-K., Andrivon, D., Cirvilleri, G., de Cara, M., Kir, A., Knebl, L., Malińska, K., Oudshoorn, F.W., Willer, H., Schmutz, U., 2020. Current use of copper, mineral oils and sulphur for plant protection in organic horticultural crops across 10 European countries. *Org. Agr.* 10, 159–171. <https://doi.org/10.1007/s13165-020-00330-2>.
- Keller, C., Lambert-Habib M-L., Robert S., Ambrosi J-P., Rabot E. 2012. Méthodologie pour la prise en compte des sols dans les documents d'urbanisme : application à deux communes du bassin minier de Provence, *Revue Sud-Ouest Européen, Toulouse*, N° 33, 11-24.
- Kooistra, M.J., Tovey, N.K., 1994. Chapter 5 - Effects of Compaction on Soil Microstructure, Editor(s): B.D. Soane, C. van Ouwerkerk, *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, Volume 11, Pages 91-111, ISSN 0167-4137, ISBN 9780444882868, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50013-1>.
- Koponen, H.T., Jaakkola, T., Keinänen-Toivola, M.M., Kaipainen, S., Tuomainen, J., Servomaa, K., Martikainen, P.J., 2006. Microbial communities, biomass, and activities in soils as affected by freeze thaw cycles. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1861–1871. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.010>.
- Kuzyakov, Y., Shevtzova, E., Pustovoytov, K., 2006. Carbonate re-crystallization in soil revealed by <sup>14</sup>C labeling; experiment, model and significance for paleo environmental reconstructions. *Geoderma* 131, 45–58.

- Laïlle, P., Cheval, H., 2019. Optimisation de la tonte et de la fauche. Résultats de l'observatoire des pratiques : Itinéraires techniques, Temps de travaux. Plante & Cité, Angers, 28 p.
- Landry, D., Dousset, S., Fournier, J.-C., Andreux, F., 2005. Leaching of glyphosate and AMPA under two soil management practices in Burgundy vineyards (Vosne-Romanée, 21-France). *Environmental Pollution* 138, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.04.007>.
- Légifrance, 2021a. Livre V : Prévention des pollutions, des risques et des nuisances (Articles L501-1 à L597-46). [en ligne]. [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000043978078](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043978078).
- Légifrance, 2021b. LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1). [en ligne]. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>.
- Lehmann, A., Stahr, K., 2007. Nature and significance of anthropogenic urban soils. *Journal of Soils and Sediments* 7, 247-260.
- Li, B., Zhang, H., Ma, Y., McLaughlin, M.J., 2011. Influences of soil properties and leaching on nickel toxicity to barley root elongation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2010.10.021>.
- Li, G., Sun, G.-X., Ren, Y., Luo, X.-S., Zhu, Y.-G., 2018. Urban soil and human health: a review: Urban soil and human health. *Eur. J. Soil Sci.* 69, 196–215. <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>.
- Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., Hall, M.H.P., Guo, R., Wang, H., Cui, J., He, X., 2013. Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma* 192, 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.011>.
- Li, Z., Wu, L., Zhang, H., Luo, Y., Christie, P., 2015. Effects of soil drying and wetting-drying cycles on the availability of heavy metals and their relationship to dissolved organic matter. *J Soils Sediments* 15, 1510–1519. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1090-x>.
- Libessart, G., Franck-Néel, C., Branchu, P., Schwartz, C., 2022. The human factor of pedogenesis described by historical trajectories of land use: The case of Paris. *Landscape and Urban Planning* 222, 104393. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104393>.
- Liu, C.-W., Yu, W.-S., Chen, W.-T., Chen, S.-K., 2005. Laboratory Investigation of Plough Sole Reformation in a Simulated Paddy Field. *J. Irrig. Drain Eng.* 131, 466–473. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:5\(466\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(466)).
- Liu, H., Zhang, S., Li, Z., Lu, X., Yang, Q., 2004. Impacts on Wetlands of Large-scale Land-use Changes by Agricultural Development: The Small Sanjiang Plain, China. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 33, 306–310. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.6.306>.
- Lorenz, K., Kandeler, E., 2005. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany. *Soil Biol. Biochem.* 37, 1373–1385. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.12.009>.
- Lundquist, E.J., Jackson, L.E., Scow, K.M., 1999. Wet ± dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 8.
- Macaire, J.J., Bernard, J., Di-giovanni, C., Hinschberger, F., Limondin-lozouet, N., Visset, L., 2006. Quantification and regulation of organic and mineral sedimentation in a late Holocene floodplain as a result of climatic and human impacts (Taligny marsh, Parisian Basin, France). *The Holocene*, pp.647-660.

- Mantovi, P., Baldoni, G., Toderi, G., 2005. Reuse of Liquid, Dewatered, and Composted Sewage Sludge on Agricultural Land: Effects of Long-Term Application on Soil and Crop. *Water Research*, Vol. 39, No. 2-3, 2005, pp. 289- 296.
- MEA, 2005. *Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington DC.
- Messant, A., Lehmann, S., Moulin, J., Lagacherie, P., Jalabert, S., Noraz, A., Lemercier, B., Chafchafi, A., Mure, J.-P., Laroche, B., Sauter, J., 2021. Diffusion des référentiels régionaux pédologiques sous la forme d'une carte des sols dominants (France métropolitaine - Hors Corse) accessible sur le Géoportail. *Etude et Gestion des Sols*, Association Française pour l'Etude des Sols, 2021, 28, pp.57-69. hal-03121194.
- Milošević, D., Nagy, I., Stojanović, V., 2013. Soils in the cities: state, problems and remediation techniques. *Researches Reviews of the Department of Geography, Tourism and Hotel Management* 43 -1/ 2 014.
- Ministère de la Transition Écologique, 2021a. La lutte contre l'artificialisation des sols. [en ligne]. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/fiche\\_lutte\\_contre\\_artificialisation\\_des\\_sols.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/fiche_lutte_contre_artificialisation_des_sols.pdf).
- Ministère de la transition écologique, 2021b. SRADDET : un schéma stratégique, prescriptif et intégrateur pour les régions. [en ligne]. <https://www.ecologie.gouv.fr/sraddet-schema-strategique-prescriptif-et-integrateur-regions>.
- Ministère de la transition écologique, 2021c. Le SCoT : un projet stratégique partagé pour l'aménagement d'un territoire. [en ligne]. <https://www.ecologie.gouv.fr/scot-projet-strategique-partage-lamenagement-dun-territoire>.
- Ministère de la transition écologique, 2021d. Démarche et outils pour élaborer un Plan local d'urbanisme (PLU) et un PLUi. [en ligne]. <https://www.ecologie.gouv.fr/demarche-et-outils-elaborer-plan-local-durbanisme-plu-et-plui>.
- Montel, N., 2012. L'agrandissement de Paris en 1860 : un projet controversé, in: Fourcaut, A., Bourillon, F. (Eds.), *Agrandir Paris (1860-1970)*. Éditions de la Sorbonne, pp. 99–111. <https://doi.org/10.4000/books.psorbonne.2393>.
- Morel J.L., Schwartz C., Florentin L., et de Kimpe C., 2005. Urban soils. In D. Hillel (ed.) *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier Ltd., Academic Press, London, 202-208.
- Morel, J.L., Séré, G., Auclerc, A., Schwartz, C., Leguedois, S., 2014. Les sols de l'environnement urbain : Caractéristiques, services et problèmes liés à leur étude. *Bulletin BGS*, pp.49-54.
- Morin, F., Bizet, V., 2020. Entretien des fossés et des bas côtés routiers, Guide technique départemental. Conseil Départemental des Côtes-d'Armor. 48 pages.
- Moureaux, C., 1967. Influence de la température et de l'humidité sur les activités biologiques de quelques sols ouest-africains. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 5 (4), p. 393-420. ISSN 0029-7259.
- Mygolfmedia, 2020. Le phytosanitaire et l'entretien des parcours de golf : Sujet de discorde. [en ligne]. <https://mygolfmedia.com/actualites/france/phytosanitaire-et-lentretien-des-parcours-de-golf-sujet-de-discorde/>.
- Nataningtyas, D.R., Morita, S., Hatano, R., 2017. Effects of soil water content and grass recycling on N2O emission in an urban lawn under laboratory incubation study. Presented at the INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON MATHEMATICAL ANALYSIS AND ITS

- APPLICATIONS (ICWOMAA 2017), Malang, Indonesia, p. 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5016016>.
- Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>.
- Neaud, C., Amossé, J., Benoist-Mouton, M., 2021. Identification du potentiel de renaturation de la zone dense francilienne - Tome 1 : Méthode d'analyse à l'échelle de l'unité urbaine, Rapport d'étude Cerema, 42 pages.
- Néchet, F.L., 2011. Quantifier l'éloignement au modèle de Bussière: monocentrisme contre "Acentrisme". *Neuvièmes rencontres de Théo Quant*, Mar 2009, Besançon, France. 19 p. hal-00616963.
- Nehls, T., Rokia, S., Mekiffer, B., Schwartz, C., Wessolek, G., 2012. Contribution of bricks to urban soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 575-584. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0559-0>.
- Nguyen, T.T., Fuentes, S., Marschner, P., 2013. Effect of incorporated or mulched compost on leaf nutrient concentrations and performance of *Vitis vinifera* cv. Merlot. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000038>.
- Nong, D., 2014. Quantify Spatiotemporal Patterns of Urban Growth in Hanoi Using Time Series Spatial Metrics and Urbanization Gradient Approach. *PLoS ONE* 13(5): e0196940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196940>.
- ONF, Pischedda, D., Bartoli, M., Brêthes, A., Cacot, E., Chagnon, J.L., Gauquelin, X., Nicolas, M., Richeter, C., 2009. Guide pratique : Pour une exploitation forestière respectueuse des sols et de la forêt « PROSOL ». Office National des Forêt. [en ligne]. [https://www.ofme.org/documents/FiliereBois/Guide\\_FCBA-ONF-PROSOL.pdf](https://www.ofme.org/documents/FiliereBois/Guide_FCBA-ONF-PROSOL.pdf).
- ONF, Pischedda, D., Helou, T-E., Augoyard, S., Baron, P., Cacot, E., Guilleray, L., Pousse, N., Ruch, P., Ulrich, E., 2021. Guide sur la praticabilité des parcelles forestières. [en ligne]. [https://www.onf.fr/outils/ressources/f1c4f5ae-f6af-4468-920f-f322bbb3b941/++versions++/4/++paras++/2/++ass++/1/++i18n++data:fr?\\_ =1631200900.813957&download=1](https://www.onf.fr/outils/ressources/f1c4f5ae-f6af-4468-920f-f322bbb3b941/++versions++/4/++paras++/2/++ass++/1/++i18n++data:fr?_ =1631200900.813957&download=1).
- Osunbitan, J.A., Oyedele, D.J., Adekalu, K.O., 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research* 82, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.007>.
- Otunola, B.O., Ololade, O.O., 2020. A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes. *Environmental Technology & Innovation* 18, 100692. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100692>.
- Ouvrard, S., Chenot, E.-D., Masfarau, J.-F., Schwartz, C., 2013. Long-term assessment of natural attenuation: statistical approach on soils with aged PAH contamination. *Biodegradation* 24, 539–548. <https://doi.org/10.1007/s10532-013-9618-5>.
- Ozlu, E., Kumar, S., 2018. Response of Soil Organic Carbon, pH, Electrical Conductivity, and Water Stable Aggregates to Long-Term Annual Manure and Inorganic Fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 82, 1243–1251. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.02.0082>.
- Oztas, T., Fayetorbay, F., 2003. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability, *CATENA*, Volume 52, Issue 1, Pages 1-8, ISSN 0341-8162, [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00177-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00177-7).

- Parat, C., Chaussod, R., Leveque, J., Andreux, F., 2005. Long-term effects of metal-containing farmyard manure and sewage sludge on soil organic matter in a fluvisol. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.025>.
- Park, S.-J., Cheng, Z., Yang, H., Morris, E.E., Sutherland, M., Gardener, B.B.M., Grewal, P.S., 2010. Differences in soil chemical properties with distance to roads and age of development in urban areas. *Urban Ecosyst* 15.
- Parton, B., Ojima, D., Del Grosso, S., & Keough, C., 2001. CENTURY tutorial. *Supplement to Century User's manual*.
- Pedro, G., 1964. Contribution à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse Sc. INRA, Paris, 345p.
- Pernes-Debuyser, A., Pernes, M., Velde, B., Tessier, D., 2003. Soil Mineralogy Evolution in the Inra 42 Plots Experiment (Versailles, France). *Clays Clay Miner.* 51, 577–584. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2003.0510512>.
- Perrono, P., 1999. Les micropolluants métalliques des boues de stations d'épuration urbaine et l'épandage agricole. Mém. D.U.E.S.S., D.E.P., Univ. Picardie, Amiens.
- Pickering, R.J., 1962. Some leaching experiments on three quartz-free silicate rocks and their contribution to an understanding of laterization. *Econ. Geol.* 57 (8), 1185–1206.
- Plan Biodiversité, 2018. [en ligne]. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/18xxx\\_Plan-biodiversite-04072018\\_28pages\\_FromPdf\\_date\\_web\\_PaP.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/18xxx_Plan-biodiversite-04072018_28pages_FromPdf_date_web_PaP.pdf).
- Plateforme Re-Sources, 2017. Guide opérationnel : quelle décharge pour ma ville ? [en ligne]. <https://www.plateforme-re-sources.org/wp-content/uploads/2018/07/Guide-operationnel-decharge.pdf>.
- Pluvinage, M., Weber, F., 1992. Les jardins populaires : pratiques culturelles, usages de l'espace, enjeux culturels. [en ligne]. [https://books.google.fr/books/about/Les\\_jardins\\_populaires.html?id=KyLFHAAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.fr/books/about/Les_jardins_populaires.html?id=KyLFHAAACAAJ&redir_esc=y).
- Poszwa, A., Bartier, D., Ollive, V., Moulis, C., 2018. Les conséquences de la guerre sur l'évolution des paysages et des sols à Flirey, à l'est du Saillant de Saint-Mihiel. 14-18 La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental, 978-2-9550042-1-0. hal-02076177.
- Prastacos, P., Chrysoulakis, N., Kochilakis, G., 2011. Urban Atlas, land use modelling and spatial metric techniques. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.28051>.
- Radulov, I., Berbecea, A., Sala, F., Crista, F., Lato, A., 2011. Mineral fertilization influence on soil pH, cationic exchange capacity and nutrient content. *Research Journal of Agricultural Science*, 43 (3).
- Ranjbar, F., Jalali, M., 2012. Calcium, Magnesium, Sodium, and Potassium Release during Decomposition of Some Organic Residues. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 43, 645–659. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.644005>.
- Read, D.B., Bengough, A.G., Gregory, P.J., Crawford, J.W., Robinson, D., Scrimgeour, C.M., Young, I.M., Zhang, K., Zhang, X., 2003. Plant roots release phospholipid surfactants that modify the physical and chemical properties of soil. *New Phytologist* 157, 315–326. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00665.x>.

- Rhea, L., Shuster, W., Shaffer, J., Losco, R., 2014. Data proxies for assessment of urban soil suitability to support green infrastructure. *Journal of Soil and Water Conservation* 69, 254–265. <https://doi.org/10.2489/jswc.69.3.254>.
- Richardson, S.J., Peltzer, D.A., Allen, R.B., McGlone, M.S., Parfitt, R.L., 2004. Rapid development of phosphorus limitation in temperate rainforest along the Franz Josef soil chronosequence. *Oecologia* 139, 267–276. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1501-y>.
- Riehl, A., Elsass, F., Duplay, J., Huber, F., Trautmann, M., 2010. Changes in soil properties in a fluvisol (calcaric) amended with coal fly ash. *Geoderma* 155, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.025>.
- Rodd, A.V., MacLeod, J.A., Warman, P.R., McRae, K.B., 2004. Surface application of cement kiln dust and lime to forages: Effect on soil pH. *Canadian Journal of Soil Science* 84(3):317-322. DOI: 10.4141/S03-087.
- Rojas, C., Munizaga, J., Rojas, O., Martínez, C., Pino, J., 2019. Urban development versus wetland loss in a coastal Latin American city: Lessons for sustainable land use planning. *Land Use Policy* 80, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.036>.
- Rokia, S., Sére, 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. p.2155-2162. DOI : 10.1016/j.wasman.2013.12.016.
- Rossiter, DG., 2007. Classification of Urban and Industrial Soils in the World Reference Base for Soil Resources. *J Soils Sediments*, DOI : <http://dx.doi.org/10.1065/jss2007.02.208>.
- RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>. <https://support.rstudio.com/hc/en-us/articles/206212048-Citing-RStudio>.
- Salisbury, A.B., Reinfelder, J.R., Gallagher, F.J., Grabosky, J.C., 2017. Long-term Stability of Trace Element Concentrations in a Spontaneously Vegetated Urban Brownfield With Anthropogenic Soils. *Soil Science* 182, 69–81. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000193>.
- Santos, S., Costa, C.A.E., Duarte, A.C., Scherer, H.W., Schneider, R.J., Esteves, V.I., Santos, E.B.H., 2010. Influence of different organic amendments on the potential availability of metals from soil: A study on metal fractionation and extraction kinetics by EDTA. *Chemosphere* 78, 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.008>.
- Sapena, M., Ruiz, L.A., 2015. Analysis of urban development by means of multi-temporal fragmentation metrics from LULC data. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XL-7/W3, 1411–1418. .
- Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., 1999. Long-term effects of farmyard manure and sewage sludge on some soil biochemical characteristics. *Biology and Fertility of Soils* 30, 100–106. <https://doi.org/10.1007/s003740050594>.
- Schindelbeck, R.R., Van ES, H.M., Abawi, G.S., Wolfe, D.W., Whitlow, T.L., Gugino, B.K., Idowu, O.J., Moebius-Clune, B.N., 2008. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and Urban Planning*, 88. p.73-80. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.006>.
- Schmit, C., Rounsevell, M.D.A., La Jeunesse, I., 2006. The limitations of spatial land use data in environmental analysis. *Environ. Sci. Policy* 9, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.11.006>.

- Scholtus, N., Leclerc, E., De Donato, P., Morel, J.L., Simonnot, M.O., 2009. Eluto-frontal chromatography to simulate chemical weathering of CO<sub>x</sub> by low-molecular-weight organic compounds and early pedogenesis processes. *European Journal of Soil Science* 60, 71–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01088.x>.
- Schulze, D.G., Nagel, J.L., Van Scoyoc, G.E., Henderson, T.L., Baumgardner, M.F., Stott, D.E., 1993. Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors, in: Bigham, J.M., Ciolkosz, E.J. (Eds.), *SSSA Special Publications*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 71–90. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c5>.
- Schwartz, C., Florentin, L., Charpentier, D., Muzika, S., Morel, J-L., 2001. Le pédologue en milieu industriels et urbains -1. Sols d'une friche industrielle, *Etude et Gestion des Sols*, 8,2, 135-148.
- Schwartz, C., Séré, G., Stas, M., Blanchart, A., Morel, J-L., 2015. Quelle ressource Sol dans les villes pour quels services et quels aménagements? *Innovations Agronomiques*, INRA, 45, pp.1-11.
- Schwartz, C., Bispo, A., Blanchart, A., Brunet, J-F., Cambou, A., Cannavo, P., Consales, J-N., De Fouquet, C., Ducommun, C., Le Guern, C., Saby, N., Sauvaget, B., Sere, G., Vidal-Beaudet, L., 2022. Sols urbains et projets d'aménagement (SUPRA) : de l'échantillonnage des sols urbains à l'outil d'aide à la décision d'affectation des sols. 224 p. (à paraître).
- Seguel, O., Horn, R., 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting–drying cycles. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 221–232. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521854>.
- Séré, G., 2007. Fonctionnement et évolution pédogénétique de Technosols issus d'un procédé de construction de sol. Thèse de doctorat. Laboratoire Sols et Environnement. Nancy Université, INPL, 227 pp.
- Séré, G., Ouvrard, S., Schwartz, C., Watteau, F., 2010. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. *Journal of Soils and Sediments*, Springer Verlag, 2010, 10, pp.1246-1254. (10.1007/s11368-010-0206-6). (hal-01486271).
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., Zhang, W., Zhang, F., 2011. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology* 156, 997–1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>.
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.T., 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-saturated Media.
- Skaloš, J., Engstová, B., 2009. Methodology for mapping non-forest wood elements using historic cadastral maps and aerial photographs as a basis for management, *Journal of Environmental Management*, Volume 91, Issue 4, Pages 831-843, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.10.013>.
- Smith, C.W., Johnston, M.A., Lorentz, S., 1997. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. *Geoderma* 78, 93–111. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00029-3).
- Smith, R.M., Williamson, J.C., Pataki, D.E., Ehleringer, J., Dennison, P., 2018. Soil carbon and nitrogen accumulation in residential lawns of the Salt Lake Valley, Utah. *Oecologia* 187, 1107–1118. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4194-3>.
- Smith, S., 2009. A critical review of the bioavailability and impacts of heavy metals in municipal solid waste composts compared to sewage sludge. *Environment International* 35, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.009>.

- SNCF réseau, n.d. Le réseau ferré national et la maîtrise de la végétation. Pratiques actuelles et perspectives. [en ligne]. [https://www.sncf-reseau.com/sites/default/files/2020-08/SNCF%20R%C3%A9seau\\_Ma%C3%A9trise%20de%20la%20v%C3%A9g%C3%A9tation\\_r%C3%A9seau%20ferr%C3%A9%20national.pdf](https://www.sncf-reseau.com/sites/default/files/2020-08/SNCF%20R%C3%A9seau_Ma%C3%A9trise%20de%20la%20v%C3%A9g%C3%A9tation_r%C3%A9seau%20ferr%C3%A9%20national.pdf).
- SolAB, 2011. Comparaison de 2 itinéraires de travail du sol en maraîchage biologique. Dispositif du PLRN. Réseau expérimental SolAB. [en ligne]. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj\\_iuTCiqHzAhVxA2MBHSgRDrgQFnoECBQQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.itab.aso.fr%2Fdownloads%2Fsolab%2Fsolab-maraich-charentes.pdf&usg=AOvVaw225reDYgDszOqVyx3MOwX](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_iuTCiqHzAhVxA2MBHSgRDrgQFnoECBQQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.itab.aso.fr%2Fdownloads%2Fsolab%2Fsolab-maraich-charentes.pdf&usg=AOvVaw225reDYgDszOqVyx3MOwX).
- Solgi, E., Esmaili-Sari, A., Riyahi-Bakhtiari, A., Hadipour, M., 2012. Soil Contamination of Metals in the Three Industrial Estates, Arak, Iran. *Bull Environ Contam Toxicol* 88, 634–638. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0553-7>.
- Sorensen, P.O., 2018. Winter soil freeze-thaw cycles lead to reductions in soil microbial biomass and activity not compensated for by soil warming. *Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.026>.
- Soria, R., 2021. Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology* 13. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103925>.
- Soukarieh, 2018. Impact of Lebanese practices in industry, agriculture and urbanization on soil toxicity. Evaluation of the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) levels in soil.
- Soulides, D.A., Allison, F.E., 1961. Effect of drying and freezing soil on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation and bacterial population. *Soil Sci.* 91: 291-298.
- Steinhardt, G.C., Franzmeier, D.P., 1979. Comparison of organic matter content with soil color for silt loam soils of Indiana. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 10, 1271–1277. <https://doi.org/10.1080/00103627909366981>.
- Stevens, P.R., Walker, T.W., 1970. The Chronosequence Concept and Soil Formation. *Q. Rev. Biol.* 45, 333–350. <https://doi.org/10.1086/406646>.
- Study of Critical Environmental Problems, 1970. Man's impact on the global environment: Assessment and recommendations for action. Cambridge: MIT Press.
- Sun, C., Wu, Z., Lv, Z., Yao, N., Wei, J., 2013. Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 21, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.012>.
- Tang, A.M., Vu, M.N., Cui, Y.-J., 2011. Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting–drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil. *Géotechnique* 61, 421–429. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP11.005>.
- Targulian, V.O., Krasilnikov, P.V., 2007. Soil system and pedogenic processes: self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71, 373–381.
- Thenail, C., Baudry, J., 2001. Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères : de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage. Séminaire de l'UMR 6554 du CNRS. LETG. Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique, Feb 2001, Rennes, France. (hal-01458437).

- Tian, H., Banger, K., Bo, T., Dadhwal, V.K., 2014. History of land use in India during 1880–2010: Large-scale land transformations reconstructed from satellite data and historical archives. *Global and Planetary Change* 121, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.07.005>.
- Thornton, I., 1991. Metal Contamination of Soils in Urban Areas, in: Bullock, P., Gregory, P.J. (Eds.), *Soils in the Urban Environment*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, pp. 47–75. <https://doi.org/10.1002/9781444310603.ch4>.
- Trammell, T.L.E., Pouyat, R.V., Carreiro, M.M., Yesilonis, I., 2017. Drivers of soil and tree carbon dynamics in urban residential lawns: a modeling approach. *Ecol Appl* 27, 991–1000. <https://doi.org/10.1002/eap.1502>.
- Tresch, S., Moretti, M., Le Bayon, R.-C., Mäder, P., Zanetta, A., Frey, D., Fließbach, A., 2018. A Gardener's Influence on Urban Soil Quality. *Front. Environ. Sci.* 6, 25. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00025>.
- TVB, 2010. Trame verte et bleue. Proposition issue du Comité Opérationnel Trame verte et bleue en vue des Orientations nationales pour la préservation et la remise en bon état des continuités écologiques. [en ligne]. [http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references\\_bibliographiques/guide1\\_comoptvb\\_juillet2010.pdf](http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/guide1_comoptvb_juillet2010.pdf).
- Uchida, Y., Clough, T., Kelliher, F., Sherlock, R., 2008. Effects of aggregate size, soil compaction, and bovine urine on N<sub>2</sub>O emissions from a pasture soil. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 924–931. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.11.007>.
- Udovic, M., Lestan, D., 2009. Pb, Zn and Cd mobility, availability and fractionation in aged soil remediated by EDTA leaching. *Chemosphere* 74, 1367–1373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.013>.
- Ugolini, F.C., Minden, R., Dawson, H., Zachara, J., 1977. An example of soil processes in the *Abies amabilis* zone of central Cascades, Washington. *Soil Sci.* 124, 291–302.
- Ugolini, F.C., Dahlgren, R., Shoji, S., Ito, T., 1988. An example of andosolization and podzolization as revealed by soil solution studies, southern Hakkoda, northeastern Japan. *Soil Sci.* 145, 111–125.
- UNICEM, 2011. Gestion et aménagement écologiques des carrières de roches massives. Guide pratique à l'usage des exploitants de carrières. [en ligne]. <https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/gestion-et-amenagement-ecologiques-des-carrieres.pdf>.
- Veldkamp, A., Lambin, E.F., 2001. Predicting land-use change. *Agric. Ecosyst. Environ.* 85, 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00199-2).
- Véquaud, P., Derenne, S., Anquetil, C., Collin, S., Poulénard, J., Sabatier, P., Huguet, A., 2021. Influence of environmental parameters on the distribution of bacterial lipids in soils from the French Alps: Implications for paleo-reconstructions. *Organic Geochemistry* 153, 104194. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2021.104194>.
- Verburg, P.H., Schot, P.P., Dijst, M.J., Veldkamp, A., 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61, 309–324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>.
- Vidosavljević, D., Puntarić, D., Gvozdić, V., Jergović, M., Miškulin, M., Puntarić, I., Puntarić, E., Šijanović, S., 2013. Soil contamination as a possible long term consequence of war in Croatia. *Acta Agric Scand-Soil Plant Sci.* 63:322–329.

- Vincey, P., 1897. Carte agronomique des environs de Paris. France. Ministère de l'Agriculture. [en ligne]. [https://archive.org/details/dr\\_carte-agronomique-des-environs-de-paris-departement-de-la-seine-dresse-p-13087007](https://archive.org/details/dr_carte-agronomique-des-environs-de-paris-departement-de-la-seine-dresse-p-13087007).
- Violante, A., Huang, P. M., Gadd, G. M., 2007. Biophysico-Chemical Processes of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments, John Wiley & Sons, INC. DOI:10.1002/9780470175484.
- Wagner, S., Cattle, S.R., Scholten, T., 2007. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 170, 173–180. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521732>.
- Walker, D.J., Clemente, R., Roig, A., Bernal, M.P., 2003. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils. *Environmental Pollution* 122, 303–312. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00287-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00287-7).
- Walter, C., Bispo, A., Chenu, C., Langlais-Hesse, A., Schwartz, C., 2014. Les services écosystémiques des sols : du concept à sa valorisation. *Cahier Demeter*. p.51-68.
- Wei, Z., Wu, S., Zhou, S., Lin, C., 2013. Installation of impervious surface in urban areas affects microbial biomass, activity (potential C mineralisation), and functional diversity of the fine earth. *Soil Res.* 51, 59. <https://doi.org/10.1071/SR12089>.
- White, J.C., Quiñones-Rivera, A., Alexander, M., 1998. Effect of wetting and drying on the bioavailability of organic compounds sequestered in soil. *Environ Toxicol Chem* 17, 2378–2382. <https://doi.org/10.1002/etc.5620171203>.
- Wikimedia common., n.d. Chronologic old maps of Paris. [en ligne]. [https://commons.wikimedia.org/wiki/Chronologic\\_old\\_maps\\_of\\_Paris?uselang=fr](https://commons.wikimedia.org/wiki/Chronologic_old_maps_of_Paris?uselang=fr).
- Wong, C.S.C., Li, X.D., 2004. Pb contamination and isotopic composition of urban soils in Hong Kong. *Sci Total Environ.* 319, 185–195. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00403-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00403-0).
- Wright, J.R., Schnitzer, M., 1963. Metallo-Organic Interactions Associated with Podzolization. *Soil Science Society of America Journal* 27, 171–176. <https://doi.org/10.2136/sssaj1963.03615995002700020025x>.
- Xu, Z., Xu, X., Tsang, D.C.W., Cao, X., 2018. Contrasting impacts of pre- and post-application aging of biochar on the immobilization of Cd in contaminated soils. *Environmental Pollution* 242, 1362–1370. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.012>.
- Yang, J.-L., Zhang, G.-L., 2015. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>.
- Yu, X., Zou, Y., Jiang, M., Lu, X., Wang, G., 2011. Response of soil constituents to freeze–thaw cycles in wetland soil solution. *Soil Biology and Biochemistry* 43, 1308–1320. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.002>.
- Yun, S., Qingrong, H., Huadong, G., Yuan, L., Qing, D., Chunming, H., 2003. Effect of dielectric properties of moist salinized soils on backscattering coefficients extracted from RADARSAT image. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41 (8), 1879–1888.
- Zanetti, T., 2018. La pollution des sols dans les territoires (post)industriels : la résilience entre norme institutionnelle et cadre de lutte socio-environnementale. *geocarrefour* 92. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.11744>.

- Zevenbergen, C., J.P. Bradley, L.P. Van Reeuwijk, A.K. Shyam, O. Hjelmar, et R.N.J. Comans. 1999. « Clay formation and metal fixation during weathering of coal fly ash ». *Environmental Science and Technology* 33 (19): 3405-3409.
- Zhang, X., Song, W., Lang, Y., Feng, X., Yuan, Q., Wang, J., 2020. Land use changes in the coastal zone of China's Hebei Province and the corresponding impacts on habitat quality. *Land Use Policy* 99, 104957. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104957>.
- Zhao, Q., Li, Peijun, Stagnitti, F., Ye, J., Dong, D., Zhang, Y., Li, Peng, 2009. Effects of aging and freeze-thawing on extractability of pyrene in soil. *Chemosphere* 76, 447–452. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.03.068>.
- Zirkle, G., Augustin, B., Lal, R., 2011. Modeling carbon sequestration in home lawns modeling carbon sequestration in home lawns. *J Environ Qual* 46:808–814. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.808>.

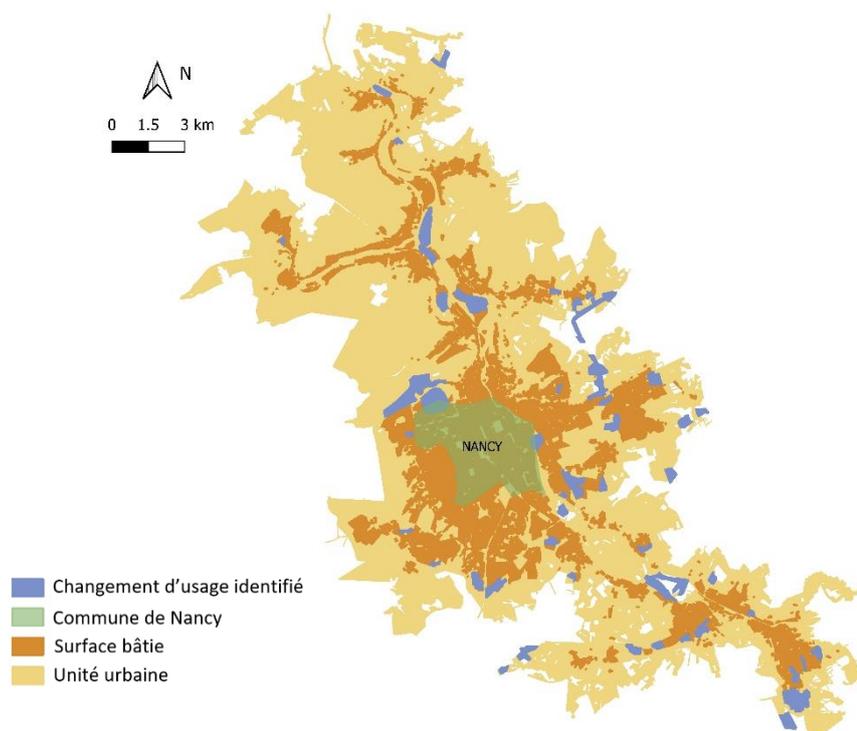
## Annexes

### Annexe 1 : Traduction de la nomenclature MOS de 81 postes en 30 postes

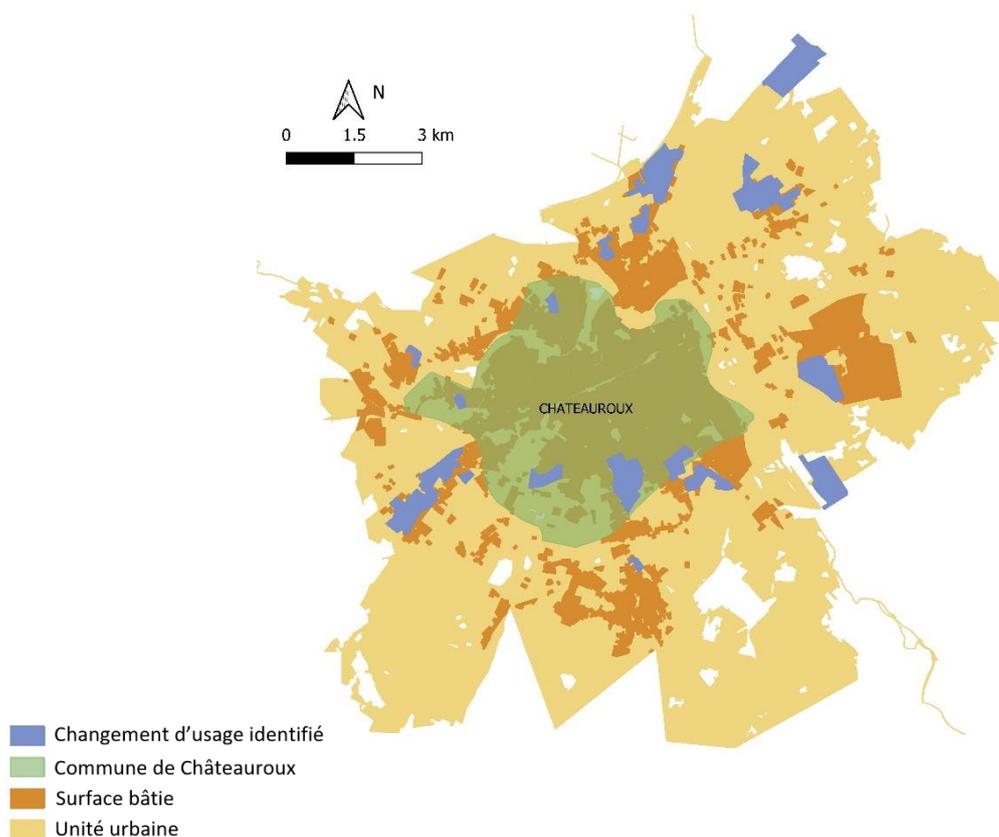
Nomenclature 81 postes	Libellés	Nomenclature 30 postes	Libellés
1	Bois ou forêts	1	Bois ou forêts
2	Coupes ou clairières en forêts	2	Coupes ou clairières en forêts
3	Peupleraies	3	Peupleraies
4	Espaces ouverts à végétation arbustive ou herbacée	4	Milieux semi-naturels
5	Berges		
6	Terres labourées	5	Grandes cultures
7	Prairies		
8	Vergers, pépinières	6	Vergers, pépinières
9	Maraîchage, horticulture	7	Maraîchage, horticulture
10	Cultures intensives sous serres	8	Cultures intensives sous serres
11	Eau fermée (étangs, lacs...)	9	Eau fermée (étangs, lacs...)
12	Cours d'eau	10	Cours d'eau
13	Parcs ou jardins	11	Espaces verts urbains
14	Jardins familiaux		
15	Jardins de l'habitat individuel		
16	Jardins de l'habitat rural		
17	Jardins de l'habitat continu bas		
18	Terrains de sport en plein air	12	Terrains de sport en plein air
19	Tennis découverts		
20	Baignades		
21	Parcs d'évolution d'équipements sportifs	13	Parcs d'évolution d'équipements sportifs
22	Golfs	14	Golfs
23	Hippodromes	15	Hippodromes
24	Camping, caravaning	16	Espaces ouverts à vocation de tourisme et loisirs
25	Parcs liés aux activités de loisirs sauf parcs de châteaux		
26	Cimetières	17	Cimetières
27	Surfaces engazonnées avec ou sans arbustes	18	Autres espaces ouverts
28	Terrains vacants		
29	Habitat individuel	19	Habitat individuel
30	Ensembles d'habitat individuel identique		
31	Habitat rural	20	Habitat rural
32	Habitat continu bas	21	Habitat collectif
33	Habitat collectif continu haut		
34	Habitat collectif discontinu		
35	Prisons	22	Habitat autre
36	Habitat autre		
37	Production d'eau	23	Activités

<b>38</b>	Assainissement		
<b>39</b>	Electricité		
<b>40</b>	Gaz		
<b>41</b>	Pétrole		
<b>42</b>	Infrastructures autres		
<b>43</b>	Activités en tissu urbain mixte		
<b>44</b>	Grandes emprises industrielles		
<b>45</b>	Zones d'activités économiques		
<b>46</b>	Entreposage à l'air libre		
<b>47</b>	Entrepôts logistiques		
<b>48</b>	Grandes surfaces commerciales		
<b>49</b>	Autres commerces		
<b>50</b>	Grands magasins		
<b>51</b>	Stations-service		
<b>52</b>	Bureaux		
<b>53</b>	Installations sportives couvertes		
<b>54</b>	Centres équestres		
<b>55</b>	Piscines couvertes		
<b>56</b>	Piscines en plein air		
<b>57</b>	Autodromes		
<b>58</b>	Enseignement de premier degré		
<b>59</b>	Enseignement secondaire		
<b>60</b>	Enseignement supérieur		
<b>61</b>	Enseignement autre		
<b>62</b>	Hôpitaux, cliniques		
<b>63</b>	Autres équipements de santé	<b>24</b>	Equipements
<b>64</b>	Grands centres de congrès et d'exposition		
<b>65</b>	Equipements culturels et de loisirs		
<b>66</b>	Sièges d'administrations territoriales		
<b>67</b>	Equipements de missions de sécurité civile		
<b>68</b>	Equipements d'accès au public limité		
<b>69</b>	Mairies		
<b>70</b>	Marchés permanents		
<b>71</b>	Lieux de culte		
<b>72</b>	Autres équipements de proximité		
<b>73</b>	Emprises de transport ferré	<b>25</b>	Emprises de transport ferré
<b>74</b>	Voies de plus de 25 m d'emprise	<b>26</b>	Emprises routières
<b>75</b>	Parkings de surface		
<b>76</b>	Parkings en étages	<b>27</b>	Parcs de stationnement
<b>77</b>	Gares routières, dépôts de bus	<b>28</b>	Gares routières, dépôts
<b>78</b>	Installations aéroportuaires	<b>29</b>	Installations aéroportuaires
<b>79</b>	Extraction de matériaux		
<b>80</b>	Décharges	<b>30</b>	Carrières, décharges et chantiers
<b>81</b>	Chantiers		

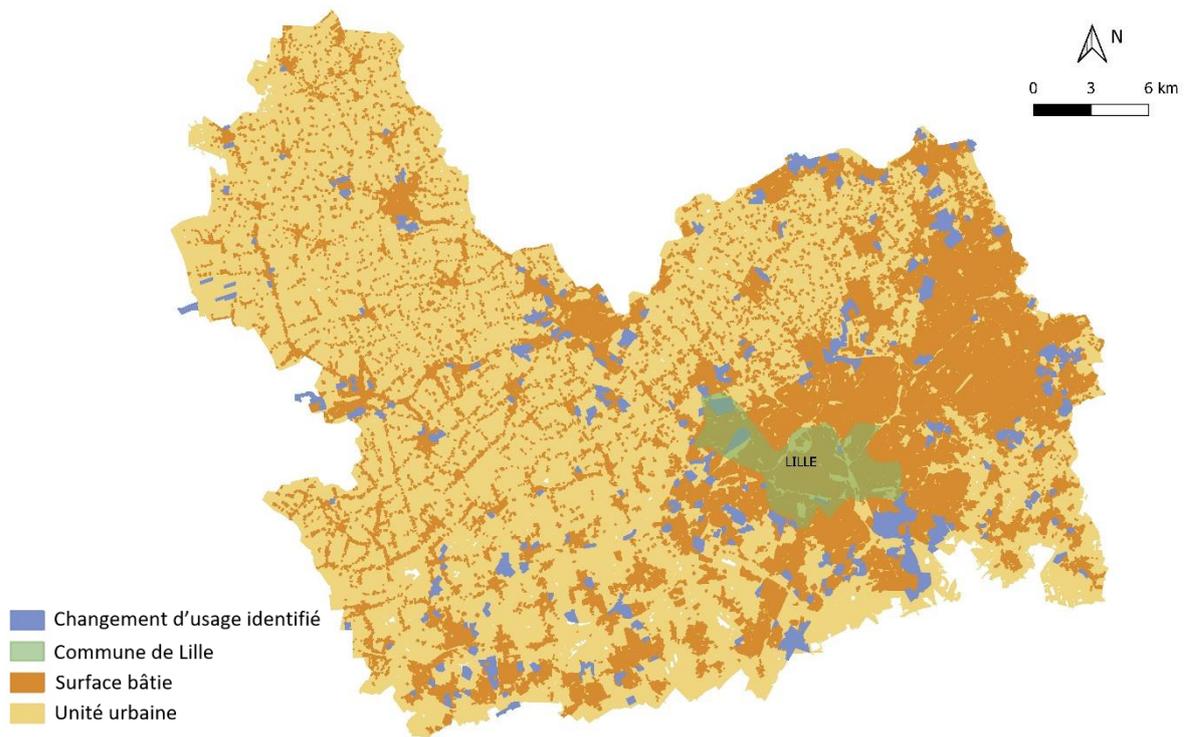
**Annexe 2 : Cartographies des unités urbaines et de leur changements d'usages identifiés grâce aux CLC sur les 30 dernières années**



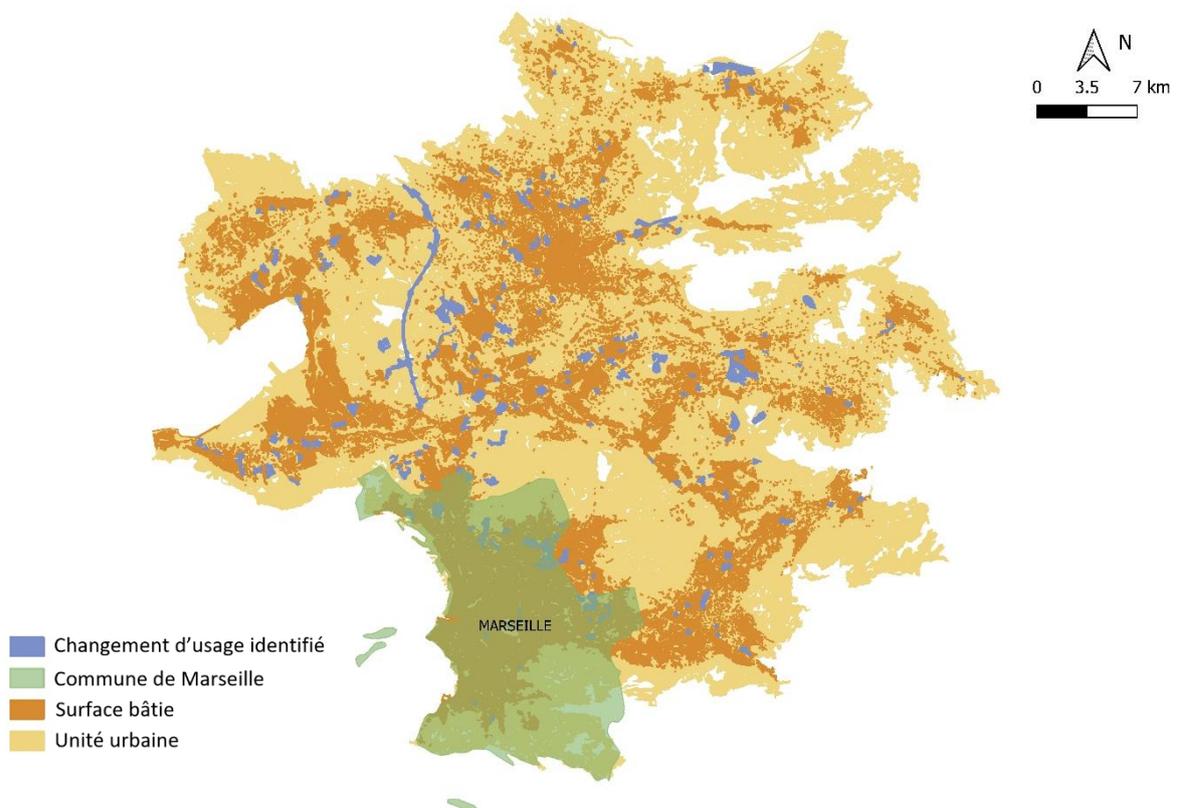
**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Nancy**



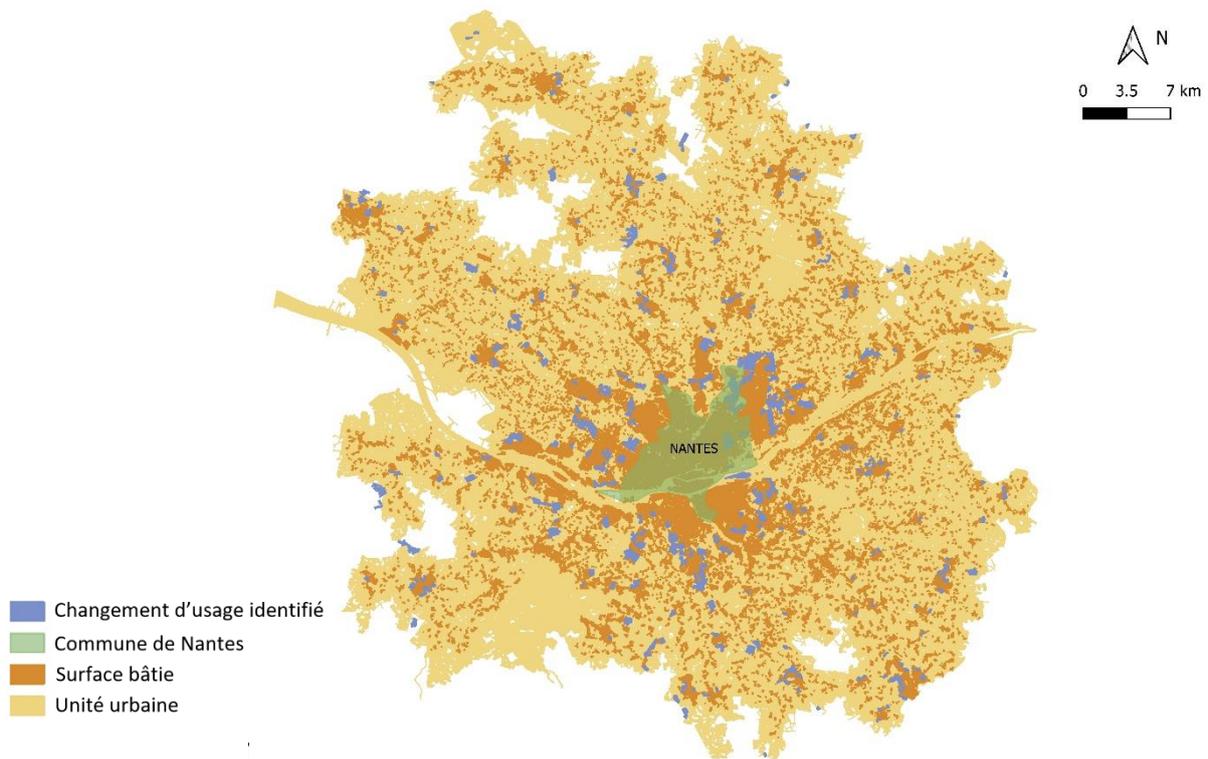
**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Châteauroux**



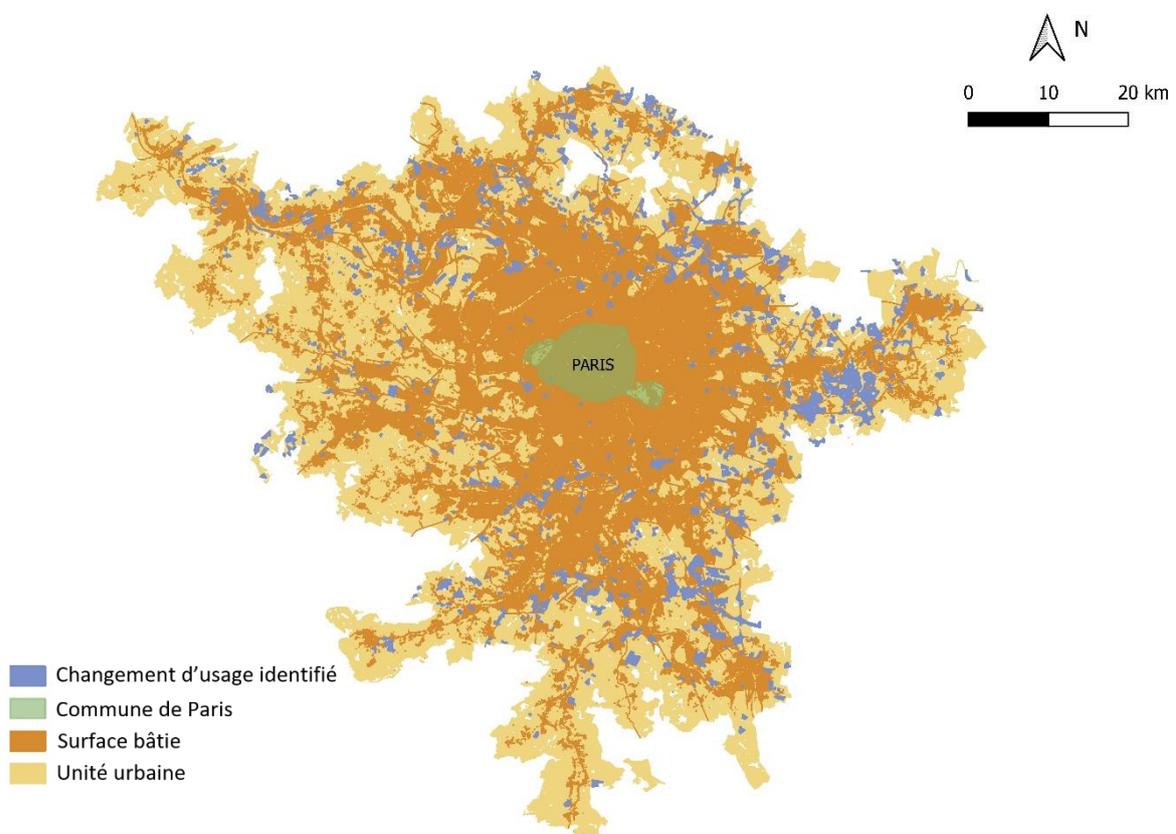
**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Lille**



**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Marseille**

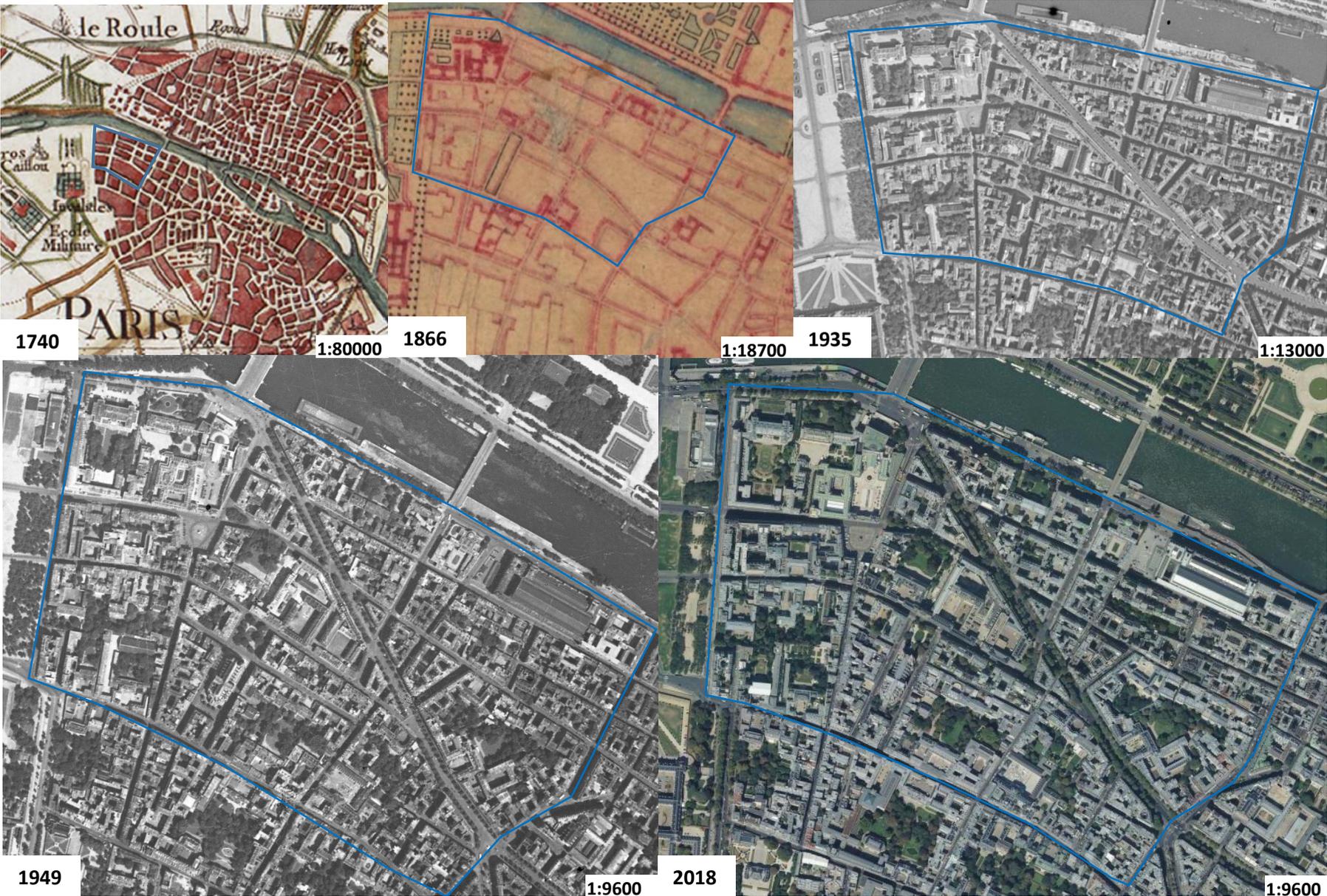


**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Nantes**

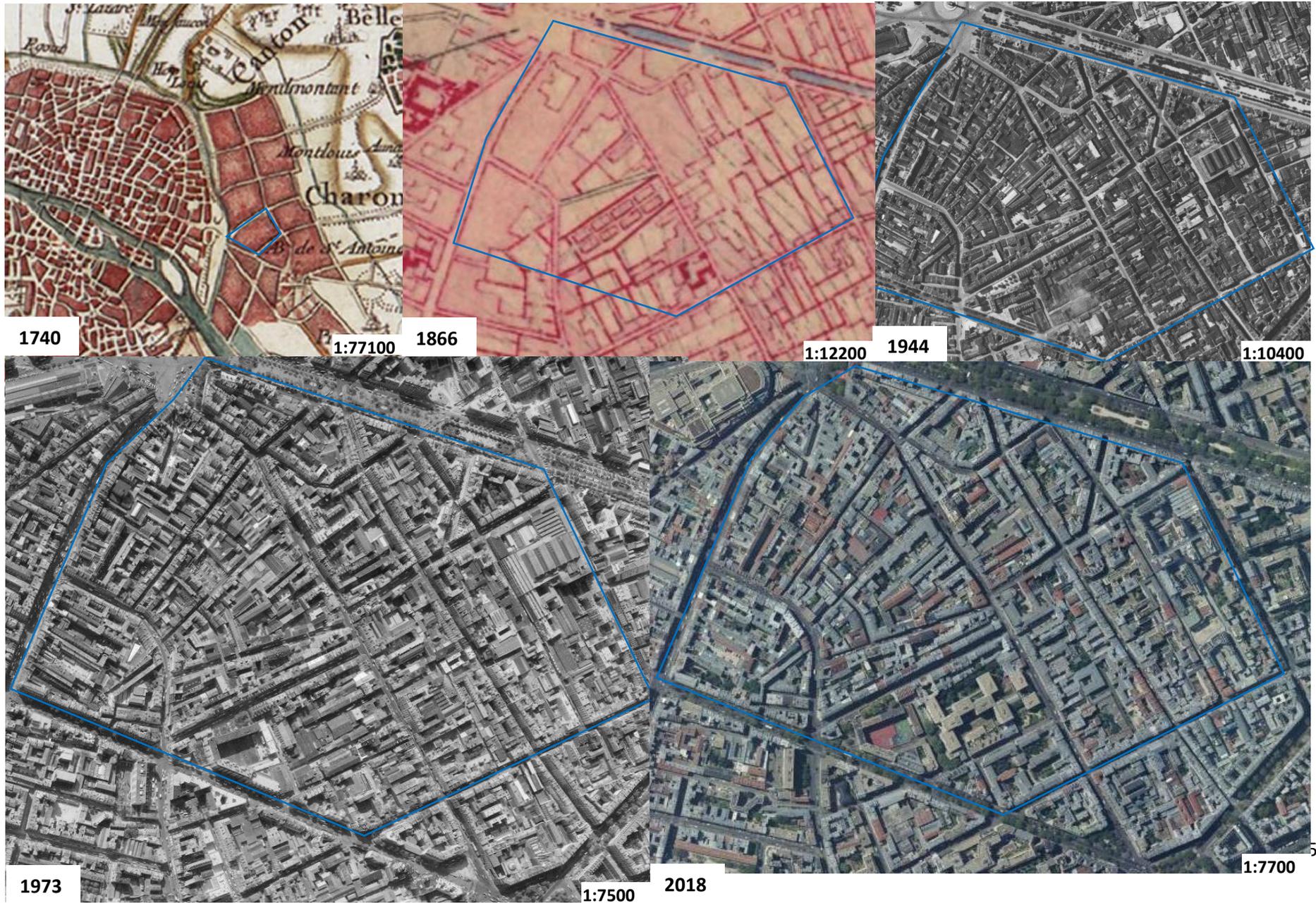


**Localisation des changements d'usage de l'unité urbaine de Paris**

**Annexe 3 : Évolution historique des sites urbains étudiés par photographies aériennes et cartes historiques**



Évolution historique du site urbain situé dans le VIIème arrondissement de Paris de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)



Évolution historique du site urbain situé dans le XI<sup>ème</sup> arrondissement de Paris de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)

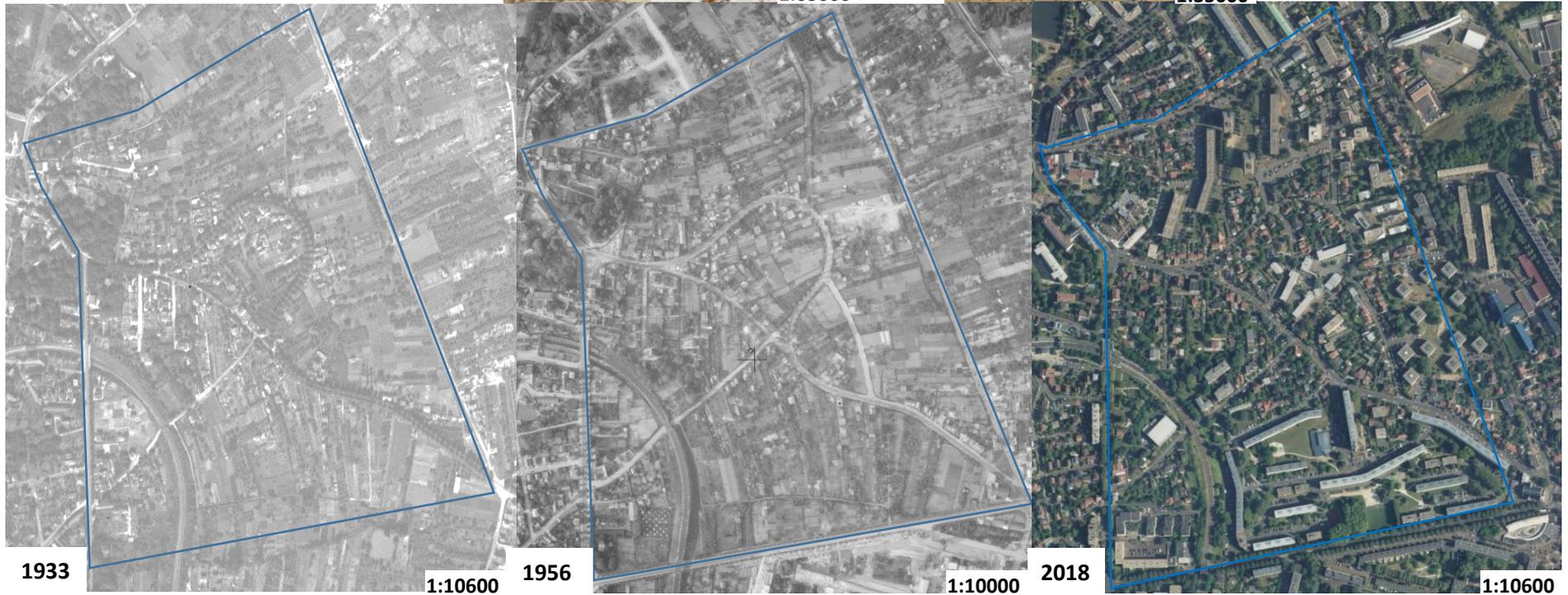


1740

1:63600

1866

1:35000



1933

1:10600

1956

1:10000

2018

1:10600

Évolution historique du site urbain de Fontenay-aux-Roses de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)



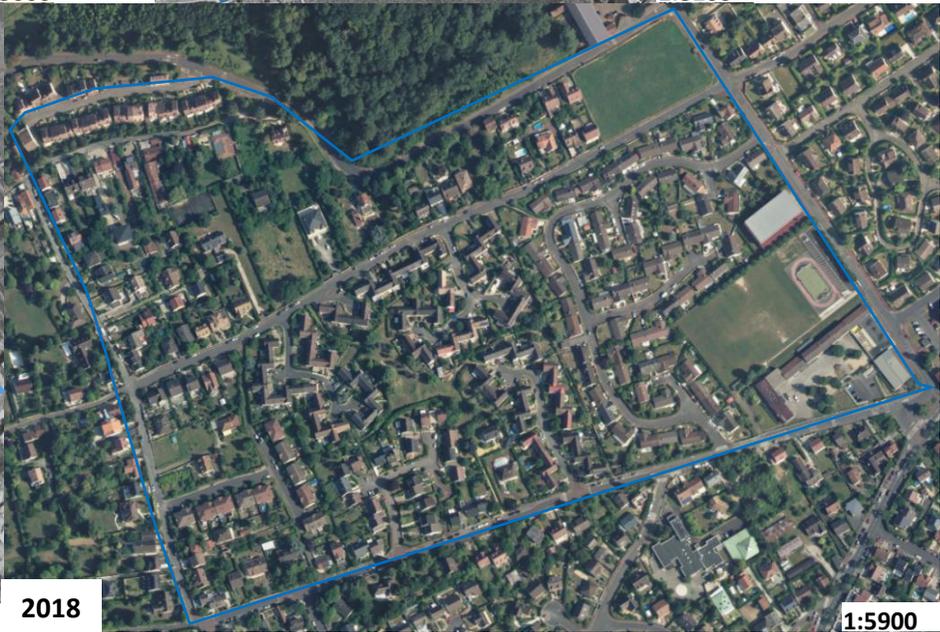
1866



1949



1968



2018

1:23000

1:8100

1:6100

1:5900

Évolution historique du site urbain de Noiseau de 1866 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)



1740



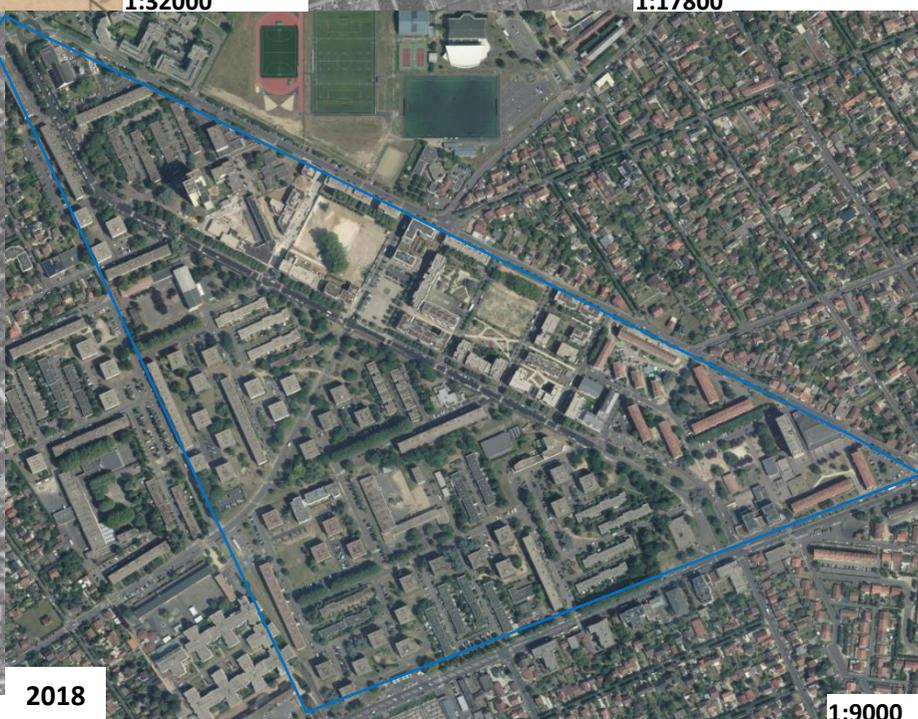
1866



1933



1965



2018

1:50000

1:32000

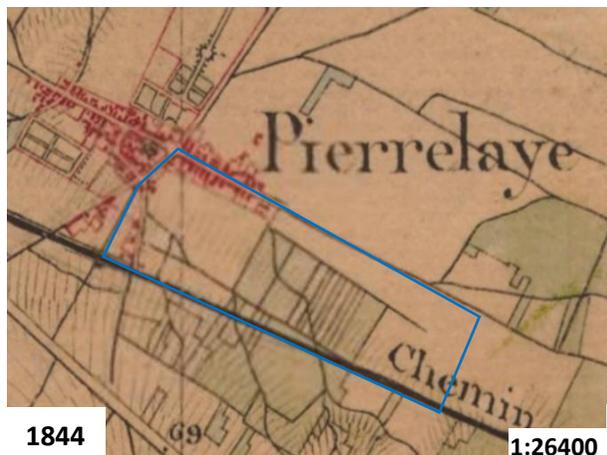
1:17800

1:9700

1:9000

278

Évolution historique du site urbain de Vigneux-sur-Seine de 1740 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)



1844

1:26400



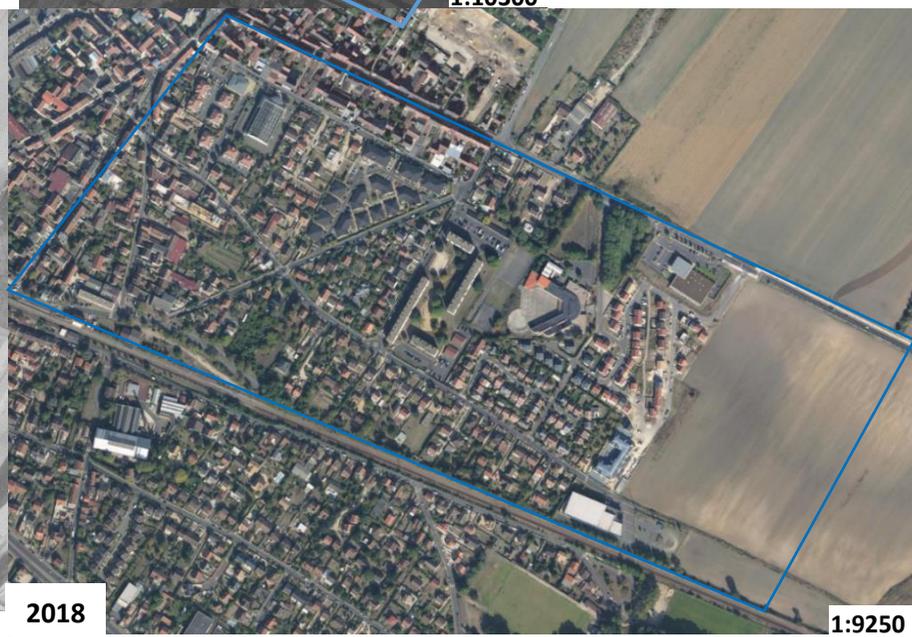
1931

1:10300



1972

1:9500



2018

1:9250

Évolution historique du site urbain de Pierrelaye de 1844 à nos jours (IGN ; <https://remonterletemps.ign.fr/>)

**Annexe 4** : Liste des paramètres physico-chimiques analysés associés aux normes utilisées

Code Arras	Description	Norme
SOL-0101	Prise en charge de l'échantillon / préparation des sols	NF ISO 11464
SOL-0102	Broyage échantillon (diamètre < 250µm)	NF ISO 11464
SOL-0201	Teneur en eau résiduelle à 105°C - g/kg	NF ISO 11465
SOL-0304	Granulométrie 5 fractions après décarbonatation - g/kg	NF X 31-107
SOL-0405	Calcaire total, Carbone organique et azote total par combustion sèche - g/kg	NF ISO 10693 / NF ISO 10694 / NF ISO 13878
SOL-0501	pH Eau	NF ISO 10390
SOL-0508	pH CaCl2 à 0,01 mol/l	NF ISO 10390
SOL-0604	Phosphore méthode de Olsen - g/kg	NF ISO 11263
SOL-0701	Capacité d'échange cationique (CEC), méthode de Metson - cmol+/kg	NF X 31-130
SOL- 0709	Extraction au chlorure de cobaltihexammine	NF ISO 23470
SOL-0710	Capacité d'échange cationique (CEC) cobaltihexammine - cmol+/kg	NF X 31-130
SOL-0719	Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al échangeables à la cobaltihexammine (ICP-AES-EAF) - cmol+/kg	NF ISO 23470
SOL-1001	Mise en solution totale par les acides fluorhydrique et perchlorique (HF - HClO4 )	NF X 31-147
SOL-1029	ICP1-éléments traces totaux HF : Co, Cr, Cu, Ni, Zn (ICP-AES) - mg/kg	NF X 31-147
SOL-1030	ICP2-éléments traces totaux HF : Pb, Cd, Tl, Mo (ICP-MS) - mg/kg	NF X 31-147
SOL-1031	ICP3-éléments totaux HF : Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na (ICP-AES) (g/100g) sauf Mn (mg/kg)	NF X 31-147 / NF ISO 220 36
SOL-1107	Arsenic (As) total	méthode INRAE
SOL-1106	Mercure (Hg) total combustion sèche	méthode INRAE
SOL-1502	Extraction à l'eau 1/5	méthode INRAE
SOL-1505	Conductivité totale sur extrait 1/5 (m/v) A 25°C - mS/cm	méthode INRAE

**Annexe 5** : Résultats complémentaires issus de la phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés des terres industrielles de la station expérimentale de Brabois

**Présentation complémentaire des données agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons 2 et 3 correspondent respectivement aux horizons intermédiaires et profonds cités précédemment (cf. 4.1.2.1))**

Profils	Horizons	Propriétés agronomiques					Cations échangeables				
		C <sub>tot</sub>	C/N	MO	CaCO <sub>3 tot</sub>	σ	Ca	Fe	K	Mg	Na
		g.kg <sup>-1</sup>	-	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	mS/cm	cmol+.kg <sup>-1</sup>				
<b>H1</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	262,5	62,0	433,0	103,0	1,2E-01	12,8	8,4E-03	0,16	0,4	3,E-02
	<b>3 (8-30cm)</b>	279,1	73,6	461,0	106,0	1,1E-01	9,8	1,3E-02	0,11	0,2	3,E-02
<b>H2</b>	<b>2 (2-8cm)</b>	303,4	57,6	503,0	105,0	1,3E-01	12,1	1,2E-02	0,13	0,3	4,E-02
	<b>3 (8-30cm)</b>	306,5	70,3	508,0	105,0	1,1E-01	9,4	1,3E-02	0,07	0,2	4,E-02
<b>H3</b>	<b>2 (2-12cm)</b>	301,0	57,7	500,0	100,0	9,8E-02	13,4	1,5E-02	0,09	0,3	3,E-02
	<b>3 (12-30cm)</b>	268,5	71,7	442,0	109,0	1,1E-01	9,9	1,2E-02	0,08	0,2	3,E-02
<b>T1</b>	<b>2 (4-18cm)</b>	71,1	39,5	111,0	58,0	1,2E-01	18,0	9,3E-03	0,12	0,6	6,E-02
	<b>3 (18-30cm)</b>	75,3	26,1	121,0	47,0	1,3E-01	21,8	1,1E-02	0,25	1,1	6,E-02
<b>T2</b>	<b>2 (2-20cm)</b>	59,0	31,9	90,2	57,0	1,2E-01	17,2	8,8E-03	0,38	0,7	4,E-02
	<b>3 (20-30cm)</b>	68,8	38,7	106,0	61,0	1,1E-01	17,0	1,8E-02	0,17	0,6	5,E-02
<b>T3</b>	<b>2 (4-17cm)</b>	72,5	29,7	115,0	49,0	1,3E-01	19,9	<0,005	0,51	0,9	5,E-02
	<b>3 (17-30cm)</b>	65,3	38,0	99,9	63,0	1,1E-01	17,4	1,3E-02	0,22	0,7	6,E-02
<b>U1</b>	<b>2 (3-15cm)</b>	84,3	37,2	95,7	241,0	1,3E-01	13,5	1,3E-02	0,19	0,3	2,E-02
	<b>3 (15-30cm)</b>	78,6	41,9	82,9	256,0	1,3E-01	12,2	9,0E-03	0,11	0,3	4,E-02
<b>U2</b>	<b>2 (4-16cm)</b>	73,1	35,5	80,8	220,0	1,4E-01	13,5	1,2E-02	0,11	0,5	2,E-02
	<b>3 (16-30cm)</b>	75,6	43,3	85,8	217,0	1,2E-01	13,3	9,6E-03	0,11	0,3	3,E-02
<b>U3</b>	<b>2 (4-23cm)</b>	70,6	36,8	76,5	220,0	1,3E-01	13,6	1,2E-02	0,12	0,4	3,E-02
	<b>3 (23-30cm)</b>	74,8	42,2	81,0	233,0	1,3E-01	12,8	1,4E-02	0,09	0,3	3,E-02

Présentation complémentaire des données de concentrations en élément majeurs, en éléments traces métalliques et de masse volumique apparente des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons 2 et 3 correspondent respectivement aux horizons intermédiaire et profonds cités précédemment (cf. 4.1.2.1))

Profils	Horizons	Éléments majeurs			Éléments traces métalliques				MVA
		Mg	Mn	Na	Co	Cr	Mo	Tl	
		g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>
<b>H1</b>	2 (2-8cm)	0,8	2532,7	0,1	14,9	78,3	2,6	0,4	1.2
	3 (8-30cm)	0,8	2424,9	0,1	13,7	76,3	2,7	0,4	1.3
<b>H2</b>	2 (2-8cm)	0,6	2175,3	0,1	16,8	84,8	2,6	0,4	1.2
	3 (8-30cm)	0,7	2120,9	0,1	16,1	87,9	2,7	0,4	1.2
<b>H3</b>	2 (2-12cm)	0,8	2255,5	0,1	15,9	83,7	2,8	0,4	1.3
	3 (12-30cm)	0,8	2409,1	0,1	14,8	80,7	2,6	0,4	1.0
<b>T1</b>	2 (4-18cm)	0,7	2460,5	0,3	19,3	94,5	3,7	1,7	1.2
	3 (18-30cm)	0,7	2214,4	0,3	18,5	92,6	3,7	1,7	1.2
<b>T2</b>	2 (2-20cm)	0,7	2404,8	0,3	19,1	93,6	3,9	1,9	1.0
	3 (20-30cm)	0,7	2355,0	0,3	18,9	93,5	3,5	1,7	1.1
<b>T3</b>	2 (4-17cm)	0,7	2275,6	0,3	19,4	92,4	4,8	1,8	1.1
	3 (17-30cm)	0,7	2297,6	0,3	18,9	91,2	3,8	1,7	1.1
<b>U1</b>	2 (3-15cm)	0,3	330,3	0,2	4,0	24,1	1,2	1,1	1.3
	3 (15-30cm)	0,3	342,4	0,2	7,0	37,5	1,3	1,1	1.3
<b>U2</b>	2 (4-16cm)	0,3	296,6	0,2	6,0	34,2	1,1	1,0	1.3
	3 (16-30cm)	0,3	313,4	0,2	6,3	34,8	1,3	1,0	1.2
<b>U3</b>	2 (4-23cm)	0,3	309,1	0,2	6,3	34,4	1,2	1,0	1.2
	3 (23-30cm)	0,3	316,0	0,2	6,7	37,6	1,5	1,1	1.3

**Annexe 6** : Résultats complémentaires issus de la phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés du sol du Potager du Roi de Versailles

**Présentation complémentaire des données agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Profils	Horizons	Propriétés agronomiques				Cations échangeables				
		C/N	MO	CaCO <sub>3</sub> tot	σ	Ca	Fe	K	Mg	Na
		-	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	mS/cm	cmol+.kg <sup>-1</sup>				
<b>Profil A</b>	1 (0-13cm)	20,0	53,9	18,0	1,9E-01	10,7	<0,005	6,2E-01	4,5E-01	3,5E-02
	2 (13-26cm)	14,0	11,2	36,0	1,0E-01	7,9	8,7E-03	2,7E-01	2,6E-01	2,2E-02
	3 (26-35cm)	10,6	6,8	32,0	1,0E-01	8,1	6,4E-03	2,6E-01	3,0E-01	2,5E-02
	4 (35-63cm)	13,1	10,2	184,0	9,4E-01	15,2	6,6E-03	2,2E-01	1,9E-01	2,8E-02
	5 (63-100cm)	9,1	3,0	8,0	1,2E-01	7,9	6,8E-03	1,6E-01	1,3E-01	1,8E-02
<b>Profil P</b>	1 (0-40cm)	12,3	55,5	18,0	1,4E-01	17,3	6,2E-03	7,4E-01	1,3E+00	3,6E-02
	2 (40-75cm)	9,6	22,6	19,0	9,4E-02	14,9	1,5E-02	4,4E-01	1,2E+00	8,5E-02
<b>Profil P/V</b>	1 (0-15cm)	13,8	66,8	2,0	1,7E-01	16,7	5,6E-03	6,1E-01	7,1E-01	2,4E-02
	2 (15-100cm)	16,6	35,6	9,0	8,3E-02	13,1	<0,005	6,2E-01	5,8E-01	2,1E-02
<b>Profil V</b>	1 (0-17cm)	15,6	36,5	5,0	1,1E-01	11,4	1,2E-02	6,4E-01	4,8E-01	1,6E-02
	2 (17-72cm)	15,0	28,5	10,0	8,5E-02	11,4	1,4E-02	5,3E-01	5,8E-01	2,0E-02
	3 (72-90cm)	10,0	11,2	3,0	6,8E-02	8,8	5,8E-03	5,2E-01	5,2E-01	1,5E-02

Présentation complémentaire des données de concentrations en élément majeurs, en éléments traces métalliques et de masse volumique apparente des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)

Profils	Horizons	Éléments majeurs			Éléments traces métalliques				MVA
		Mg	Mn	Na	Co	Cr	Mo	Tl	
		g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>
<b>Profil A</b>	1 (0-13cm)	1,5E-01	277,0	3,3E-01	5,0	25,3	7,7E-01	2,6E-01	1,4
	2 (13-26cm)	1,6E-01	177,0	2,0E-01	3,0	29,2	6,2E-01	2,6E-01	1,6
	3 (26-35cm)	1,7E-01	143,0	2,0E-01	3,2	35,9	7,3E-01	3,0E-01	1,6
	4 (35-63cm)	2,0E-01	159,0	1,5E-01	2,8	27,5	8,5E-01	2,6E-01	-
	5 (63-100cm)	1,2E-01	71,2	1,6E-01	2,5	24,3	5,8E-01	2,7E-01	1,5
<b>Profil P</b>	1 (0-40cm)	2,4E-01	466,0	3,6E-01	5,7	37,2	7,0E-01	3,5E-01	1,3
	2 (40-75cm)	3,3E-01	516,0	4,6E-01	7,0	53,8	7,1E-01	4,0E-01	1,4
<b>Profil P/V</b>	1 (0-15cm)	2,0E-01	493,0	3,9E-01	7,0	39,1	6,9E-01	3,4E-01	1,3
	2 (15-100cm)	2,4E-01	488,0	4,1E-01	7,4	42,8	7,6E-01	3,5E-01	1,4
<b>Profil V</b>	1 (0-17cm)	2,0E-01	370,0	3,7E-01	6,0	36,7	6,0E-01	3,2E-01	1,6
	2 (17-72cm)	2,2E-01	357,0	3,8E-01	6,2	40,4	6,7E-01	3,3E-01	1,4
	3 (72-90cm)	2,1E-01	318,0	3,8E-01	5,0	38,7	6,2E-01	3,4E-01	1,4

**Annexe 7** : Résultats complémentaires issus de la phase d'échantillonnage et de caractérisation des propriétés du sol du quartier de Bel Air à Montreuil

**Présentation complémentaire des données agronomiques des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)**

Horizons	Propriétés agronomiques				Cations échangeables				
	C/N	MO	CaCO <sub>3 tot</sub>	σ	Ca	Fe	K	Mg	Na
	-	g.kg <sup>-1</sup>	g.kg <sup>-1</sup>	mS/cm	cmol+.kg <sup>-1</sup>				
<b>1 (0-5cm)</b>	13.2	60.3	171.0	1.9E-01	19.1	<0.005	0.7	1.7	7.0E-02
<b>2 (5-15cm)</b>	13.3	31.7	207.0	1.3E-01	16.1	<0.005	0.3	1.0	4.7E-02
<b>3 (15-45cm)</b>	23.7	44.0	175.0	1.4E-01	16.0	<0.005	0.3	0.6	3.9E-02
<b>4 (45-70cm)</b>	27.3	66.0	25.0	8.4E-02	16.2	5.3E-03	0.2	0.6	3.2E-02
<b>5 (70-85cm)</b>	17.9	17.9	15.0	6.9E-02	12.8	5.2E-03	0.2	0.4	2.7E-02

Présentation complémentaire des données de concentrations en élément majeurs, en éléments traces métalliques et de masse volumique apparente des différents horizons obtenues suite à la phase d'échantillonnage sur site. (Les horizons sont classés par ordre de profondeur croissant. L'horizon 1 représente l'horizon de surface du profil considéré)

Horizons	Éléments majeurs			Éléments traces métalliques				MVA
	Mg	Mn	Na	Co	Cr	Mo	Tl	
	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.100g <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	mg.kg <sup>-1</sup>	g.cm <sup>-3</sup>
1 (0-5cm)	0.7	397.0	2.5E-01	35.8	5.8	0.8	0.4	1.3
2 (5-15cm)	0.6	446.0	2.4E-01	34.4	6.3	0.7	0.5	1.6
3 (15-45cm)	0.4	519.9	1.6E-01	32.8	8.4	0.8	0.4	1.4
4 (45-70cm)	0.3	547.6	1.9E-01	44.9	11.9	1.2	0.5	1.4
5 (70-85cm)	0.2	444.5	1.8E-01	30.9	6.4	0.6	0.4	1.7

## Annexe 8 : Fiche descriptive de l'Unité Cartographique de Sol n°102



### Description de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) numéro 102

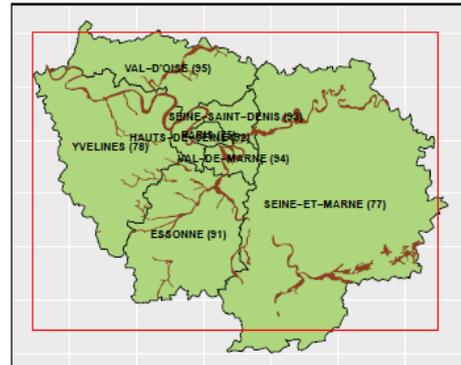
#### Référentiel Régional Pédologique de l'Île-de-France

Numéro d'UCS : 102

Nom d'UCS : Alluvions très humides de cultures de peupleraies et de prairies permanentes, de limons : Fluvisols (24,2%), de limons sur tourbe : Fluvisols (19,4%), d'argile : Fluvisols (56,4%)

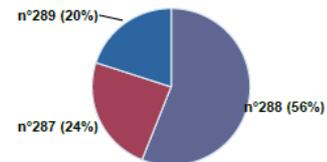
Composition : cette UCS est composée de 3 Unité(s) Typologique(s) de Sol (UTS)

Surface : 49784 ha



#### Informations relatives aux Unités Typologiques de Sols (UTS)

- UTS n° 288 : ALLUVION ARGILEUSE HYDROMORPHE, CALCAIRE  
- Type de sol : FLUVIOSOL ARGILEUX REDOXIQUE CALCAIRE  
- Matériau parental : ARGILE CALCAIRE
- UTS n° 287 : ALLUVION LIMONO-ARGILO-SABLEUSE, HYDROMORPHE ET CALCAIRE  
- Type de sol : FLUVIOSOL LIMONEUX REDOXIQUE CALCAIRE  
- Matériau parental : LIMON
- UTS n° 289 : ALLUVION LIMONO-ARGILEUSE CALCIQUE  
- Type de sol : FLUVIOSOL LIMONEUX REDOXIQUE CALCIQUE  
- Matériau parental : LIMON CALCIQUE



Pourcentages de surface des UTS dans l'UCS

#### Informations sur l'étude

Numéro de l'étude : 10100

Titre de l'étude : REFERENTIEL PEDOLOGIQUE DE L'ILE-DE-FRANCE

Échelle de l'étude : 1/250 000

Auteur(s) de la base sémantique : Jacques ROQUE

Année de création : 2003

État : Finalisé et labellisé

#### Gestionnaire(s) de l'étude

Responsable technique de l'étude : Bertrand LAROCHE

Structure(s) propriétaire(s) : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), US 1106 Infosol, Orléans

Adresse(s) de la/des structure(s) : 2163 Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 ARDON, Orléans, 45075, France

Pour plus d'informations : Cliquez ici

Cliquez-ici pour accéder à la carte sur le Géoportail



## Annexe 9 : Fiche descriptive de l'Unité Cartographique de Sol n°10



### Description de l'Unité Cartographique de Sol (UCS) numéro 10

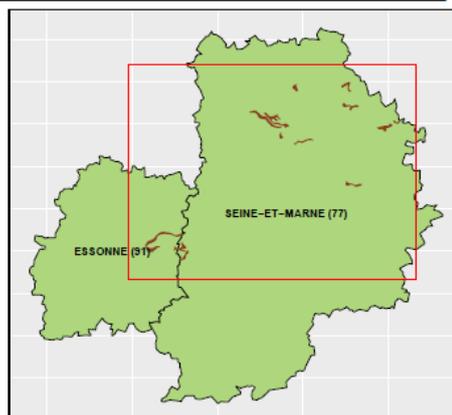
#### Référentiel Régional Pédologique de l'Île-de-France

Numéro d'UCS : 10

Nom d'UCS : Pentes faibles à cultures annuelles et à friches, de calcaires durs bartoniens (calcaire de Champigny, de Saint Ouen) : Calcosols argileux (71%), et de calcaire dur stampien (calcaire de Brie) : Calcosols et Rendosols (19%), Calcisols (10%)

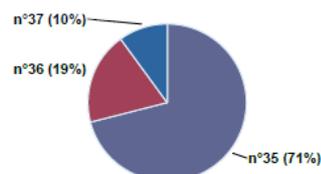
Composition : cette UCS est composée de 3 Unité(s) Typologique(s) de Sol (UTS)

Surface : 4494 ha



#### Informations relatives aux Unités Typologiques de Sols (UTS)

- UTS n° 35 : ARGILE CAILLOUTEUSE CALCAIRE DE PENTE .  
- Type de sol : CALCOSOL ARGILO-CAILLOUTEUX .  
- Matériau parental : ARGILE CALCAIRE DE CHAMPIGNY ET/OU DE ST-OUEN .
- UTS n° 36 : LIMON ARGILO-CAILLOUTEUX CALCAIRE DE PENTE .  
- Type de sol : CALCOSOL ET RENDOSOL CAILLOUTEUX .  
- Matériau parental : LIMON CALCAIRE
- UTS n° 37 : LIMON ARGILEUX CAILLOUTEUX CALCAIRE  
- Type de sol : CALCISOL LIMONEUX CAILLOUTEUX  
- Matériau parental : LIMON CALCAIRE DE BRIE



Pourcentages de surface des UTS dans l'UCS

#### Informations sur l'étude

Numéro de l'étude : 10100

Titre de l'étude : REFERENTIEL PEDOLOGIQUE DE L'ILE-DE-FRANCE

Échelle de l'étude : 1/250 000

Auteur(s) de la base sémantique : Jacques ROQUE

Année de création : 2003

État : Finalisé et labellisé

#### Gestionnaire(s) de l'étude

Responsable technique de l'étude : Bertrand LAROCHE

Structure(s) propriétaire(s) : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), US 1106 Infosol, Orléans

Adresse(s) de la/des structure(s) : 2163 Avenue de la Pomme de Pin - CS 40001 ARDON, Orléans, 45075, France

Pour plus d'informations : Cliquez ici

[Cliquez-ici pour accéder à la carte sur le Géoportail](#)



**Annexe 10** : Compositions chimiques des différents apports ayant pour objectifs de simuler le facteur anthropique

**Composition chimique du fumier utilisé pour les expériences de vieillissement en laboratoire**

Propriétés agronomiques								
pH	C <sub>org</sub>		N <sub>tot</sub>		C/N		P <sub>Olsen</sub>	
-	g/kg		g/kg		-		mg/kg	
8.8	245.1		17.7		13.8		166.8	
Éléments majeurs								
Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	g/kg	g/kg	g/kg
3.2	47.8	5.3	15.9	3.1	328.2	1.3	3.0	2.1
Éléments traces métalliques								
As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
4.9	0.4	46.8	29.9	20.5	23.0	99.1		

**Composition chimique du compost utilisé pour les expériences de vieillissement en laboratoire**

Propriétés agronomiques								
pH	C <sub>org</sub>		N <sub>tot</sub>		C/N		P <sub>Olsen</sub>	
-	g/kg		g/kg		-		mg/kg	
7.6	327.0		11.8		27.7		128.6	
Éléments majeurs								
Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
3.2	27.2	4.9	5.8	2.8	175.0	735.1	863.0	914.1
Éléments traces métalliques								
As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
2.2	0.2	25.5	18.9	10.4	10.0	50.7		

**Composition chimique de l'engrais utilisé pour les expériences de vieillissement en laboratoire**

Propriétés agronomiques									
pH	C <sub>org</sub>		N <sub>tot</sub>		C/N		P <sub>Olsen</sub>		
-	g/kg		g/kg		-		mg/kg		
4.2	LQ*		67.1		LQ		602.8		
Éléments majeurs									
Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	
mg/kg	g/kg	mg/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
363.0	8.6	274.1	187.0	7.1	15.1	1.7	99.7	87.5	
Éléments traces métalliques									
As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn			
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
LQ**	0.2	6.3	5.2	6.0	LQ	69.6			

\* limite de quantification C<sub>org</sub> : 5g/kg

\*\* limite de quantification As : 0.008 mg/kg

**Composition chimique de l'herbe utilisée pour les expériences de vieillissement en laboratoire**

Propriétés agronomiques									
pH	C <sub>org</sub>		N <sub>tot</sub>		C/N		P <sub>Olsen</sub>		
-	g/kg		g/kg		-		mg/kg		
-	378.4		37.8		10.0		141.0		
Éléments majeurs									
Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	g/kg	g/kg	g/kg	
1.4	17.1	2.3	21.9	1.9	137.3	1.4	3.1	3.3	
Éléments traces métalliques									
As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn			
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
1.6	LQ*	19.8	23.3	11.8	6.7	91.0			

\*limite de quantification Cd : 0.003 mg/kg

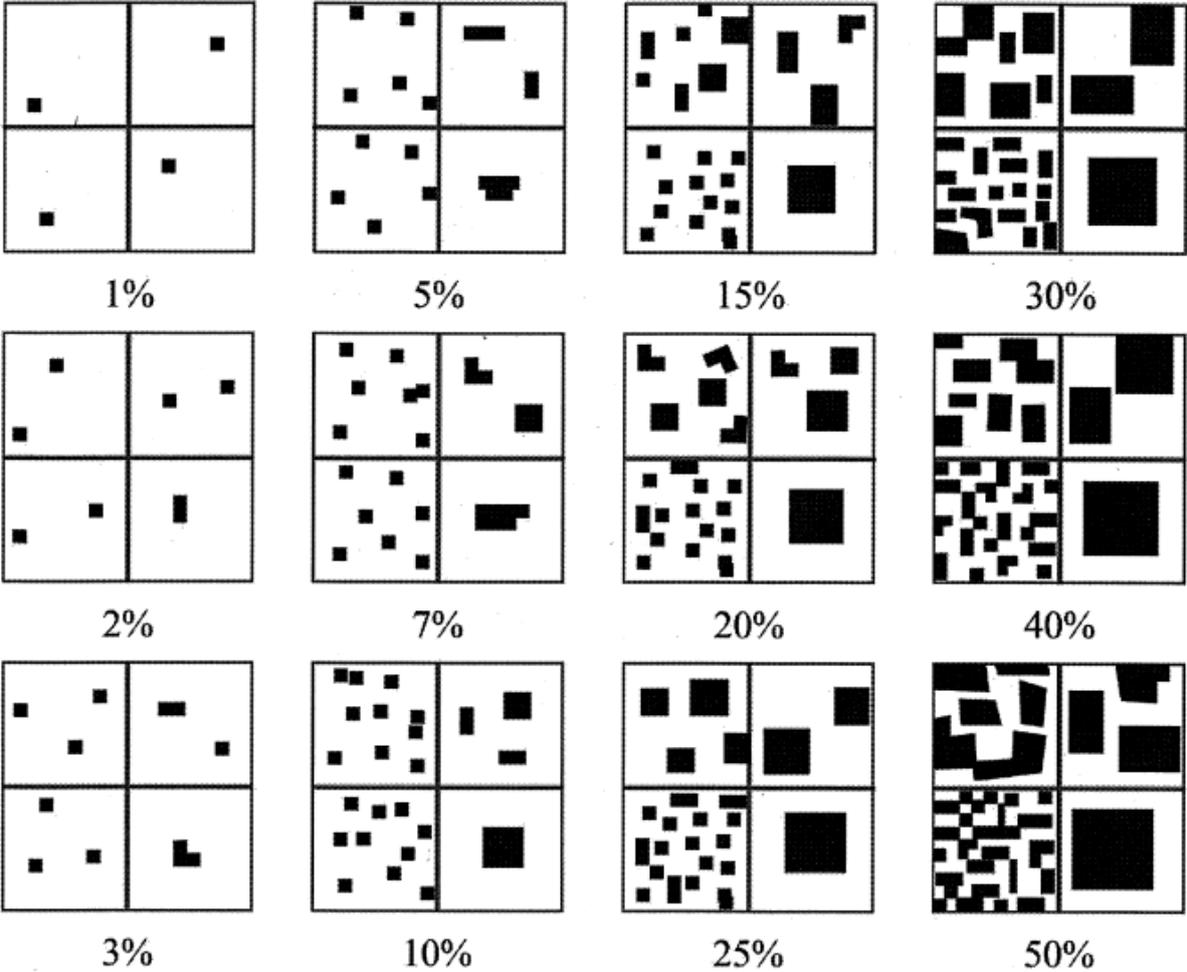
**Composition chimique du mortier utilisé pour les expériences de vieillissement en laboratoire**

<b>Propriétés agronomiques</b>								
<b>pH</b>	<b>C<sub>org</sub></b>	<b>N<sub>tot</sub></b>	<b>C/N</b>	<b>P<sub>Olsen</sub></b>				
-	g/kg	g/kg	-	mg/kg				
11.7	LQ*	3.7	LQ	21.4				
<b>Éléments majeurs</b>								
<b>Al</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>	<b>K</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Na</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	g/kg
4.9	76.3	5.8	1.4	1.8	331.9	112.1	241.3	1.6
<b>Éléments traces métalliques</b>								
<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>		
mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg		
8.6	LQ**	122.6	16.2	44.7	7.9	80.0		

\*limite de quantification C<sub>org</sub> : 5 g/kg

\*\*limite de quantification Cd : 0.003 mg/kg

**Annexe 11** : Graphique d'estimation des pourcentages surfaciques utilisés pour décrire les structures des sols (tirée de la grille standard Munsell d'indication des tâches, éléments grossiers ou de la pierrosité des sols)



**Annexe 12** : Présentation détaillée des résultats issus de l'analyse des structures des sols représentant le site du Potager du Roi de Versailles

**Résultats issus de l'analyse des structures des sols représentant le Potager du Roi de Versailles**

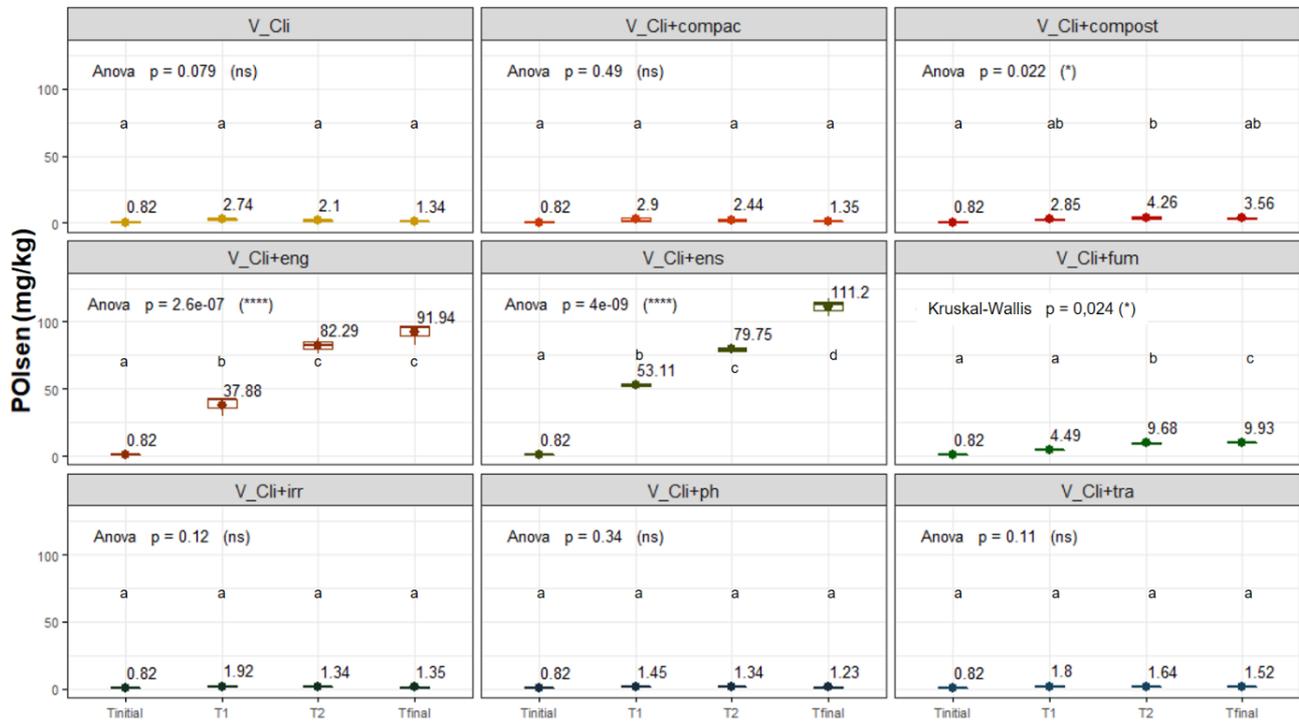
		<i>Degré</i> (intensité d'agrégation)	<i>Classe</i> (taille d'agrégation)	<i>Type</i> (forme d'agrégation)
<b>V_Cli</b>	<b>Sur-structure : 30 %</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique anguleux
	<b>Sous-structure : 70 %</b> Micro-agrégats (70 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (30 %)			
<b>V_Cli+compac</b>	<b>Sur-structure : 30 %</b> Macro-agrégats	Fort	Pluricentimétrique (≈ 4 à 5 cm)	Polyédrique anguleux
	<b>Sous-structure : 70%</b> Micro-agrégats (90 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (10 %)			
<b>V_Cli+irr</b>	<b>Sur-structure : 30%</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique anguleux
	<b>Sous-structure : 70%</b> Micro-agrégats (80 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (20 %)			
<b>V_Cli+ph</b>	<b>Sur-structure : 25%</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique anguleux
	<b>Sous-structure : 75%</b> Micro-agrégats (65 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (35 %)			
<b>V_Cli+tra</b>	<b>Sur-structure : 15%</b> Macro-agrégats	Moyen voire faible	Pluricentimétrique (≈ 2 à 3 cm)	Polyédrique
	<b>Sous-structure : 85%</b> Micro-agrégats (50 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (50 %)			
<b>V_Cli+fum</b>	<b>Sur-structure : 20%</b>	Moyen voire faible	Pluricentimétrique	Polyédrique

	Macro-agrégats		( $\approx$ 2 à 3 cm)	
	<b>Sous-structure : 80%</b>			
	Micro-agrégats (50 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (50 %)			
	<b>Sur-structure : 15%</b>			
	Macro-agrégats	Moyen voire faible	Pluricentimétrique ( $\approx$ 2 à 3 cm)	Polyédrique
<b>V_Cli+compost</b>	<b>Sous-structure : 85%</b>			
	Micro-agrégats (55 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (45 %)			
	<b>Sur-structure : 15%</b>			
	Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique ( $\approx$ 2 à 3 cm)	Polyédrique
<b>V_Cli+eng</b>	<b>Sous-structure : 85%</b>			
	Micro-agrégats (50 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (50 %)			

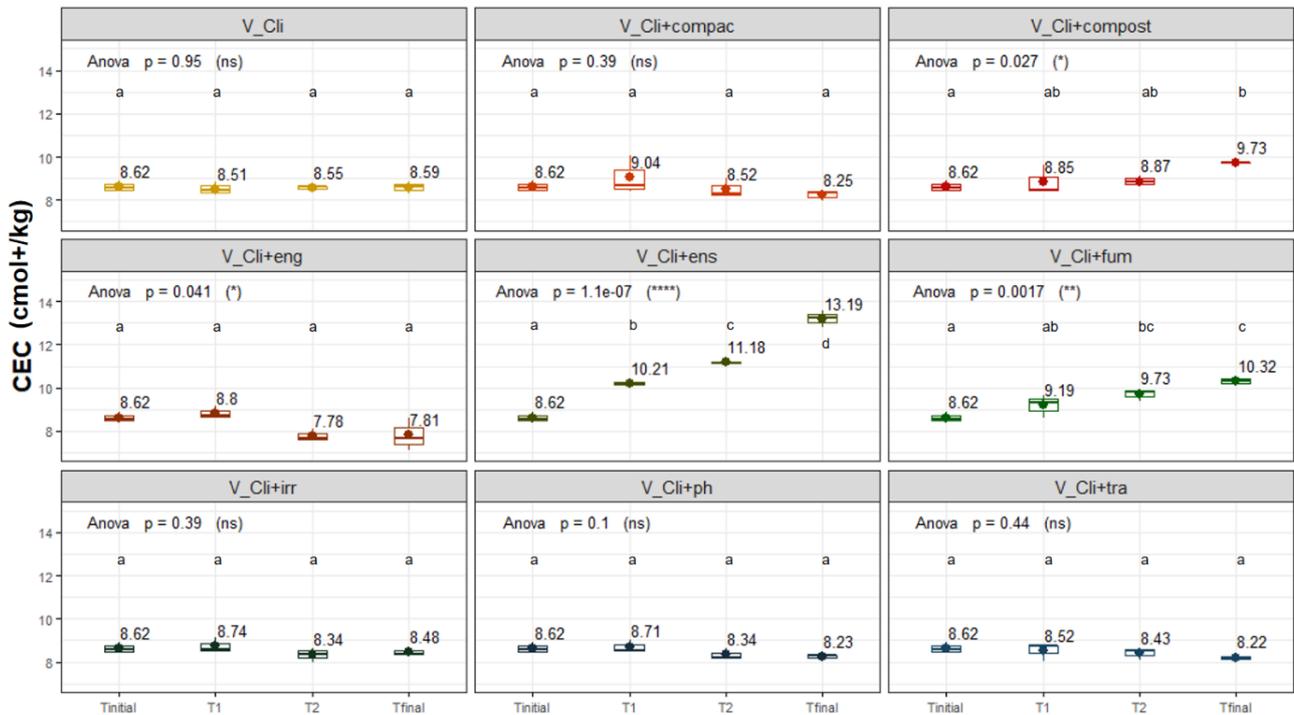
Résultats issus de l'analyse des structures des sols représentant le site du quartier de Bel Air

		<i>Degré</i> (intensité d'agrégation)	<i>Classe</i> (taille d'agrégation)	<i>Type</i> (forme d'agrégation)
<b>M_Cli</b>	<b>Sur-structure : 35 %</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique
	<b>Sous-structure : 65 %</b> Micro-agrégats (60 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (40 %)			
<b>M_Cli+compac</b>	<b>Sur-structure : 40 %</b> Macro-agrégats	Fort	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique
	<b>Sous-structure : 60%</b> Micro-agrégats (65 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (35 %)			
<b>M_Cli+herb</b>	<b>Sur-structure : 30%</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique
	<b>Sous-structure : 70%</b> Micro-agrégats (60 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (40 %)			
<b>V_Cli+mor</b>	<b>Sur-structure : 35%</b> Macro-agrégats	Moyen	Pluricentimétrique (≈ 3 à 4 cm)	Polyédrique
	<b>Sous-structure : 65%</b> Micro-agrégats (65 %)	Fort		Polyédrique sphérique
	Particules (35 %)			

**Annexe 13** : Évolution des paramètres agronomiques ( $P_{Olsen}$ , CEC) au cours du temps en fonction des différents traitements réalisés (site Potager du Roi)

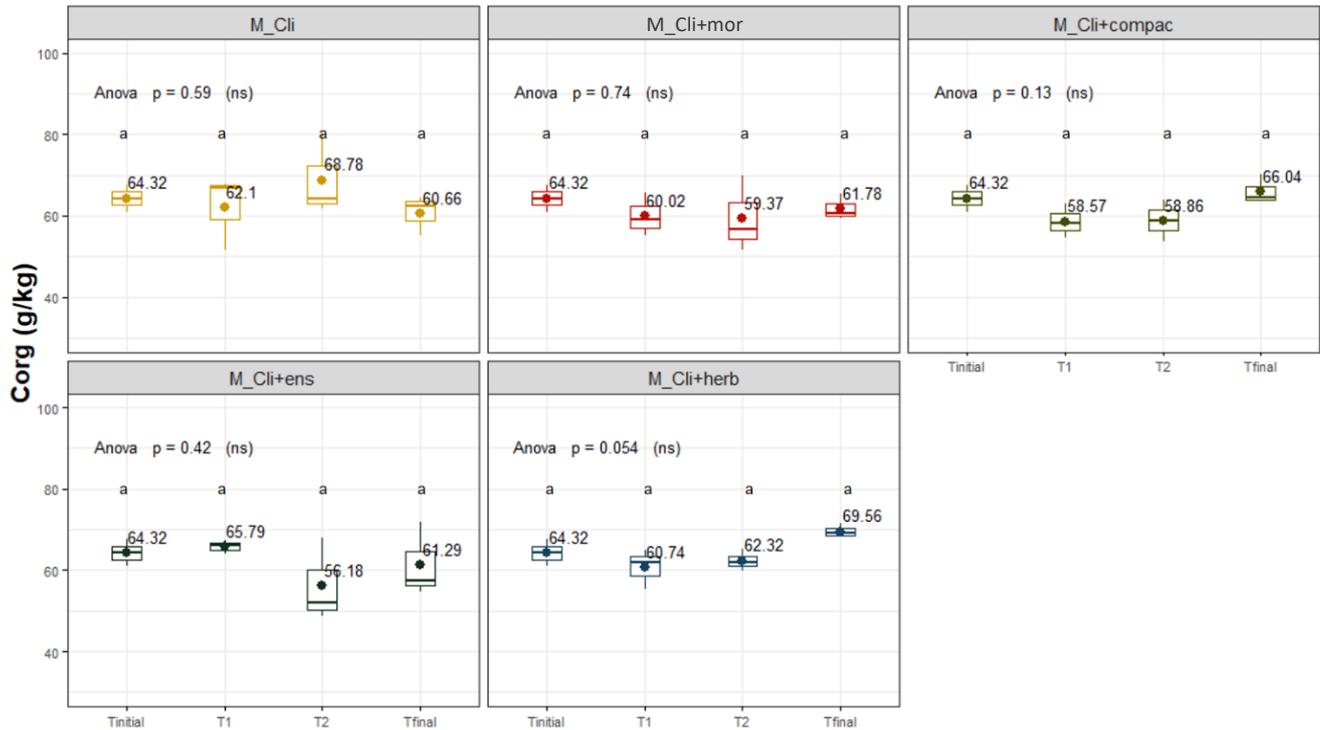


**Évolution du  $P_{Olsen}$  au cours du temps en fonction des neuf traitements réalisés**

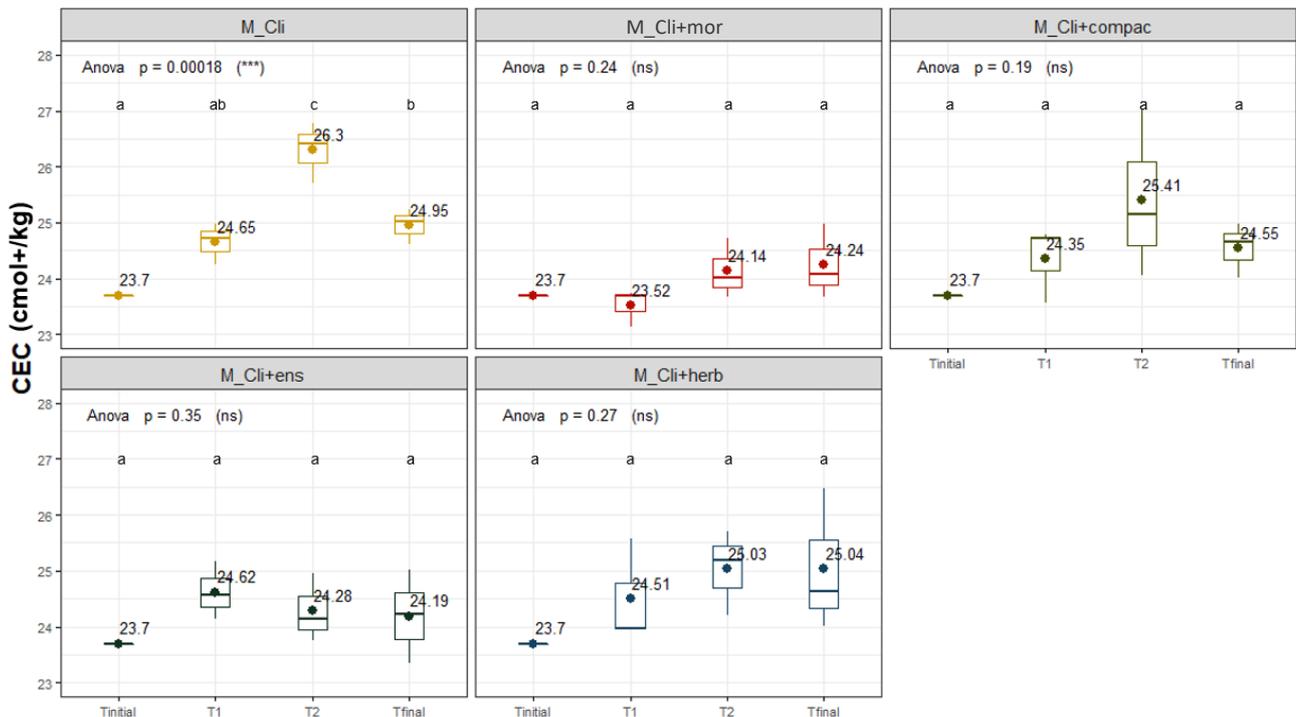


**Évolution de la capacité d'échange cationique au cours du temps en fonction des neuf traitements réalisés**

**Annexe 14** : Évolution des paramètres agronomiques (Corg, CEC) au cours du temps en fonction des différents traitements réalisés (site Quartier de Bel Air)



**Évolution de la teneur en carbone organique au cours du temps en fonction des cinq traitements réalisés**



**Évolution de la capacité d'échange cationique au cours du temps en fonction des cinq traitements réalisés**



## Résumé

L'artificialisation des sols, et les enjeux environnementaux associés (îlots de chaleur, inondation, dégradation de biodiversité), sont devenus une problématique majeure de l'aménagement et de la planification urbaine. L'objectif de cette thèse est de proposer une approche de caractérisation des sols urbains fondée sur l'analyse de leur trajectoire historique d'usage, en considérant que les successions d'usages et les pratiques humaines associées, déterminent les propriétés physico-chimiques des sols. Pour ce faire, une démarche scientifique s'appuyant sur trois approches complémentaires a été menée pour aboutir à une proposition méthodologique opérationnelle de cartographie prédictive des propriétés des sols urbains. La première approche est cartographique et documentaire, elle vise à mieux caractériser les trajectoires historiques des sols urbains et ainsi mieux appréhender l'ensemble des pratiques humaines que subit les sols au cours du temps. Il s'avère qu'une vingtaine de trajectoires historiques suffisent à décrire la majorité de la superficie d'une unité urbaine. Par ailleurs, les trajectoires historiques majoritaires représentent des successions d'usages composées au maximum d'un à deux usages montrant une faible dynamique des changements d'usages et pratiques au cours du temps. La seconde approche est une approche de terrain ayant pour objectif de caractériser l'impact de trois trajectoires historiques représentatives des sols urbains sur les propriétés physico-chimiques des sols. Elle met en évidence le lien existant entre la trajectoire historique d'un sol et ses propriétés physiques et chimiques. L'impact des pratiques humaines sur les propriétés du sol semble de plus, être dépendant de l'intensité des pratiques exercées sur le sol. Ces liens encore aujourd'hui peu développés, pourraient être mis en avant par le développement d'un nouvel concept : l'« anthroposéquence ». La dernière approche est une approche expérimentale aidant à la caractérisation des processus pédogénétiques impliqués au cours de ces trajectoires historiques et à décrire l'évolution des propriétés physico-chimiques au cours du temps. Il en ressort que les effets individuels des pratiques peuvent être contraire à l'effet résultant de l'ensemble de ces pratiques. De plus, les processus pédogénétiques mis en avant au cours de ces expériences reflètent la réalité du terrain, renforçant ainsi la méthode expérimentale proposée. Ainsi, ces trois approches méthodologiques ont finalement été discutées afin de retranscrire les résultats obtenus en règles « simples » permettant la prédiction cartographique des types de sols et de certains paramètres agronomiques en milieu urbain par la connaissance des trajectoires historiques.

Mots-clés : sol urbain, trajectoire historique, facteur humain, propriétés physico-chimiques, pédologie expérimentale, cartographie, planification urbaine

## Summary

Land take and the associated environmental issues (heat islands, flooding, biodiversity degradation) have become a major issue in urban planning and development. The objective of this thesis is to propose an approach to characterise urban soils based on the analysis of their historical trajectory of land use, considering that the land use successions and the associated human practices determine the physico-chemical properties of soils. To do this, a scientific approach based on three complementary approaches was carried out to achieve an operational methodological proposal for predictive mapping of urban soil properties. The first approach is cartographic and documentary, and aims to better characterise the historical trajectories of urban soils and thus to better understand all of the human practices that the soils have undergone over time. It turns out that twenty historical trajectories are sufficient to describe the majority of the surface area of an urban unit. Moreover, the majority of historical trajectories represent land use successions composed of a maximum of one or two land uses, showing a low dynamic of land use changes and practices over time. The second approach is a field approach aimed at characterising the impact of three historical trajectories representative of urban soils on the physico-chemical properties of soils. It highlights the link between the historical trajectory of a soil and its physical and chemical properties. The impact of human practices on soil properties also appears to be dependent on the intensity of the practices carried out on the soil. These links, which are still underdeveloped, could be highlighted by the development of a new concept: the "anthroposequence". The last approach is an experimental approach that helps to characterise the pedogenetic processes involved during these historical trajectories and to describe the evolution of physico-chemical properties over time. It shows that the individual effects of practices can be contrary to the effect resulting from the whole of these practices. Moreover, the pedogenetic processes put forward during these experiments reflect the reality of the field, thus reinforcing the proposed experimental method. Thus, these three methodological approaches were finally discussed in order to transcribe the results obtained into "simple" rules allowing the cartographic prediction of soil types and certain agronomic parameters in urban environments through the knowledge of historical trajectories.

Key words: urban soil, historical trajectory, human factor, physico-chemical properties, experimental pedology, mapping, urban planning