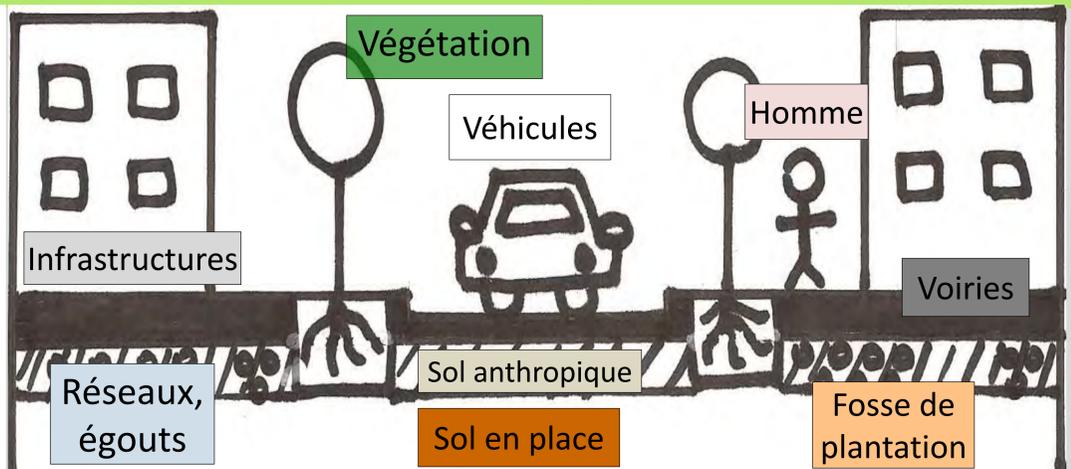


# Sols urbains, terres inconnues ?

Dans le cadre de l'année internationale des sols, la Communauté Urbaine du Grand Nancy veut mieux connaître les capacités des sols urbains à être supports de végétation. Les sols ont le potentiel de rendre des services écosystémiques d'approvisionnement, de régulation ou encore culturels pour répondre aux attentes des citoyens et des élus.

## Que sont les sols urbains ?

- sols très anthropisés : apports de matériaux technogéniques (minéraux et/ou organiques)
  - caractéristiques fréquentes : chimiquement pauvres, peu de réserve nutritionnelle, potentiellement contaminés, compactés, imperméables et asphyxiants
- effet sur la fertilité et la croissance des plantes



## Des usages du sol contrastés

**Cimetière :** protection, régulation, culture



**Jardin potager :** approvisionnement, support, protection, régulation



**Friche urbaine :** habitat, support



**Outil d'aide à la décision pour la gestion des sols urbains**

**Parc :** régulation, protection, support et habitat



**Equipement sportif :** culture



**Arbre d'alignement :** régulation, protection (remplacement des arbres en ville tous les 15 ans en moyenne)



**Base de données et cartographie et de la qualité des sols et des services écosystémiques associés**



plan d'échantillonnage raisonné

Analyse des indicateurs physiques, chimiques et biologiques

L'orientation de l'aménagement urbain permise par une meilleure connaissance de la qualité des sols urbains doit permettre d'optimiser la gestion de la nature en ville et rendre possible un gain économique considérable



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE



**GrandNancy**  
COMMUNAUTÉ URBAINE & HUMAINE

2015

Année internationale  
des sols



# Sols Urbains : Terres Inconnues ?



E. Mephane, C. Monot, L. Paire, C. Pascaretti, J. Soeima – Tuteur : C. Schwartz

Projet Pro 1<sup>ère</sup> année ENSAIA 2014/2015

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>1</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>2</b>
<b>I. INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>II. MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>5</b>
1. <i>Le Grand Nancy</i> .....	5
2. <i>Choix des terrains d'investigation</i> .....	5
3. <i>Plan d'échantillonnage</i> .....	6
4. <i>Protocole de tamisage</i> .....	7
5. <i>Choix des indicateurs à analyser</i> .....	7
a. <i>Indicateurs analysés par l'ensemble des projets</i> .....	7
b. <i>Caractéristiques retenues dans la base de données</i> .....	8
c. <i>Données représentées et étudiées</i> .....	8
6. <i>Représentation des données</i> .....	9
<b>III. RESULTATS .....</b>	<b>10</b>
1. <i>Cartographie des points de prélèvements</i> .....	10
2. <i>Constitution de bases de données</i> .....	10
3. <i>Ensemble graphique représentant les résultats d'analyse de la base de données Excel</i> .....	12
<b>IV. INTERPRETATION DES RESULTATS.....</b>	<b>14</b>
1. <i>La pierrosité</i> .....	14
2. <i>Le pH</i> .....	14
3. <i>La CEC</i> .....	15
<b>V. CONCLUSION .....</b>	<b>16</b>
<b>VI. PERSPECTIVES .....</b>	<b>17</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>18</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>19</b>
<i>Annexe 1</i> .....	19
<i>Annexe 2</i> .....	23

# Remerciements

Tout d'abord, nous souhaitons remercier la Communauté Urbaine du Grand Nancy, et particulièrement Christophe Gross, du Service Espaces Verts, pour sa confiance et pour nous avoir proposé ce projet.

Un grand merci également aux techniciens du Services Espaces Verts : Calypso Dard, Julien André, Oliver Pantin et Yann Van Haaren, qui ont su se rendre disponibles pour nous accompagner sur le terrain afin de prélever les échantillons de sol, ainsi que Alain Rakoto (LSE) pour nous avoir explicité la technique de la préparation des sols.

Nous remercions aussi notre tuteur M. Christophe Schwartz, professeur à l'Université de Lorraine-Ensaia et directeur du Laboratoire Sols et Environnement (Université de Lorraine-Inra) pour son soutien et son aide précieuse dans la réalisation globale de ce Projet Pro et la rédaction du présent rapport.

Enfin, nous souhaitons remercier Mme C. Sirguy, M. P. Leglize et leur groupe de Projet Pro "sels de déneigement" de même que Mme S. Joimel pour nous avoir fourni des données de caractérisation de sols occupés respectivement par des arbres d'alignement et des jardins potagers urbains.

# Résumé

Dans le cadre de l'Année Internationale du Sol, la Communauté Urbaine du Grand Nancy nous a sollicités pour réaliser un Projet Pro sur les sols urbains végétalisés. Ce projet s'inscrit dans la continuité de travaux déjà réalisés au cours des trois dernières années par des étudiants de l'ENSAIA en partenariat avec le Grand Nancy (en particulier le service des espaces verts) et le Laboratoire Sols et Environnement (UL-INRA). L'objectif de cette étude est de mieux connaître les sols afin de mieux les gérer. La méthode mise en œuvre aboutit à la création d'une base de données regroupant les principales caractéristiques physico-chimiques de sols urbains végétalisés sur le territoire du Grand Nancy, en termes de fertilité et de toxicité. Cette base de données résulte de la compilation de résultats acquis dans le cadre de trois projets : deux groupes de Projet Pro (« Sel de déneigement » et « Sols urbains : terres inconnues ? ») et le programme de recherche national « Jardins associatifs urbains et ville durables » coordonnée par le Laboratoire Sols et Environnement (Jassur-ANR Villes et Bâtiments Durables). Les types d'occupation du sol pris en compte dans la base de données sont alors diversifiés, intégrant arbres d'alignement, jardins potagers associatifs, parcs et jardins, friches urbaines, terrains de sport et cimetières. Afin d'alimenter cette base de données, nous avons défini un plan d'échantillonnage sur le territoire de l'agglomération, puis nous avons effectué des prélèvements et des analyses de sols végétalisés, représentatifs d'occupations du sol contrastées. De ce fait, nous avons également créé une méthode d'étude des sols sur un territoire.

Ce projet s'inscrit dans une démarche plus grande. En effet, il est aussi envisagé que les données que nous avons récoltées soient intégrées à une base de données RMQSU (Réseau de Mesures de la Qualité des Sols Urbains) progressivement constituée par le LSE avec la Communauté Urbaine du Grand Nancy. Cette base regroupe les données physico-chimiques des sols avec un objectif de mise en relation avec les fonctions des sols et les services écosystémiques qu'ils peuvent potentiellement rendre. Cette démarche vise à aboutir à un outil d'aide à la décision pour une meilleure prise en compte de la qualité des sols dans les projets d'aménagement des villes.

# I. Introduction

Les populations des villes ne cessant d'augmenter, la qualité de vie dans les milieux urbains devient une préoccupation majeure. Or elle est notamment liée à la présence d'espaces végétalisés qui permettent entre autre de réduire la pollution atmosphérique mais aussi de réguler le cycle de l'eau et l'effet îlots de chaleur urbains. En effet, les plantes absorbent du CO<sub>2</sub> et rejettent de la vapeur d'eau via la photosynthèse, permettant ainsi de compenser l'émission de gaz à effet de serre (par exemple par les transports, les activités industrielles et domestiques) et de réguler la température ambiante (Gis Sol, 2011). Cependant, les bénéfices induits par les processus liés aux plantes ne peuvent être retirés que si elles trouvent dans leur environnement tous les éléments nécessaires à leur croissance et à leur développement. Ainsi la qualité du sol vue sous l'angle de sa fertilité physique et chimique et de son niveau de contamination, est d'une importance primordiale en milieu urbain.

Les sols urbains sont dits anthropisés (Girard *et al*, 2005), c'est-à-dire modifiés par l'Homme pour l'aménagement de son milieu de vie (réseaux souterrains, bâtiments, espaces verts, réseaux routier, trottoirs, ...). Ils sont, pour grand nombre d'entre eux, qualifiés d'Anthroposols dans le Référentiel Pédologique Français et de Technosols dans la World Reference Base for Soil Resources. Les sols urbains résultent de superpositions d'usages au cours du temps et sont souvent chimiquement pauvres, sans forte réserve nutritionnelle, compactés, imperméables et asphyxiants (Calvet, 2003). Ils ne permettent donc pas, *a priori*, un développement optimum des végétaux. Cette situation peut d'ailleurs conduire l'Homme à reconstituer ou construire artificiellement des sols suivant des procédés du génie pédologique afin d'optimiser les conditions de développement des végétaux.

Les principales catégories d'occupations de sols associant des végétaux sont au nombre de 7 (Girard *et al*, 2005) :

- les **arbres d'alignement** (parcs, trottoirs) plantés dans des fosses de plantation d'un volume de 1 à plusieurs m<sup>3</sup> parfois constitués de mélange terre-pierre (Girard *et al*, 2005 ; Gillig *et al*, 2008),
- les **espaces verts** (plates-bandes des parcs, pelouses, squares) comprenant différents horizons : en surface, de la terre végétale poreuse avec ajout ou non de compost (Girard *et al*, 2005),
- les **cimetières** présentant des caractéristiques proches de celles des parcs (APUR, 2008),
- les **terrains de sport** aménagés pour résister aux intempéries : sous-sol modelé en pente pour permettre le drainage-gravats, substrat artificiel, gazon avec système racinaire dense et tondu ras (Girard *et al*, 2005),
- les **jardins potagers** (privés ou collectifs) caractérisés par des sols fertiles résultant d'apport réguliers d'engrais et d'amendement, pour un objectif de production alimentaire (Girard *et al*, 2005),
- les **toitures végétalisées** constituées d'une couche végétale et d'un complexe isolation-étanchéité (Ecovegetal, 2002),
- les **friches urbaines** : terrains abandonnés dans l'attente d'être reconvertis, comme par exemple des usines désaffectées (Medde, 2011).

Les sols n'auront certainement pas les mêmes propriétés en fonction de ces types d'usages, n'assureront pas les mêmes fonctions, et ne rendront pas les mêmes services

écosystémiques à l'Homme (De Groot *et al*, 2010). Cette notion de service réfère aux bénéfiques qui profitent à la société, à l'économie et aux ménages. Ces services sont rendus grâce à la présence de différents agents physiques, chimiques ou biologiques qui interagissent pour réaliser ce que l'on appelle des fonctions écosystémiques. De par la grande diversité des sols végétalisés, liée notamment à leurs constituants organiques et minéraux ainsi qu'à une faune et une flore variées pouvant se développer au sein du sol, ces services sont multiples. Ils se distinguent selon 5 catégories : approvisionnement (nutrition, support des réseaux de transport d'eau, électricité et gaz), régulation (température, qualité de l'air, pureté de l'eau), protection (contre les inondations, l'érosion), habitat et support (maintien de la biodiversité), culture et commodités (loisirs, inspiration religieuse, héritage culturel). Chaque sol rend un certain nombre de services qui sont difficiles à définir car dépendant de nombreux facteurs.

A partir de la définition des services, leur évaluation économique (monétarisation ou attribution d'une valeur économique chiffrée à un service) permettrait d'améliorer les plans d'aménagement des villes (Corbera *et al*, 2009). Cependant, des recherches sont encore à mener sur ce sujet. Il faut en particulier insister sur le fait que, jusqu'à présent, ont été considérés les bénéfiques retirés des sols comme support de route ou bâtiment en négligeant ceux apportés par des sols supports de végétation (Barles *et al*, 1999). Cette évaluation est en effet complexe car il faudrait prendre en compte des indicateurs de qualité des sols, des indicateurs sociaux, environnementaux et culturels en plus d'indicateurs économiques. A ce titre, certains pays comme la Chine ou le Mexique ont d'ores et déjà mis en place un programme appelé PSE (Paiement pour les Services Ecosystémiques). Ce programme comporte néanmoins quelques points faibles puisque ce paiement dépend du consentement à payer des populations locales et nécessite donc des sondages préalables (Wunder *et al*, 2007).

Dans l'optique d'une meilleure gestion des sols en ville, il est avant tout nécessaire de bien connaître les caractéristiques des différents types de sols présents sur le territoire. Il existe ensuite différentes méthodes permettant de visualiser spatialement la qualité des sols dont le système d'information géographique (SIG) est aujourd'hui le plus utilisé, réalisant une projection des données sur une carte (d'après Gross, architecte paysagiste pour le Grand Nancy).

Si de nombreuses études pédologiques ont été réalisées pour la gestion des surfaces agricoles et forestières, très peu de travaux ont été menés sur le milieu urbain. Ainsi, l'objectif de notre projet est de proposer un plan d'échantillonnage de sols urbains végétalisés, de collecter des terres et de les analyser afin d'alimenter une base de données de la qualité des sols. Cette démarche est ensuite orientée vers la mise en place d'un outil d'aide à la décision permettant de déterminer, pour un sol donné, quel usage serait le plus adapté. Des questions scientifiques et techniques émergent alors : comment mettre en place cet outil grâce aux technologies à notre disposition ? Quelle méthode appliquer et quelles techniques mettre en œuvre ? Quels critères utiliser pour établir un diagnostic de qualité du sol ?

Notre projet est centré autour des objectifs principaux suivants :

- constituer une base de données regroupant pour chaque type d'occupation des caractéristiques macroscopiques des sols observés sur le terrain ;
- y ajouter les résultats d'analyses des sols de jardins potagers et d'arbres d'alignements réalisées conjointement avec d'autres projets ;
- réaliser une étude statistique des caractéristiques des sols du Grand Nancy végétalisés pour trois indicateurs représentatifs du taux de fertilité ou de contamination de ces sols : la teneur en éléments grossiers, le pH et la capacité d'échanges cationiques (CEC).

# II. Matériels et méthodes

## 1. Le Grand Nancy

L'étude se porte sur le territoire du Grand Nancy situé en Lorraine, en Meurthe-et-Moselle. La communauté urbaine est constituée de 20 communes et compte plus de 262 000 habitants. Le projet s'intéresse aux sols urbains. Les zones de prélèvement au sein de ce territoire peuvent-elles être considérées comme urbaines ? D'après l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), une ville est définie par une population d'au moins 2000 habitants. Ce critère est vérifié pour 18 communes sur les 20 composants le territoire du Grand Nancy, les prélèvements réalisés dans le cadre du projet sont donc bien justifiés.

Au cours du vingtième siècle, l'activité industrielle a subi un essor dans la région et il y a eu expansion de la zone urbaine. La surface urbanisée a ainsi été multipliée par 25 au cours du vingtième siècle. Cette expansion s'est faite au détriment des zones forestières et agricoles originellement présentes (Quelle prise en compte des sols dans l'urbanisme ? Spécialisation Sciences et Génie de l'Environnement, février 2013). Le sol a été durablement marqué par cette activité industrielle, bien qu'aujourd'hui, cette activité ait en grande partie disparue.

Bien que le Grand Nancy soit très urbanisé, il n'en reste pas moins végétalisé. Il compte de nombreux parcs et jardins. Par exemple, la ville de Nancy regroupe près de 300 ha de parcs, dont le parc de la Pépinière qui est l'un des plus grands de France en milieu urbain avec ses 22 ha. Le Grand Nancy est aussi traversé par la Meurthe, une rivière bordée par des espaces verts, et le canal de la Marne au Rhin au bord duquel s'est développé le jardin d'eau le long de la promenade de Kanazawa. Enfin, la forêt de Haye au Nord-Ouest du Grand Nancy représente près de 40% de sa superficie totale avec 10 000 ha de massif forestier.

## 2. Choix des terrains d'investigation

Afin d'obtenir des données de caractérisation de la qualité des sols du Grand Nancy, des prélèvements de terre ont été réalisés dans la plupart des communes et pour des sols végétalisés faisant l'objet de divers usages. Le choix des parcs et jardins s'est appuyé sur des zones d'intérêt proposées par le service des espaces verts de la Communauté Urbaine du Grand Nancy. Certains des parcs que nous avons choisis n'étant pas sous leur direction, il a fallu contacter les propriétaires ou gardiens de ces lieux pour obtenir les autorisations de prélèvement. Pour les cimetières, il s'est révélé nécessaire de faire des demandes auprès de la mairie de Nancy. Aucun site de toit végétalisé n'ayant pu être localisé, ce type d'usage n'a pas été étudié.

Les zones retenues sont listées ci-dessous :

- **terrains de sport et de loisirs (6)** : stade Matter, stade de la Plaine Flageul, stade de la Toulouse, stade Laurent Luzi, hippodrome de Brabois,
- **parcs et jardins (10)** : parc de la Pépinière, jardin Godron, jardin d'Eau, parc Bonnet, parc Blondot, parc de la Cure d'Aire, parc du Belvédère, parc de Montaigu, parc Charles III, parc Orly,
- **cimetières (3)** : cimetière de Préville, cimetière du Sud, cimetière de Brabois,

- **friches urbaines (2)** : friche de Division de Fer, friche de la Promenade Emilie du Châtelet.

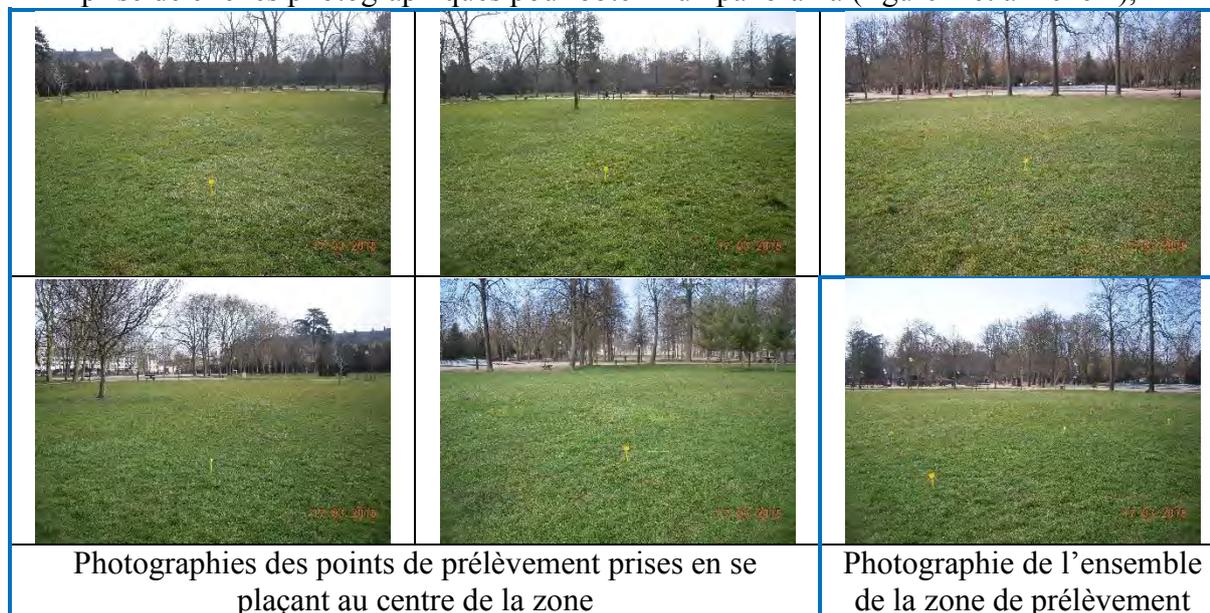
Pour ce qui est des sols occupés par des **alignements d'arbres (39)** de bord de routes, les analyses sont effectuées à partir des prélèvements réalisés par le groupe de Projet Pro "Sels de déneigements" tutoré par Pierre Leglize et Catherine Sirguy. L'analyse des sols des **jardins potagers (33)** familiaux du Grand Nancy se baseront sur des jardins appartenant à six sites du Grand Nancy : 1 à Jarville, 7 à Malzéville, 4 à Laneuveville-Devant-Nancy, 10 à Maxéville, 1 à Seichamps et 10 dans la commune de Heillecourt. Les prélèvements ont été réalisés par Sophie Joimel (LSE), dans le cadre du programme Jassur-ANR VBD.

Dans ces deux cas, la méthode d'échantillonnage des sols est similaire à celle employée dans le présent projet.

### 3. Plan d'échantillonnage

Tous les prélèvements ont été réalisés en cinq demi-journées entre le 17 et le 31 mars 2015 (soit après le dégel des sols). Chaque fois, au moins un technicien employé au Service des Espaces Verts du Grand Nancy est venu apporter son aide et a véhiculé les étudiants entre deux sites. Un unique échantillon de terre a été réalisé dans chaque lieu, suivant le protocole suivant :

- définition de la zone de prélèvement,
- repérage d'un point central avec un piquet, puis de 6 points équidistants du centre. Les rayons ont une longueur variable selon la zone, proportionnelle à la taille totale du terrain.
- récupération des coordonnées GPS au niveau du point central,
- prise de clichés photographiques pour obtenir un panorama (figure 1 et annexe 1),



**Figure 1 : Réalisation des clichés sur l'exemple du parc de la Pépinière**

- prélèvement de terre de l'horizon de surface (profondeur très différente selon le terrain) avec une tarière hélicoïdale à main pour chacun des sept points,
- mélange de ces sept échantillons élémentaires dans un seau et transfert de l'échantillon composite homogénéisé dans un sac codifié selon la référence du terrain,
- séchage à l'air sous serre pendant une dizaine de jours, avant tamisage à 2 mm (en désagréant grossièrement les mottes, manuellement tous les 3 jours).

#### 4. Protocole de tamisage

Le tamisage à 2 mm permet de séparer la fraction fine de la fraction grossière afin de les étudier séparément :

- chaque échantillon séché est photographié, remis en sac puis pesé. En soustrayant la tare du sac plastique au poids indiqué par la balance, nous obtenons PT (poids total),
- le sol est tamisé une première fois à 2 mm : la partie fine est transférée dans un sac nommé FFXX avec FF pour Fraction Fine et XX les chiffres correspondants à la référence du terrain,
- les éléments grossiers constituant le refus de tamisage sont extraits et mis en sac nommé FGXX avec FG pour Fraction Grossière,
- la fraction grossière est broyée dans un broyeur à mâchoires à 2,5 mm, puis tamisée une seconde fois à 2 mm,
- la fraction à nouveau retenue est transférée dans le sac FGXX et la fraction tamisée est ajoutée au sac FFXX.

Avant le premier broyage et après chaque broyage, le broyeur est soigneusement vidé de tout reste de terre à la souffleuse à air. De surcroît, dans l'éventualité où de la terre soit encore contenue dans la machine, une poignée de sol à broyer est insérée dans le broyeur afin de le nettoyer et d'éliminer les restes du sol précédent. Ce sous-échantillon est conditionné à part dans un sac nommé PP pour Première Partie. Considéré comme souillé car contenant un peu de deux sols, il ne fera pas l'objet d'une analyse.

#### 5. Choix des indicateurs à analyser

##### *a. Indicateurs analysés par l'ensemble des projets*

Les sols échantillonnés dans le cadre strict de ce projet sont prélevés sur toute la hauteur de l'horizon de surface (profondeur mesurée). Ils ont fait l'objet d'observations macroscopiques et de premières descriptions sur le terrain. Ont été décrits la teneur moyenne en carbonates (grâce au test de l'effervescence à HCl), la structure, l'activité biologique (en particulier pour l'enracinement) et la texture. Grâce à une pesée ultérieure en laboratoire, les pourcentages de fractions fine et grossière sont également disponibles pour ces sols. Ces données permettent de renseigner une base de données, sous le logiciel Microsoft Excel.

Il peut s'y ajouter des informations sur les sols des jardins familiaux. Les 33 échantillons prélevés dans le cadre du programme Jassur sont issus des premiers 20 cm de l'horizon de surface. Une aliquote de terre par sol de jardin a été envoyée au Laboratoire d'Analyse des Sols certifié de Arras (LAS-INRA). Les paramètres ayant été analysés sont les suivants : granulométrie (NF ISO 11465), pH (NF ISO 10390), carbonates totaux et actifs ( $\text{CaCO}_3$ ) (NF ISO 10693), carbone (C), azote (N) et matière organique (MO) (NF ISO 10694, NF ISO 13878), phosphore assimilable ( $\text{P}_{\text{Olsen}}$ ) (méthode Olsen; NF ISO 11263), capacité d'échange cationique (CEC; méthode Metson; NF X 31-130), base échangeable (échangeables à la cobaltihexamine) : Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Sodium (Na), Potassium (K), Fer (Fe), Manganèse (Mn), Aluminium (Al), éléments totaux et éléments traces métalliques (ETM) (extraction HF; NF EN ISO 17294-2, NF ISO 22036), éléments traces extractibles (extraction  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol.l<sup>-1</sup>; méthode INRA), oligo-éléments extractibles (extractibles à l'EDTA).

Les analyses des sols des rangées d'arbres ont été réalisées pour des échantillons prélevés dans les 20 premiers cm. Les caractérisations ont été faites par les étudiants au LSE. Les données analysées sont pour ces sols : la DO380, la DO475, la concentration, le C fixé,

l'N, la CEC, les bases échangeables : Ca, K, Mg, Na, le pH, la conductivité et également le pourcentage de la fraction fine.

*b. Caractéristiques retenues dans la base de données*

Des indicateurs révélant le niveau de fertilité et de contamination des sols sont retenus :

- paramètres indicateurs de fertilité : C, N, P<sub>Olsen</sub>, CEC, bases échangeables (Ca, K, Mg), CaCO<sub>3</sub>, minéraux essentiels (Ni, Zn, Co, Cr, Cu, Mo, C, B) ;
- paramètres indicateurs de toxicité : Na, Pb, Cd, Ti, Fe ;
- paramètres mixtes : pH, Al, Mn, pierrosité (fraction > 2mm).

*c. Données représentées et étudiées*

L'étude comparée de la qualité des sols du Grand Nancy réalisée dans la suite de ce rapport va s'appuyer uniquement sur trois critères pour lesquels nous avons suffisamment de données à ce stade de réalisation des travaux analytiques : pierrosité, pH et CEC.

➤ La pierrosité

La pierrosité équivaut à la charge totale en éléments grossiers, soit au pourcentage volumique des éléments supérieurs à 2mm de diamètre sur l'ensemble du volume (Hillel, 2008). Cela correspond aux gravillons, graviers, cailloux, pierres et blocs. Plus cette charge en éléments grossiers est élevée, plus les racines auront du mal à pénétrer dans le sol. De plus, cela diminue la réserve en eau du sol. Enfin lorsque la pierrosité d'un sol dépasse 30%, les graviers et cailloux forment un mulch minéral qui réduit l'évapotranspiration. Ces éléments grossiers peuvent aussi être constitués de matériaux technogéniques issus des activités humaines. Ces matériaux contiennent potentiellement des contaminants.

➤ Le pH

Le degré d'acidité du sol est exprimé par le pH. Sa valeur implique des modifications physiques (stabilité structurale), chimique (biodisponibilité des nutriments et des contaminants) et biologiques (minéralisation de la matière organique) du sol (tableau 1). Le pH varie selon la saison (tendance à devenir acide en été et alcalin en hiver) en raison de l'état hydrique, la température et la présence d'un couvert végétal (Hillel, 2008).

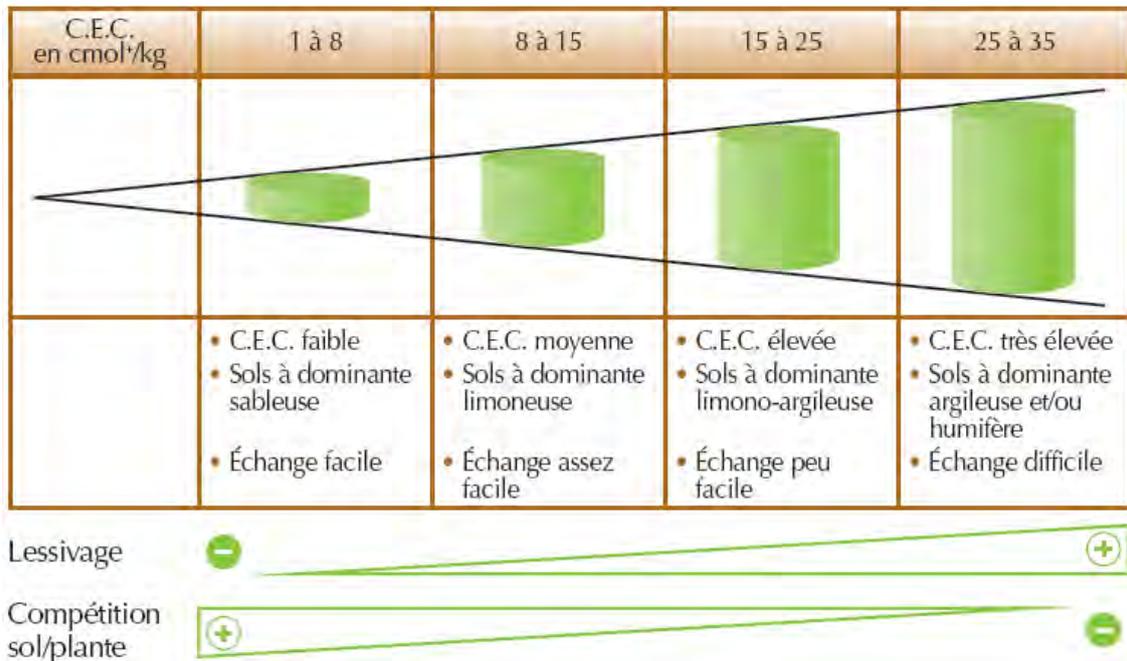
pH	Eléments absorbables par les plantes	Décomposition de la Mo	Physico-chimie	Minéralisation
>7,5	calcium, molybdène	rapide	acides humiques	lente à très difficile
7,5-5,5	tous éléments fertilisants	rapide	acides humiques et fulviques	rapide
4-5,5	aluminium, fer, manganèse	moyenne	acides humiques et fulviques liés aux argiles	assez lente
<3	aluminium, fer, manganèse	lente à très lente	peu d'humus formé	très difficile

**Tableau 1 : Outil d'interprétation du pH**

(d'après La dégradation des sols dans le monde, 2008 ; μTime, 2009)

➤ La CEC

La capacité d'échange cationique équivaut à la quantité d'éléments chimiques fertilisants ( $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , ...) pouvant être stockés et échangés dans le complexe argilo-humique du sol (figure 3). Elle varie donc selon la quantité et la nature des argiles et de la matière organique du sol ainsi que de son pH (Hillel, 2008).



**Figure 2 : Outil d'interprétation de la CEC** (wikiLCA, 2010)

## 6. Représentation des données

Les données ainsi recueillies sont intégrées dans un fichier Microsoft Excel ce qui permet de constituer une base de données. A partir de celle-ci, des analyses statistiques sont effectuées et représentées sous forme de graphiques. Pour chacun des trois paramètres analysés sur l'échantillon (pierrosité, pH, CEC), un graphique est obtenu. Il regroupe, pour chaque usage du sol, un diagramme en boîtes à moustaches) représentant tous les échantillons traités. Sont ainsi représentés moyenne, médiane et écart-type de chacun des indicateurs. Il sera ainsi possible d'étudier la variabilité des trois paramètres obtenue pour chacune des occupations du sol et pour chacun des terrains testés au sein d'un même type d'usage du sol.

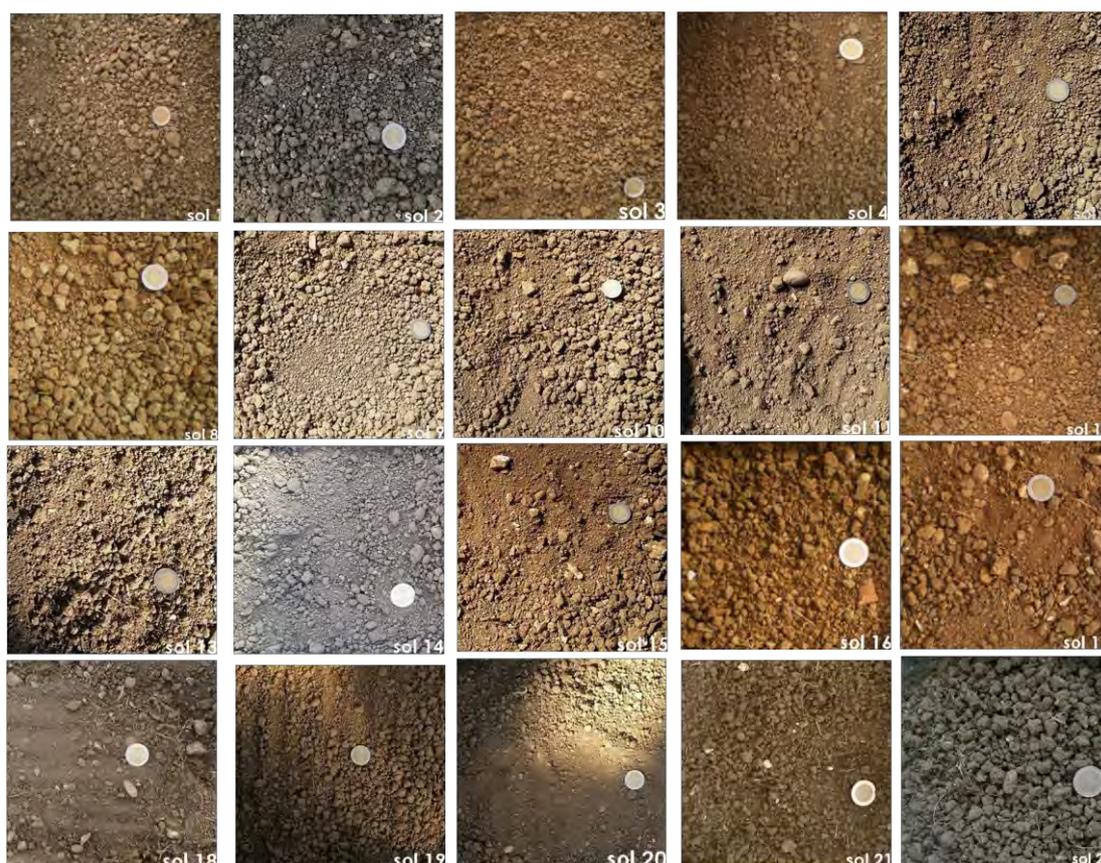
# III. Résultats

## 1. Cartographie des points de prélèvements

Les coordonnées GPS sont référencées pour chacun des prélèvements avec la longitude et la latitude en degrés décimaux. Elles ont été d'abord rapportées sur le logiciel Google Earth (annexe 2) puis transférées sous format SIG (Système d'Information Géographique) grâce à la plateforme de cartographie ARCGIS.

## 2. Constitution de bases de données

La première base de données, qui est une base de données photographique, a été réalisée à partir des clichés pris sur chacun des sites de prélèvement. Nous avons réalisé deux planches, l'une affichant des vues générales des zones de prélèvement (annexe 1) et la seconde une vue rapprochée de l'échantillon de terre avant son broyage et la séparation des éléments grossiers (figure 3).



**Figure 3 : Planche des échantillons de sols prélevés**

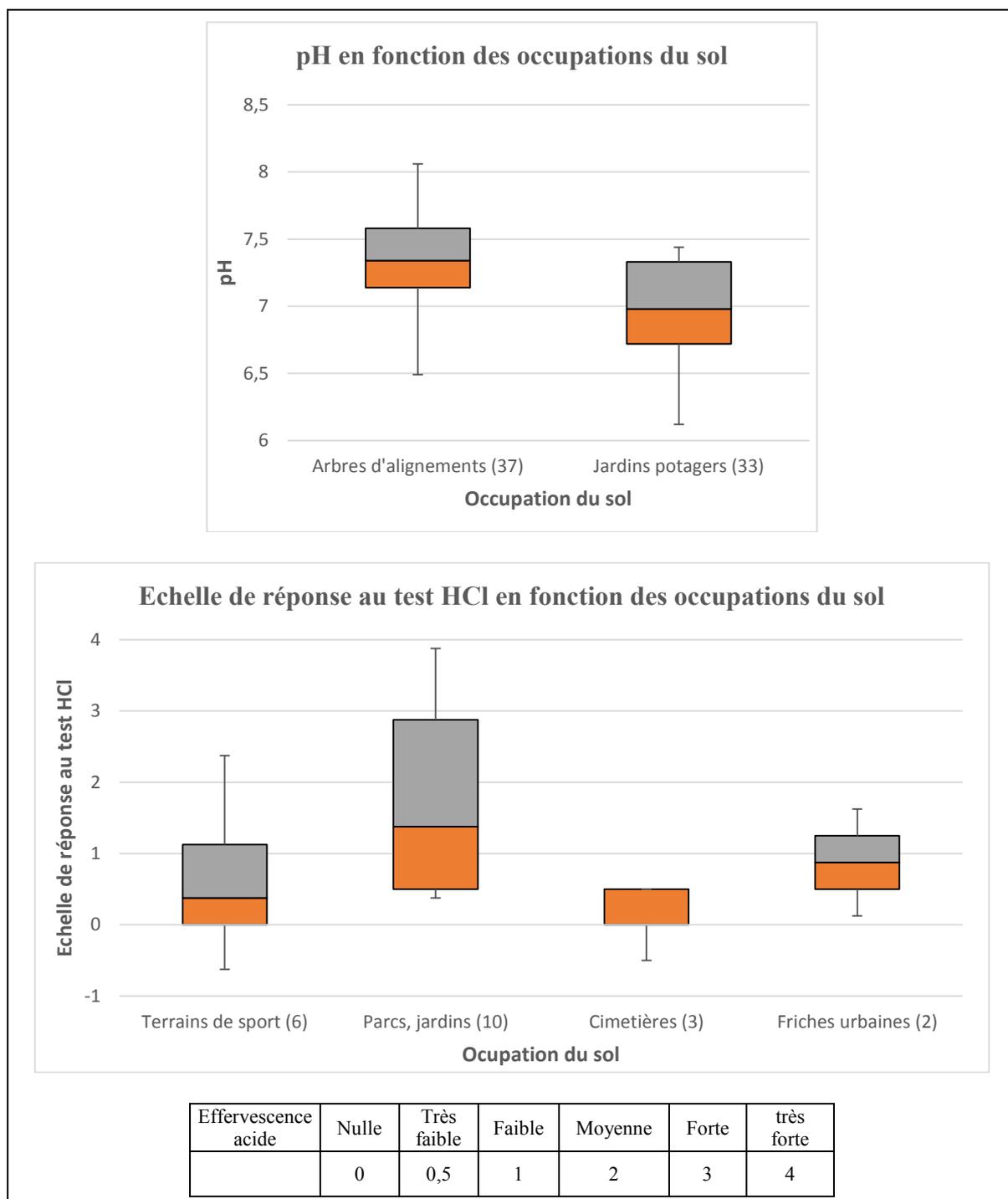
La seconde base de données que nous avons créée à partir d'un fichier Excel, regroupe les données que nous avons récoltées lors de la réalisation des prélèvements (coordonnées GPS, test HCl) et les résultats d'analyses réalisées au laboratoire (% de fraction grossière, pH, CEC, ...) (tableau 2).

	Echantillon	latitude	longitude	Profondeur (cm)	Cfixé (cmol+ /l)	N (cmol+/l)	CEC (cmol+/Kg)	...	pH	% FG
<b>Arbres d'alignements</b>	1S	6,195916	48,685323	20	3,061351351	0,076533784	30,01324854	...	7,65	53,0857302
	3S	6,200994	48,68898	20	2,306389189	0,05765973	23,24989102	...	8,02	61,1424984
	4S	6,134427	48,693859	20	2,231783784	0,055794595	22,86663713	...	8,34	58,652507
	5S	6,142352	48,679509	20	1,647189189	0,04117973	17,08702478	...	8,12	43,8404877
	6S	6,19599	48,687074	20	0,915610811	0,02289027	9,267315899	...	8,38	51,0703773
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	37S	6,187105	48,670619	20	1,144994595	0,028624865	11,82845656	...	7,86	64,8471168
<b>Terrains de sport</b>	14	48,687945	6,202839	30				...		19,8748211
	13	48,690339	6,2182509	10				...		21,4099631
	12	48,687764	6,130792	15				...		34,3441564
	...	...	...	...				...		'''
	20	48,664225	6,192952	25				...		29,918542
<b>Parcs, jardins</b>	1	48,6978526	6,18617043	35				...		17,1569205
	2	48,6947195	6,18898608	40				...		13,4379517
	3	48,6938436	6,19342715	25				...		15,3130191
	...	...	...	...				...		...
	18	48,663459	6,215268	20				...		20,9745087
<b>Cimetières</b>	17	48,412852	6,094184	25				...		21,2791964
	19	48,674271	6,187867	30				...		21,1553726
	22	48,656942	6,162815	25				...		29,594703
<b>Friches urbaines</b>	8	48,4841378	6,115055	20				...		29,8237954
	10	48,693083	6,189884	30				...		33,8635034
<b>Jardins potagers</b>	Heillecourt			20			30,1	...	7,67	1,00
	Jarville			20			8,71	...	7,32	1,00
	...			...			...	...	...	...
	Seichamps			20			7,4	...	7,50	2,00

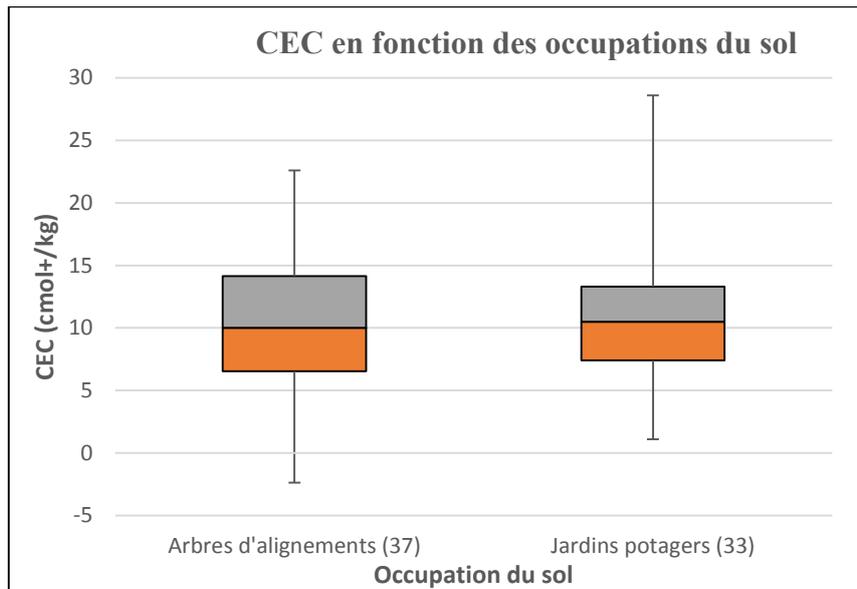
**Tableau 2 : Illustration de la base de données regroupant les résultats d'analyses des différentes occupations du sol**

### 3. Ensemble graphique représentant les résultats d'analyse de la base de données Excel

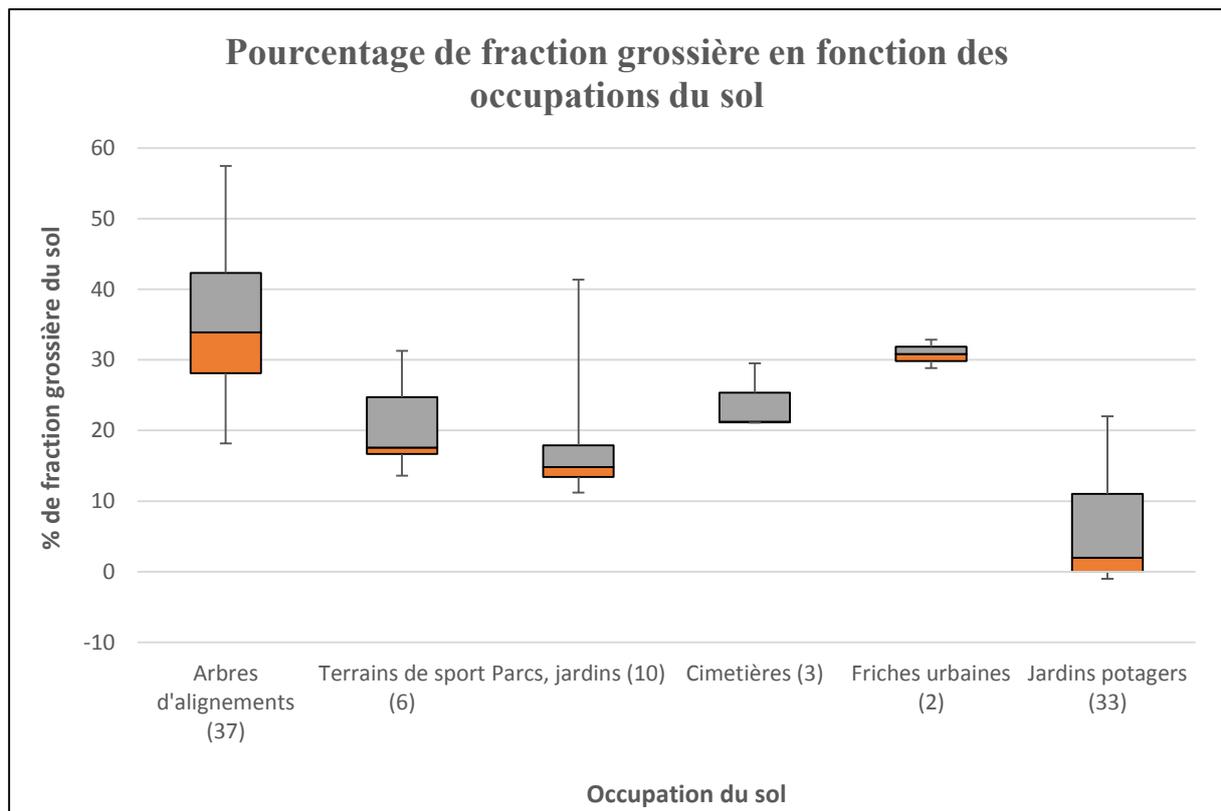
Bien que la base de données Excel comprend 25 paramètres, nous avons décidé de représenter seulement les résultats d'analyse de pH (figure 4), CEC (figure 5) et pierrosité (figure 6). Ce choix vient du fait que ce sont les seuls résultats ayant été obtenus, à cette date, pour tous les types d'occupation de sol végétalisés.



**Figure 4 : Représentation graphique des indicateurs de pH et d'échelle de réponse à HCl**



**Figure 5 : Représentation graphique de la CEC des sols des jardins potagers et es arbres d'alignements**



**Figure 6 : Représentation graphique de la pierrosité en fonction des occupations du sol**

# IV. Interprétation des résultats

Dans cette partie, nous avons cherché à caractériser les résultats d'analyses de 3 paramètres : la pierrosité, le pH et la CEC, afin de pouvoir diagnostiquer l'état de fertilité et de toxicité des différentes occupations des sols végétalisés et de les comparer entre elles.

## 1. La pierrosité

Le pourcentage de fraction grossière (soit les éléments de taille supérieure à 2 mm) est le plus important pour les sites d'arbres d'alignement (dépassant les 40 %) (figure 6). Ces résultats sont de plus significativement différents de ceux des jardins potagers pour lesquels le pourcentage de fraction grossière est très faible (entre 0 et 10-20 %). On peut remarquer que pour les autres occupations de sols, les résultats restent inférieurs à ceux des arbres d'alignement bien qu'ils ne soient pas différents de façon significative : par exemple pour les friches urbaines, on atteint les 30 %.

Ceci nous indique donc que dans le cas des sites d'arbres d'alignement, il est difficile pour les racines de se développer, d'autant plus qu'à la quantité importante de fraction grossière se rajoute d'éventuelles canalisations ou tuyaux qui rendent ce processus encore plus compliqué. Ceci peut poser problème compte tenu de la rhizosphère importante que les arbres possèdent en général. Cette situation est aussi rencontrée dans les friches urbaines, dans une moindre mesure. Une évapotranspiration diminuée est aussi attendue dans ces occupations. Au niveau des parcs et des jardins au contraire, on note en général une faible pierrosité, ce qui va avec le fait que la terre utilisée est souvent travaillée ou importée (terreau pour les jardins) afin de faire pousser la végétation plus facilement.

## 2. Le pH

On peut noter que pour les terres d'arbres d'alignement et de jardins potagers, le pH est en majorité faiblement alcalin ou alcalin, ce qui ne nécessite aucun chaulage (figure 4). En outre on remarque que le pH était alcalin voire très alcalin (jusqu'à 8,7 pour les arbres d'alignement), ce qui ne correspond pas au pH optimum pour la croissance de la majorité des espèces cultivées (entre 6,8 et 7,2) ; une végétation adaptée devrait être introduite. Ce pH alcalin correspond de plus à un sol urbain calcaire.

En revanche, pour les terrains de sport, les cimetières et les friches urbaines, on observe un pH plutôt acide. Les mesures ne sont pas assez précises (observation d'effervescence) pour savoir si des éléments comme l'aluminium peuvent poser problème, mais un chaulage peut être nécessaire. Il est également probable que les oligo-éléments tels que le fer, le zinc et le cuivre soient disponibles en quantité plus importante dans ces sols à pH plus acide ce qui pose des problèmes de toxicité.

### 3. La CEC

Bien que les résultats d'analyse de la CEC ne soient pas significatifs (recoupement des barres d'erreur sur les graphiques) (figure 5), il ressort que les terres de sites d'arbres d'alignement comme les terres de surface de jardins potagers ont une CEC élevée (comprise entre 15 et 25), les sols des arbres d'alignement ayant une CEC légèrement supérieure toutefois. Cela indique que les sols de ces deux usages sont présentent des teneurs élevées en argiles et en matières organiques, ce qui est favorable à la croissance des végétaux. Les valeurs restent néanmoins peu significatives car pour un même type d'usage, les jardins potagers par exemple, la variabilité inter-échantillons est très grande (écart-type élevé). En effet, les valeurs de CEC varient dans ce cas de 7 à 35 mole/kg.

De manière générale, on a pu observer que les conditions de vie des plantes sont compatibles avec leur croissance. Même si les sols subissent une anthropisation marquée, ils restent tout de même globalement fertiles vis à vis des critères étudiés. D'autre part, il est vrai les sols présentent des caractéristiques pH-CEC-pierrosité différentes, même au sein d'un même type d'occupation du sol. Ces variations s'expliquent par la diversité de ces sols liés à la roche mère et aux processus de pédogénèse dont ils sont issus.

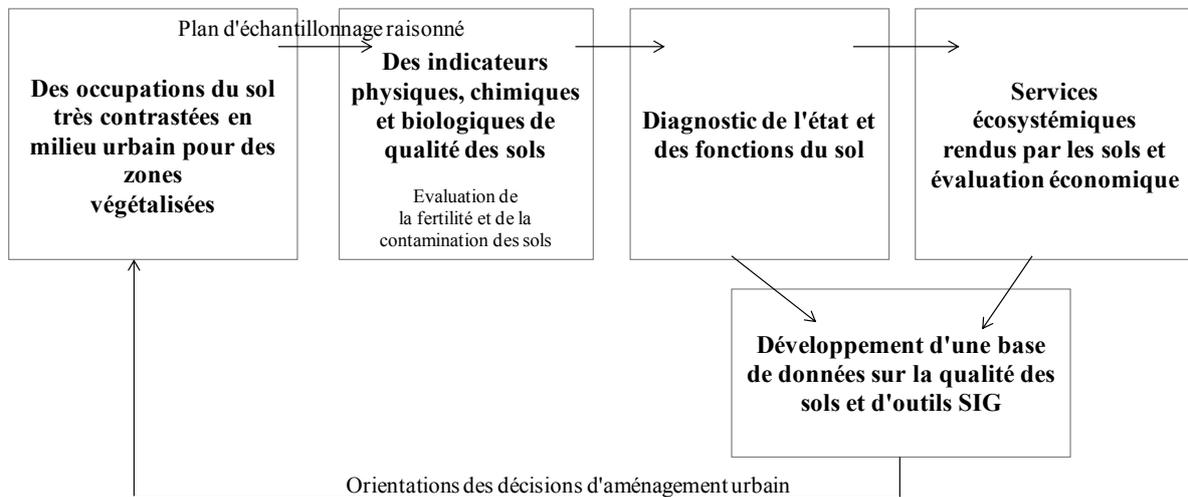
Ceci étant, les résultats des arbres d'alignement, des jardins potagers et ceux restants à obtenir sur les autres sols échantillonnés n'ont pas été obtenus en suivant exactement le même protocole. En effet, les analyses des sols d'arbres d'alignement ont été réalisées par les élèves du projet tant dis que les analyses des sols des jardins potagers ont été réalisées par un laboratoire d'analyse. De plus, la méthode de prélèvement d'échantillon sur le terrain n'était pas la même pour les 3 groupes ; il n'y a pas eu de consensus préalable, les attentes des différents projets professionnels n'étant pas les mêmes et les résultats des jardins potagers ayant été étudiés l'année précédente. Ainsi, les horizons prélevés n'ont pas toujours la même profondeur et les échantillonnages n'ont pas été réalisés à la même période de l'année, ceci ayant une influence sur le pH notamment. Ces résultats ne sont par conséquent pas absolus bien qu'ils restent comparables. De plus, compte tenu de la portée restreinte de cette étude, le nombre d'échantillons est suffisamment élevé afin de mettre en évidence des différences de fertilité pour les occupations variées des sols étudiés.

## V. Conclusion

Nous avons constitué une base de données de caractéristiques physico-chimiques de sols qui répond à un objectif de meilleure connaissance de la qualité et de la diversité des sols urbains dans le Grand Nancy. Au choix de 10 parcs et jardins répartis sur le territoire la Communauté Urbaine, dans lesquels nous avons collecté des échantillons de terres de surface, se sont ajoutés différents types d'usage des sols, de façon à compléter notre échantillonnage : 33 jardins associatifs, 37 arbres d'alignement, 6 terrains de sport et de loisir, 3 cimetières, 2 friches urbaines et 10 parcs et jardins. Ce sont ainsi 91 échantillons répartis dans toute la Communauté Urbaine qui ont été étudiés. Des analyses de ces sols, plusieurs résultats ressortent. Ils permettent d'émettre diverses hypothèses quant à la qualité des sols Grand Nancéens. En premier lieu, on remarque du point de vue de la teneur en éléments grossiers, une faible fertilité des sols occupés par des arbres d'alignement. Ceci est expliqué par l'emplacement de ces arbres : situés en ville, le sol dans lequel ils se développent est tassé, jamais labouré et aux éléments caillouteux s'ajoutent la matière technogénique. Leur développement est néanmoins facilité par la texture et le pourcentage en matière organique des sols couverts par ce type d'usage, ce dont témoigne une CEC élevée. De l'analyse du pH il ressort une évidence : les sols sont alcalins puisque les zones urbaines sont généralement implantées sur des roches mères calcaires. De ce fait, la végétation devrait être sélectionnée en conséquence avec une majorité de plantes et espèces ligneuses alcalinophiles qui devraient dominer, ce qui n'est pas toujours le cas. Enfin, il n'est pas exclu que les sols urbains soient contaminés par des substances toxiques pour les plantes, notamment des excès d'oligo-éléments dans certains sols acides.

# VI. Perspectives

Dans un premier temps, les échantillons que nous avons préparés au cours de l'année seront envoyés pour analyse. Les résultats qui nous parviendront seront ajoutés à la base de données. Une fois que nous aurons obtenus l'ensemble des résultats, nous serons aptes à rendre compte de l'état des sols du Grand Nancy. Cela permettra par la suite de déterminer les fonctions des sols, les services écosystémiques qu'ils rendent et leur valeur monétaire. Celle-ci sera déterminé non plus en terme de valeur immobilière mais en terme de service écosystémique rendu en ayant connaissance des caractéristiques du sol. L'ensemble de ces données pourront être réuni dans une base SIG constituant un outil d'aide à la décision pour les futurs plans d'aménagement urbain.



**Figure 4 : Schéma résumant l'avancé future du projet**

# Bibliographie

- . Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), 2008. Synthèse de l'enquête sur la gestion des cimetières adhérents au SIFUREP. 1-4p.
- . S. Barles, D. Breyse, A. Guillerme, C. Leyval, 1999. Le Sol urbain. Collection VILLES, 11p.
- . R. Calvet, 2003. Le sol : Propriété et fonctions, Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques, Applications agronomiques et environnementales. Dunod.
- . E. Corbera, C. Gonzalez Soberanis, K. Brown, 2009. Institutional dimensions of Payments for Ecosystem Services: An analysis of Mexico's carbon forestry programme, *Ecological Economics* 68, 743-761p.
- . Ecovegetal, 2002. <http://www.ecovegetal.fr/toitures-vegetales/concept.html> (Page consultée le 11 janvier 2015).
- . C.-M. Gillig, C. Bourgerie, N. Amann, 2008. L'arbre en milieu urbain : conception et réalisation des plantations. *Infolio*, 20-25p.
- . M.-C. Girard, C. Walter, J.-C. Remy, J. Berthelin, J.-L. Morel, 2005. Sols et environnement. Dunod, 25-28. 221-222. 222-224. 224-225. 226-227. 228p.
- . R. De Groot, 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst. Serv.* 1, 50–61 p.
- . R. S. De Groot, R. Alkenrade, L. Braat, L. Hein, L. Willemsen, 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*.
- . Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol), 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Chromatiques éditions, 2p.
- . D. Hillel, 2008. Soil in the environment Crucible of terrestrial life. ACADEMIC PRESS, 55-75, 103-105, 135-145, 151, 163-173p.
- . S. Wunder, 2007. The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation.
- . S. Wunder *et al*, 2008. Taking Stock : A Comparative Analysis of Payments for Environmental Services Programs in Developed and Developing Countries.
- . Université de Nice Sophia-Antipolis (UNS), 2008. La dégradation des sols dans le monde, [En ligne]. <http://unt.unice.fr/uoh/degsol/fertilite-chimique.php> (Page consultée le 16 mai 2015).
- . µTime : Fragments pour une écologie étendue, 13 septembre 2009. Ressource en eau, [En ligne]. <http://utime.unblog.fr/category/notions-decologie/leau/page/2/> (Page consultée le 16 mai 2015).
- . WikiLCA, 9 août 2010. La capacité d'échange en cation, [En ligne]. [http://wiki.laboratoirelca.com/index.php/La\\_Capacit%C3%A9\\_d'%C3%A9change\\_en\\_Cations](http://wiki.laboratoirelca.com/index.php/La_Capacit%C3%A9_d'%C3%A9change_en_Cations) (Page consultée le 16 mai 2015).

# Annexes

## Annexe 1

Planche des vues d'ensemble des lieux de prélèvement dans les parcs, terrains de sport, cimetières, friches urbaines et jardins potagers





Promenade Emilie du Châtelet (sol 8)



Parc Charles III (sol 9)



Friche urbaine : Division de Fer (sol 10)



Parc Olry (sol 11)



Stade de la Toulouse (sol 12)



Stade de la Plaine Flageul (sol 13)



Stade Matter (sol 14)



Parc de la cure d'air (sol 15)



Parc du Belvédère (sol 16)



Cimetière de Préville (sol 17)



Parc de Montaigu (sol 18)



Cimetière du Sud (sol 19)



Parc des sports de Vandoeuvre (sol 20)



Hippodrome de Brabois (sol 21)



Cimetière de la Sapinière (sol 22)



Jardins familiaux (Malzéville)



Jardins familiaux (Jarville)



Jardins familiaux (Laneuveville)

Crédit : Sophie Joimel

Crédit : Sophie Joimel

Crédit : Sophie Joimel



Jardins familiaux (Maxéville)

Crédit : Sophie Joimel



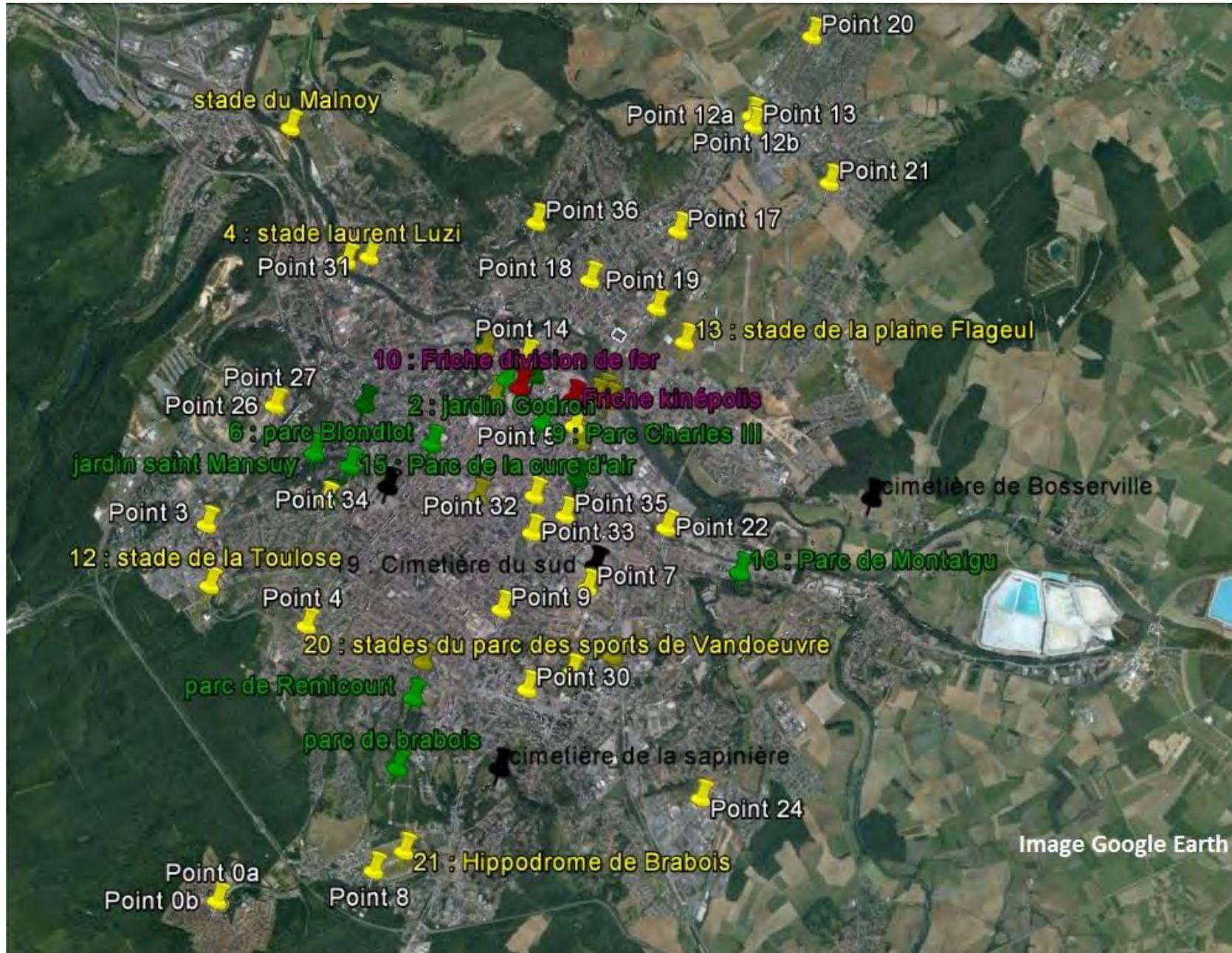
Jardins familiaux (Seichamps)

Crédit : Sophie Joimel



Jardins familiaux (Heillecourt)

Crédit : Sophie Joimel



# Sols urbains, Terres inconnues ?

*Synthèse bibliographique*



Eléonore Mephane  
Clémence Monot  
Laura Paire  
Claire Pascaretti  
Jonathan Soeima

---

Tuteur : Christophe Schwartz

En partenariat avec Le Grand Nancy

Projet pro- 1<sup>ère</sup> année ENSAIA - 2014/2015

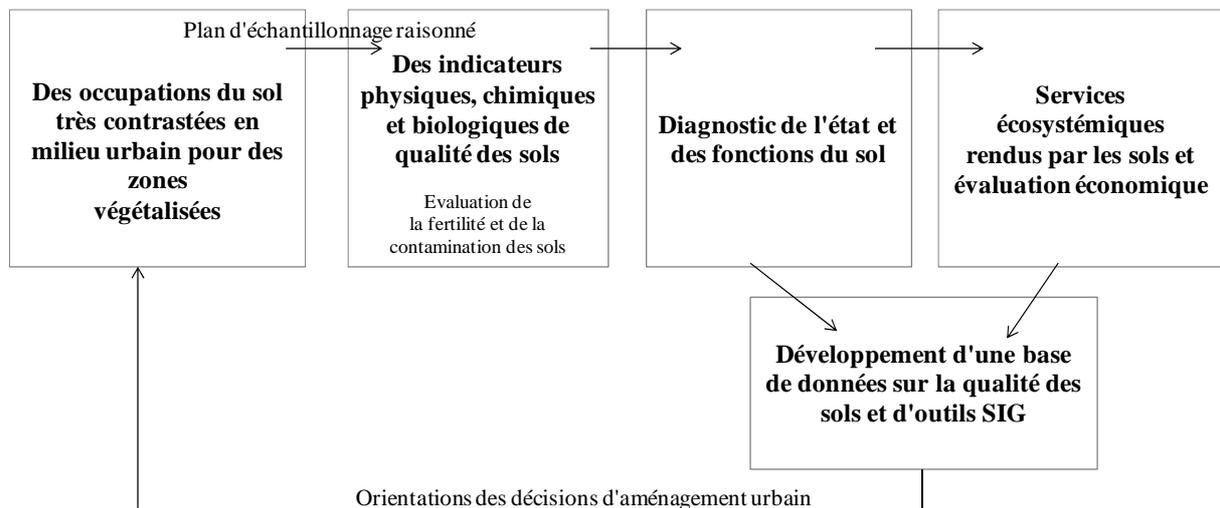
# Sommaire

Introduction	1
I. Les services écosystémiques liés au sol urbain	2
1. Définitions	2
a. L' écosystème	2
b. Les services écosystémiques	2
c. Les fonctions écosystémiques	3
2. Les services écosystémiques dans la société	3
a. Exemples de services écosystémiques dans le cadre des sols	3
b. Une prise en compte possible des services écosystémiques dans les sociétés	4
II. Les sols urbains : caractéristiques, occupations, fonctions, services rendus	5
1. Qu'est que le sol ?	5
a. Définition du sol	5
b. Les sols dans les villes	6
c. Les sols urbains végétalisés	6
2. Quelles sont les occupations des sols urbains végétalisés ?	7
a. Les sols des arbres d'alignements	7
b. Les sols des espaces verts	7
c. Les sols des terrains de sport	7
d. Les sols des cimetières	8
e. Les sols des jardins potagers	8
f. Les toitures végétales	8
g. Les sols des friches urbaines	8
3. Quelles sont les occupations des sols urbains végétalisés ?	9
III. Choix des indicateurs et méthodes d'analyses	10
1. Sélection d'indicateurs et analyses	10
a. Critères de sélection des indicateurs	10
b. Caractéristiques et rôle des indicateurs de qualité des sols, méthodes d'analyses	10
2. Réalisation d'un échantillonnage adapté aux analyses à réaliser et respectant les normes	15
a. Réalisation d'un plan d'échantillonnage	15
b. Méthodes de prélèvement et conditionnement des échantillons	16
IV. Bases de données et systèmes d'information géographique sur les sols urbains	17
1. Conception d'une base de données sur les sols urbains	17
a. Choix des zones de prélèvement	17
b. Conception d'une base de données	17
2. Représentations du sol	18
a. La cartographie	18
b. Représentation à l'aide d'un système d'information géographique	19
V. Vers une évaluation économique des services écosystémiques	21
1. Généralités	21
a. Pourquoi monétariser ?	21
b. Comment monétariser ?	21
2. L'analyse économique par les PSE	22
a. Origine du terme et définition	22

b. Les différents types de programmes de PSE	22
c. Particularités de la monétarisation des services en zone urbaine	23
d. Limites aux paiements	24
3. Résultats (prix des écosystèmes) pour quelques exemples de PSE	24
Conclusion	26

# Introduction

La population mondiale augmente et se dirige vers les villes de telle sorte qu'en 2014, plus de 54% des habitants de la planète occupent des zones urbaines. De ce fait, on constate une artificialisation croissante des territoires et ainsi une diminution des surfaces végétalisées, en particulier agricoles et forestières. Dans ce contexte, il est question de limiter l'étalement urbain et aussi de développer la végétalisation des villes. Les plantes en milieu urbain peuvent en effet, rendre des services à l'Homme, comme la régulation de la pollution atmosphérique, la régulation des îlots de chaleur urbains ou encore l'approvisionnement en biomasse alimentaire. Ces services sont indispensables à la création et au maintien d'une qualité de vie élevée dans des environnements urbains. Ces bénéfices que l'on appelle aussi services écosystémiques sont en particulier rendus par le sol et dépendent de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. C'est pourquoi les sols urbains font de plus en plus l'objet d'études visant à mieux connaître leurs caractéristiques, leur aptitude à assurer des fonctions de support de biodiversité, de support .végétation ou encore des fonctions de filtre et d'échange. Ces fonctions sont alors en lien étroit avec les potentialités des sols urbains en termes de fourniture de services écosystémiques. Comment sont alors caractérisés les sols urbains et les services qu'ils rendent dans la littérature ? Tout d'abord, nous définirons la notion de services écosystémiques ainsi que celle de sols urbains. Nous détaillerons ensuite les méthodes et outils de caractérisation de ces sols pour une meilleure connaissance de leur fertilité et de leur contamination potentielle. Puis nous décrirons les approches envisagées pour représenter les données caractéristiques des sols urbains, en décrivant des modes de représentation cartographique. Pour finir, nous présenterons les avancées récentes en terme de monétarisation des services rendus par les sols (figure 1).



**Figure 1 : Schéma introductif de la bibliographie**

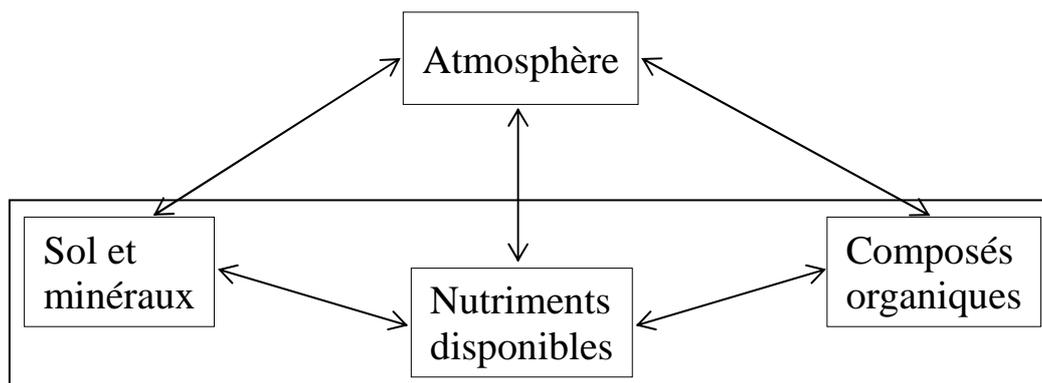
## I. Les services écosystémiques liés au sol urbain

Avec l'intérêt croissant des sociétés pour l'environnement, il est devenu nécessaire d'introduire de nouvelles notions correspondant aux relations entre les Hommes et les écosystèmes. Ainsi, à partir des années 1990 est apparu le besoin d'inclure l'Homme dans les écosystèmes et de considérer ses liens avec la nature et ses composantes. On s'est ensuite intéressé dans les années 2000 plus particulièrement à ce qui est bénéfique pour l'Homme, dans le but d'améliorer ses conditions de vie tout en tenant compte de l'environnement. Cette notion étant récente, il existe encore peu d'études sur le sujet et il y a beaucoup de débats sur ses définitions et ses limites. En particulier, les études sur les services écosystémiques en milieu urbain se font rares en comparaison avec d'autres milieux forestiers, marins ou agricoles, alors que l'urbanisation dans le monde entier reste un phénomène en croissance perpétuelle.

### 1. Définitions

#### a. *L' écosystème*

A la base, un écosystème comporte un environnement physique et des organismes vivants ainsi que les relations existant entre eux (figure 2). A partir de ces relations, qui peuvent avoir des propriétés différentes, il existe différents écosystèmes, de tailles et d'importances apparentes différentes (Pickett *et al*, 1997).



**Figure 2 : schéma simplifié d'un écosystème de base**

(d'après Likens, 1992 ; Pickett *et al*, 1997)

Le désir de définir et d'étudier les services écosystémiques vient de la prise de conscience que l'Homme fait lui aussi partie d'un écosystème à part entière, formé d'un système social et d'un système de ressources qui est directement lié aux ressources écosystémiques. L'Homme est de plus un élément des écosystèmes, puisqu'il est capable de construire des structures et de manipuler son environnement (Machlis *et al*, 1997).

#### b. *Les services écosystémiques*

La notion de services écosystémiques est devenue cruciale en 2005 dans l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire, bien qu'elle soit apparue une trentaine d'années auparavant. Les services écosystémiques sont rendus à l'Homme (notamment aux sociétés, aux économies et aux ménages) par un écosystème. Ils sont souvent définis comme des bénéfices qui profitent à la société et apportent du bien-être aux êtres humains.

Cependant, cette notion étant relativement nouvelle, les avis sont partagés sur la nature d'un service écosystémique et les limites de sa définition. Pour certains, un service écosystémique rendu à un endroit précis peut être différent selon le bénéfice que l'on obtient. Dans le cas de la pêche (loisir), le service rendu pourrait être l'abondance de poissons (Boyd et Banzhaf, 2007).

### c. Les fonctions écosystémiques

Les fonctions écosystémiques regroupent les processus écologiques qui rendent le service (ou influencent sa disponibilité). Elles comportent ainsi toutes les interactions physiques, chimiques et biologiques se produisant dans l'écosystème et qui permettent de rendre des services écosystémiques. Ce sont donc des intermédiaires aux bénéfices rendus par l'écosystème (Boyd et Banzhaf, 2007). Là encore, les opinions divergent sur la nature des fonctions qui peuvent également être considérées comme des services – dans le cas de la régulation du climat et de la température, on peut se demander en effet si l'ombre offerte par de la végétation est une fonction de l'écosystème, puisqu'elle entraîne une baisse de la température – qui serait ainsi le service recherché, ou un de ses services (communication personnelle, 2014).

## 2. Les services écosystémiques dans la société

### a. Exemples de services écosystémiques dans le cadre des sols

Les services écosystémiques qui peuvent être rendus par les sols sont extrêmement étendus, du fait de la présence d'une faune et d'une flore variées se développant au sein du sol (tableau 1). De plus, la végétation, dont le support de croissance est le sol, offre une grande palette de services, que ce soit en milieu agricole, forestier ou urbain. La très grande partie de ces services écosystémiques concerne également les sols urbains, car ils sont eux aussi support d'une végétation et d'une faune développées, mais les études sur ce milieu restent beaucoup moins nombreuses que sur d'autres sols.

Services écosystémiques et exemples	Fonctions
<p><i>Approvisionnement :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en nourriture,</li> <li>- en eau,</li> <li>- en matières premières,</li> <li>- en produits biochimiques,</li> <li>- en matériel génétique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Présence de plantes et d'animaux comestibles,</li> <li>- Présence de réserves d'eau,</li> <li>- Présence d'espèces ou de composants abiotiques avec un usage potentiel pour le bois, le carburant ou des matières premières,</li> <li>- Présence d'espèces ou de composants abiotiques avec des molécules utiles ou un usage médical potentiel</li> </ul>
<p><i>Régulation :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- de la qualité de l'air,</li> <li>- du climat (dont des atténuations de catastrophes naturelles),</li> <li>- de l'eau,</li> <li>- traitement des déchets,</li> <li>- protection contre l'érosion,</li> <li>- formation et régénération du sol,</li> <li>- pollinisation,</li> <li>- régulation biologique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité des écosystèmes à extraire des aérosols et des agents chimiques de l'atmosphère,</li> <li>- Influence des écosystèmes sur le climat local et global à travers l'écorce terrestre et des processus biologiques,</li> <li>- Rôle de la végétation dans l'atténuation d'événements extrêmes (i.e. protection contre des dommages causés par des inondations),</li> <li>- Rôle de la végétation dans l'infiltration et la libération progressive de l'eau,</li> <li>- Rôle de processus biotiques et abiotiques dans la disparition ou la destruction de matière organique, de nutriments et de composés,</li> <li>- Rôle de la végétation dans la rétention du sol, rôle</li> </ul>

	des processus naturels dans la formation et la régénération du sol, - Abondance et efficacité des pollinisateurs, - Contrôle des populations nuisibles à travers des relations trophiques
<i>Habitat et support de la diversité génétique :</i> - habitat primordial, - protection de la diversité génétique.	- Importance des écosystèmes pour fournir des habitats pour la reproduction, l'alimentation ou le repos des espèces en transit, - Maintenance d'une balance écologique et de processus évolutifs donnés
<i>Culture, loisirs et identité :</i> - appréciation d'un paysage naturel, - opportunités touristiques et loisirs, - inspiration pour la culture, - l'art et le design, - héritage et identité culturels, - inspiration spirituelle et religieuse, - éducation et science.	- Qualité esthétique du paysage, basée sur la diversité structurelle, la «verdure», la tranquillité, - Caractéristiques du paysage, faune attirante, - Caractéristiques du paysage ou espèces ayant valeur d'inspiration pour les arts humains, etc., - Traits du paysage ou espèces culturellement importants, - Traits du paysage ou espèces avec une valeur religieuse et spirituelle, - Caractéristiques ayant un intérêt/ une valeur éducatif(ve) et scientifique spécifiques

**Tableau 1 : Récapitulatif des services écosystémiques**

(d'après De Groot *et al*, 2010)

En considérant l'urbanisation croissante dans le monde entier, les services écosystémiques, et notamment ceux concernant les milieux urbains paraissent indispensables aux futures décisions d'aménagement urbain en particulier.

*b. Une prise en compte possible des services écosystémiques dans les sociétés*

La question de l'environnement devenant de plus en plus importante, les services écosystémiques devraient eux aussi être mieux connus par ceux qui en bénéficient. Pourtant, peu de méthodes scientifiques, en comparaison avec d'autres notions environnementales, ont été mises en œuvre pour les évaluer et mieux les comprendre. Il existe notamment, pour évaluer ces services de façon efficace, un besoin de leur donner une valeur économique, pour pouvoir les rémunérer, et trouver un prix juste. De plus, dans les prises de décision, que ce soit à l'échelle des Etats ou du Monde, le service écosystémique le plus cité est l'approvisionnement en nourriture. Ceci implique que beaucoup d'autres services écosystémiques sont négligés, alors qu'ils sont tout autant indispensables aux Hommes. En impliquant les services écosystémiques dans les prises de décision – ce qui signifierait qu'ils soient également mieux connus, - on pourrait aboutir à de meilleurs scénarios qui eux-mêmes permettraient de meilleures décisions, en particulier concernant l'utilisation des terres et de l'eau (Daily *et al*, 2009).

**Conclusion :**

Les services écosystémiques sont extrêmement nombreux et variés et prennent de plus en plus d'importance au niveau des décisions d'aménagement du territoire. Il est important de remarquer que les services écosystémiques dépendent d'indicateurs et de caractéristiques influant sur les fonctions écosystémiques, faisant ainsi du type de sol étudié un facteur majeur de leur étude, afin qu'ils profitent au maximum aux Hommes. Il est de plus devenu essentiel de pouvoir quantifier et donner une valeur à ces services écosystémiques, afin d'inclure l'avis des citoyens dans les décisions des villes concernant leur aménagement et de donner à ces services un poids plus marqué au niveau des décisions politiques par exemple.

## II. Les sols urbains : caractéristiques, occupations, fonctions, services rendus

Le sol est un environnement méconnu par l'Homme. Il est souvent uniquement conçu comme support (Barles *et al*, 1999). Pourtant il est le principal producteur de ressources naturelles et un maillon important dans les cycles de régulation de l'eau, du carbone et de l'azote (Gis Sol, 2011).

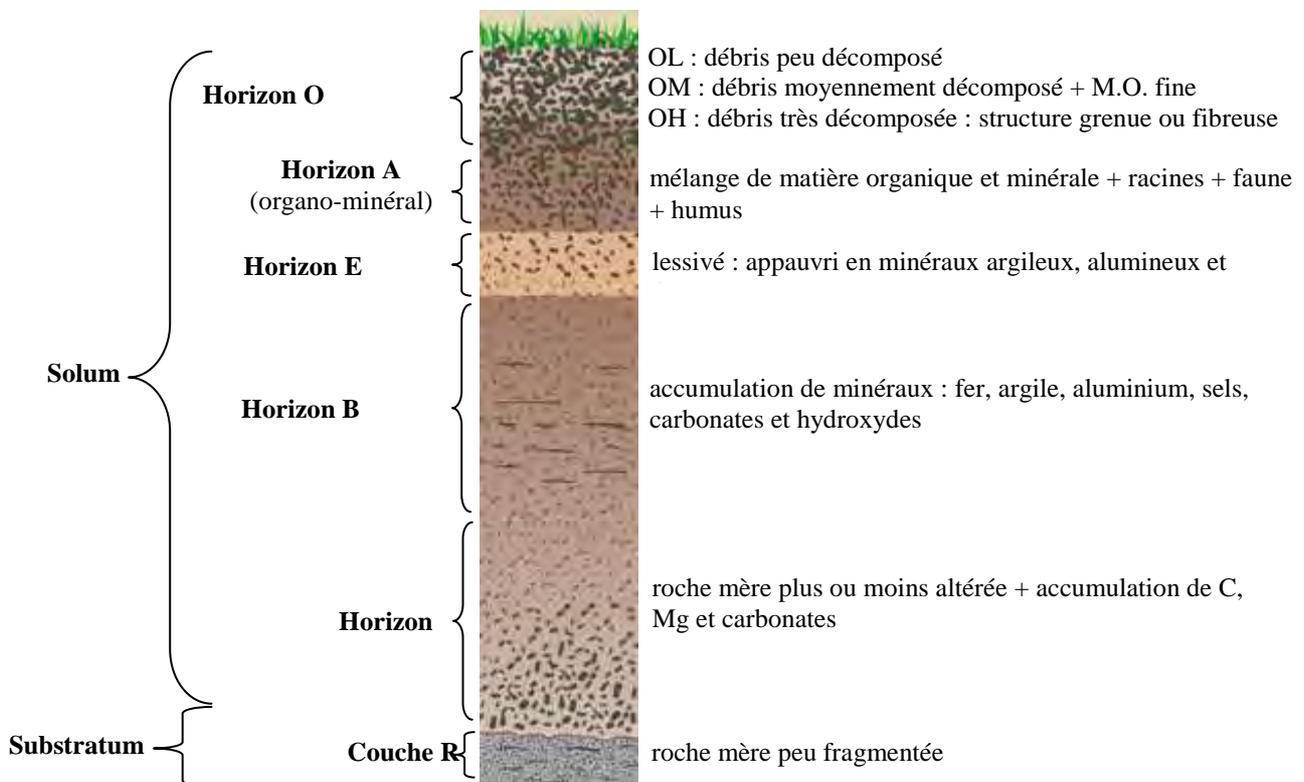
### 1. Qu'est que le sol ?

#### *a. Définition du sol*

Le sol est la couche superficielle continentale s'étendant de plusieurs mètres en profondeurs formée par pédogénèse, c'est-à-dire par l'altération des roches sous l'action de divers facteurs : climat, topographie, activités biologiques, activités anthropiques... (Gis Sol, 2011). Il est constitué de 3 phases (Girard *et al*, 2005) :

- une phase solide : elle contient 2 fractions de matériaux mélangées : une fraction d'éléments minéraux (argiles, sables, graviers, blocs de roche) provenant de l'altération de la roche mère sous-jacente et une fraction de matières organiques principalement issues des biomasses ;
- un phase liquide : appelée solution du sol, elle contient des substances dissoutes et particulaires ;
- une phase gazeuse : appelée l'atmosphère du sol, elle a souvent la même composition que l'air.

La composition du sol évolue de la surface vers la profondeur, on parle d'hétérogénéité verticale des sols. Le développement des sols se fait alors en bandes ou couches que l'on appelle horizons (figure 3). L'ensemble de ces horizons définit un profil pédologique (Calvet, 2003).



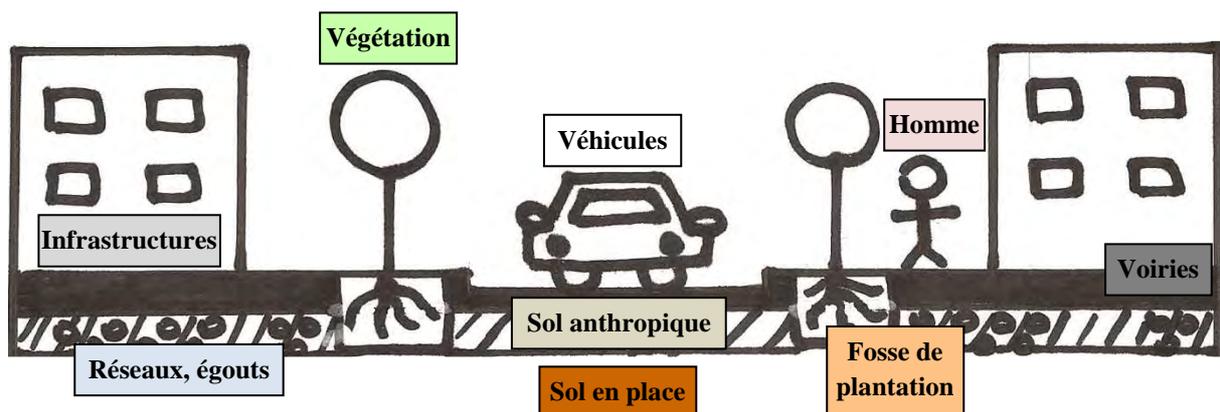
**Figure 3 : Schéma d'un profil pédologique et de ses horizons**  
(d'après Baize et Girard, 2008 ; Girard *et al*, 2005 ; UNS, 2008)

On distingue 2 types de sols (Calvet, 2003) :

- les sols naturels : ce sont des sols ayant subis peu de modification excepté par des pratiques culturales. Ils sont situés en milieu rurale ou forestière.
- les sols fortement modifiés par les activités humaines : ce sont des sols constitués d'un mélange de sols et de minéraux artificiels. Ils sont soit recouvert d'une couche imperméable comme le bitume ou d'une couche végétale comme les friches urbaines. Ce sont des sols urbains. On parle d'Anthrosols ou de Technosols suivant les référentiels français ou international des sols.

### b. Les sols dans les villes

Les sols urbains sont des sols dits anthropisés, c'est-à-dire modifié par des activités humaines (figure 4) : urbanisation, industrialisation et végétalisation (Girard *et al*, 2005). Ils sont alors constitués de graviers, cailloux, pierres, blocs, mélangés à des éléments terreux et des réseaux (électriques, eaux), atteignant 6 à 10 m (Barles *et al*, 1999). Il faut citer deux types d'anthropisation (Girard *et al*, 2005) : certains sols sont recouverts de matériaux de construction ou de démolition (gravats, bitume) et d'autres de végétaux d'ornement (parcs) ou comestibles (jardins potagers). Cette anthropisation est plus forte au fur et à mesure qu'on se rapproche du centre des villes. Ainsi les sols présentent différents usages, occupations et caractéristiques selon leur localisation dans et en périphérie des villes. Ces sols ont été modifiés au court des siècles au fur et à mesure des transformations historiques des villes.



**Figure 4 : Schéma du sol dans son contexte urbain**  
(d'après Girard *et al*, 2005)

### c. Les sols urbains végétalisés

Les sols végétalisés les plus présents en ville sont les sols des parcs, des jardins potagers et des pieds d'arbres (Girard *et al*, 2005). Ils ont une épaisseur allant de 30 cm pour les végétations basses à 80 cm pour les arbres. Ces sols sont souvent chimiquement pauvres, sans forte réserve nutritionnelle, compactés, imperméables et asphyxiants. Ils ne permettent ainsi pas un développement optimum des végétaux. Les sols végétalisés que l'on voit dans les villes sont alors souvent des sols reconstitués ou construits. Le modèle utilisé est celui des sols fertiles ayant des caractéristiques compatibles avec le développement des végétaux. sont formés d'un mélange de matériaux minéraux artificiels organiques et minéraux (compost de déchets verts, boues de station d'épuration, gravats). Bien que ces mélanges puissent être favorables à la fertilité du sol au niveau de l'horizon de surface, son transport et sa mise en place entraîne des risques de détérioration qui diminue la qualité du sol installé.

## 2. Quelles sont les occupations des sols urbains végétalisés ?

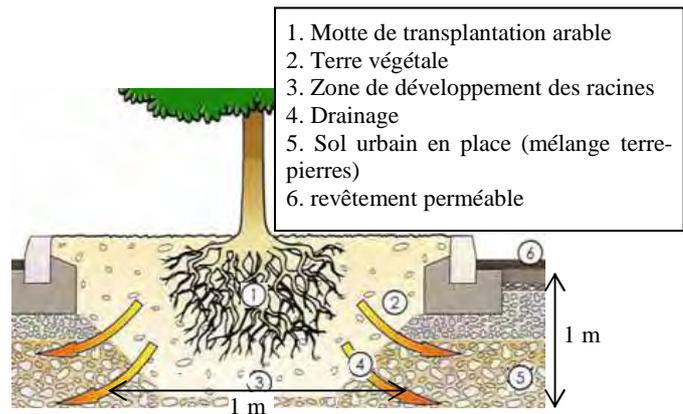
L'occupation des sols correspond à la nature de la surface physique et biologique de ces sols. Cette occupation reflète essentiellement le type d'usage mis en place par l'Homme. On dénombre 7 types majeurs d'occupation des sols en lien avec la végétation.

### a. *Les sols des arbres d'alignements*

Les arbres d'alignements sont présents dans les parcs, sur les trottoirs et le long des voies de circulation (Girard *et al*, 2005 ; Gillig *et al*, 2008). Ils sont très souvent plantés dans des fosses de plantation allant d'1 m<sup>2</sup> de surface sur les trottoirs à plusieurs m<sup>2</sup> dans les parcs (figure 5 et 6).



**Figure 5 : Photo d'arbres d'alignement**  
(Lessard, Boulfroy, 2008)



**Figure 6 : Schéma du sol sous un arbre de trottoir**  
(d'après Gillig *et al*, 2005 ; Girard *et al*, 2008)

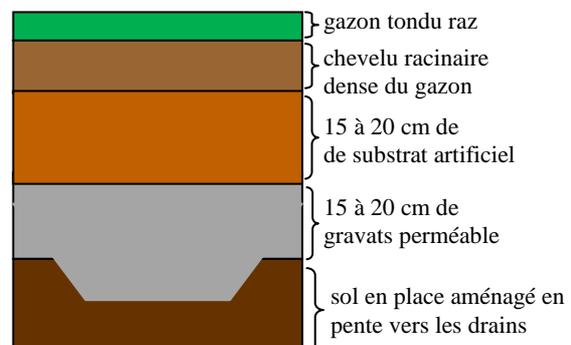
### b. *Les sols des espaces verts*

Les sols des espaces verts sont présents sous les plates-bandes des parcs, sous les pelouses ou dans les squares. Ils ont des propriétés contrastées en termes de compacité et de profondeur des différents horizons (Girard *et al*, 2005). De manière générale, on y retrouve :

- dans les premiers centimètres, une terre végétale mélangée ou non à un compost (limon sableux et racines mortes) qui est très poreuse et contient de petites racines ;
- en-dessous, un limon sableux compact et tassé qui est donc peu poreux. L'état sanitaire des racines moyennes y est faible.
- jusqu'à plus d'un mètre, un limon sableux poreux avec des racines moyennes plongeante et une activité biologique détectable.

### c. *Les sols des terrains de sport*

Les sols des terrains de sport sont aménagés de telle sorte qu'ils résistent aux intempéries pour qu'ils puissent être praticables quelque soit le temps (figure 7) (Girard *et al*, 2005).



**Figure 7 : Schéma du sous-sol d'un terrain gazonneux**  
(d'après Girard *et al*, 2005)

d. *Les sols des cimetières*

Les cimetières sont généralement situés en zone urbaine et périurbaine (APUR, 2008). Leurs sols végétalisés ont les mêmes caractéristiques physiques, chimiques et biologiques que ceux des parcs. Ils sont constitués de terre, sable, graviers et béton en profondeur, de pavés, dalles et d'une couverture végétale en surface (figure 8).



**Figure 8 : Schéma du principe d'organisation d'un cimetière au sein d'une ville** (APUR, 2008)

e. *Les sols des jardins potagers*

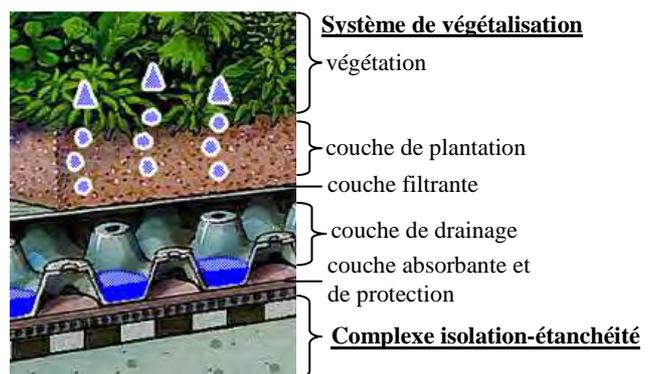
Les sols des jardins potagers sont situés dans des jardins privés et partagés (Girard *et al.*, 2005). On y pratique une agriculture intensive rendant le sol hautement fertile par l'apport d'engrais et d'amendements.

f. *Les toitures végétales*

Les toitures végétales sont des solutions récemment mises en place dans les villes pour lutter contre la perte de nature (Ecovegetal, 2002). Elles sont globalement constituées de deux grandes structures : une partie végétale et une partie servant à l'isolation et l'étanchéité (figure 9 et 10).



**Figure 9 : Photographie d'une toiture d'un immeuble de Paris** (Rejue, 2013)



**Figure 10 : Schéma du sous-sol d'une toiture végétale** (d'après Ecovegetal)

g. *Les sols des friches urbaines*

Les friches urbaines sont des terrains abandonnées en ville dans l'attente d'être reconvertis (bâtiment, plateforme de livraison, square). Ils sont situés en périphérie urbaine (Medde, 2011). Peu d'études ont été réalisées sur le sol des friches urbaines. Néanmoins, certaines de ses friches ont un sol pollué comme pour les friches industrielles.

### **3. Quelles sont les fonctions et les services écosystémiques rendus par les sols urbains végétalisés ?**

Les sols ont une utilité pour l'Homme, on dit alors qu'ils rendent des services appelés services écosystémiques. Ces services sont rendus possibles grâce aux différents rôles qu'exerce le sol dans son milieu que l'on appellera : les fonctions du sol. Selon ses occupations, le sol assure des fonctions et des services différents (tableau 2).

	<b>Services</b>	<b>Fonctions</b>	<b>Occupations</b>
<b>Approvisionnement</b>	- nutrition - loisir - éducation	- production végétale	- jardin potagers
	- eau - gaz - électricité	- support de réseaux	- tous types de sols
<b>Régulation</b>	- régulation de la température	- ombrage - absorption de chaleur	- arbres d'alignements - cimetières - espaces verts
	- régulation des nuisances sonores	- support d'arbre à feuillage important	
	- régulation de la qualité de l'air	- photosynthèse - aération	
	- cycles biogéochimiques	- interaction inter-espèces - habitat de micro-organismes - support de végétation	- tous types de sol végétalisés
	- traitement des déchets et purification de l'eau	- cycle et rétention des polluants - support de végétation - support de réseaux d'assainissement	- tous types de sol végétalisés
<b>Protection</b>	- inondation	- infiltration de l'eau - rétention d'eau - support de végétation	- tous types de sol végétalisés
	- érosion - vent - maintien des sols	- support de végétation haute	- arbres d'alignements - cimetières - espaces verts
<b>Habitat, support</b>	- maintien de la biodiversité	- pollinisation - interaction des espèces - diversification des paysages	- tous types de sol végétalisés (sauf les terrains de sport)
	- habitat biologique	- support de végétation	
<b>Cultures et commodités</b>	- loisir - héritage culturel - inspiration religieuse et pour l'art - éducation	- support d'infrastructure - support de végétation - mesure du temps (strates archéologiques)	- cimetières - espaces verts - terrain de sport

**Tableau 2 : Lien entre service écosystémique, fonction et occupation du sol**  
(APUR, 2008 ; Barles *et al*, 1999 ; Calvet, 2003 ; Gillig *et al*, 2008 ; Gis Sol, 2011)

#### **Conclusion :**

Les destructions causées par l'anthropisation des sols sont difficilement réversibles et leur réhabilitation souvent trop coûteuse (APUR, 2008). Ainsi, il est essentiel de diagnostiquer leurs niveaux de fertilité et de contamination afin de les protéger et de mieux connaître leur aptitude à être le support de végétation dans les villes.

### **III. Choix des indicateurs et méthodes d'analyses**

Maintenant que nous connaissons mieux les caractéristiques générales des sols urbains ainsi que les services écosystémiques qu'ils peuvent rendre, nous pouvons décrire la méthode à mettre en œuvre pour établir un protocole d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des sols. Les résultats issus de cette démarche de caractérisation sont destinés à réaliser un diagnostic de la qualité des sols et à déterminer quels sont les services écosystémiques qui peuvent potentiellement être réalisés. Ainsi, un service écosystémique sera associé à un ou plusieurs indicateurs d'état de qualité des sols. Ceci devra nous permettre de cibler les analyses à réaliser et ainsi de limiter les coûts associés.

#### **1. Sélection d'indicateurs et analyses**

L'objectif est de déterminer les indicateurs de qualité des sols en lien avec la réalisation de services écosystémiques donnés. Pour cela, il faut dans un premier temps savoir quel est la signification de chaque indicateur et la manière de l'interpréter dans une phase de diagnostic.

##### *a. Critères de sélection des indicateurs*

Les indicateurs à mesurer doivent être choisis selon différents critères complémentaires :

- la correspondance entre l'indicateur et la fonction du sol que l'on veut étudier (les principales fonctions étant le support de végétation, le support de biodiversité et les fonctions de filtre et d'échange)
- le type d'utilisation du terrain étudié (occupation du sol)
- les techniques d'analyses existantes en considérant le budget disponible et le matériel nécessaire ainsi que la fiabilité des résultats (incertitudes des mesures)
- la superficie de la zone sur laquelle sera réalisé l'échantillonnage.
- la durée de la phase d'échantillonnage car les valeurs de certains indicateurs peuvent varier en fonction du climat ou du type d'utilisation du sol

##### *b. Caractéristiques et rôle des indicateurs de qualité des sols, méthodes d'analyses*

Le sol peut être décrit par de multiples propriétés physiques, chimiques et biologiques (Schindelbeck et al, 2008) qui sont des indicateurs de sa qualité (essentielle en terme de fertilité et de contamination éventuelle). Il existe différentes méthodes permettant d'analyser ces propriétés d'état des sols (tableau 3) et de mettre en lien les résultats avec les fonctions des sols et leur aptitude à rendre des services.

Indicateurs physiques (Hillel, 2008)	Fonctions (Hillel, 2008)	Comment les analyser
<p><b><u>Texture</u></b> = répartition des échantillons de terre suivant la taille des particules les composant</p>	<p>Suivant sa classe de texture :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>= le sol est plus ou moins perméable à l'eau et a donc une capacité de rétention en eau plus ou moins forte</li> <li>= le sol a des pores de taille plus ou grande, les minéraux sont donc plus ou moins soudés entre eux donc plus ou moins facile à éroder</li> </ul>	<p><i>Analyse granulométrique</i> (Baize, 1989) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>= séparation des sables en utilisant la différence de taille (tamis) et séparation des argiles et des limons en utilisant leur différence de densité (vitesse de sédimentation différente en considérant la loi de Stokes)</li> <li>= détermination de la classe de texture à partir des pourcentages d'argiles-limons-sables reportés sur un diagramme de texture (figure 11)</li> </ul>  <p>Figure 11 (<a href="http://www.ecosysteme.fr">www.ecosysteme.fr</a>)</p>
<p><b><u>Stabilité des agrégats</u></b> = les particules élémentaires minérales et organiques des sols s'assemblent pour former des agrégats. Le maintien de leur stabilité dépend de facteurs climatiques (vent, pluie) qui peuvent engendrer leur désassemblage.</p>	<p>Un sol à agrégats stables :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>= favorise l'enracinement</li> <li>= permet l'infiltration de l'eau et une bonne aération et ainsi favorise la respiration aérobie des racines, l'oxydation de la matière organique du sol et la fonction de biodiversité (e.g. micro-organismes) des sols</li> </ul> <p>Une forte stabilité des agrégats limite la sensibilité des sols à l'érosion</p>	<p><i>Calcul de l'indice de stabilité</i> (Baize, 1989) :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. De la terre séchée à l'air est forcée à passer à travers un tamis de 2mm</li> <li>2. la terre restante dans le tamis est divisée en 3 échantillons qui vont subir 3 traitements différents : témoin sans traitement – benzène - alcool éthylique ce qui va permettre de tester la résistance des agrégats et ainsi de déterminer le taux d'agrégats stables pour chaque situation (Age-Agb-Aga)</li> <li>3. la fraction des agrégats inférieurs à 20µm est séparée grâce à un tamis de 0,2mm (A20)</li> <li>4. détermination de différentes catégories de stabilité structurale suivant la valeur de l'indice de stabilité calculé à partir d'Aga, Agb, Age et A20</li> </ol>
<p><b><u>Capacité du sol à retenir l'eau</u></b></p>	<p>Un sol qui retient bien l'eau :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>= permet une bonne alimentation du cycle de l'eau essentiel à la vie de la plante, c'est-à-dire de l'absorption de l'eau du sol par les racines jusqu'à l'évapotranspiration dans l'atmosphère par les feuilles</li> </ul>	<p><i>Détermination du taux d'humidité du sol</i> (Baize, 1989) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>= on mesure le poids d'un échantillon de sol humide tout juste prélevé puis on met l'échantillon à l'étuve pendant un temps donné et à une certaine température. On mesure ensuite le poids du sol sec. La différence entre les deux poids mesurés donne le poids en eau retenu par l'échantillon de terre analysé</li> </ul> <p><i>Détermination des réserves réelles en eau</i> ⇔ eau disponible pour la plante = le taux de réserve dépend de la classe de texture du sol considéré.</p>

<b><u>Dureté de la surface</u></b>	Un sol dur : = rend plus difficile l'enracinement de surface = absorbe plus difficilement les eaux de surface	<i>Test de terrain, pénétrométrie</i>
<b><u>Profondeur du sol</u></b>	Un sol profond : = permet la croissance et la progression des racines dans le profil de sol	<i>Evaluation de la profondeur sur le terrain à partir de la description de profil de sol et de ses différents horizons.</i>
<b><u>Densité</u></b> = état de compaction du sol. Elle renseigne la porosité du sol	Un sol trop dense : = génère des conditions anaérobies car le sol est mal aéré ce qui engendre des réductions chimiques pouvant produire des molécules toxiques pour la plante	<i>Mesure de la densité par un densitomètre à membrane (Baize, 1989) :</i> 1. Densité = P1/P2 avec P1 = poids de l'échantillon sec et P2 = poids d'un volume d'eau comprimé dans le volume total de l'échantillon considéré  2. Pour déterminer P2 : On creuse un trou dans un sol bien plat grâce à un cylindre de volume connu, ainsi on connaît le volume total de l'échantillon. On met ensuite l'appareil constitué d'un sac membraneux rempli d'eau dans le trou avant d'appuyer fortement. L'appareil mesure la pression exercée sur le sac d'eau pour remplir le trou. On peut alors calculer le poids P2.
<b><u>Température</u></b>	il existe des températures optimales permettant le bon fonctionnement du sol associé en particulier à l'activité enzymatique des micro-organismes du sol	<i>Thermomètre</i>
Indicateurs biologiques	Fonctions	Comment les analyser
<b><u>Potentiel de minéralisation de l'azote</u></b> = capacité à fournir du NO <sub>3</sub> - qui est la forme de l'azote assimilable par la plante. Or cet ion est présent en faible quantité par rapport à l'azote organique. Cette fraction d'azote organique peut être transformée en NO <sub>3</sub> - via de lentes réactions biochimiques appelée réactions de minéralisation réalisées par les micro-organismes du sol. La fréquence de ces réactions dépend de la disponibilité en substrats et en eau ainsi que de la température du sol.	Un sol riche en azote minéral : = permet la croissance de la plante, cet ion étant un nutriment essentiel.	<i>Détermination du taux d'azote minéralisé au cours du temps (Kara-Mitcho et al, 2004):</i> 1. L'échantillon est tamisé à 2mm, on réalise ensuite différents tubes.  2. on essaye de reproduire dans ces tubes les conditions d'humidité et de température présentes dans le sol sur le lieu d'échantillonnage.  3. Pendant un certain nombre de semaines, on dose l'azote par spectrométrie d'absorption atomique (voir état de réserve minérale) : à intervalles réguliers pour voir l'évolution de la teneur en azote dans chaque tube.

<p><b><u>Dénombrer les micro-organismes présents dans le sol:</u></b> algues, espèces fongiques ou bactéries.</p>	<p><i>Algues</i> : Production de glucides permettant la stabilisation de la structure du sol</p> <p><i>Champignons filamenteux</i> : décomposent les résidus organiques et perméabilisent le sol</p> <p><i>Bactéries</i> interviennent dans les réactions d'oxydo-réduction. Certaines sont capables de fixer le nitrogène atmosphérique et le combiner avec l'hydrogène pour former de l'ammoniac utilisé par les plantes comme nutriment</p>	<p><i>Mesure du CO<sub>2</sub> émis par les micro-organismes par chromatographie en phase gazeuse</i> (voir teneur en carbone actif) : = Le taux de CO<sub>2</sub> mesuré est proportionnel au nombre de micro-organismes car ils ont une certaine activité métabolique</p>
<p><b><u>Quantité de lombrics</u></b></p>	<p>Les lombrics réalisent le brassage de l'argile et de la matière organique : = cela permet la formation de complexes argilo-humiques qui contiennent des éléments nutritifs nécessaires à la plante = cela favorise l'aération et les flux d'eau au sein du sol</p>	<p><i>Comptage sur le terrain</i></p>
<p>Indicateurs chimiques</p>	<p>Fonctions</p>	<p>Comment les analyser</p>
<p><b><u>pH / acidité du sol</u></b> (entre 6 et 7 = optimal pour les cultures)</p>	<p>Si le sol a un pH trop bas : = cela inhibe l'activité de certains microorganismes = Certains nutriments (calcium, magnésium) sont solubilisés et ne sont alors plus disponibles pour la plante = La teneur en ions métalliques (zinc, cuivre, aluminium) augmente, ce qui peut être toxique pour la plante.</p>	<p><i>Détermination du pH avec un pH-mètre</i> : = ionométrie (voir analyse des éléments totaux) avec une électrode de verre et d'une électrode de référence.</p>
<p><b><u>Etat de réserve minérale</u></b> ⇔ <b><u>analyse des éléments totaux : Si, Al, Fe, Na, K, Ca, Mg, Mn, N</u></b></p>	<p>= Ces éléments constituent les minéraux du sol = le fer peut sous une certaine forme attacher les particules d'argiles aux particules organiques d'humus pour former un complexe.</p>	<p><i>Mesure des concentrations des différents éléments par spectrométrie d'absorption atomique (SAA)</i> (Pansu et al, 1997) :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Excitation des atomes par une énergie produite dans le spectromètre (flamme, étincelle)</li> <li>2. Les atomes se désexcitent en émettant un rayonnement. L'intensité de ce rayonnement est proportionnelle à la concentration des atomes présents au départ.</li> <li>3. Mais par le SAA, on mesure la quantité d'énergie absorbée par les atomes lorsqu'ils passent à l'état excité</li> </ol>

<p><b><u>Capacité d'échange cationique</u></b> (CEC) = les cations peuvent se fixer à la surface de l'argile qui est chargée négativement ou de la matière organique. Ils peuvent ensuite se déplacer et être remplacés par d'autres ions suivant les concentrations dans la solution du sol</p>	<p>Si un sol a une CEC élevée : = les nutriments sont plus facilement libérés et disponibles pour la plante = la structure du sol est moins stable, il y a beaucoup de dispersion de particules</p>	<p>Différentes méthodes existent mais comprennent toutes les mêmes étapes (Baize, 1989) :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. On ajoute une solution cationique (ne comprenant qu'un seul type de cation) sur l'échantillon de sol</li> <li>2. Ceci entraîne un échange de cations : les cations et les protons présents au départ sur l'échantillon sont remplacés par les cations de la solution.</li> <li>3. On dose le cation de la solution pour déterminer combien se sont substitués aux cations de départ.</li> </ol>
<p><b><u>Teneur en cuivre, zinc</u></b></p>	<p>Un sol avec une teneur élevée en cuivre et en zinc est toxique pour la plante</p>	<p><i>Mesure de la concentration en <math>Cu^{2+}</math> et <math>Zn^{2+}</math> par ionométrie (voir conductivité électrique)</i></p>
<p><b><u>Teneur en matière organique</u></b> = très dépendante de la végétation présente  = La matière organique est formée de résidus de plantes ou animaux en décomposition qui sont composés essentiellement de carbone. Elle est généralement présente en surface.</p>	<p>Un sol riche en matière organique : = permet la croissance des micro-organismes qui à leur tour produisent des nutriments pour la plante par des réactions de décomposition de la matière organique = constitue une source d'énergie (azote, soufre et phosphore) pour la plante = favorise une meilleure stabilité des agrégats = a une bonne rétention d'eau = est plus fertile  = La fraction stable de la matière organique (humus) : permet l'atténuation de la toxicité des molécules comme les pesticides car les complexes chargés, formés au sein de l'humus, sont capables d'absorber de telles molécules.</p>	<p><i>Détermination du taux de carbone total par détection avec catharomètre à infrarouge (Pansu et al, 1997) :</i> Différents appareils existent et ils analysent des échantillons de différentes masses (200 mg au maximum) = techniques basées sur la combustion par chauffage de l'échantillon à très haute température (1000 °C) libérant les gaz <math>CO_2</math>, <math>O_2</math> et <math>N_2</math> qui sont ensuite mélangés dans une enceinte de volume connu et le taux de <math>CO_2</math> est alors mesuré par un détecteur infrarouge.  En laboratoire, on considère que le taux de matière organique est proportionnel au taux de carbone total.</p>
<p><b><u>Teneur en Carbone actif</u></b> = taux de carbone dans la matière organique qui assure la fonction biologique</p>	<p>Fonction d'activité biologique</p>	<p><i>Chromatographie en phase gazeuse (Pansu et al, 1997) :</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. le chromatographe comprend une phase fixe et une phase mobile gazeuse (azote) dont le débit est régulé. Ce qui est injecté dans le chromatographe est aussi mis sous forme gazeuse et est entraîné dans la colonne par la phase mobile. La colonne est dans un four dont la température est régulée (thermostat). le gaz est détecté généralement en bout de colonne par un détecteur à ionisation de flamme.</li> <li>2. On obtient alors un chromatogramme avec différents pics qui renseignent sur le nombre de constituants du mélange (nombre de pics) et sur leurs</li> </ol>

		proportions dans le mélange (hauteur des pics)
<p><b><u>Conductivité électrique</u></b>            = dépend de la salinité du sol c'est-à-dire de la teneur en électrolytes comme Na<sup>+</sup> (cation) ou Cl<sup>-</sup> (anion) qui sont des sels provenant soit de la décomposition des minéraux de la roche du sol, soit des eaux de pluie</p>	<p>Un sol comprenant beaucoup de sels :            = les sels n'étant pas assimilés par la plante vont s'accumuler au niveau des racines ce qui est nocif pour la plupart des plantes</p>	<p><i>Mesure des concentrations en sels par Ionométrie (Pansu et al, 1997) :</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. on utilise deux électrodes : une électrode de référence et une électrode qui varie suivant le type d'ions considérés (électrode à membrane de verre pour Na<sup>+</sup> et à membrane cristalline pour Cl<sup>-</sup>). On les plonge dans la solution du sol.</li> <li>2. il y a alors établissement de tensions électriques dépendant des concentrations des ions présents dans la solution.</li> </ol> <p>La solution du sol ne comprend pas qu'un seul type d'ion (celui dont on veut savoir la concentration dans le sol) mais plusieurs types d'ions ce qui crée une force ionique qui peut influencer sur la tension créée au niveau des électrodes. On peut alors ajouter une solution de force ionique élevée pour équilibrer la force ionique dans la solution du sol.</p>

**Tableau 3 : Indicateurs rendant compte de l'état du sol et méthode d'analyse**

## **2. Réalisation d'un échantillonnage adapté aux analyses à réaliser et respectant les normes**

La première étape de la méthode consiste à choisir les analyses à effectuer. Pour cela, il faut se poser un certain nombre de questions préliminaires (Blaize D, 1989) : suivant notre budget, quelles sont les analyses accessibles compte tenu de leur coût et suivant notre objectif, quel type de prélèvement doit-on faire ?

### *a. Réalisation d'un plan d'échantillonnage*

Cette étape est la phase essentielle de l'échantillonnage afin de choisir des échantillons représentatifs de la variabilité des sols du territoire étudié (AFNOR, 1992). Le plan d'échantillonnage peut être systématique suivant un maillage régulier ou orienté selon des zones choisies dans le périmètre d'étude. Il faut alors délimiter des zones contrastées sur lesquelles on va prélever des échantillons unitaires dont le mélange constituera un échantillon composite représentatif de la zone. Chaque zone peut se définir selon les critères suivants : histoire de l'occupation du sol, passé culturel, type de pratiques humaines (travail du sol, fertilisation, incorporation de matériaux exogènes comme les déchets ou sous-produits) ou encore le type de végétation. Selon nos objectifs, il faudra déterminer le critère selon lequel nous définirons des zones. Il faudra ensuite déterminer les coordonnées des zones et des points de prélèvements sur une carte des sols ou une carte topographique et noter leurs limites selon le système géodésique français Lambert.

Pour une zone donnée, il faut effectuer entre 14 et 16 prélèvements élémentaires au minimum. Pour cela on doit partager chaque zone en 14 à 16 « unités d'échantillonnage » de même taille, ensuite on prélève au hasard dans chaque unité en évitant toutefois les bordures, les bosses et creux qui pourraient ne pas être représentatifs de la zone étudiée.

#### *b. Méthodes de prélèvement et conditionnement des échantillons*

Une fois le plan d'échantillonnage proposé, on peut effectuer les prélèvements grâce à différents outils choisis en fonction du type de sol étudié (AFNOR, 1992). En effet, il existe différents instruments adaptés aux propriétés structurales contrastées des sols :

- si le sol ne présente que très peu de charge grossière en cailloux, il est possible d'utiliser une tarière, outil en acier qui peut avoir différentes formes (tire-bouchon, à bec) pouvant faciliter l'enfoncement dans un sol donné. La profondeur de l'enfoncement dépend du protocole défini et peut aller jusqu'à près de 2m, intégrant le profil du sol considéré.
- si le sol présente beaucoup de charges grossières en cailloux, il est préférable de creuser une fosse pédologique de forme carrée jusqu'à une profondeur choisie, puis de découper verticalement avec une pelle une des faces de la fosse afin d'observer le profil de sol. Des échantillons peuvent alors être prélevés horizon par horizon avant préparation pour analyse.

La préparation des échantillons doit alors être adaptée aux types de caractérisations à réaliser. De plus, pour réaliser des échantillons de laboratoire, il faut le plus souvent réduire la taille de l'échantillon composite obtenu précédemment. Pour cela, 10 prélèvements de 50 g doivent être effectués sur toute la surface de l'échantillon qui a été préalablement étalé. On obtient ainsi un « échantillon réduit » de 500g. Une autre méthode (quartage) consiste à réaliser un tas puis le découper en 4, deux des tas formés sont mélangés, les deux autres sont jetés. On répète l'opération jusqu'à obtenir un tas de 500g qui constituera l'échantillon de laboratoire.

Finalement, une fois que l'échantillon à analyser est obtenu, il faut le conditionner dans un contenant (sachet) qui permettra sa conservation au sec et à l'abri de la poussière. Le sac doit être soigneusement étiqueté de manière à tracer l'origine de l'échantillon. Chaque étiquette est associée à une fiche de renseignement qui doit comporter notamment le nom de la personne ayant effectué le prélèvement, la date du prélèvement, le nom de la zone de prélèvement, l'horizon du sol concerné et éventuellement ses coordonnées géographiques.

#### **Conclusion :**

Le sol a de multiples propriétés physiques, chimiques et biologiques qui donnent une indication de son état de fonctionnement. Les sols sont en effet capable de remplir des fonctions (par exemple le support de végétation) qui peuvent être mises en relation avec des services écosystémiques rendus à l'Homme (par exemple le l'approvisionnement en biomasse alimentaire). Les données issues des analyses de terres sont indispensables au diagnostic de fertilité et/ou de contamination. Ces données de caractérisation peuvent être regroupées dans des bases de données et utilisées dans le but de réaliser une représentation cartographique de la qualité du sol. Différentes approches et méthodes de représentation spatiale de données ponctuelles sont alors disponibles et sont des outils utiles à une meilleure gestion des sols.

## **IV. Bases de données et systèmes d'information géographique sur les sols urbains**

En effet, il est intéressant de savoir comment les données obtenues suite à l'étude de prélèvements sur les sols urbains peuvent être représentées. Nous verrons dans un premier temps comment sont choisies les zones de prélèvements et comment les informations obtenues sont rangées dans une base de données, puis dans un second temps nous nous intéresserons à la représentation des données par la cartographie et par système d'information géographique.

### **1. Conception d'une base de données sur les sols urbains**

#### *a. Choix des zones de prélèvement*

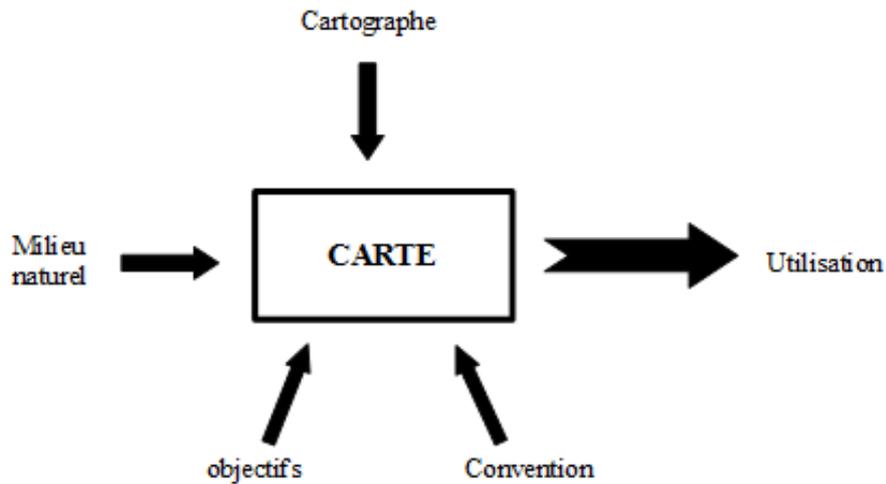
Une fois que l'on connaît les normes pour faire des prélèvements, il est nécessaire de réfléchir à l'endroit où prélever et à quelles profondeurs. La très grande majorité des études sur les sols urbains se focalisent sur le pied des arbres ou dans des parcs et selon l'endroit d'échantillonnage et les paramètres recherchés, il faut choisir une profondeur de prélèvement adaptée. Par exemple, lorsque l'on cherche à mesurer la quantité d'un élément toxique pour l'Homme dans le sol, on s'intéresse uniquement aux trente premiers centimètres du sol, ce qui correspond à la fois à surface du sol qui peut être absorbée sous forme de poussière et à la profondeur à laquelle peut creuser un enfant pouvant alors être affecté par cet élément (exemple du plomb en ville par Laperche et Mossmann, 2004). Dans cette même étude, pour le cas de jardins potagers, il est préférable de prélever jusqu'à 60cm, puisque certaines cultures peuvent dépasser les 30 premiers centimètres du sol. Si l'on considère les sols ruraux, notamment utilisés pour l'agriculture, l'échantillonnage se fait jusqu'à 120cm de profondeur puisque le système racinaire des plants peuvent dépasser le mètre, et que la terre est labourée, ce qui engendre un mélange de la terre de surface et celle plus enfouie (Suivi annuel des épandages des effluents urbains et industriels – guide méthodologique 2ème édition, 2010). Cependant, pour étudier un arbre en ville, dont les racines sont confinés dans un espace réduit, il faudrait faire un prélèvement sur toute la profondeur de son support, mais pour faciliter les manipulations et réduire les coûts, on ne s'intéresse qu'aux 30 premiers centimètres, puisqu'il s'agit de la profondeur qu'atteignent des racines de plantes poussant naturellement sur le sol.

Une fois l'échantillonnage et les analyses terminées, comment regrouper ces informations ? Il convient alors de rentrer les informations obtenues dans une base de données.

#### *b. Conception d'une base de données*

Lorsque les analyses sont nombreuses, il devient nécessaire de les ranger dans une base de données afin de pouvoir ensuite les exploiter (notamment pour les représenter, voir IV-2). Pour concevoir une base de données, il est important d'en déterminer l'objectif, d'organiser les informations obtenues dans des tables ou bien dans un tableau et de définir une clé primaire (qui permet d'associer les données à une ligne unique). Il s'agit donc de classer dans un tableau les résultats des analyses en notant la date et le lieu du prélèvement, ce couple d'information servant de clé primaire puisque chaque prélèvement sera réalisé dans un lieu différent et permettant ensuite une représentation cartographique des données obtenues, puis de ranger dans des colonnes les informations classées de façon logique, c'est à dire, de regroupées par type d'information, à savoir chimique, biologique ou physique (figure 12). Il peut être intéressant de mettre une colonne "usage du sol" correspondant au type de végétaux





**Figure 13 : Eléments nécessaires à la réalisation d'une carte**  
(d'après Legros, 1996)

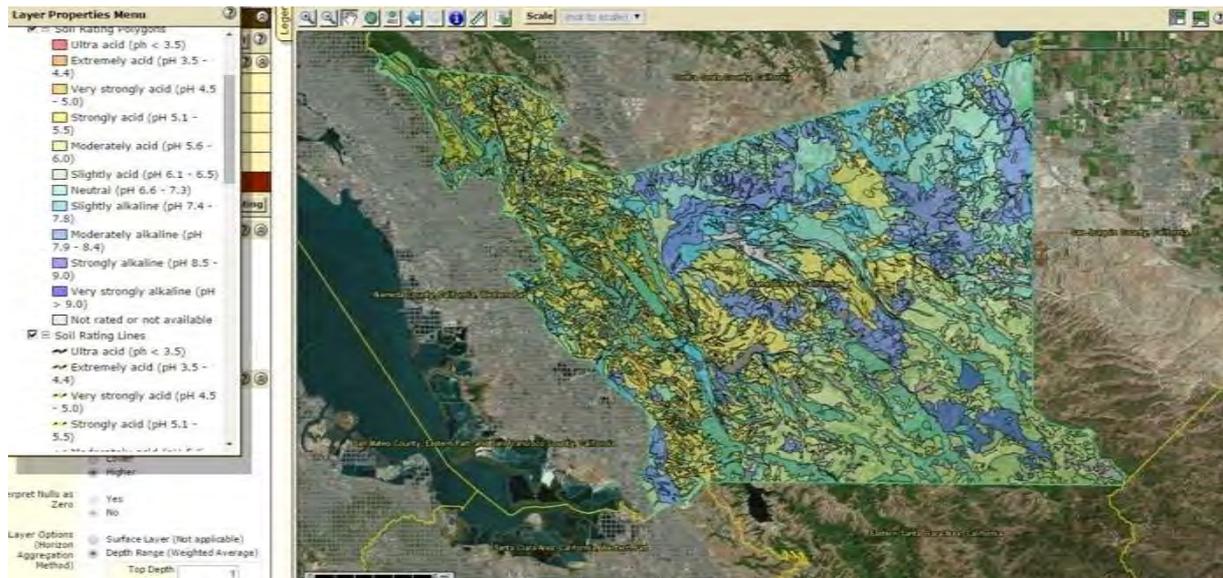
Il existe peu de représentations cartographiques de données obtenues sur les sols dû à la complexité de faire figurer toutes les données sur un espace réduit et de transformer une étude sur un prélèvement ponctuel en données surfaciques pour des sols en milieu urbain (Bur), cependant, lorsque l'on s'intéresse à un paramètre unique, certains scientifiques décident de considérer des études ponctuelles comme représentatives d'une zone, ce qui nécessite de faire des approximations entraînant alors une perte de précision des données. Afin de régler ce problème de représentation, deux solutions sont utilisées, soit regrouper les différents paramètres étudiés dans des " classes " définies par des intervalles de valeurs, et permettre ainsi de représenter en un figuré (par exemple, une couleur) un ensemble de caractéristiques, sans défavoriser la compréhension de la carte, soit attribuer des notes aux paramètres puis calculer une moyenne pour caractériser le sol et représenter cette note sur la carte (d'après Stas). La deuxième méthode est la plus facile à mettre en œuvre puisque il suffit de définir un système de notation avec des coefficients tandis que la première méthode, il faut faire des classes, ce qui implique une approche statistique, ce qui rend les calculs compliqués.

Cependant, les cartes souffrent du manque de lisibilité lorsque l'on veut faire apparaître plusieurs informations. Il existe un outil permettant de représenter des études réalisées sur les sols sur une carte informatisée, il s'agit du système d'information géographique.

#### *b. Représentation à l'aide d'un système d'information géographique*

Tout d'abord, qu'est-ce qu'un système d'information géographique (SIG) ? Il s'agit d'un système qui permet d'afficher sur une carte informatisée les données voulues et qui permet ensuite d'analyser ces données. Dans le cas d'étude du sol et de ses paramètres physiques, chimiques et biologiques, ce système permet de voir de façon simple la zone étudiée et les informations recherchées. Par le biais de l'informatique, on peut avoir une carte ne prenant pas de place, se servant de coordonnées GPS (Global Positioning System) précises pour délimiter les surfaces des terrains, et on peut donc sélectionner ce que l'on veut faire apparaître (par exemple, uniquement les arbres). Les SIG sont notamment utilisés pour l'aménagement du territoire, par exemple par le Service Espaces Verts du Grand Nancy afin d'avoir par exemple le nombre d'arbres plantés dans une rue, le type d'arbres, les coordonnées précises de ceux-ci et d'autres informations utiles (d'après Gross architecte paysagiste pour le Grand Nancy).

C'est le moyen utilisé pour représenter et faire des études sur le sol, puisqu'il permet d'intégrer à une zone une grande quantité d'informations, à partir des bases de données, sans besoin de surcharger la carte avec des figurés puisqu'en cliquant sur la zone voulue, on peut faire apparaître un tableau de valeurs. Par exemple, une étude encore en cours menée par des scientifiques américains du Natural Resources Conservation Service (NRCS) sur le projet Web Soil Survey (WSS) utilise ce type d'outil pour représenter sur une carte informatisée des données obtenues suite à l'étude de sols américains dans le but de pouvoir accéder facilement aux informations d'un terrain, par exemple, le pH du sol, et de savoir si celui-ci peut convenir à un usage particulier (figure 14).



**Figure 14 : Représentation du pH des sols dans la zone d'Alameda (Californie) par SIG (WSS)**

On remarquera qu'à partir d'études ponctuelles, la représentation des sols a été faite en zones et non en données ponctuelles.

Cependant, les études réalisées par les scientifiques du NRCS ne sont valables qu'à une échelle dézoomée au 1:20000ème, et si l'on s'intéresse à des sols de surfaces moindres, les données sont estimées et imprécises. Dans le SIG de WSS, le sol est prolongé sous les routes en milieu urbain par approximations. Or, en milieu urbain, le sol ne peut être généralisé ainsi dû à la diversité des origines de celui-ci, et il est donc nécessaire d'effectuer des études au cas par cas. Il faut donc tenir compte de l'échelle dans la représentation des sols étudiés : une étude des sols urbains en général permettra le regroupement de données ponctuelles en zones, tandis qu'une étude plus ciblée ne pourra qu'être représentée que par un point de prélèvement.

### **Conclusion :**

Suite à ces études, nous connaissons un peu mieux les outils de représentation du sol et de données. D'après les recherches déjà effectuées, nous pourrions nous aussi dans la suite de notre projet utiliser un SIG pour représenter nos futurs résultats dans un format dans lequel le Service Espaces Verts du Grand Nancy (notre commanditaire) est habitué à manipuler. En revanche, suite au peu d'études des sols en milieu urbain, il nous reste à déterminer quels seront les lieux de prélèvement afin d'obtenir des résultats variés exploitables. Mais si un sol possède des caractéristiques favorables à plusieurs utilisations, laquelle choisir ? Comment peut-on alors choisir parmi les divers usages possibles ?

## **V. Vers une évaluation économique des services écosystémiques**

### **1. Généralités**

#### *a. Pourquoi monétariser ?*

Les services écosystémiques rendus par les sols, qui ont été détaillés dans les parties précédentes, sont souvent considérés comme des biens publics. En tant que tels, ils devraient être fournis en quantité suffisante. Pourtant, ils sont souvent obtenus comme des coproduits ou des externalités de productions primaires. C'est pourquoi l'idée de récompenser les fournisseurs de ces ressources pour l'approvisionnement en services écosystémiques non rivaux (dont l'utilisation par un agent ne réduira pas la quantité disponible pour les autres individus) et non exclusifs (services accessibles par tout le monde) grandit dans l'économie environnementale (Engel *et al*, 2008).

Bien qu'on se demande toujours jusqu'où la monétarisation des écosystèmes est possible, certains croient que celle-ci est souvent indispensable. Par exemple Bolund & Hunhammar ont établi en 1999 que les bénéfices d'un écosystème sont souvent omis dans les analyses coût-bénéfice (ACB) alors que, une fois évalués, ils pourraient y être inclus afin d'améliorer l'efficacité d'utilisation du territoire. De même TEEB (2011) indique que l'évaluation économique des écosystèmes devrait être incorporé dans les CBA comme un outil pour identifier la meilleure option politique. En dehors des ACB, la détermination de paiement compensatoires liés à des pertes de services écosystémiques (de Groot *et al*, 2012) ou à des coûts de substitution pour la préservation des écosystèmes (Hein *et al*, 2006) requièrent une monétarisation des écosystèmes.

En théorie, l'établissement d'institutions visant à financer les gestionnaires des ressources pour les services écosystémiques que rendent les sols, devrait augmenter les chances d'approvisionnement en ces services (Corbera *et al*, 2009). En effet, la traduction du coût ou du bénéfice du service en une valeur compréhensible par le plus grand nombre facilitera les processus décisionnels d'aménagement du territoire.

Le Commissariat Général au Développement Durable en France justifie ainsi l'intérêt de la monétarisation : « Nombre de biens et services environnementaux ne font pas l'objet d'échanges et n'ont donc pas de prix. L'environnement a pourtant une valeur : sa qualité est en effet une composante essentielle du bien-être des générations présentes et futures. La monétarisation est une technique d'analyse qui vise à révéler cette valeur, pour mieux prendre en compte les enjeux environnementaux dans les décisions publiques et les choix privés ».

#### *b. Comment monétariser ?*

Il est possible d'estimer les externalités comme un "coût" pour la prise de décision (étude des risques liés à la gestion de la dépendance de l'activité aux écosystèmes, et impacts négatifs des activités humaines sur les services écosystémiques) ou comme un "prix" (valeur marchande). Les acteurs économiques retirent des "bénéfices externes" de l'échange, sous forme de biens et services, s'il y a valorisation du capital naturel (Balez & Reunkrilerk, 2013).

Une réponse à cet échec de marché a été pour les gouvernements et les Organisations Non Gouvernementales (ONG) de mettre en place des politiques et des incitations qui récompensent les propriétaires fonciers à maintenir ou augmenter l'approvisionnement en de tels biens (Derissen, 2013). Les outils fiscaux que l'on peut retrouver sont par exemple la taxation, la subvention ou encore la mise sur le marché de mécanismes de compensation.

Pour se référer à ce "marché émergent de création de mécanismes d'incitation" (Pascual & Perrings, 2007), on utilise les initiales PSE.

## 2. L'analyse économique par les PSE

### a. *Origine du terme et définition*

Le terme PSE (PES en anglais) peut être traduit par des Paiements pour des Services, soit Écosystémiques, soit Environnementaux. Ces deux termes ont jusqu'à présent été utilisés de façons interchangeables dans la littérature, puisqu'aucune définition officielle n'a été établie. Les services écosystémiques correspondent aux biens et services directement permis par la nature sans intervention de l'Homme (MA, 2005) tandis que les services environnementaux sont, d'après la FAO, les services fournis comme co-produits de production humaines, ce qui n'implique que les biens et services environnementaux obtenus involontairement. La FAO réduit de beaucoup leur nombre, puisqu'il semble qu'il faille aussi intégrer les services produits intentionnellement dans cette décision. En partant de ces définitions, il apparaît que le "paiement pour les services écosystémiques" est un terme obsolète car la nature ne peut être payée pour les biens et services qu'elle fournit à l'Humanité. En revanche, seuls les humains peuvent être rémunérés et ont besoin d'être rémunérés pour l'apport d'"avantages environnementaux" (volontaires ou non), c'est pourquoi la seule signification possible pour l'acronyme PSE est le suivant : "paiement pour les services environnementaux" dans le sens d'un paiement au fournisseur du service environnemental (Derissen & Latacz-Lohmann, 2013).

Cette approche prometteuse pour corriger les externalités environnementales peut être définie comme suit : "accord volontaire et conditionnel entre au moins un "fournisseur" et un "acheteur" à propos d'un service environnemental bien défini" (Wunder, 2008).

Avant l'instauration des PSE, d'autres termes désignaient des mécanismes du même type tels que la "compensation et récompenses pour les services environnementaux" ou les "paiement incitatifs" en 2009, ou plus récemment les "paiement pour les services de conservation de l'agrobiodiversité" en 2011 (Derissen, 2013).

Le principe des PSE est le suivant : établissement d'une liste des possibilités pour améliorer une situation donnée; choix d'une solution; préparation d'une méthodologie à suivre; suivi de celle-ci; analyse des résultats. Pour étudier la situation de départ on peut entre autre se référer au modèle inVEST (Intergrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), un logiciel qui quantifie, cartographie et évalue les biens et services de la nature qui contribuent au maintien de la vie humaine. Il regroupe ainsi 17 modèles de la pollinisation des cultures à la purification de l'eau. L'analyse des résultats des programmes de PSE peut se faire grâce à une méthode économique telle que l'Équilibre Général Calculable (EGC) par exemple. On en déduit l'efficacité ou non du PSE, sachant que celle-ci n'est pas forcément due à l'impact financier du PSE mais elle est parfois liée aux conseils et aux formations donnés en parallèle.

Les services environnementaux auxquels s'appliquent le plus fréquemment les PSE sont les problèmes de carbone, de bassins versants, de biodiversité et de beauté des paysages, tous en lien avec les sols.

### b. *Les différents types de programmes de PSE*

#### o *Division selon le type d'acheteur ou de fournisseurs*

Dans les programmes privés (Costa Rica, Mexique, Chine), l'Etat agit au nom des utilisateurs des services en tant qu'acheteur en collectant des taxes et des subventions alors que dans les programmes publics l'objectif est plus local (bassins versants en Equateur, Bolivie...) et les acheteurs payent plus directement. Il existe des différences significatives entre les programmes financés par les gouvernements où les fonds proviennent d'une tierce

partie, et les programmes de PSE financés par les utilisateurs du service écosystémique rendu. Ces derniers ont un impact plus large, des coûts de transaction plus faibles et le système dispose d'une légitimité que les programmes privés peinent à atteindre (Wunder *et al*, 2007). De plus, Wunder a montré (2008) que les programmes financés par les utilisateurs sont mieux ciblés, plus précisément adaptés aux conditions et besoins locaux, font l'objet d'un meilleur contrôle et d'une plus grande volonté à renforcer la conditionnalité, et on également beaucoup moins d'effets secondaires négatifs par rapport aux programmes financés par les gouvernements

En général, on considère que les coûts payés par les acheteurs sont reçus par des ménages, cependant il y a également eu des cas de PSE où se sont des communautés qui ont été financées. (Reynolds, 2012; Tacconi *et al*, 2013)

Dans certains cas, aucun dispositif ne peut satisfaire tous les critères, c'est pourquoi un mécanisme "de type PSE" est mis en place. C'est notamment le cas en Bolivie (Robertson & Wunder 2005) et au Vietnam (Wunder *et al*, 2005) où les paiements pour les bassins versants qui y ont été réalisés faisaient intervenir de l'argent qui venait de donateurs et non des utilisateurs du service. A l'inverse, il est arrivé que les paiements aient été réalisés par les utilisateurs mais n'aient pas été dépensés pour financer les fournisseurs potentiels du service environnemental.

- *Selon la nature du paiement*

Certains pays comme l'Equateur, le Costa Rica ou le Mexique ont développé des schémas nationaux de PSE où les paiements ressemblent davantage à des subventions qu'à des réelles rétributions (Munoz-Pinaetal, 2008). D'autres projets de PSE n'utilisent pas de paiements comptants pour la participation mais plutôt différents types de compensation et récompenses (van Noordwijk & Leimona, 2010) : taxes agro-forestières, incitation au semi d'arbres, prorogation technique.

- *Variations selon l'implication des participants*

Les projets de PSE peuvent être caractérisés comme suivant des approches "à usage restreint" ou d' "accroissement actif" (Wunder, 2007). Les méthodes à usage restreint paieraient les participants pour une action passive telle que la simple conversion d'une forêt en une zone agricole ou la chasse d'animaux (Milne & Adams, 2012) tandis que les techniques d'accroissement actif se concentreraient au contraire sur la gestion active comme la reforestation ou l'élimination d'espèces invasives (van Noordwijk *et al*, 2010).

- c. *Particularités de la monétarisation des services en zone urbaine*

Les citoyens peuvent augmenter ou diminuer la valeur des bénéfices liés au sol car les choix de gestion foncière affectent les fonctions écosystémiques du sol. Ainsi est-il important de comprendre les bénéfices tirés du sol et leur valeur afin de pouvoir apprécier l'importance de la gestion des sols. (Kreißig, 2013). Dans les zones rurales, il s'agit généralement de la croissance des plantes comme des cultures ou des pâturages. Dans les zones urbaines, le bénéfice le plus direct que l'on puisse obtenir d'un sol est lié au support structural pour les bâtiments, routes et parkings. Cependant on néglige que l'aménagement du paysage, le jardinage et les parcs peuvent également faire l'objet d'une évaluation économique. En effet, des décisions impliquant des compensations affectent toujours implicitement des valeurs. Par exemple le choix de conserver des espaces ouverts dans une ville, au lieu d'utiliser la zone comme habitation ou pour une installer une activité économique, sous-entend un prix en termes de "coûts d'opportunité" (Constanza *et al*, 1997).

La plupart de la littérature existante sur la dynamique spatiale urbaine et les services écosystémiques utilise des méthodes d'évaluation simples et se concentre majoritairement sur la perte des services liés à la transformation d'un milieu naturel en un milieu urbain (Kreuter *et al*, 2001) ou n'utilise pas d'évaluation économique (Haase *et al*, 2012). Les risques de telles méthodes sont la non prise en compte de l'importance particulière des services écosystémiques urbains et la forte variation dans l'espace de l'offre et de la demande. C'est pourquoi Gómez-Baggethun & Barton (2012) soulèvent l'idée d'indicateurs multiples pour les différentes valeurs de dimension économique, socioculturelle et d'assurance.

Les valeurs d'un service écosystémique dépendent largement des attributs socio-économiques de ses bénéficiaires, or ceux-ci sont plus hétérogènes et dynamiques dans un contexte urbain (Hein *et al*, 2006, Troy & Wilson 2006). Le mécanisme qui relie la dynamique spatiale urbaine aux valeurs est ainsi similaire au mécanisme du prix du marché puisqu'elle dépend de l'offre et de la demande (Schägnner *et al*, 2013). L'offre des services écosystémiques se réfère à l'approvisionnement (Burkhard *et al*, 2012), ce qui explique pourquoi la dynamique spatiale modifie la valeur économique des services écosystémiques. Du côté de la demande, la forte densité de population et les variations spatiales de la valeur devraient être pris en compte dans les plans d'urbanisme.

#### *d. Limites aux paiements*

Il y a tous les bénéfices "sur place", à court terme, pour lesquels le propriétaire du terrain qui décide de la gestion du sol récolte les bénéfices et coûts d'une telle gestion. A contrario il existe de nombreux bénéfices à long terme qui vont au delà de la gestion du sol pour lesquels les propriétaires qui décident des choix de gestion, et payent les coûts liés, ne sont pas forcément les mêmes personnes qui sont affectés par ces décisions. Aussi la société devrait-elle discuter la valeur de ces bénéfices "hors-sites" et de la mesure dans laquelle le propriétaire foncier devrait payer pour des co-bénéfices additionnels (Asquith *et al*, 2008).

Il est de plus en plus reconnu qu'un simple paiement en faisait attention aux mécanismes de coût pour les services écosystémiques en l'absence totale des facteurs culturels et social est inadéquat. Ainsi, les co-bénéfices, opposés au simple paiement comptant, peut être un moyen de donner du poids aux PSE face aux normes locales (Muradian *et al*, 2013).

Il est nécessaire de suivre le devenir de l'argent obtenu par les fournisseurs ayant participé au programme de PES.

Bien qu'on utilise pour l'évaluation économique des valeurs marchandes, on ne peut monétariser par des méthodes directes toutes les composantes qui caractérisent les exigences de bien-être des Hommes en milieu urbain tels que la santé ou encore la valorisation des espaces naturels. Il en est de même pour les écosystèmes indispensables et non remplaçables comme l'atmosphère mondiale par exemple, sans lequel la vie serait impossible. Ceux-ci doivent donc être estimés de façon indirecte par la prise en compte des évaluations subjectives de citoyens interrogés. Ils sont donc généralement évalués avec l'aide du concept de consentement à payer (Costanza *et al*, 1997).

### **3. Résultats (prix des écosystèmes) pour quelques exemples de PSE**

Les coûts totaux pour des études de cas isolées s'étalent de quelques dollars par ménage et par an à des milliers de dollars, selon la taille du terrain impliqué. (FONAFIFO *et al*, 2012; Mahanty *et al*, 2013).

### ○ *Programmes nationaux*

Le plus important projet de PSE établi à l'échelle nationale est le "Sloping Land Conversion Program" mis en place par la Chine, qui vaut 4 milliards de dollars. On retrouve également le Royaume-Uni avec son Programme de Développement Rural à 0.8 milliards.

En dépit de l'importance croissante de l'interface rural-urbain par rapport aux politiques environnementales, peu d'analyses ont déjà été menées sur les PSE en milieu péri-urbain. La plupart des études portent plutôt sur des programmes basés sur des zones rurales. Pourtant, la tendance de la population à l'augmentation, l'exode rural et la croissance des mégapoles soulignent la nécessité d'une nouvelle convention rural-urbain reconnaissant que les habitants en milieu urbain sont ceux qui bénéficient le plus des services environnementaux. Certains pays ont déjà mis en places des programmes nationaux de PSE de ce genre, comme par exemple le Costa Rica, puis le Mexique en 2003. Au Mexique le programme a été initialement mis en place afin d'assurer l'approvisionnement en eau, une ressource qui s'épuise dans le pays et particulièrement dans la capitale (Neitzel, 2014). Le budget de ce projet nommé "Paiements pour les Services Hydrologiques Environnementaux" s'élève à 18,2 millions de dollars.

L'Indonésie a subi un développement économique important ces dernières décennies (sous l'administration du président Suharto), grâce à l'extraction de ressources naturelles notamment. Cependant, la croissance économique a grandement affecté l'environnement du pays. En réponse aux coûts liés à la dégradation environnementale, le gouvernement a mis en place certaines stratégies : mécanismes de commande et de contrôle (permis, quotas), instruments basés sur le marché (honoraires) et le paiement pour les services écosystémiques (PSE). En 2009 le gouvernement indonésien vote la loi 32/2009 qui reconnaît deux différentes catégories de méthodes pour la gestion de l'environnement : les PSE et les CSE (Compensation pour les Services Environnementaux). Le terme CSE indique un plan d'action établi entre des gouvernements (entre deux provinces ou entre une province et le gouvernement central). Le terme PSE se réfère quant à lui à un plan d'action établi par une institution privée (par exemple entre une compagnie de distribution d'eau potable et une communauté).

### ○ *Programmes régionaux*

Il existe également des projets régionaux dont le plus important est l'Australie avec son Fonds de Conservation pour la Forêt de Tasmanie, qui vaut 14 millions de dollars (Pushpam, 2014). Le projet du Costa Rica sur la protection des bassins versants coûte quant à lui cinq millions de dollars en 2012 aux fabricants de boissons du Costa Rica et de l'équateur. Ce programme a pour projet de s'étendre à 50 millions de dollars d'ici à 2020. Il propose aux industries productrices de boissons de payer les propriétaires fonciers pour une meilleure utilisation du sol qui limiterait la déforestation et la dégradation du sol et réduirait par la même des risques d'inondation et d'érosion, tout en maintenant la qualité de l'aquifère.

### **Conclusion :**

L'importance des sols urbains dans l'approvisionnement en services écosystémiques, nécessaire au bien-être des citoyens est une donnée aujourd'hui avérée. Ainsi est née l'idée de traduire les services rendus par ces sols en des valeurs économiques concrètes car chiffrées. Cela facilite les plans d'urbanisme et augmente par la même les chances d'approvisionnement en services écosystémiques. Une des manières d'accéder à la monétarisation d'un service la mise en place d'un programme PSE (paiement pour les services écosystémiques ou environnementaux). Il en existe déjà de nombreux dont certains à grande échelle comme en Chine, au Mexique ou encore au Costa Rica.

# Conclusion

Pour conclure, il ressort que les sols urbains sont des milieux très contrastés pour leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Les occupations du sol et les usages très variés des sols en milieux urbains dépendent de leurs propriétés. Celles-ci sont globalement très différentes d'autres types de sols considérés comme étant « plus naturels » (agricole ou forestiers). Ce constat justifie donc leur étude spécifique pour mieux les connaître. Pour ce faire, il faut avant tout raisonner et mettre en œuvre un plan d'échantillonnage adapté qui permette de définir de manière représentative les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de ces sols. Les données de diagnostic peuvent alors être intégrées dans des bases de données permettant de mieux juger des capacités des sols urbains à assurer des fonctions et à rendre des services écosystémiques. À partir de cette phase de diagnostic, des exemples montrent qu'il est possible de modifier les caractéristiques des sols afin d'optimiser la rentabilité économique, sociale et environnementale des services écosystémiques associés. Une évaluation économique participerait à l'orientation des décisions politiques d'aménagement urbain tout en préservant les sols et les services écosystémiques qu'ils rendent.

# Bibliographie

- . AFNOR, Norme française - X31-101, 1992 - Echantillonnage Méthode de prélèvement d'échantillons du sol.
- . Asquith, N.M. *et al.* 2008. Selling two environmental services kind payments for bird habitat and watershed protection in Los Negros, Bolivia. *Ecol. Econ.* 65, pp. 675–684.
- . Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), 2008. Synthèse de l'enquête sur la gestion des cimetières adhérents au SIFUREP. 1, 3-4. 3p.
- . Baize D. Et Girard M.-C., 2008. Référentiel pédologique 2008. *Quae*, 6-26p.
- Barles*, Breyse D., Guillaume A., Leyval C., 1999. *Le Sol urbain*. Collection VILLES, 131. 11. 137. 185. 16p.
- . Baize D, 1989. Guide des analyses courantes en pédologie. INRA. 1-4, 25-31, 69-71, 109-115, 126-127, 131-133 p.
- . Balez, A. & Reunkrilerk, J. 2013. Écosystèmes et territoires urbains : impossible conciliation ? Développement durable et territoires, vol.4, n°2.
- . Bolund, P. & Hunhammar, S. 1999. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*. 29(2), pp. 293-301.
- . Boyd J., Banzhaf J., 2007. What are ecosystem services ? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*.
- . Bur T., Caractérisation des sols urbains et cartographie – Aptitudes à l'enracinement.
- . Burkhard, B. 2012. Solutions for sustaining natural capital and ecosystem services. *Ecological Indicators*, 21, pp. 1–6
- . Calvet R., 2003. *Le sol : Propriété et fonctions*, Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces. Dunod, 41-44, 249 p.
- . Calvet R., 2003. *Le sol : Propriété et fonctions*, Tome 2 : Phénomènes physiques et chimiques, Applications agronomiques et environnementales. Dunod.
- . Constanza, R. 1997. The value of the World's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, pp. 253–260.
- . Corbera, E, Gonzalez Soberanis, C. & Brown K. 2009. Institutional dimensions of Payments for Ecosystem Services: An analysis of Mexico's carbon forestry programme, *Ecological Economics* 68, pp. 743-761.
- . Daily G., Polasky S., Goldstein J., Kareiva P., Mooney H., Pejchar L., Ricketts T., Salzman J., Shallenberger R., 2009. Ecosystem services in decision making : time to deliver. *Ecological Environment*.
- . Davoust P., 2015. « Texture ». *Ecosociosystème* [En ligne] (23 janvier 2015). <http://www.ecosociosystemes.fr/texture.html> (Page consultée le 18 janvier 2015).
- . Derissen, S. & Latacz-Lohmann, U. 2013. What are PES? A review of definitions and an extension.
- . Ecovegetal, 2002. <http://www.ecovegetal.fr/toitures-vegetales/concept.html> (Page consultée le 11 janvier 2015).
- . Engel *et al.* 2008. Designing payments for environmental services in theory and practice. *Ecol. Econ.*

- . FONAFIFO, CONAFOR & Ministry of Environment. 2012. Lessons Learned for REDD+ from PES and Conservation Incentive Programs. Examples from Costa Rica, Mexico and Ecuador.
- . Gillig C.-M., Bourgery C., Amann N., 2008. L'arbre en milieu urbain : conception et réalisation des plantations. *Infolio*, 20-25, 43. 87p.
- . Girard M.-C., Walter C., Remy J.-C., Berthelin J., Morel J.-L., 2005. Sols et environnement. Dunod, 776. 776. 25-28. 208-209. 213. 221-222. 222-224. 223. 224-225. 226-227. 227-228. 228p.
- . Girard M.-C. *et al.*, 2011. Etude des sols. Dunod, 335-341p.
- . Gómez-Baggethun *et al.* 2012. Traditional ecological knowledge and community resilience to environmental extremes. A case study in Doñana, SW Spain. *Global Environmental Change*, 22: 640-650.
- . De Groot, R. 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst. Serv.*1, pp. 50–61.
- . De Groot R. S., Alkenrade R. Braat L., Hein L., Willemsen L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*.
- . Gros R., 2002. Thèse Université de Savoie : fonctionnement et qualité des sols soumis à des perturbations physiques et chimiques d'origines anthropiques : réponse du sol de la flore et de la microflore bactérienne tellurique [En ligne]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006161/document>. 20 p.
- . Groupement d'intérêt scientifique sur les sols (Gis Sol), 2011. Synthèse sur l'état des sols de France. Chromatiques éditions, 2. 3p
- . Haase, A. *et al.* 2012. Transitory urbanites: new actors of residential change in Polish and Czech inner cities. In: *Cities* 29, pp. 318-326.
- . Hein, L. 2006. The costs of PM10 air pollution in the Netherlands. *Milieu* 5:22-27.
- . Hillel D, 2008. Soil in the environment Crucible of terrestrial life. ACADEMIC PRESS, 55-75, 103-105, 135-145, 151, 163-173 p.
- . Kara-Mitcho E, Parisod J – Fr, Neyroud J-A, 2004. Le potentiel de minéralisation de l'azote du sol. Agroscope RAC Changins. *Revue suisse agricole*. 259-260 p.
- . Kreißig, J. 27 août 2013. Economic valuation of the impact of urban spatial dynamics on ecosystem services. Thèse de Master.
- . Kreuter, U. P. 2001. Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas. *Ecological Economics* 39, pp. 333 – 346.
- . Kumar, P. 2014. Behavioural foundation of response policies for ecosystem management: What can we learn from Payments for Ecosystem Services (PES)?
- . Laperche V. Et Mossmann J.R., 2004. Protocole d'échantillonnage des sols urbains pollués par du plomb.
- . Legros J.P., 1996. Cartographie des sols, presses polytechniques et universitaires romandes, 2-8 p.
- . Lessard G., Boulfroy E., 2008. Les rôles de l'arbre en ville. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO). Québec, 12p.
- . Likens G., 1992. Excellence in ecology, 3 : The ecosystem approach : its use and abuse. Ecology Institute, Oldendork/Luhe, Germany.

- . MA, 2005 Ecosystems and Human Well-being: Synthesis (Millennium Ecosystem Assessment). Island Press, Washington DC.
- . Machlis G., Force J., Burch W. Jr, The Human ecosystem part I : The human ecosystem as an organizing concept in ecosystem management, *Soc. Nat. Res.*, in press.
- . Mahanty, S, Tacconi, L & Suich, H. 2013. Access and benefits in payments for environmental services and implications for REDD+: lessons from seven PES schemes. *Land Use Policy*, 31, pp. 38-47.
- . Milne, S. & Adams, B. 2012. Uncovering the Politics of Community-level Payments for Environmental Services in Cambodia. *Development and Change*. Volume 43, pp 133–158.
- . Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), 2011. Friches urbaines et logistique urbaine, [En ligne]. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Friches-urbaines-et-logistique.html> (Page consultée le 13 janvier 2015)
- . Munoz-Pinaetal, C.A. *et al.* 2008. Paying for the hydrological services of Mexico's forest : analysis, negotiations and results. *Ecol.Econ.* 65, pp. 725–736.
- . Muradian, R. 2013. Payments for ecosystem services as incentives for collective action. *Soc. Nat. Resour.* 26(10), 1155–1169.
- . Neitzel, C. 2014. Paying for environmental services: Determining recognized participation under common property in a peri-urban context. *Forest Policy and Economics*. Volume 38, pp. 46–55.
- . Pansu M, Gautheyrou J, Loyer J, 1997. L'analyse du sol Echantillonnage, instrumentation et contrôle. *MASSON*, 4-16, 175-203, 233-247, 264-288, 318-319 p.
- . Pickett S., Burch W. Jr, Dalton S. and Foresman T., Grove M., Rowntree Rowan, 1997. A conceptual framework for the study of human ecosystems in urban areas. *Urban Ecosystems*, 185-199 p.
- . Reju E. « Les toitures végétales font respirer les villes ». *La Croix* [En ligne]. (Septembre 2013). <http://www.la-croix.com/Actualite/France/Les-toitures-vegetales-font-respirer-les-villes-2013-09-09-1010826> (Page consultée le 11 janvier 2015)
- . Schindelbeck R, van Es H, Abawi G, Wolfe.D, Whithlow T, Guginot B, Idowu O, Moebius-Clune B, 2008. Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management. *Landscape and urban planning*. ELSEVIER, 73-80 p.
- . Stas M., ingénieur chercheur, projet DESTISOL, rencontrée le 12 décembre 2014
- . Université de Nice Sophia-Antipolis (UNS), 2008. La dégradation des sols dans le monde, [En ligne]. <http://unt.unice.fr/uoh/degsol/repartition-sol.php> (Page consultée le 11 janvier 2015)
- . Van Noordwijk, M., & Leimona, B. 2010. Principles for fairness and efficiency in enhancing environmental services in Asia: payments, compensation, or co-investment? *Ecology and Society* 15(4): 17.
- . Pascual, U. and Perrings, C. 2007. Developing incentives and economic mechanisms for in-situ biodiversity conservation in agricultural landscapes *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- . Schägner *et al.* 2013. Mapping ecosystem services' values: current practice and future prospects. *Ecosystem Services* 4:33-46. *Computer and Information Science* 108:1-7.
- . TEEB. 2011. Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB).

- . Wikipédia : définition de Système d'Information Géographique.
- . Wunder S. 2007. The Efficiency of Payments for Environmental Services in Tropical Conservation.
- . Wunder, S. *et al.* 2008. Taking Stock: A Comparative Analysis of Payments for Environmental Services Programs in Developed and Developing Countries.
- . Zanella, M. 2014. Why do farmers join Payments for Ecosystem Services (PES) schemes? An Assessment of PES water scheme participation in Brazil.
- . 2010, Suivi annuel des épandages des effluents urbains et industriels – guide méthodologique 2ème édition.
- . Support microsoft office : <https://support.office.com/fr-be/article/Notions-fondamentales-sur-la-conception-dune-base-de-donn%25C3%25A9es-1eade2bf-e3a0-41b5-ae6-d2331f158280?ui=fr-FR&rs=fr-BE&ad=BE&fromAR=1>
- . Web Soil Survey : <http://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/HomePage.htm>