



## LAURE VIDAL-BEAUDET

Institut Agro Rennes-Angers – Enseignante, chercheuse en génie civil appliqué au paysage

*SITERRE I et II : un projet Plante&Cité pour une filière éco-efficiente de valorisation des déchets et sous-produits industriels ou urbains pour développer des sols fertiles.*



# SITERRE I et II: un projet Plante&Cit  pour une filière éco-efficente de valorisation de déchets et sous- produits industriels ou urbains pour développer des sols fertiles.

*Colloque Où va la terre?*

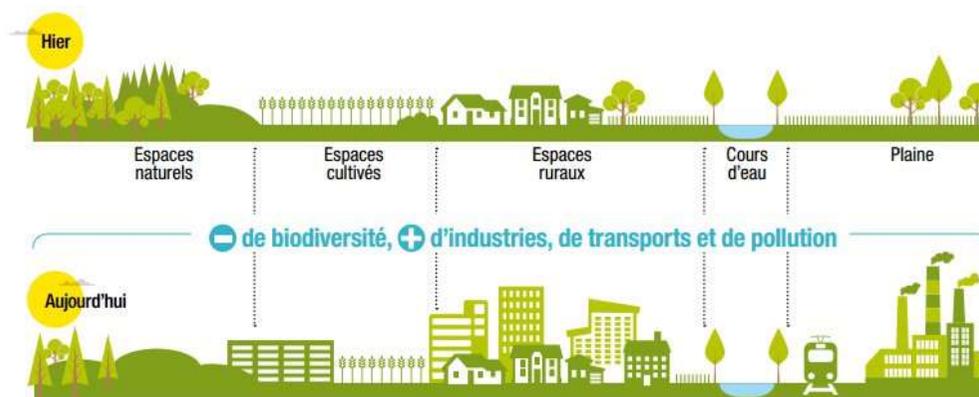
*« Préserver et valoriser le sol de la cité »*

*Jeudi 13 octobre 2022, H pia, Genève*

Laure Vidal-Beaudet, maître de conférences

# L'urbanisation des sols

L'artificialisation = changement d'affectation des surfaces agricoles, forestières ou à l'état naturel  
 Ⓢ perte de ressource en sol à usage agricole et perte de biodiversité

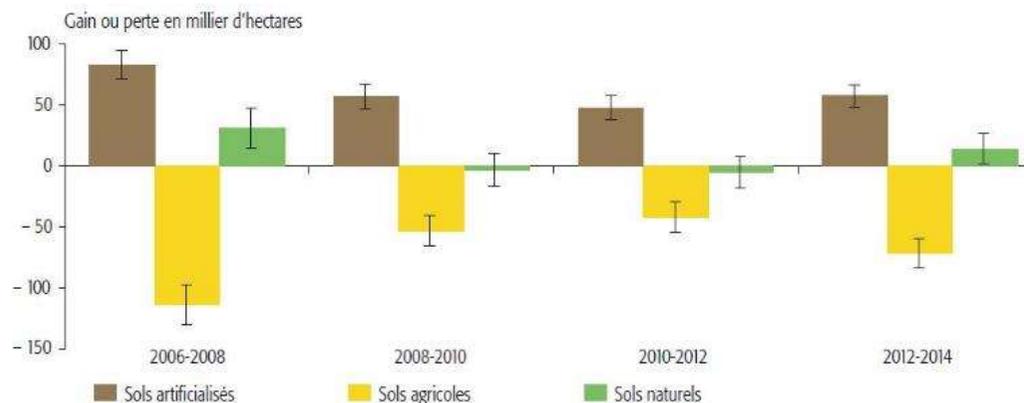


MEDDE (2014). L'environnement en France - Les grandes tendances

Surfaces artificialisées = habitat urbain, espaces végétalisés urbains, zones d'activités commerciales et industrielles, infrastructures de transport, mines et carrières, équipements sportifs



+ 1,2% de sols artificialisés entre 2012 et 2014



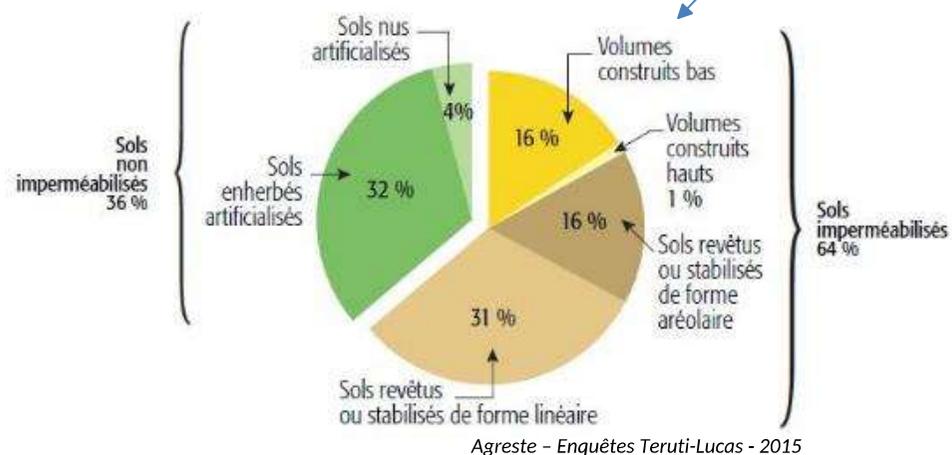
Enquêtes Agreste - Teruti Lucas 2015

# L'urbanisation des sols

En 2014, 9,3 % du territoire métropolitain est artificialisé (Teruti Lucas) et 5,6 % pour Corine Land Cover

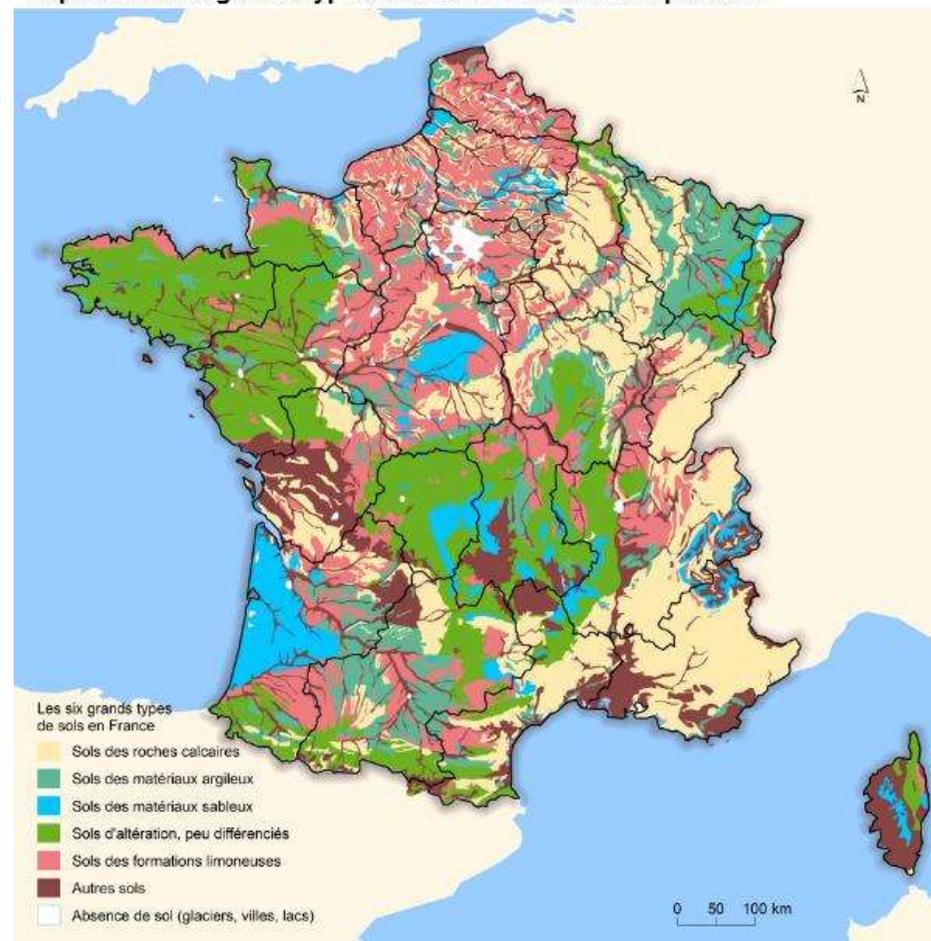
Sols artificialisés urbains =  
sols imperméabilisés + sols  
couverts de végétation insérés  
dans le bâti et la voirie

Un hectare sur deux  
consommé par  
l'habitat individuel



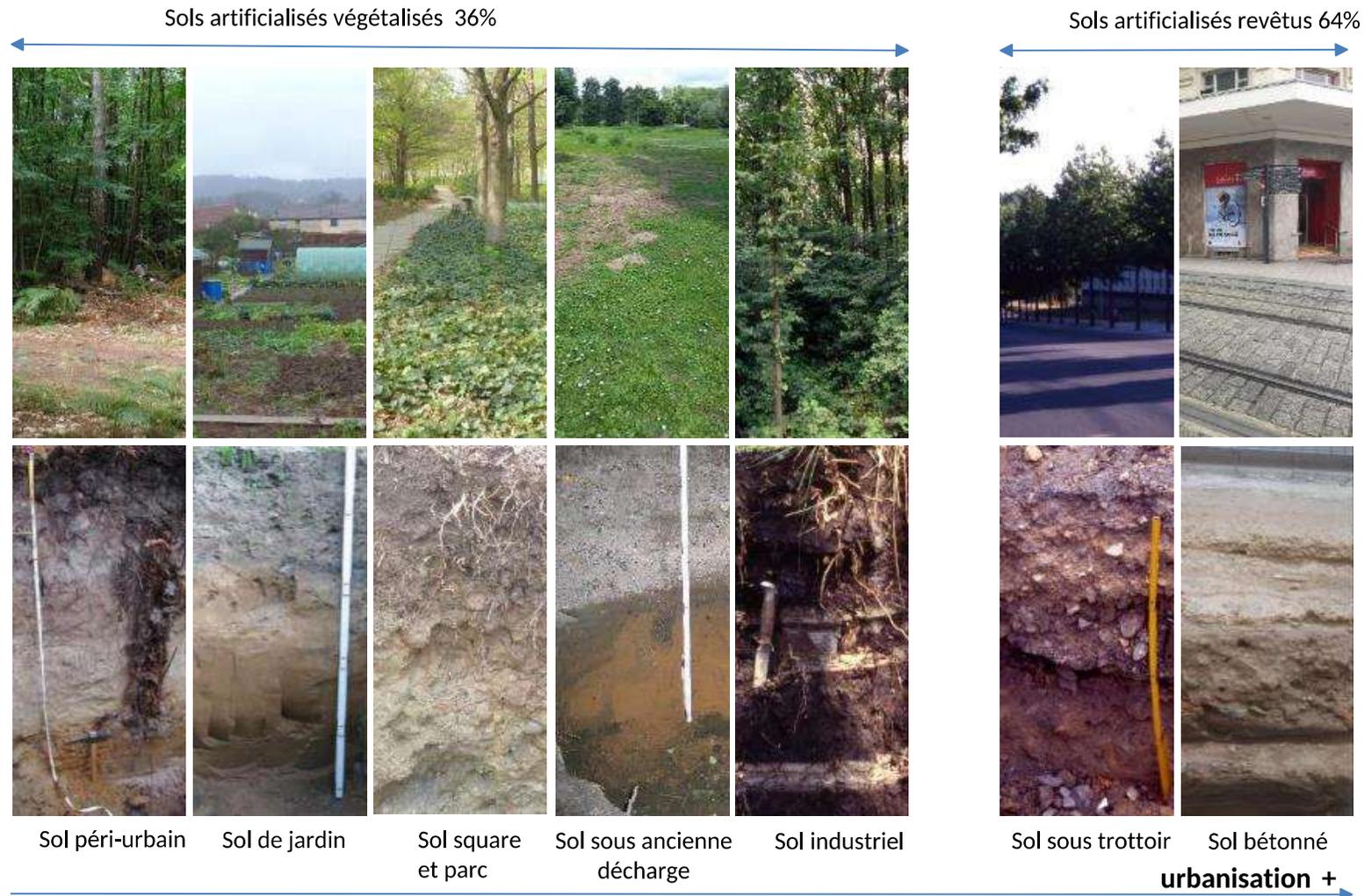
Structure typique d'implantation d'habitat individuel et proportion des surfaces imperméabilisées (couleur noire 70% de l'espace) Union européenne 2012

Répartition des grands types de sols en France métropolitaine



Source : Inra, BDGSF à 1/1 000 000, 1998. Traitements : SoeS, 2014

# Y a t'il des sols en ville?



➔ Grande variabilité spatiale et verticale, dépôts successifs hétérogènes stratifiés

# Comment se sont-ils formés?

## Formation des sols « naturels » les facteurs de la pédogénèse

Facteur anthropique

Facteur : Température, pluie, gel

Couvert végétal, microfaune et macrofaune

Conditions topographiques



Matériau parental

**PEDOGENESE** Mise en place à long terme : 100 – 1000 ans

D'après Fourvel 2018

## Formation des sols urbains impact fort du facteur anthropique

superposition de sols enterrés, dépôts successifs (remblai, ancienne carrière, dépôt)

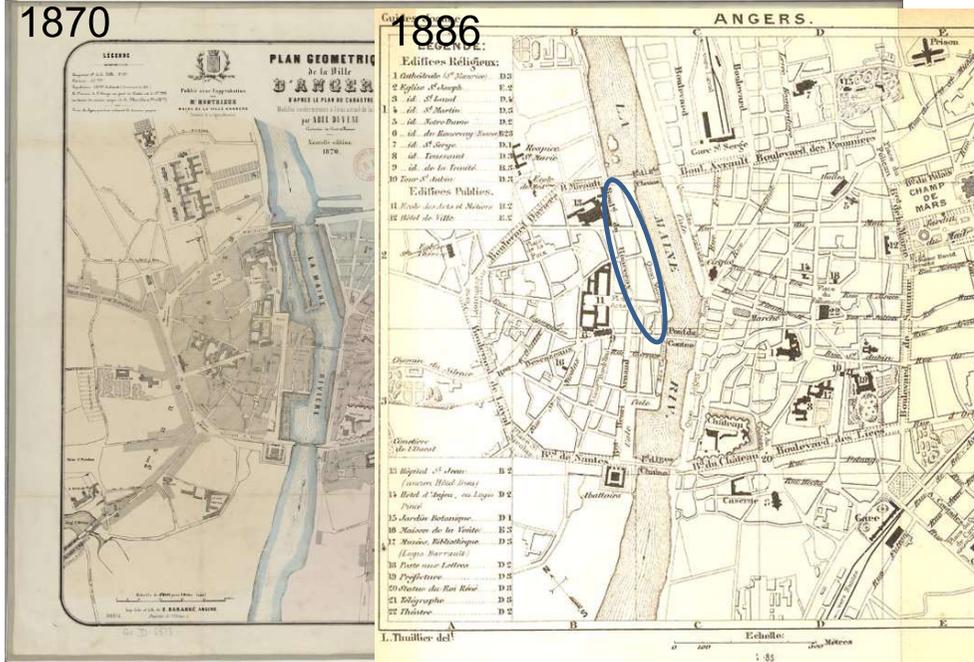


Dépôts anthropiques romains (France, quartier gare d'Angers 2010)



Dépôts anthropiques médiévaux (France, Cathédrale d'Angers 2016).

©Jean-Pierre Rossignol



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

# Les fonctions attendues pour les sols urbains



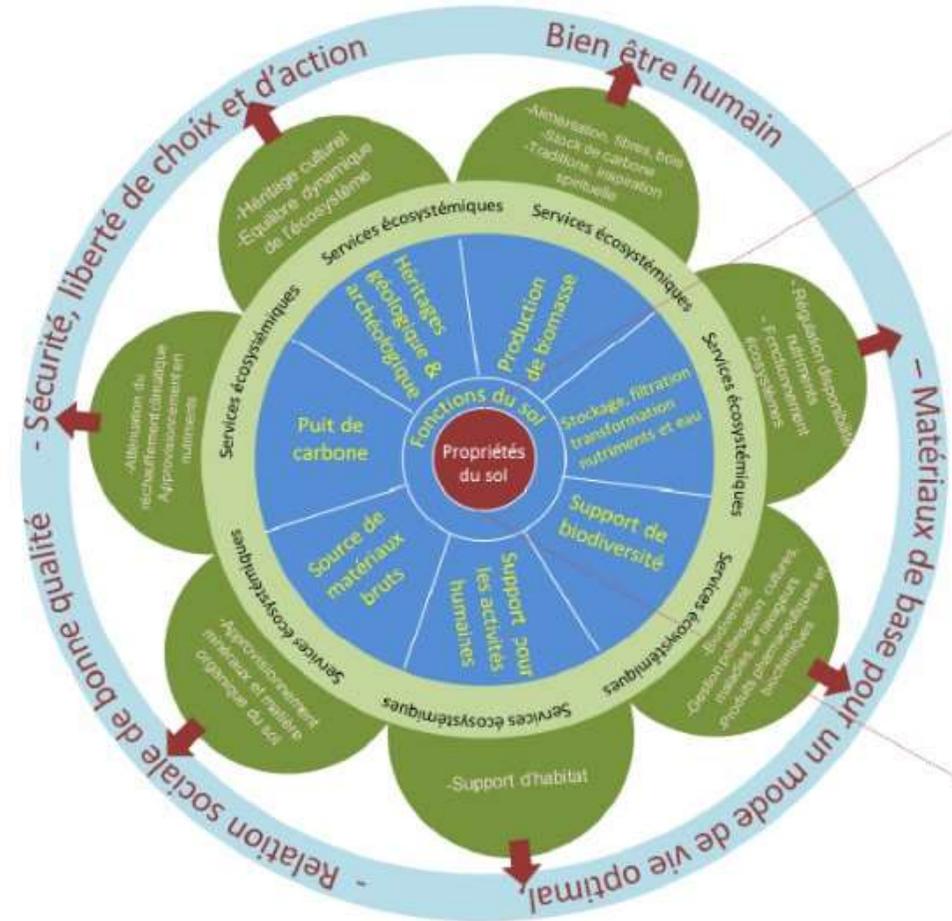
- ① Habitat pour les organismes du sol
- ② Cycle des nutriments, filtre et tampon
- ③ Support pour la croissance des plantes
- ④ Régulation du cycle de l'eau, du climat et stockage de carbone
- ⑤ Support et matériel.
- ⑥ Environnement physique et patrimoine culturel

fonctions 1, 2 et 3  
Gestionnaires des espaces végétalisés

fonctions 2 et 5  
Ingénieur urbain

fonctions 4 et 5  
Aménageur urbain

fonctions 6  
Archéologues



Schématisation du lien fonctions du sol et services écosystémiques  
Source : d'après Adhikari et Hartemink, 2016

# Demande de sols urbains multifonctionnels

## ➔ Support de la nature en ville

Forte demande sociale et environnementale des citoyens pour : plus de proximité avec la nature, une amélioration de la qualité de vie , une horticulture et agriculture urbaine.



**Un grand nombre de services écosystémiques rendus par les espaces végétalisés:**

Régulation du climat de la qualité de l'air ; infiltration de l'eau ; réduction des risques de ruissellement et d'inondation ; maintenir la biodiversité ; récréation ; éducation ...

➔ **Les villes doivent développer leurs stratégies de végétalisation et de renaturation dont le succès dépend de la qualité et des fonctions assurées par **les sols supports** de la végétation.**

# Les caractéristiques des sols en ville

## ➡ Modification du continuum sol-plante-atmosphère

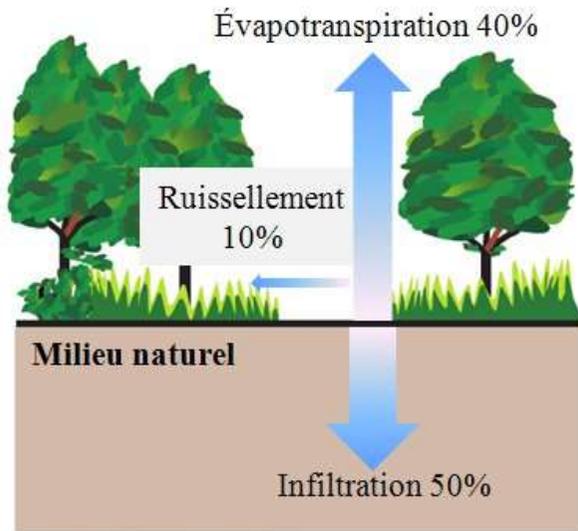
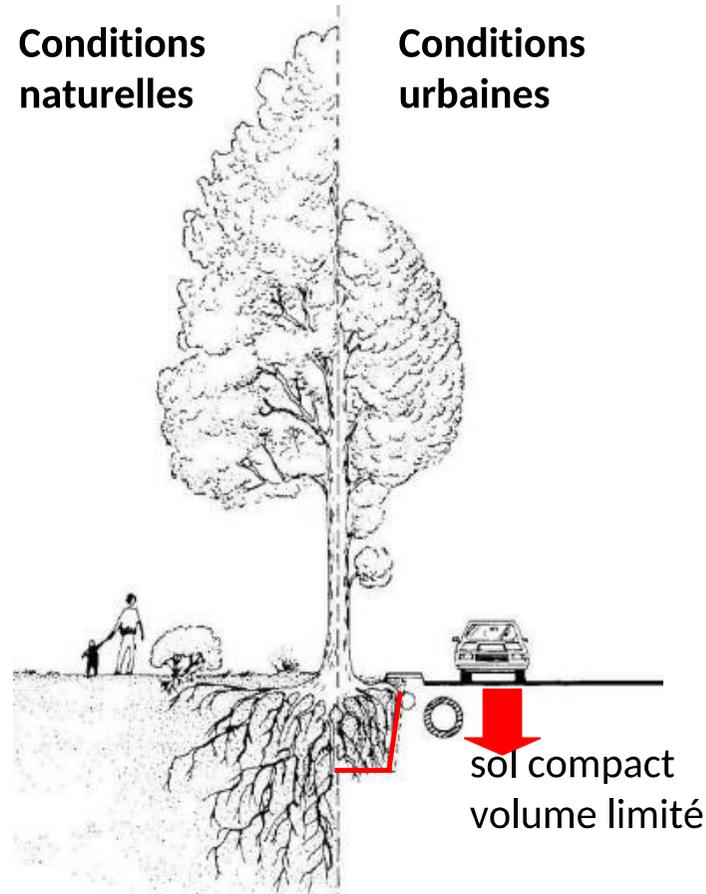
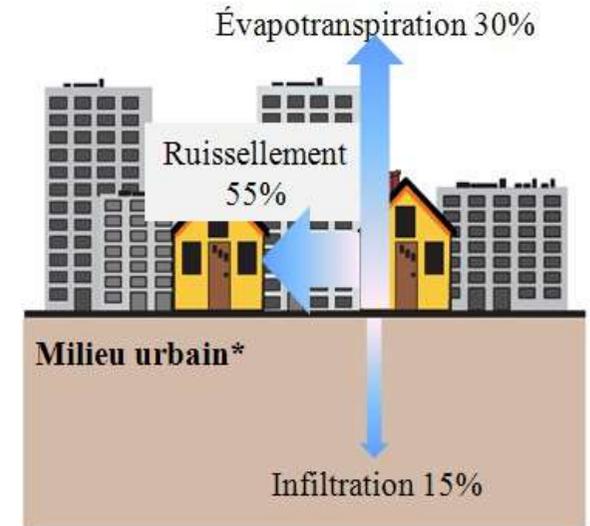


Image EPA (2003) modifiée



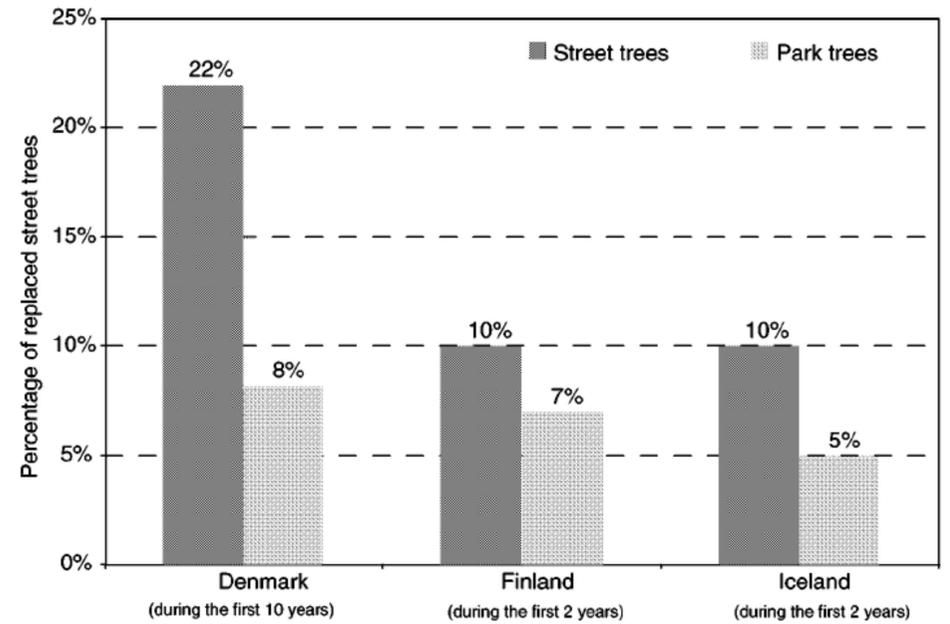
(d'après Freydet in Bourgery & Mailliet, 1993)



\*Asphalté ou construit entre 75 et 100%

➡ Sols peu fertiles et rendant moins de services écosystémiques

# ➔ Des volumes de sol peu propices à la production de biomasse



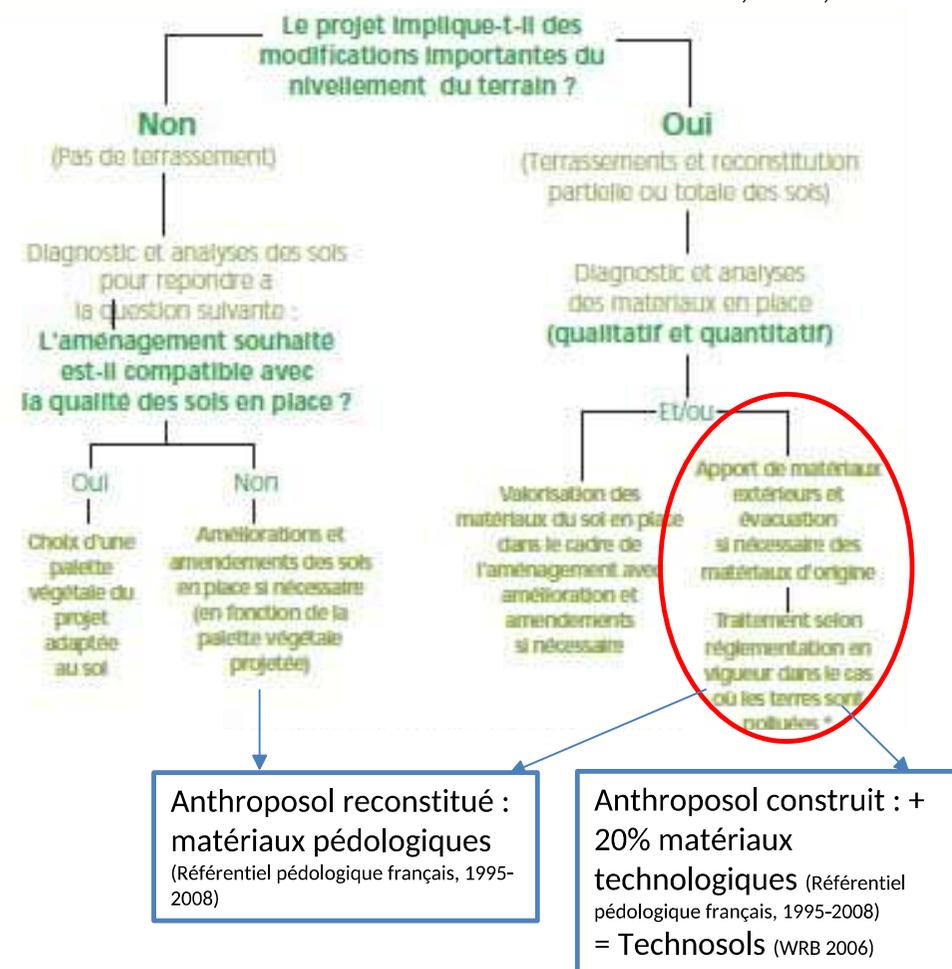
Taux de remplacement des plantations nouvelles d'arbres d'alignement durant la phase d'établissement (Pauleit et al, 2002)

# Des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## ➔ Contexte réglementaire et pratiques actuelles pour la rédaction du CCTP

- CCTG fascicule 35 Aménagements paysagers avril 1999, Chapitre N.2.2 terre végétale
- NF U 44-551 Support de cultures – dénominations, spécifications, marquages (AFNOR 2002) qui définit les termes de « terre végétale » et de « terre support »,
- NF U 44-051 Amendements organiques - dénominations, spécifications, marquages (AFNOR 2006) qui définit les amendements organiques
- Règles professionnelles du paysage dont 2012 « travaux des sols, supports de paysage : caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution, règles professionnelles » (PC1-R0, UNEP, 2012) qui introduit le terme « terres-ressources »
- 2017 Qualité et usage des sols urbains: points de vigilance [http://www.cerema.fr/IMG/pdf/pollusols\\_web-2.pdf](http://www.cerema.fr/IMG/pdf/pollusols_web-2.pdf)

In UNEP, 2012, P.C.1-R0



# ➔ Exemples de pratiques contemporaines

1998

2012

1994 Cité internationale Lyon  
Des milliers de m<sup>3</sup> de terre et graviers



<http://guy.raphat.pagesperso-orange.fr/citeinter.htm>



➔ **Consommation de matériaux non renouvelables ; risque pour la sécurité alimentaire**

## ➔ Exemples de pratiques contemporaines

2018  
Réaménagement complet Allée  
Jeanne d'Arc à Angers (600 m).  
Remplacement de 30 000 m<sup>3</sup> de  
sol par **terre agricole**



Plantation arbre alignement  
Fabrication de mélange  
terre-pierre avec terre agricole  
et granulats de carrière



➔ **Consommation de matériaux non renouvelables ; risque pour la sécurité alimentaire**

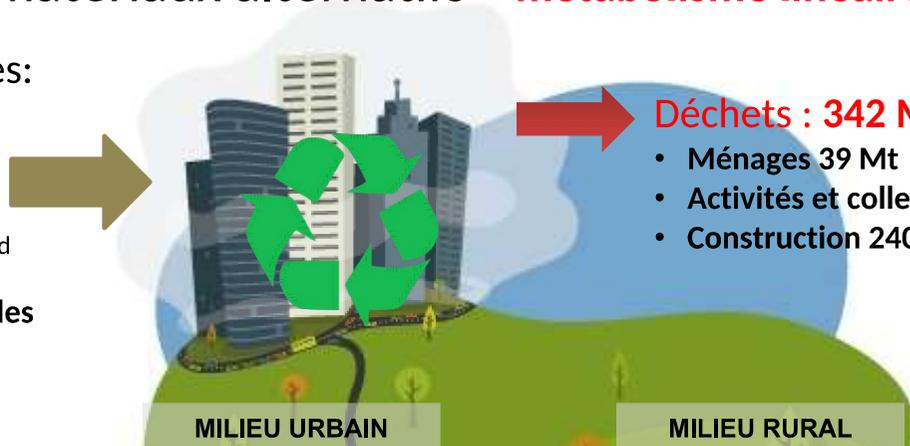
# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

➡ Avec des matériaux alternatifs « **métabolisme linéaire** » vers un « **METABOLISME CIRCULAIRE** »

Matériaux primaires:

**790 Mt utilisés en 2018 en France**

- Construction (e.g. bois, briques, métaux, pétrole and gaz)
- Végétalisation des villes (e.g. terres arables, granulats de carrière)



**Déchets : 342 Mt produits en 2018**

- Ménages 39 Mt
- Activités et collectivités 70 Mt
- Construction 240 Mt

Leur devenir

- 6 % valorisation énergétique
- 66 % recyclage
- 28 % à éliminer

➡ Le génie pédologique **des sites dégradés** : construire des sols fertiles avec des déchets  
Ex: Cokerie Homécourt site du GISFI

8000 tonnes de terre traitée; 8000 tonnes de boues papetières ; 400 tonnes de compost DV



Octobre 2007



Mai 2009

Prairie extensive

(LSE Université de Lorraine INRA; VALTERRA)

# Le génie pédologique au service de la construction de sols fertiles en sites dégradés

Structuration rapide, altération chimique, colonisation biologique



Séré et al., 2011, *Journal of Soils and Sediments*

**➡ les sols construits sont rapidement capables de remplir les mêmes fonctions qu'un sol naturel**

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

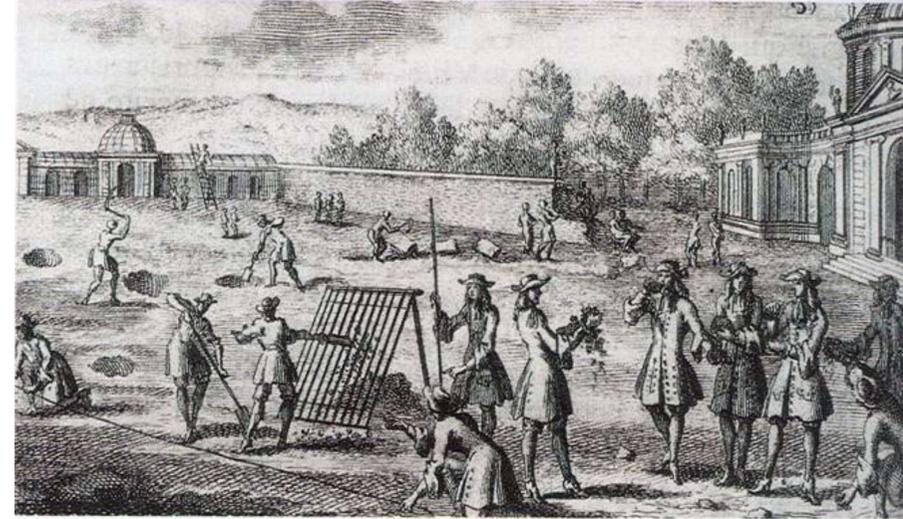
## ➔ En contexte urbain

### Travaux d'aménagement du Potager du Roy à Versailles (1678-1683)

terrassements, remblais et amendements pour aménager « l'Etang puant »



<http://ark.bnf.fr/ark:/12148/cb40584898q> (1662)



La Quintinie, *Instruction pour les jardins fruitiers et potagers*, nouvelle édition (1730)

### Construction de sol à Central Park, décharge marécageuse 1857-1876

Apport de terre et plantation 500 000 arbres



<https://www.nypl.org/>



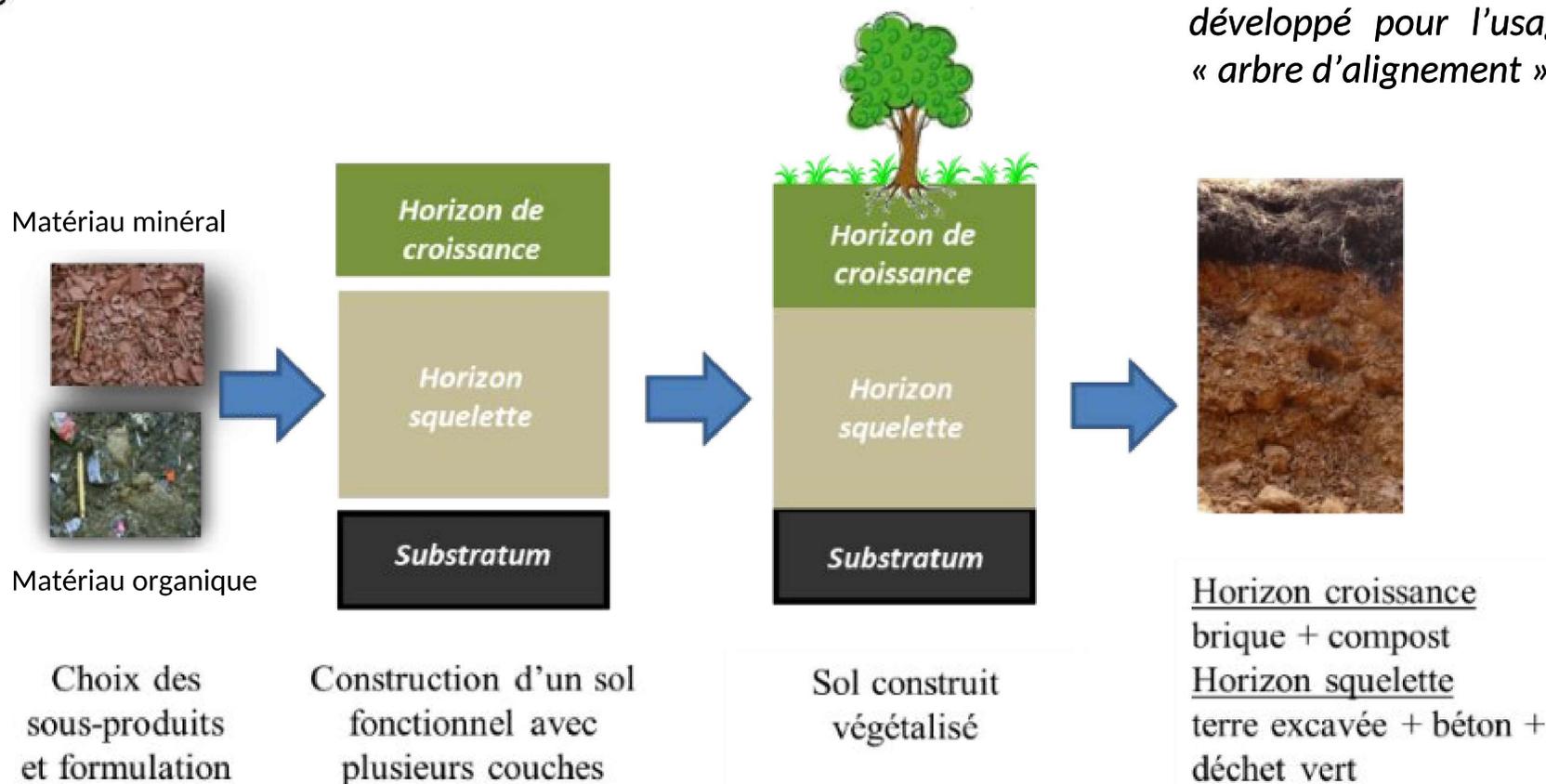
Manhattan - a natural history of New York City, EW Sanderson, 2009

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

➔ Le génie pédologique pour construire des sols fertiles avec des matériaux alternatifs =  
Projet Siterre (2011-2015; financement ADEME) procédé de construction de sol



Exemple du profil de sol développé pour l'usage  
« arbre d'alignement ».



# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## 6 déchets minéraux et inertes



## 5 déchets organiques ou organo-minéraux



## Combinaisons possibles

55 mélanges binaires

165 mélanges ternaires



15 mélanges binaires

10 mélanges ternaires

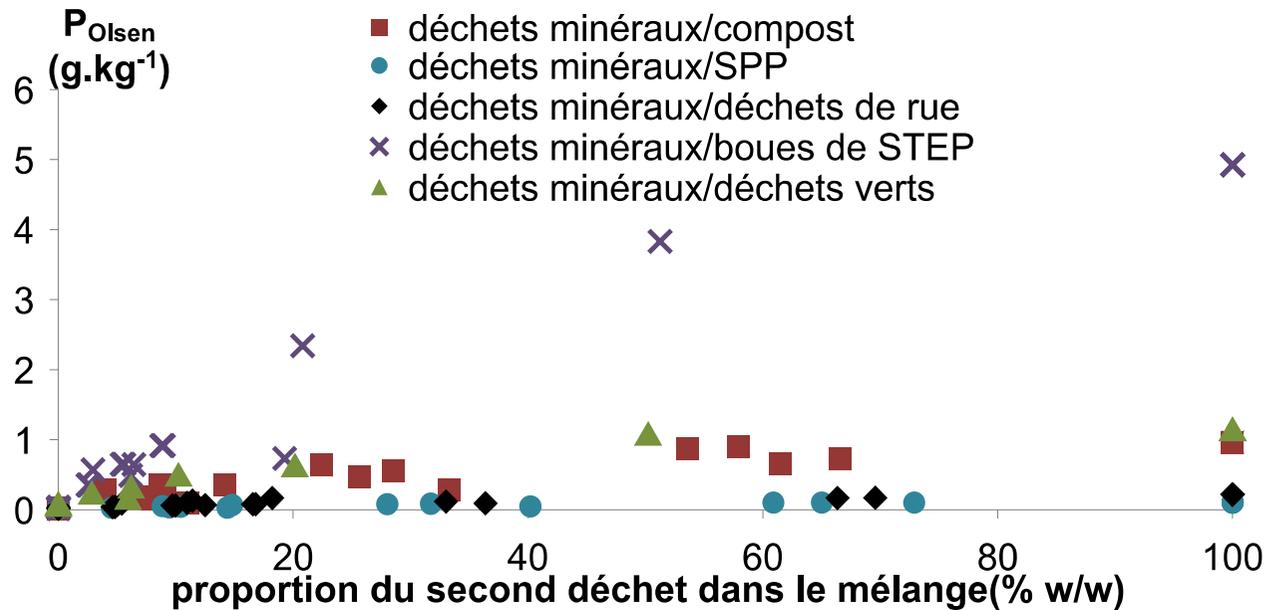


75 mélanges testés

$C_{tot}$   $N_{tot}$  CEC  $P_{Olsen}$  pH  $CaCO_3$   
*masse volumique apparente*  
*teneur en eau*

*Modélisation des propriétés des mélanges (Rokia et al, 2014)*

## Courbe dose-réponse pour mélange binaire de déchet: $P_{\text{Olsen}}$



- $C_{\text{tot}}$ ,  $P_{\text{Olsen}}$ , CEC modélisés par courbe de régression
- finesse pas toujours satisfaisante: exploration d'autres modèles polynomiaux pour décrire les variations de fertilité des mélanges avec différents ratios.

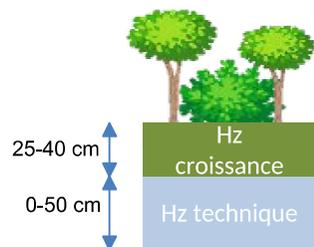
516 mélanges testés avec une bonne justesse

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

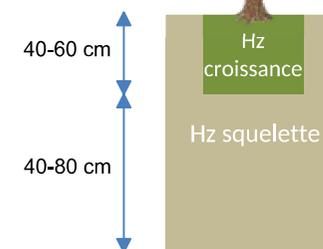
➔ Quel design du profil de sol en fonction des usages : nombre et type d'horizons



Accompagnement de voirie  
Tramway  
Toiture terrasse extensive



Square et parc  
Accompagnement de bâtiment  
Toiture terrasse intensive  
Jardins vivriers  
Sites industriels

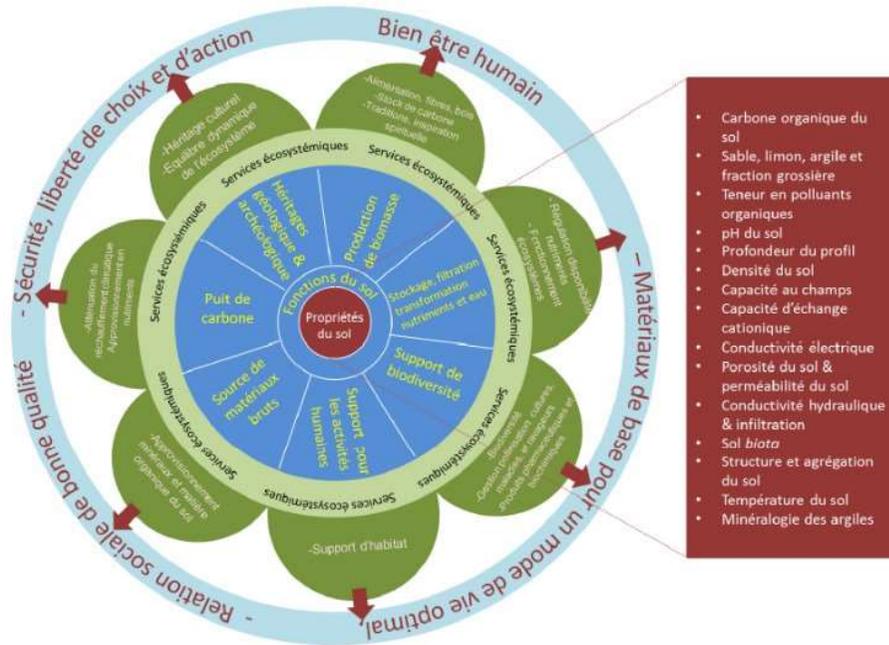


Arbres d'alignement



# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

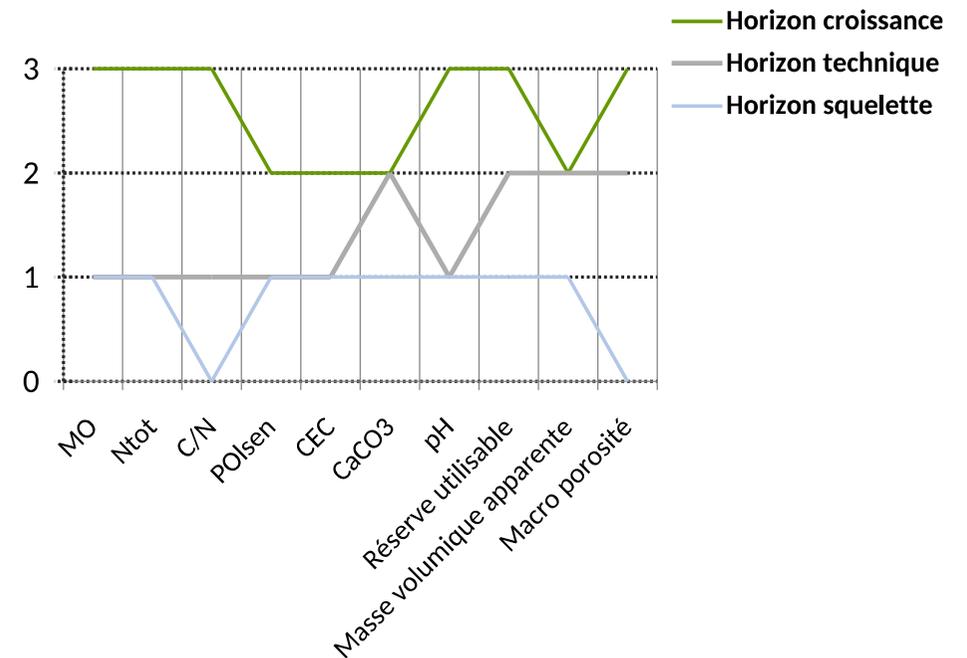
➔ Quelles propriétés idéales pour chaque horizon pour assurer des fonctions multiples?



- Carbone organique du sol
- Sable, limon, argile et fraction grossière
- Teneur en polluants organiques
- pH du sol
- Profondeur du profil
- Densité du sol
- Capacité au champs
- Capacité d'échange cationique
- Conductivité électrique
- Porosité du sol & perméabilité du sol
- Conductivité hydraulique & infiltration
- Sol biota
- Structure et agrégation du sol
- Température du sol
- Minéralogie des argiles

Programme Siterre: sélection de paramètres de qualité agronomiques des sols :

- 3 paramètres de fertilité physique
- 7 paramètres de fertilité chimique



Schématisation du lien propriétés du sol/fonctions du sol et services écosystémiques

Source : d'après Adhikari et Hartemink, 2016

➔ Définition de gammes de valeurs de chaque paramètre (Damas et Coulon, 2016)

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## ➔ Evaluation de la fertilité des sols construits avec des déchets

### Station lysimétrique du GISFI

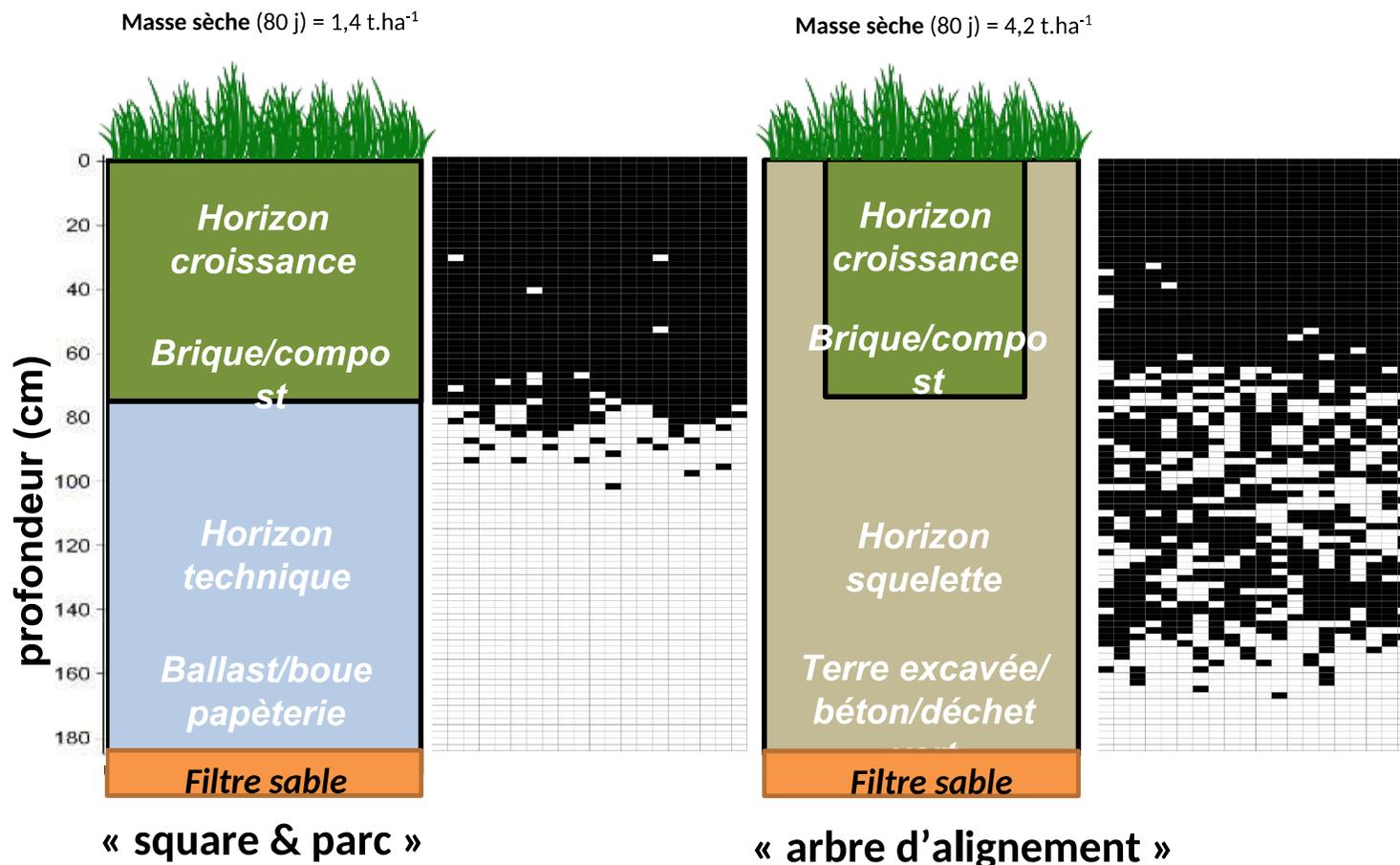
Localisation : Homécourt (Meurthe-et-Moselle)

Nature des expérimentations : *in situ*

Durée : 24 mois

Végétation : Ray-grass (*Lolium perenne*)

Usage: square et parc et arbre d'alignement



- Densité racinaire élevée + Production de biomasse équivalente à une prairie extensive (2 à 4 t ha<sup>-1</sup>)
- Teneur en P<sub>Olsen</sub> (g.kg<sup>-1</sup>) = 0,34 supérieure à la moyenne des sols français = 0,05

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## ➔ Evaluation de la fertilité des sols construits avec des déchets

Plateforme Institut Agro Angers

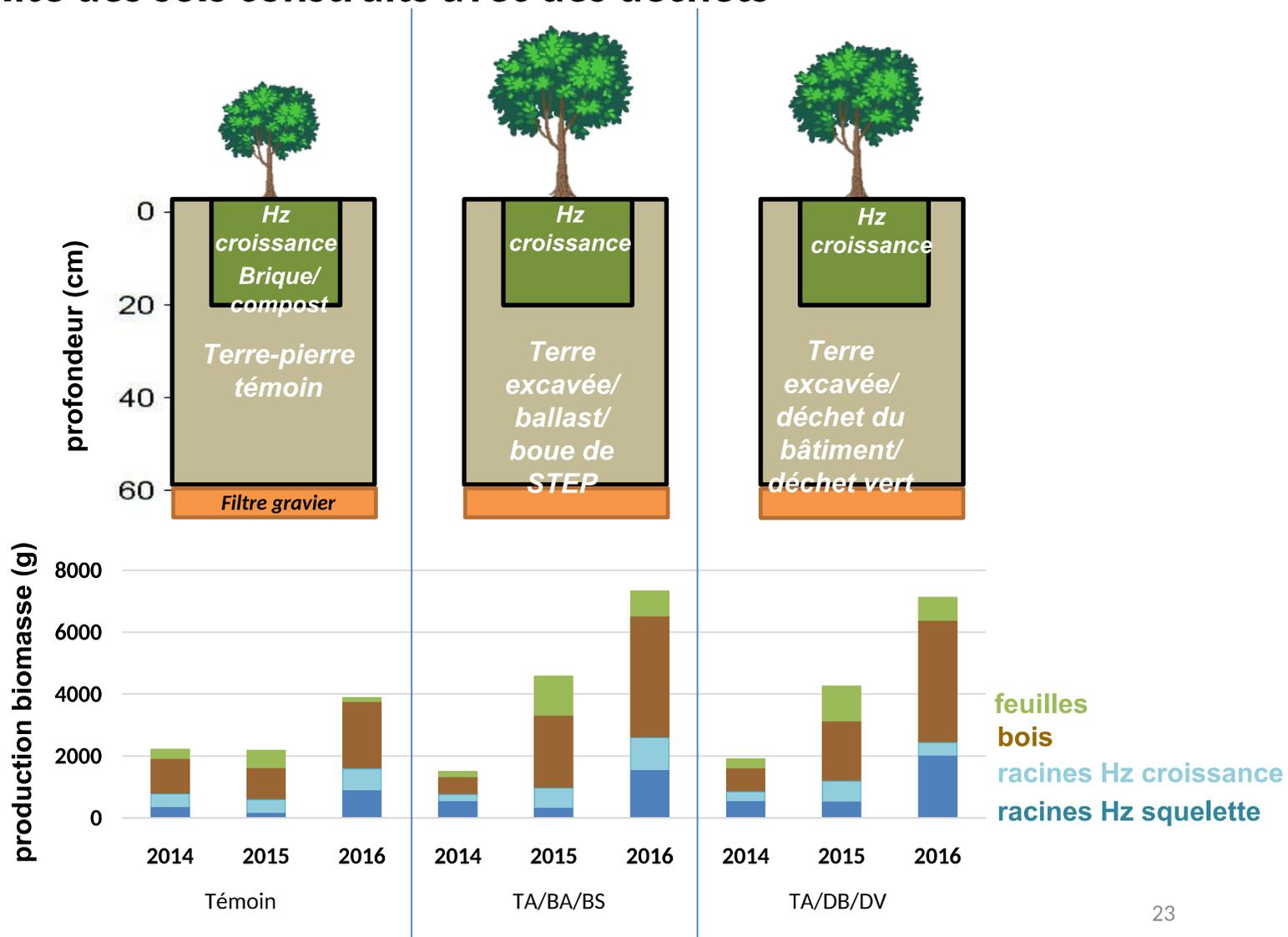
Localisation : Angers (Maine et Loire)

Nature des expérimentations : *in situ*

Durée : 36 mois

Végétation : érable (*Acer platanoides*)

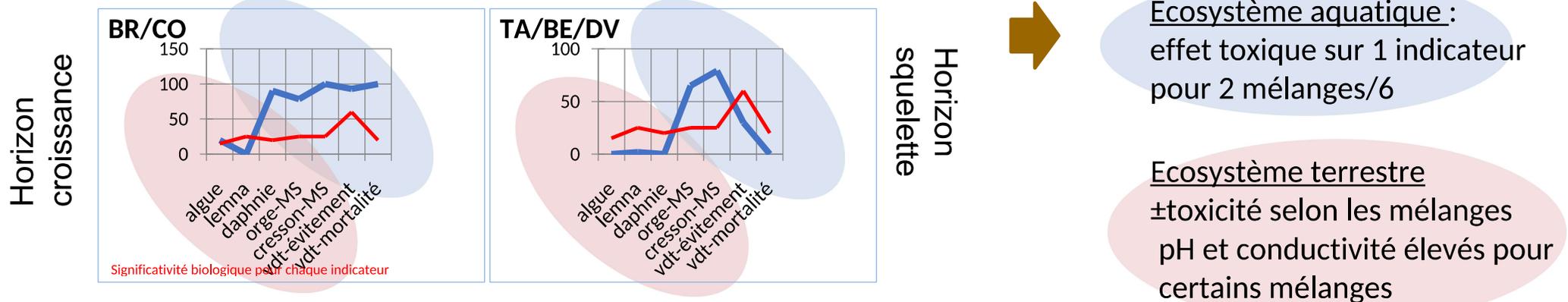
Usage : arbre d'alignement



# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## ➔ Evaluation de l'innocuité pour l'environnement et la santé

1. **Éléments traces dans les mélanges** : les concentrations sont peu élevées dans les mélanges testés et < valeurs limites fixées par la norme NF U 44-551 des supports de culture .
2. **Contamination, relargage éventuel dans les eaux (essais de percolation)** : Aucun déchet et mélange avec teneurs problématiques Sb (Antimoine), Mo (Molybdène), sulfates (briques)
3. **Evaluation écotoxicologique : pour les écosystèmes aquatiques et terrestres**



## 4. Evaluation Quantitative des Risques Sanitaires

3 cibles: promeneurs enfants, promeneurs adultes, chargé d'entretien

Scénarii majorants: 365 j/an d'exposition, éléments considérés sous leur forme la plus toxique

➔ Peu ou pas de risques pour les usagers,  
dépassement pour le chrome et l'arsenic : à relativiser par rapport aux fonds géochimiques (milieu urbain)

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## ➔ Version alpha d'un outil multicritère d'aide à la décision

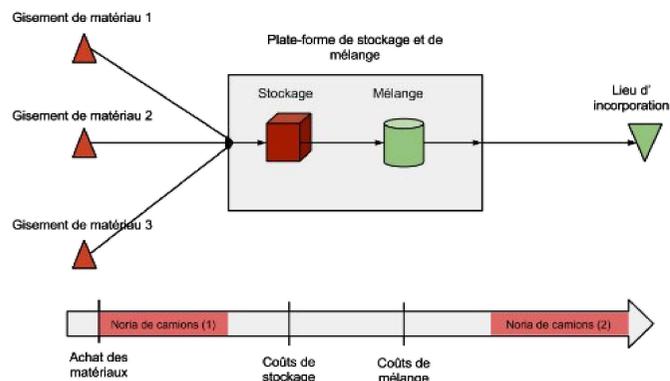
faciliter la différenciation de mélanges de matériaux afin de sélectionner le plus pertinent en fonction de :

- contraintes techniques et d'usages,
- contraintes de disponibilité locale de matériaux,
- des informations de coûts,
- des informations environnementales et d'acceptabilité

Analyse	ID	Acceptabilité	Coût économique	Environnement (émissions CO2 kg)	de débris excavés (masse)	de déconstruction de bâtiments en mélange (masse)	Macro-porosité	M.O.	Azote total	ratio carbone sur Azote	Polsen	Capacité d'échange
Non	6548	0	1 645 €	202	0,1	0,1	0,8	0,26	31	2	8,7	0,35
Non	6549	1	1 729 €	202	0,15	0,05	0,8	0,28	44	3	9,4	0,42
Non	6550	1	2 005 €	287	0,05	0,25	0,7	0,24	17	2	6,3	0,27
Non	6551	1	2 101 €	287	0,1	0,2	0,7	0,26	29	2	7,9	0,36
Non	6552	1	2 166 €	224	0,15	0,15	0,7	0,28	42	3	8,8	0,43
Non	6553	1	2 263 €	224	0,2	0,1	0,7	0,29	54	3	9,2	0,5
Non	6554	1	2 359 €	224	0,25	0,05	0,7	0,31	67	4	9,4	0,57
Non	6555	1	2 484 €	372	0,05	0,35	0,6	0,24	15	2	5,7	0,27
Non	6556	1	2 265 €	309	0,1	0,3	0,6	0,25	28	2	7,4	0,36
Non	6557	1	2 377 €	309	0,15	0,25	0,6	0,27	40	3	8,3	0,44
Non	6558	1	2 490 €	309	0,2	0,2	0,6	0,29	53	3	8,9	0,51
Non	6559	1	2 571 €	246	0,25	0,15	0,6	0,31	66	4	9,1	0,58
Non	6560	1	2 684 €	246	0,3	0,1	0,6	0,33	79	5	9,3	0,64
Non	6561	1	2 796 €	246	0,35	0,05	0,6	0,34	92	6	9,4	0,69
Non	6562	1	2 713 €	457	0,05	0,45	0,5	0,23	15	2	5,3	0,26
Non	6563	1	2 848 €	457	0,1	0,4	0,5	0,25	27	2	7,1	0,35
Non	6564	1	3 087 €	394	0,2	0,3	0,5	0,29	53	4	8,6	0,51
Non	6565	1	2 891 €	331	0,25	0,25	0,5	0,31	66	4	9	0,58

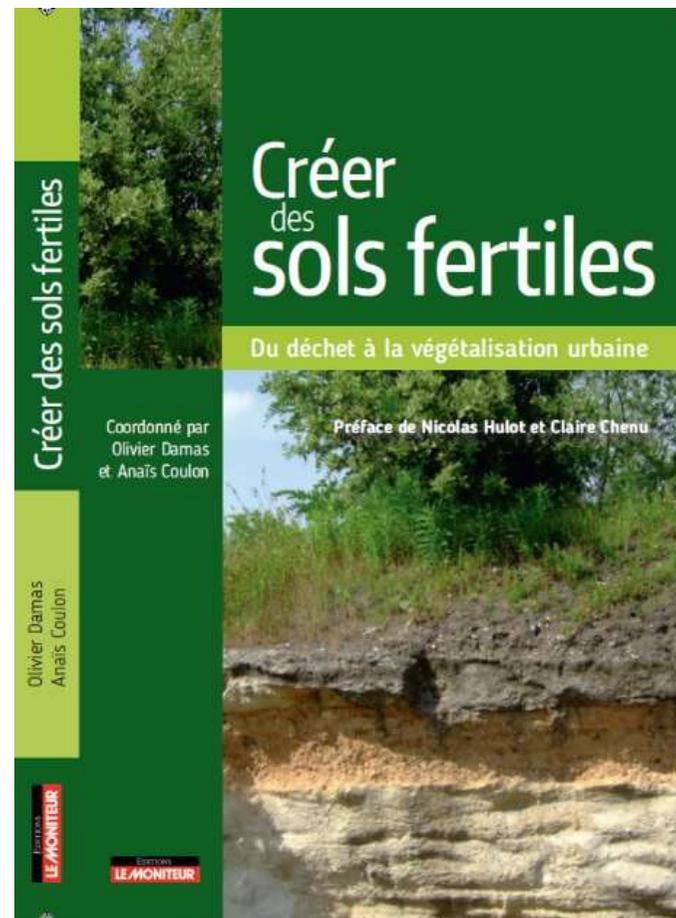
# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## Version alpha d'un outil multicritère d'aide à la décision



€/tonne	Horizon de croissance (cm)				Horizon squelette (cm)			
	Transport	Achat Matériau	mélange stockage	Coût total	Transport	Achat Matériau	mélange stockage	Coût total
<b>Angers</b>								
Construction sols	2,3	-3,9	6,5	4,9	2	2,5	6,5	11
Traditionnelle	7,5	9	6,5	23,0	6,1	13,7	6,5	26,3
<b>Nancy</b>								
Construction sols	7,5	-3,9	6,5	10,1	5,8	2,6	6,5	14,9
Traditionnelle	8,7	9	6,5	24,2	36,8	13,2	6,5	56,5
<b>Paris/Île-de-France (IDF)</b>								
Construction sols	6,1	-7,9	6,5	4,7	5,2	5	6,5	16,7
Traditionnelle	8,6	15,3	6,5	30,4	49,8	13,8	6,5	70,1

 Un outil à finaliser



Livre paru le 30 novembre 2016, 705 ex vendus

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## Où en est-on?

è directive cadre déchet qui encadre la valorisation des matériaux incite très clairement à la valorisation des déchets « **sans mettre en danger la santé humaine et sans nuire à l'environnement** ».

D'après le **code de l'environnement (2017)**, Les matériaux susceptibles d'être utilisés pour la construction de sols sont des « **biens meubles, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire** », c'est-à-dire des matériaux prenant le statut de déchet au sens de la réglementation européenne, et donc française (Art L-541-1 du code de l'Environnement)



- è Existence de **guides méthodologiques de valorisation de matériaux** qui expose la démarche à suivre et accompagne les opérateurs pas à pas
- Guide en technique routière pour la valorisation des matériaux de déconstruction issus du BTP
- Prise en compte de la ressource en eau au droit du site

# Construire des sols fertiles pour l'aménagement des espaces végétalisés

## Où en est-on?

2021 Guides de valorisation hors site des terres excavées dans les projets d'aménagement <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>



	NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3
	APPROCHE NATIONALE	APPROCHE RÉGIONALE OU URBAINE	APPROCHE AU CAS PAR CAS
	Condition A : Maintien de la qualité des sols du site receveur		
	Valeurs seuils nationales libératoires	Valeurs libératoires issues de fonds pédo-géochimiques régionaux ou urbains	Valeurs du site receveur libératoires
	Condition B : Préservation de la ressource en eau		
	Valeurs seuils nationales libératoires	Valeurs libératoires issues de fonds pédo-géochimiques régionaux ou urbains	Critères libératoires basés sur Annexe II Arrêté 12/12/2014



des outils dédiés permettent **la traçabilité** des mouvements de matériaux et **la conservation de la mémoire** sont disponibles.



des outils pratiques mais encore incomplets sur l'ingénierie pédologique et la construction de sols avec des matériaux alternatifs

Des guides envisagés sur la valorisation en aménagements

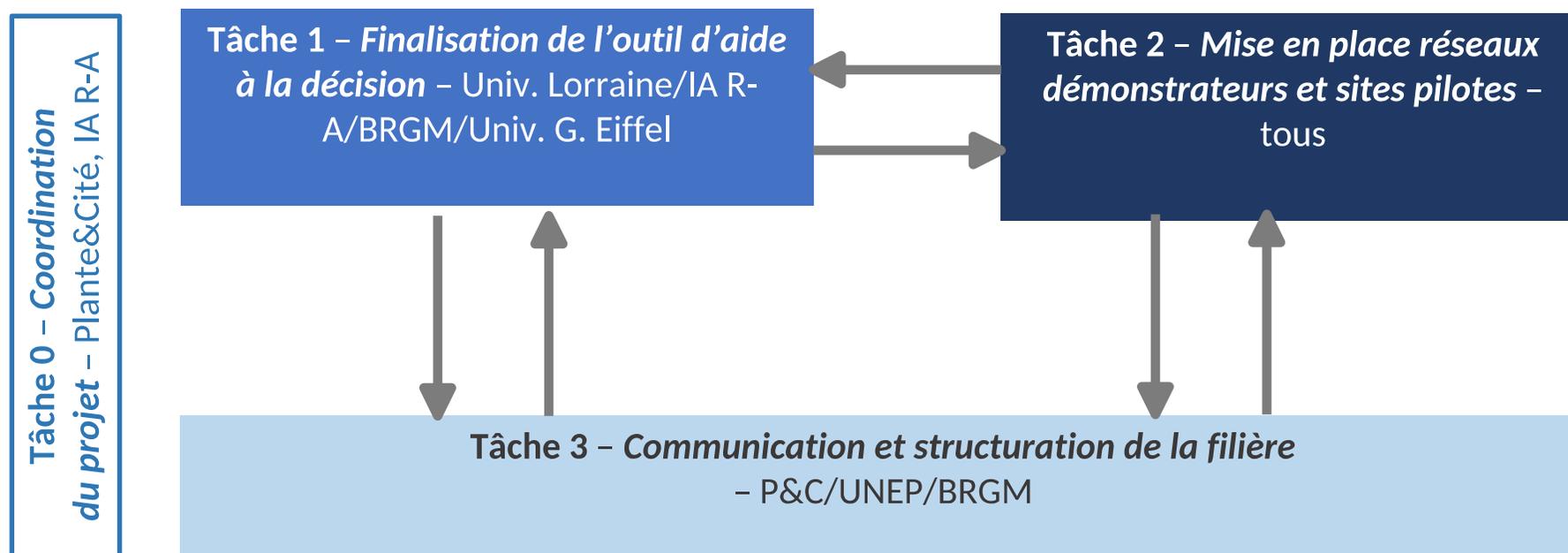
- des sédiments
- la terre végétale

## Mise en place d'une filière de construction des sols fertiles

➔ Aujourd'hui, pas d'encadrement spécifiquement dédié à la construction de sol à partir de matériaux valorisables

### Le projet SITERRE II 2022-2025 : Porteur Plante et Cité

Financement ADEME, partenaires (Université de Lorraine-INRAE, Institut Agro Rennes-Angers, Université Gustave Eiffel, BRGM, UNEP) et Région Pays de la Loire



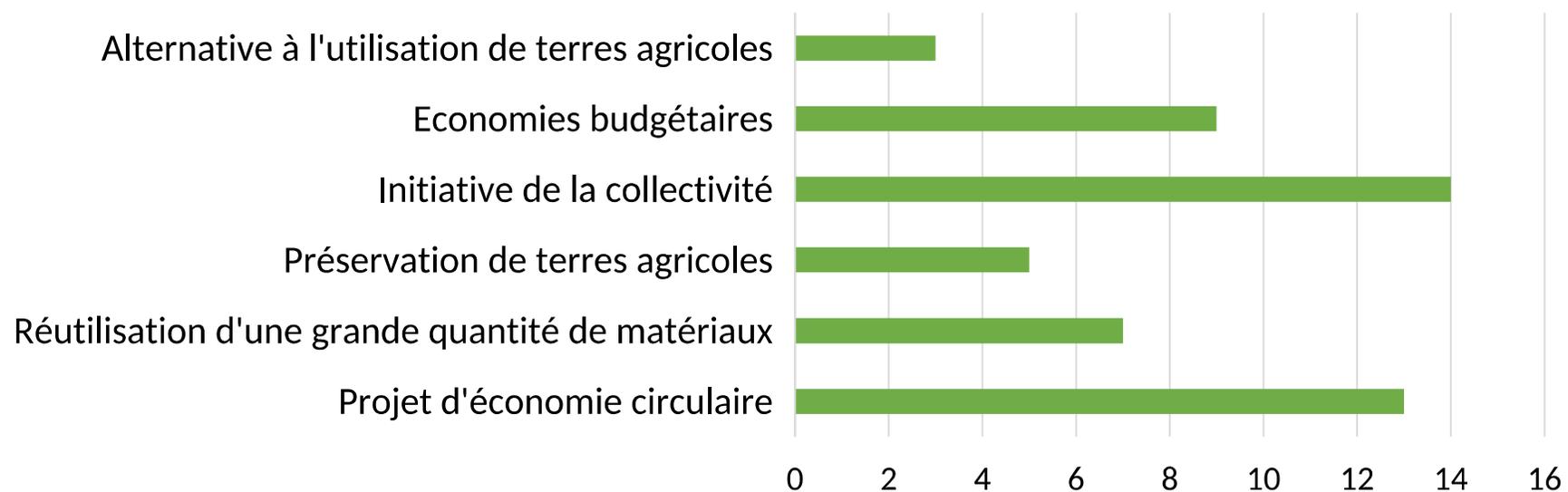
## Mise en place d'une filière de construction des sols fertiles

### Le projet SITERRE II : Mise en place d'un réseau de démonstrateur

2021 Enquête en ligne menée par Plante et Cité et Eva Souty (stagiaire APT)

Retour d'expériences et données sur l'état actuel de la filière de construction de sols

➔ 12 structures ont répondu pour 16 projets de construction de sol  
Quelles motivations pour ce type de projet?

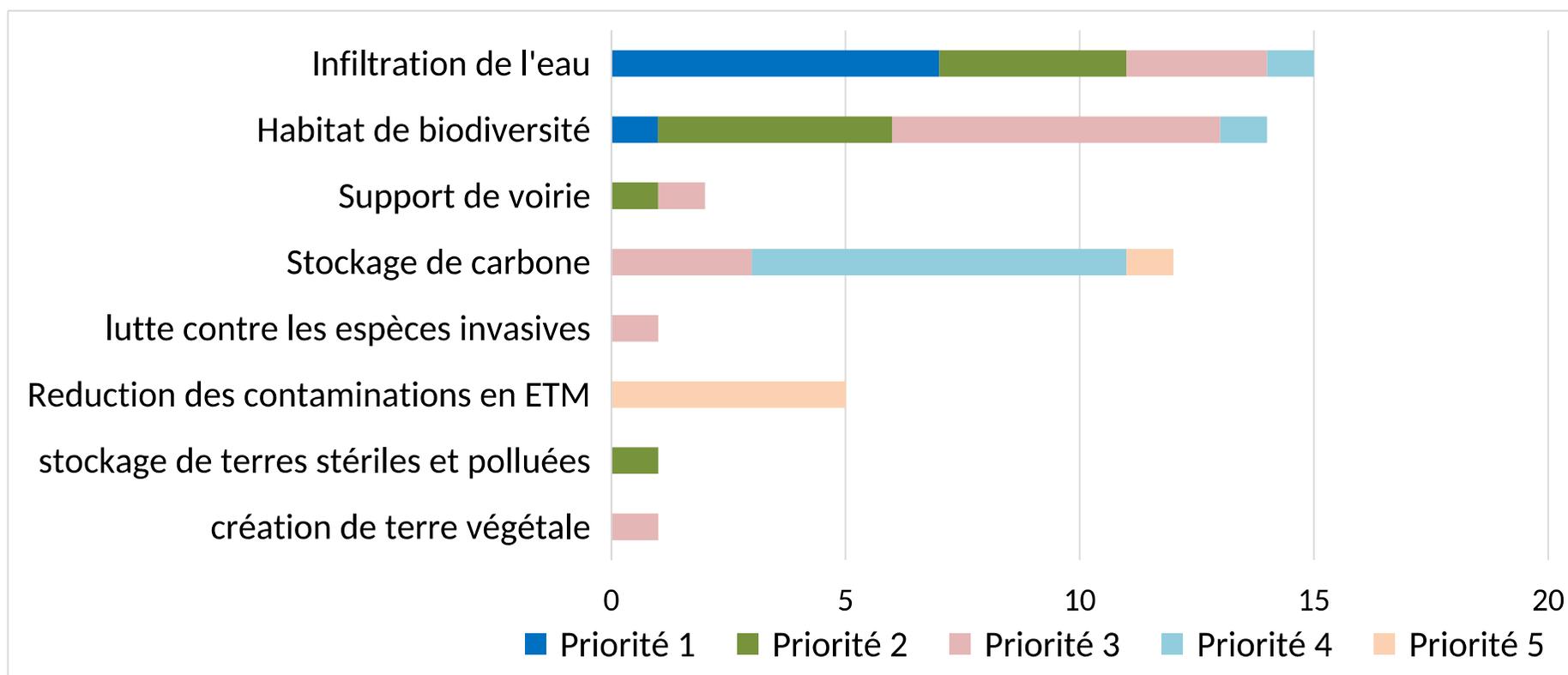


Souty, 2021

# Mise en place d'une filière de construction des sols fertiles

## Le projet SITERRE II : Mise en place d'un réseau de démonstrateur

➡ Quelles fonctions sont recherchées dans ce type de projet?

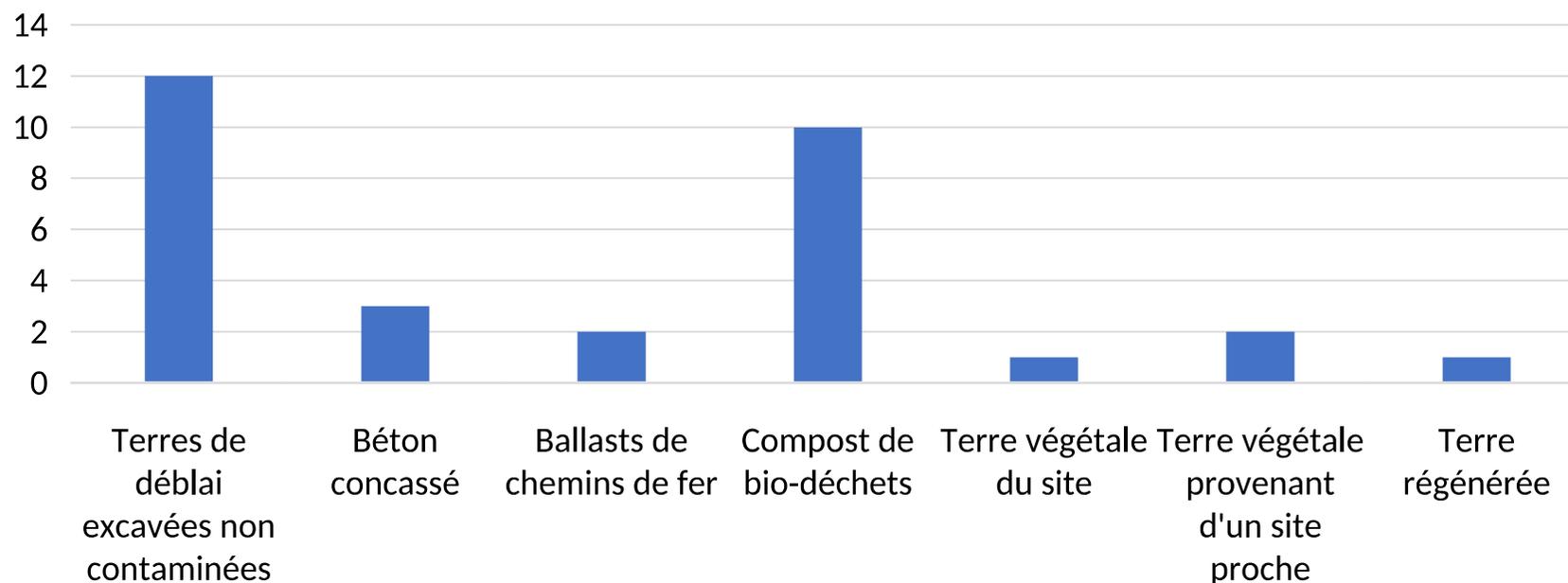


Souty, 2021

## Mise en place d'une filière de construction des sols fertiles

### Le projet SITERRE II : Mise en place d'un réseau de démonstrateur

➡ Quels matériaux parentaux ont été utilisés?



Souty, 2021

➡ **Principalement des terres excavées et des composts de déchets verts**

## Mise en place d'une filière de construction des sols fertiles Siterre II

La construction de sol à partir de matériaux alternatifs ne pourra se structurer en filière qu'à la demande de ses acteurs, dont les utilisateurs finaux => nécessité de :

- è rencontrer les Ministères en charge de la thématique
- è constituer un groupe de travail
- è compléter/conforter les données acquises par des sites pilotes
- è **en finalisant des outils d'aide à la décision pour une gestion durable et optimale des sols construits avec des déchets**



### **Des actions conjointes à mener sur les sols urbains**

- Améliorer la connaissance sur les sols et en développant les activités de recherches
- Agir et sensibiliser sur les enjeux de préservation des sols



Connaissance et gestion des sols urbains

<https://urbasol.institut-agro-rennes-angers.fr/fr>

## Elements de bibliographie

- Gis Sol. 2011. *L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols*, 188 p [en ligne] <http://www.gissol.fr/RESF/index.php>
- Béchet B., Le Bissonnais Y., Ruas A. Desrousseaux M. et al. 2017. Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'actions. IFSTTAR et INRA, France, 650 p. (rapport), 127 p. (synthèse) [en ligne] <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Expertises/Toutes-les-actualites/Sols-artificialises-et-processus-d-artificialisation-des-sols>
- Damas O., Coulon A., 2016. Créer des sols fertiles : du déchet à la végétalisation urbaine. Editions du Moniteur, Paris. (ouvrage collectif)
- Damas O., Vidal-beaudet L., 2017. Créer des sols fertiles à partir des déchets de la ville : une solution d'avenir. In Aménager et gérer avec frugalité : préserver les ressources en faisant mieux avec moins. Plante et Cité, Angers, 18-21.
- Fourvel G. 2018. Valorisation agronomique des sédiments fins de retenues hydroélectriques en construction d'Anthroposols fertiles. Thèse de doctorat, Agrocampus Ouest.
- Rokia Sarah, 2014. Contribution à la modélisation du processus d'agrégation et du transfert d'éléments nutritifs dans les Technosols construits à partir de déchets (contrat ADEME/ projet Siterre). Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Vidal-Beaudet L., Cannavo P., Schwartz C., Séré G., Béchet B., Legret M., Peyneau PE., Bataillard P., Coussy S., Damas O., 2017. Using wastes for fertile urban soil construction – The French Research Project SITERRE. Soils within Cities. Global approaches to their sustainable management – composition, properties, and functions of soils of the urban environment, Eds: Levin, M.J., Kim, K.-H.J., Morel, J.L., Burghardt, W., Charzynski, P., Shaw, R.K., edited on behalf of IUSS Working Group SUITMA, Catena-Schweizerbart, Stuttgart.
- Vidal-Beaudet L., Rossignol Jean-Pierre, 2018. Les sols urbains : artificialisation et gestion. In C. Valentin coordination, les sols au cœur de la zone critique 5 : Dégradation et réhabilitation. Série les sols coordonnée par Christian Valentin, Collection système Terre-environnement, ISTE éditions, 260p.

<http://ec.europa.eu/environment/soil>

<http://ec.europa.eu/environment/land-use>

<http://www.gessol.fr/>

**SITERRE I et II: un projet Plante&Cit  pour une filière  
 co-efficente de valorisation de déchets et sous-  
produits industriels ou urbains pour développer des sols  
fertiles.**

*Merci pour votre attention*