

webinaire DEVELOPPE du 12 mars 2021



# optimisation de l'usage des sols dans les projets d'aménagement

**Cécile Le Guern**

BRGM Nantes  
FR CNRS 2488 IRSTV  
[c.leguern@brgm.fr](mailto:c.leguern@brgm.fr)



**Laure Vidal-Beudet**

UPSP EPHor  
FR CNRS 2488 IRSTV  
L'institut Agro - AGROCAMPUS OUEST -  
Campus Angers  
[laure.beaudet@agrocampus-ouest.fr](mailto:laure.beaudet@agrocampus-ouest.fr)

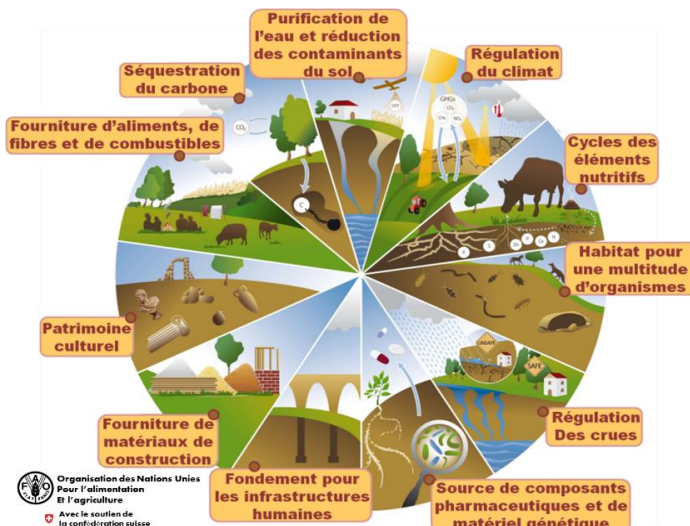


## Optimisation de l'usage des sols dans les projets d'aménagement

- Qu'est-ce qu'un sol
- Le contexte des sols artificialisés
- La pollution des sols et les terres excavées
- La qualité des sols pour quels usages
- La construction de sols fertiles

## Qu'est-ce qu'un sol?

### Ses fonctions multiples



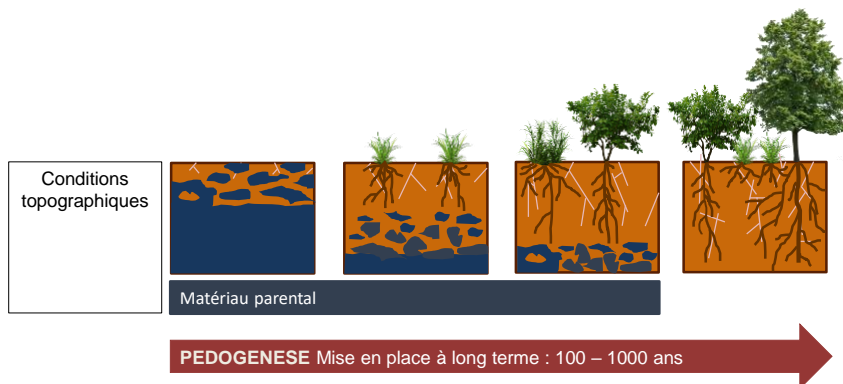
23/03/2021

3

## Qu'est-ce qu'un sol?

### Ses origines : les facteurs de la pédogénèse

- Facteur anthropique
- Facteur : Température, pluie, gel
- Couvert végétal, microfaune et macrofaune



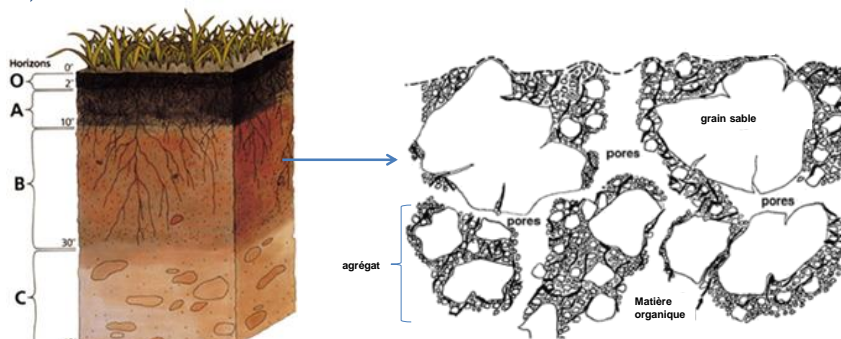
D'après Fourvel 2018

23/03/2021

4

## Qu'est-ce qu'un sol?

➔ la structure du sol = des agrégats et des pores (50%)



Les pores permettent :

- la circulation de l'eau (drainage)
- la circulation de l'air
- le stockage de l'eau (capacité de stockage)
- le passage des racines (ancrage physique + prospection nutritive)

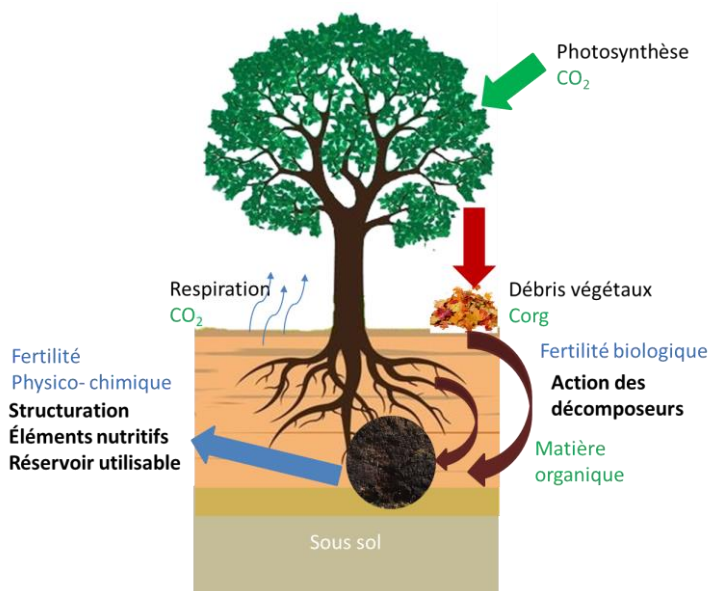
➔ Rôle prépondérant de la matière organique

23/03/2021

5

## Qu'est-ce qu'un sol?

➔ Son fonctionnement = continuum sol – plante - atmosphère

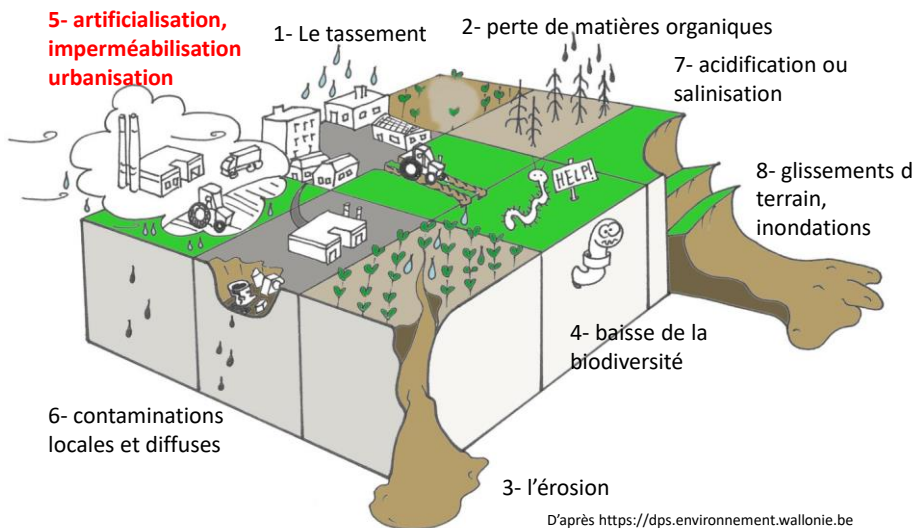


23/03/2021

6

## Contexte des sols artificialisés

L'artificialisation = une des 8 menaces identifiées au niveau mondial qui s'exerce sur les sols

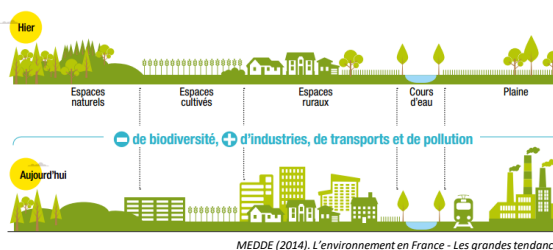


23/03/2021

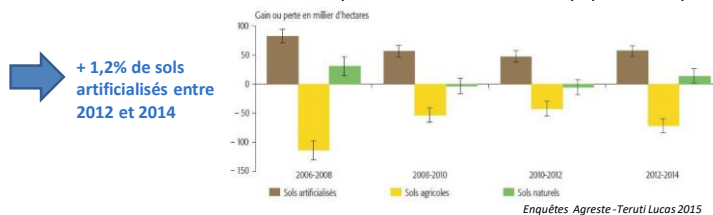
7

## Contexte des sols artificialisés

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**



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



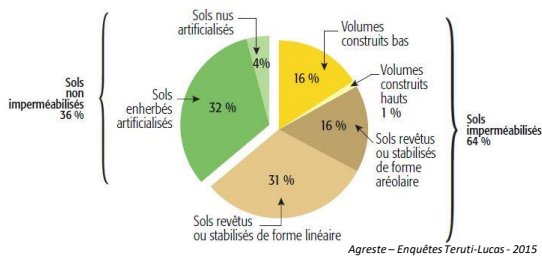
23/03/2021

8

## Contexte des sols artificialisés

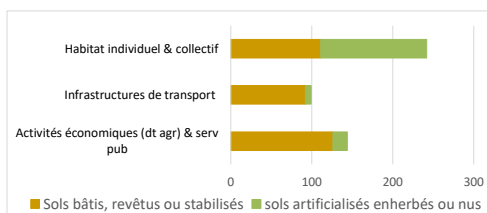
En 2014, 9,3 % du territoire métropolitain est artificialisé

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



Un hectare sur deux  
consommé par  
l'habitat individuel

80% de la population  
du territoire urbain vit  
dans une aire urbaine



Solde des flux 2006-2014 des sols artificialisés selon l'utilisation du sol (en milliers d'hectares). Source : Agreste, 2015

23/03/2021

9

## Contexte des sols artificialisés : besoin de nature

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



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.

23/03/2021

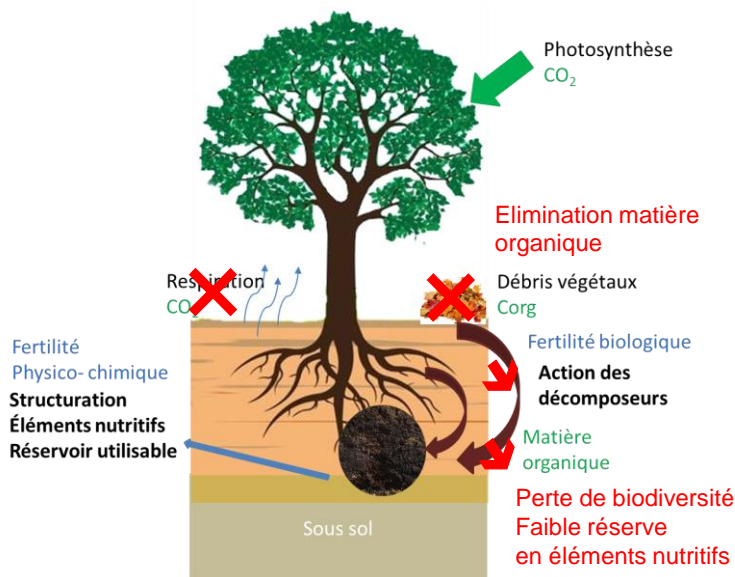
10

## Les sols artificialisés urbains



## Les sols artificialisés urbains

### Modification du continuum sol-plante-atmosphère

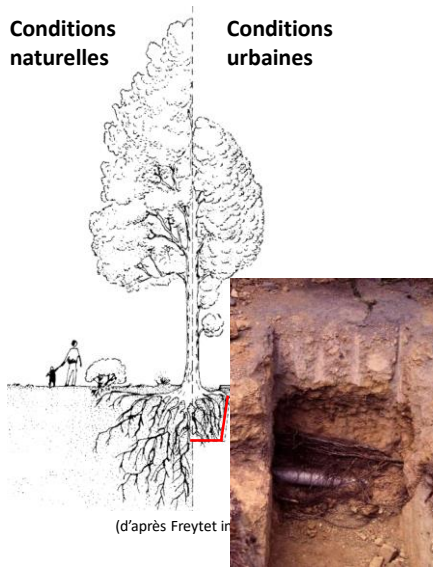


23/03 ➔ Sols peu fertiles et rendant moins de services écosystémiques

12

## Les sols artificialisés urbains

Conditions naturelles      Conditions urbaines

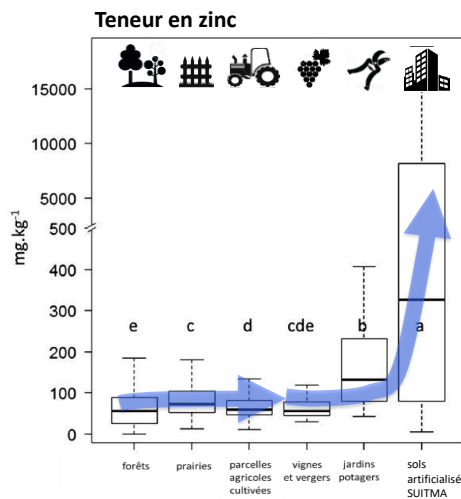
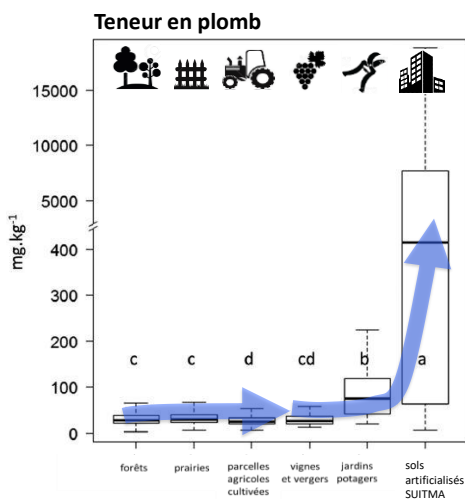


23/03/2021

13

## Les sols artificialisés urbains

➔ Des sols pollués



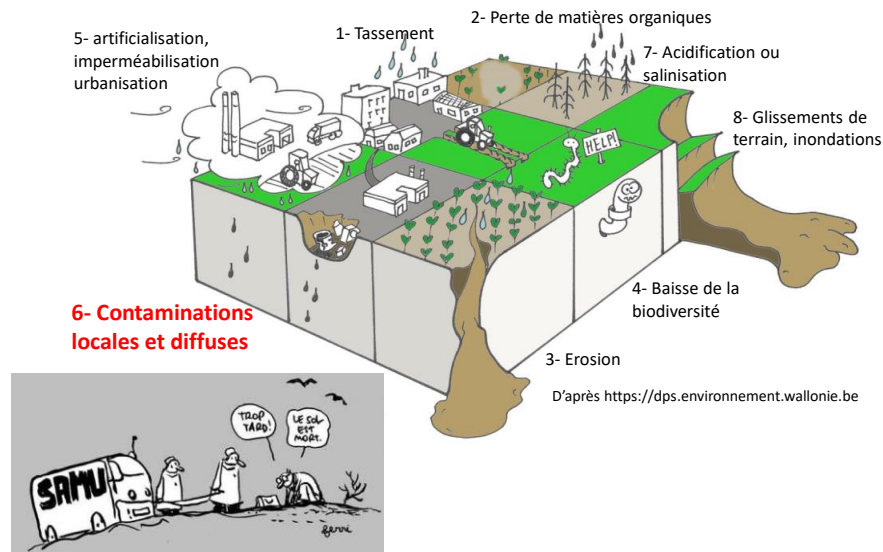
Joimel et al., STOTEN, 2016 – RMQS, Inra, LSE, ANR Jassur

23/03/2021

14

## Pollution des sols et terres excavées

Contamination = une des 8 menaces identifiées au niveau mondial qui s'exerce sur les sols



15

## Pollution des sols et terres excavées

➔ Pollutions des sols : un enjeu majeur pour le (ré)aménagement

### Gestion durable

- Optimiser leur utilisation
- Éviter les répercussions de leur dégradation sur la santé humaine et l'environnement



Crédit Vivien Baudouin, BRGM

### Reconstruire la ville sur la ville

- Densification de l'urbanisation
- Friches
- Nature en ville



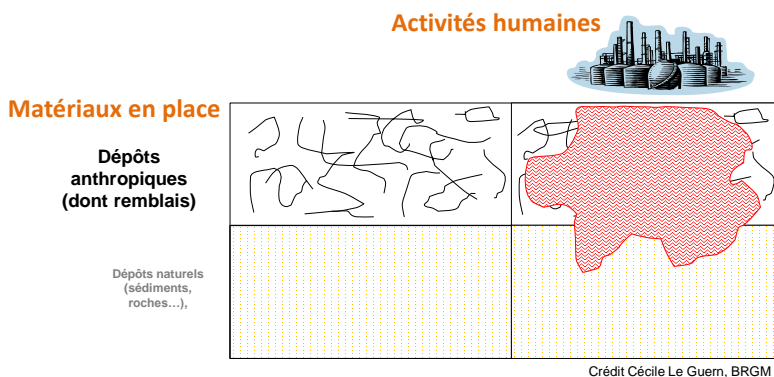
Crédit Cécile Le Guern, BRGM

23/03/2021



## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Origine des contaminants dans les sols urbains



Cumul de toutes les pressions actuelles et historiques

=> **Anticiper leur présence**

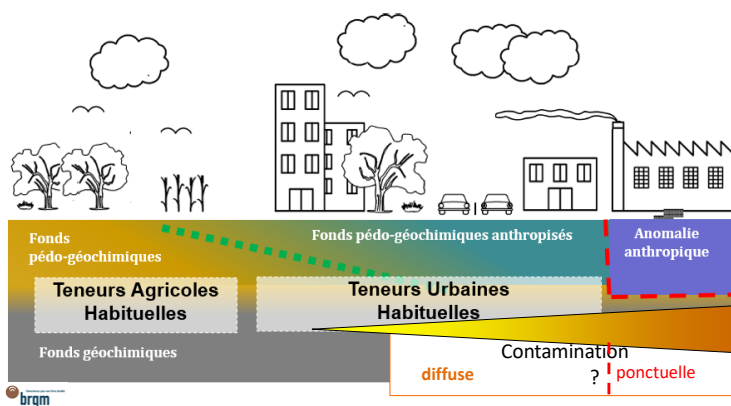
23/03/2021



17

## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Gradients de contamination



Contamination avec risque sanitaire = pollution

Rem : anomalies naturelles possibles (ex. minier)

23/03/2021



18

## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Pression industrielle historique



**Inventaire historique urbain (IHU) de l'Ile de Nantes**

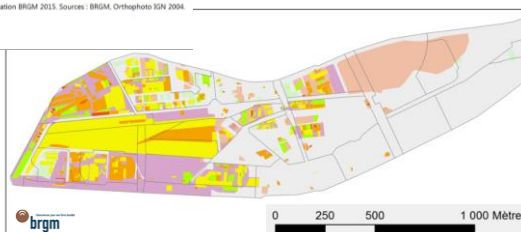
Extension des anciennes activités industrielles et de service

⇒ Sources potentielles de contaminants  
Ex. plomb

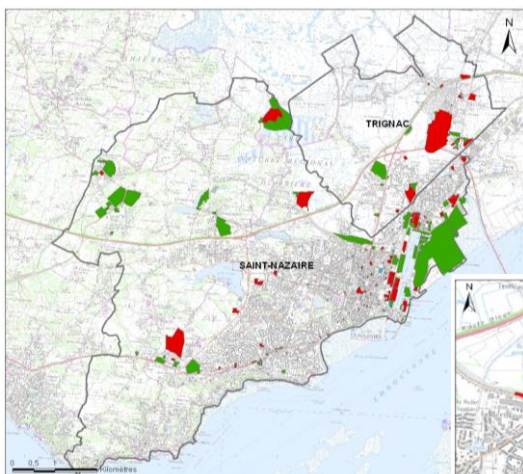
- INTRA-SITES
- Sites BASIAS
  - Emprise des sites et activités

Réalisation BRGM 2015. Sources : BRGM, Orthophoto IGN 2004.

**Rapport BRGM/RP-66013-FR**

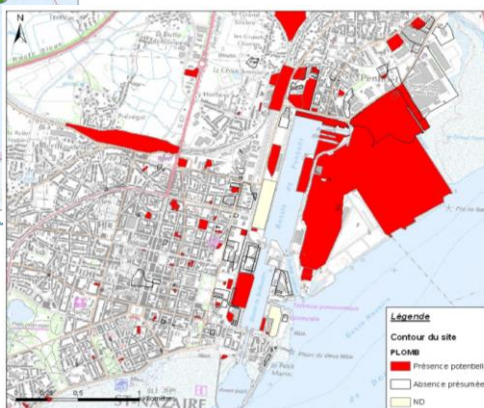


23/03/2021



### Pression industrielle historique

**Inventaire historique urbain (IHU) de la Carene**



**BRGM/RP60092-FR**

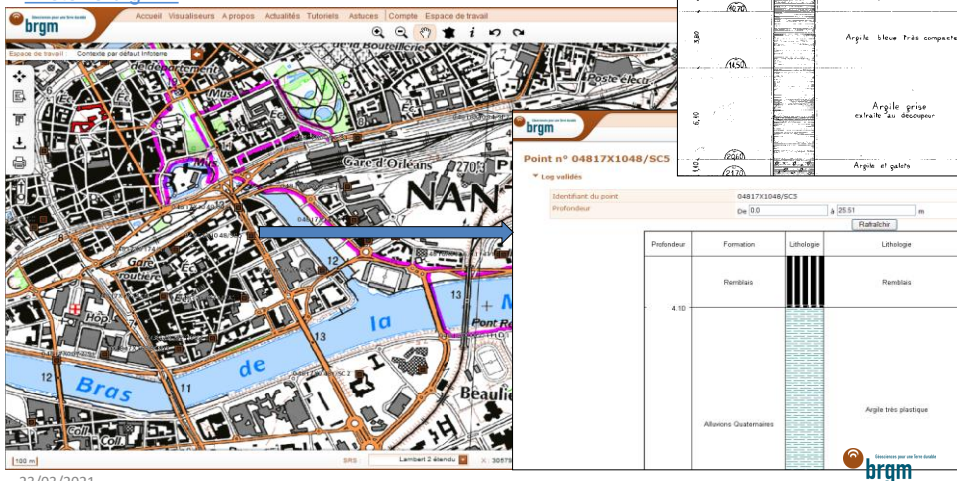
23/03/2021

## Pollution des sols et terres excavées

➔ **SOLS URBAINS ET INDUSTRIELS :  
Des remblais fréquents**

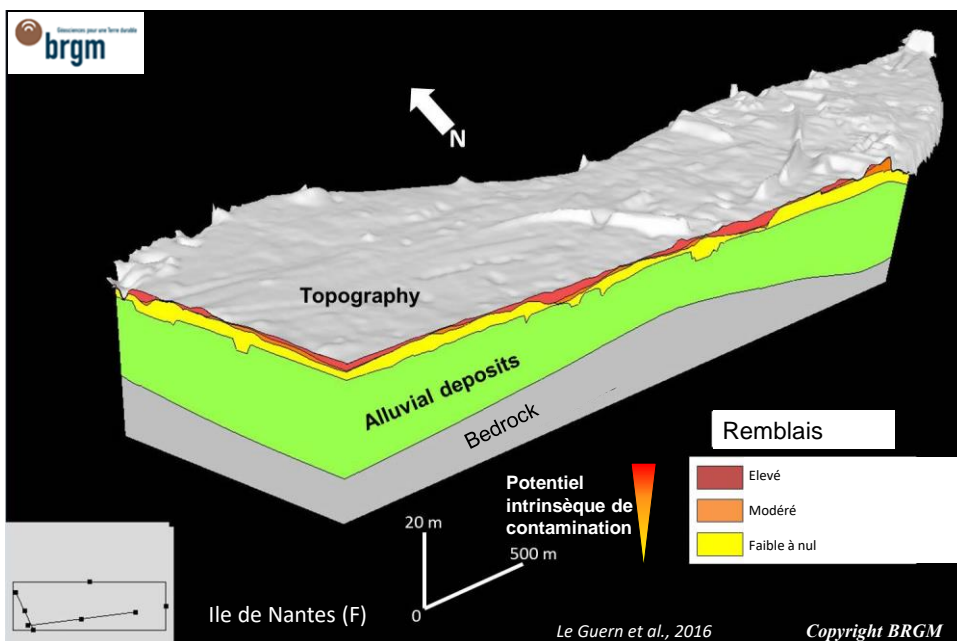
▶ Exemples nantais

[Infoterre.brgm.fr](http://Infoterre.brgm.fr)



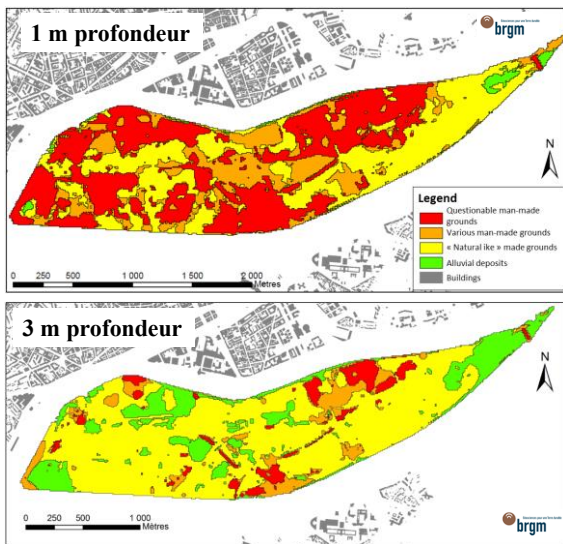
23/03/2021

## Typologie de remblais



## Pollution des sols et terres excavées

➔ Potentiel polluant intrinsèque des remblais selon la profondeur



Le Guern et al., 2016,

Rapport BRGM/RP-66013-FR

Ile de Nantes (F)

23/03/2021



## Pollution des sols et terres excavées

➔ SIS : système d'information sur les sols

Article 173 de la Loi ALUR / L.125-6 du code de l'environnement

« Terrains où la connaissance de la pollution des sols justifie, notamment en cas de changement d'usage, la réalisation d'études de sols et de mesures de gestion de la pollution pour préserver la sécurité, la santé ou la salubrité publique et l'environnement. »

**Tenir compte des pollutions résiduelles**  
afin de garantir l'absence de risques sanitaires  
pour les futurs occupants des terrains en SIS

[www.georisques.gouv.fr](http://www.georisques.gouv.fr)

Projet d'aménagement/construction avec **changement d'usage**

- ⇒ Étude de l'état des sols
- ⇒ Mesures éventuelles de gestion
- ⇒ Attestation d'un BE

23/03/2021

24

## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Que faire en cas de pollution ?

- Nécessité d'une gestion appropriée
- Pour (ré)utilisation sans **risque** inacceptable pour l'environnement et la santé
- **Objectifs** de gestion **maîtrise sur le long terme des impacts sanitaires et environnementaux**



23/03/2021

## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Politique nationale de gestion des sites et sols pollués

- Principes fondateurs
  - Examen du risque
  - Gestion des sites en fonction de l'usage
- Initialement pour les pollutions d'origine industrielle
  - S'appliquent /s'adaptent aux différents cas rencontrés en milieu urbain



23/03/2021

## Pollution des sols et terres excavées

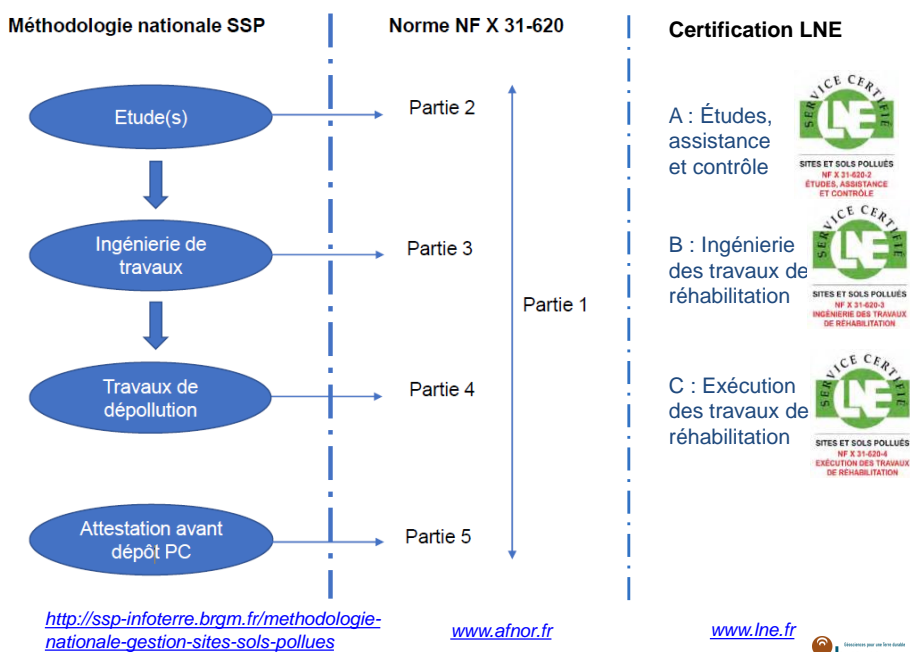
### ➔ Coûts de gestion : ordres de grandeur

Très variables : Selon la taille du site et son niveau de pollution

- **Premier diagnostic : 10-20 k€**
  - étude historique et documentaire
  - visite du site, quelques analyses
- **Plan de gestion : 30-100 k€**
  - diagnostic approfondi, schéma conceptuel
  - étude sanitaire, bilan coûts/avantages...
- **Surveillance piézométrique : 30 k€**
  - mise en place 5 ouvrages, nappe entre 4 et 10 mètres, surveillance semestrielle métaux pendant 4 ans
- **Travaux de dépollution : jsq > 500 k€**

23/03/2021

Source DREAL, 2012



23/03/2021



## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Guide relatif à la découverte fortuite de pollution des sols et des eaux souterraines lors de travaux

[BRGM RP-69496-FR](#)  
(PDF via [InfoTerre.brgm.fr](http://InfoTerre.brgm.fr))

Pollution des sols et des eaux souterraines, par tout composé chimique (organique ou inorganique) ou par des déchets.



23/03/2021



29

## Pollution des sols et terres excavées

### ➔ Acteurs des sites et sols pollués



#### Privés

Bureaux d'études  
[www.upds.org](http://www.upds.org)

<https://www.lne.fr/fr/certification/certification-sites-sols-pollues>

Juristes  
Industriels, responsables des sites  
Promoteurs

#### Aménageurs

#### Publics

Mairie/collectivité  
Préfecture/DREAL  
ARS  
EPF

Organismes d'appui  
(dont BRGM, INERIS,  
ADEME)  
Ministère

23/03/2021



30

## Pollution des sols et terres excavées

### Valorisation des terres excavées

- Un enjeu pour le (ré)aménagement urbain

#### Développement durable

- Optimiser leur utilisation
- Eviter les répercussions de leur dégradation sur la santé humaine et l'environnement

#### Difficultés

- **Responsabilités**
  - Producteur : qualité des terres
  - Receveur : compatibilité avec l'usage
  - Techniques : hétérogénéités, discontinuités

#### Solutions

- Contractualisation, préparation, traçabilité, Respect de critères environnementaux

Economie circulaire



Anticiper leur gestion



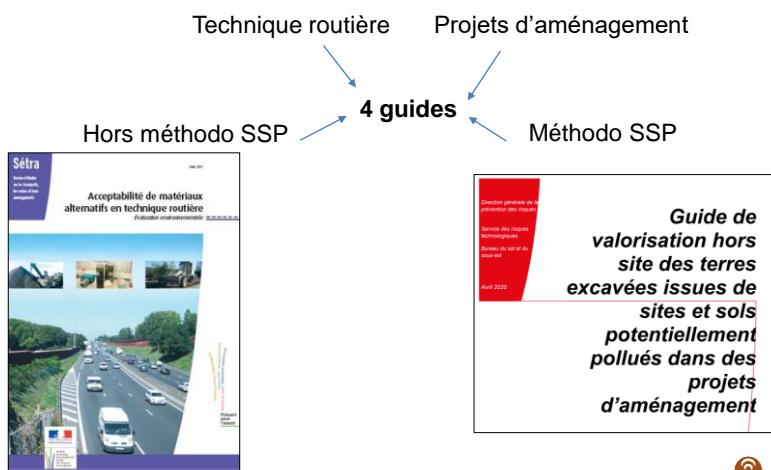
Enjeux économiques et environnementaux

23/03/2021



## Pollution des sols et terres excavées

### Scénarios de valorisation des terres excavées



23/03/2021





## Pollution des sols et terres excavées

### Optimiser l'usage des sols

- Terres excavées
  - Réutilisation, valorisation en aménagement et technique routière (cf. guides)
  - Reconstruction de sols (ex. argiles, limons, sables, matériaux divers)
  
- Sols en place
  - Dépollution si nécessaire
  - Possibilité d'améliorer leur qualité, notamment pour l'accueil de végétation
  - Adaptation du projet d'aménagement en fonction de la qualité des sols
  
- Notion de qualité des sols très large
  - Fertilité
  - Stockage/filtration d'eau
  - Contamination
  - ...

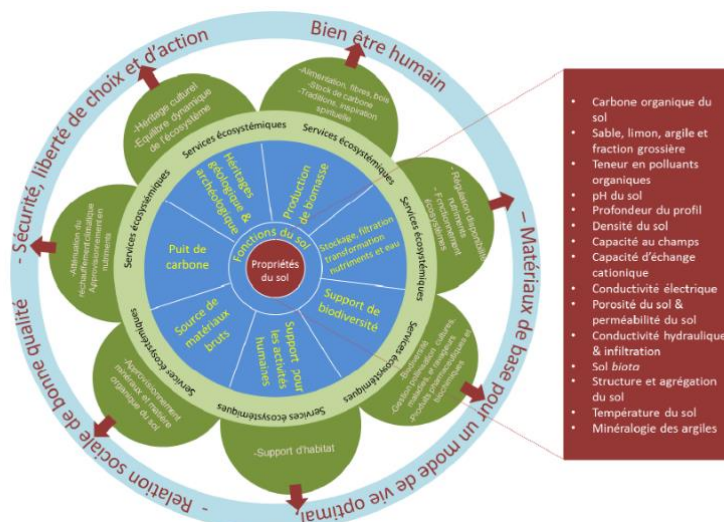
→ **Fonctions et services rendus par les sols**

23/03/2021



## La qualité des sols pour quels usages?

### Des propriétés pour assurer des fonctions et rendre des services



- 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 champ
- 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

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

34

## La qualité des sols pour quels usages?

Evaluation de la qualité des sols et préconisations

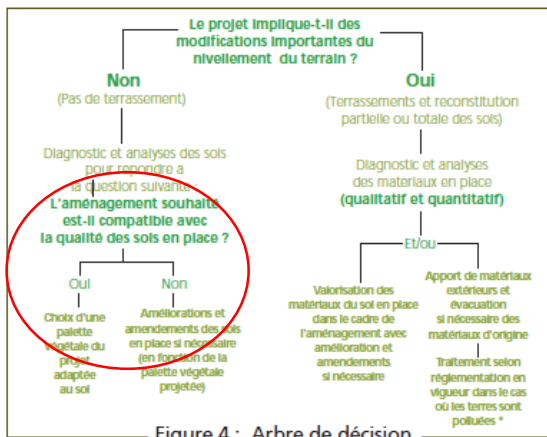


Figure 4 : Arbre de décision

\* cf. Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement, Rapport final, BRGM/RP-60013-FR, Février 2012

➤ Diagnostic en phase de planification urbaine ou de programmation de la zone d'aménagement  
➔ cartographie des sols en place

➤ Optimisation des ressources en matériaux présents sur place, diagnostic en phase de conception de l'aménagement, mobilisation de sources extérieures de matériaux limitée

23/03/2021 In UNEP, 2012, P.C.1-R0

35

## La qualité des sols pour quels usages?

Destisol : Outil d'évaluation de la qualité des sols urbains

- Diagnostic agro-pédologique



diapos Geoffroy Séré, LSE-Univ Lorraine-INRA

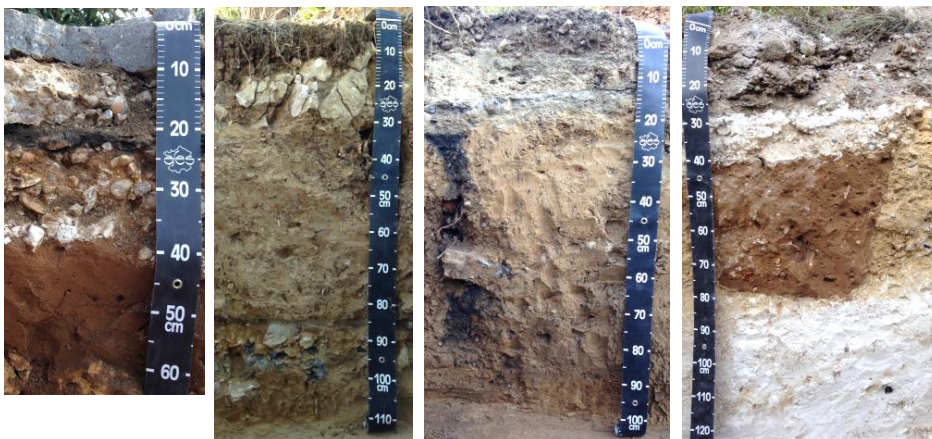
23/03/2021

36

## La qualité des sols pour quels usages?

### Destisol : Outil d'évaluation de la qualité des sols urbains

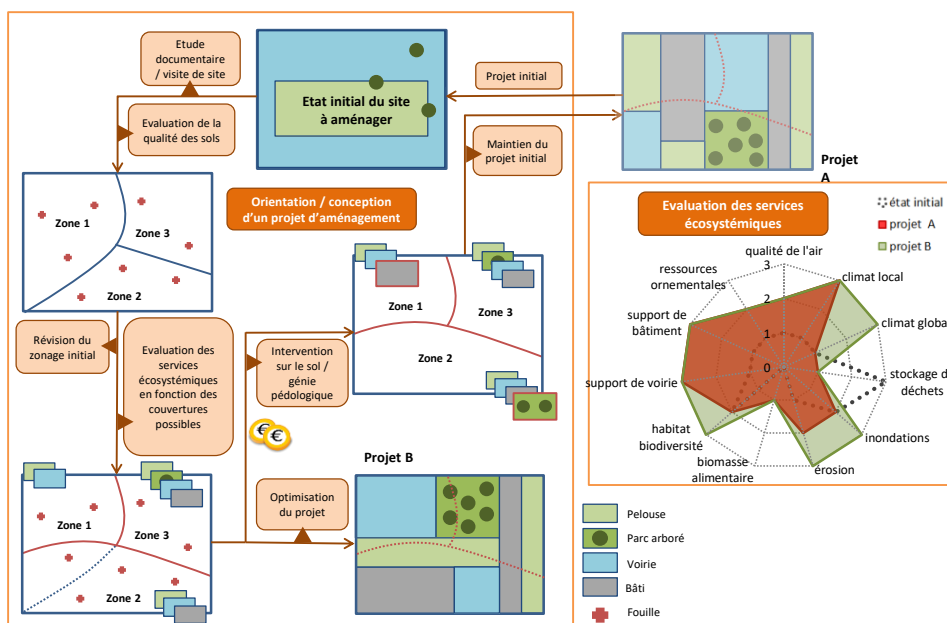
- Diagnostic agro-pédologique



diapos Geoffroy Séré, LSE-Univ Lorraine-INRA

23/03/2021

37



23/03/2021

38

## La qualité des sols pour quels usages?

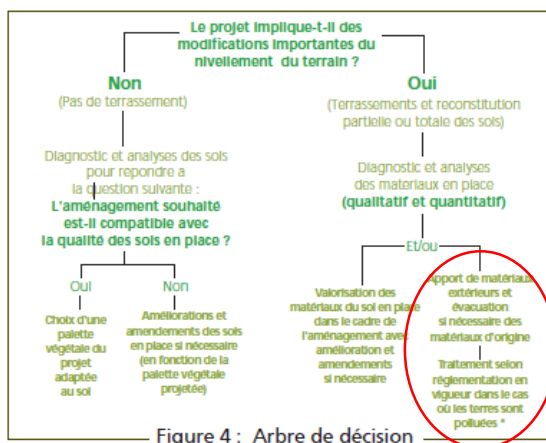


Figure 4 : Arbre de décision

\* cf. Guide de réutilisation hors site des terres excavées en technique routière et dans des projets d'aménagement, Rapport final, BRGM/RP-60013-FR, Février 2012

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

23/03/2021

39

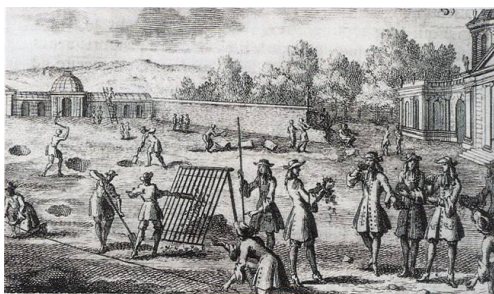
## Construire des sols urbains fertiles



### Des sols construits

Travaux d'aménagement du Potager du Roy à Versailles  
terrassements et remblais pour aménager « l'Etang puant »

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



Construction de sol à Central Park, 1859

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



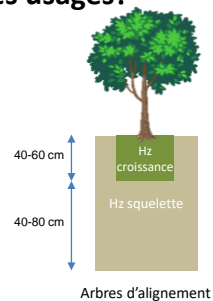
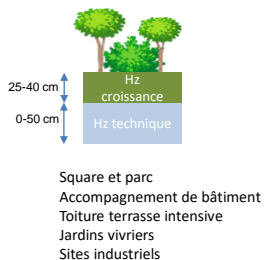
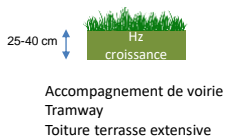
These two lithographed views by George Hayward show the evolving topography of Manhattan in the 1850s. Top: This view in June 1858, looking south from the Arsenal Building at Sixty-third Street and Fifth Avenue, shows how the streets have been built up to a common grade. Bottom: The equipment available for altering the landscape of Manhattan in the past was mainly pick, shovel, and mule, as shown in this scene from the construction of Central Park, circa 1859.

23/03/2021

40

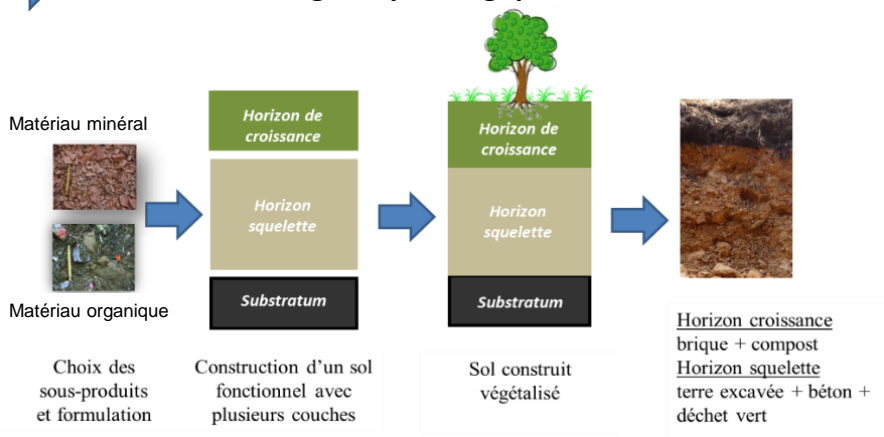
## Construire des sols fertiles

➔ **Quel design du profil de sol en fonction des usages?**  
 Nombre et type d'horizon



## Construire des sols urbains fertiles

➔ **Mise en œuvre du génie pédologique**



*Procédé de construction de sol du programme Siterre.  
 Exemple du profil de sol développé pour l'usage « arbre d'alignement ».*

## Construire des sols urbains fertiles

### ➔ Réhabilitation de sites dégradés Ex: Cokerie Homécourt

Chantier de mise en œuvre

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



Mai 2009



Octobre 2007

Prairie extensive

(LSE Université de Lorraine INRA; VALTERRA)

23/03/2021

43

## Construire des sols urbains fertiles

### ➔ Des sols construits

Le génie pédologique au service de la construction de sols fertiles  
Structuration rapide, altération chimique, colonisation biologique



Séré et al., 2011, *Journal of Soils and Sediments* (LSE Université de Lorraine INRA)

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

23/03/2021

44

webinaire DEVELOPPE du 12 mars 2021



# optimisation de l'usage des sols dans les projets d'aménagement – annexes

**Cécile Le Guern**

BRGM Nantes  
FR CNRS 2488 IRSTV  
[c.leguern@brgm.fr](mailto:c.leguern@brgm.fr)

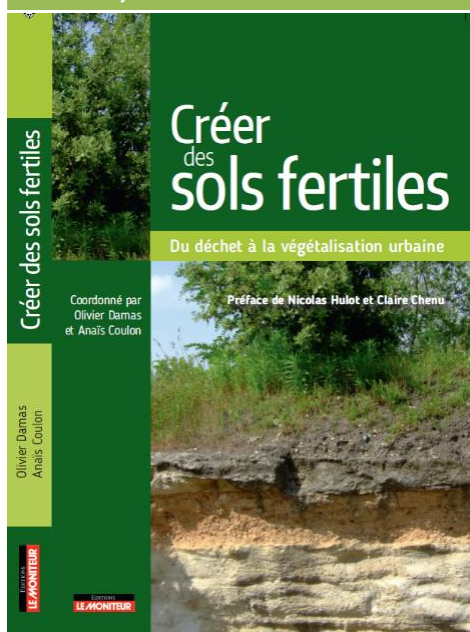


**Laure Vidal-Beudet**

UPSP EPHor  
FR CNRS 2488 IRSTV  
L'institut Agro - AGROCAMPUS OUEST -  
Campus Angers  
[laure.beudet@agrocampus-ouest.fr](mailto:laure.beudet@agrocampus-ouest.fr)



Un livre, sorti le 30 novembre 2016 , Editions Le moniteur, 49 €



- CHAPITRE 1**  
Construire des sols pour végétaliser la ville
- CHAPITRE 2**  
Concevoir un sol construit
- CHAPITRE 3**  
Evaluer la qualité des sols construits
- CHAPITRE 4**  
Passer du concept à la pratique
- CHAPITRE 5**  
Structurer une filière naissante
- CHAPITRE 6**  
Fiches techniques

## La qualité des sols pour quels usages?

### Le contexte réglementaire ou technique

- Le CCTG fascicule 35 Aménagements paysagers avril 1999  
Chapitre N.2.2 terre végétale
- La norme NF U 44-551 Support de cultures – dénominations, spécifications, marquages (AFNOR 2002) qui définit les termes de « terre végétale » et de « terre support »,
- La norme NF U 44-051 Amendements organiques - dénominations, spécifications, marquages (AFNOR 2006) qui définit les amendements organiques
- Règles professionnelles du paysage  
Décembre 2012 « travaux des sols, supports de paysage : caractérisation, amélioration, valorisation et reconstitution, règles professionnelles » (PC1-R0, UNEP, 2012) qui introduit le terme « terres-ressources »  
<http://www.lesentreprisesdupaysage.fr/tout-savoir/r%C3%A8gles-professionnelles/les-r%C3%A8gles-parues/travaux-des-sols-supports-de-paysage-caract%C3%A9risation-am%C3%A9lioration-valorisation-et-reconstitution>
- Quelques guides publics
  - 1999 la remise en état des carrières, BRGM
  - 2020 Guide de valorisation hors site des terres excavées issues de sites et sols potentiellement pollués dans des projets d'aménagement <http://ssp-infoterre.brgm.fr/guide-valorisation-hors-site-terres-excavees>
  - Les fiches techniques de Plante et Cité
  - 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)

23/03/2021

47

## Le BRGM

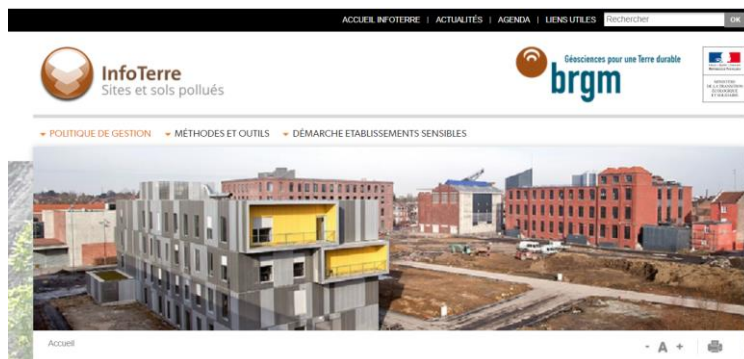
- Etablissement public (EPIC) [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Missions
  - Appui aux politiques publiques (état, collectivités) Répondre aux enjeux de demain
  - Recherche et développement Ex. Ville durable
- Thématiques
  - Connaissances du sol/sous-sol
  - Solutions novatrices pour la gestion des sols/sous-sols dégradés
  - Ressources en eau
  - Prévention des risques naturels et environnementaux...

23/03/2021

48



## Sols pollués : pour en savoir plus



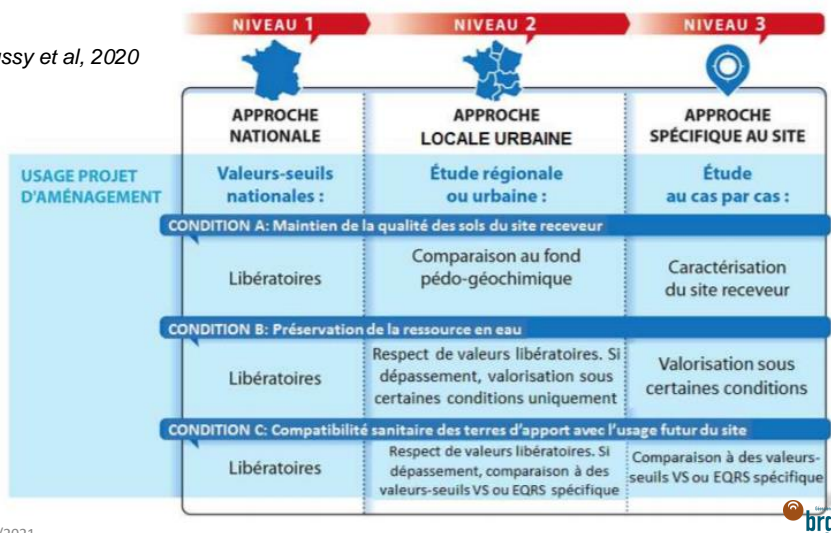
<http://ssp-infoterre.brgm.fr>

23/03/2021

49

## Terres excavées issues de sites et sols pollués : principes de l'approche nationale

Coussy et al, 2020



23/03/2021

50

