



Opération de Recherche TERRANOVA

Terrassements Novateurs

Nantes, 28 mai 2018

SOLS URBAINS

VALORISATION DES SOLS URBAINS DANS LE DOMAINE ROUTIER

Myriam Duc, Thomas Lenoir, Katia Bellagh



Caractéristiques des sols urbains

Présence de matériaux anthropiques → composition complexe

- **Produits de construction et de démolition**
(briques, éléments à base de béton, acier, plâtre, enrobés, ...)
- **Sous-produits industriels**
(laitiers de hauts fourneaux, produits d'incinération de déchets ménagers...)



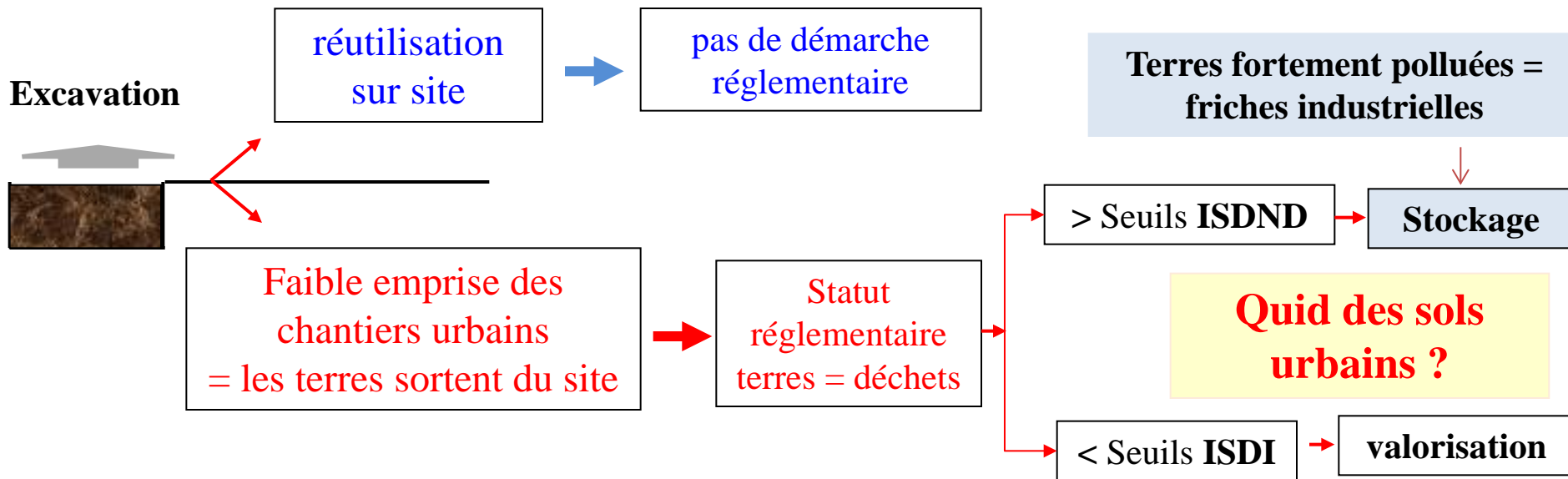
Origine des pollutions multiples

- **Sulfates** (déchets de démolition et de construction ex PLATRE)
- **Source de carbone complexe dans les sols urbains**
HAP, matière végétale, calcite (béton carbonaté) + carbone technogène = scories, imbrulés...
- **Éléments trace métalliques (Pb, Zn...)** - trafic routier, sous-produits industriels...

??? Quid des caractéristiques des sols urbains au-delà de 1m de profondeur concernés par les terrassements et les fondations ???

Circuit de valorisation des terres excavées en France

Terrassement en zones urbaines



Réutilisation des sols urbains dans le domaine routier

*

Sols urbains ?

Terres excavées

Matériaux alternatifs

Règles environnementales =
Guide de réutilisation des terres
excav. (BRGM, 2012) + Hydrotex

Règles techniques

Règles environnementales
Guide SETRA (2011)
Guide SETRA graves de
béton recyclé...

GTR

Couche de
forme

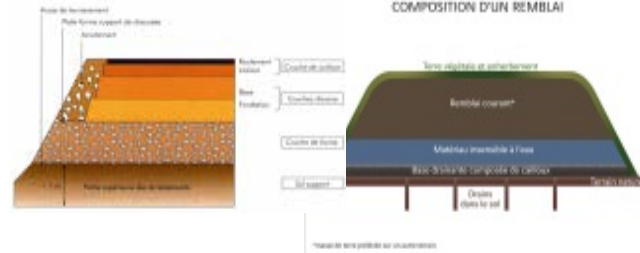
Remblai

lixiviation

percolation

>> Nouvelle version du guide
après modif. en nov 2017*

“Guide de valorisation hors site des
terres excavées issues de sites et
sols potentiellement pollués dans
des projets d’aménagement”



+ Guide VALTEX pour les
fractions grossières des
terres excavées (> 20 mm)
= faire rentrer cette fraction
dans le champ d'application du
guide Cerema « matériaux de
déconstruction issus du BTP »

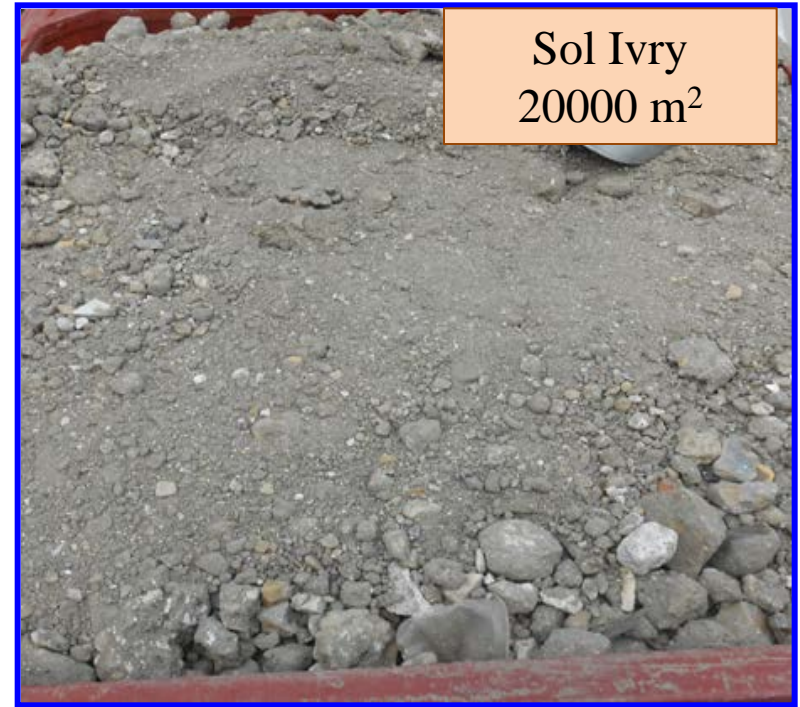
Pas de classe spécifique dans le
GTR pour les sols urbains (mélanges)

Objectifs de l'étude

1. Qu'est-ce qu'un sol urbain « profond » ? Comment caractériser expérimentalement ce type de sol pour les terrassements ?
2. Tester les performances mécaniques des matériaux de type sols urbains en vue de leur réutilisation dans le domaine routier
3. Evaluer l'impact environnemental des matériaux de type sols urbains « faiblement pollués » en prenant en compte les conditions réelles de mise en œuvre sur chantier : essai sur sol compacté et/ou traité à la chaux et/ou au liant hydraulique.

Deux sols urbains étudiés

- Sites dans le bassin de Paris
- Formations sédimentaires de craie et alluvions de la Seine.
- Dépôt de matériaux anthropiques.



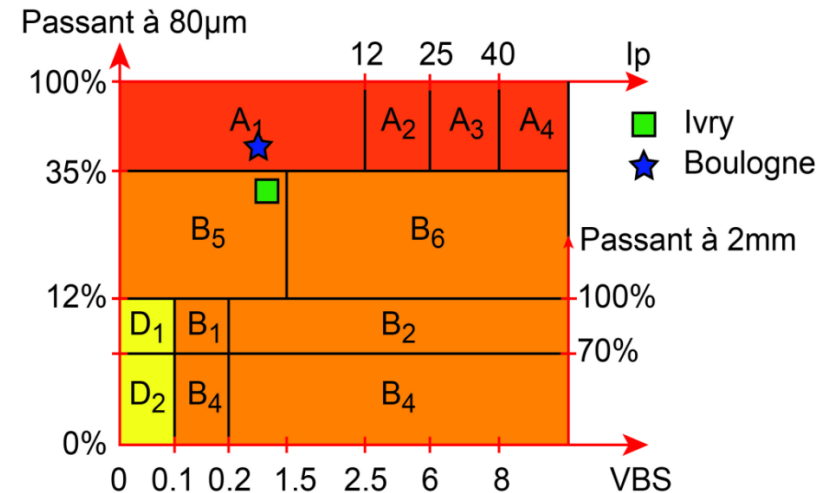
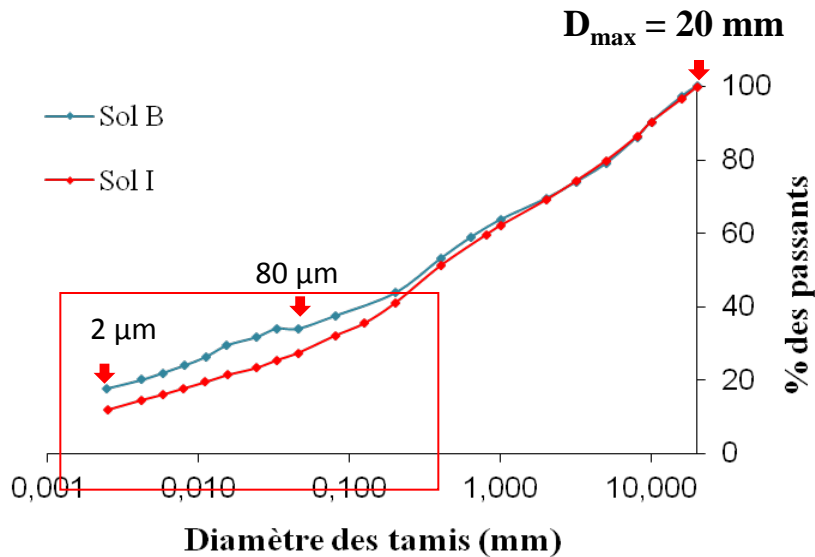
- Exploitation industrielle (Automobiles)

- Site à proximité du périphérique Parisien

Excavation entre 1 m et 10 m de profondeur loin des zones riches en HAP
Elimination avant excavation de la couche superficielle riche en mat. organ. « active »

Identification géotechnique des 2 sols urbains

Paramètres	Sol B	Sol I
Teneur en MO (%)	5.2±0,1	6.7±0,8
ρ_s (g/cm ³)	2.52±0.01	2.59±0.00
Indice de plasticité	10.8	12.1
VBs (g/100g)	0,82±0,06	1,05±0,02



Classification de la fraction 0-20 mm

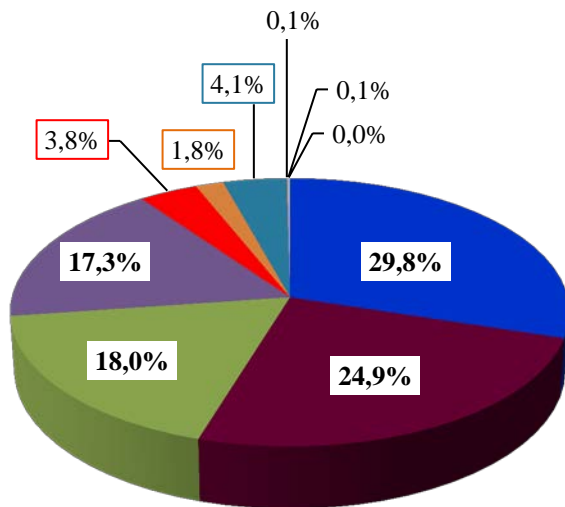
Caractéristiques communes à un grand nombre de sols urbains

Classification GTR : C₁B₅ pour SI et C₁A₁ pour SBB

>> artefacts non pris en compte et teneur en MO (mat. volatile) à la limite

Composition du squelette granulaire et source de pollution : Application d'un essai de tri sur la fraction > 5 mm

Sol Boulogne



Pierres naturelles

Sol fin motté

Bétons

Scories non magnétiques

Gypse

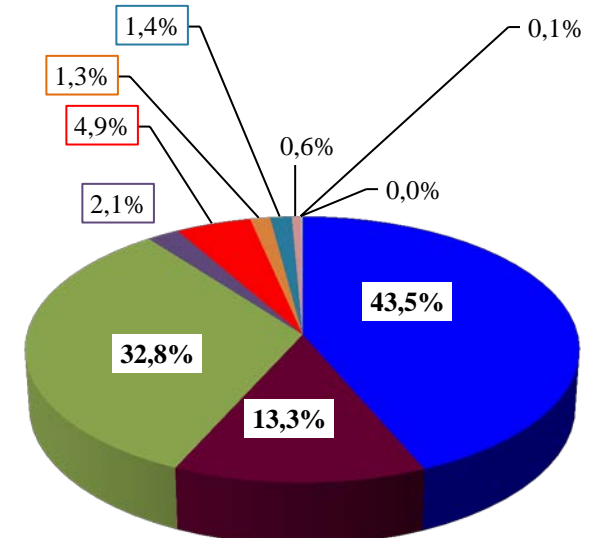
Elts terre cuite

Scories magnétiques

Verre

Autres (plastiques, bois)

Sol Ivry



Composition de la fraction > 5 mm ≈ Composition sur sol global

>> impact sur comportement mécanique / courbe granulométrique

>> source potentielle de pollutions (scories)

Focus sur la matière organique dans les sols urbains

$$MO_{(\text{type humus})} = 1.72 \times C_{\text{org}}$$

Echantillon	C _{org} % (ACS)	MO	MV (%)
Gypse SI	0,04	0,07	4,3/5
Gypse SB	0,22	0,38	4,84
Scories Ferreuses SI	3,29	5,66	5,4/6,3
Scories Ferreuses SB	1,62	2,79	1,13
Scories non ferreuses SI	20,1	34,57	7,8/19,7
Scories non ferreuses SB	40,75	70,09	16,6
F _{tot} SI	3,38	5,81	3,5/6,8
F _{tot} SB	9,26	15,93	11/14,6



Différentes méthodes de mesure

Méthode par calcination : XP P94-047

= Matières volatiles (MV)

Méthode ACS (analyseur C/S)

$C_{\text{org}} = C_{\text{tot}} - C_{\text{mineral}}$

Mesure >> MO, HAP, sucre, charbon et imbrulé...

Méthode chimique oxydative : NF P94-055

Mesure >> MO mais aussi autres couples redox potentiellement comme Fer II et Fer III

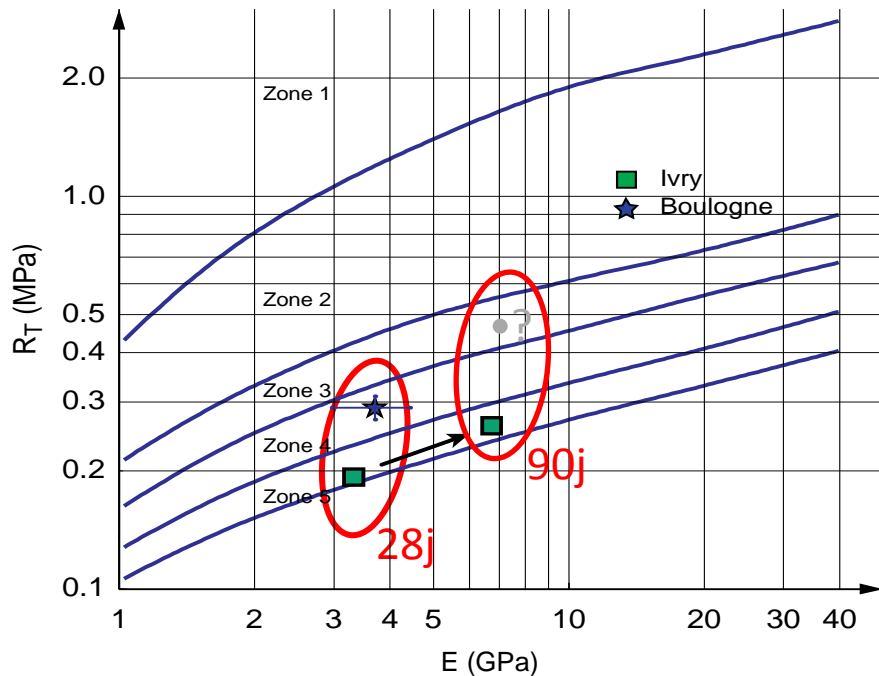
Gypse/béton → déshydratation → bcp MV et pas de MO

Scories ferreuses → peu de MV et peu de MO.

Scories non ferreuses → bcp de MO et peu de MV

Validation des performances mécaniques pour une utilisation dans le domaine routier

	Classe GTR	Traitement au ciment					Traitement à la chaux
		Gv	Rc	Rc/Rci	Rit 28j	Rit 90j	Gv
Sol Boulogne	C ₁ B ₅	apte	Ok	Ok	Ok	En cours	Apte
Sol Ivry	C ₁ A ₁	apte	Ok	Ok	< 0.2	Ok	Apte



Malgré la faible teneur en produits de traitement (5% de ciment) et les fortes teneurs en sulfates
 → performances mécaniques acceptables

Sol de Boulogne plus performant :
 → quantité de béton importante
 → phénomène auto-cimentation des bétons.

**Valorisation possible “techniquement”
 >> zone mécanique minimale requise selon le GTR atteinte**

Réglementation environnementale : essai de lixiviation

Eléments	Eluât sur le sol SBB		Eluât sur le sol SI		VL ISDI***	VL ISDND***	VL ₁ *	VL ₂ **
	Moyenne mg/kg	σ	Moyenne mg/kg	σ				
Zn	0,0134	0,007	0,026	0,006	4	50	12	50
Cr	0,029	0,0035	0,0058	0,00066	0,5	10	1,5	10
Sr	19,4	1,5	34,9	3,2	--	--	--	--
Ba	0,28	0,01	0,37	0,02	20	100	60	100
Cu	0,198	0,044	0,145	0,015	2	50	6	50
Pb	0,0031	0,0012	0,0028	0,0013	0,5	10	1,5	10
Ni	0,12	0,025	<(0,1)	--	0,4	10	1,2	10
V	0,10	0,006	0,022	0,0028	--	--	--	--
Mo	0,11	0,046	0,28	0,17	0,5	10	1,5	10
As	0,066	0,0049	0,043	0,0026	0,5	2	1,5	2
Co	<(0,002)	--	<(0,002)	--	--	--	--	--
Cd	<(0,1)	--	<(0,1)	--	0,04	1	0,12	1
Sb	0,32	0,20	0,60	0,41	0,06	0,7	0,18	0,7
Se	<<(0,002)	--	0,16	0,13	0,1	0,5	0,3	0,5
Sulfates	12916,4	1316	10657,6	2245	1000	20000	3000	20000
Fluorures	1,72	0,45	16,26	12,12	10	150	30	150
Chlorure	138,8	126,8	74,4	24,7	800	15000	2400	15000
C _{org} % sol	92 600	//	33 800	//	30000	50 000	60 000	60 000
C _{org} % éluat	603	14	509	38	500	800	--	--
pH	9,56	0,2	8,31	0,13	--	--	--	--
Conduc.(μS/cm)	2164	39	2262,9	6,6	--	--	--	--

Application du test de lixiviation (NF EN 12457-2) avec L/S = 10 L/kg

*VL guide SETRA (2011) = **pour tout usage routier envisagé (Type 1 à 3)**

*VL guide SETRA (au-delà, pas d'usage possible)

***Valeurs limites (VL) en lixiviation à ne pas dépasser pour un stockage en ISDI ou en ISDND;

Eléments au-delà des seuils ISDI → Sulfates, Fluorures, Antimoine, C_{org}

Observation du comportement environnemental

Les **scories**, bien que contenant le plus de polluants en contenu total, ne relarguent pas plus que les autres composantes du squelette granulaire.

V, Mo, As, et Sb = concentrations faibles mais mobilités les + importantes

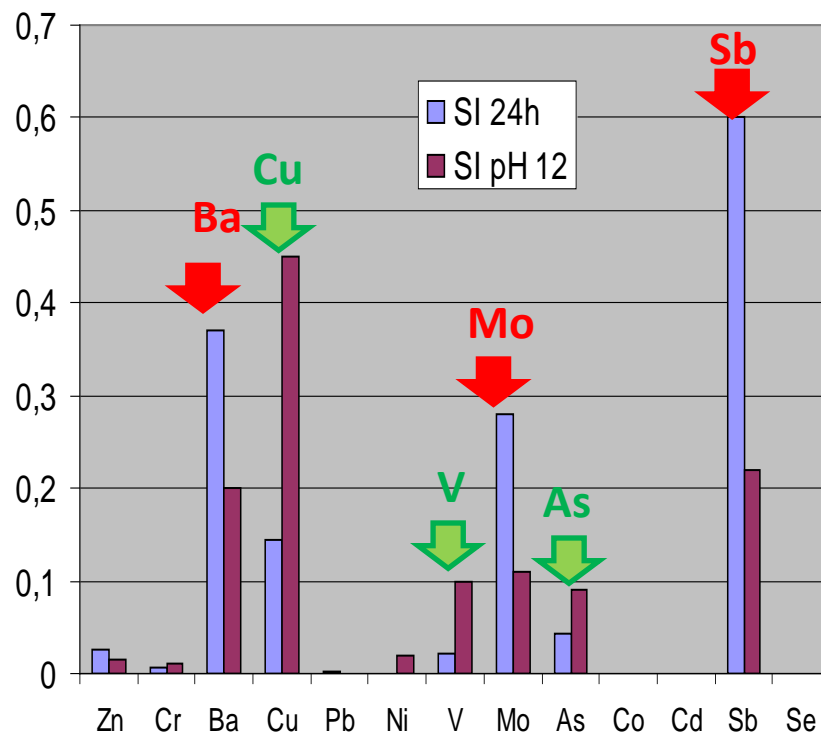
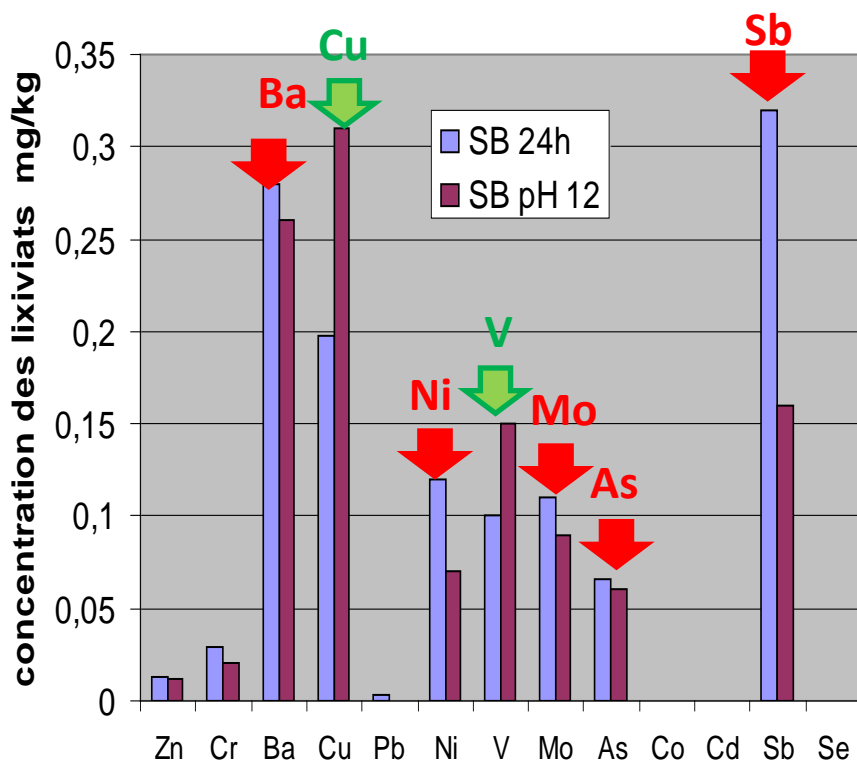
Zn Cr Cu Pb Ni = concentrations non négligeables mais mobilités quasi nulle

Essai de lixiviation à pH12: simuler l'impact de la chaux

Dissolution, complexation de cations, précipitation hydroxydes/ composés cimentaires

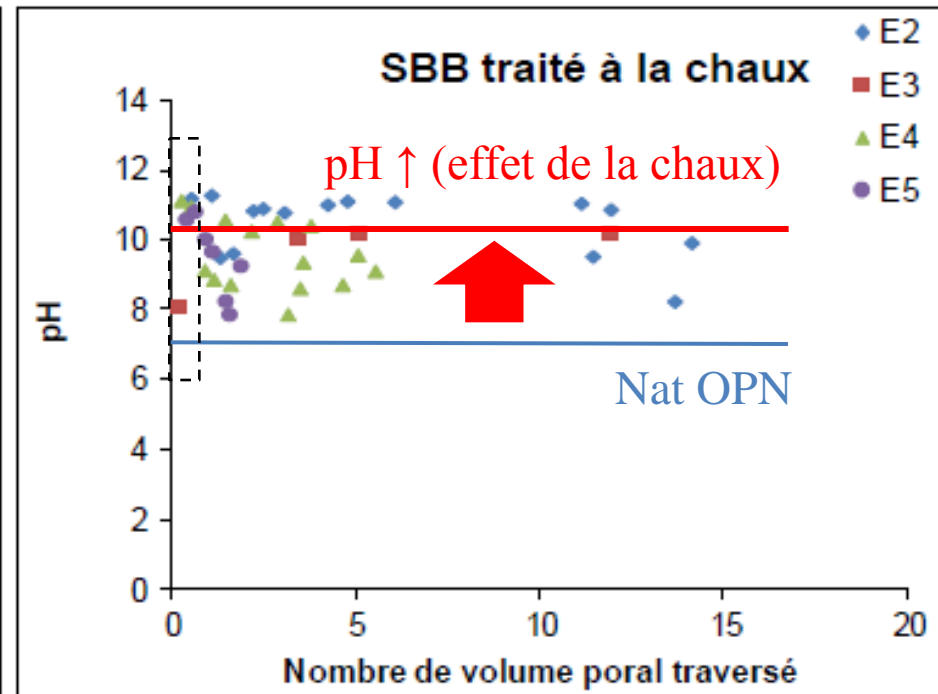
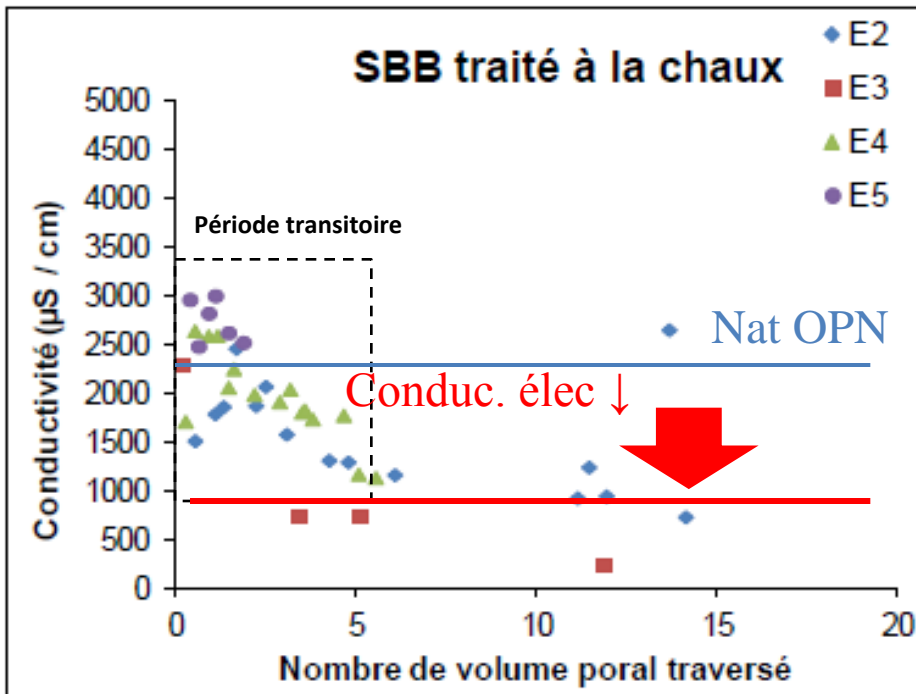
stabilisation ? ↓

ou Relargage accru ? ↓



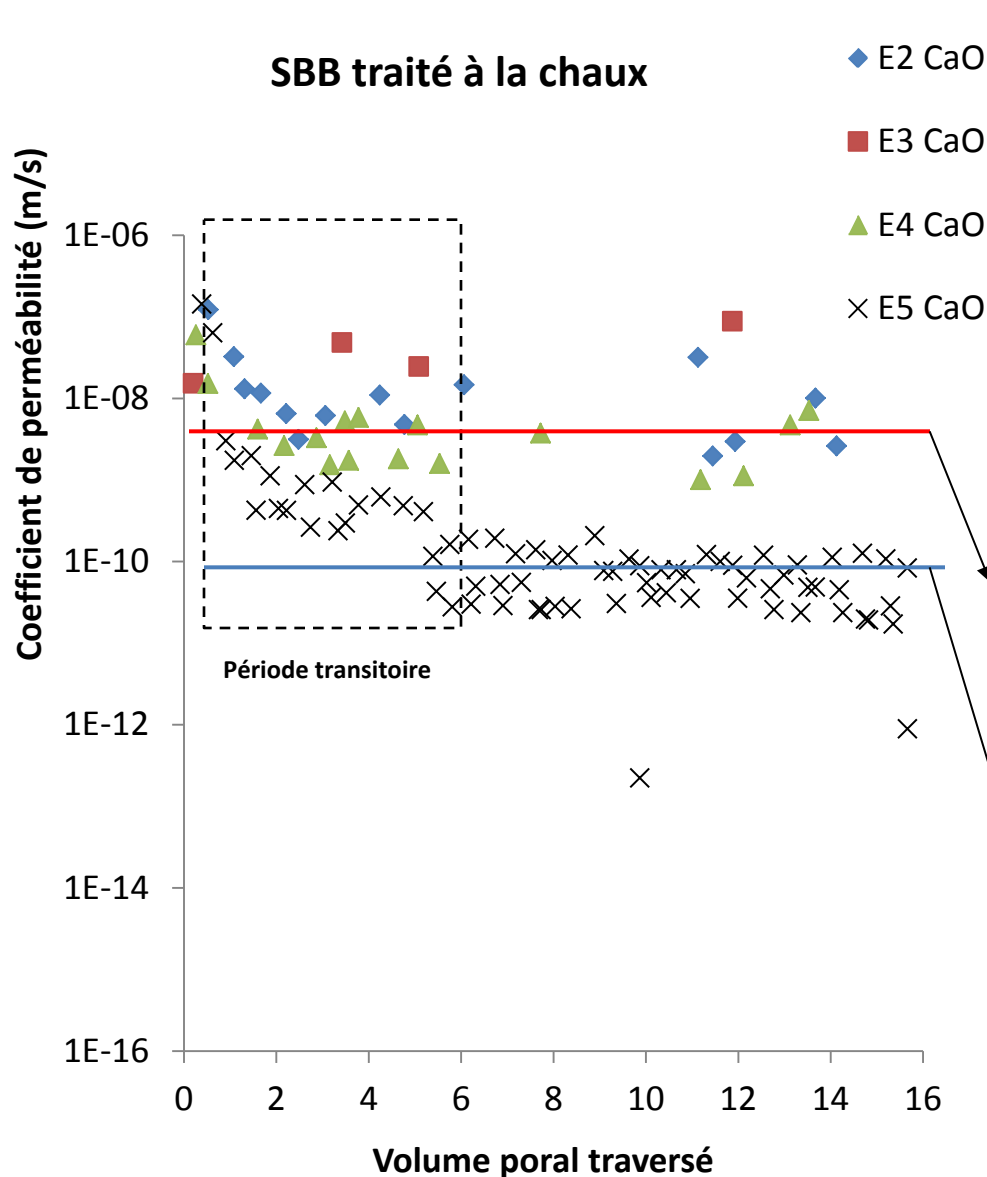
Percolation : relargage des polluants après traitement 1 % chaux

Le traitement à la chaux facilite-il ou non le transfert de polluants?



**Baisse de la conductivité des percolats par rapport à la percol. À l'OPN :
effet stabilisant de la chaux**

Coefficient de perméabilité après traitement 1 % chaux



Faibles coefficients de perméabilités
pour SBB OPN ou OPM
(peu d'effet du compactage)

$$k = 10^{-9} \text{ à } 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$$

>> **transfert lent des polluants**

+ CaO : Perméabilité = $10^{-8} - 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$
supérieure à perméabilité du sol non traité

+ CaO : Perméabilité = $10^{-9} \text{ à } 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$.
égale à perméabilité du sol non traité
**Traitement inopérant sur certaines
épreuves?**

Conclusions

- Sols urbains étudiés avec des origines variées mais caractéristiques géotechniques communes
>> caractéristiques générales des sols urbains >> vers une nouvelle classe de matériau (définition de la MO - attention à la mesure dans les sols urbains - et application d'un essai de tri sur la fraction > 5 mm)
- Forte pollution au gypse et présence d'artefacts en quantité variable mais sols urbains techniquement acceptables en remblai et couche de forme selon GTR (classe mécanique atteinte)
- Du point de vue environnemental, des éléments (Sb, F SO₄ et Corg) dépassent le seuil ISDI (caractéristiques que l'on retrouve sur les sols urbains parisiens)
- les deux sols présentent des perméabilités similaires : faibles perméabilités et temps de percolation relativement long (plus d'un an).
- Le compactage semble avoir peu d'effet sur la perméabilité des sols tandis qu'un traitement à la chaux augmente la perméabilité. Le traitement au ciment montre une grande variabilité sur la perméabilité selon les éprouvettes (k_{OPN} à k proche de 0 sur 1-2 ans = absence d'écoulement)
- Le traitement à la chaux ou au ciment semble avoir un effet stabilisant sur le relargage des ions puisque les valeurs de conductivités diminuent par rapport à celles obtenues sur un sol non traité.