



## **OPUSS**

MODELISATION DU TRANSPORT DE  
POLLUANTS DANS LES SOLS ET LE SOUS-  
SOL EN MILIEU URBAIN – Etat de l'art

## **CONTAMINANT TRANSPORT MODELING IN SOILS AND SUBSOILS IN URBAN ENVIRONMENT – A review**

C. Le Guern, B. Béchet, V. Gujisait, Y. Lotram, N. Saiyouri, T.  
Khalil, H. Roussel



30 mars 2011



## **Plan de l'exposé**

- > Contexte et objectifs**
- > Premiers résultats**
- > Enquête en cours**
- > Discussion**



jeudi 28 avril 2011

> 3

## Le sol, une ressource menacée

### ► Développement urbain

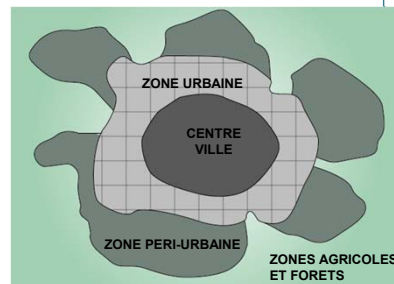
- ▶ Perte de « terres »
- ▶ Sol = récepteur et source de pollution

➡ Santé humaine et qualité de vie

### ► Future Directive Européenne pour la Protection des Sols ?

Liste des activités potentiellement polluantes

(industries + ports, aéroports, stations service, décharges, STEP)

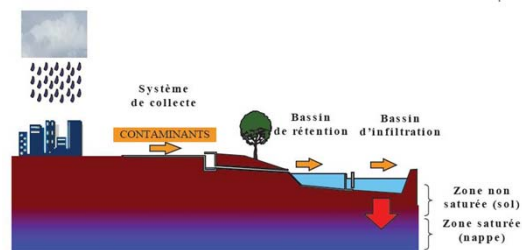


d'après Girard M-C., 2005 modifié

## L'eau, une ressource fragile

### ► Eaux de surface et souterraines

Santé humaine  
Enjeux écologiques  
Qualité de vie



Larmet, 2007, d'après Lassabatère, 2002

### ► Directive Cadre Européenne sur l'eau

Reconquête de la qualité de l'eau



## La gestion des sols et des eaux en milieu urbain

### > Collectivités => gestion durable

#### > Sols

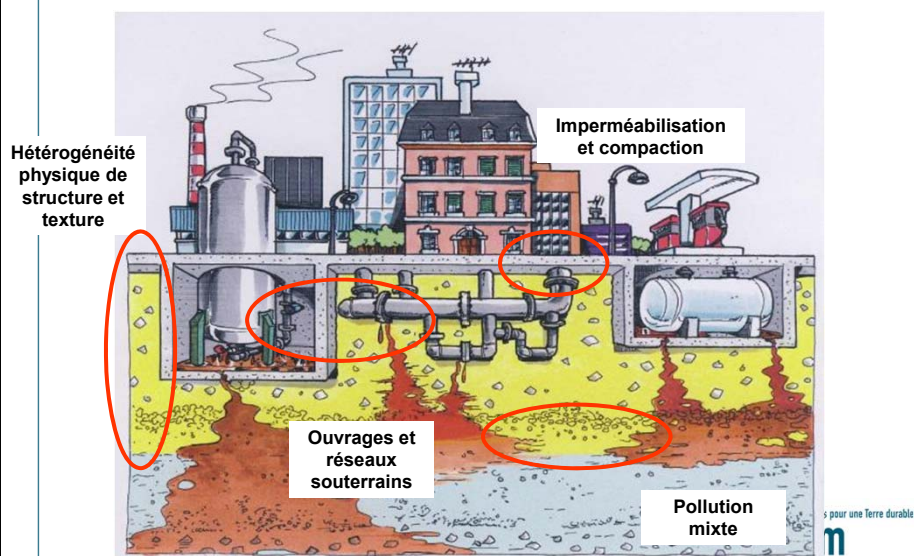
- Optimiser leur **usage** =>
  - Réutilisation/réaménagement des sols de friches (pollués)
- Eviter les répercussions de la dégradation des sols sur la **santé humaine**

#### > Eaux

- Infiltration
- Nappes
- Rivières



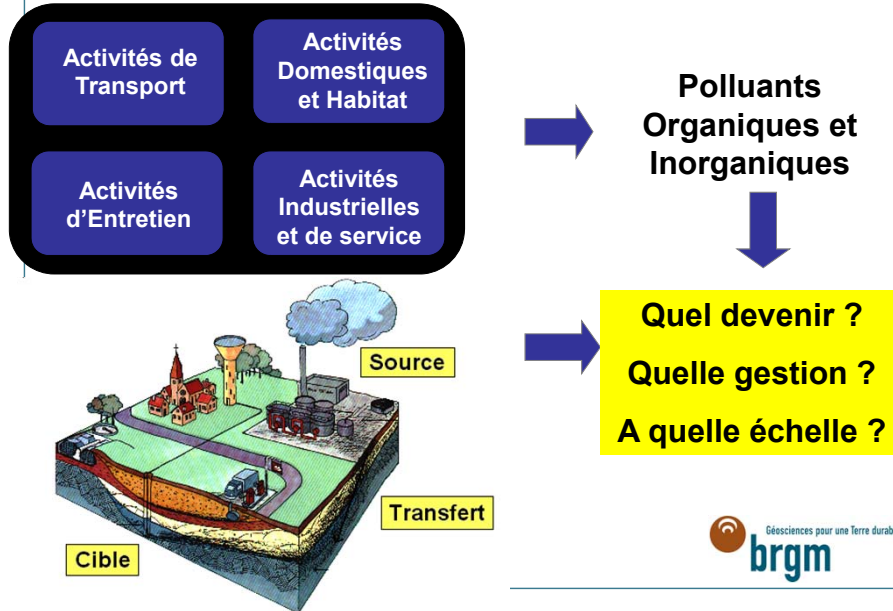
## Spécificités des sols urbains



+ Evolution du centre des villes vers les campagnes

(© M. Balme, CFH)

## Principales sources de pollution des sols urbains



## Différentes échelles d'approche

- > Ponctuelle
- > Locale
- > Globale

## Objectifs du projet OPUSS

### > Etat de l'art scientifique et technique

- Outils de modélisation

- Transferts de polluants

- zone saturée

- zone non saturée

- Gestion durable des pollutions urbaines diffuses

- Potentialité à être utilisés ou adaptés en milieu urbain



## Méthodologie

**Bibliographie**

**Enquête**

**Modèles et outils de modélisation**

**Diversité des polluants rencontrés en milieu urbain**

**Retours d'expériences**

**Particularités liées au contexte urbain**

**Approche scientifique et technique multidisciplinaire  
Vision opérationnelle et intégratrice**



**Possibilités et limites des modèles existants  
Améliorations possibles**



## Premiers résultats

- > **Processus de transport des polluants**
- > **Modèles et outils de modélisation**

## Impact des différents processus sur le transfert de polluants

	PROCESSUS	Impact sur le transport
PHYSIQUES	Advection (ou convection)	Transport du soluté loin de la source (migration verticale ou horizontale)
	Diffusion moléculaire	Étalement du panache (présent avec ou sans mouvement) souvent considéré négligeable
	Dispersion mécanique	Diminue la concentration du pic et les premiers temps d'arrivée, augmente la taille du panache
	Filtration mécanique	Diminution de concentration grâce aux éléments « fixés »
	Transport colloïdal	Augmentation du transfert en vitesse et en distance
BIO-PHYSICO-CHIMIQUES	Spéciation en phase aqueuse	Influence la réactivité et donc la mobilité de certains ions et molécules
	Réactions acido-basiques	Contrôle le pH de la solution et influe sur la spéciation
	Réactions d'oxydo-réduction	Effet important sur la solubilité des métaux (donc sur la spéciation) et la dégradation des composés organiques
	Réactions de complexation en solution	Augmentation ou diminution de la mobilité selon les espèces et les complexes formés (rôle sur la spéciation)
	Dissolution / précipitation	Accélération / Retard de la mobilité du polluant, changement de la porosité du milieu et donc du champ de vitesse
	Co-précipitation	Retard de la vitesse de transfert du polluant (inorganique)
	Adsorption (sens large)	Réduit la vitesse apparente du polluant
	Transformations biologiques	Diminution des concentrations en solution des polluants organiques
	Volatilisation	Diminue la concentration en solution (certains polluants organiques plus particulièrement)

## Impact des spécificités urbaines sur le transfert de polluants

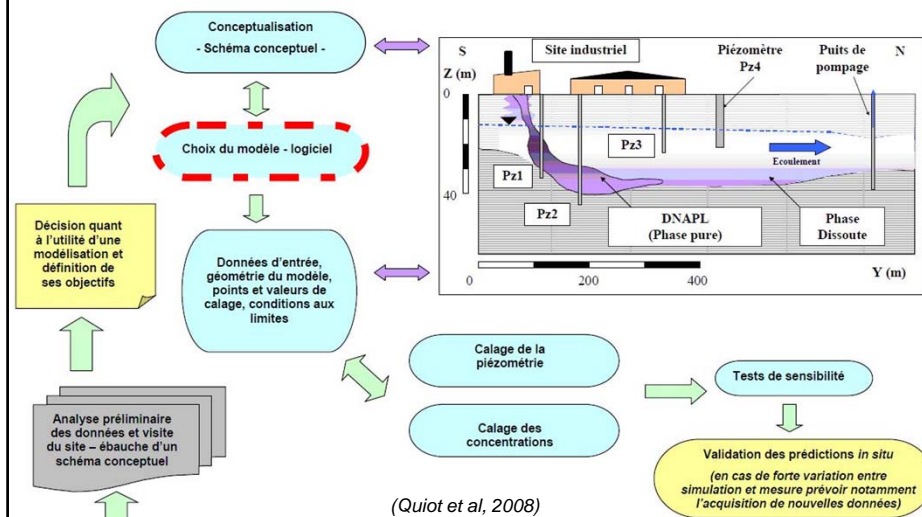
### > Les spécificités du milieu urbain

- hétérogénéité,
- propriétés hydrodynamiques complexes
- évolution temporelle

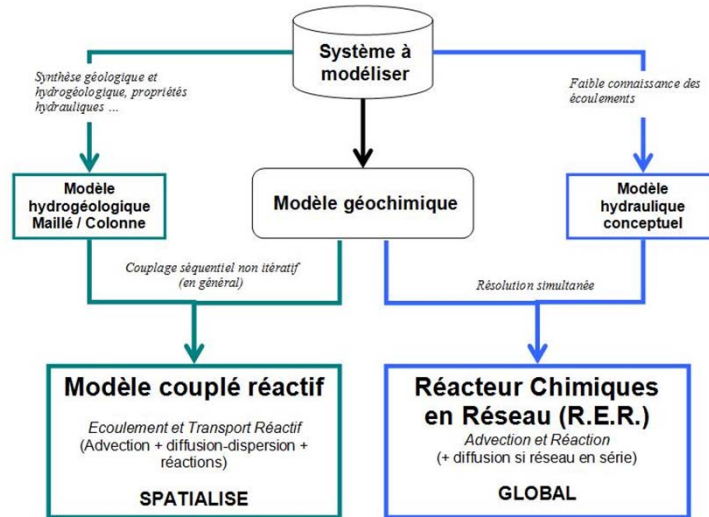
### > Influencent fortement le devenir des polluants.



## Démarche globale de modélisation



## Modèles de transport réactif



d'après Lanini, 2004 modifié

## Analyses des outils de modélisation

- > **Étape 1 - Principaux modèles de transport réactif et leurs fonctionnalités**
- > **Étape 2 – Analyse de chaque outil**
  - *Fiches*
    - *Littérature scientifique*
    - *Développeurs*
    - *Utilisateurs*
- > **Étape 3 - Comparaison**



## Exemple de fiche

<b>Nom</b>	HP1 version 2.x (HYDRUS1D-PHREEQC) HP1 Version 2.2.002 (beta version) - Septembre 2009
<b>Description</b>	Hydrus 1D est un programme logiciel basé sur le code PHREEQC. Il se situe au niveau outil de simulation. HP1 (acronyme pour HYDRUS1D-PHREEQC) est capable de simuler le transport et les réactions en milieu poreux saturé ou non saturé en 1D.
<b>Disponibilité</b>	gratuit Jacques et al., 2004 ; Jacques et Simunek, 2009
<b>Documents de référence</b>	HYDRUS 1D (Simunek et al., 1998); Université de Riverside, California, USA PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999); SOU-CEN, Flandre, Belgique Simunek et Šimunek, 2009 Simunek et al., 2009 <a href="http://www.mwlab.ces.ncsu.edu/">http://www.mwlab.ces.ncsu.edu/</a>

<b>Utilisation</b>	
Domaine d'application	Transport de métaux lourds avec réactions d'échanges cationiques multiples
Exemples d'application	Transport avec dissolution/mixité de SO <sub>2</sub> atmosphérique et de gibbsite Al(OH) <sub>3</sub> Transport de métaux lourds avec influence de pH Écoulement transitoire long terme et transport de cations majeurs et métaux lourds dans un profil de sol Évaluation de cadmium dans un sol saturé acide (Jacques et al., 2006a) Transport de radionucléides « isotopes césars » (Jacques et al., 2006a) Transport et dégradation de composés organiques (PCE)
Prévisions d'incertitude	Équations prédictives (métaux lourds)
Échelle d'application	Échelle de la simulation du transport et de l'écoulement (1D)
Utilitaires associés	
Remarque	

### Phénomènes pris en compte

<b>Écoulements</b>	
Modèle d'écoulement	1D
Modèle de transport	Modèle de transport avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dispersion	Modèle de dispersion avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de réaction	Modèle de réaction avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de précipitation	Modèle de précipitation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dissolution	Modèle de dissolution avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de sorption	Modèle de sorption avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dégradation	Modèle de dégradation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de précipitation	Modèle de précipitation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dissolution	Modèle de dissolution avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de sorption	Modèle de sorption avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dégradation	Modèle de dégradation avec réactions d'échanges cationiques multiples

<b>Transport</b>	
Modèle de transport	1D
Modèle de dispersion	Modèle de dispersion avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de réaction	Modèle de réaction avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de précipitation	Modèle de précipitation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dissolution	Modèle de dissolution avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de sorption	Modèle de sorption avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dégradation	Modèle de dégradation avec réactions d'échanges cationiques multiples

<b>Géochimie</b>	
Modèle de réaction	Modèle de réaction avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de précipitation	Modèle de précipitation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dissolution	Modèle de dissolution avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de sorption	Modèle de sorption avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dégradation	Modèle de dégradation avec réactions d'échanges cationiques multiples

### Couplage écoulement-chimie

<b>Limites</b>	
Transport et écoulement	pas de diffusion et advection de soluté dans la phase gazeuse simplification de l'équation de la phase gazeuse influence géochimie sur le porosités pas prise en compte de l'effet d'un changement minéralogique sur l'écoulement et le transport toutes les fonctionnalités de HYDRUS 1D ne sont pas implémentées dans HP1 <b>Échelle de calculs ?</b>
Écoulement	pas de solution solide pas de transport et production de CO <sub>2</sub>
Modèle Numérique de couplage	Modèle à pas de temps pour le couplage écoulement et réaction pour une même période des calculs (Jacques et al., 2006)

<b>Paramètres d'entrée ?</b>	
1) valeur en eau résiduelle	1) valeur en eau à saturation
2) conductivité hydraulique à saturation	2) conductivité hydraulique à saturation
3) porosité de connectivité des pores	3) porosité de connectivité des pores
4) coefficients empiriques	4) coefficients empiriques
5) réactions volumiques	5) réactions volumiques
6) densité	6) densité
7) coefficient de distribution du soluté entre phases liquide et solide	7) coefficient de distribution du soluté entre phases liquide et solide
8) coefficient de fractionnement d'adsorption	8) coefficient de fractionnement d'adsorption
9) espacement de fractionnement d'adsorption	9) espacement de fractionnement d'adsorption
10) constante de réaction (décomposition) du 1er ordre pour la phase dissoute	10) constante de réaction (décomposition) du 1er ordre pour la phase dissoute
11) constante de réaction (décomposition) d'ordre 0 pour la phase dissoute	11) constante de réaction (décomposition) d'ordre 0 pour la phase dissoute
12) coefficient de réaction de masse	12) coefficient de réaction de masse

<b>Sensibilité</b>	
Modèle de réaction	Modèle de réaction avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de précipitation	Modèle de précipitation avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dissolution	Modèle de dissolution avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de sorption	Modèle de sorption avec réactions d'échanges cationiques multiples
Modèle de dégradation	Modèle de dégradation avec réactions d'échanges cationiques multiples

### Couplage SIG



## Retours d'expérience

### > Enquête

- Questionnaire en ligne
  - Généralités
  - Environnement concerné (agricole, industriel, urbain...)
  - Applications (gestion des sols, des eaux)
  - Outils utilisés
  - Détail sur les calculs (objectifs, milieux modélisés, échelle, processus, paramètres, sensibilité)
  - Exemples de projets (avantages, limites des outils)
  - Couplage SIG ?
  - Souhait rapport OPUSS ?
- Questionnaire papier (à disposition)



## Conclusion

### > Un état de l'art utile pour

- Les décideurs (collectivités)
- Les réalisateurs (bureaux d'études)
- Les développeurs

### > Importance du retour d'expérience



**Merci de votre attention**

**En avant pour la discussion !**

***N'hésitez pas à proposer des  
correspondants,  
ou à venir remplir l'enquête***

**Contact**  
**c.leguern@brgm.fr**

