

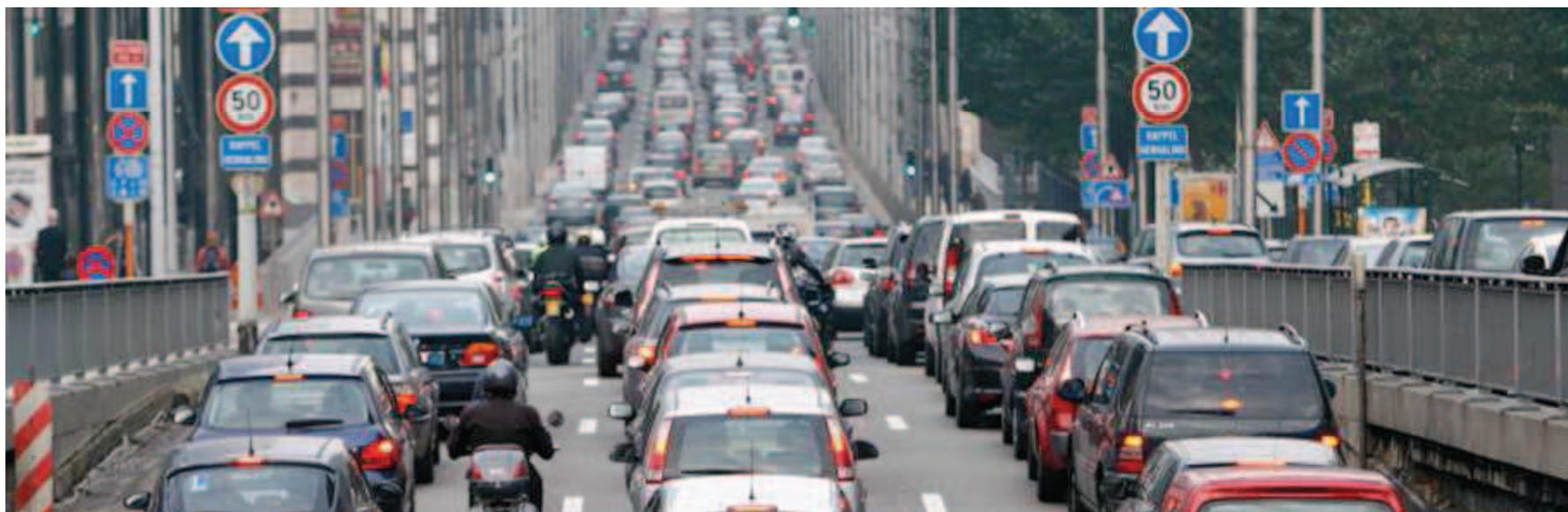
**Maîtriser la contamination des eaux pluviales**

**PEUT ON MAÎTRISER LA POLLUTION DIFFUSE  
LIÉE AU RUISSELLEMENT URBAIN PAR UNE  
MEILLEURE CONCEPTION HYDROLOGIQUE DES  
OUVRAGES DE CONTRÔLE À LA SOURCE ?**

Jérémie Sage, Emmanuel Berthier, Marie-Christine Gromaire

# LES EAUX DE RUISSELLEMENT À L'AMONT

---



# LES EAUX DE RUISSELLEMENT À L'AMONT

---



- **DES NIVEAUX DE CONTAMINATION VARIABLES**
- **UNE CONTRIBUTION NON NÉGLIGEABLE À LA POLLUTION DIFFUSE DES MILIEUX**

**→ NÉCESSITÉ DE LIMITE LES REJETS  
POUR L'ENSEMBLE DES SURFACES  
URBAINES**

# L'INTÉRÊT D'UNE GESTION À LA SOURCE

---

- **GESTION DE VOLUMES RÉDUITS DANS DES OUVRAGES SIMPLES ET INTÉGRÉS**
- **PAS DE SUR-CONTAMINATION EN RÉSEAU**
- **POSSIBILITÉ D'ADAPTER LES SOLUTIONS AU TYPE DE SURFACE CONSIDÉRÉ**



## ○ LES TECHNIQUES ALTERNATIVES:

- Des perspectives pour la maîtrise des flux
- Mais une efficacité variable d'une réalisation à l'autre...
- ...et très liée à l'abattement hydrologique

## ○ DES CRITÈRES DE CONCEPTION NE TRADUISANT PAS TOUJOURS UN OBJECTIF DE MAÎTRISE DES FLUX

- Décliner les objectifs de maîtrise des flux en termes de rétention des pluies courante
- Mieux comprendre l'incidence du fonctionnement hydraulique des ouvrages sur la réduction des flux

**→ Optimiser la gestion du ruissellement des eaux pluviales urbaines pour une maîtrise à la source des flux de polluants**

- **SYNTHÈSE DES PRESCRIPTION À L'INTERNATIONAL – DEUX CRITÈRES DE GESTION HYDROLOGIQUES IDENTIFIÉS:**

- La régulation des débits de fuite
- La définition d'un volume d'abattement

*(Justification de la nature ou la valeur de ces critères ?)*

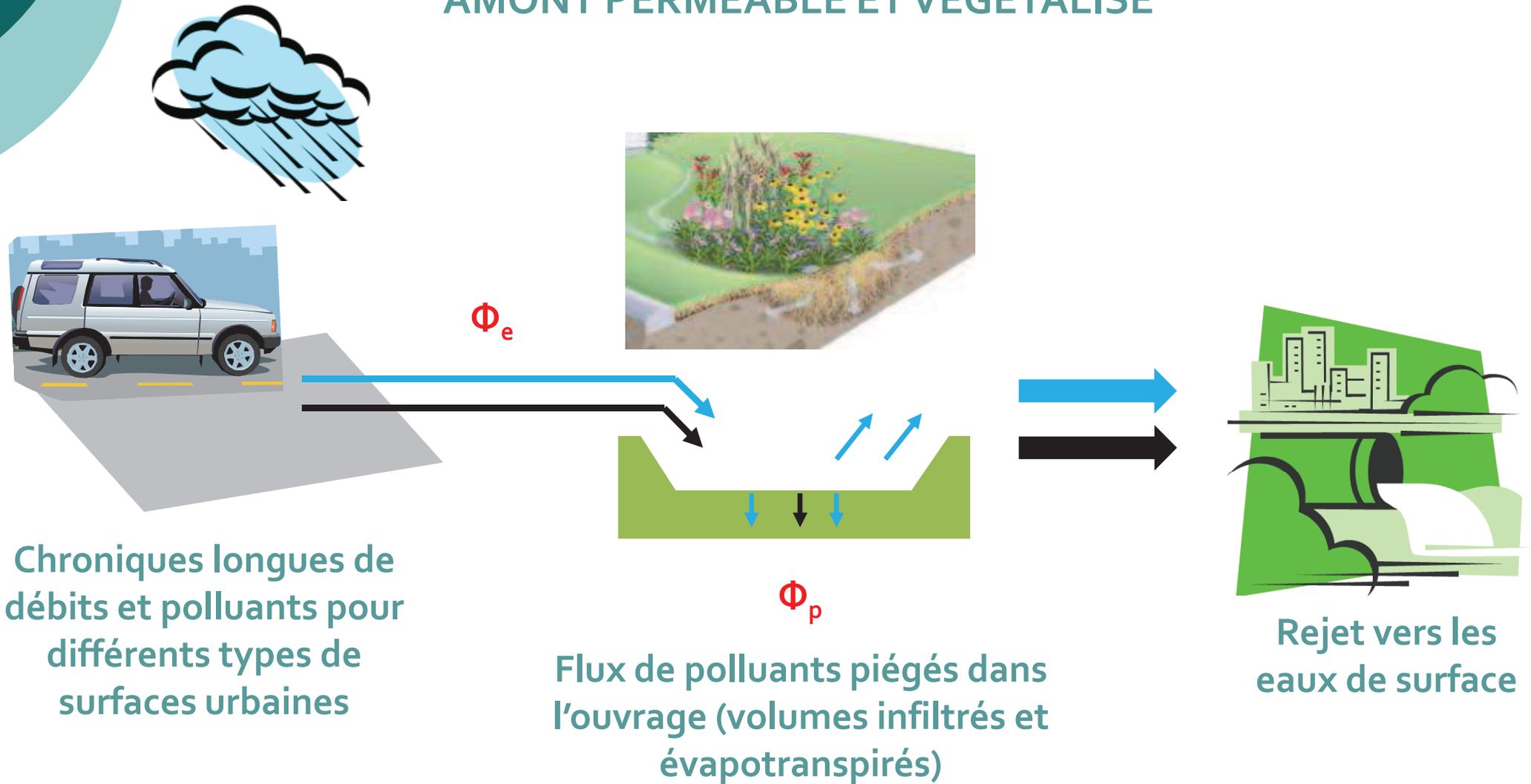
- **EVALUER L'INCIDENCE DE CES MODES DE GESTION POUR LA MAÎTRISE DES FLUX**

- **CONSTITUER UN CADRE DE RÉFÉRENCE POUR:**

- La définition des critères de gestion
- La conception des techniques alternatives

# MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

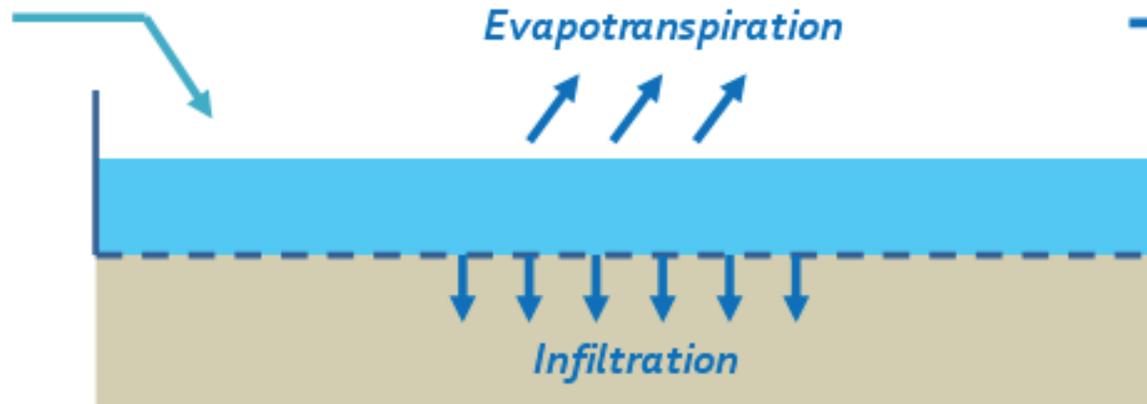
## MODELISATION COUPLEE SURFACE URBAINE + OUVRAGE AMONT PERMEABLE ET VEGETALISE



# MODÉLISATION DE L'OUVRAGE

## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES

Ruissellement  
+ contaminants



Rejet par  
surverse

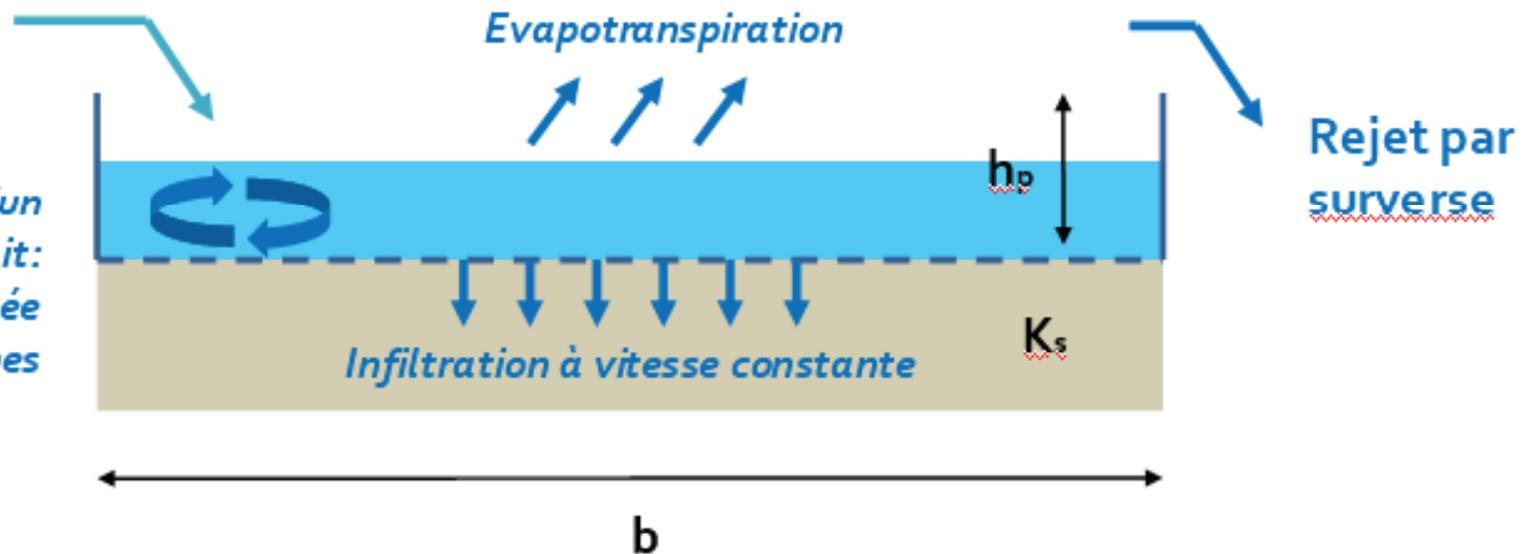
# MODÉLISATION DE L'OUVRAGE

## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES

**NOTE: hauteurs d'eau exprimées dans la suite en mm sur la surface d'apport**

Ruissellement  
+ contaminants

*Hypothèse d'un  
réacteur parfait:  
mélange instantané  
des volumes*

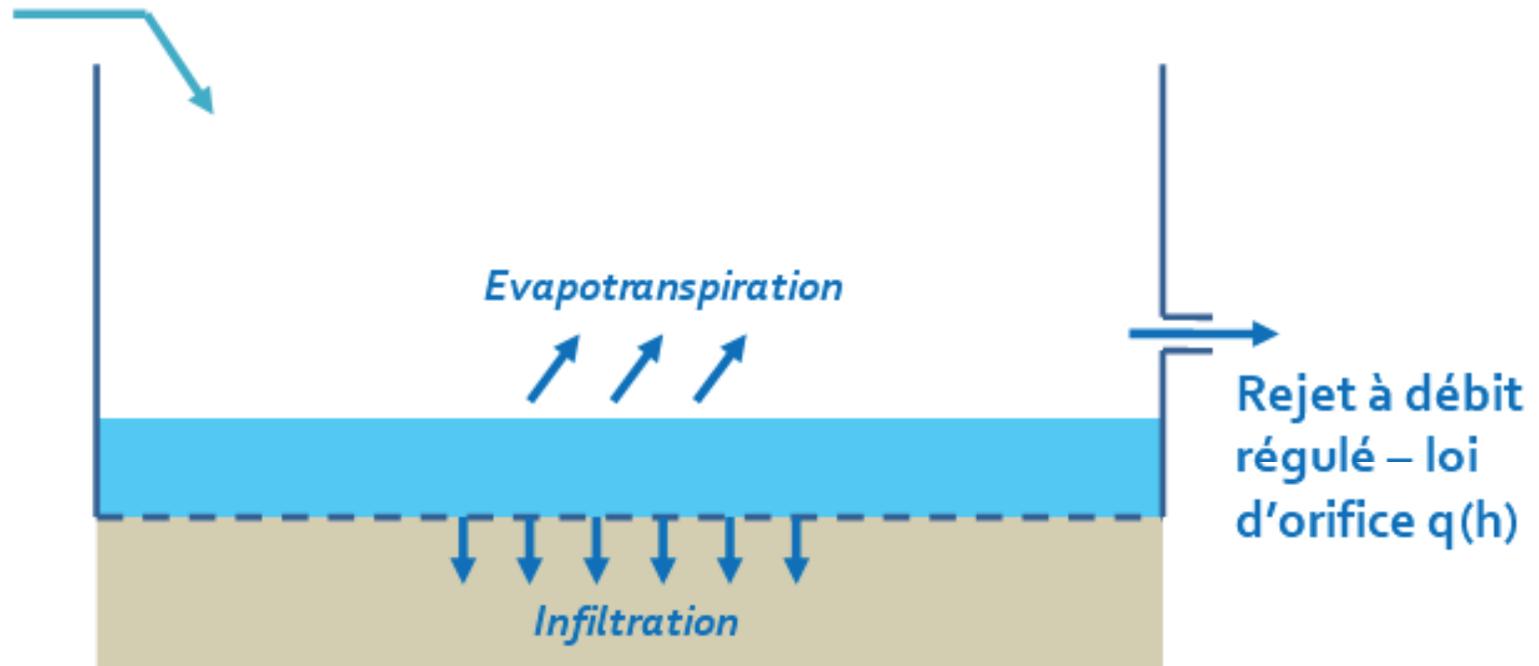


(Ratio surface de l'ouvrage :  
surface drainée)

# MODÉLISATION DE L'OUVRAGE

## CAS DE LA REGULATION DES DEBITS

Ruissellement  
+ contaminants

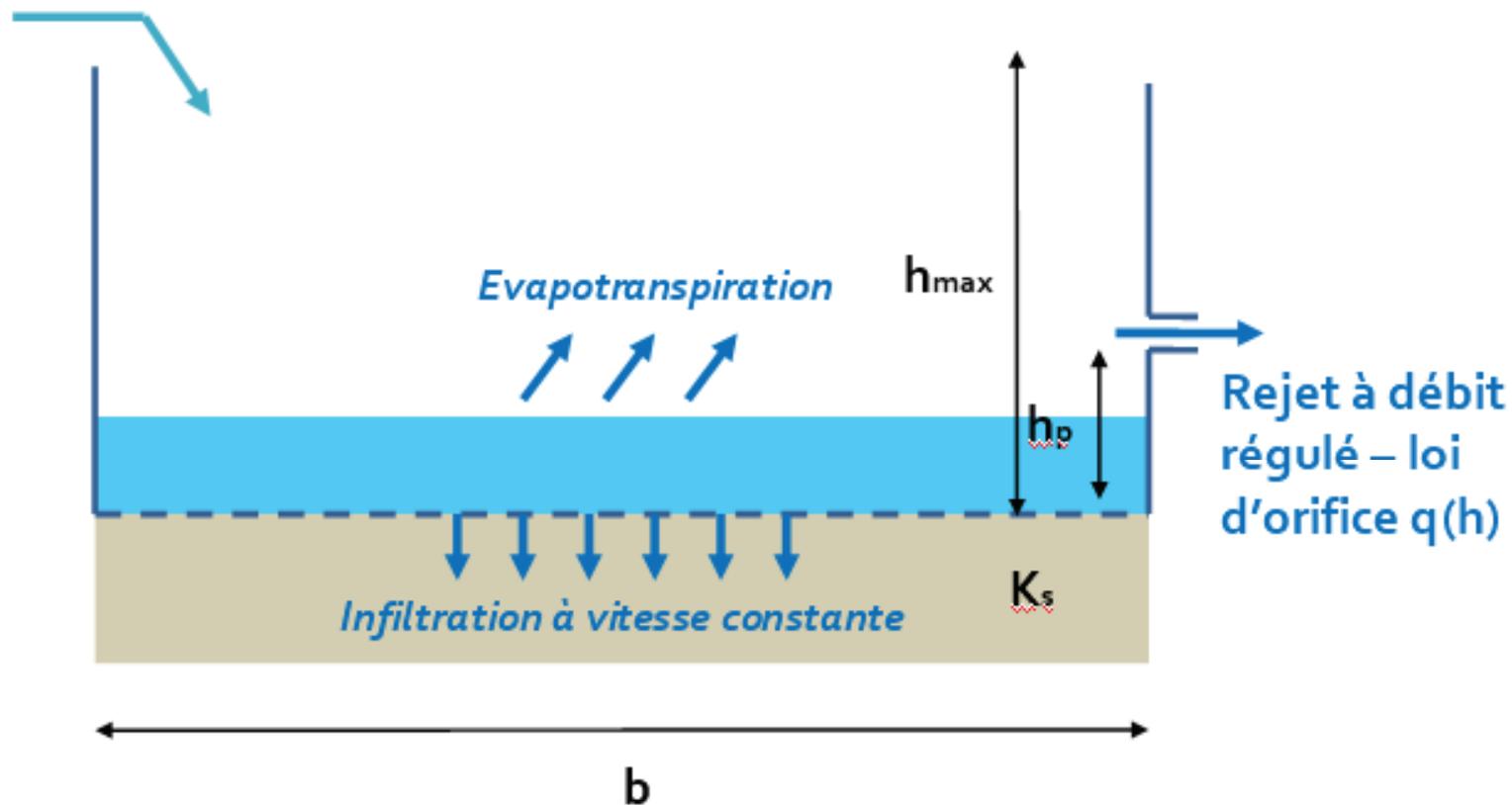


# MODÉLISATION DE L'OUVRAGE

## CAS DE LA REGULATION DES DEBITS

**NOTE: hauteurs d'eau exprimées dans la suite en mm sur la surface d'apport**

Ruissellement  
+ contaminants



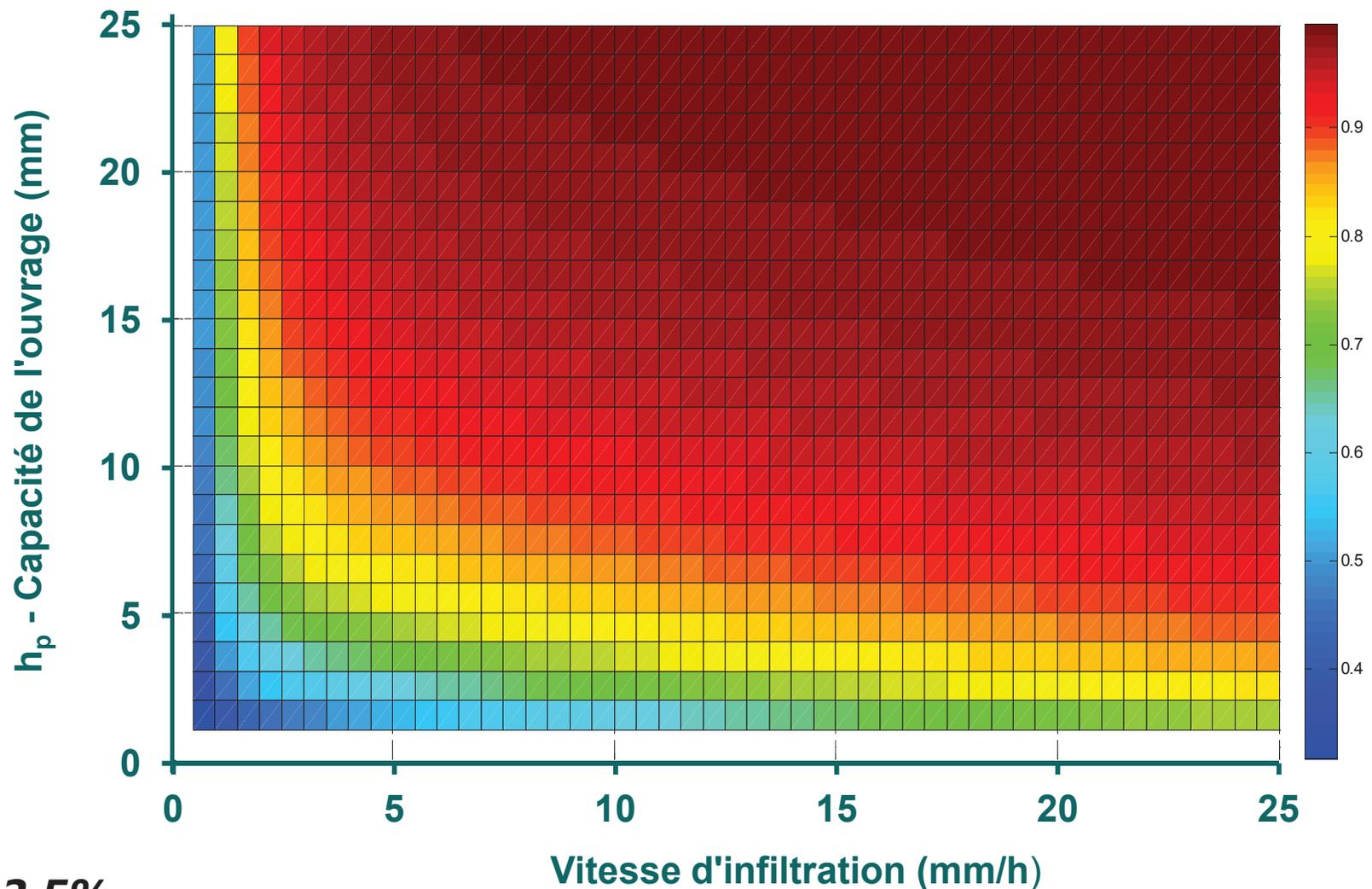
Rejet à débit  
régulé – loi  
d'orifice  $q(h)$

$b$   
(Ratio surface de l'ouvrage :  
surface drainée)

- **CAS D'UNE TECHNIQUE ALTERNATIVE RECEVANT LES EAUX DE RUISSELLEMENT D'UNE CHAUSSÉE**
  - Accumulation des polluants par temps sec à la surface de la chaussée
  - Lessivage des polluants (MES) influencé par l'intensité des précipitations
  - Simulation des flux de MES à partir de données collectées sur 5 chaussées → 5 dynamiques d'émission différentes (Thèse A. Kanso, 2004)
  
- **REPRÉSENTATION GÉNÉRIQUE ET SIMPLIFIÉE DE L'OUVRAGE**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

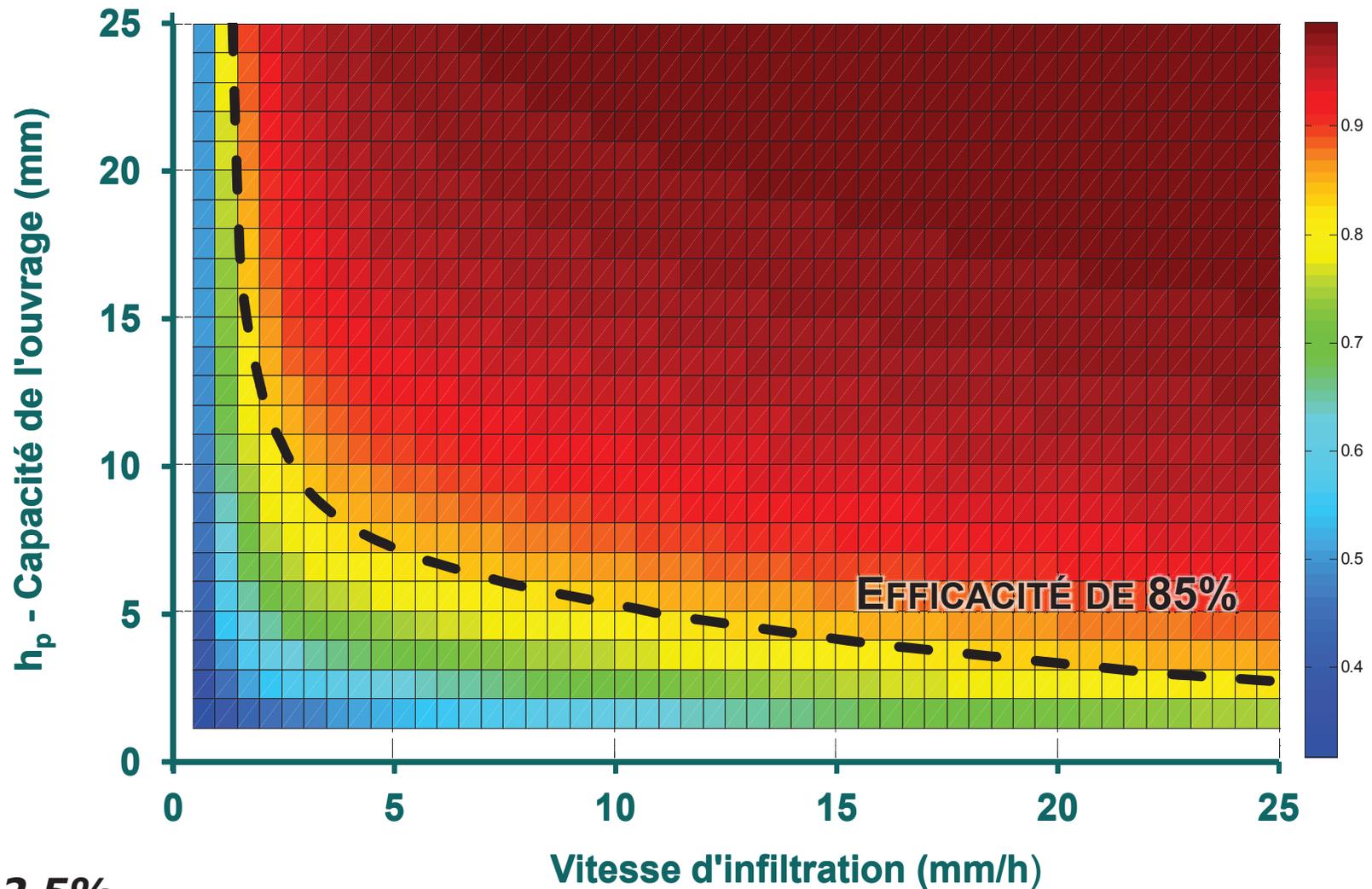
CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – EFFET DE LA VITESSE D'INFILTRATION ET DE LA HAUTEUR D'EAU CIBLEE



**NOTE:  $b = 2.5\%$   
(ouvrage de petite taille)**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

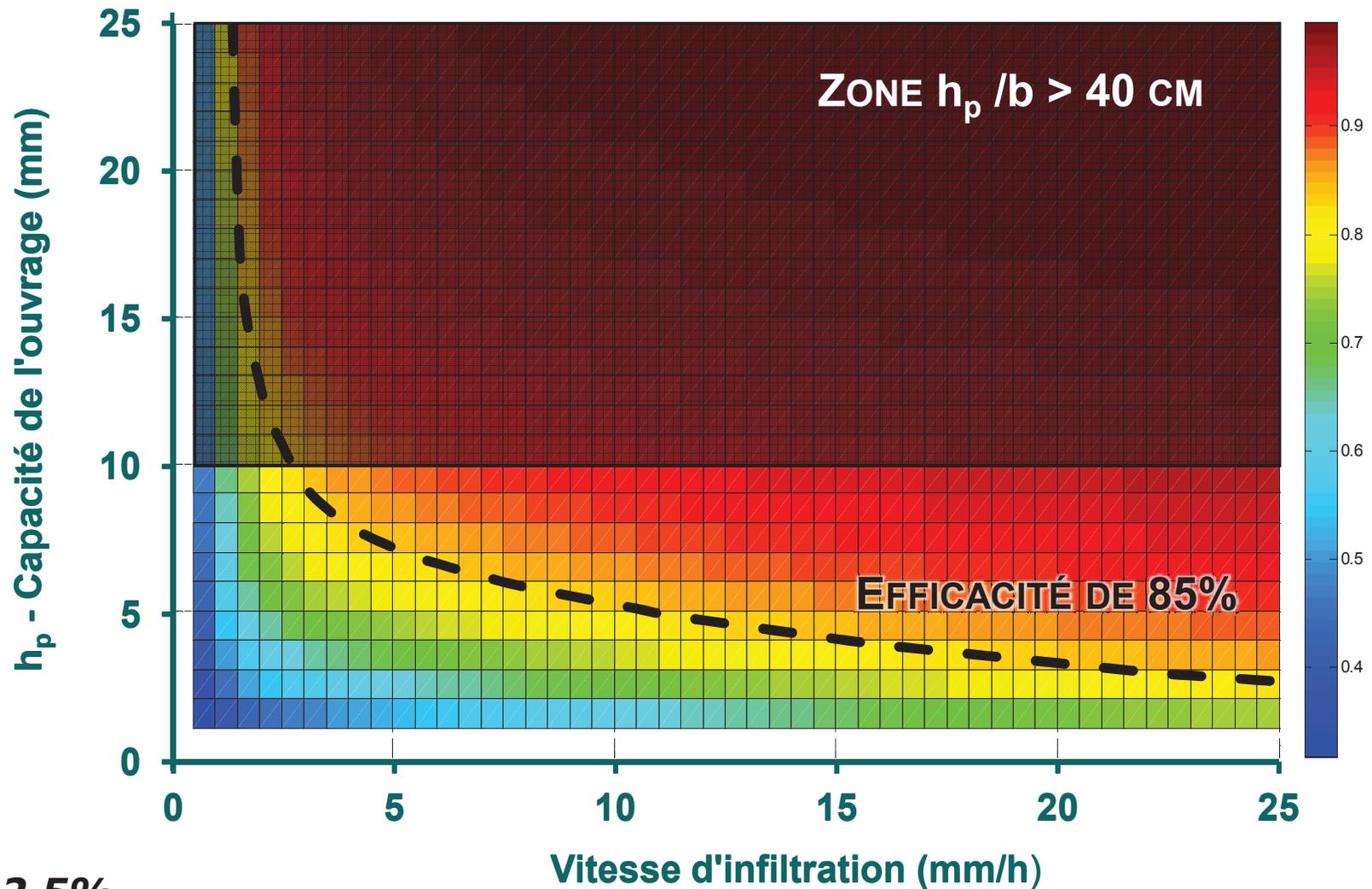
CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – EFFET DE LA VITESSE D'INFILTRATION ET DE LA HAUTEUR D'EAU CIBLEE



**NOTE:  $b = 2.5\%$   
(ouvrage de petite taille)**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

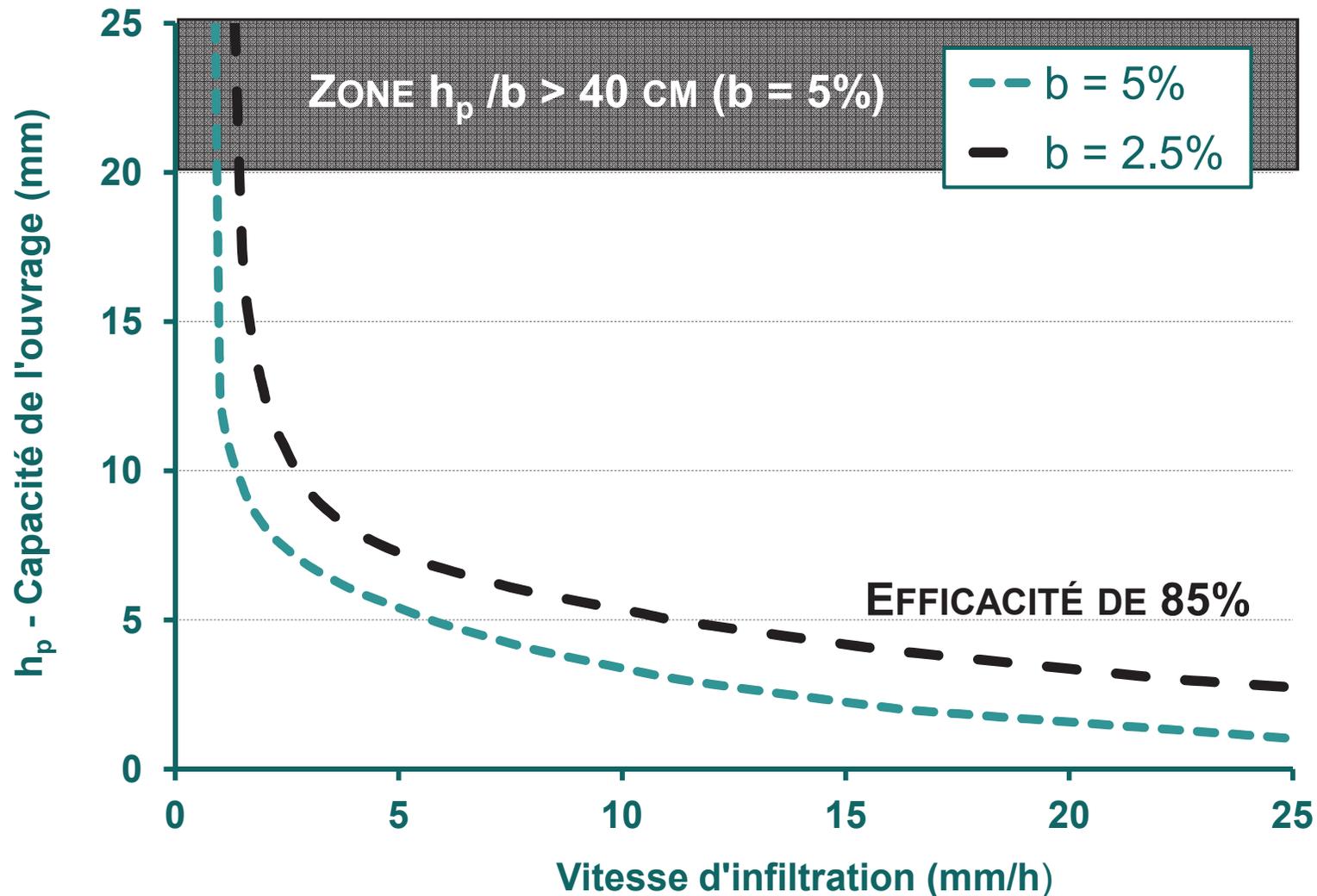
CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – EFFET DE LA VITESSE D'INFILTRATION ET DE LA HAUTEUR D'EAU CIBLEE



**NOTE:  $b = 2.5\%$   
(ouvrage de petite taille)**

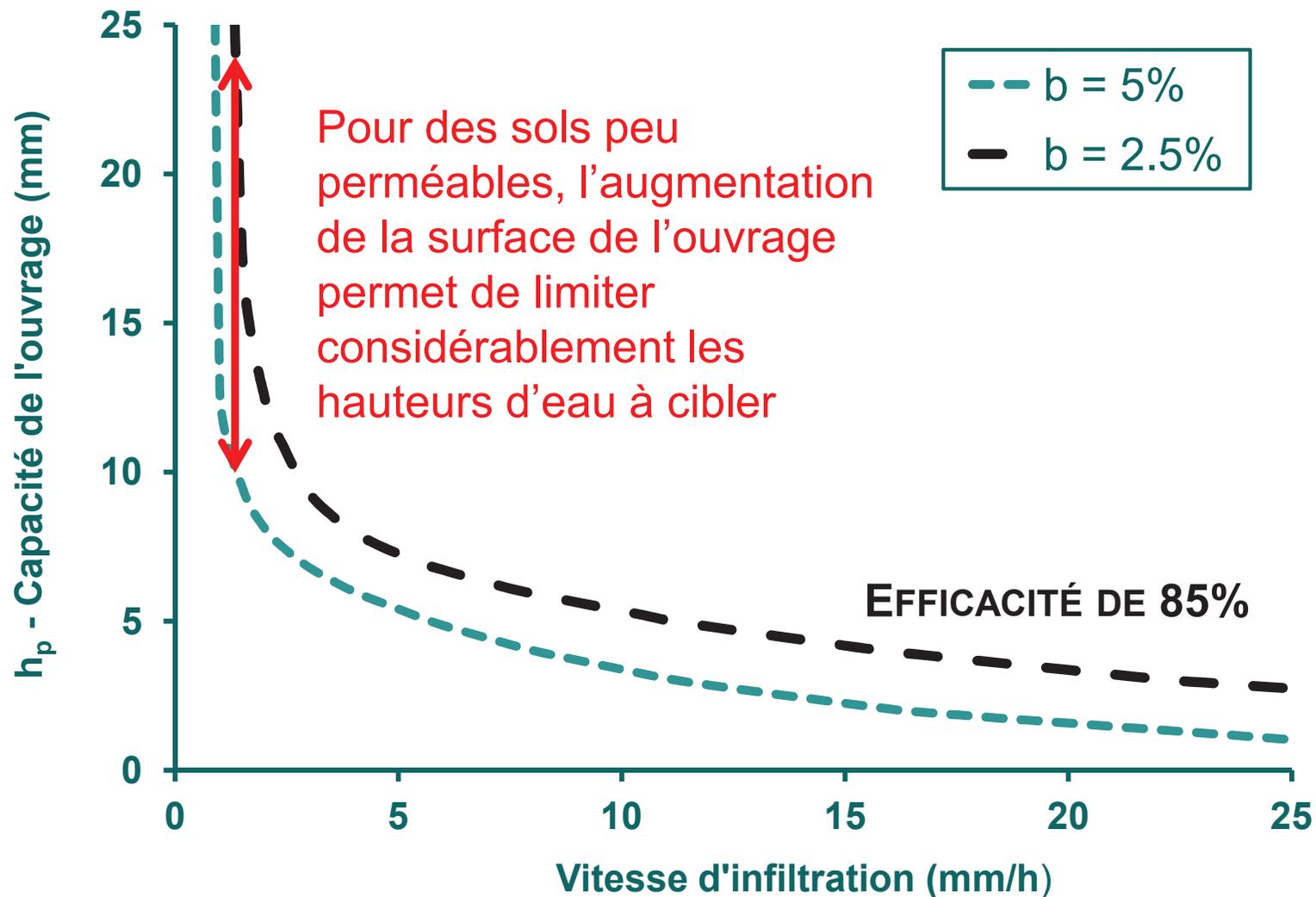
# EXEMPLE DE RÉSULTATS

## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – EFFET D'UNE AUGMENTATION DE LA SURFACE DE L'OUVRAGE



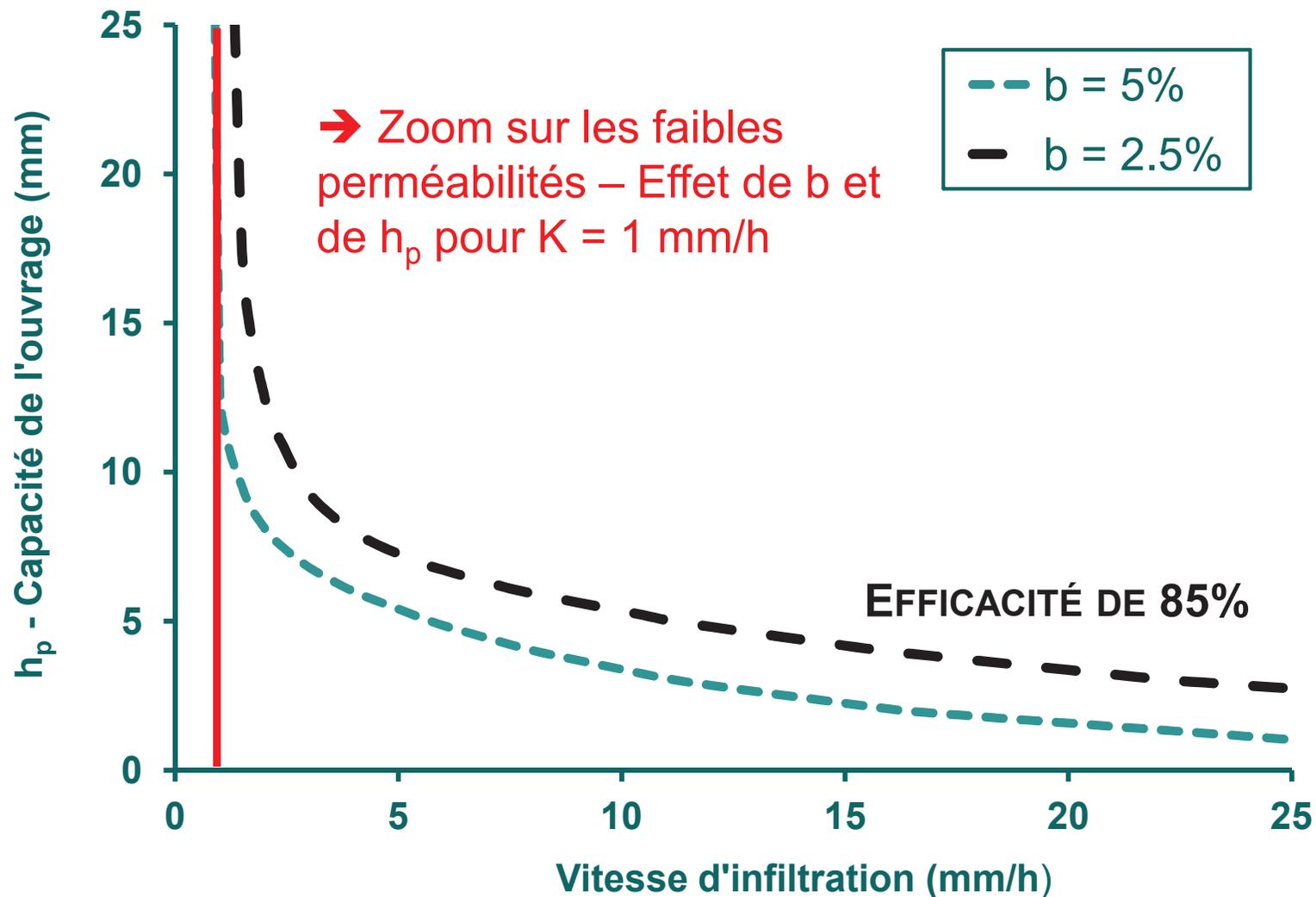
# EXEMPLE DE RÉSULTATS

## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – EFFET D'UNE AUGMENTATION DE LA SURFACE DE L'OUVRAGE



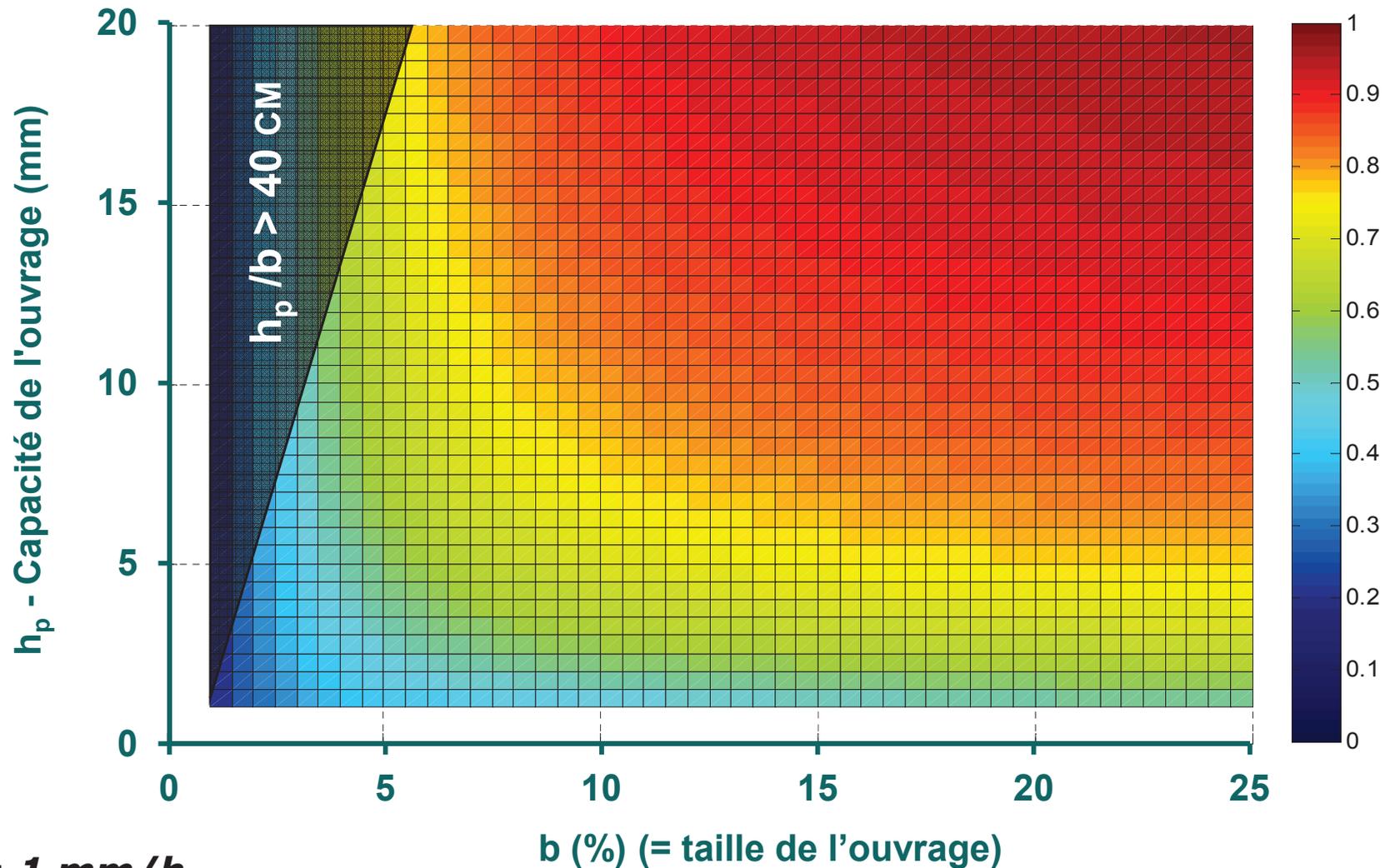
# EXEMPLE DE RÉSULTATS

## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – INCIDENCE DE LA TAILLE DE L'OUVRAGE POUR LES SOLS PEU PERMEABLES



# EXEMPLE DE RÉSULTATS

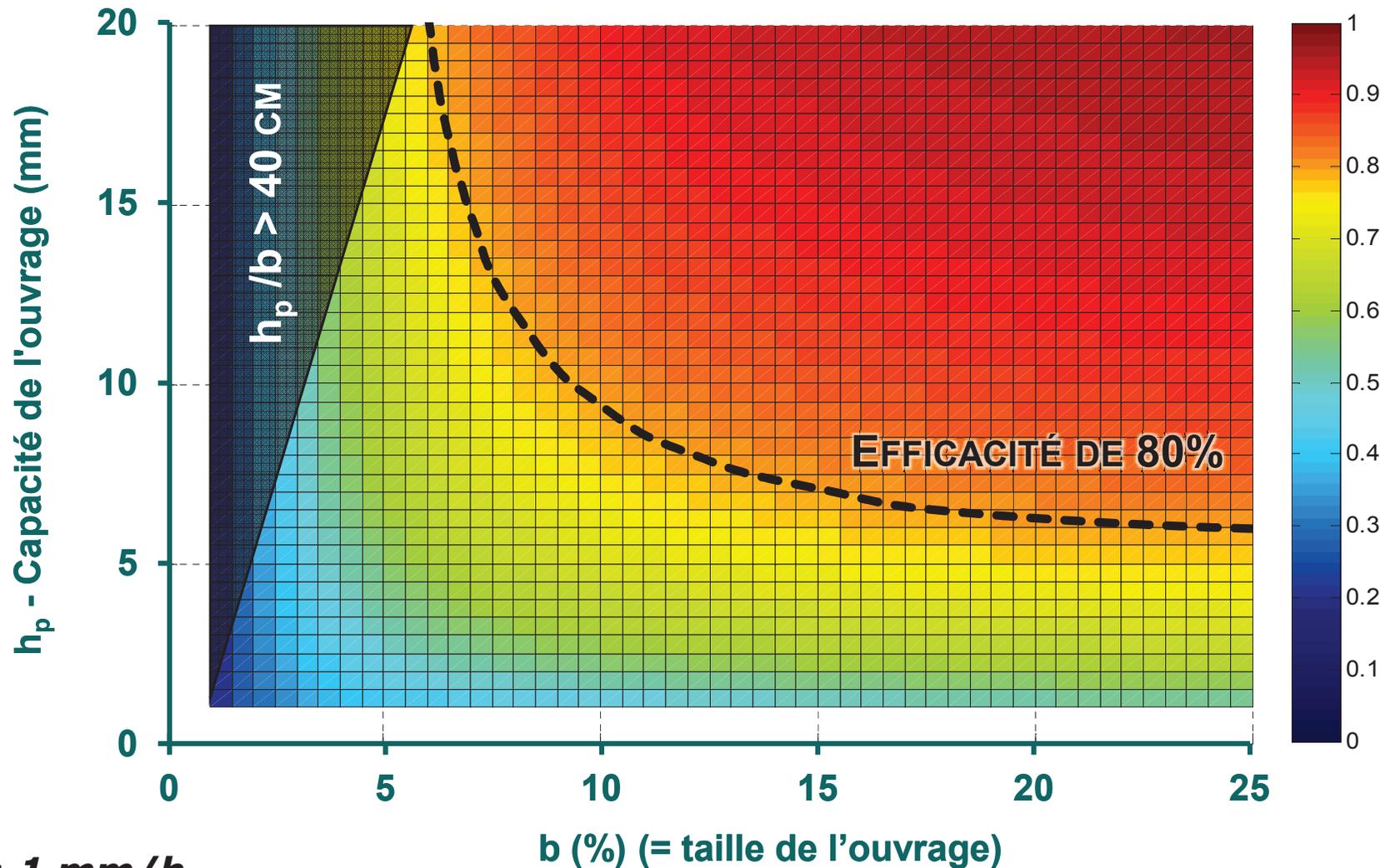
CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – INCIDENCE DE LA TAILLE DE L'OUVRAGE POUR LES SOLS PEU PERMEABLES



**NOTE:  $K_s = 1 \text{ mm/h}$   
(Sol peu perméable)**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

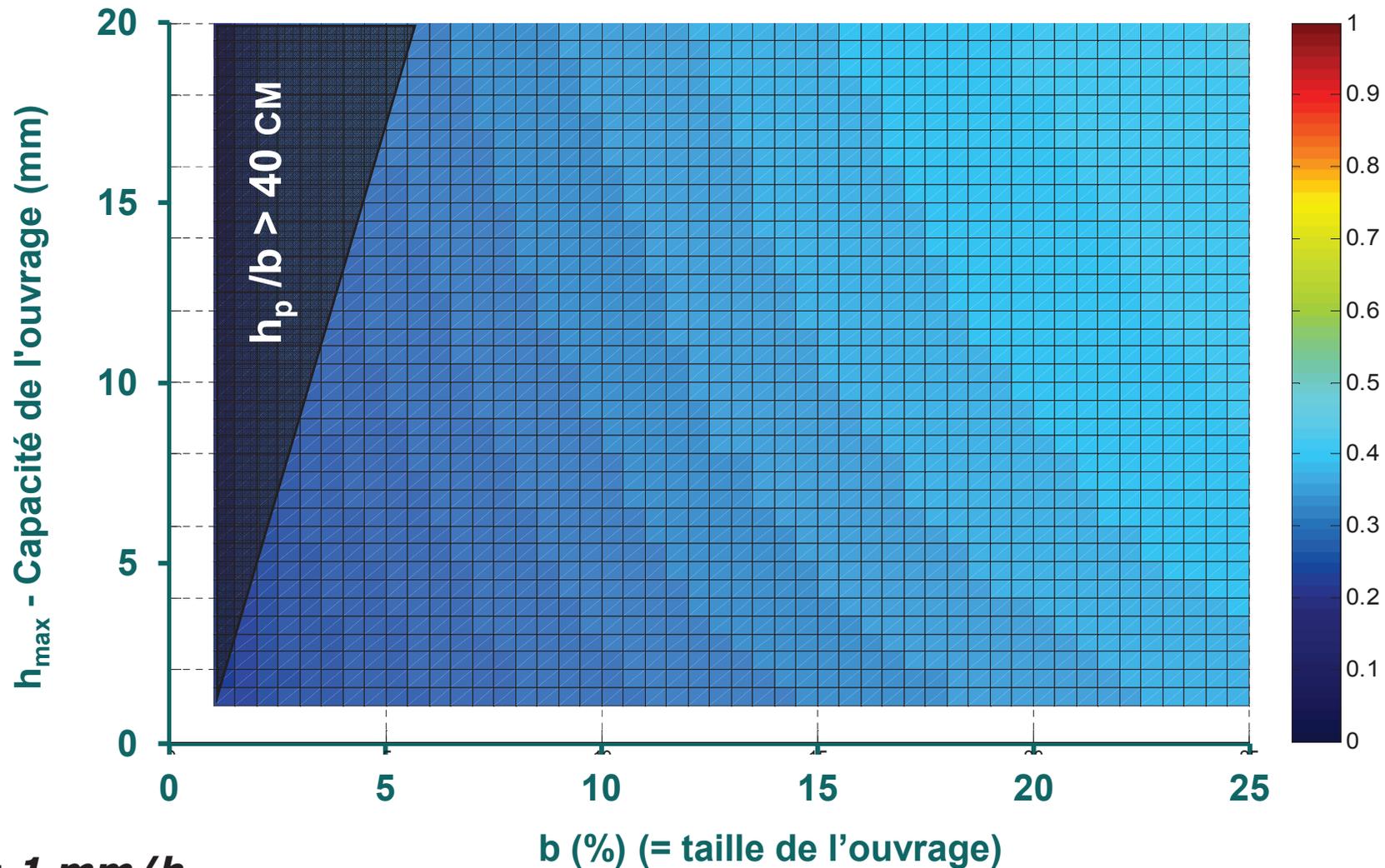
## CAS DE L'ABATTEMENT DES VOLUMES – INCIDENCE DE LA TAILLE DE L'OUVRAGE POUR LES SOLS PEU PERMEABLES



**NOTE:  $K_s = 1 \text{ mm/h}$   
(Sol peu perméable)**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

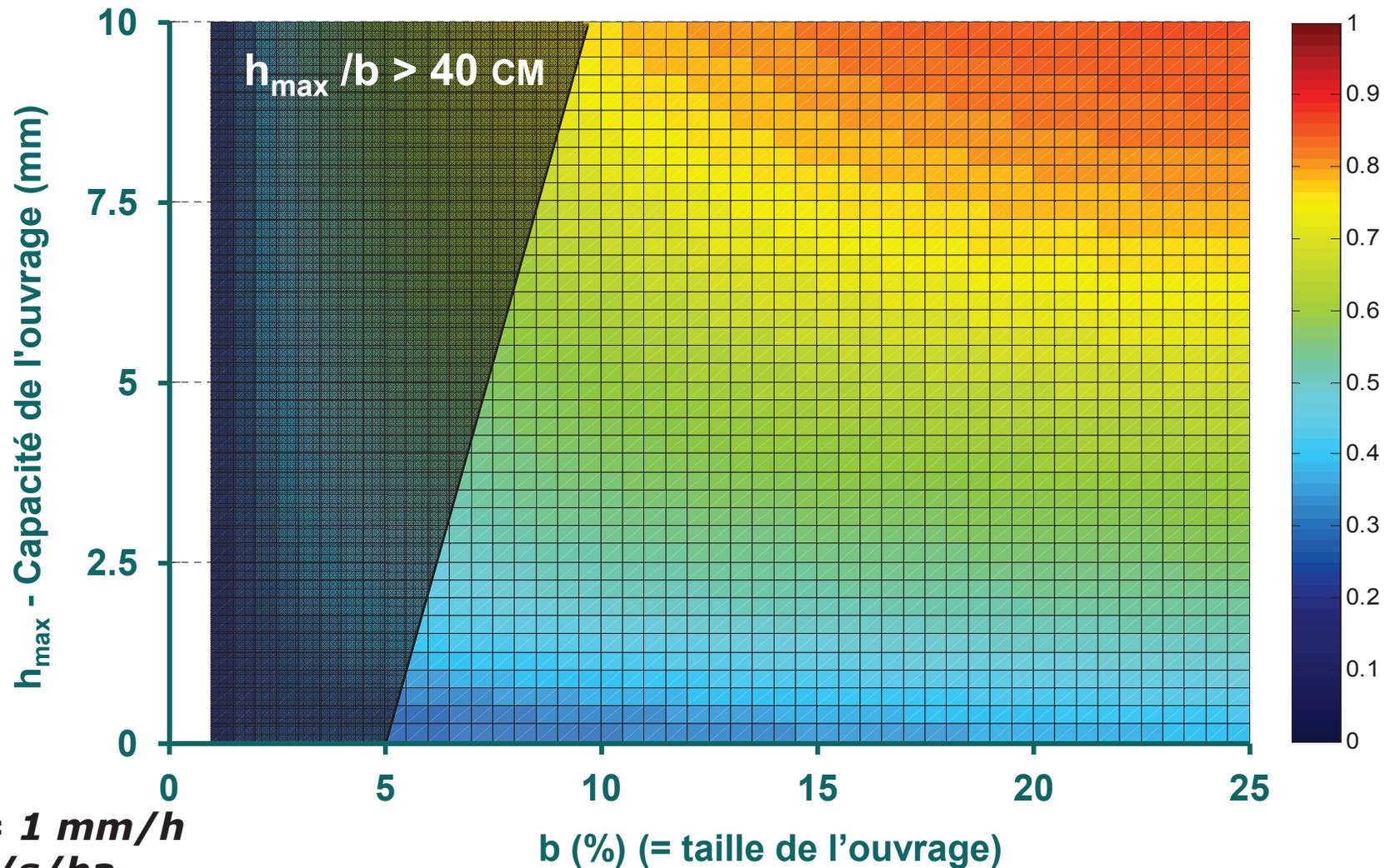
## COMPARAISON ABATTEMENT/REGULATION – PASSAGE A UNE REGULATION A 10 L/s/ha



**NOTE:  $K_s = 1 \text{ mm/h}$   
(Sol peu perméable)**

# EXEMPLE DE RÉSULTATS

## INTERET D'UNE COMBINAISON ABATTEMENT-REGULATION (PRESENCE D'UN VOLUME MORT)



**NOTE:  $K_s = 1 \text{ mm/h}$**   
 **$Q_{\max} = 10 \text{ l/s/ha}$**   
 **$h_{\max} - h_p = 22 \text{ mm}$**

# CONCLUSIONS

---

- **L'ABATTEMENT D'UNE PETITE FRACTION DU RUISSELLEMENT PEUT DONNER LIEU À DES ABATTEMENTS IMPORTANTS EN FLUX**
- **L'ABATTEMENT PEUT FOURNIR DES RÉSULTATS SATISFAISANTS Y COMPRIS POUR LES SOLS PEU PERMÉABLES (A CONDITION QUE LA SURFACE DE L'OUVRAGE SOIT SUFFISANTE)**
- **LA PRÉSENCE D'UN VOLUME MORT DANS LES OUVRAGES DE RÉGULATION SEMBLE SOUHAITABLE LORSQUE LA VITESSE D'INFILTRATION EST FAIBLE DEVANT LE DÉBIT DE FUITE**

- **EVALUER L'INCIDENCE DES DIFFÉRENTES HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES**
  - Préciser l'effet de la dynamique d'émission des contaminants
  - Quels résultats pour une représentation plus détaillée de l'ouvrage ?
  
- **LA PRODUCTION DE CRITÈRES DE GESTION GÉNÉRIQUES EST-ELLE ENVISAGEABLE?**



**MERCI DE VOTRE  
ATTENTION**

**Maîtriser la contamination des eaux pluviales**

# **Infiltration à la source des eaux de ruissellement**

**Quels risques de contamination diffuse des sols et sous-sols ?**

**Damien TEDOLDI**



# Éléments de contexte

---

1

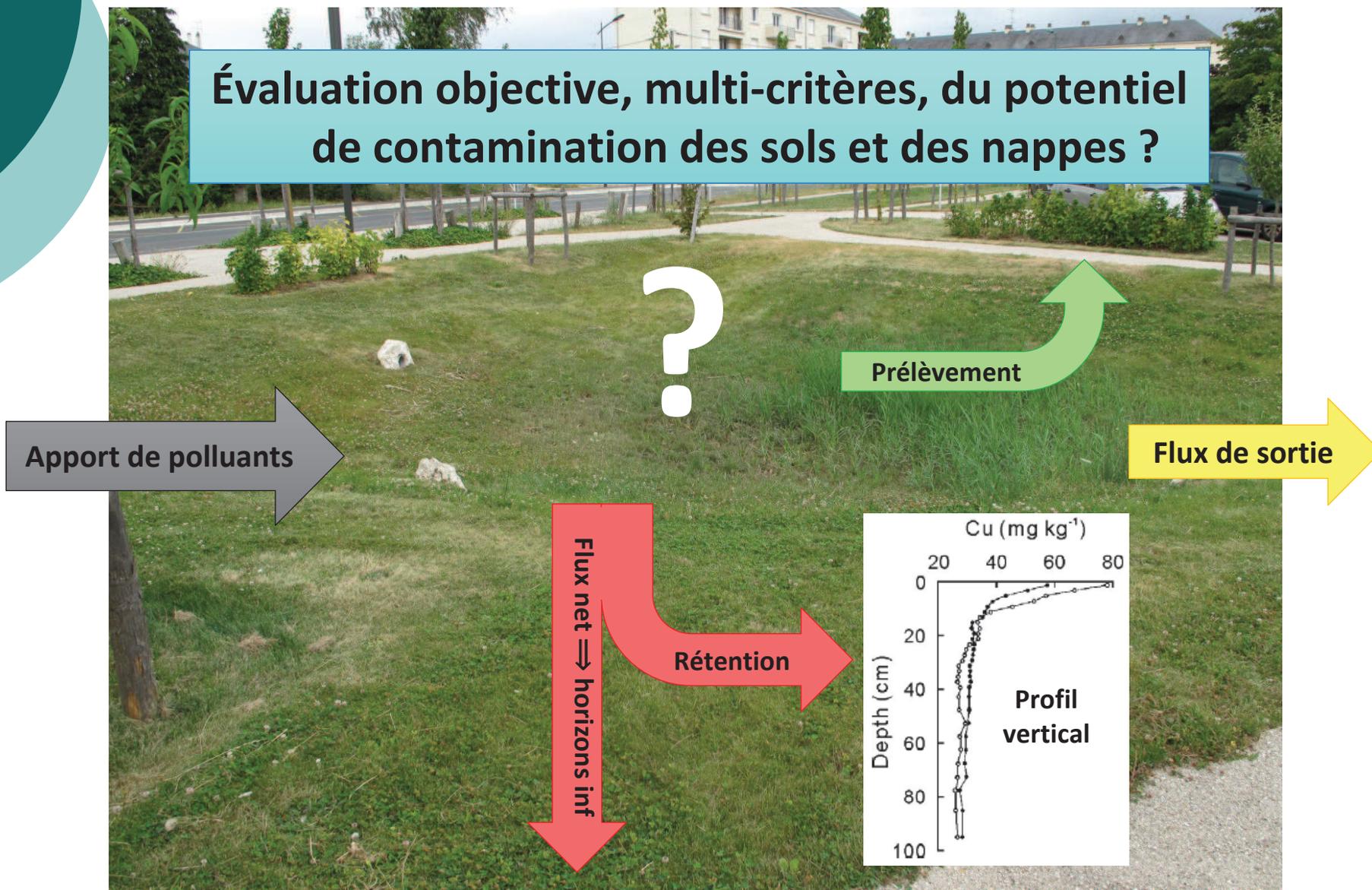
- Tendance croissante à une gestion à la source des eaux pluviales
- Fonctionnement hydraulique des **ouvrages infiltrants** assez bien appréhendé...
- ...mais des **incertitudes** demeurent sur les aspects qualitatifs :
  - Accumulation de contaminants dans le sol **Gestion de long terme ?**
  - Migration vers les eaux souterraines **Risques ?**
- **Questions opérationnelles** (conception des ouvrages, modes de gestion, instruction des dossiers par la police de l'eau)
- **Frein** à la mise en place de techniques alternatives, et manque d'une « **doctrine** » généralisable

- Étude de l'accumulation de **métaux et HAP** dans les sols, de leur transfert, et des phénomènes qui en sont la cause
- Détermination de la dynamique de migration des contaminants
- Évaluation objective du **potentiel de contamination des sols et des nappes**

# Éléments de contexte

2

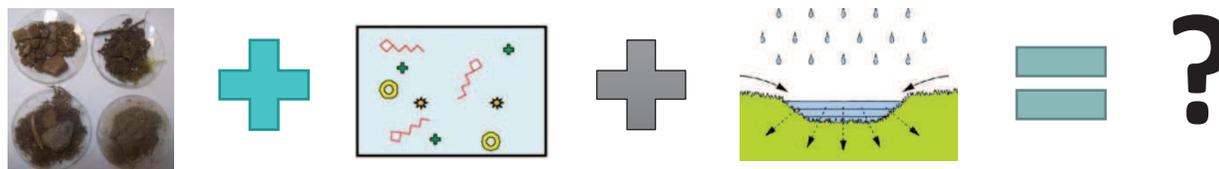
Évaluation objective, multi-critères, du potentiel de contamination des sols et des nappes ?



## Plan de la présentation

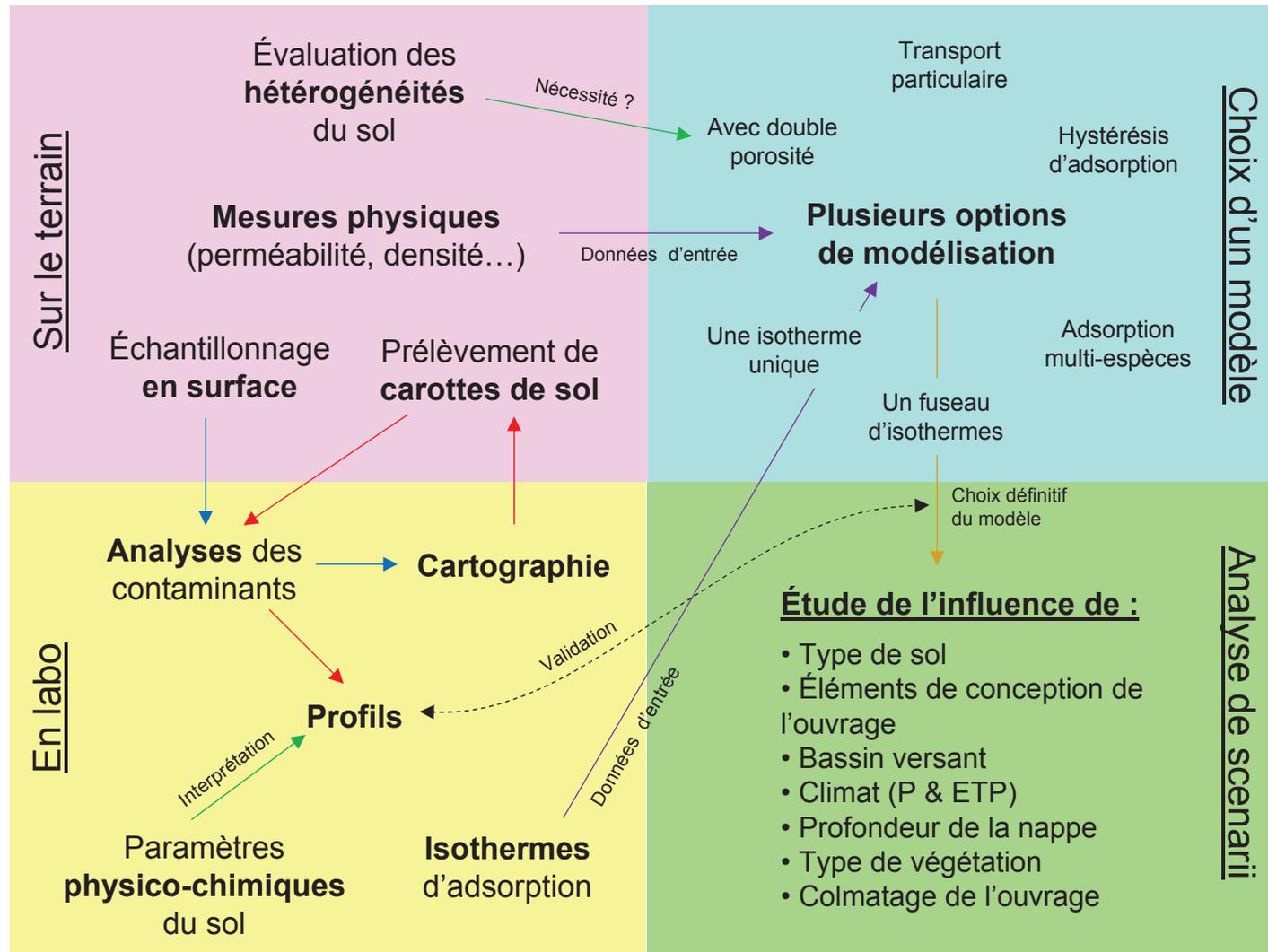
---

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles



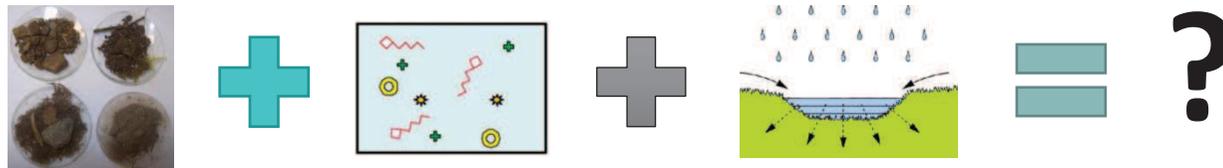
## Volet expérimental

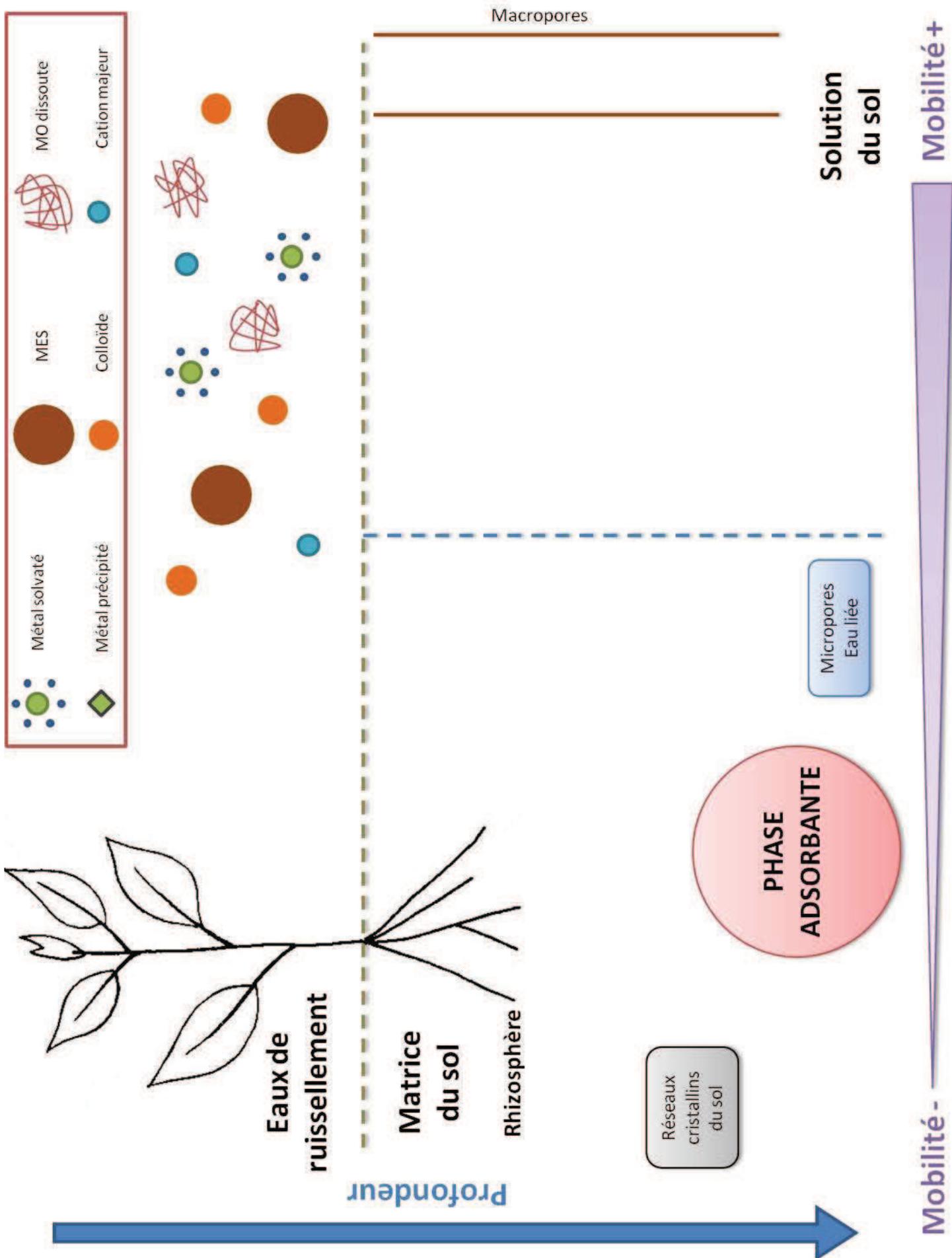
## Volet modélisation

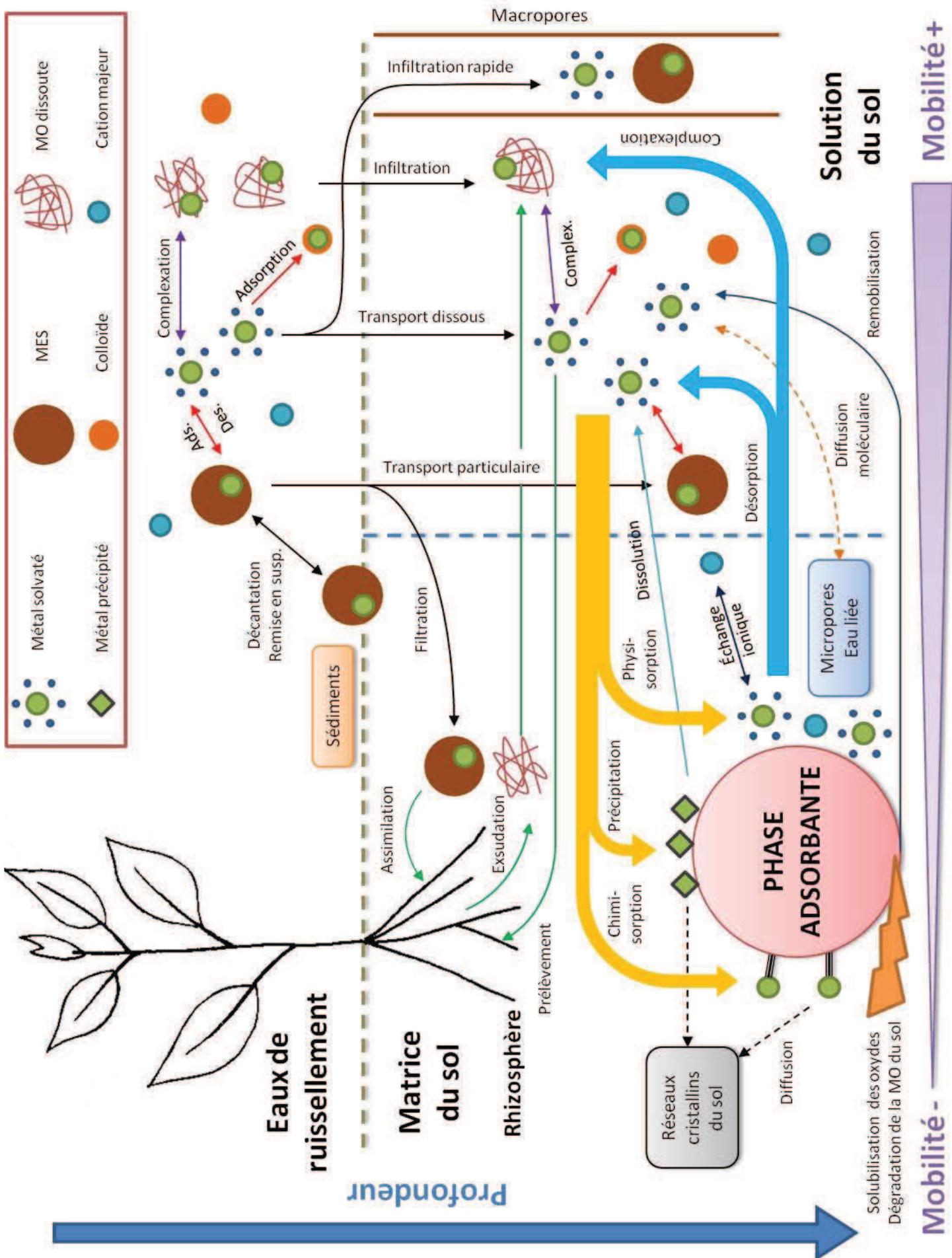


# Plan de la présentation

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles



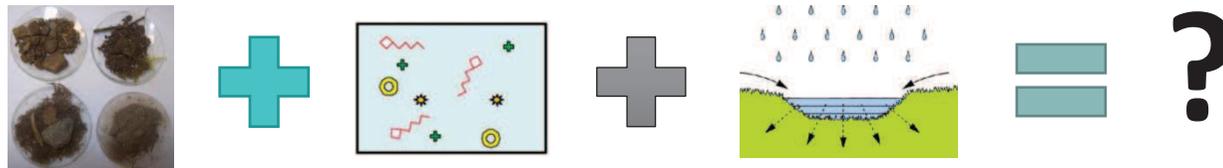




**Mobilité+** ————— **Mobilité-**

# Plan de la présentation

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles



# Présentation d'un site d'étude



## Analyse pédologique



Horizon organique sombre, d'épaisseur variable

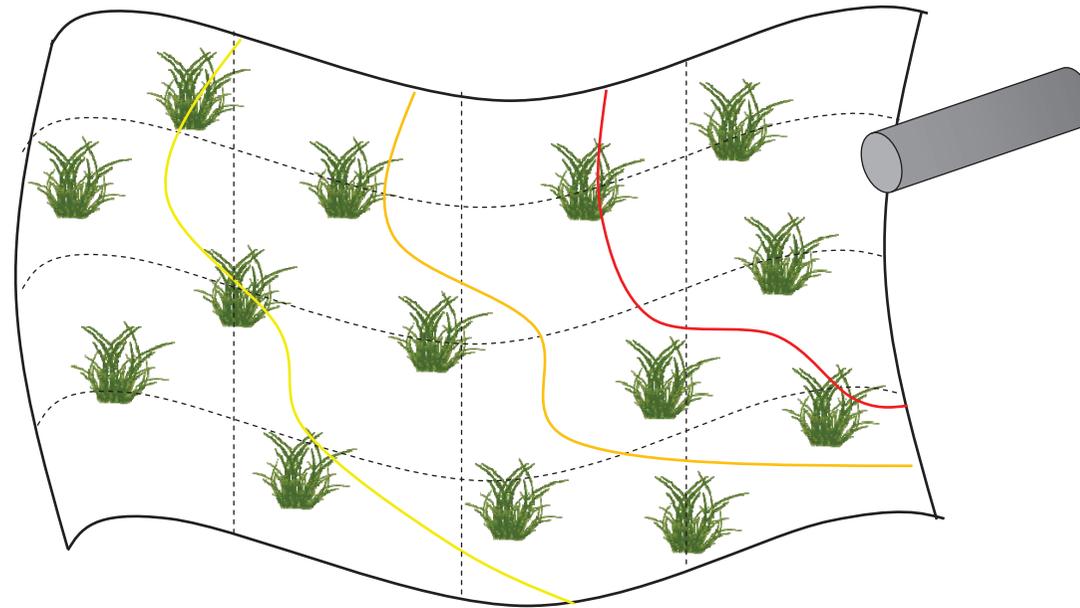
Zone de transition +/- marquée

Horizon argilo-sableux, non carbonaté, avec des éléments grossiers (5%). Très humide avec présence de taches de réduction  
⇒ stagnation de l'eau

Horizon plus argileux, carbonaté, absence de sable. Densité de cailloux ↗

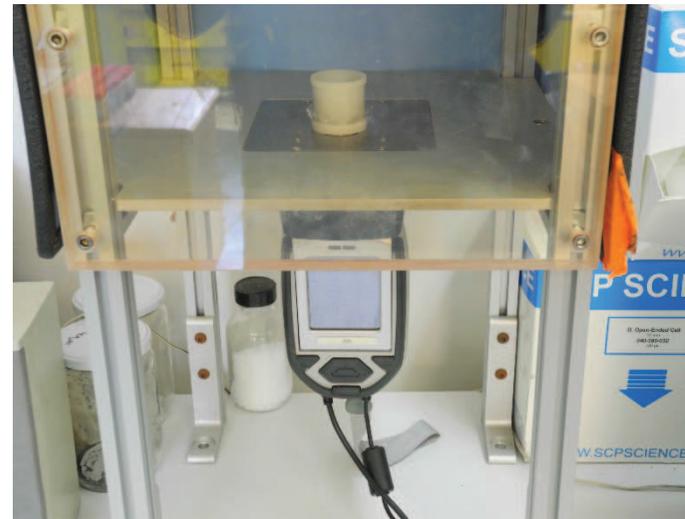


## Méthodologie



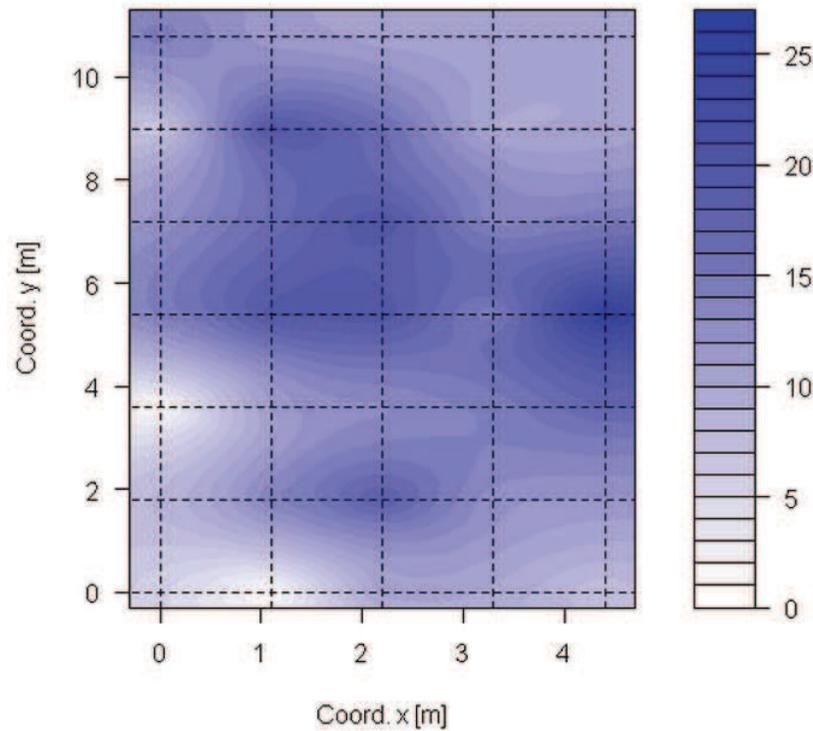
Selon un maillage régulier, **cartographie**

- des teneurs métalliques en surface (échantillonnage + Fluo-X)
- de l'humidité du sol (sonde TDR)
- de l'épaisseur de la couche organique
- du taux de matières volatiles (calcination)

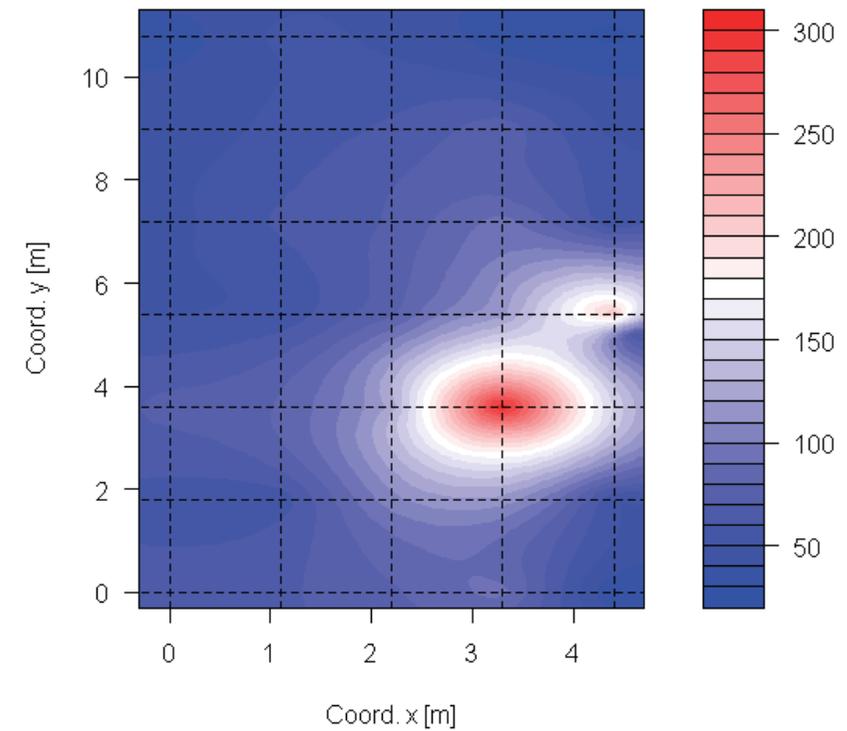


## Résultats

Différence de teneur en eau (J. pluvieux - J. sec)

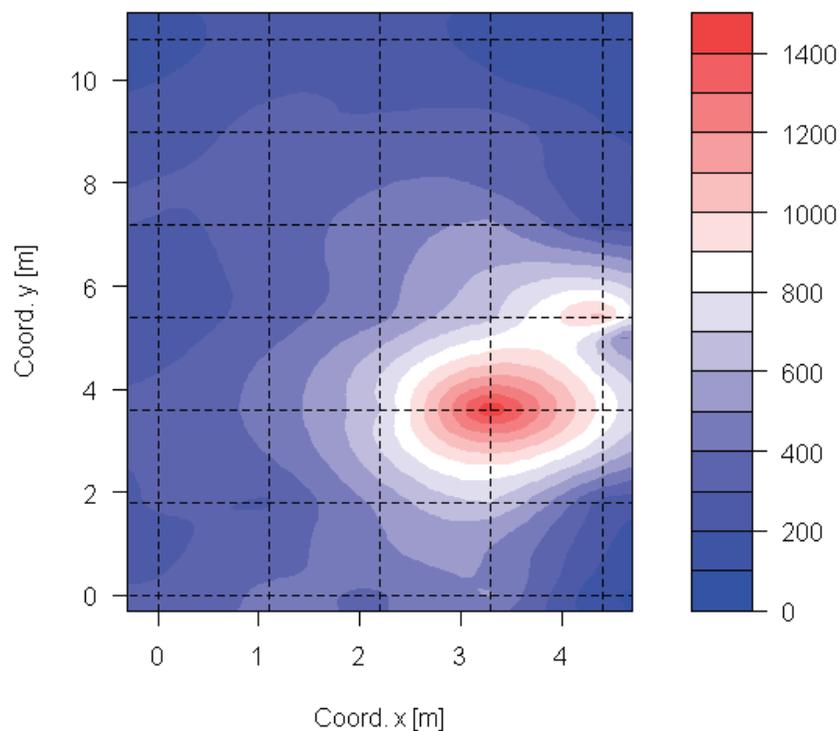


Répartition spatiale des teneurs en Cu [mg/kg]

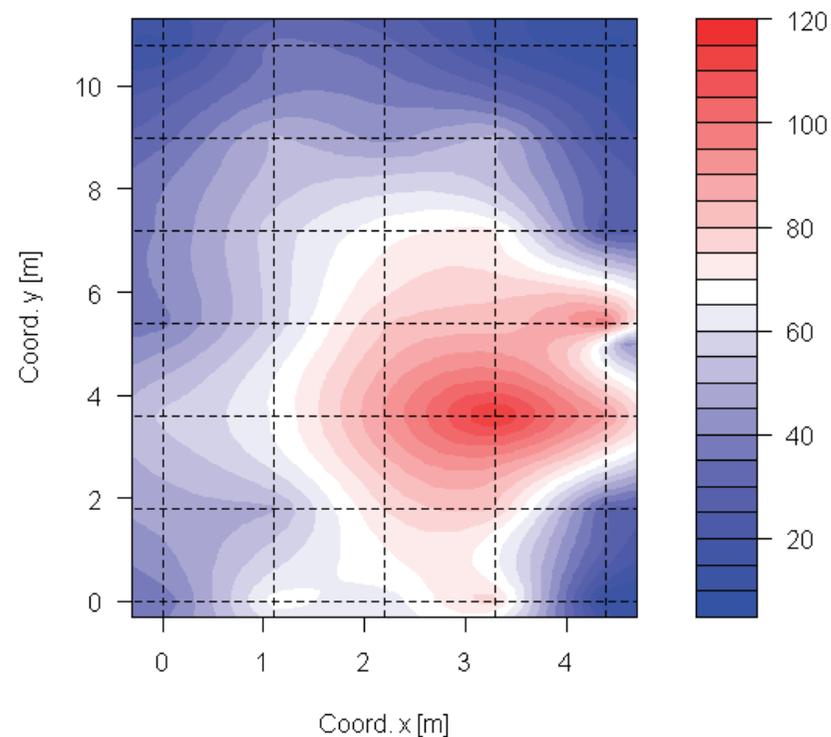


## Résultats

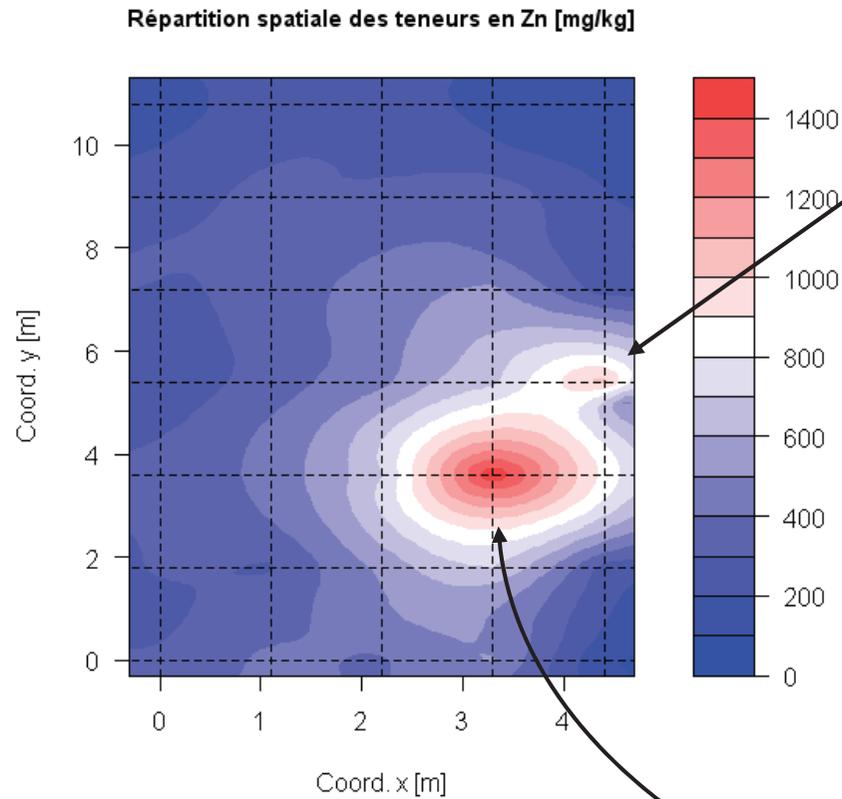
Répartition spatiale des teneurs en Zn [mg/kg]



Répartition spatiale des teneurs en Pb [mg/kg]

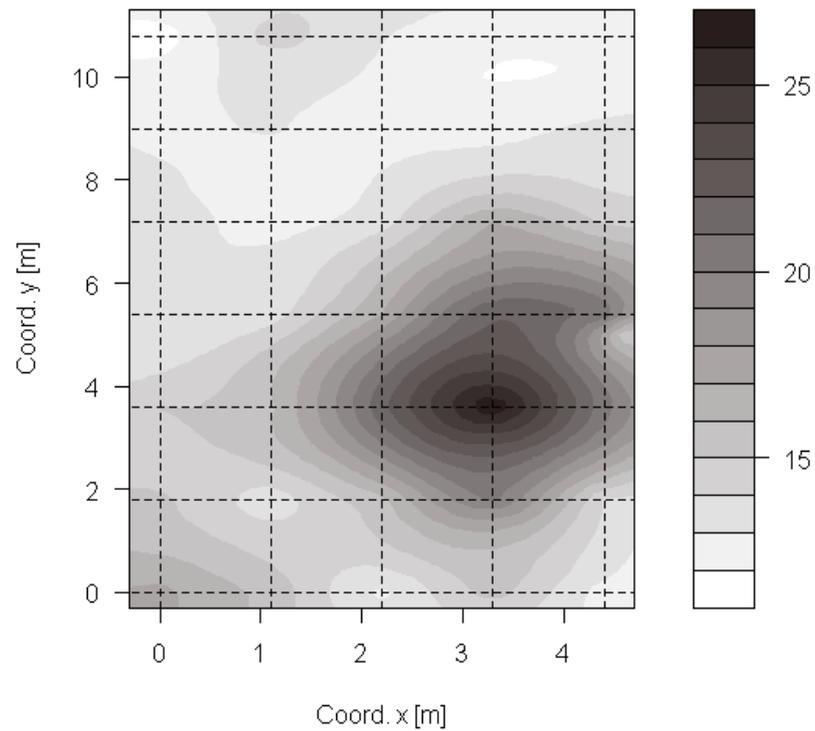


## Résultats

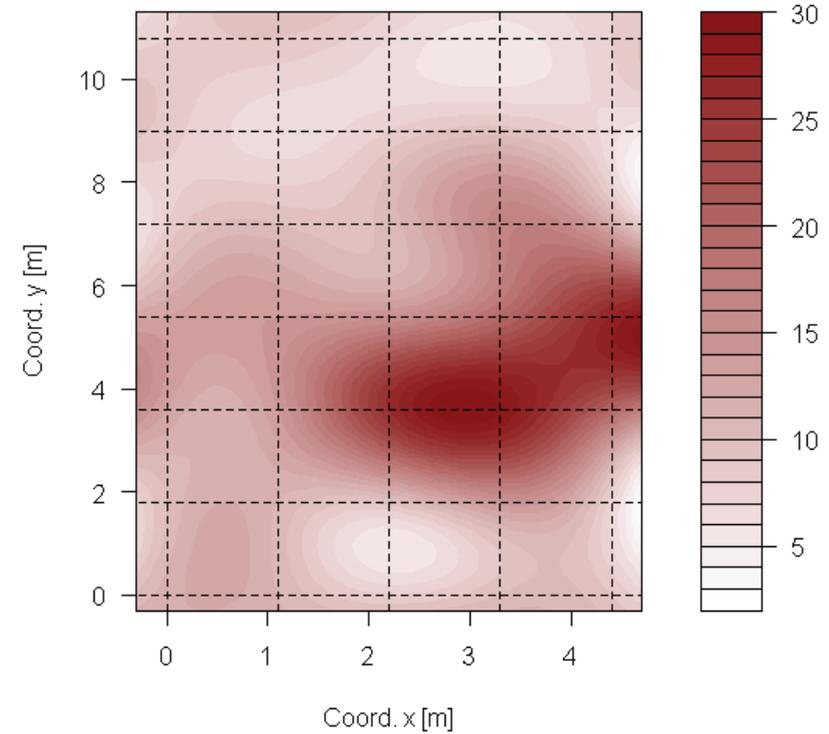


## Résultats

Répartition spatiale du taux de MV [%]

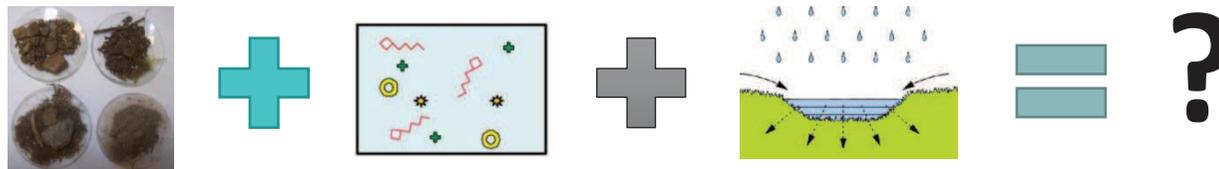


Épaisseur de la couche sombre en surface [cm]

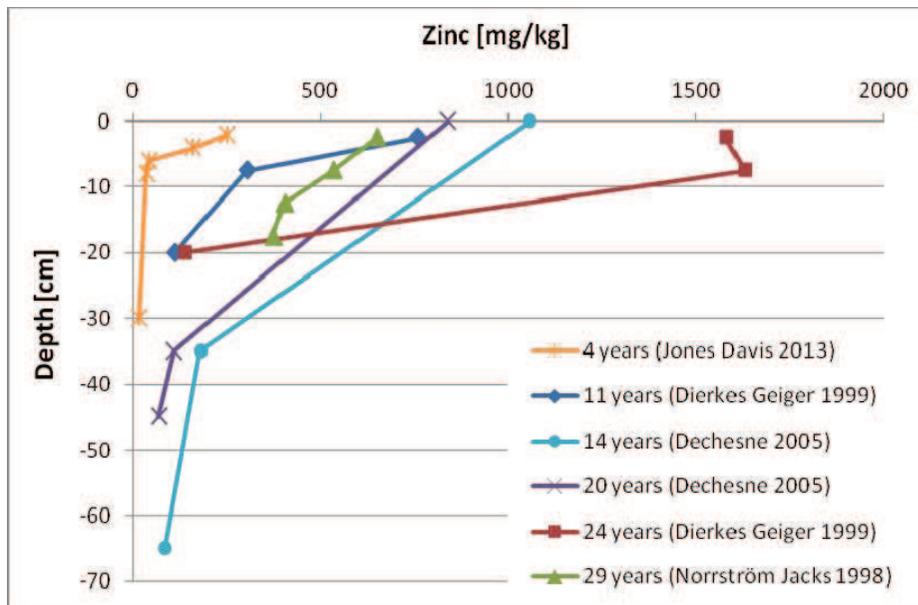
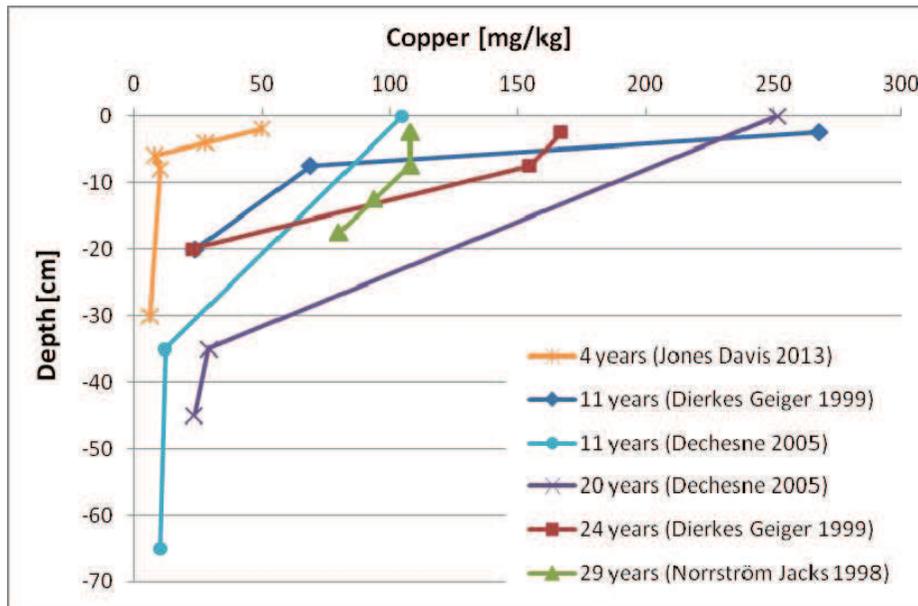


# Plan de la présentation

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles

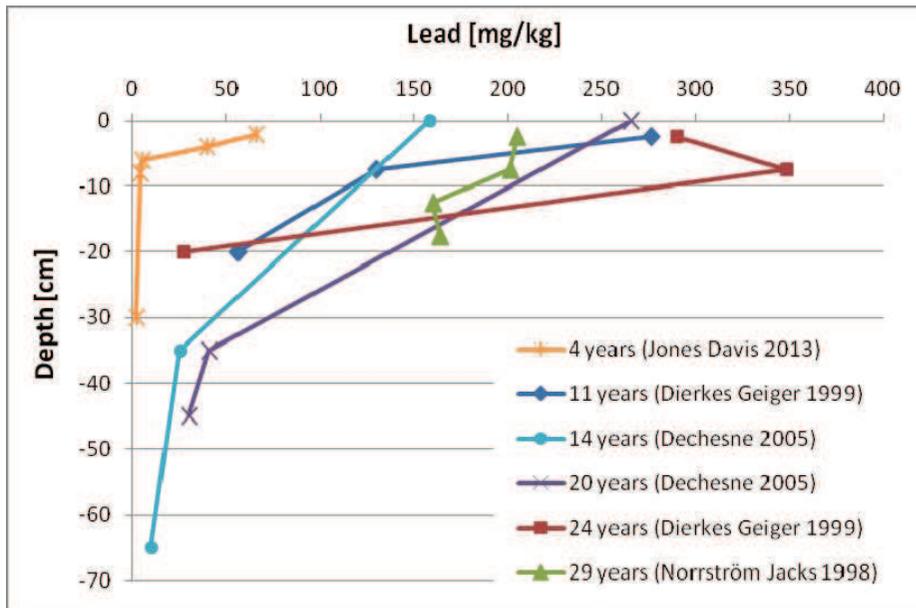


# Répartition verticale des contaminants

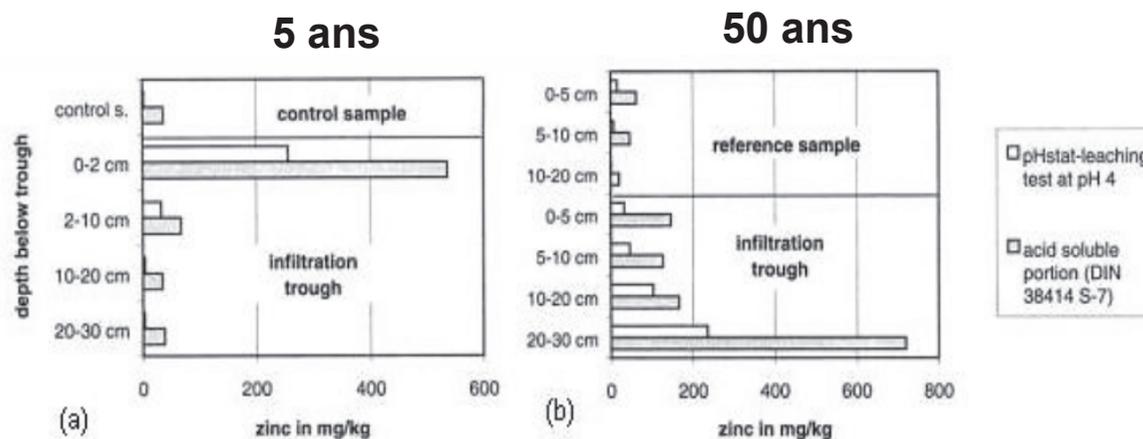


- **Accumulation** des contaminants dans la couche de surface
- **Décroissance** des concentrations avec la profondeur
- Tendances similaires pour les trois métaux
- Une zone de **fort gradient** sépare l'horizon contaminé de la zone non-contaminée
- **Absence de corrélation** entre les teneurs de surface et l'âge de l'ouvrage

# Répartition verticale des contaminants



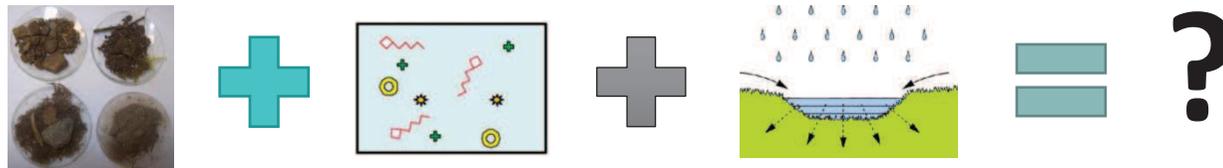
- **Uniformisation** des concentrations avec le temps
- **Épuisement progressif** des capacités d'adsorption du sol
- **Migration** du « front » de contamination
- Des situations extrêmes...



Remmler et Hütter, 2001

# Plan de la présentation

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles



## Mise en œuvre sous HYDRUS-1D

3 modules couplés :

- Hydrodynamique
- Transport
- Physico-chimie



$$ETR = \alpha(h) \times ETP$$

Surverse  
(éventuelle)

Hauteur  $h$

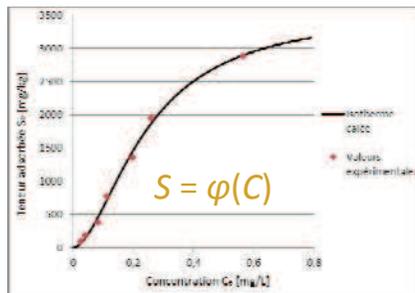
Pluie  $\times S_{active}/S_{ouvrage}$   
Concentration  $C_0(t)$

Mélange

Paramètres hydrodynamiques

$$K_s, \theta_s, \theta_r, b, h_0$$

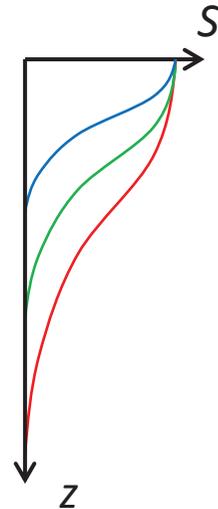
Paramètres physico-chimiques



Épaisseur ?

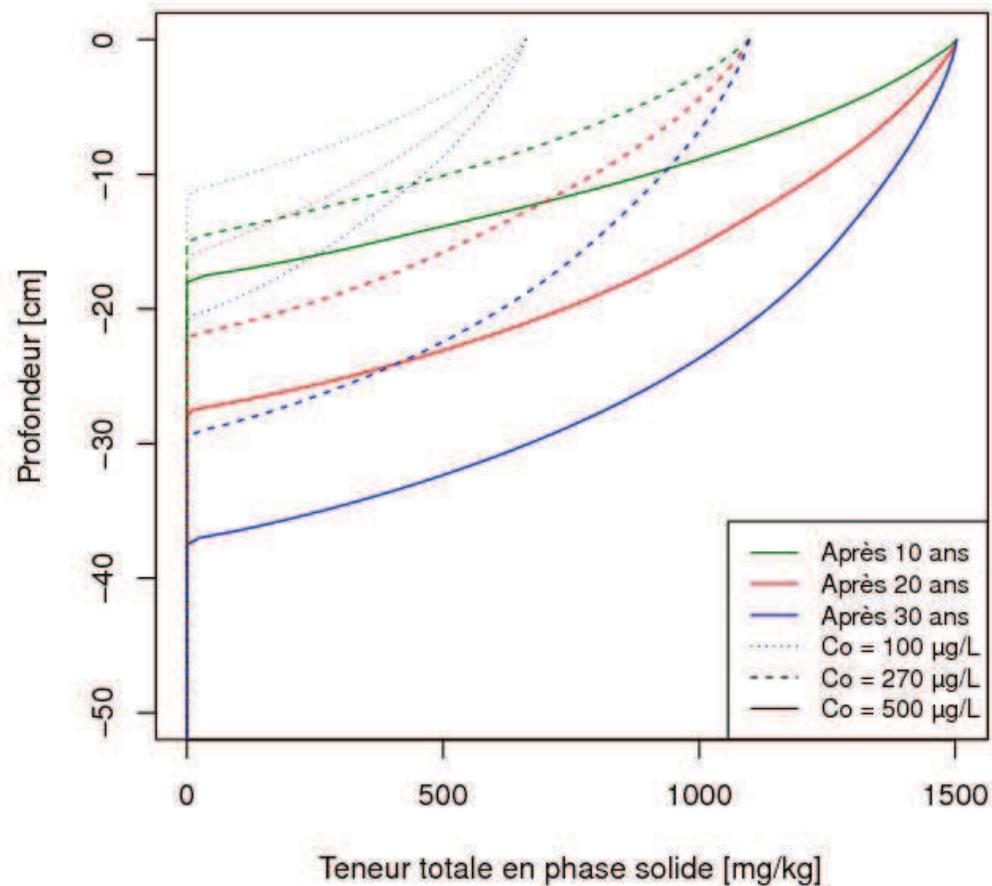
Flux exportés

?

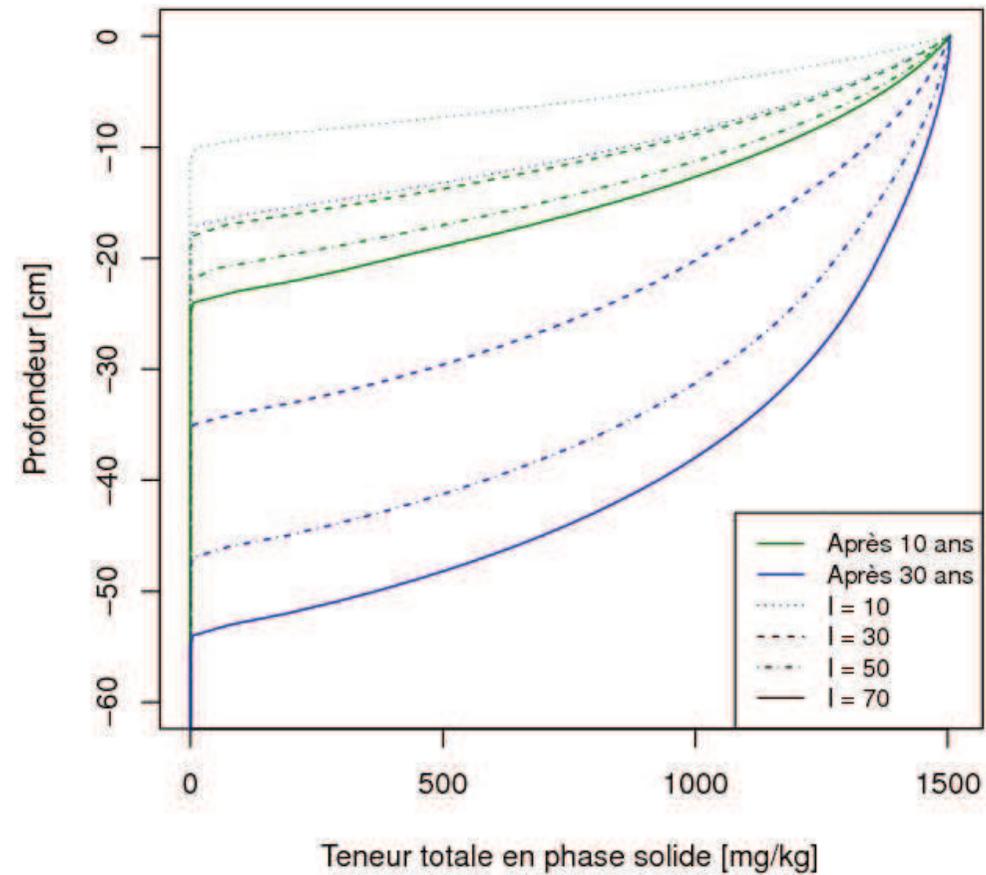


# Modélisation

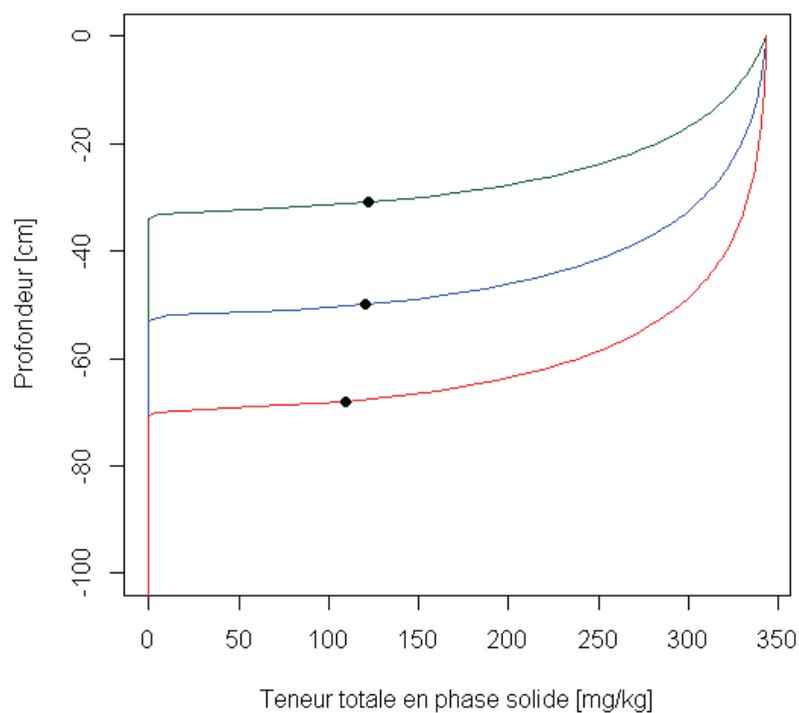
## 1) Importance du niveau de **concentration** dans les eaux de ruissellement



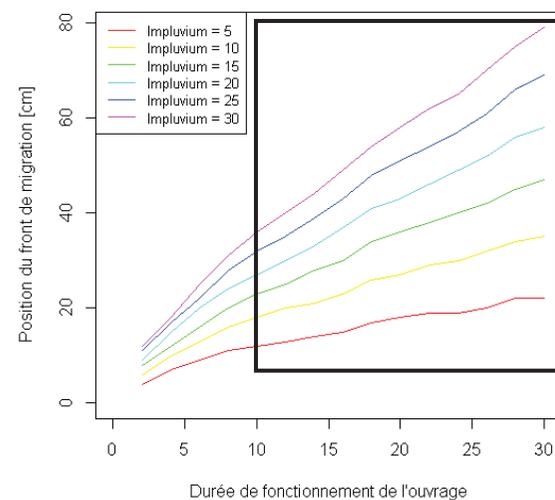
## 2) Importance du niveau de sollicitation hydrologique (ratio $S_{\text{active}}/S_{\text{ouvrage}}$ )



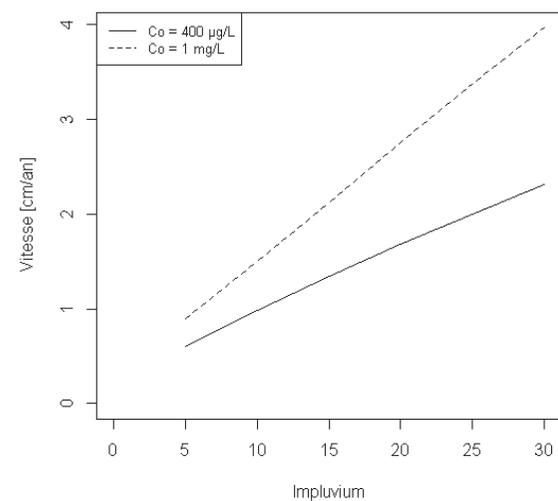
Position du front de migration de Zn



Progression du front de migration de Zn, Co = 400 µg/L

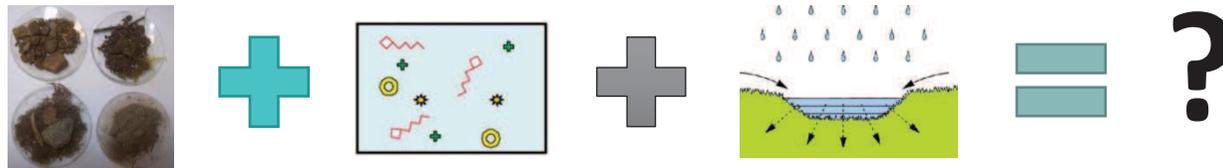


Vitesse de progression du front de migration



# Plan de la présentation

- Méthodologie générale de la thèse
- Que comprend-on des phénomènes mis en jeu dans les sols ?
- Comment se répartissent les contaminants à la surface d'un ouvrage d'infiltration ?
- Qu'est-ce qui cause la migration des contaminants en profondeur ?
- Quels enseignements tire-t-on des simulations numériques ?
- Perspectives futures & déclinaisons opérationnelles



- Le sol, puits ou source de contaminants ? Cela dépend
  - ...de sa constitution et de ses propriétés physico-chimiques
  - ...des phénomènes mis en jeu
  - ...de la composition du ruissellement
  
- Potentiellement, une forte accumulation de contaminants dans la couche de surface
  
- « Migration verticale » des polluants :
  - Saturation des couches de surface
  - Déplacement lié au mouvement de l'eau dans les macropores
  - Remobilisation possible
  
- La répartition des polluants dans un ouvrage est avant tout liée à son fonctionnement hydrologique
  
- Importance des niveaux de concentration et de la sollicitation hydrologique dans la vitesse de migration

- Deuxième phase du volet expérimental : investigations verticales et caractérisation approfondie
- Détermination de profils de concentrations (métaux, HAP) et de paramètres pédologiques
- Données de validation pour les modèles
- Nécessité de prendre en compte des zones d'infiltration différenciée dans la modélisation
- Analyse fréquentielle de l'infiltration et couplage au modèle unidimensionnel  $\Rightarrow$  gain en réalisme
- Conclusions du travail : recommandations
  - Avant-projet : l'infiltration des eaux de ruissellement est-elle pertinente compte tenu du contexte (urbain, pédologique) ?
  - Au bout de combien de temps dépasse-t-on des seuils critiques ?
  - Maintenance : comment limiter les transferts ?

# Conclusions et perspectives



# Conclusions et perspectives



A photograph of a stone retaining wall and a stream in a wooded area. The wall is made of stacked stones and runs across the middle of the frame. A stream flows through a concrete channel in the wall. The background is a dense forest of green trees under a cloudy sky. The foreground shows grass and more stone walls.

Merci pour votre attention

Des questions ?



URBIS



## ROULÉPUR

Solutions innovantes pour une maîtrise à la source de la contamination en micropolluants des eaux de ruissellement des voiries et parkings urbains

EPOC



MC Gromaire (coordinatrice, LEESU)

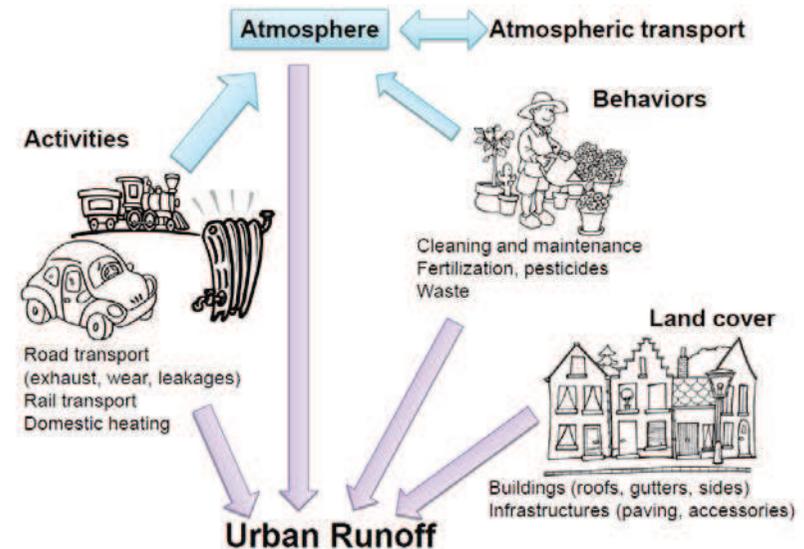
AP – Innovations et changements de pratiques:  
Lutte contre les micropolluants des eaux urbaines  
MEDDE – ONEMA – Agences de l'Eau



# ROULÉPUR - problématique



- Le ruissellement urbain :  
une source diffuse de micropolluants  
... partiellement diagnostiquée  
...Et encore mal maîtrisée



- Nécessité de gérer cette contamination au plus près de la source
  - Capacité limitée de traitement à l'aval
  - Le transport en réseau est une source de sur-contamination
  - Tous les ruissellements n'ont pas besoin d'un traitement poussé
    - Évacuer localement les eaux peu contaminées
    - Traiter spécifique des volumes restreints d'eaux très contaminées

# ROULÉPUR - problématique

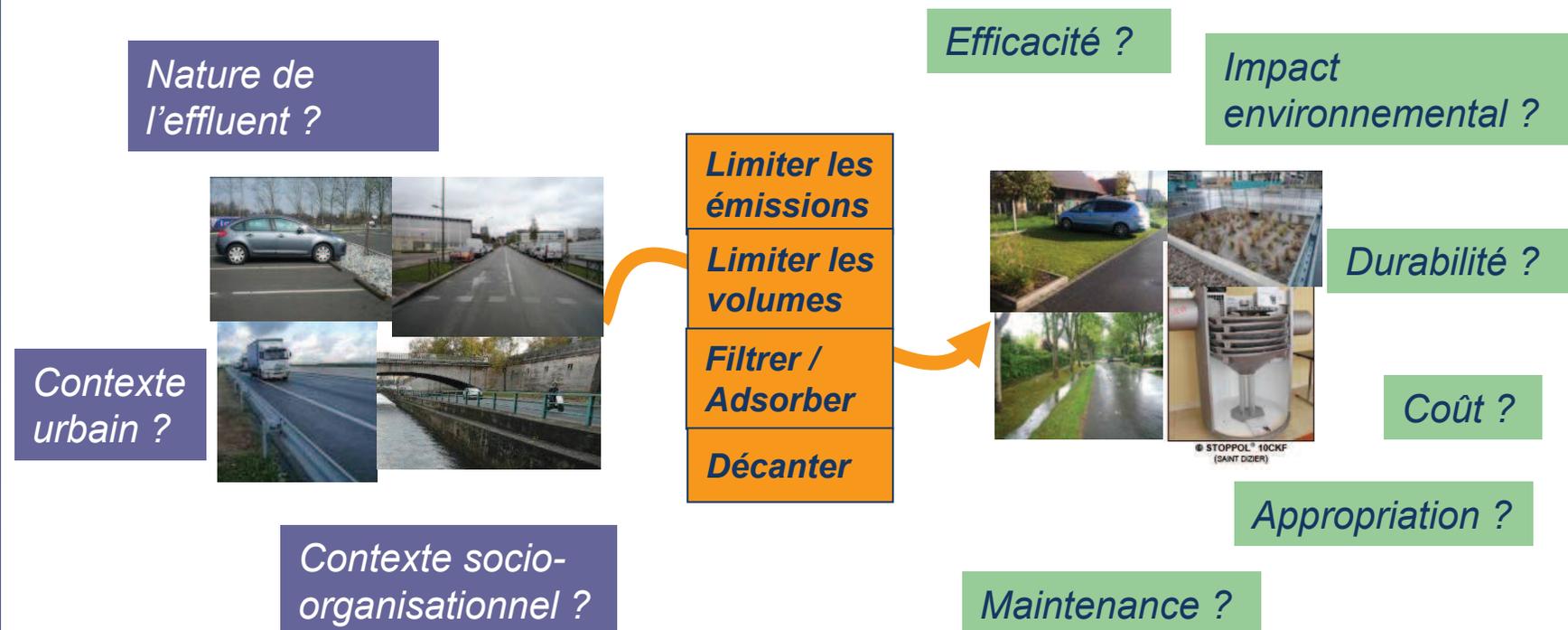


- Cas des eaux de ruissellement des espaces circulés (voirie, parking)
  - Un matrice complexe
    - Métaux, HAP bien documentés
    - Autres polluants prioritaires ou émergents?
  - Niveaux de contamination variables suivant le site modéré... à très élevé
  - Nature des contaminants variable

# ROULÉPUR - problématique



- Maîtrise de la pollution diffuse issue des eaux de ruissellement des voiries, parking  
⇒ Adapter les solutions de gestion



# ROULÉPUR - objectifs



- Solutions innovantes de **maîtrise à la source** des flux de **micropolluants** des **voiries** urbaines
  - **Diagnostiquer** la **composition** des eaux et leur toxicité, mieux identifier les **sources** primaires
  - **Évaluer in-situ l'efficacité** (hydrologie, chimie et écotox) de plusieurs solutions innovantes de traitement de technicités différentes, ainsi que leur **durabilité** (maintenance, vieillissement)
  - Analyser la **performance environnementale globale** sur l'ensemble du cycle de vie (ACV)
  - Évaluer les **conditions d'appropriation des solutions** (sociale, technique et économique) ⇒ potentiel de diffusion en fonction du contexte local

# ROULÉPUR - objectifs



- **Principe des solutions innovantes testées :**
  - Gestion à la source des eaux de ruissellement urbaines de voirie / parking
    - Avec ou sans composante **infiltration** / évapotranspiration
    - Visant la **filtration / adsorption** des micropolluants,
  - Innovant par rapports aux pratiques usuelles de gestion des eaux de voirie en France
  - Niveaux de technicité différents, adaptées à des contextes urbains différents

# ROULÉPUR – sites d'études



- 4 sites en IdF, avec des contextes différents

Potentiel  
polluant  
croissant



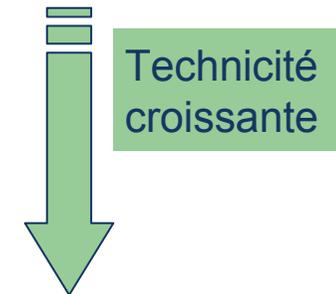
- Villeneuve le Roi, parking résidentiel
- Rosny sous Bois, rue à trafic modéré
- Compans, RD212
- Paris, voie George Pompidou



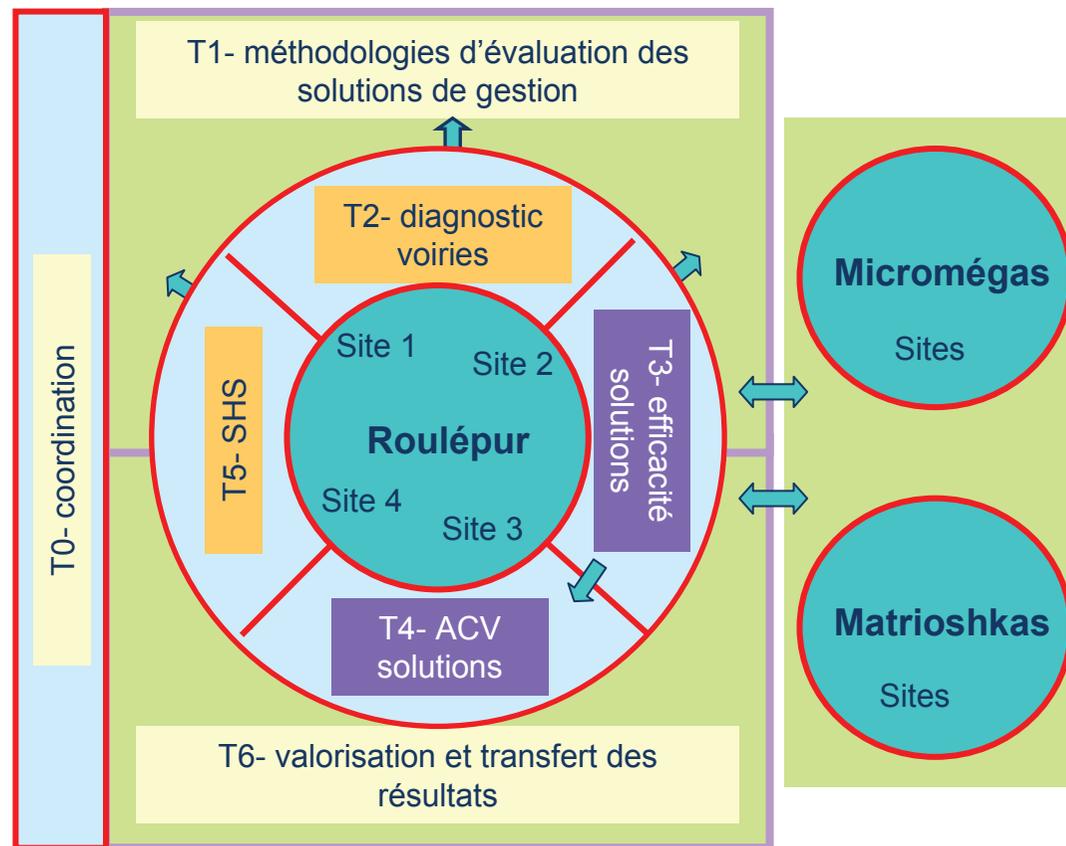
# ROULÉPUR - Solutions testées



- 4 Solutions de technicités différentes
- Tests d'innovations technologiques sur 2 des solutions
  - Bandes enherbées + fossés filtrants / infiltrants
  - Parking perméable filtrant (Ecovégétal)
  - Filtres plantés horizontaux non infiltrants
  - Dispositif compact de décantation / filtration / adsorption (STOPPOL10CKF)



# ROULÉPUR - Organisation du projet





- Tâche 2: diagnostic des eaux
  - Screening ciblé (pistes: composés réglementés peu documentés : PBDE, DEHP, organo-étains, nickel, HBCDD, PFOS, Composés non réglementés : benzotriazoles, tétrabromobisphénol A, platinoïdes, benzophénones)
  - Screening non ciblé
  - Toxicité
- Tâche 3: efficacité des solutions techniques
  - Paramètres globaux: MES, COP, COD, N, P, éléments majeurs, HC totaux
  - Micropolluants: 12 métaux, HAP, alkylphénols, bisphénolA, phtalates
  - Toxicité

# Analyse de l'appropriation sociale et technique des solutions innovantes



- Analyse des « conditions d'appropriation » des dispositifs innovants
  - impact sur le choix de la technique, son dimensionnement, sa gestion et son entretien.
  - Analyse de deux phases du processus d'innovation :
    - Adoption des dispositifs
    - Adaptation des dispositifs
- Focus sur le décalage entre l'« innovation conçue » et l'« innovation en usage »
- Méthodes: 4 études de cas
  - Réalisation d'entretiens semi-directifs :
    - (a) services techniques des collectivités,
    - (b) des industriels,
    - (c) des représentants des entreprises de BTP routes
    - (d) des experts de bureaux d'étude,
    - (e) des représentants d'associations de riverains et de protection de la nature
  - Analyse documentaire:
    - des documentations techniques relatives au produit,
    - des documents relatifs au projet (comptes-rendus réunions maîtrise d'ouvrage/maîtrise d'œuvre,
    - des documents liés à l'exploitation (carnets de vie, fiches d'intervention...)

## Consortium et rôle des partenaires



- Consortium:
  - Recherche: LEESU, CEREMA, UMR EPOC
  - Collectivités : CG77, CG93, Ville de Paris
  - Industriels: St Dizier, Ecovégétal
- + URBIS: tâche méthodologique commune avec projet MICROMEGAS et MATRIOCHKAS

Site 1

Site 2

Site 3

Site 4

Gestion site, mise à disposition installations

Ville de Paris

CG93

CG77

Ecovégétal

Definition méthodes expérimentales

Tous les partenaires

Campagnes de mesure hydrologie et prélèvements

Ville de Paris

CG93

LEESU  
Cerema

Ecovégétal  
Cerema

Tests *in-situ* d'évolutions technologiques

St Dizier

Ecovégétal

Tâche 2

LEESU  
Analyses chimiques et toxicologiques : LPTC + partenaires recherche externes au consortium et soustraction

Analyses chimiques  
Tâche 3

LEESU : alkyphénols, bisphénoIA, phtalates, paramètres globaux  
Cerema : HAP, nutriments  
St Dizier, via soustraction IFSTTAR : métaux

Exploitation résultats  
Tâche 3

Ville de Paris  
St Dizier  
LEESU

CG93  
LEESU

Cerema  
LEESU

Cerema  
Ecovégétal  
LEESU

Tâche 4  
Tâche 5

Cerema : réalisation ACV  
LEESU : analyses socio-techniques

Fourniture données

Ville de Paris  
St Dizier

CG93

CG77

Ecovégétal

Valorisation

Tous les partenaires