

# Rétention et transfert de polluants dans le sol de deux ouvrages d'infiltration des eaux pluviales

## Variabilité de la contamination de surface en éléments traces métalliques

**D. Tedoldi<sup>1</sup>, D. Pierlot<sup>2</sup>, P. Branchu<sup>3</sup>, Y. Kovacs<sup>2</sup>, O. Fouché<sup>1,4</sup>,  
P.-A. Lessault<sup>5</sup>, G. Chebbo<sup>1</sup>, and M.-C. Gromaire<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>LEESU

<sup>2</sup>SEPIA Conseils

<sup>3</sup>CEREMA

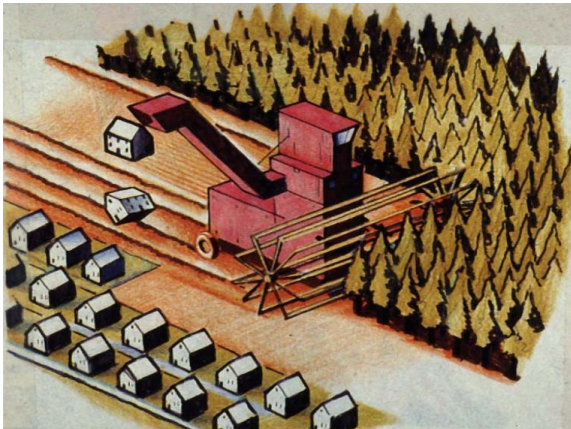
<sup>4</sup>CNAM

<sup>5</sup>Chambre d'agriculture de Seine-et-Marne



# 1 Éléments de contexte

- Étalement urbain  $\Rightarrow$  accroissement des volumes et débits à évacuer.
- Tendence grandissante à une **gestion intégrée** des eaux pluviales.
- Les avantages quantitatifs et le fonctionnement hydraulique des **ouvrages d'infiltration** sont désormais assez bien appréhendés...
- ...mais des incertitudes demeurent sur les aspects qualitatifs :
  - **Devenir des contaminants** dans le sol ?
  - Risques de **transferts** vers les eaux souterraines ?
- De nombreuses **questions opérationnelles** associées...



Andrew Potts & Michele Adams, 2003



Forez info, Saint-Etienne Métropole









## 2 Éléments de contexte





## 2 Éléments de contexte

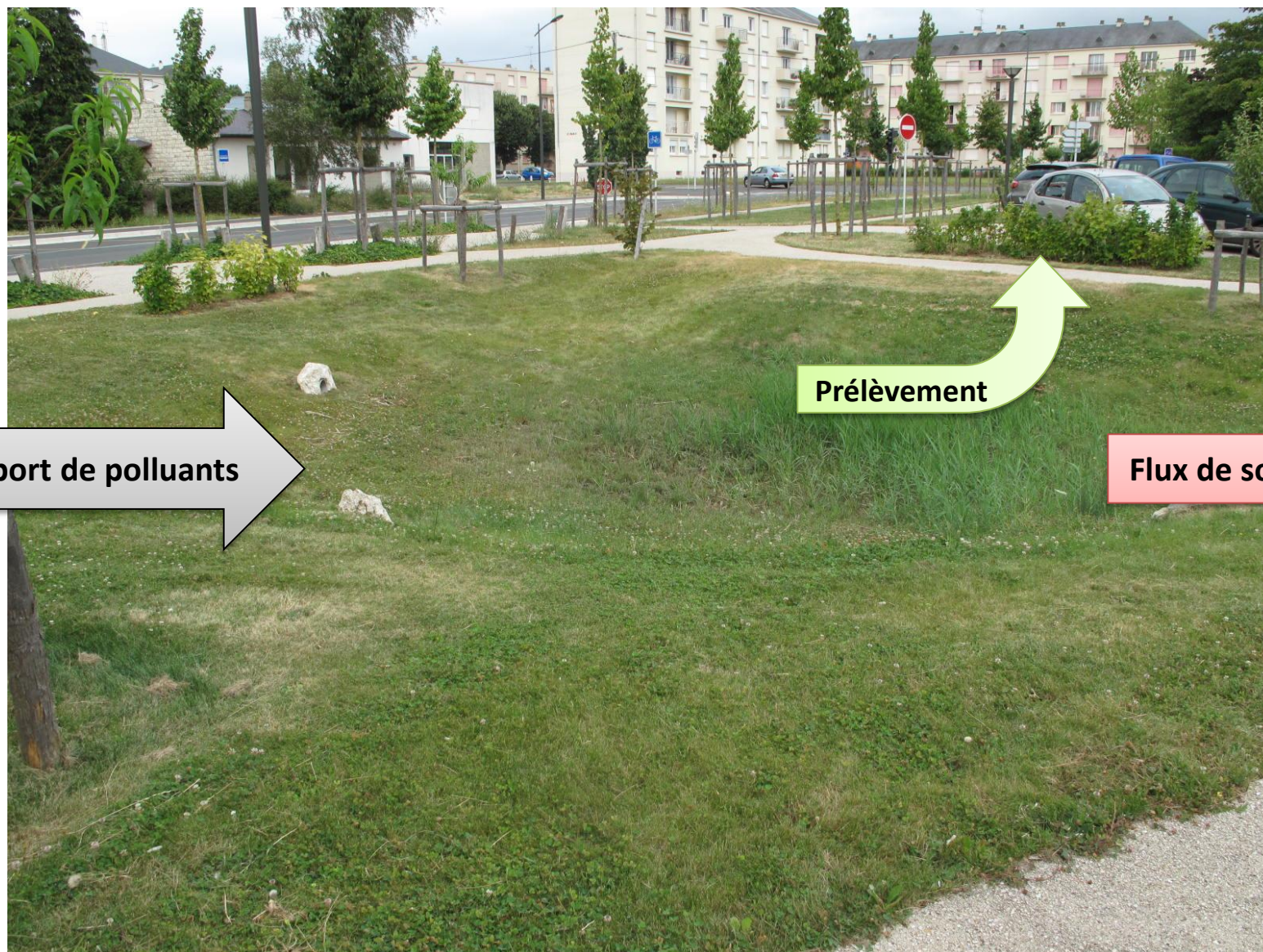


**Apport de polluants**

**Flux de sortie**



## 2 Éléments de contexte



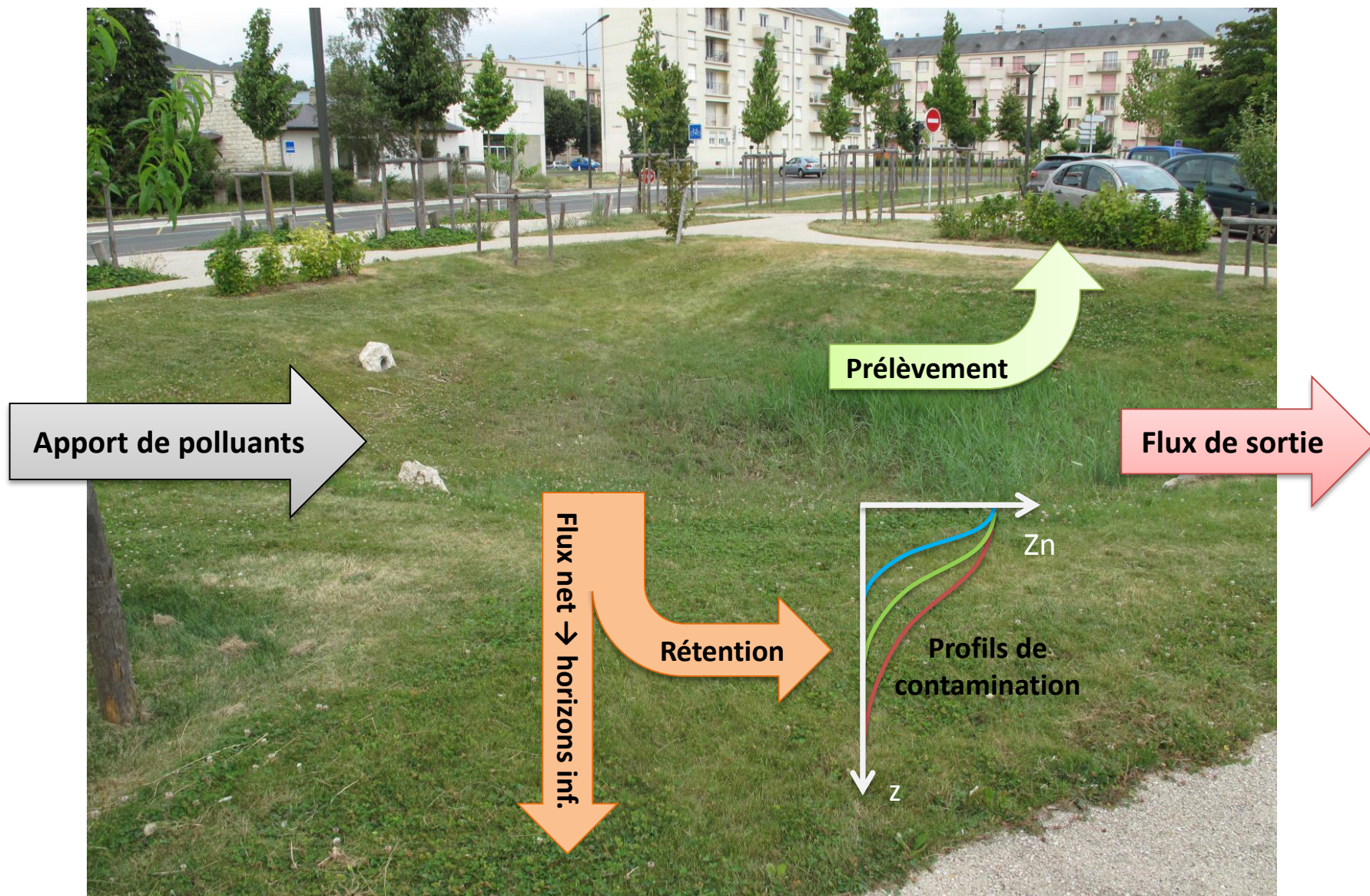
Apport de polluants

Prélèvement

Flux de sortie

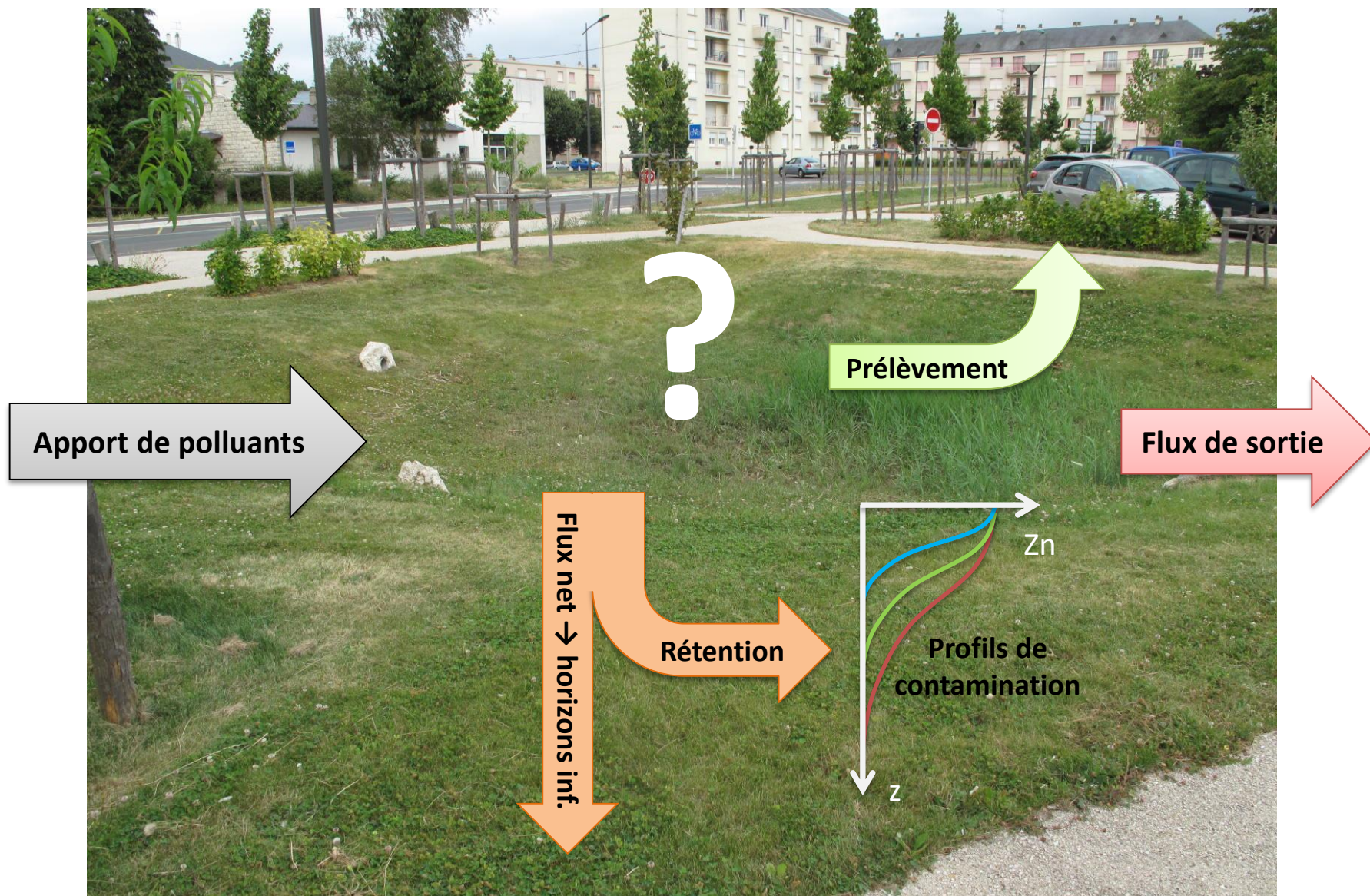


## 2 Éléments de contexte



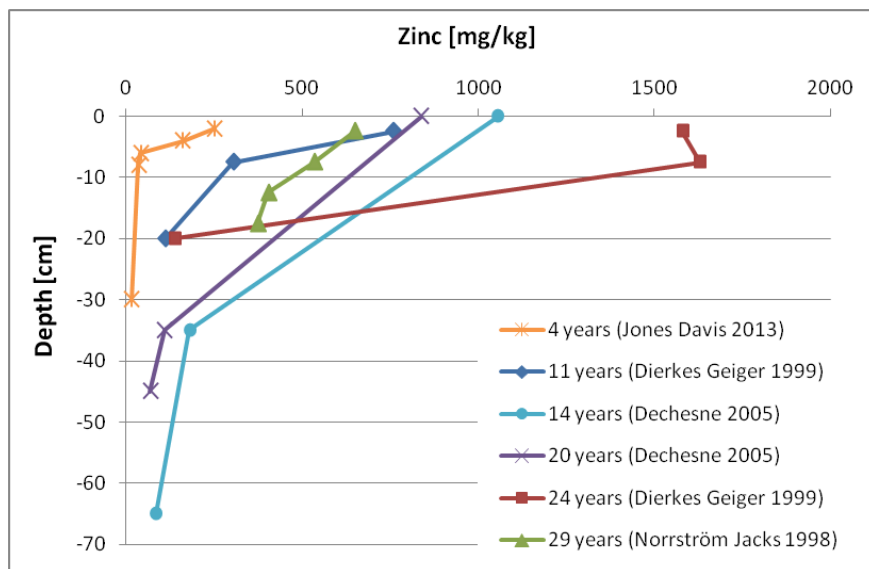


## 2 Éléments de contexte





### 3 État de l'art

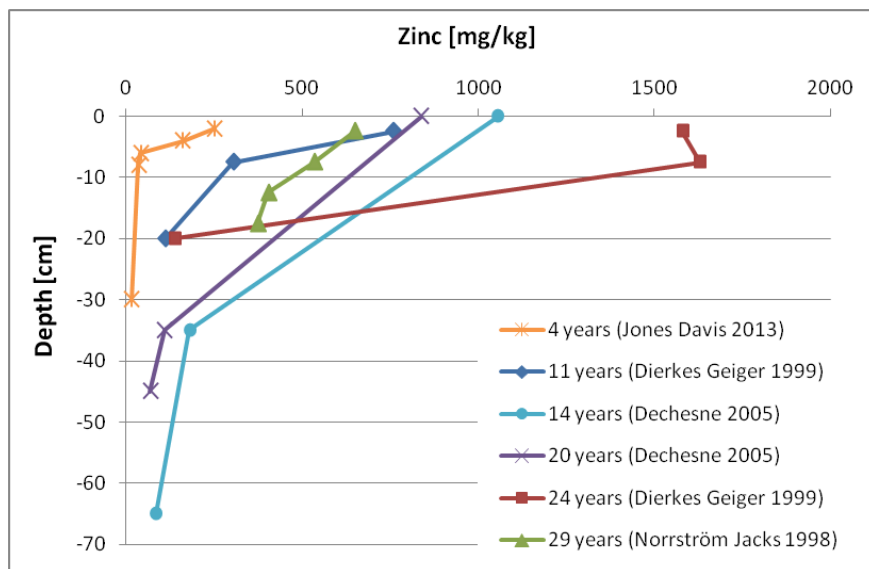


- Métaux traces (Cu, Pb, Zn...) = contaminants **conservatifs**
- **Accumulation** dans la couche de surface
- **Décroissance** des concentrations avec z

⇒ Perspectives intéressantes pour la **maîtrise** à court et moyen termes **des flux de polluants** ?

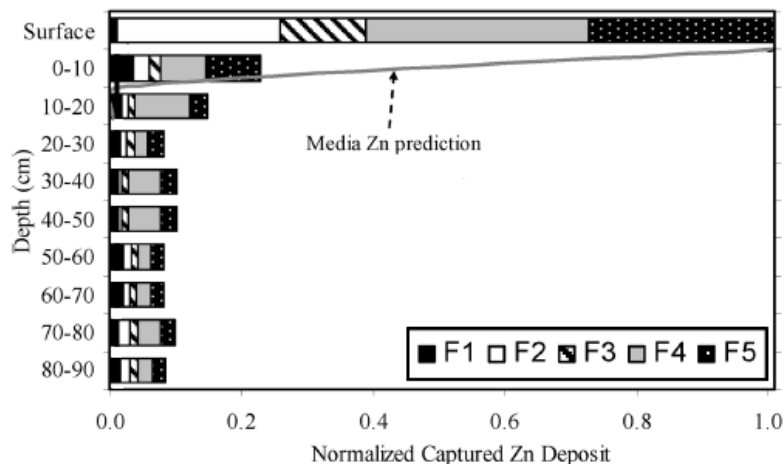


### 3 État de l'art



- Métaux traces (Cu, Pb, Zn...) = contaminants **conservatifs**
- **Accumulation** dans la couche de surface
- **Décroissance** des concentrations avec z

⇒ Perspectives intéressantes pour la **maîtrise** à court et moyen termes **des flux de polluants** ?



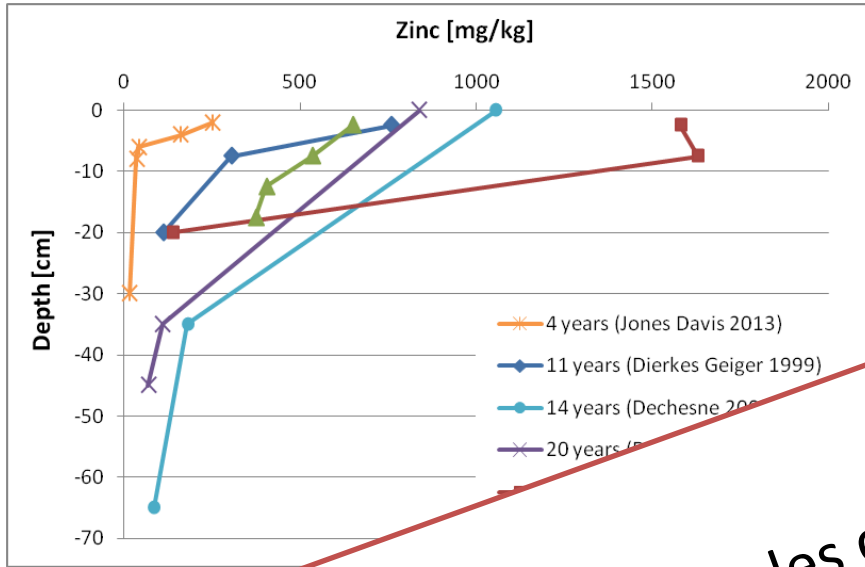
Li & Davis, 2008

- Tendance apparemment reproduite par les **modèles 1D** de transport réactif...
- Hypothèse usuelle : **uniformité des flux d'infiltration** à l'échelle d'un ouvrage

⇒ Possibilité d'utiliser ces modèles pour des **évaluations prospectives** ?



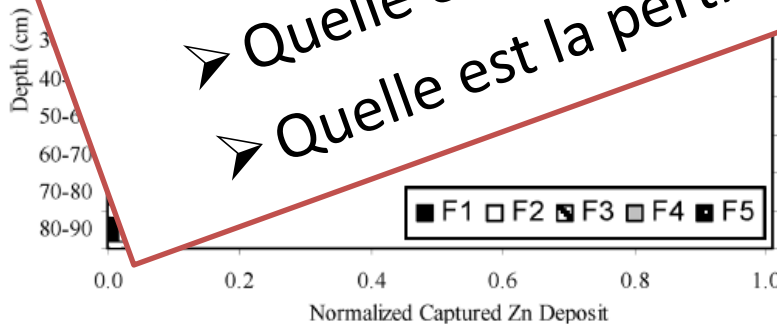
### 3 État de l'art



- Métaux traces (Cu, Pb, Zn...) = contaminants **conservatifs**
- **Accumulation** dans la surface
- **Décroissance** avec la profondeur

**Oui, mais...**

- Où ont été prélevées les carottes de sol ?
- Quelle est la représentativité des profils précédents ?
- Quelle est la pertinence des modèles unidimensionnels ?



- Hypothèse usuelle : **uniformité des flux d'infiltration** à l'échelle d'un ouvrage

⇒ Possibilité d'utiliser ces modèles pour des **évaluations prospectives** ?

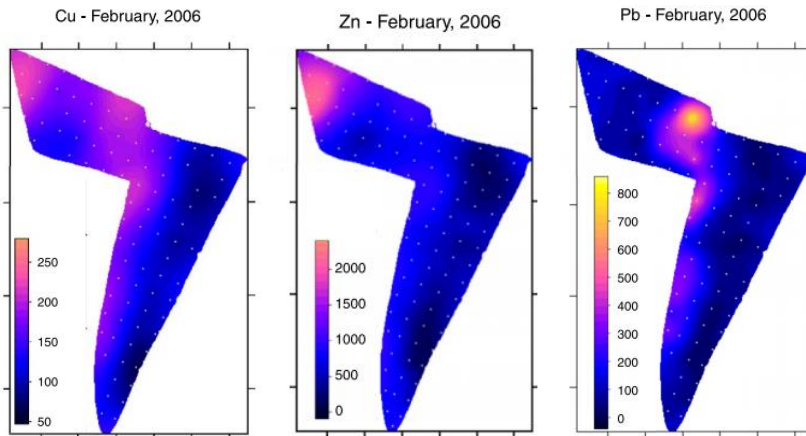


## 4 État de l'art

**Que sait-on de la variabilité « horizontale » de la contamination dans les ouvrages d'infiltration ?**



## Que sait-on de la variabilité « horizontale » de la contamination dans les ouvrages d'infiltration ?

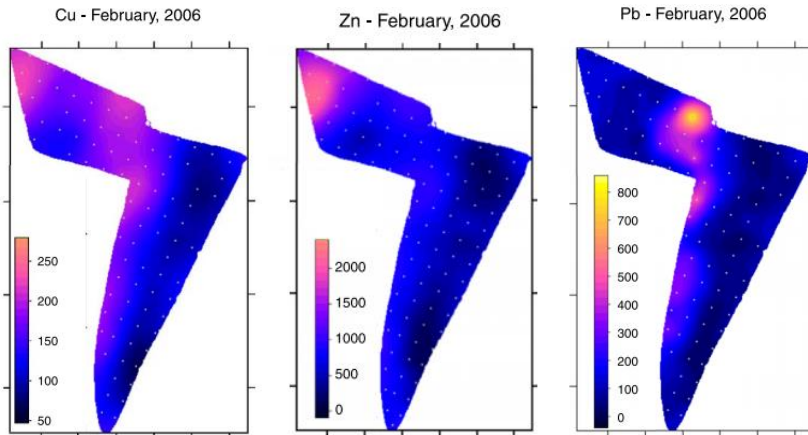


*Le Coustumer et al., 2007*

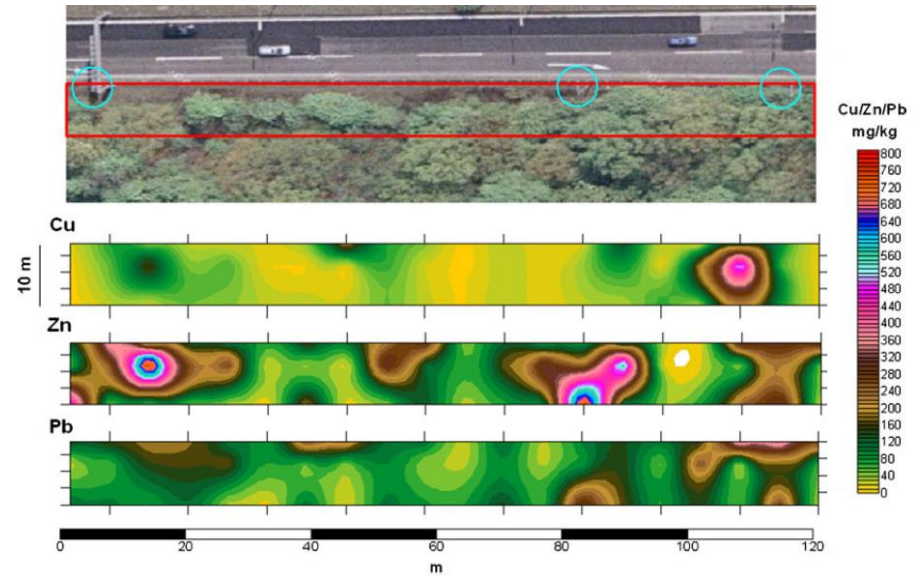


# 4 État de l'art

## Que sait-on de la variabilité « horizontale » de la contamination dans les ouvrages d'infiltration ?



Le Coustumer et al., 2007

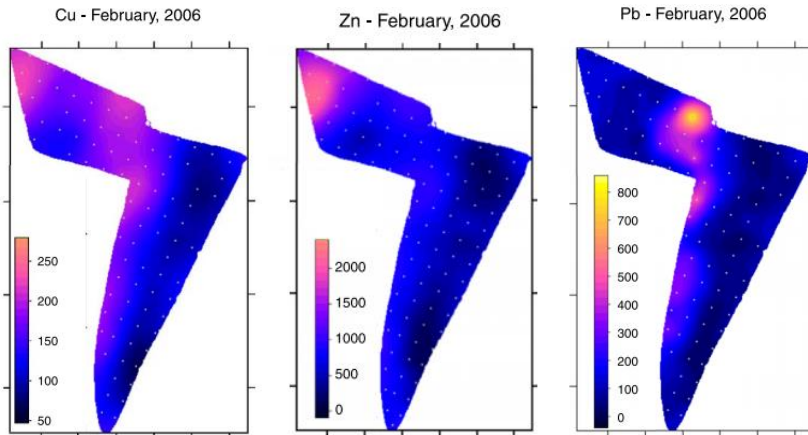


Kluge et Wessolek, 2012

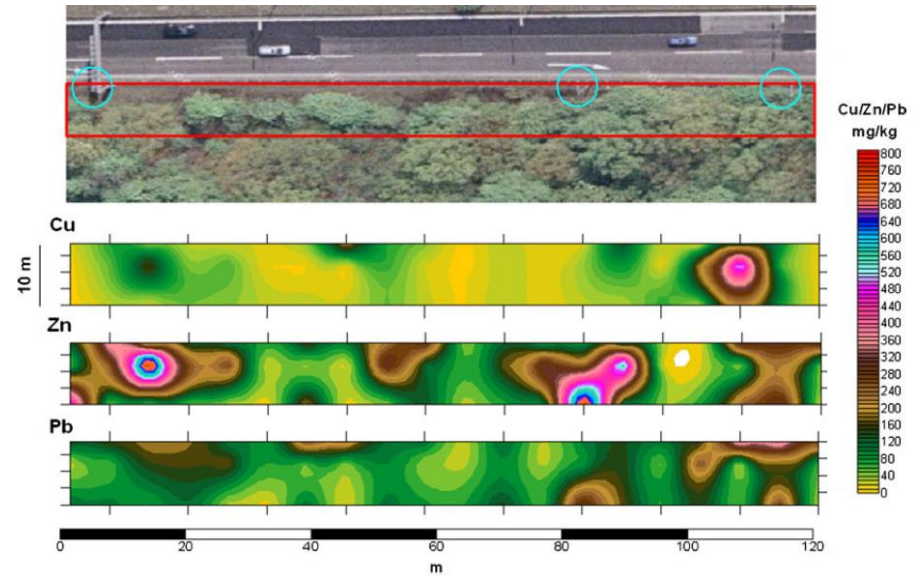


# 4 État de l'art

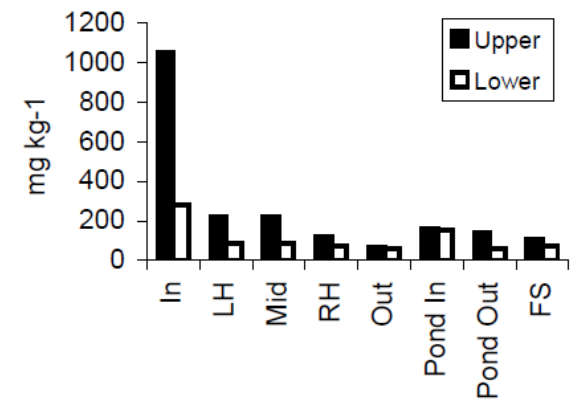
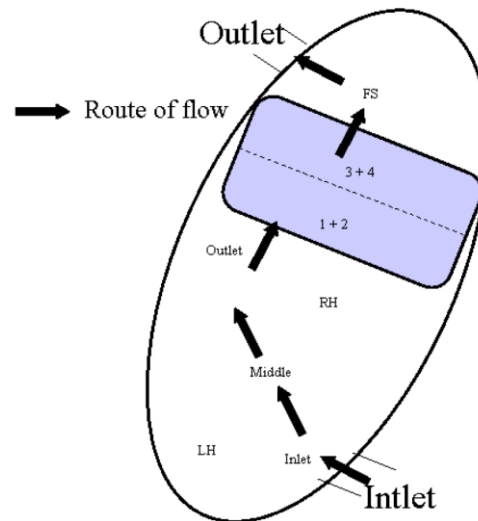
## Que sait-on de la variabilité « horizontale » de la contamination dans les ouvrages d'infiltration ?



*Le Coustumer et al., 2007*



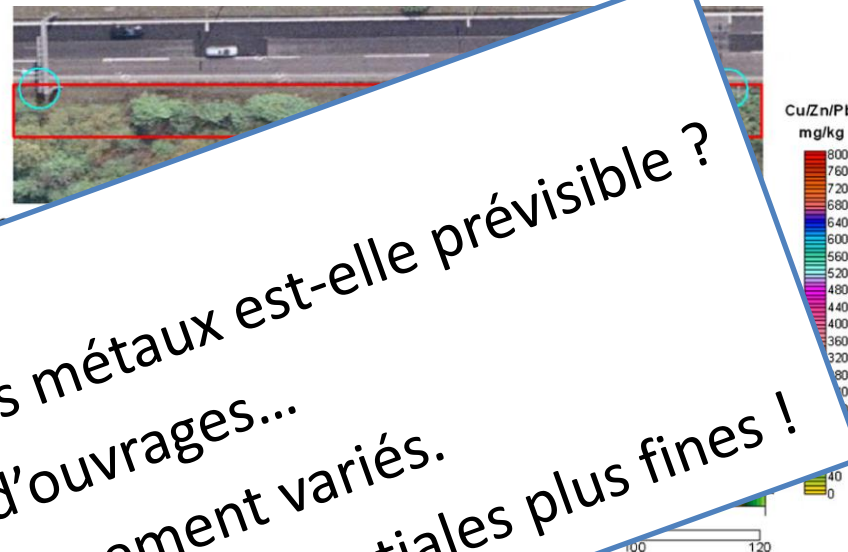
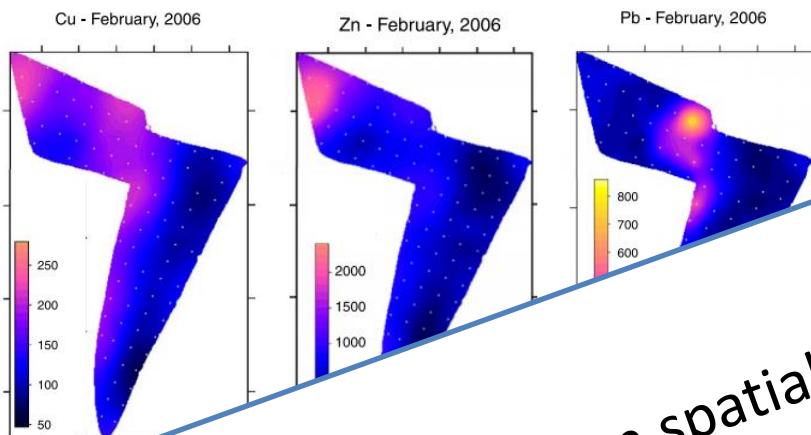
*Kluge et Wessolek, 2012*



*Napier et al., 2009*



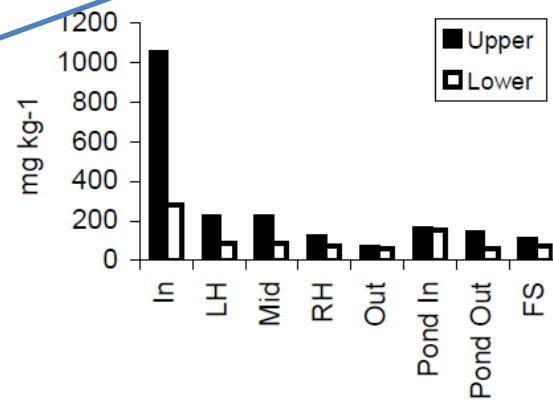
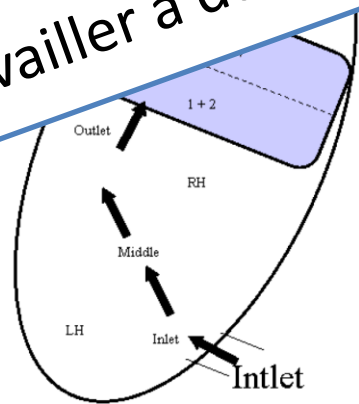
## Que sait-on de la variabilité « horizontale » de la contamination dans les ouvrages d'infiltration ?



**Oui, mais...**

- Cette distribution spatiale des métaux est-elle prévisible ?
- Besoin de caractériser plus d'ouvrages...
- ...avec des modes de fonctionnement variés.
- Nécessité de travailler à des échelles spatiales plus fines !

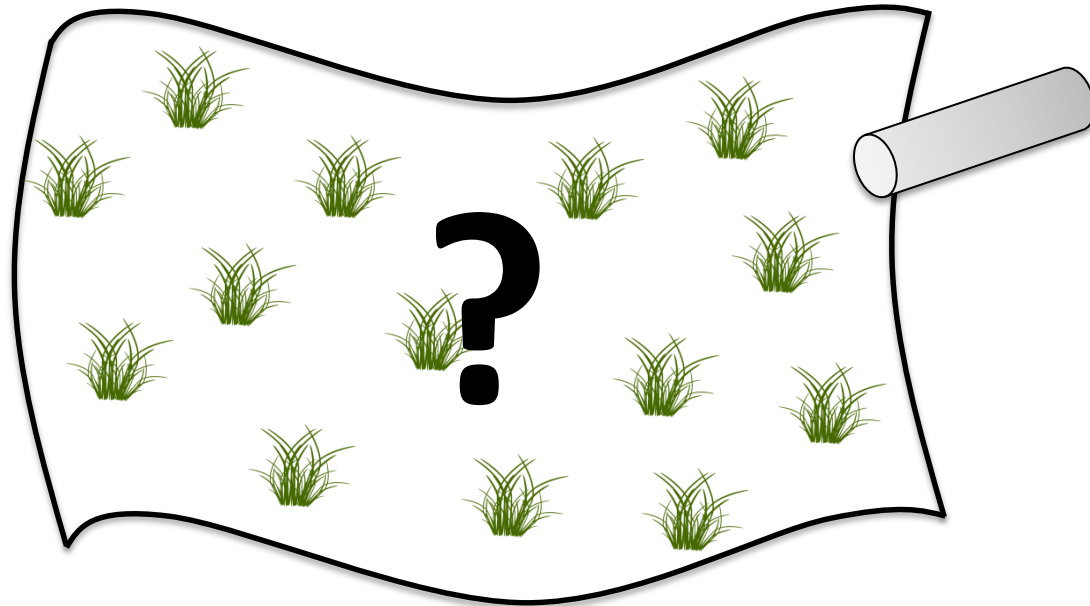
*Kluge et Wessolek, 2012*



*Napier et al., 2009*

## 5 Objectifs de l'étude

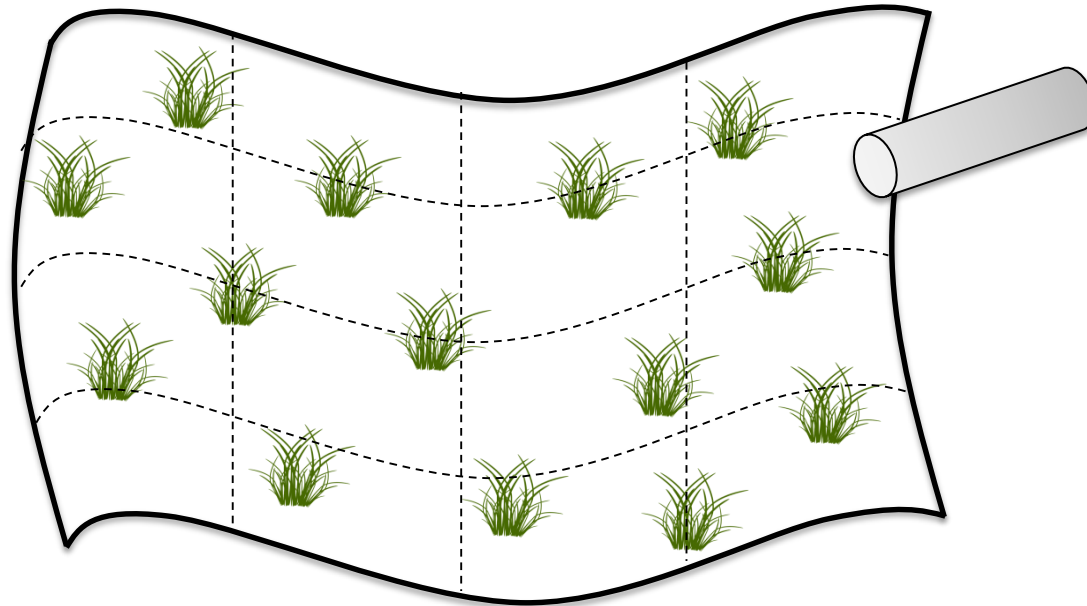
Sur une **diversité d'ouvrages** de gestion à l'amont





## 5 Objectifs de l'étude

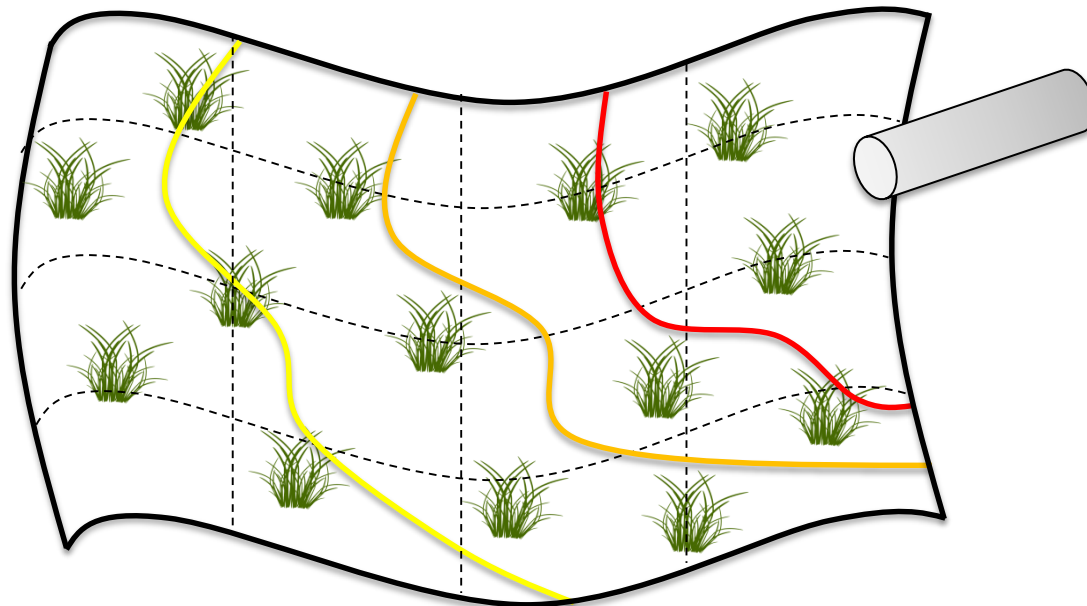
Sur une **diversité d'ouvrages** de gestion à l'amont, réaliser des cartographies à **haute résolution spatiale** :



## 5 Objectifs de l'étude

Sur une **diversité d'ouvrages** de gestion à l'amont, réaliser des cartographies à **haute résolution spatiale** :

- des **teneurs en métaux traces** dans les premiers centimètres du sol

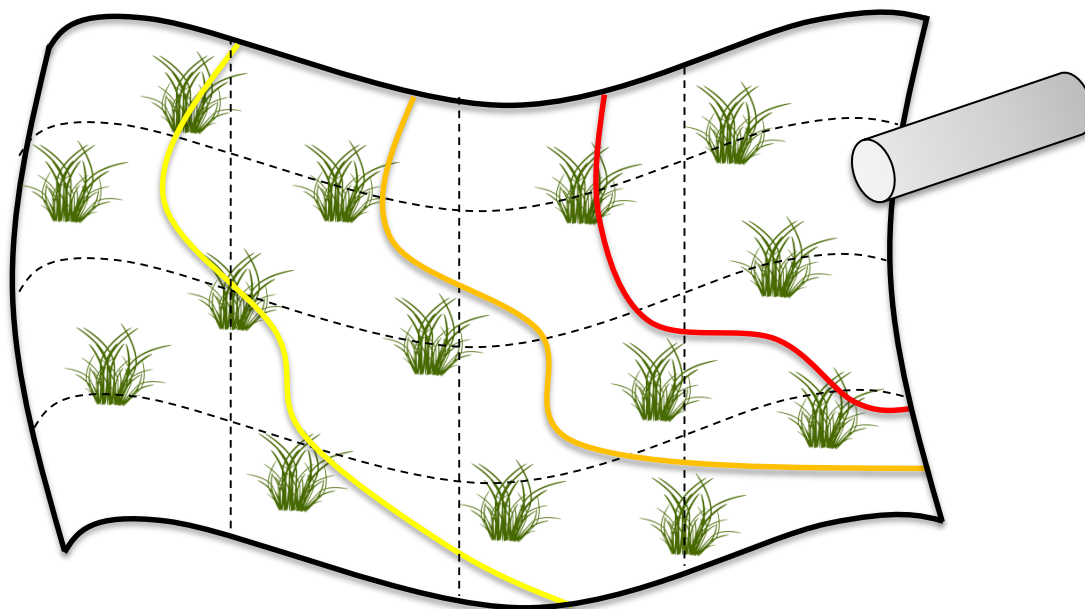




## 5 Objectifs de l'étude

Sur une **diversité d'ouvrages** de gestion à l'amont, réaliser des cartographies à **haute résolution spatiale** :

- des **teneurs en métaux traces** dans les premiers centimètres du sol
- d'autres **paramètres explicatifs** :
  - Taux de matières volatiles  $\Rightarrow$  Information sur la MO du sol
  - Humidité du sol  $\Rightarrow$  Visualiser le cheminement de l'eau dans l'ouvrage
  - Épaisseur de l'horizon superficiel  $\Rightarrow$  Comprendre sa variabilité







# 7 Méthodologie

Échantillonnage sur 2-3 cm



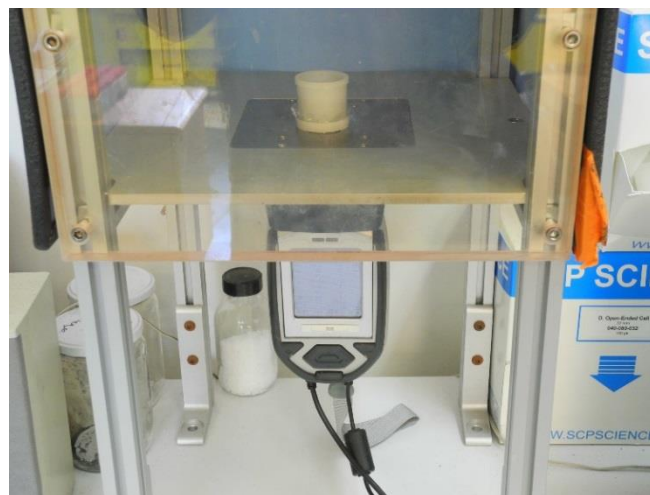
Séchage à 40°C, tamisage à 2 mm



Conditionnement pré-analyse



Analyse de **Cu, Pb, Zn** par Fluorescence X



# 8 Méthodologie

1 m

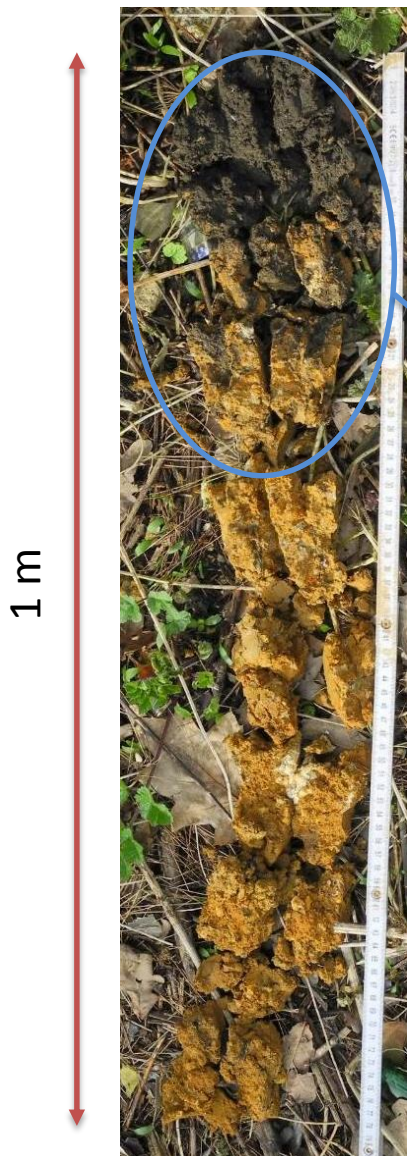


Mesure de  
l'épaisseur de  
l'horizon superficiel





# 8 Méthodologie



Mesure de l'épaisseur de l'horizon superficiel



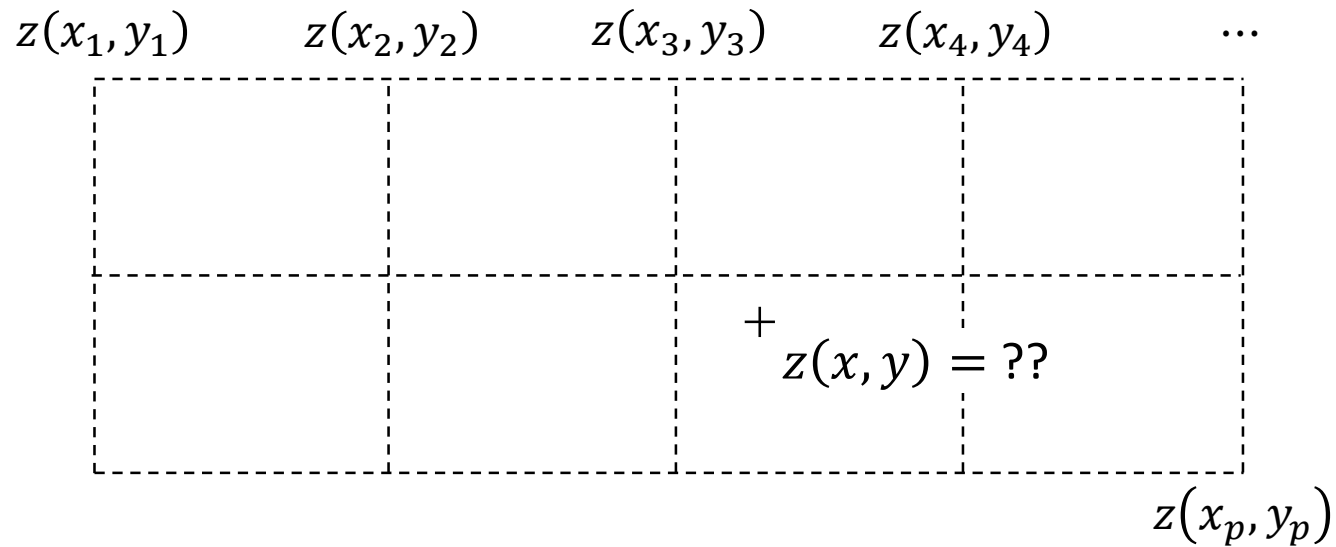
Calcination à 550°C pendant 6h



Différence de masse  
⇒ **Matières volatiles**

## 9 Méthodologie

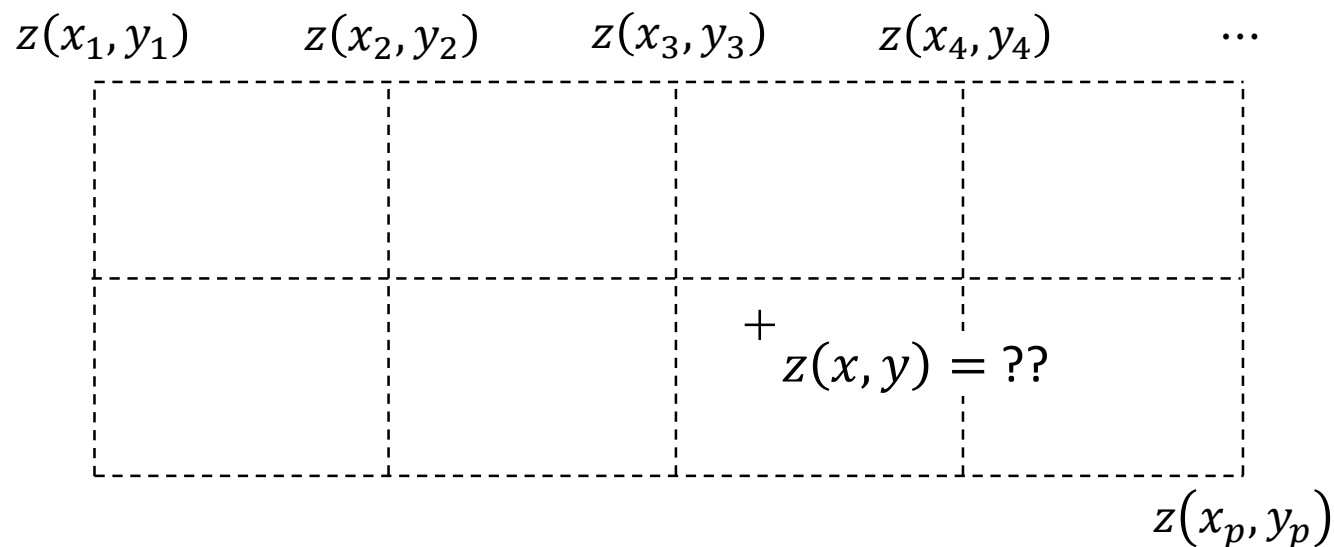
- 35 points d'échantillonnage à FLEURY, 38 à DOURDAN
- Maillage : 1 m x 1,8 m (FLEURY), et 1,5 m x 1,5 à 3 m (DOURDAN)





## 9 Méthodologie

- 35 points d'échantillonnage à FLEURY, 38 à DOURDAN
- Maillage : 1 m x 1,8 m (FLEURY), et 1,5 m x 1,5 à 3 m (DOURDAN)

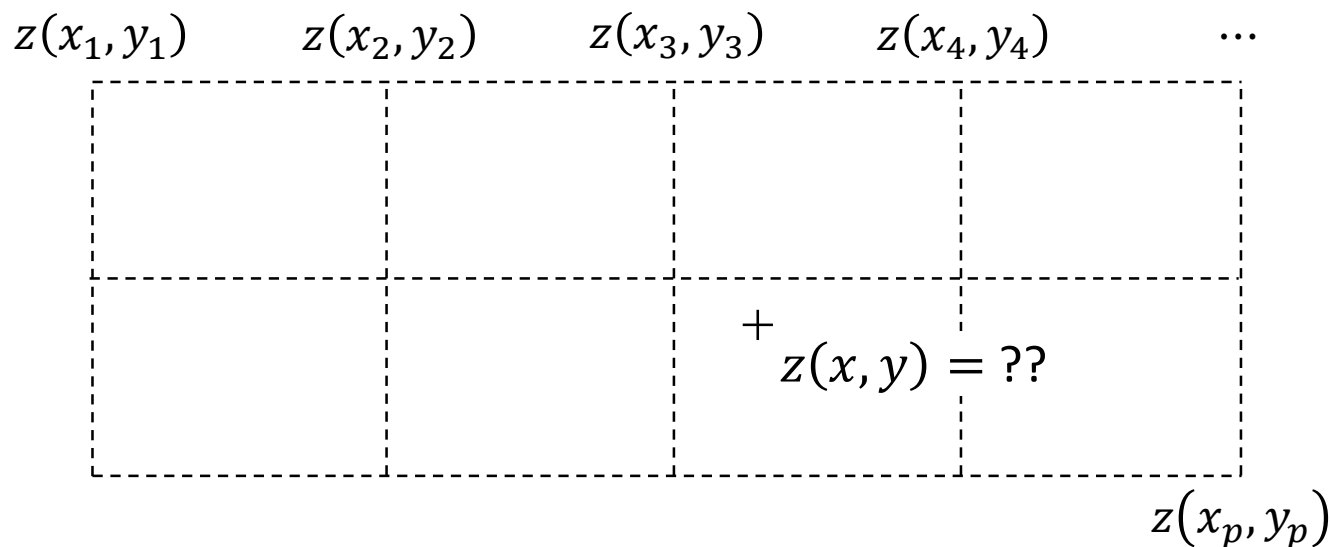


- Interpolation des champs spatiaux : **Krigeage universel**  
 $\Rightarrow z(x, y)$  est la réalisation d'une fonction aléatoire

$$Z(x, y) = \mu(x, y) + \delta(x, y)$$

## 9 Méthodologie

- 35 points d'échantillonnage à FLEURY, 38 à DOURDAN
- Maillage : 1 m x 1,8 m (FLEURY), et 1,5 m x 1,5 à 3 m (DOURDAN)



- Interpolation des champs spatiaux : **Krigeage universel**  
 $\Rightarrow z(x, y)$  est la réalisation d'une fonction aléatoire

$$Z(x, y) = \mu(x, y) + \delta(x, y)$$

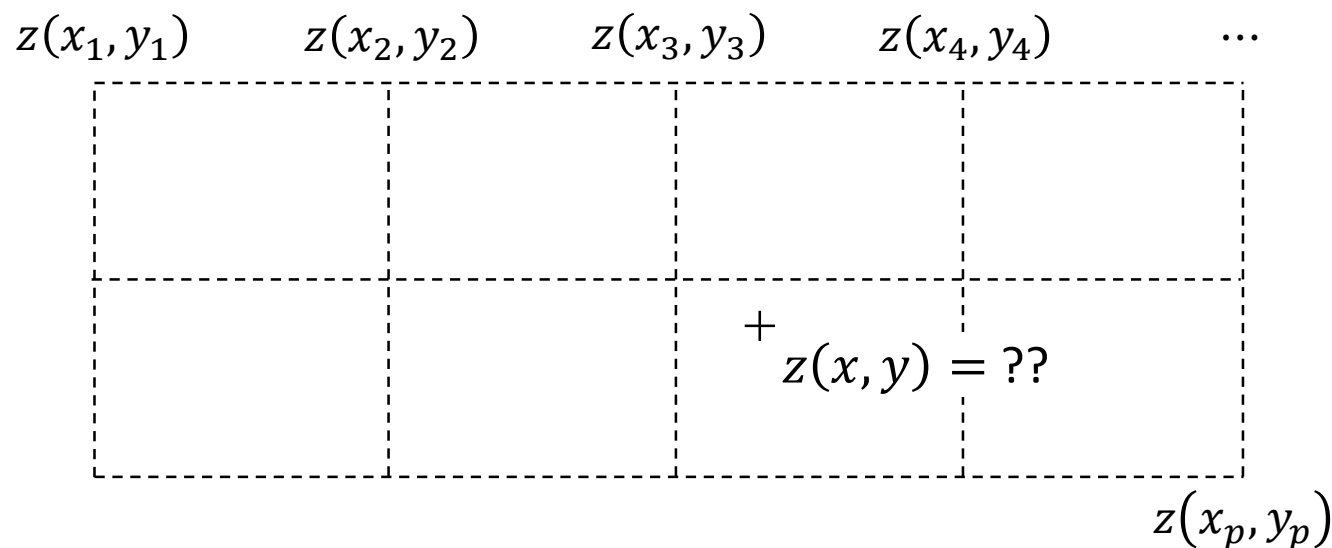
Structure déterministe

Fonction aléatoire stationnaire



## 9 Méthodologie

- 35 points d'échantillonnage à FLEURY, 38 à DOURDAN
- Maillage : 1 m x 1,8 m (FLEURY), et 1,5 m x 1,5 à 3 m (DOURDAN)



- Interpolation des champs spatiaux : **Krigeage universel**

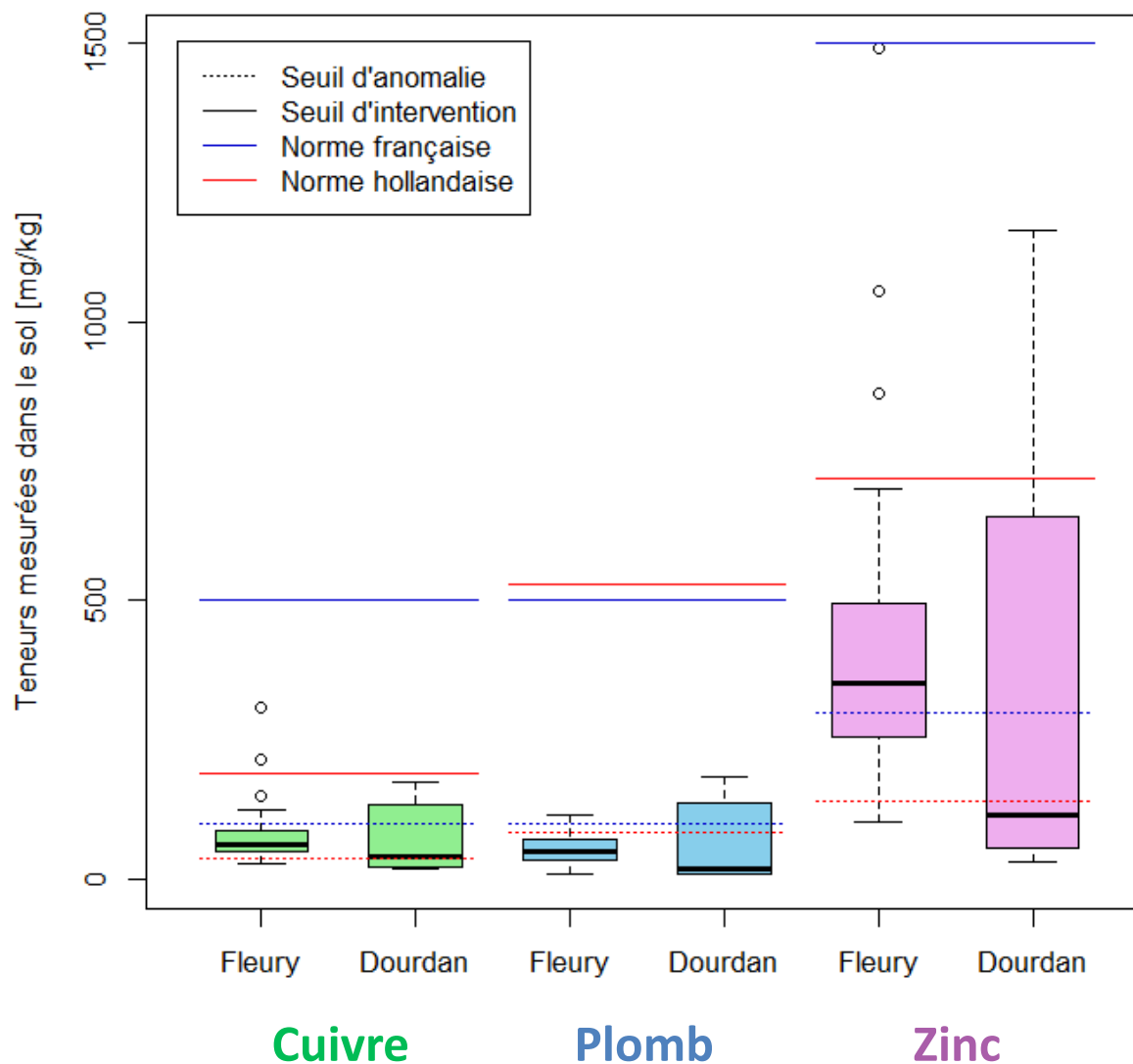
$\Rightarrow z(x, y)$  est la réalisation d'une fonction aléatoire

$$Z(x, y) = \mu(x, y) + \delta(x, y) \text{ estimée par } \hat{Z}(x, y) = \lambda_0 + \sum_i \lambda_i Z(x_i, y_i)$$

Structure déterministe

Fonction aléatoire stationnaire

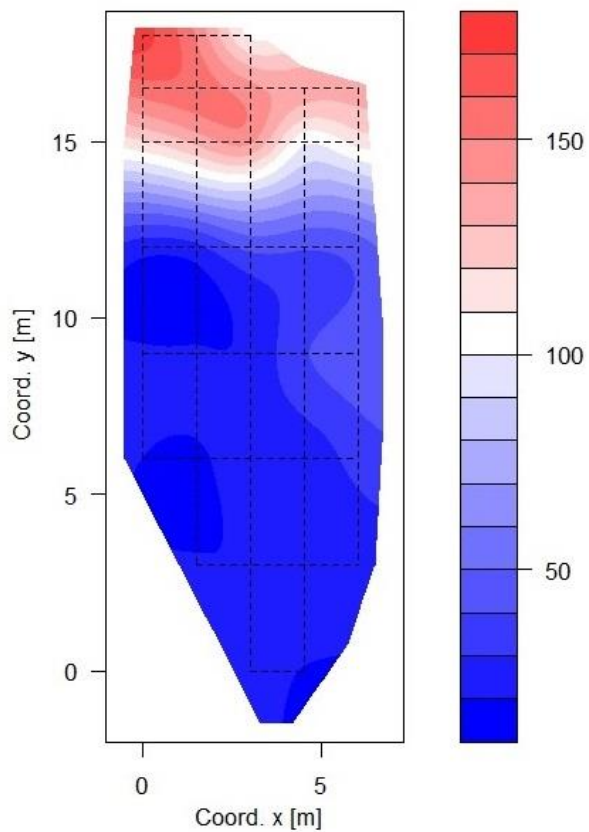
# 10 Statistiques générales



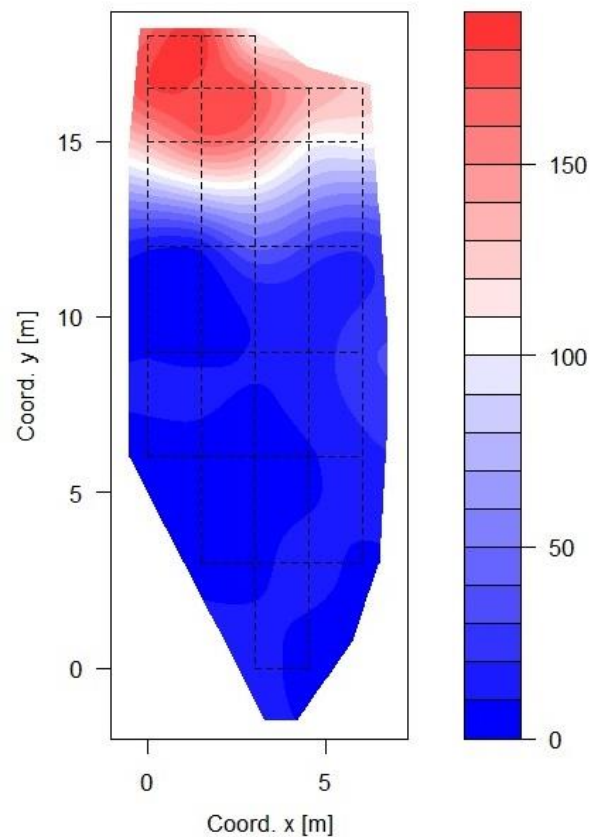


# 11 Résultats – DOURDAN (1/2)

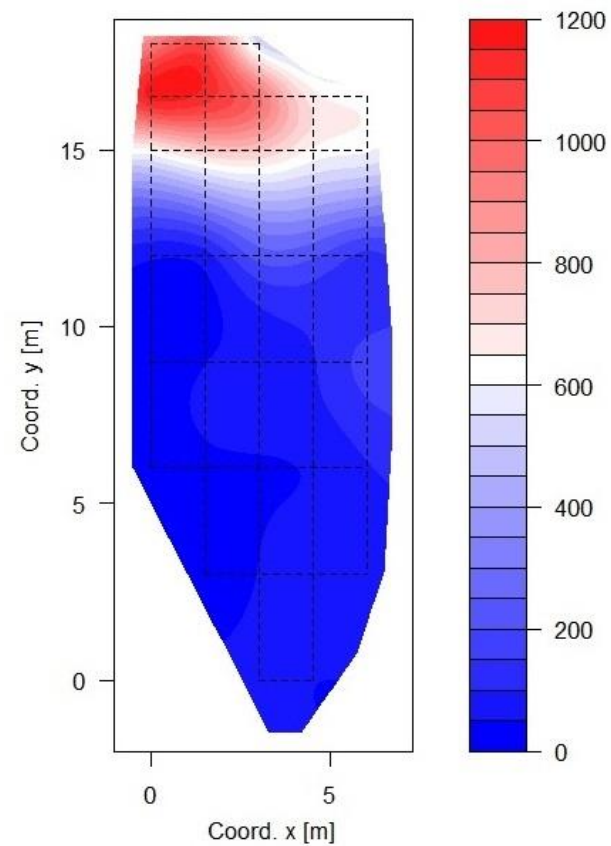
## Cuivre [mg/kg]



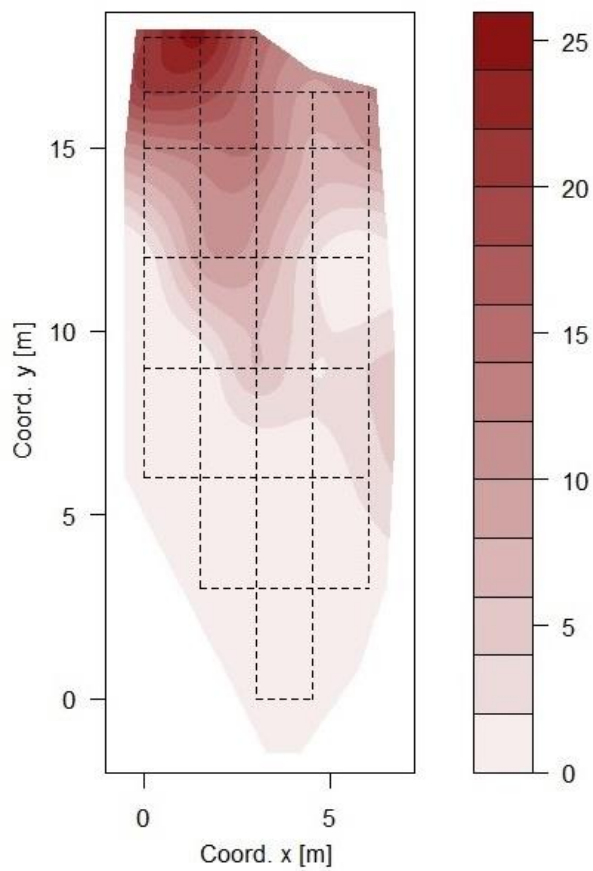
## Plomb [mg/kg]



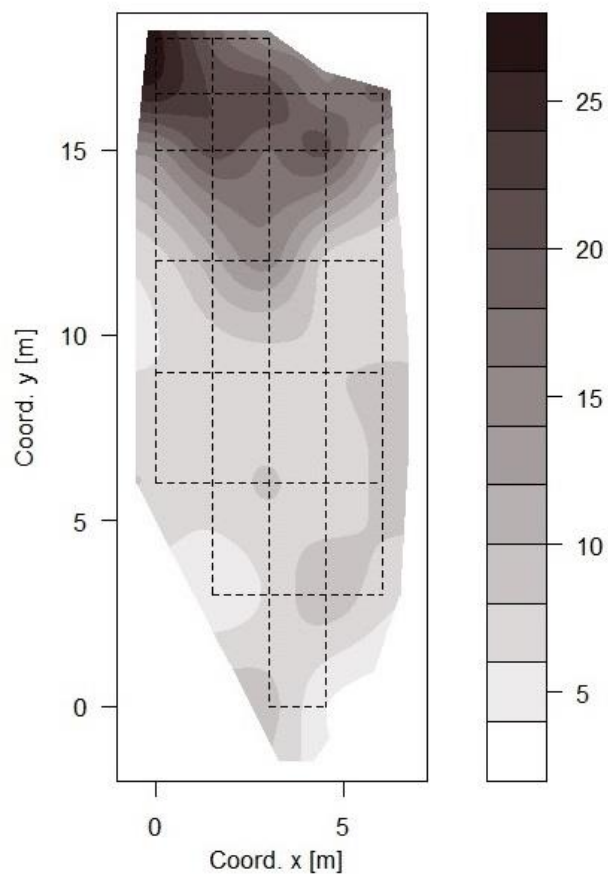
## Zinc [mg/kg]



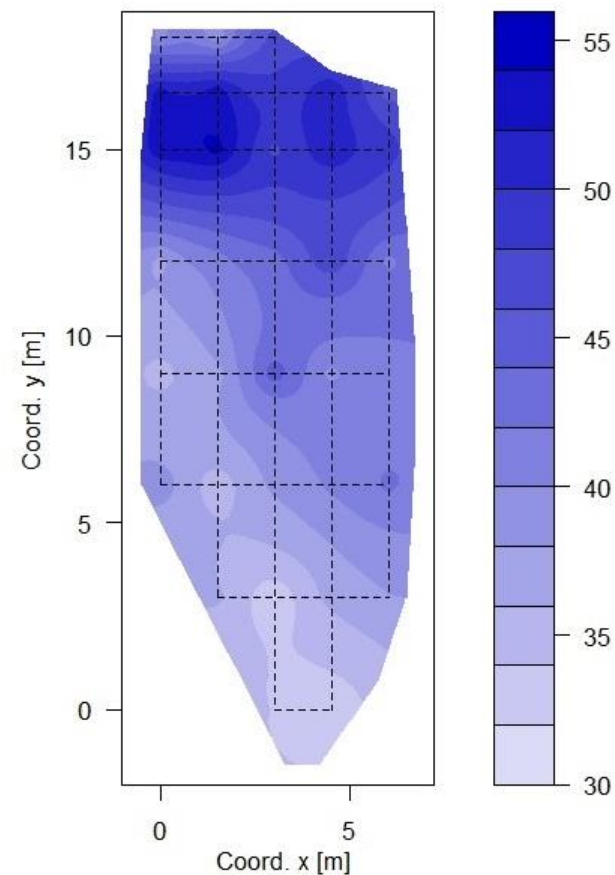
## Épaisseur de l'horizon superficiel [cm]



## Matières volatiles [%]



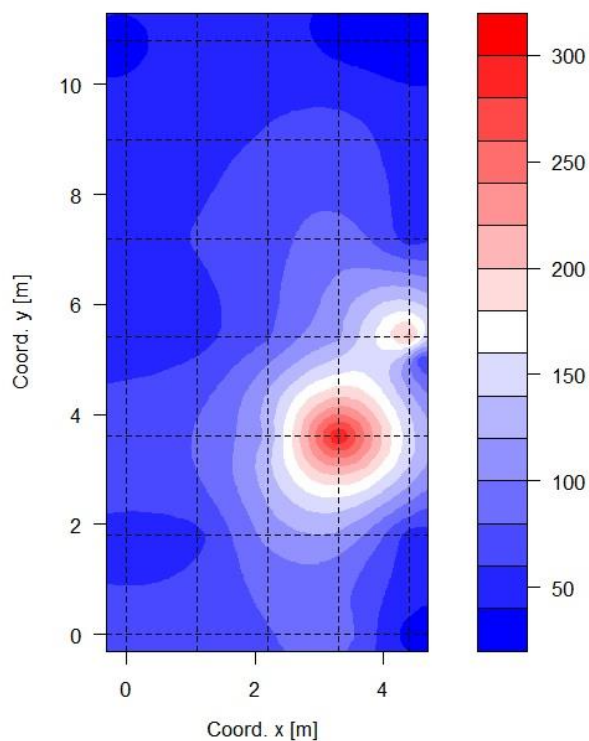
## Teneur en eau [%]



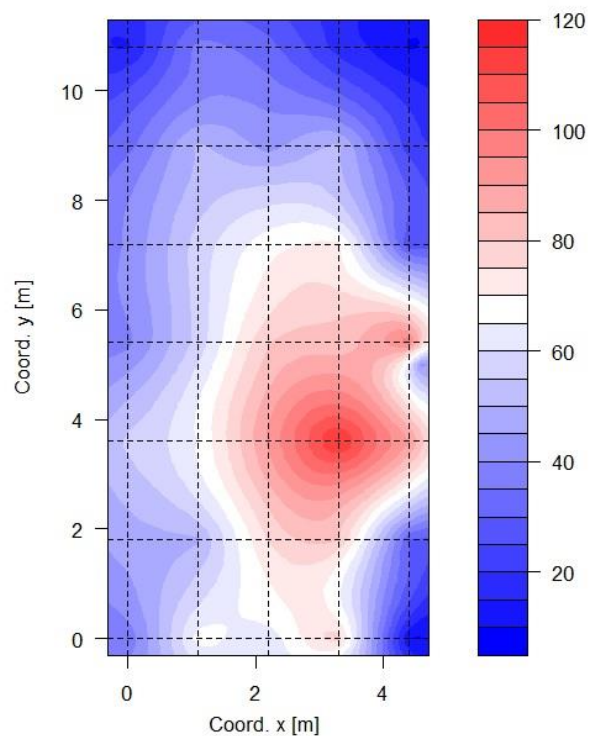


# 13 Résultats – FLEURY (1/2)

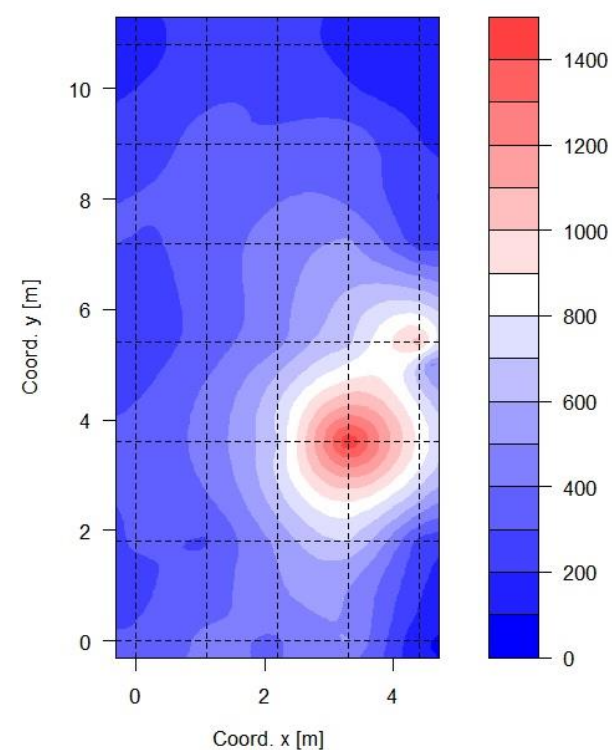
### Cuivre [mg/kg]



### Plomb [mg/kg]

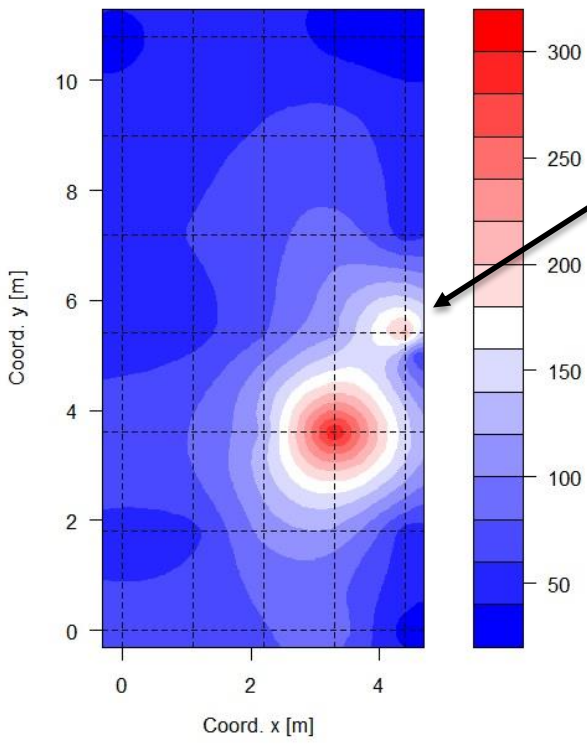


### Zinc [mg/kg]



# 14 Résultats – FLEURY (1/2)

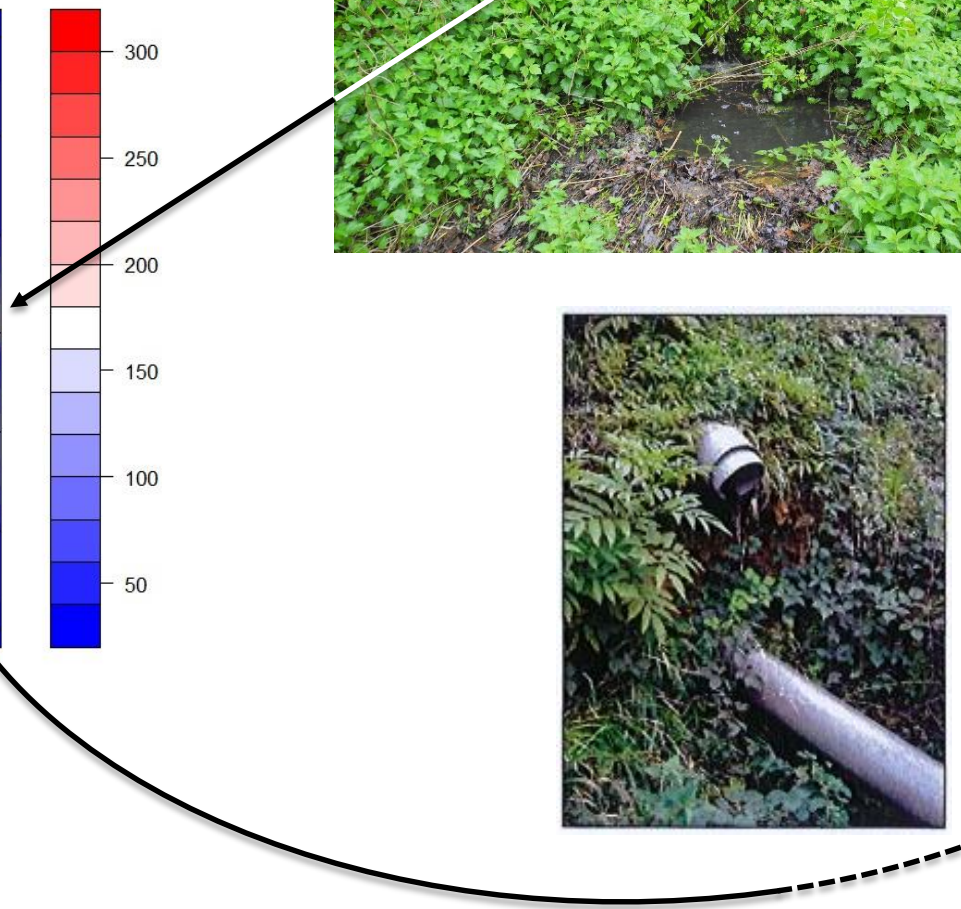
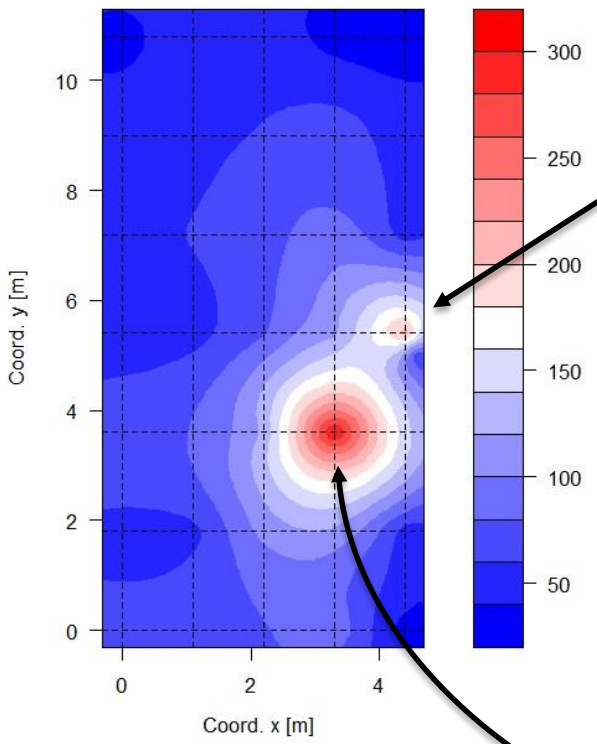
### Cuivre [mg/kg]



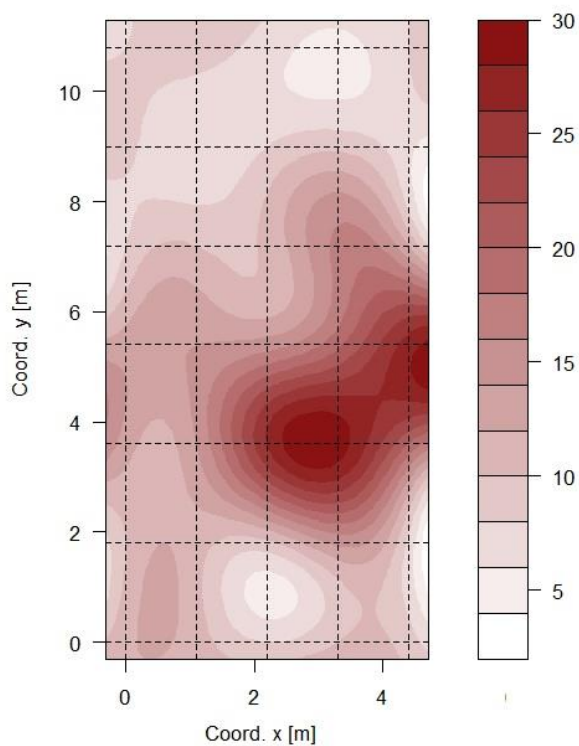


# 14 Résultats – FLEURY (1/2)

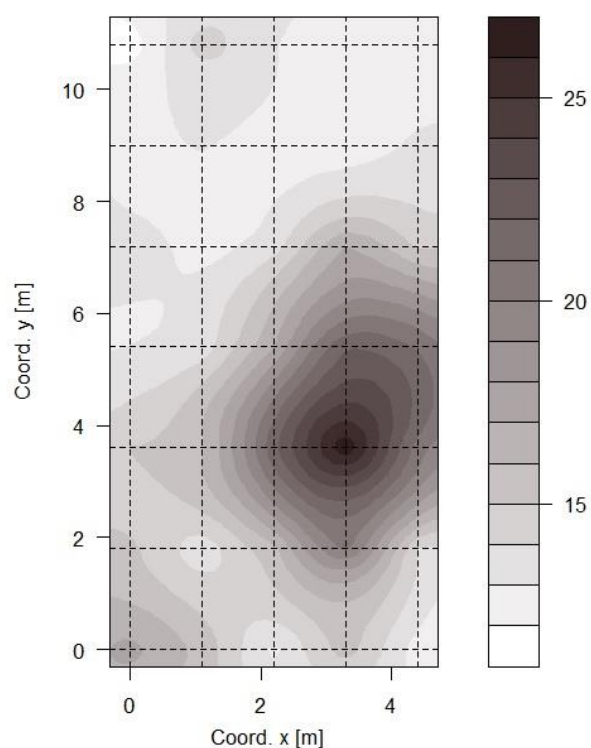
### Cuivre [mg/kg]



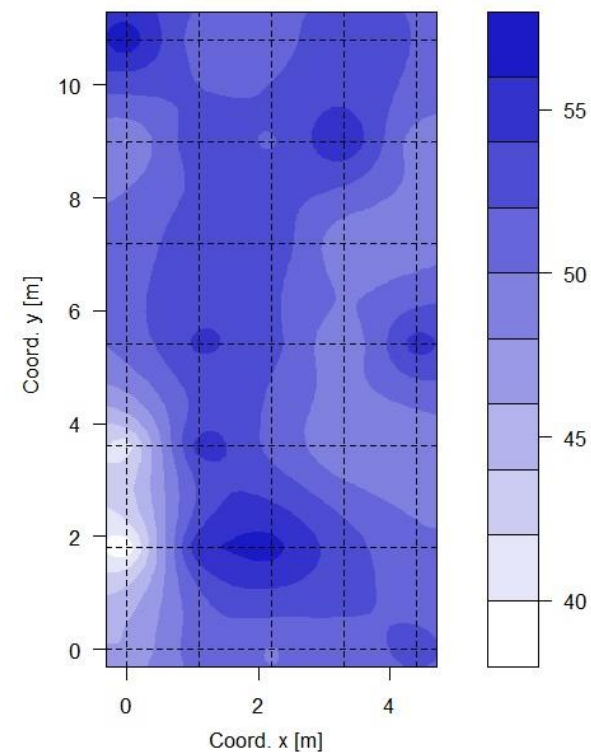
## Épaisseur de l'horizon superficiel [cm]



## Matières volatiles [%]

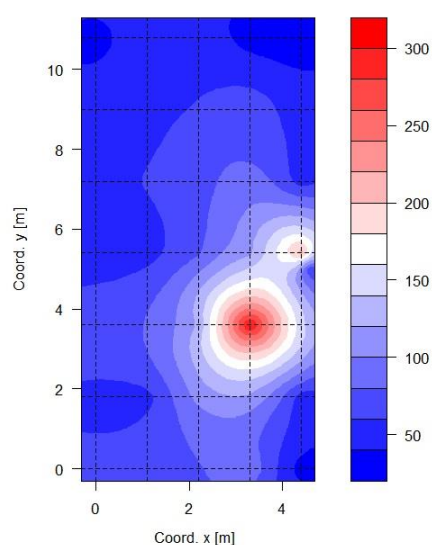
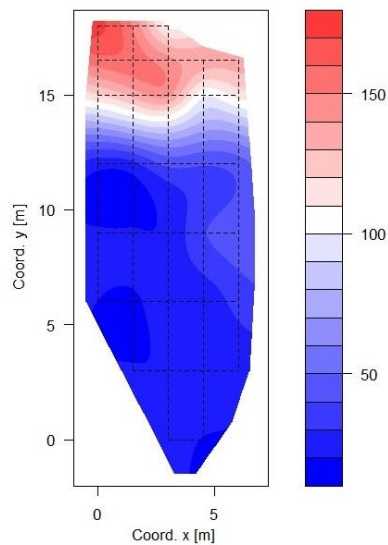
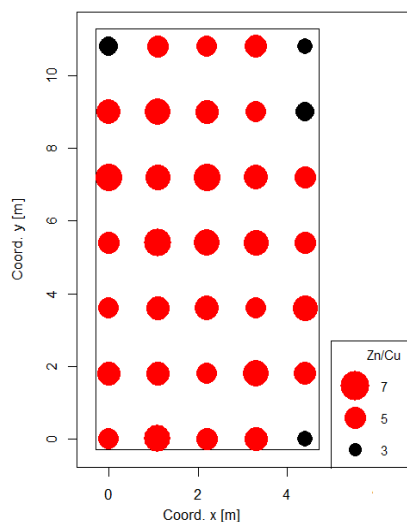
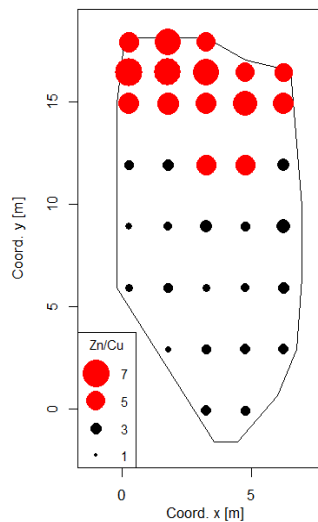


## Teneur en eau [%]



# 16 Signature des sources de métaux ?

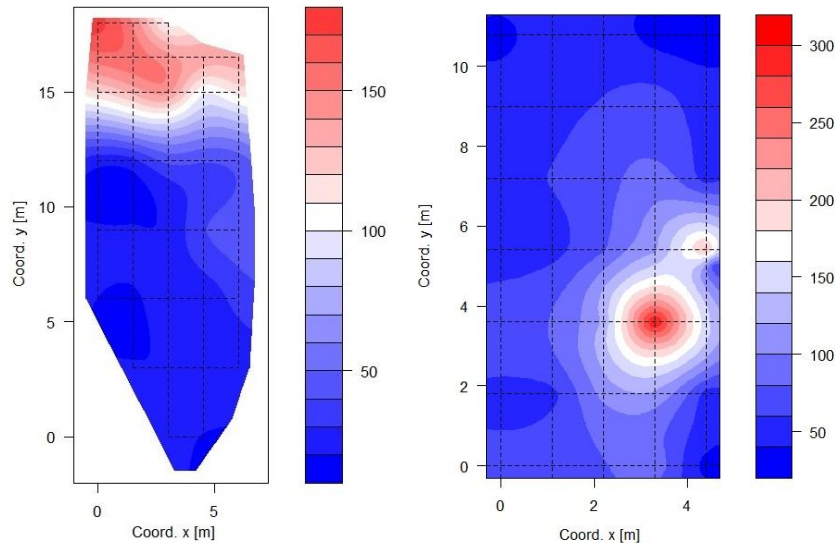
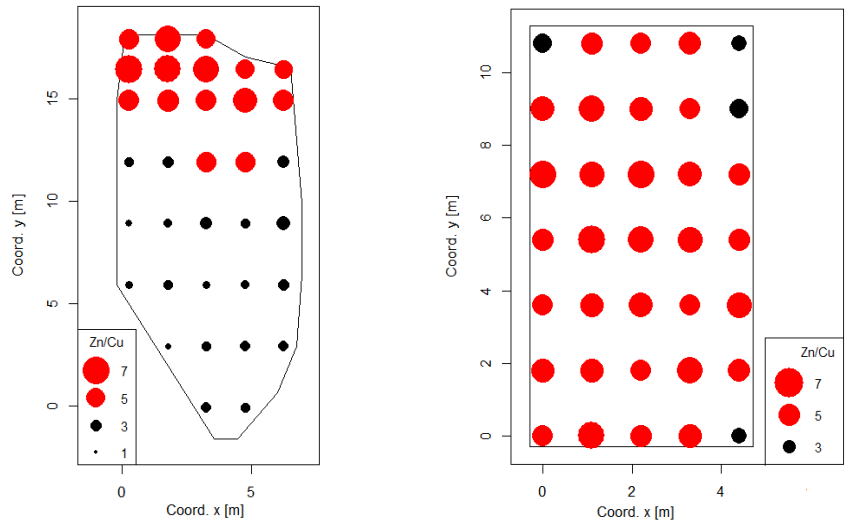
## Ratio Zn/Cu





# 16 Signature des sources de métaux ?

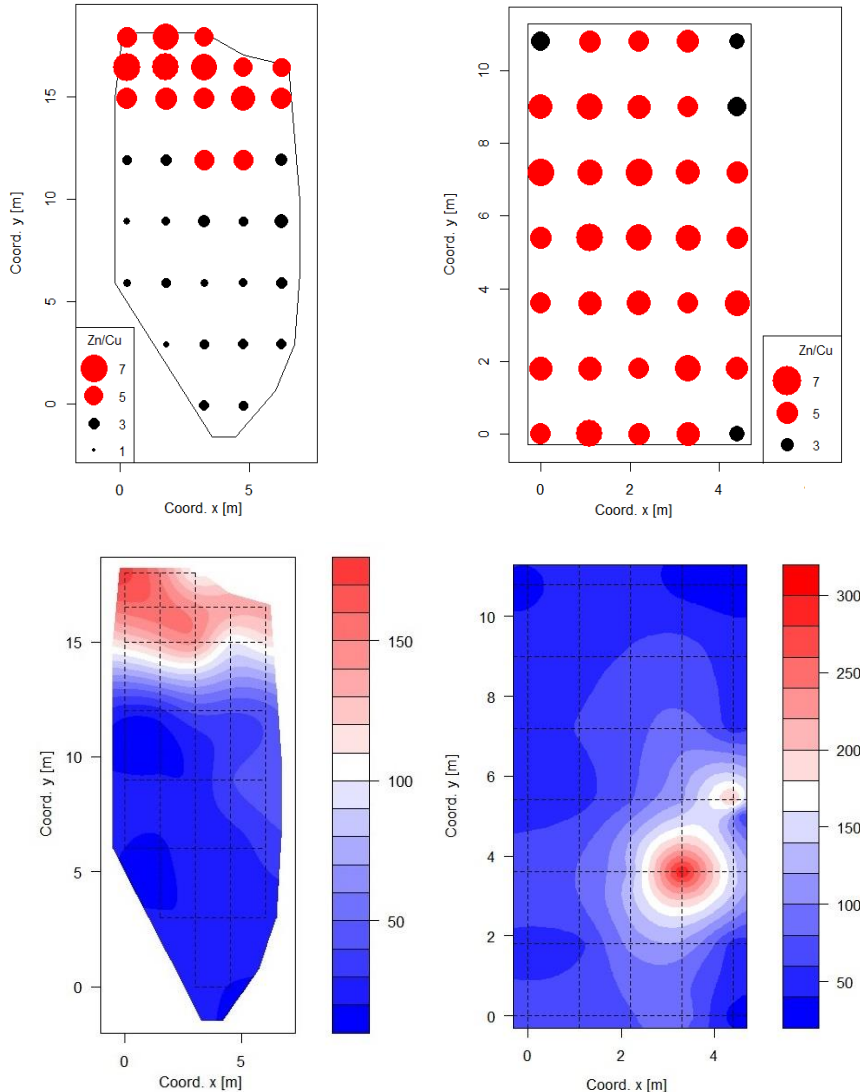
## Ratio Zn/Cu



Zn/Cu plus faible dans le sol « peu contaminé » que dans la partie polluée des bassins...

# 16 Signature des sources de métaux ?

## Ratio Zn/Cu



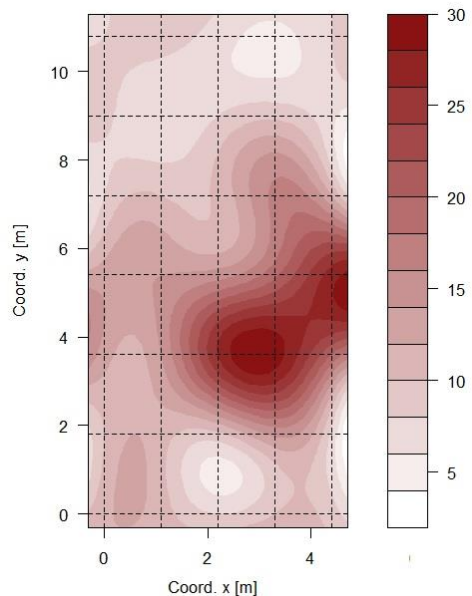
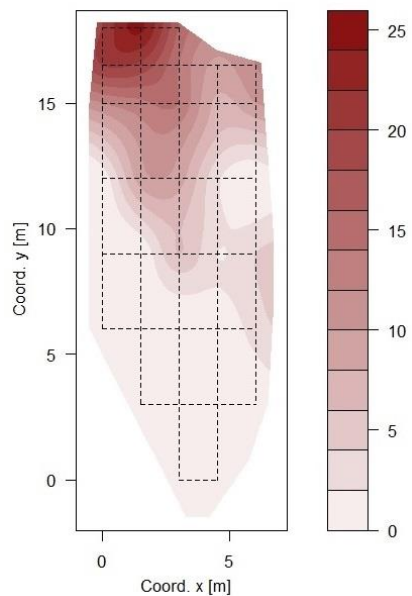
Zn/Cu plus faible dans le sol « peu contaminé » que dans la partie polluée des bassins...

...et dans le ruissellement :

- Rues de Paris  
 $[Zn/Cu]_{moy} = 7,3$  (Gounou, 2004)
- Chaussées à circulation modérée  
 $[Zn/Cu]_{moy} = 3,8$  (Bressy, 2010)  
 $[Zn/Cu]_{moy} = 2,7$  (Gasperi et al., 2014)
- Bassin versant mixte  
 $[Zn/Cu]_{moy} = 5,5$  (Bressy, 2010)  
 $[Zn/Cu]_{moy} = 5,2$  (Gasperi et al., 2014)

Signature des sources ?

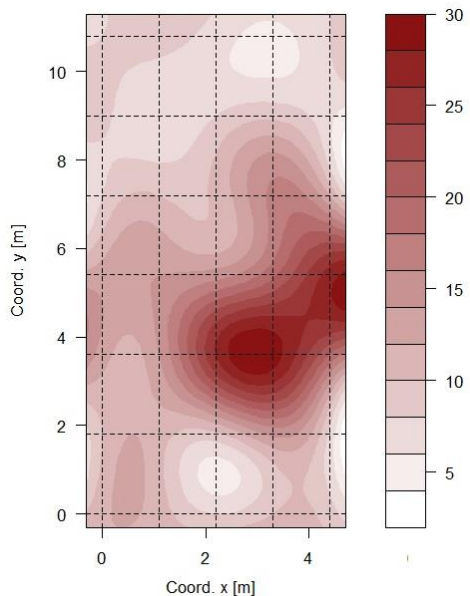
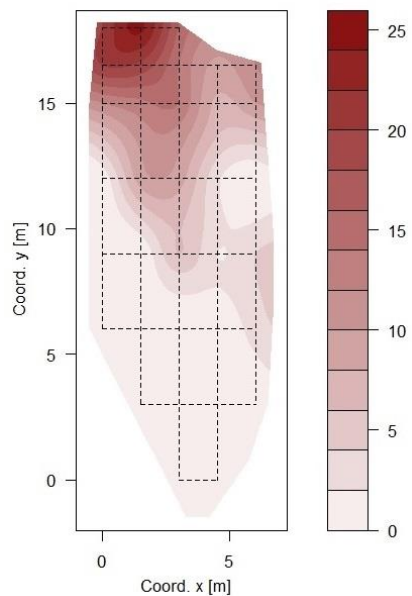
# 17 Horizon de surface ?



Quelle est la nature de cet horizon de sol superficiel, plus riche en matières volatiles, et dont l'épaisseur fortement variable est corrélée aux concentrations de métaux ?



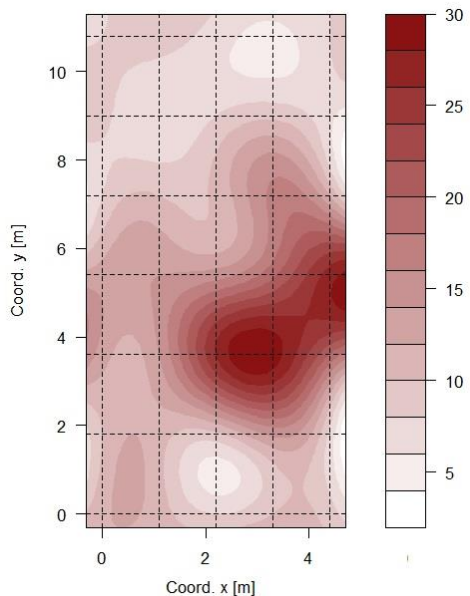
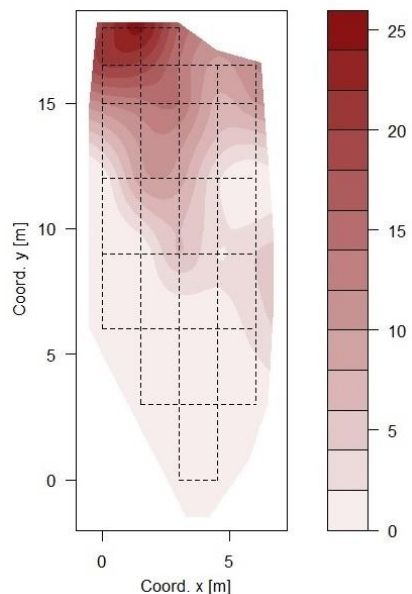
# 17 Horizon de surface ?



Quelle est la nature de cet horizon de sol superficiel, plus riche en **matières volatiles**, et dont l'**épaisseur fortement variable** est corrélée aux concentrations de métaux ?

- **Hypothèse 1** : couche majoritairement formée par des matières en suspension issues du ruissellement. Signature d'un transport particulaire des trois métaux ?

# 17 Horizon de surface ?



Quelle est la nature de cet horizon de sol superficiel, plus riche en **matières volatiles**, et dont l'**épaisseur fortement variable** est corrélée aux concentrations de métaux ?

- **Hypothèse 1** : couche majoritairement formée par des matières en suspension issues du ruissellement. Signature d'un transport particulaire des trois métaux ?
- **Hypothèse 2** : matière organique endogène, dont la formation et la dégradation ont été affectées par la mise en eau plus fréquente de cette zone.

## 18 Conclusions et perspectives

- Importante variabilité de la contamination, mais **structuration spatiale** autour du point d'arrivée de l'eau dans les bassins.
- Tendances **similaires pour les trois métaux**, malgré des spéciations potentiellement différentes dans le ruissellement.
- Importance du **fonctionnement hydraulique**  $\Rightarrow$  Non-uniformité des flux d'infiltration, surtout pour les événements pluvieux courants.
- Corrélations intéressantes avec les **MV** et l'épaisseur de **l'horizon de surface**.
- Ratios entre métaux = **signature des sources** de la contamination ?

### À venir...

- Compléter cette analyse par des **investigations verticales**.
- Nécessité de tenir compte de cette variabilité dans les **modèles**.
- Portée opérationnelle des résultats : **conception** des ouvrages ?



A photograph of a stone weir structure in a grassy area. The weir is built with stacked stones and has a small wooden gate. A stream flows through the weir, creating a small pool of water. The background is a dense forest of green trees under a cloudy sky.

Merci pour votre attention

Des questions ?