Quantification et caractérisation des transferts d'eau et de contaminants au sein des bassins versants :

Mesures in-situ, expérimentation en laboratoire et modélisation numérique

Célestine Delbart

Laboratoire GéHCO de l'Université de Tours

	Recherche	*Enseignement*
L3 - M1: Géologie, environnement *ENS Ulm, UPMC*	**Géomorphologie-protection du littoral (1 mois)** LOG (université de Dunkerque) **Bilan hydrologique d'un bassin crayeux (6 mois)** CEH, Wallingford, Angleterre	
M2 Hydrologie-hydrogéologie *UPMC, ENS Ulm*	**Hydrodynamique et géochimie, système carbonaté (6 mois)** CEA, METIS (UPMC), GEOPS (UPSud)	
Doctorat *UPSud*	**Transfert d'eau et de contaminants dans des systèmes carbonatés** CEA – METIS (UPMC) – GEOPS (UPSud), Université de Berne (Suisse)	Vacation enseignement (42h) Encadrement de stagiaire M2
ATER *UPSud*		**Temps-plein** Encadrement de stagiaire M1
Post doctorat *ENSEGID – Bx INP*	**Interface nappe-rivière** **Transfert de perchlorate** ENSEGID – SUEZ Environnement – Conseil Régional d'Aquitaine, University of Western Australia	Encadrement de « bureau d'étude », 3ème a. ENSEGID Encadrement Ecole de terrain, 2ème a. ENSEGID

Contexte scientifique :

Bassin versant :

- Continuum des masses d'eau
- Eau : vecteur de contaminants dissous/particulaires

Objectifs :

- Quantification des transferts de masse, de pression et d'énergie au sein des bassins versants.
- Caractérisation et quantification des transferts de contaminants réactifs et non réactifs (nitrate, tritium, perchlorate …)

Contexte scientifique :

Bassin versant :

- Continuum des masses d'eau
- Eau : vecteur de contaminants dissous/particulaires

Objectifs :

- Quantification des transferts de masse, de pression et d'énergie au sein des bassins versants.
- Caractérisation et quantification des transferts de contaminants réactifs et non réactifs (nitrate, tritium, perchlorate …)

Facteurs :

- Hydrogéologique
- Géomorphologique
- Anthropique
- Climatique

Contexte scientifique :

Bassin versant :

- Continuum des masses d'eau
- Eau : vecteur de contaminants dissous/particulaires

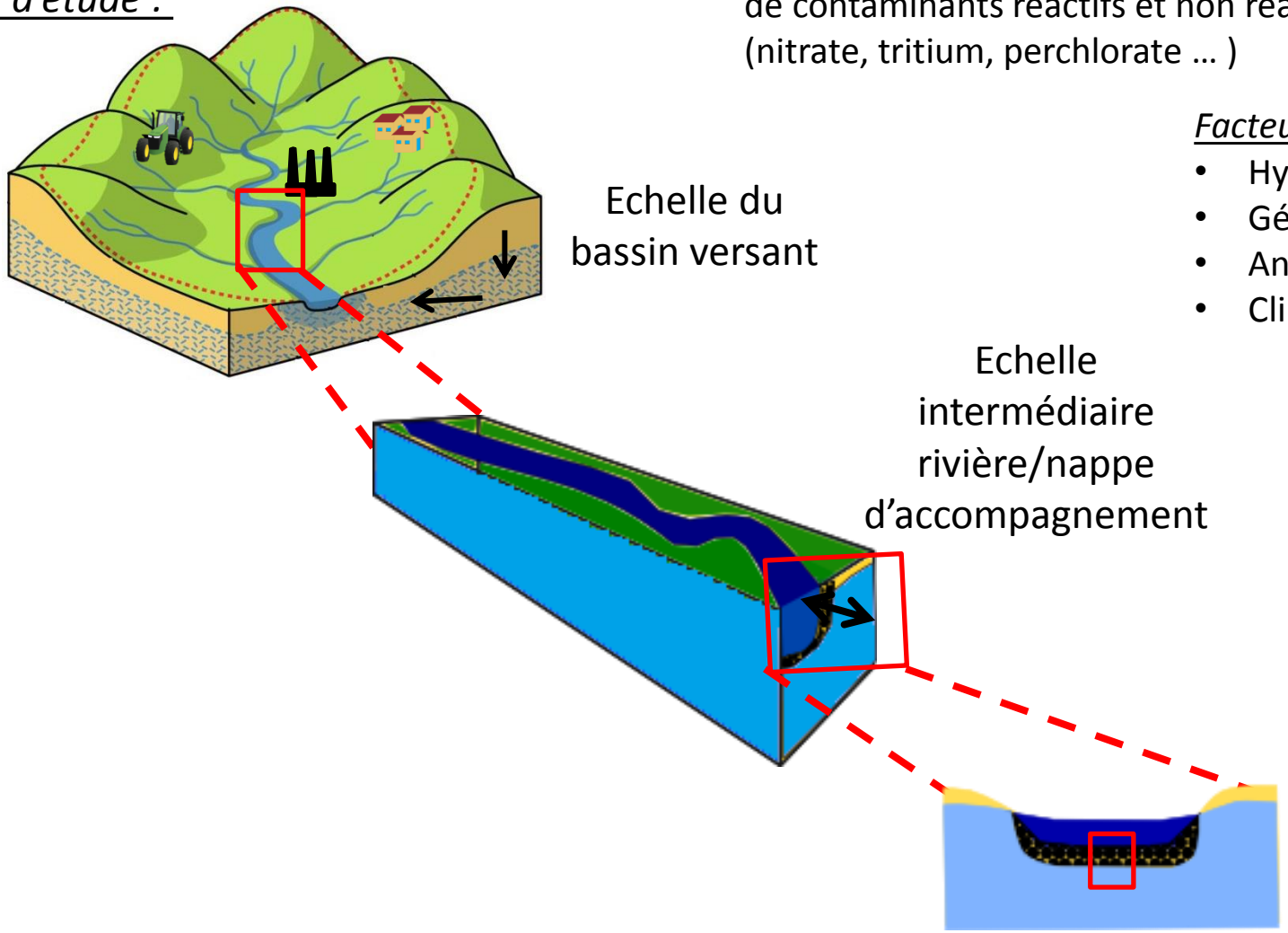
Objectifs :

- Quantification des transferts de masse, de pression et d'énergie au sein des bassins versants.
- Caractérisation et quantification des transferts de contaminants réactifs et non réactifs (nitrate, tritium, perchlorate …)

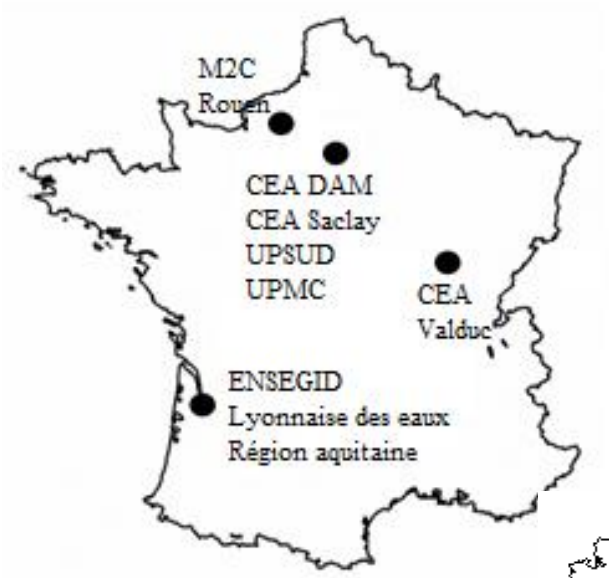
Facteurs :

- Hydrogéologique
- Géomorphologique
- Anthropique
- Climatique

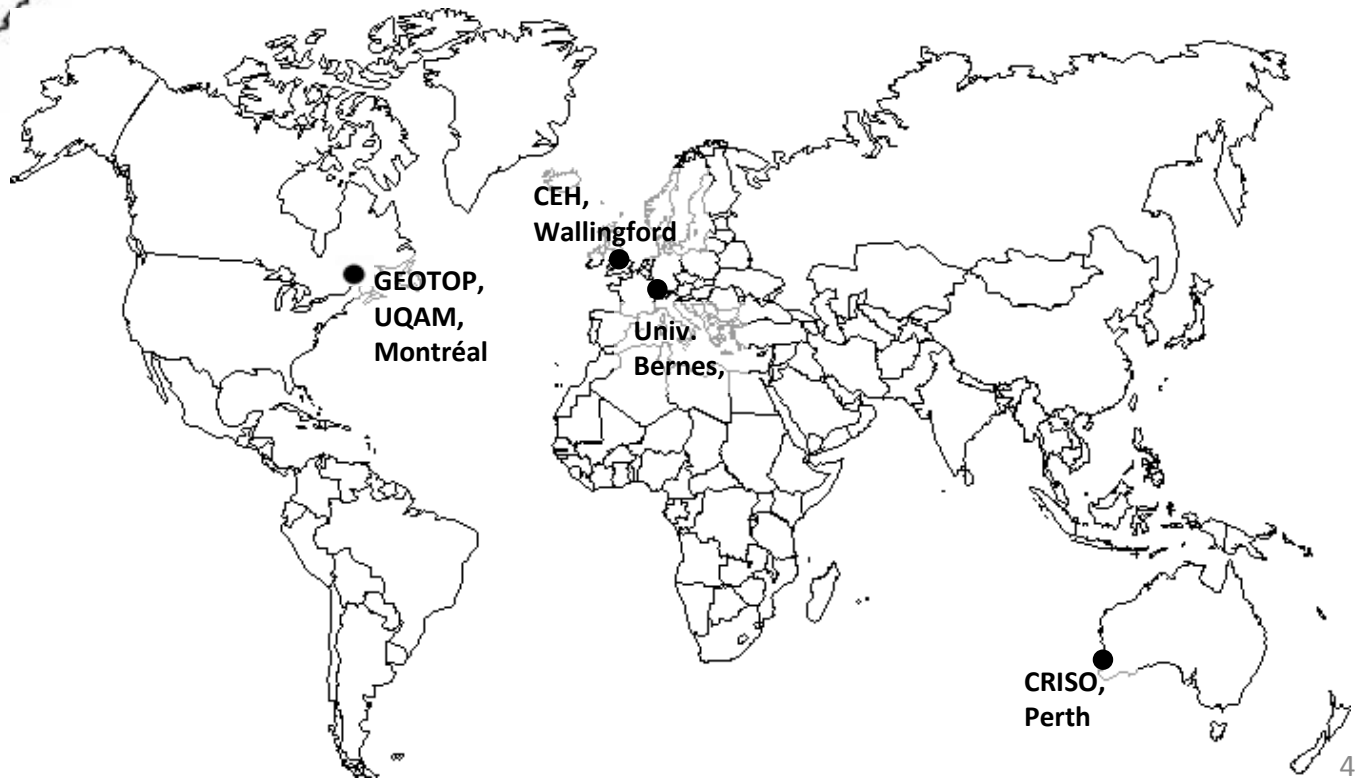
Echelles d'étude :



Collaborations :



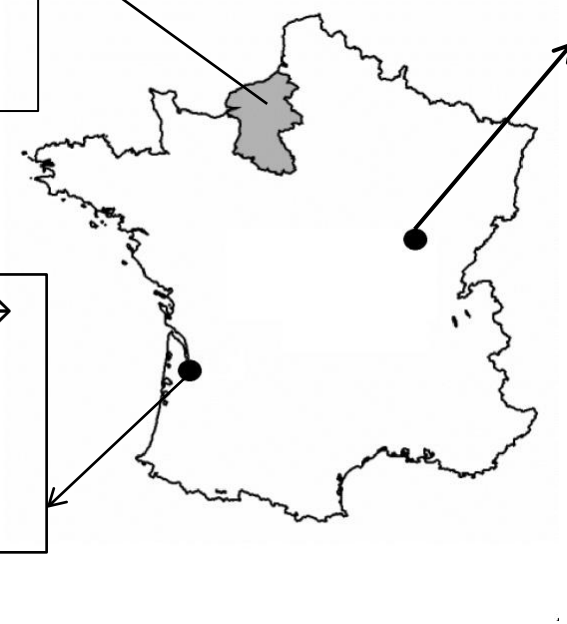
- Nationales et internationales
- Universités et entreprises privées



Sites d'étude :

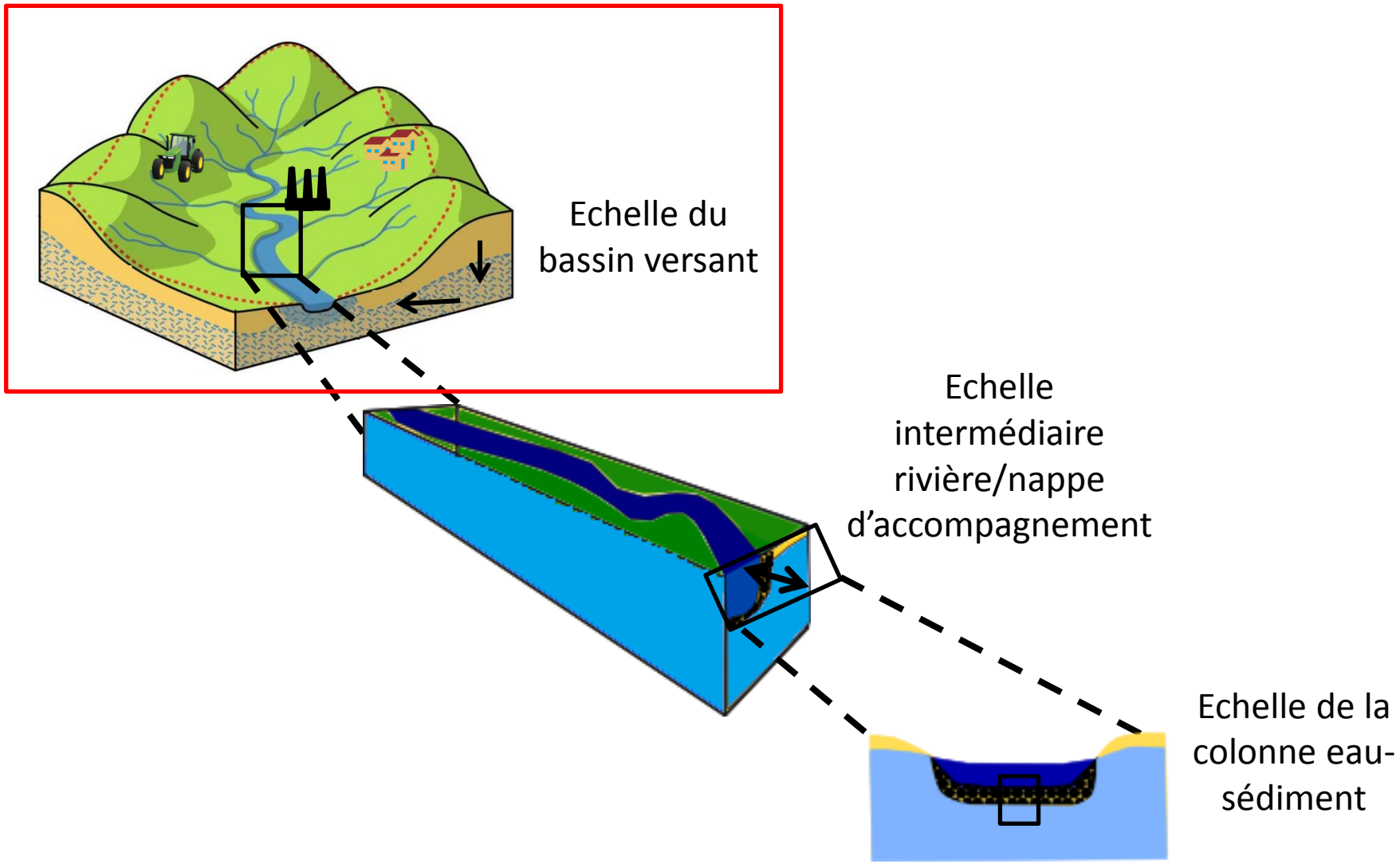
- Etude régionale
- Craie
- **Nitrate**

- Etude locale: 40 km²
- Calcaire du Dogger
- **Tritium**



- Etude multi-échelle: 2 km² → colonne de sédiment
- Calcaire de l'Oligocène
- Contexte très anthropisé
- **Perchlorate**

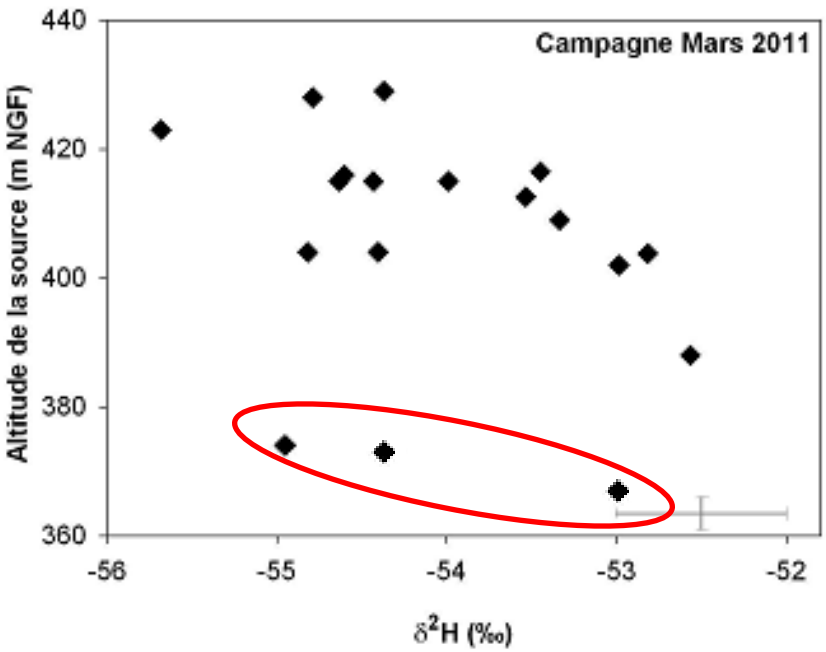
Traceurs géochimiques : quantification, origine des flux d'eau au sein des bassins versants



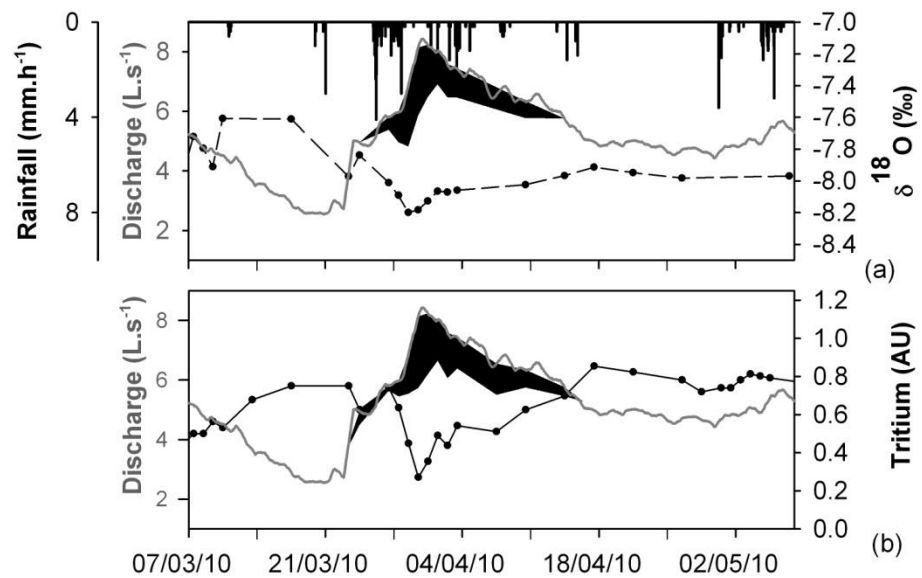
Traceurs géochimiques : quantification, origine des flux d'eau au sein des bassins versants

Un exemple de traceurs : l'apport des isotopes stables δ^2H et $\delta^{18}O$

Origine des eaux :



Décomposition d'hydrogramme de crue:



$$Q_{source}=Q_{base}+Q_{surface}$$

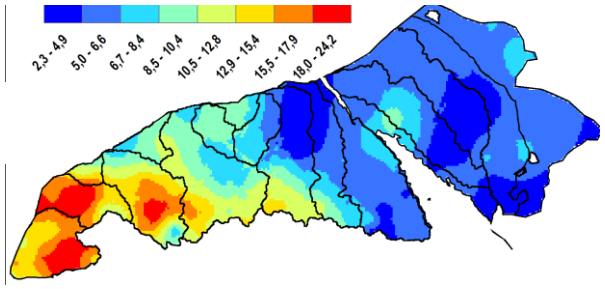
$$C_{source}Q_{source}=C_{base}Q_{base}+C_{surface}Q_{surface}$$

Delbart *et al.*, Applied Geochemistry (2014)

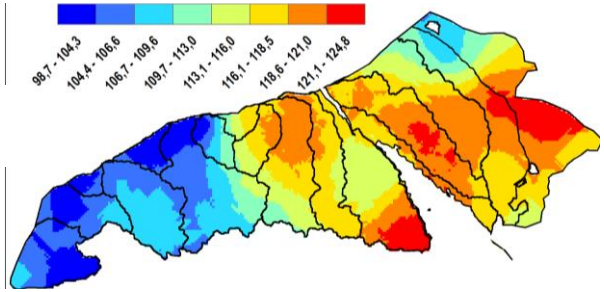
Traceurs géochimiques : processus d'infiltration d'eau et de contaminants

Etude statistique de la distribution spatiale de la composition géochimique

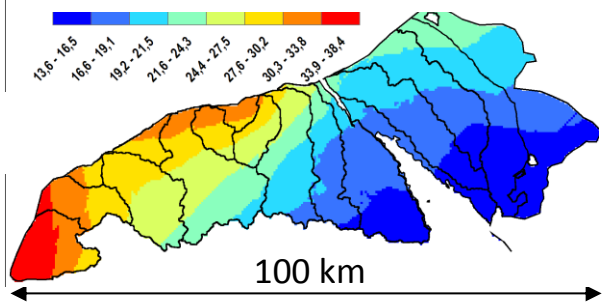
Épaisseur d'argile à silex (m)

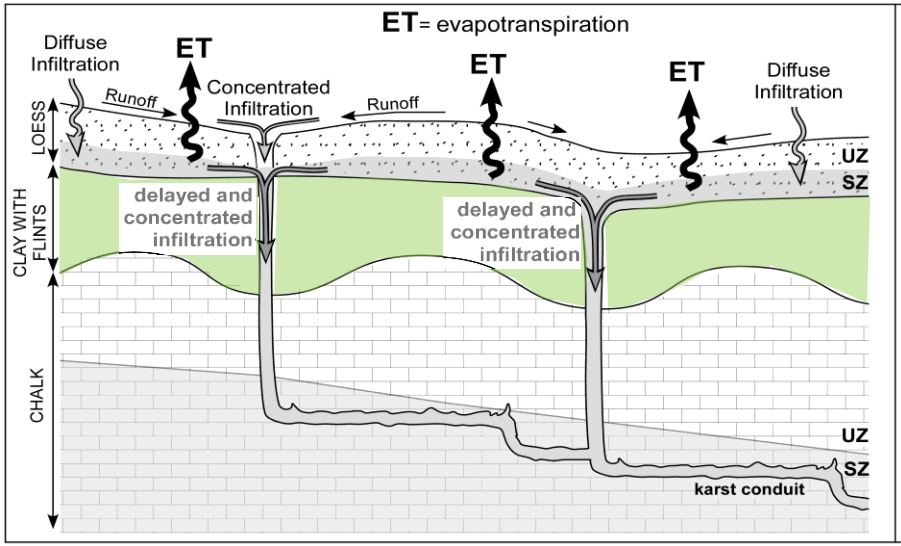


Ions autochtones ex: [Ca^{2+}]

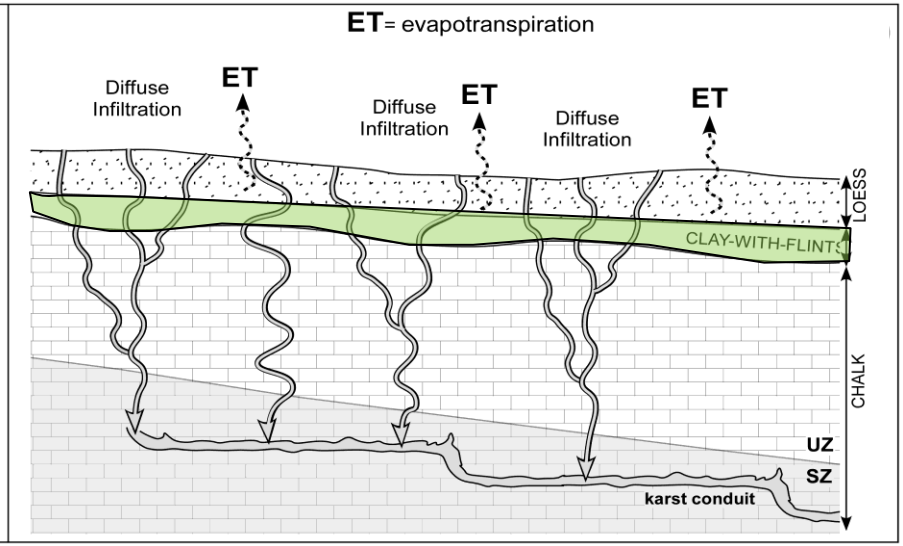


Ions allochtones: ex [Cl^-]





Développement d'une nappe perchée

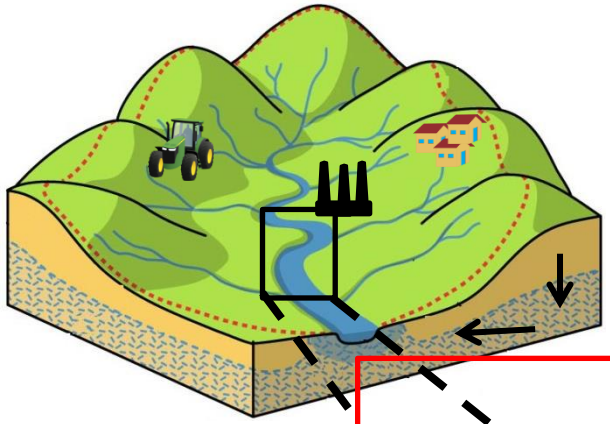


Infiltration diffuse

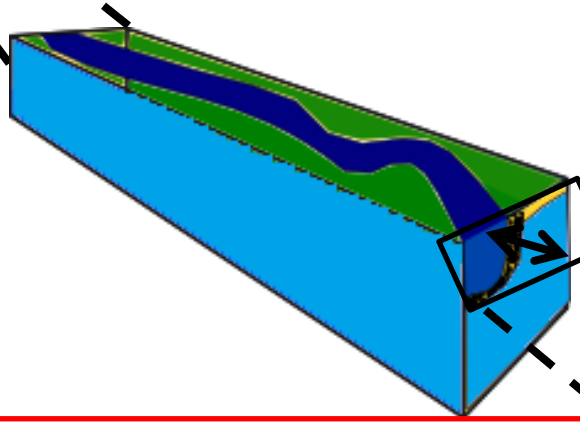
Variabilité des processus d'infiltration, des vitesses et des temps de contact eau-roche

Valdes *et al.*, Journal of Hydrology (2014)

Traceurs géochimiques : flux nappe – rivière

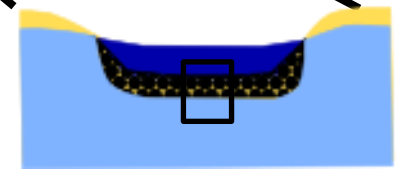


Echelle du bassin versant



Echelle intermédiaire

- **Nappe → rivière**
- Rivière → nappe



Echelle de la colonne eau-sédiment

Traceurs géochimiques : flux nappe – rivière

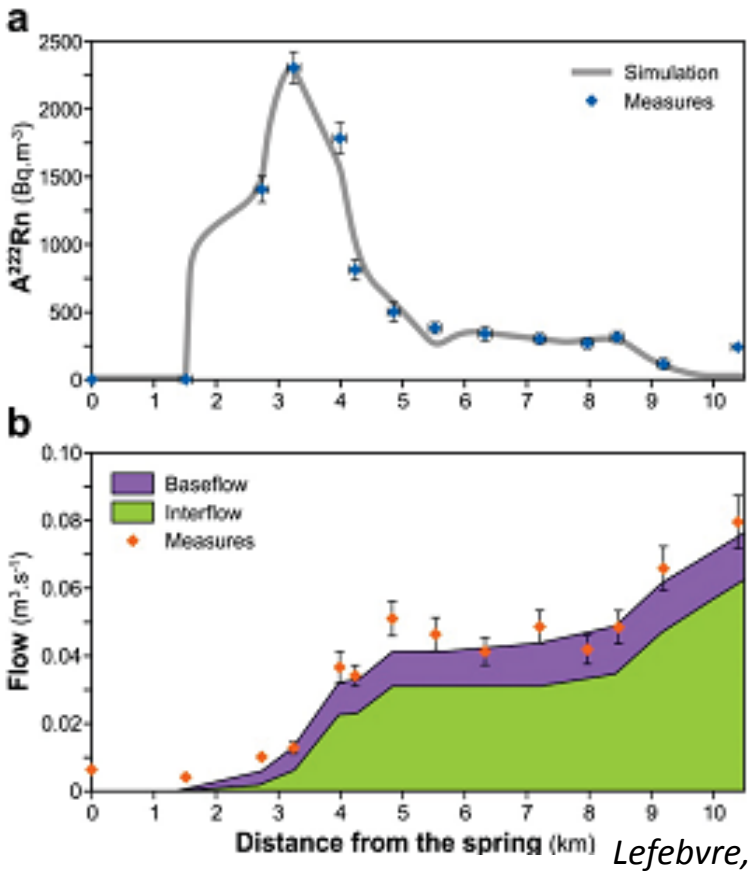
Traceurs à forts gradients

nappe / rivière / zone hyporhéique :

- Paramètres physico-chimiques
- Radon-222
- CFCs, SF_6
- Anions et cations
- Isotopes stables

Quantification de la part d'eau souterraine au sein des rivières et fleuves

Exemple de l'utilisation du radon

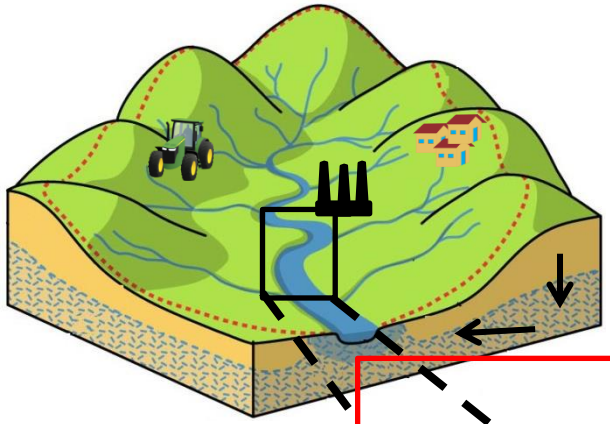


Lefebvre, 2015

(a) Activités ^{222}Rn mesurées et similées

(b) Débits mesurés et flux d'eau souterraine et flux latéraux

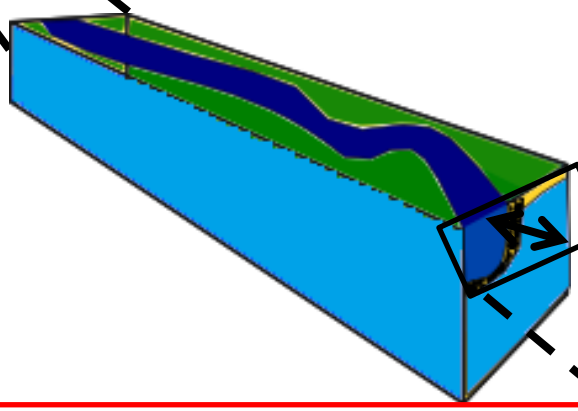
Transferts de contaminants par le système riverain

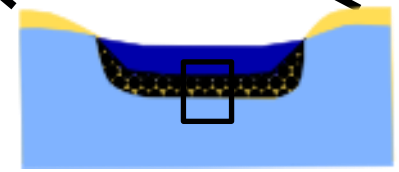


Echelle du bassin versant

Echelle intermédiaire

- Nappe → rivière
- **Rivière → nappe**

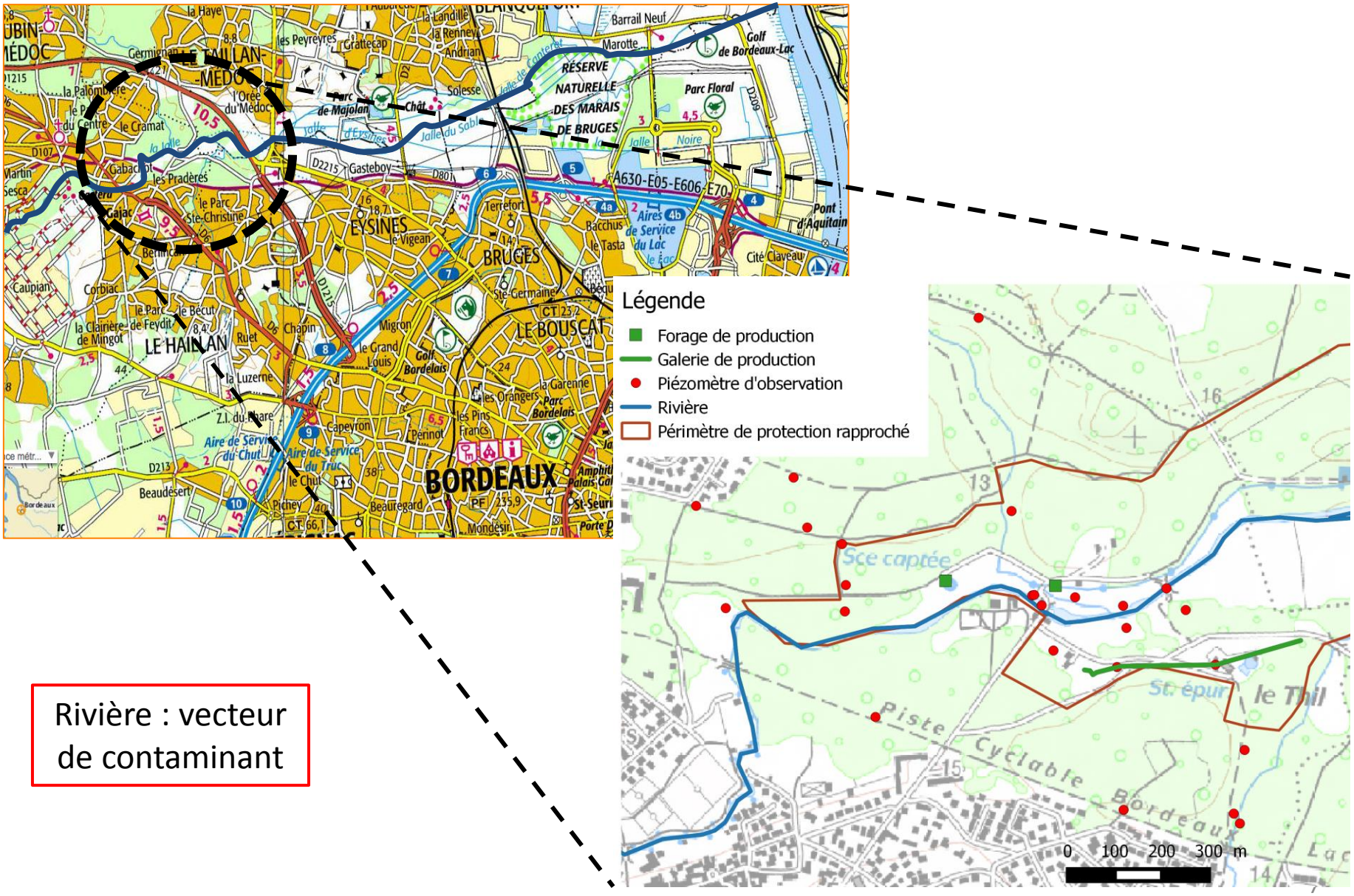




Echelle de la colonne eau-sédiment

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

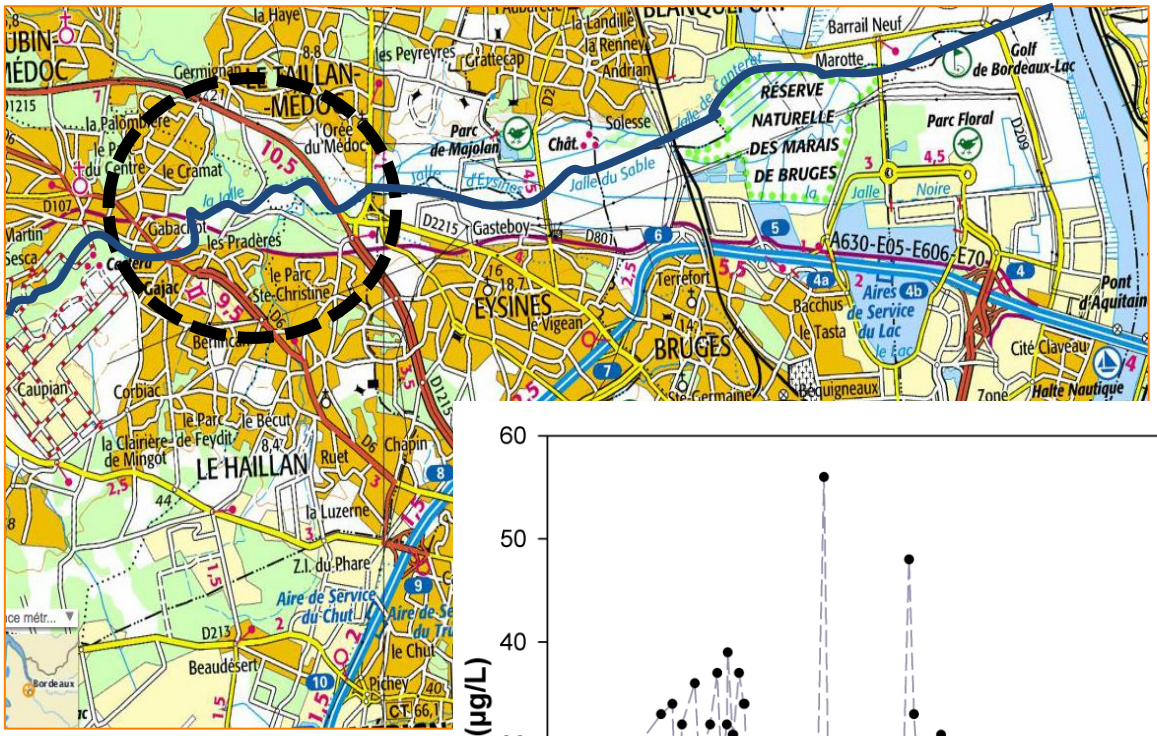
Contexte

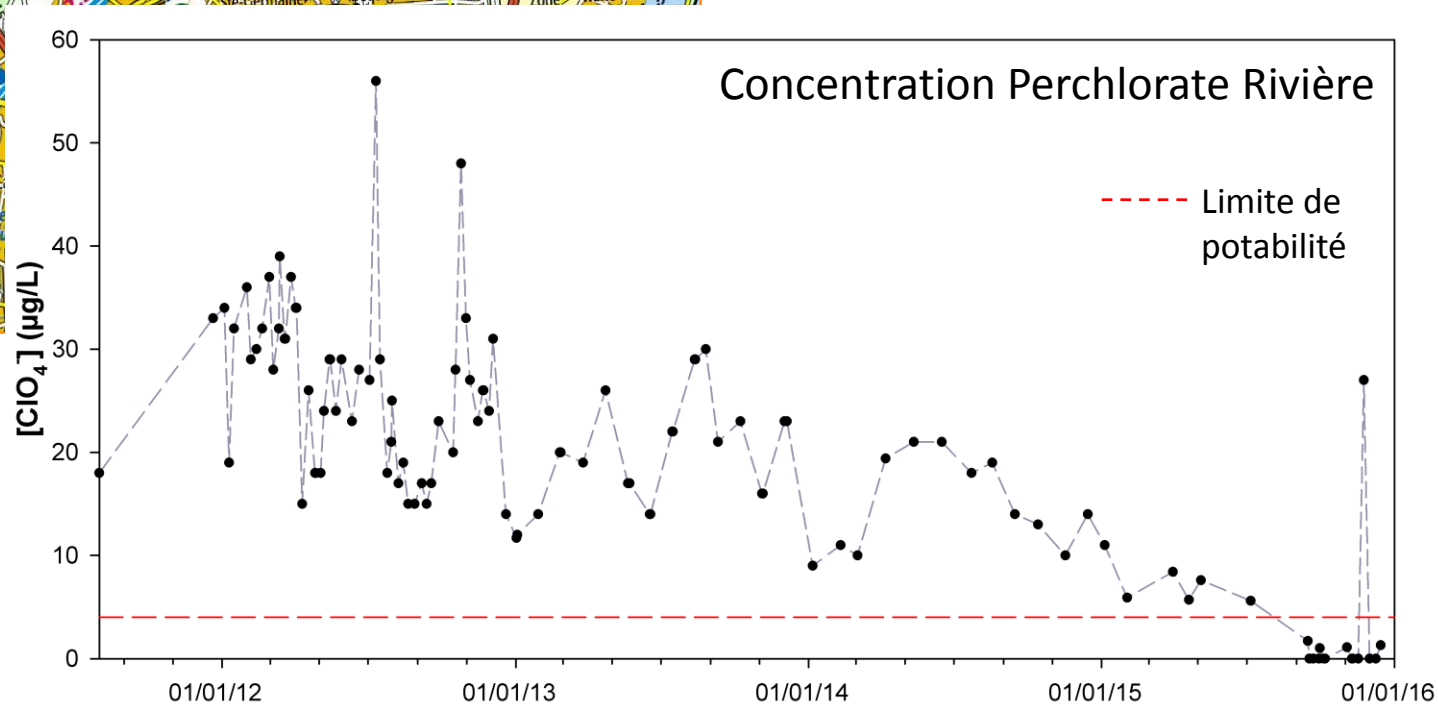


Rivière : vecteur de contaminant

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

Contexte

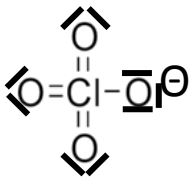




Rivière : vecteur de contaminant

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

L'ion perchlorate



- Origine : perchlorate d'ammonium NH_4ClO_4
- Perturbateur endocrinien
- Sources multiples : explosif, blanchisserie, airbag, feu d'artifice, industrie, pesticides …

- Très soluble dans l'eau
- Faible adsorption
- Traceur ?

Objectifs de l'étude :

Caractériser et quantifier les flux de perchlorates au sein du bassin versant et notamment à l'interface rivière / nappe d'accompagnement

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

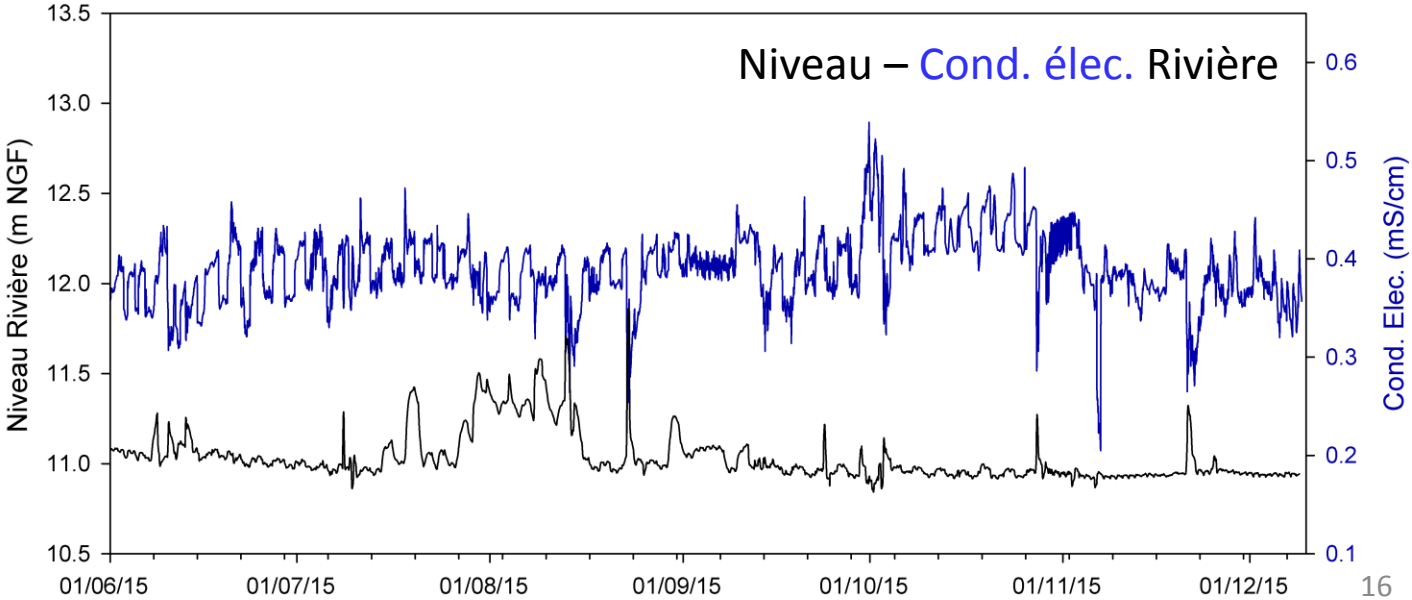
*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*

- Isotopes stables de l'eau
- Anions et cations majeurs
- Conductivité électrique, température et pH (haute fréquence)

Préleveur automatique

Sondes multi-paramètres

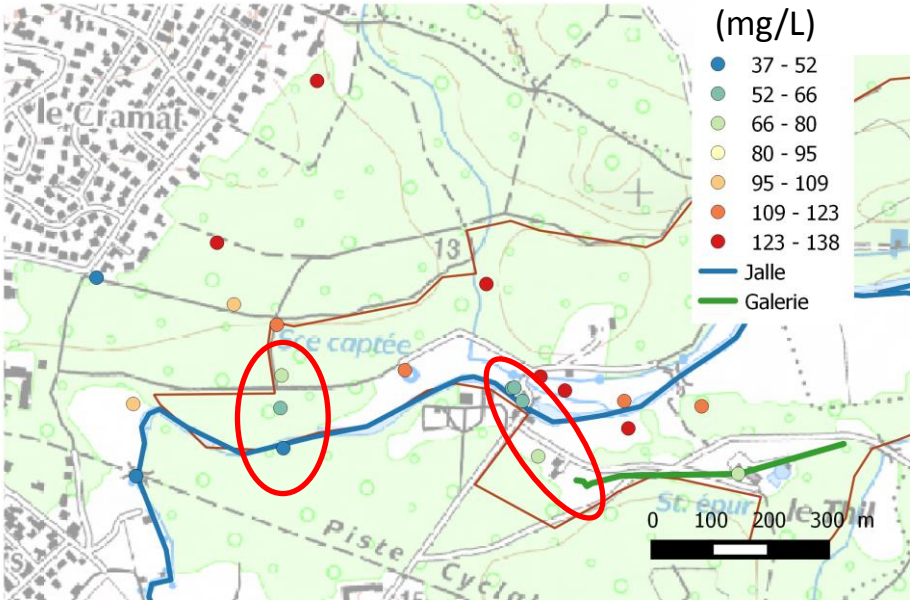
Spectromètre d'absorption laser LGR



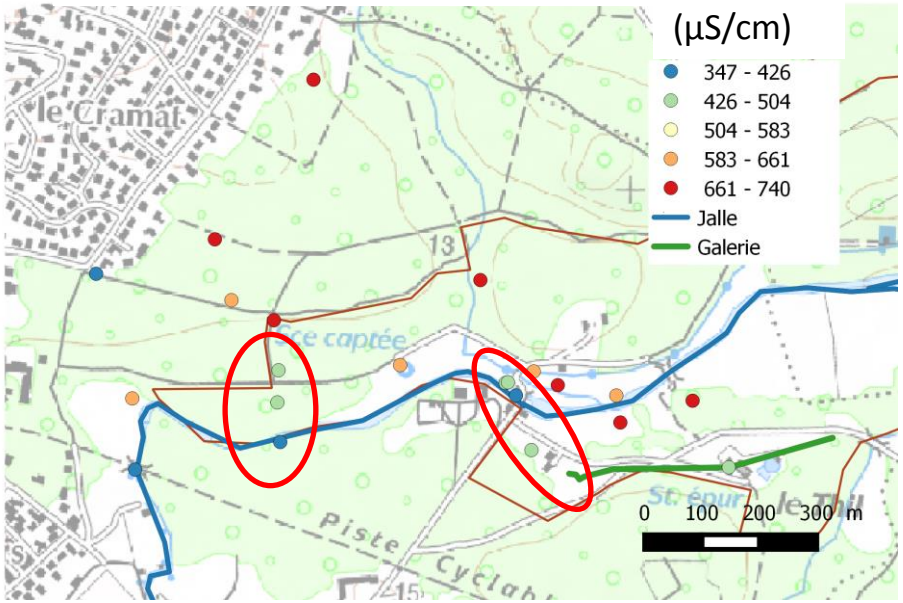
Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*

Concentration en Ca^{2+}



Conductivité électrique



Octobre 2014

- Composition géochimique : rivière ≠ eau souterraine
- Zones à composition géochimique intermédiaire entre rivière et eau souterraine

Mise en évidence d'écoulement : rivière → nappe d'accompagnement

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*

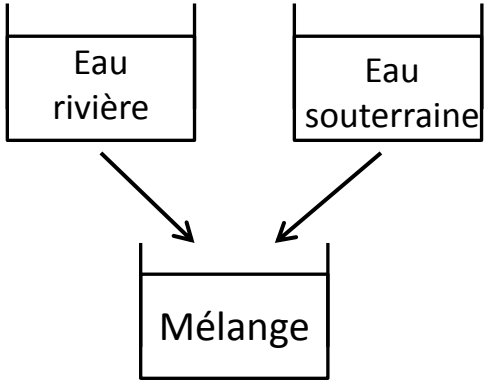
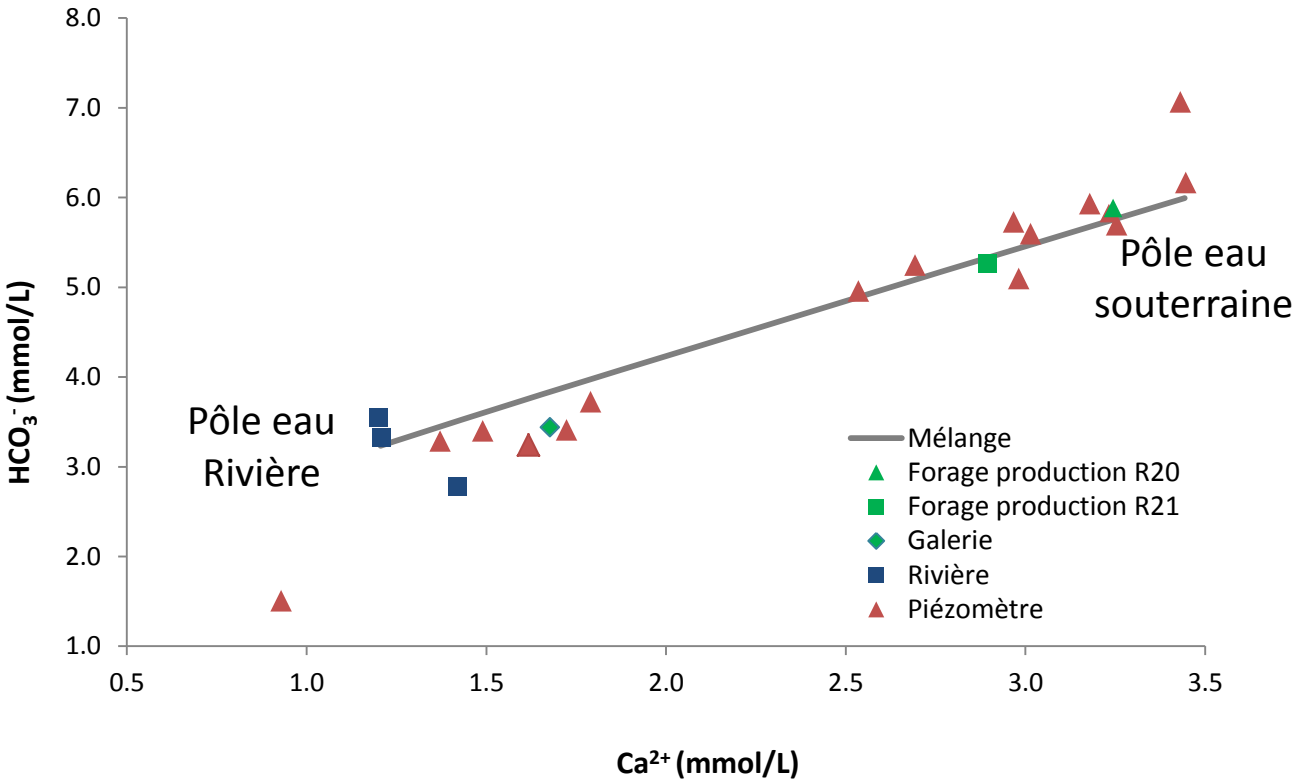


Schéma du modèle de mélange

Modélisation Phreeqc



Quantification des flux rivière → nappe d'accompagnement

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*

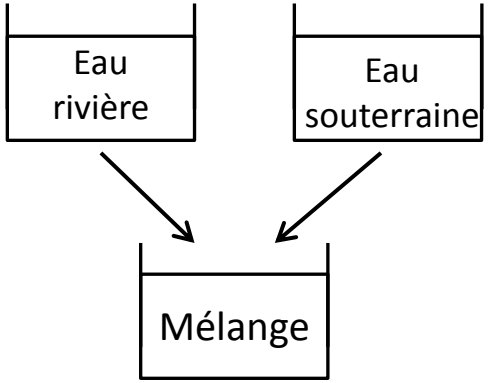
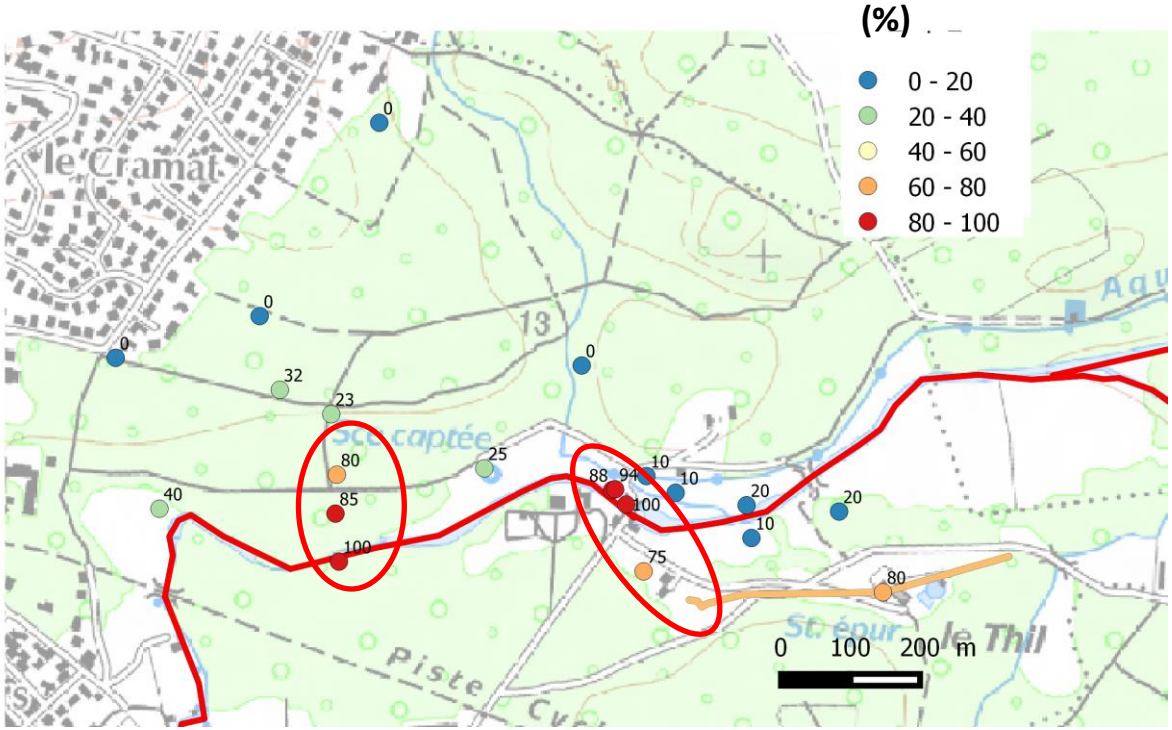


Schéma du modèle de mélange

Modélisation Phreeqc

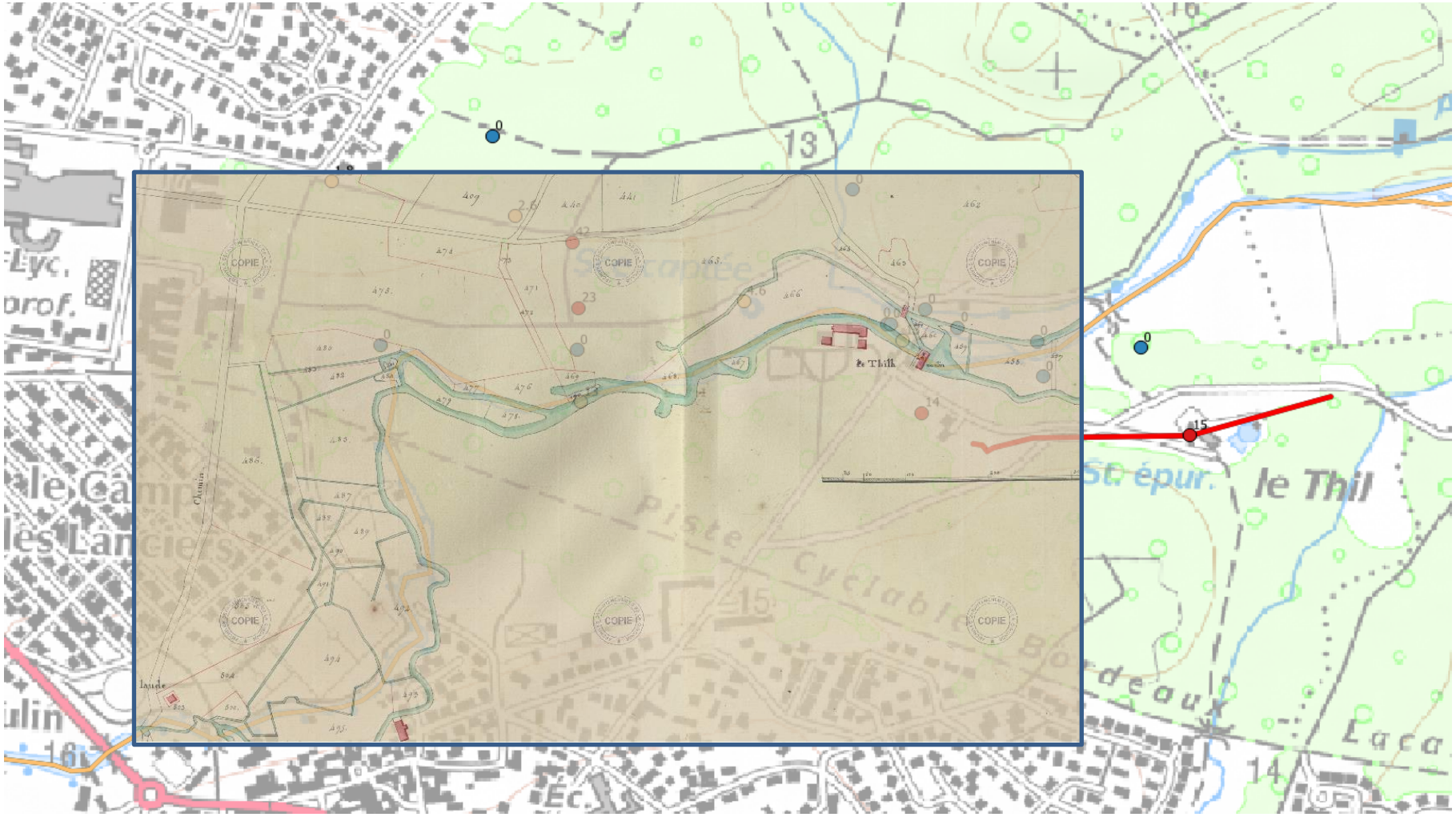
Proportion d'eau de « rivière »



Quantification des flux rivière → nappe d'accompagnement

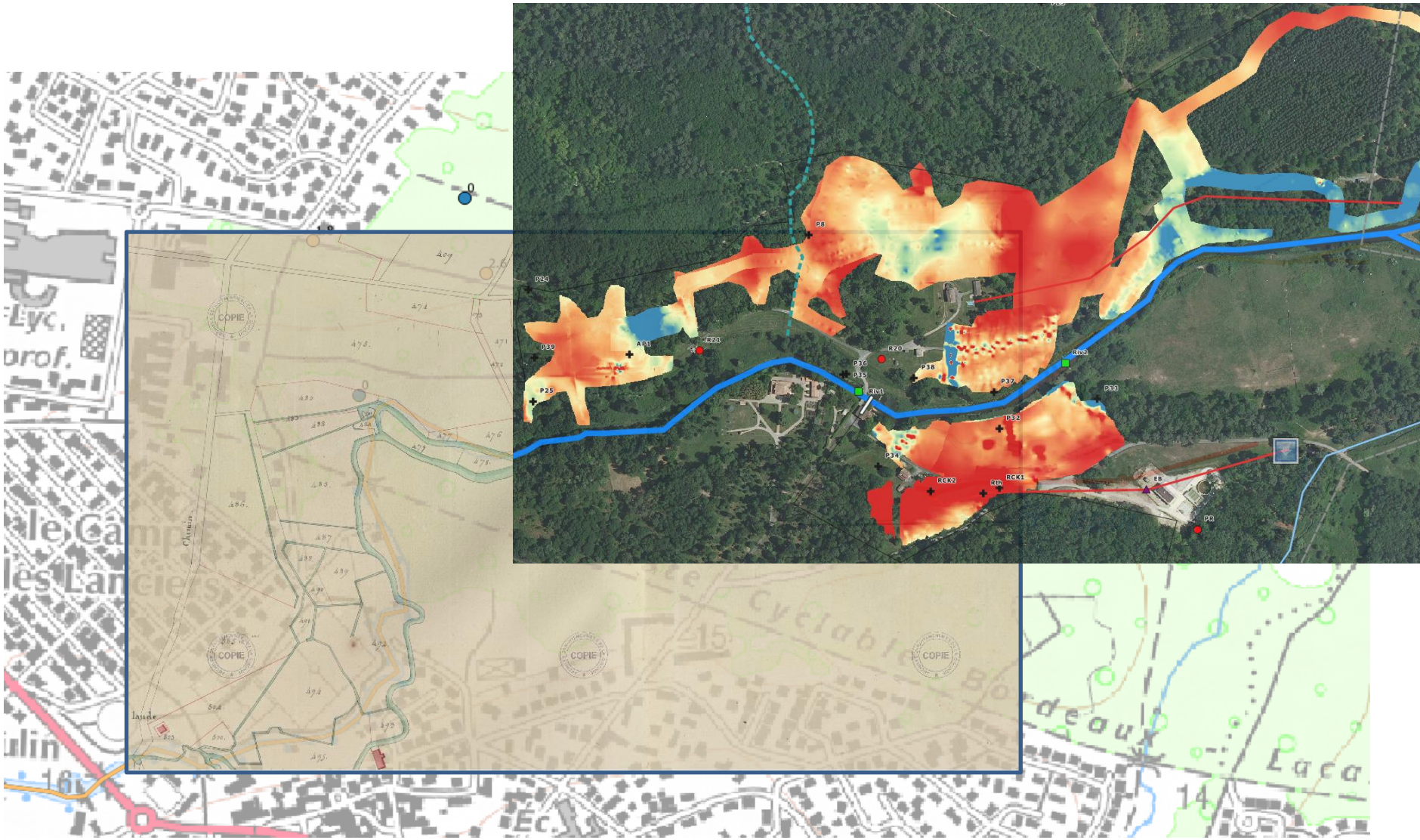
Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*



Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : **Traceurs géochimiques** – Modélisation hydrodynamique et transport*



Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

Approche couplée : Traceurs géochimiques – ***Modélisation hydrodynamique et transport***

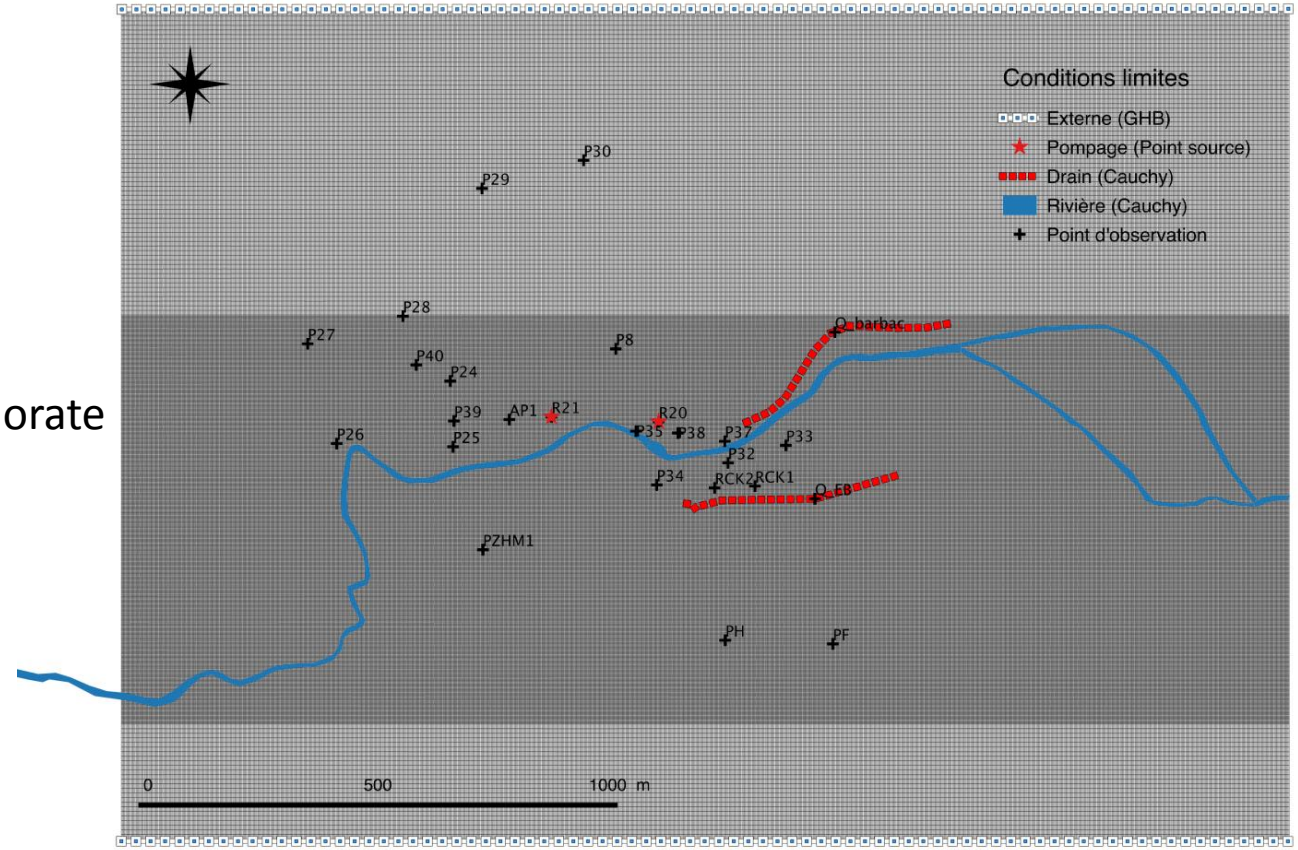
Caractéristique du modèle :

- Modèle Modflow (différences finies) et MT3DMS

- Rivière : condition de type Cauchy

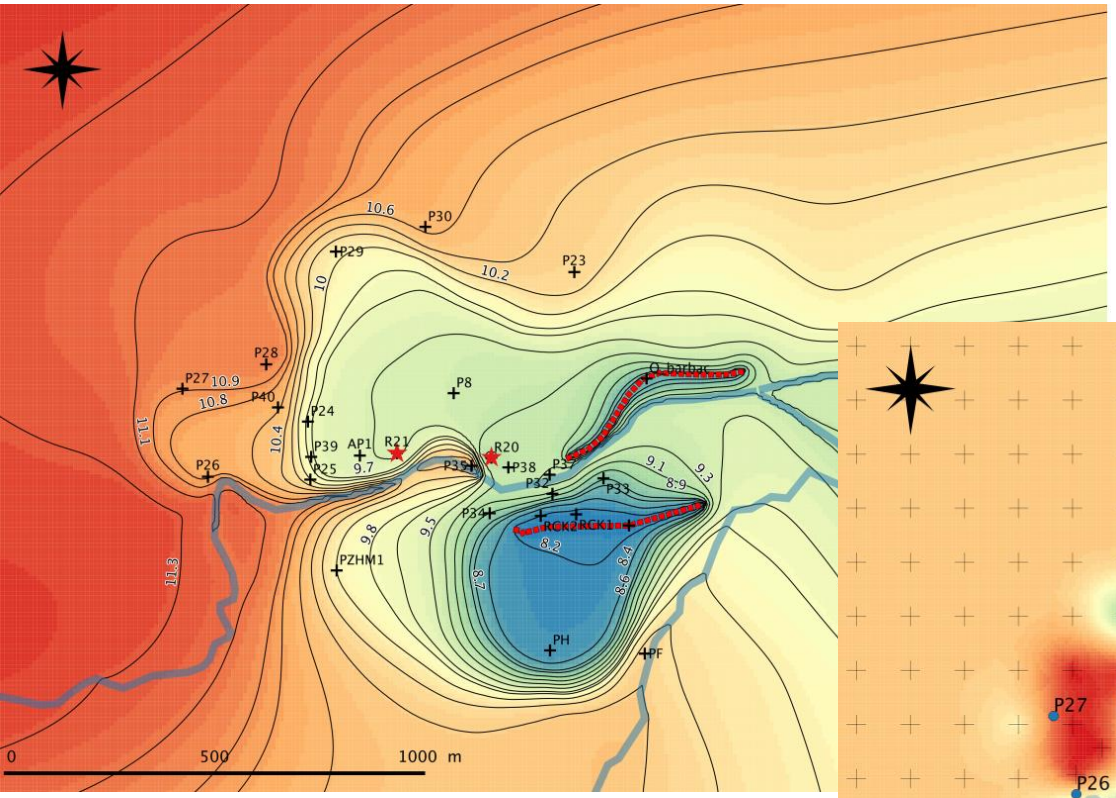
- Hydrodynamique :
  - niveau rivière
  - niveau piézométrique
  - débit de production

- Transport :
  - concentration en perchlorate
  - rapport de mélange

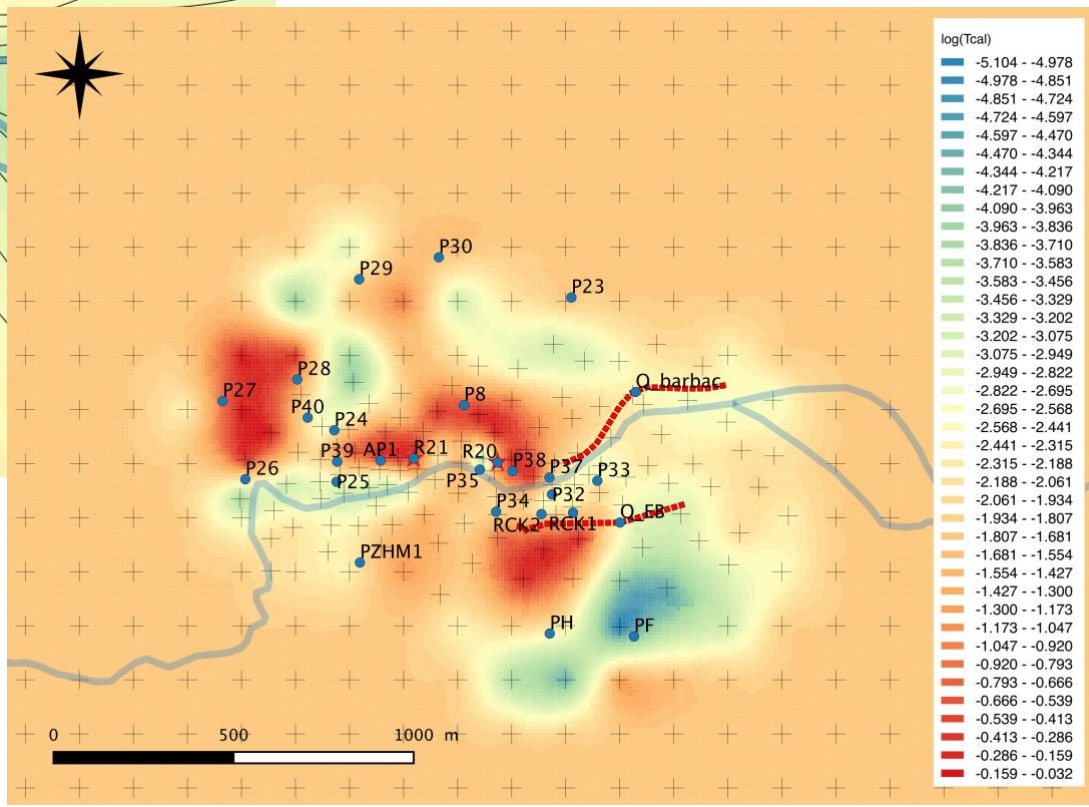


Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : Traceurs géochimiques – **Modélisation hydrodynamique et transport***



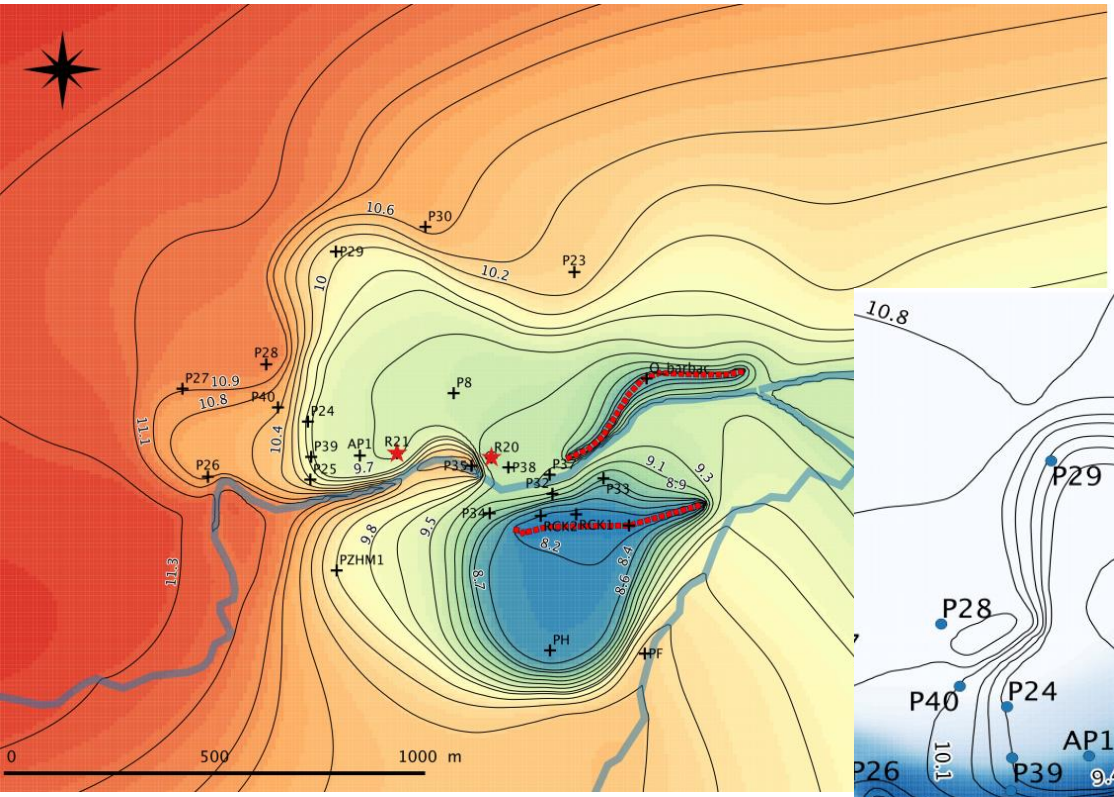
Carte piézométrique modélisée



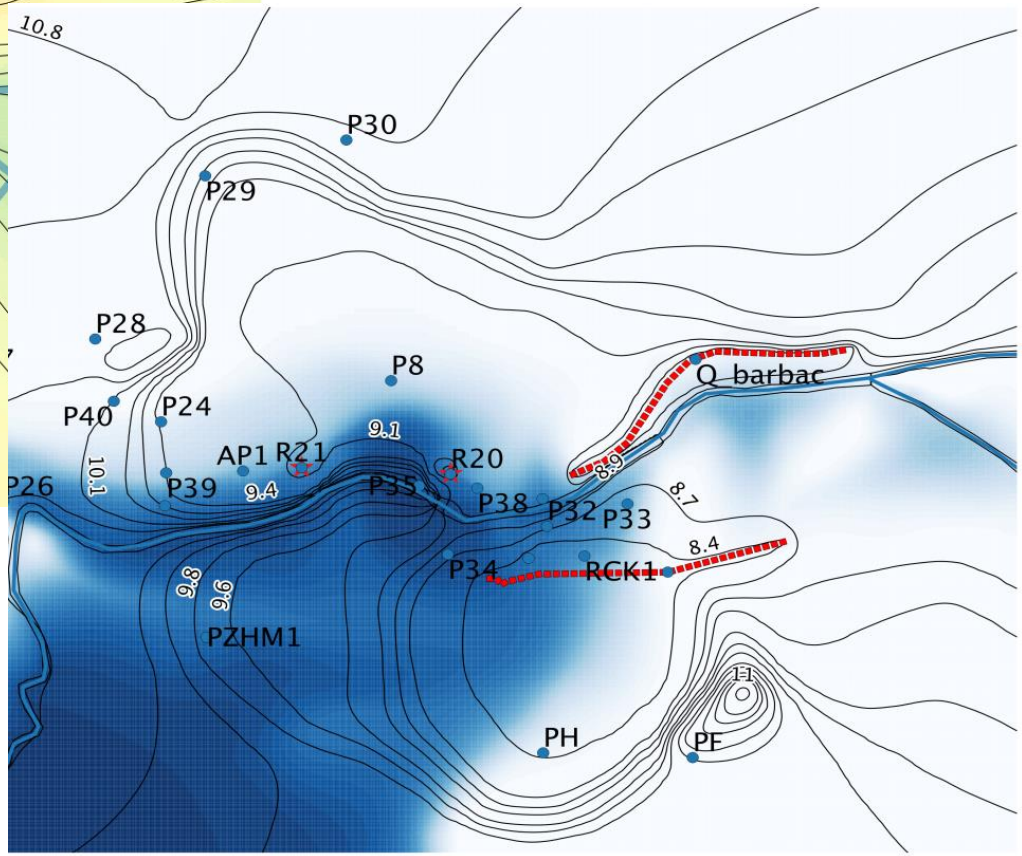
Carte des transmissivités estimées

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

*Approche couplée : Traceurs géochimiques – **Modélisation hydrodynamique et transport***

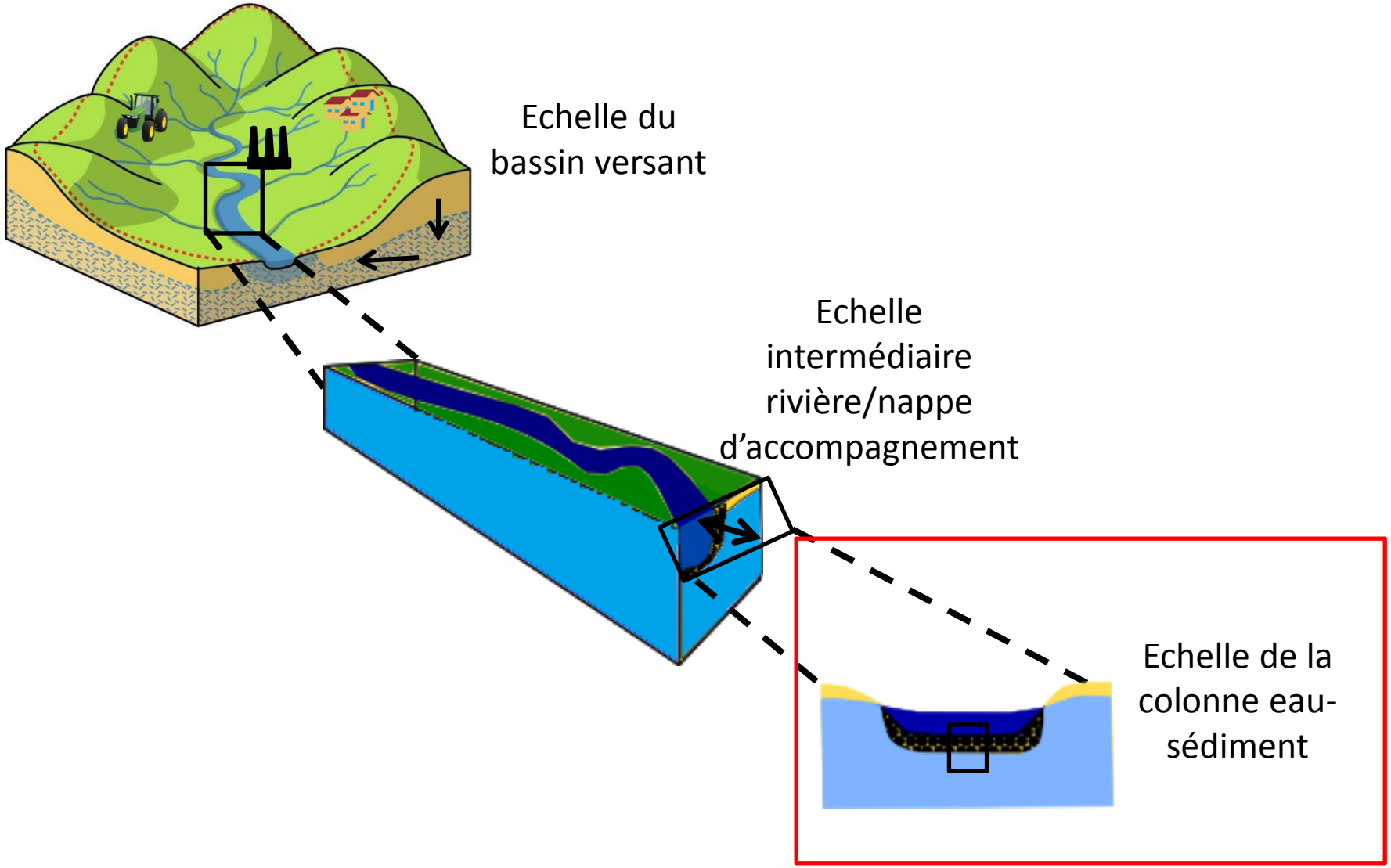


Carte piézométrique modélisée



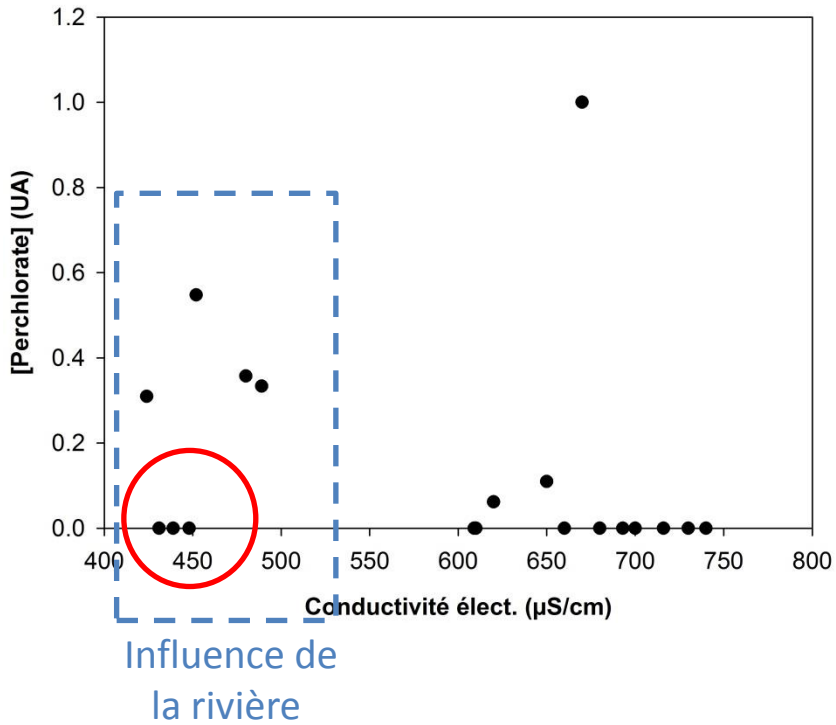
Transfert de masse à partir de la rivière

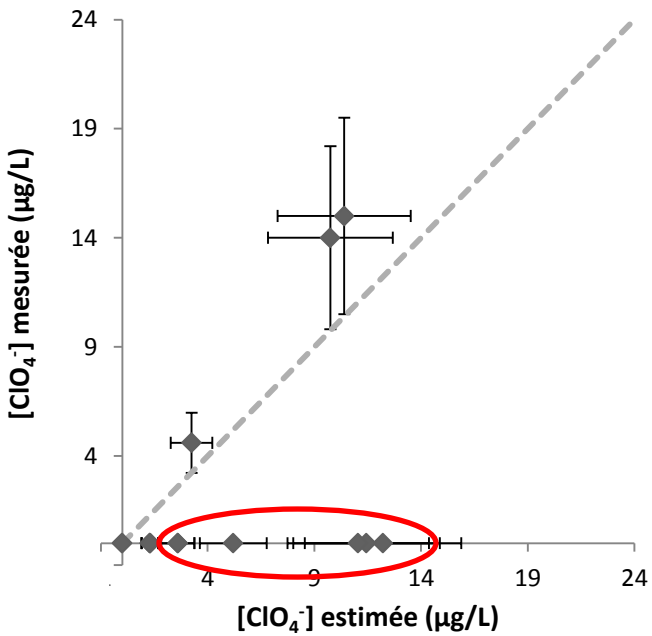
Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)



Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

Processus de transfert de perchlorate au niveau du lit de la rivière





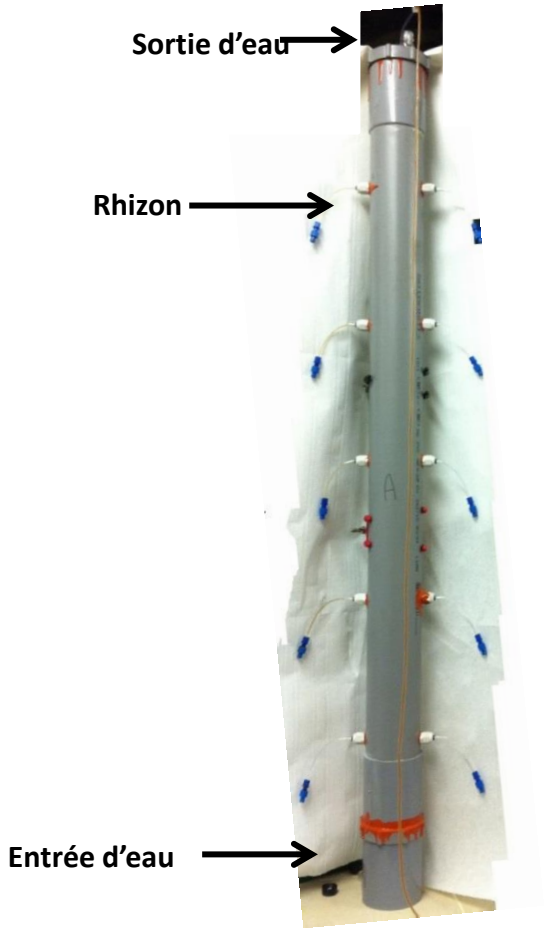
Ineris, 2014 : « **Aucun processus de dégradation des perchlorates dans l'environnement** n'a été clairement mis en évidence. Des expériences en laboratoire suggèrent que les ions perchlorate peuvent être dégradés par des microbes en conditions anaérobies dans le sol et l'eau, bien que la présence de sulfates et de nitrates dans l'environnement atténue ce processus. »

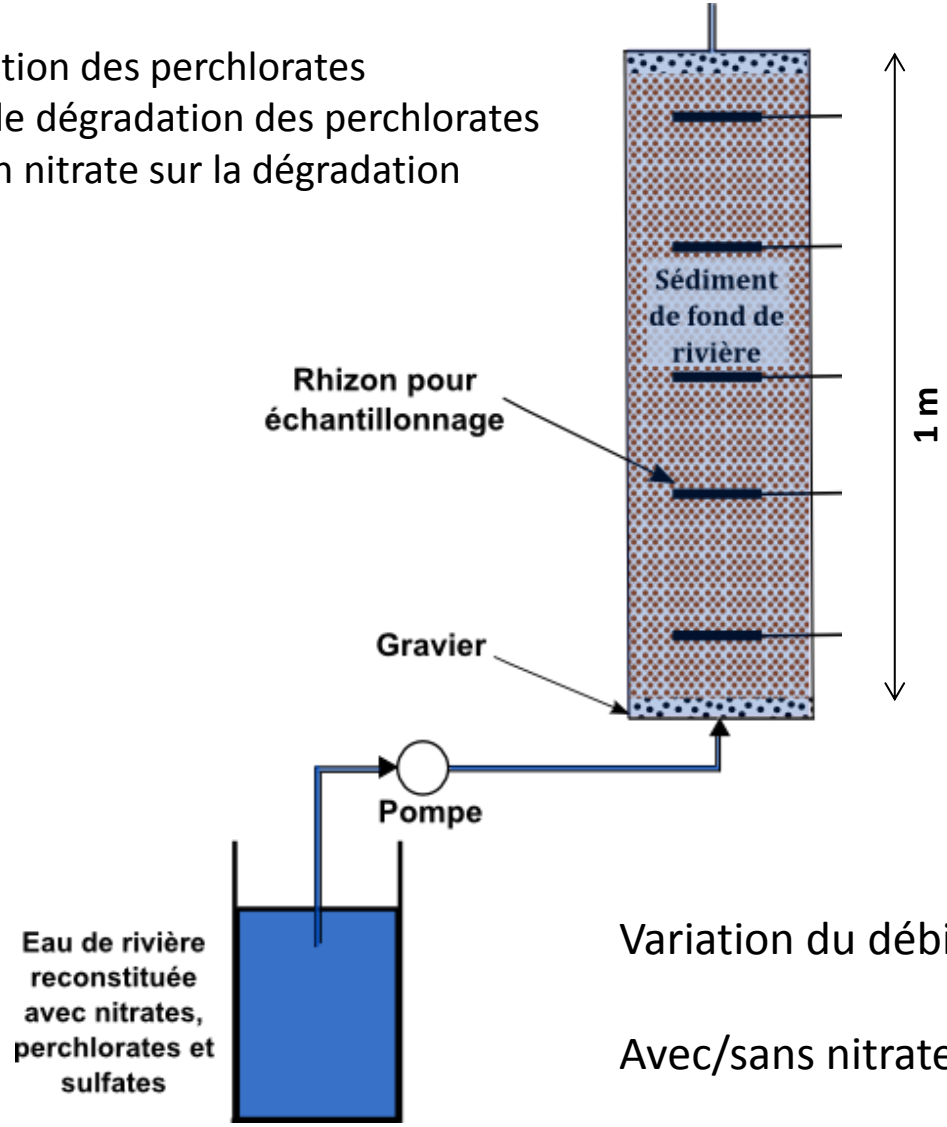
Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

Processus de transfert de perchlorate au niveau du lit de la rivière : expérience en colonne

Objectifs **:**

- Mise en évidence de la dégradation des perchlorates
- Détermination de la cinétique de dégradation des perchlorates
- Influence de la concentration en nitrate sur la dégradation





Variation du débit d'entrée

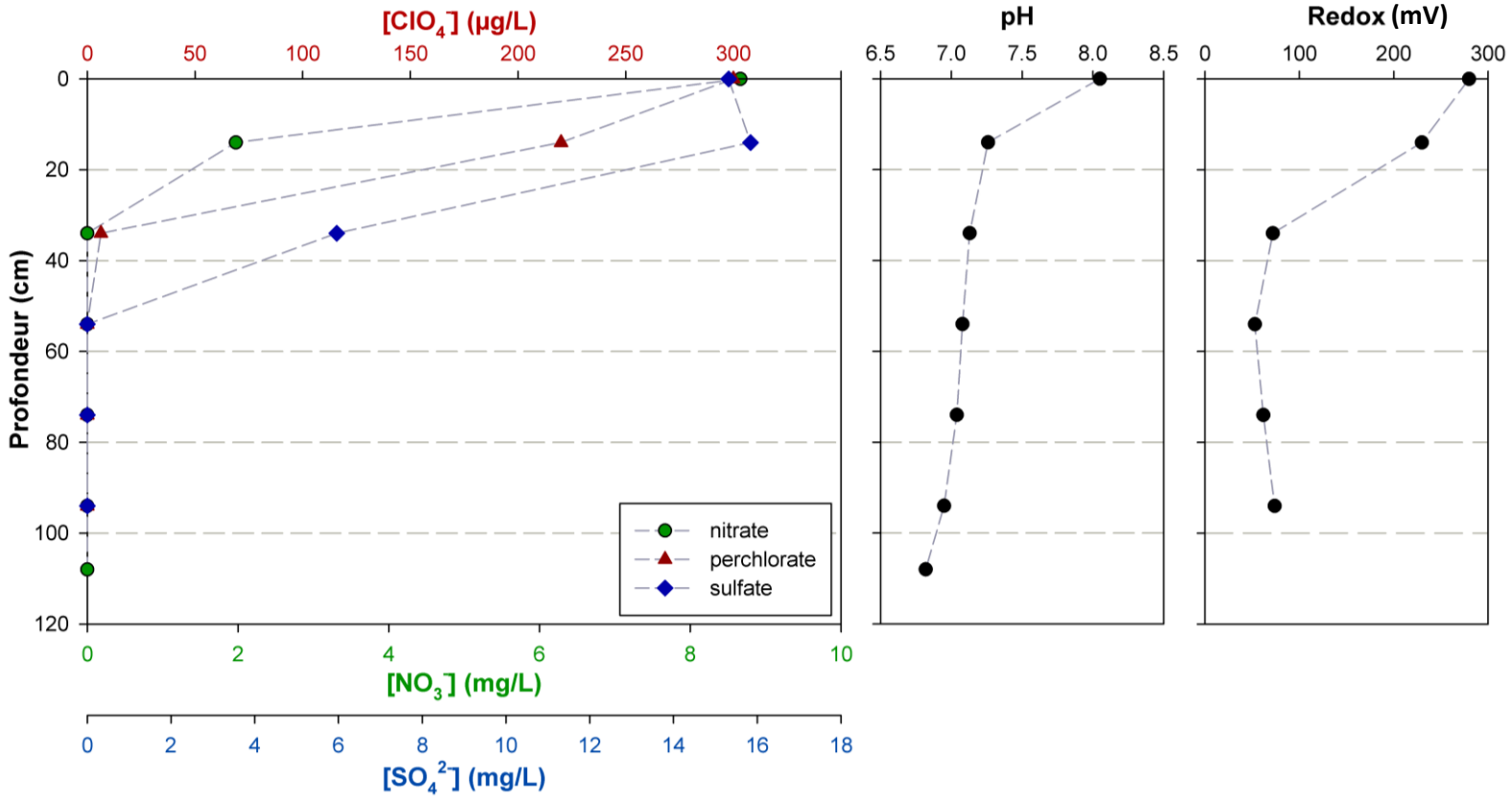
Avec/sans nitrate

Colonne de sédiments de fond de rivière remaniés

Transferts de contaminants par le système riverain : Perchlorate (Gironde)

Processus de transfert de perchlorate au niveau du lit de la rivière : expérience en colonne

Résultats : Injection 1: Débit (400 ml/ jour)

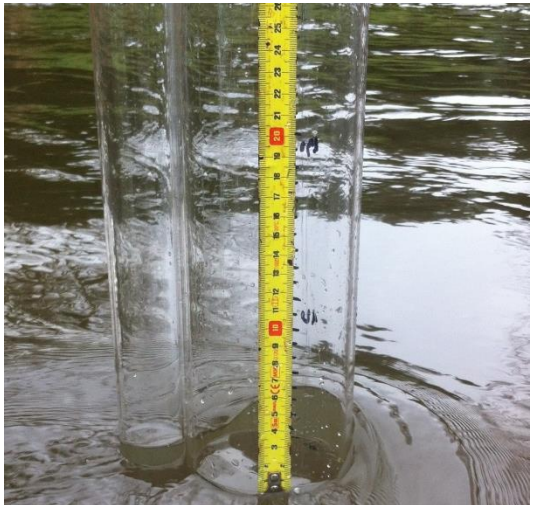


Mise en évidence de la dégradation des perchlorates dans les sédiments de fond de rivière

Transferts de contaminants par le système riverain

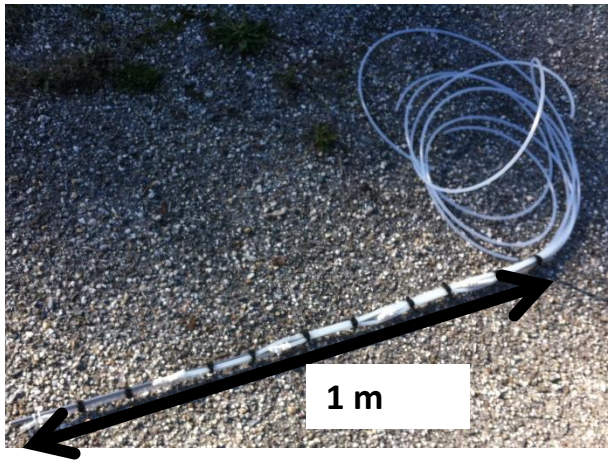
Dégradation des perchlorates : Mesures in-situ

Mesure de la perméabilité du fond de rivière



Mise en évidence d'un flux rivière - nappe

Prélèvement de sédiments de fond de rivière

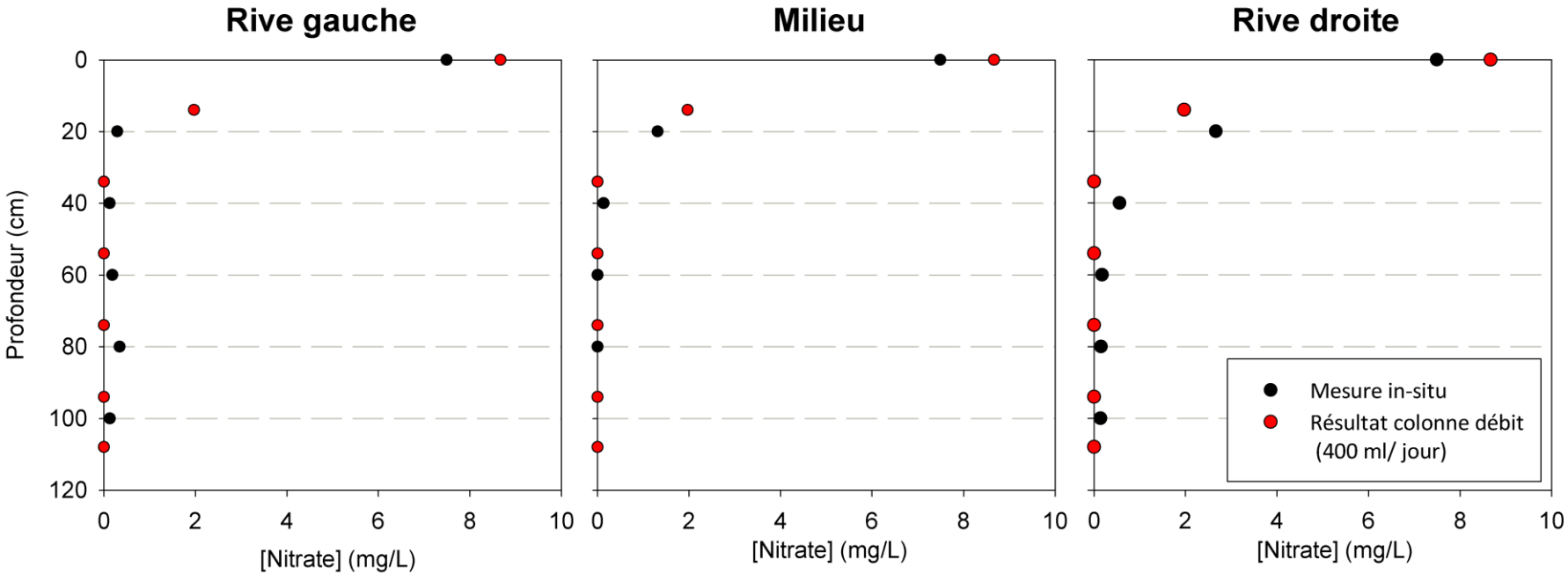


Matériel pour prélèvement d'eau dans sédiments de fond de rivière

Emplacements des zones de prélèvement de l'eau dans les sédiments de fond de rivière

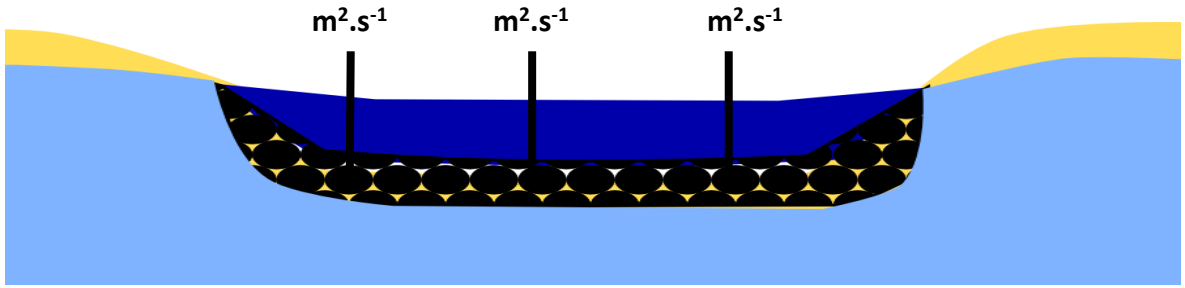
Transferts de contaminants par le système riverain

Dégradation des perchlorates : Mesures in-situ



K: 7,16 10 $^{-5}$ K: 4,73 10 $^{-4}$ K: 1,09 10 $^{-4}$

$m^2.s^{-1}$ $m^2.s^{-1}$ $m^2.s^{-1}$



Hétérogénéité du lit de la rivière (sédimentologie) → variabilité des flux d'eau et de processus de dégradation de contaminants

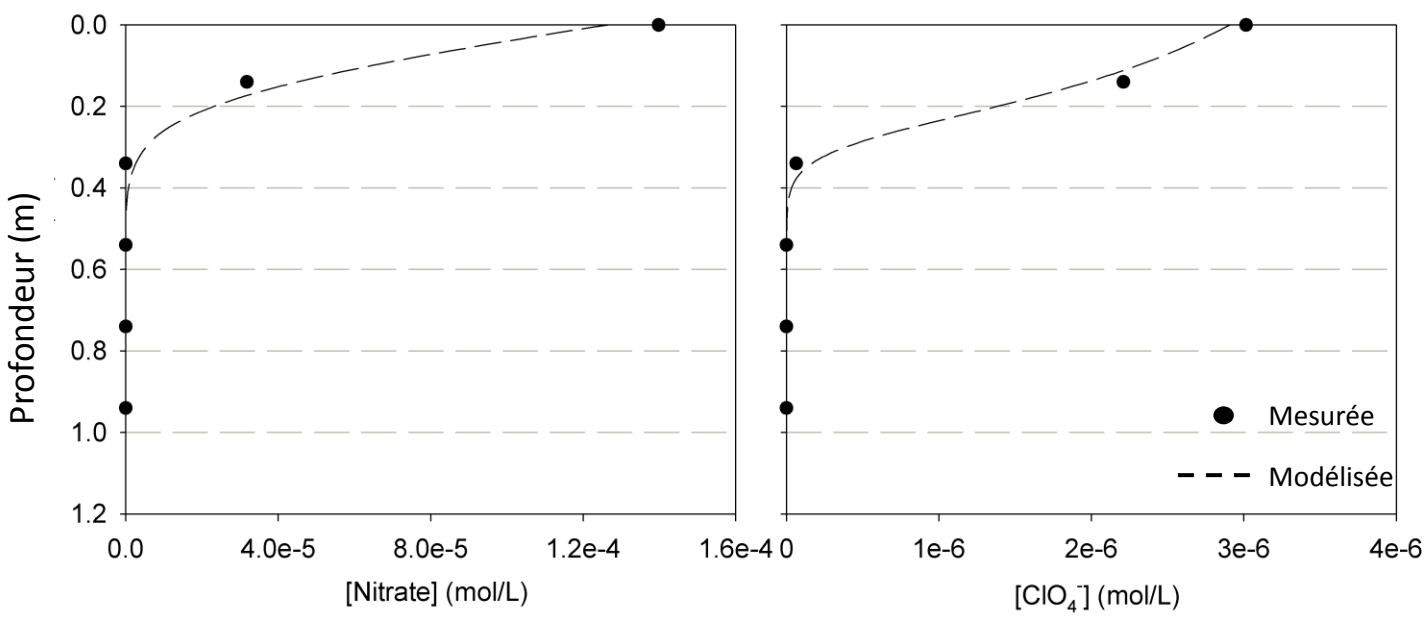
Transferts de contaminants par le système riverain

Dégradation des perchlorates : Modélisation

Chemin de réduction des perchlorates : $ClO_4^- \rightarrow ClO_3^- \rightarrow ClO_2^- \rightarrow Cl^- + O_2$

Modélisation : cinétique de Monod avec inhibition par les nitrates

$$\frac{d[ClO_4^-]}{dt} = k_{ClO_4^-} \frac{[ClO_4^-]}{K_{S\,ClO_4^-} + [ClO_4^-]} \times \underbrace{\frac{k_inb_nit}{k_{inb_{nit}} + [nit]} k_inb_nit}_{\text{Inhibition par les nitrates}}$$



$K_{NO_3^-} = 9.10^{-9}$ mol.s $^{-1}$

$K_{ClO4} = 1.10^{-7}$ mol.s $^{-1}$

Conclusions et perspectives

MESURES terrain/laboratoire → **TRAITEMENT DE DONNEES** → **MODELISATION numérique**

Physiques :
- précipitation /débit /nv. piézo

Géochimiques :
- cond. élec., temp.
- anions et cations majeurs
- δ^2H, $\delta^{18}O$
- $\delta^{13}C_{CITD}$, $A^{14}C$
- radon
- CFCs, SF_6, ^{85}Kr, ^{39}Ar
- contaminants

Analyses corrélatoires et spectrales

Analyses statistiques

SIG

Hydrodynamique

Transport

Transport réactif

Géochimie

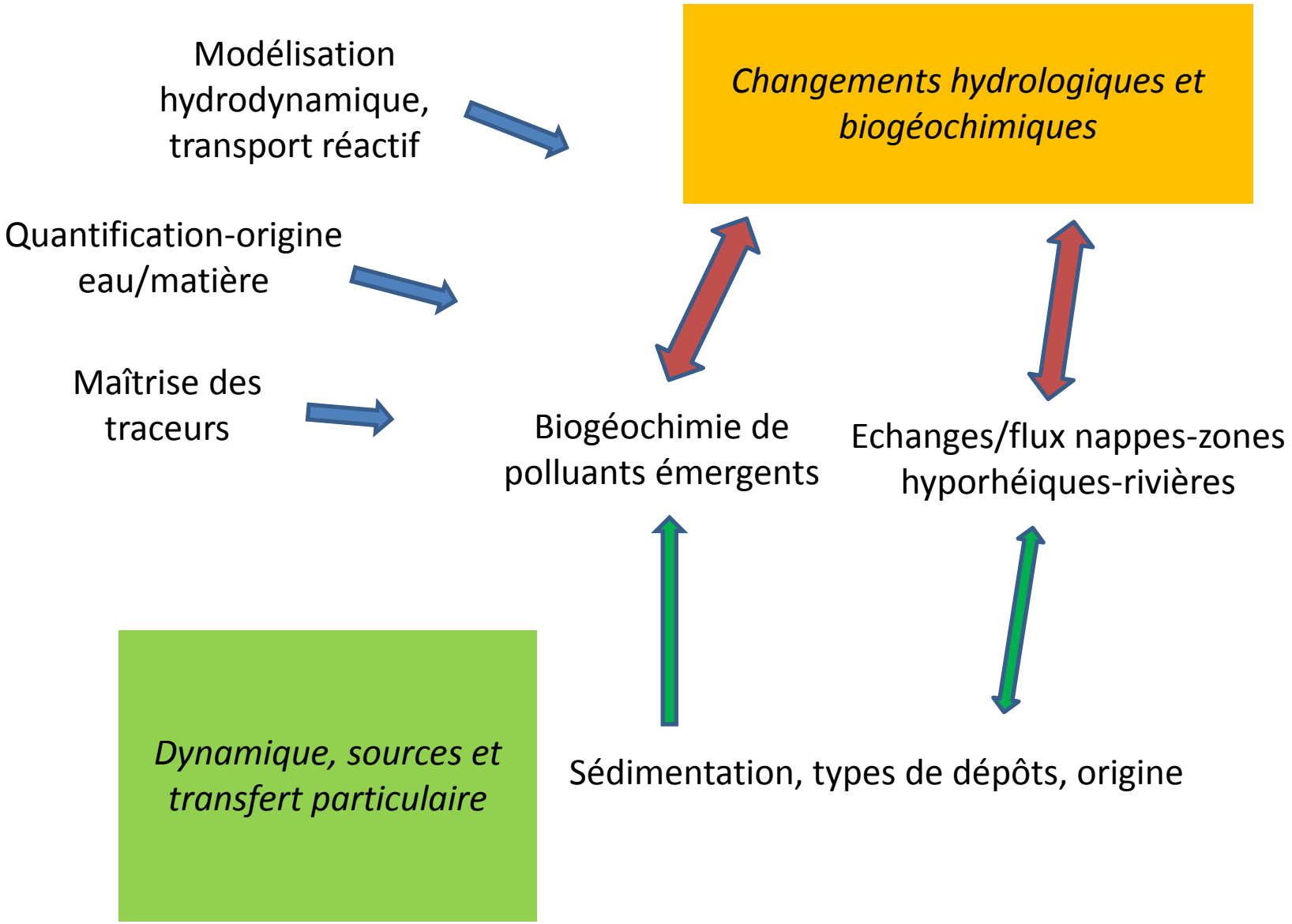
- Sources
- Quantification des flux de matière
- Mise en évidence de processus

Comparaison entre facteurs (anthropiques, hydrogéologiques, morphologiques, géomorphologiques) et processus de transfert

Analyses corrélatoires : variabilité temporelle des paramètres et des processus

- Quantification
- Caractérisation des flux et des processus

Conclusions et perspectives



Merci de votre attention