



CONTAMINATION DES EAUX SOUTERRAINES KARSTIQUES

Généralités et exemples jurassiens

Aurélien Vallet, Jean-Baptiste Charlier

BRGM

a.vallet@brgm.fr, j.charlier@brgm.fr

Pôle Karst « Pollutions des hydrosystèmes karstiques : où, quand, comment ? »



Notions de base

Paysages karstiques

Karst = dissolution des roches carbonatées par l'eau (acide)

Nombreuses manifestations en surface et dans le sous-sol

Très forte Hétérogénéité spatiale du milieu (verticale et latérale)

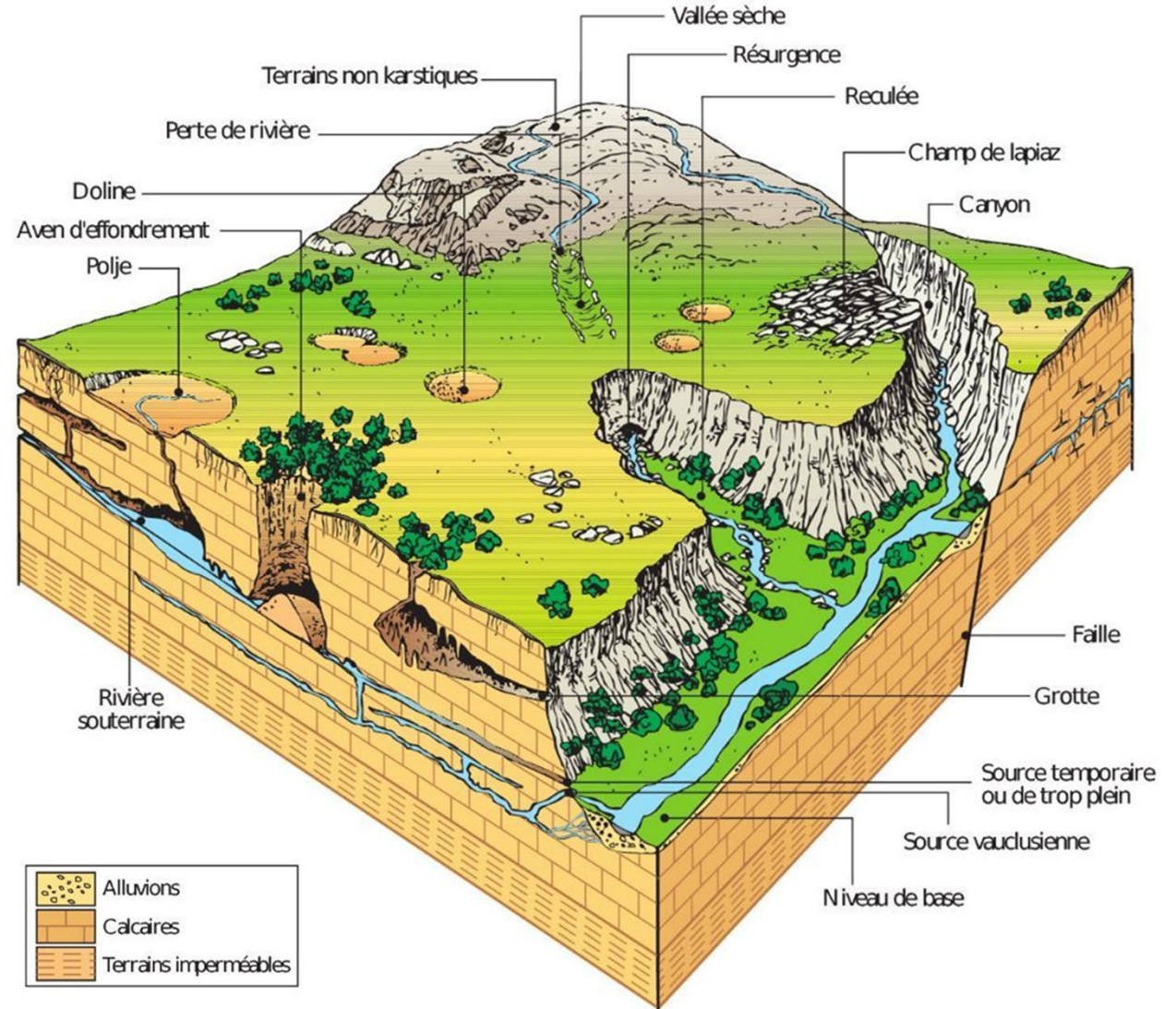
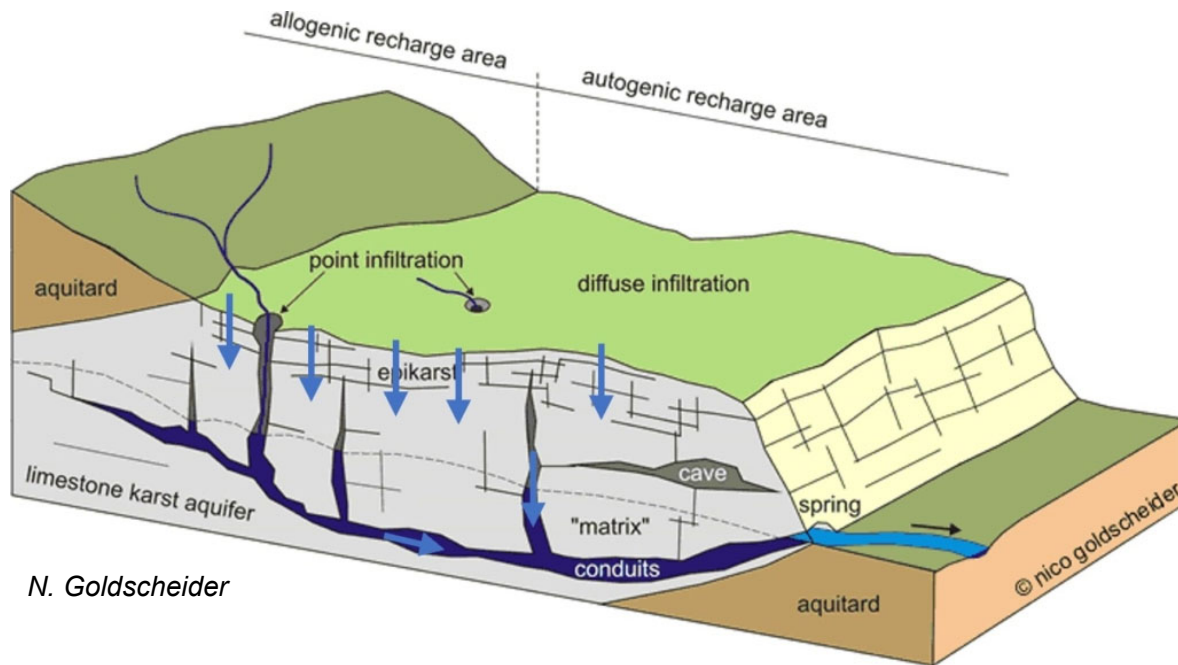


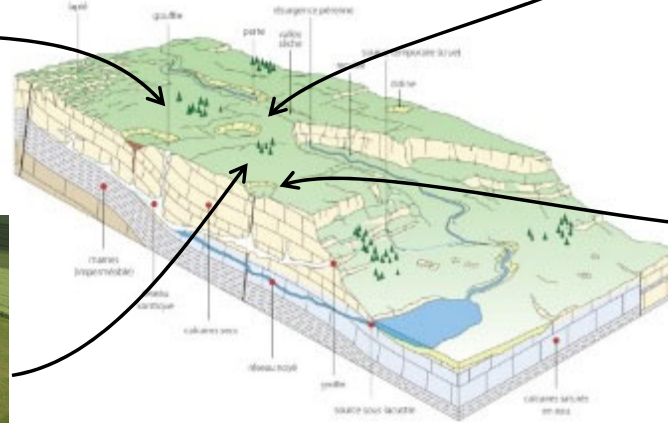
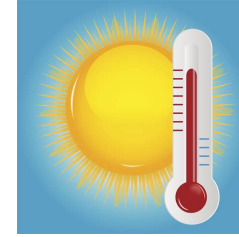
Schéma conceptuel



- **Vides**
 - Ouverture importante -> écoulements turbulents
→ Transferts rapides et lois d'écoulement complexe
 - Organisés -> connexion + hiérarchisation des écoulements
- **Dualité de la recharge et des écoulements**
 - Matrice microfissurée + ou - connectée: recharge diffuse - stockage et débit de base
 - Conduit: recharge localisée – drainage et débit évènementiel
- **Milieu vulnérable aux contaminations**
 - Peu de sol + infiltration localisée
 - Transfert très rapide
 - Organisation complexe à modéliser

→ TRANSFERT DE MASSE IMPORTANT LORS DE CRUE SANS FILTRATION / DILUTION DU MILIEU

Spécificités des hydrosystèmes karstiques

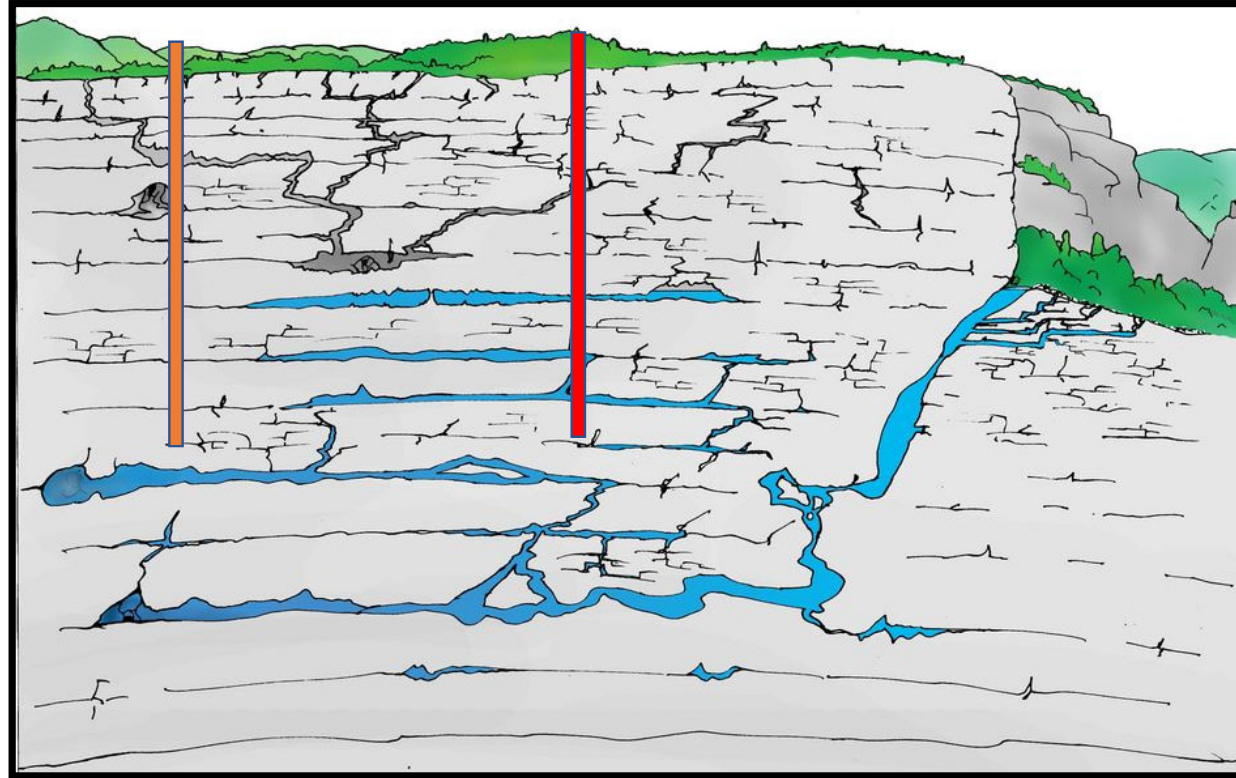


Relations peu explicites entre pressions climatiques & anthropiques et conséquences environnementales

Quel est l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux?

Etude des karsts

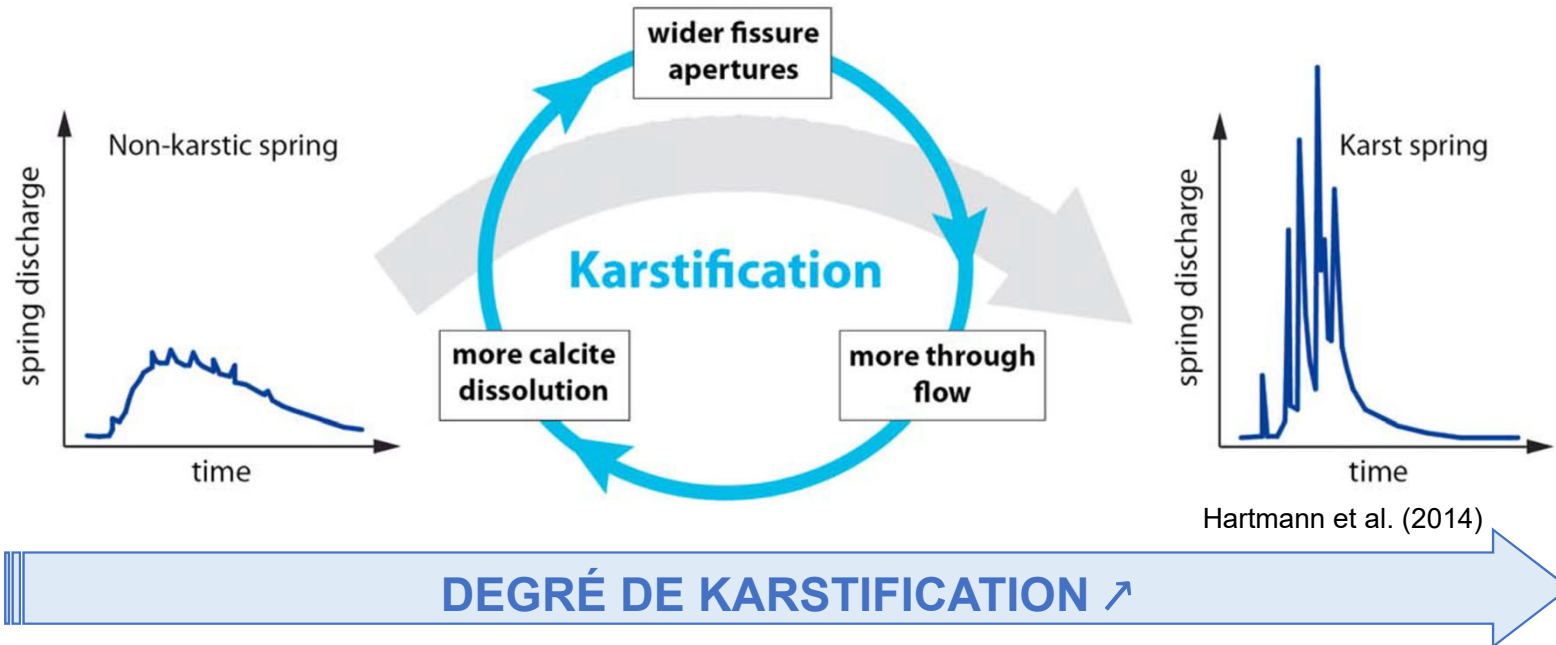
- Hydrogéologie classique (piézométrie) peu adaptée face à la dualité des écoulements et à l'hétérogénéité spatiale du milieu



Etude des karsts

- Hydrogéologie classique (piézométrie) peu adaptée face à la dualité des écoulements et à l'hétérogénéité spatiale du milieu
- Réponse hydrodynamique et hydrochimique des sources karstiques porte la signature du comportement hydrodynamique de l'ensemble de l'hydrosystème dont elles constituent l'exutoire (signal intégrateur)

VARIABILITÉ DES RÉPONSES EN FONCTION DES CONDITIONS DE BE ET HE





Transport de soluté et de contaminants dans les karsts

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

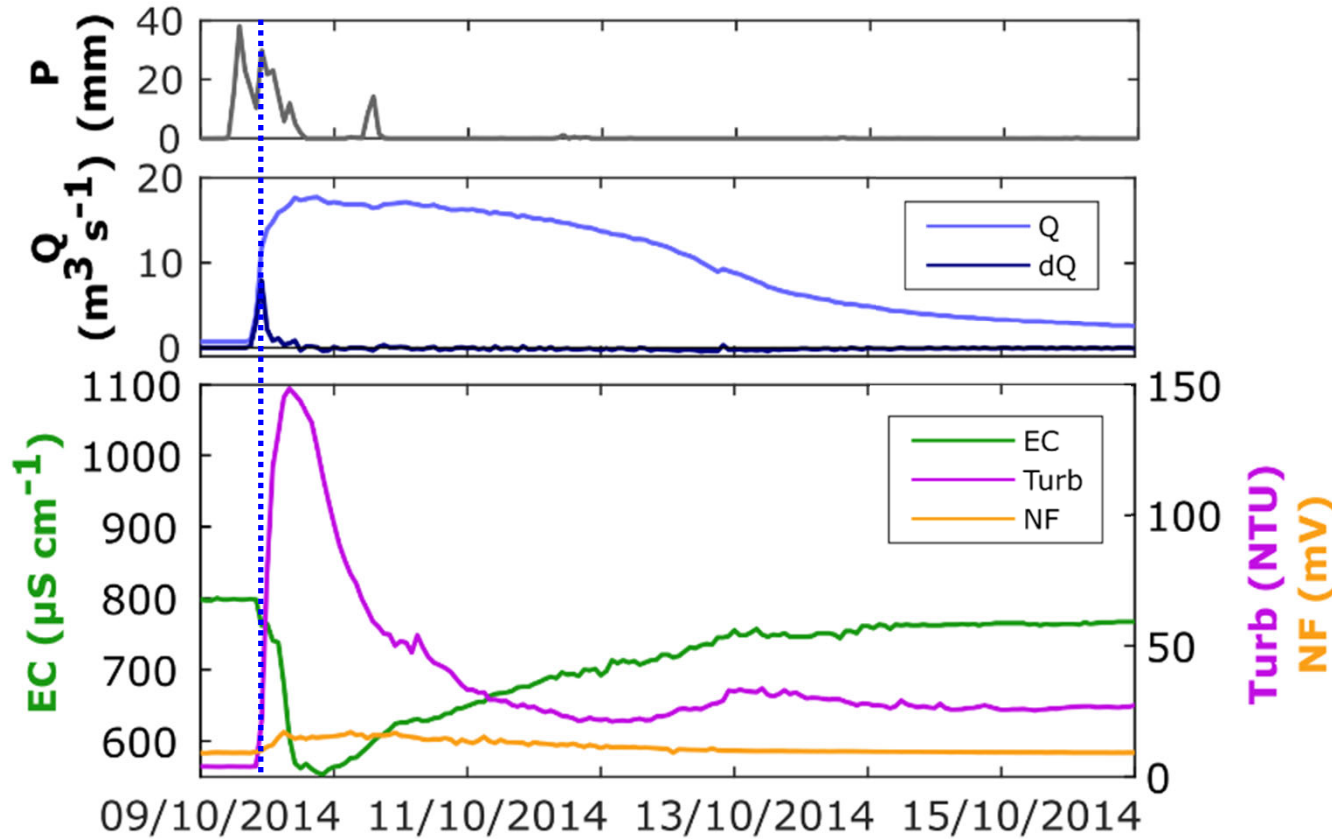


Contamination eaux usées (MO) + turbidité

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE HAUTES EAUX



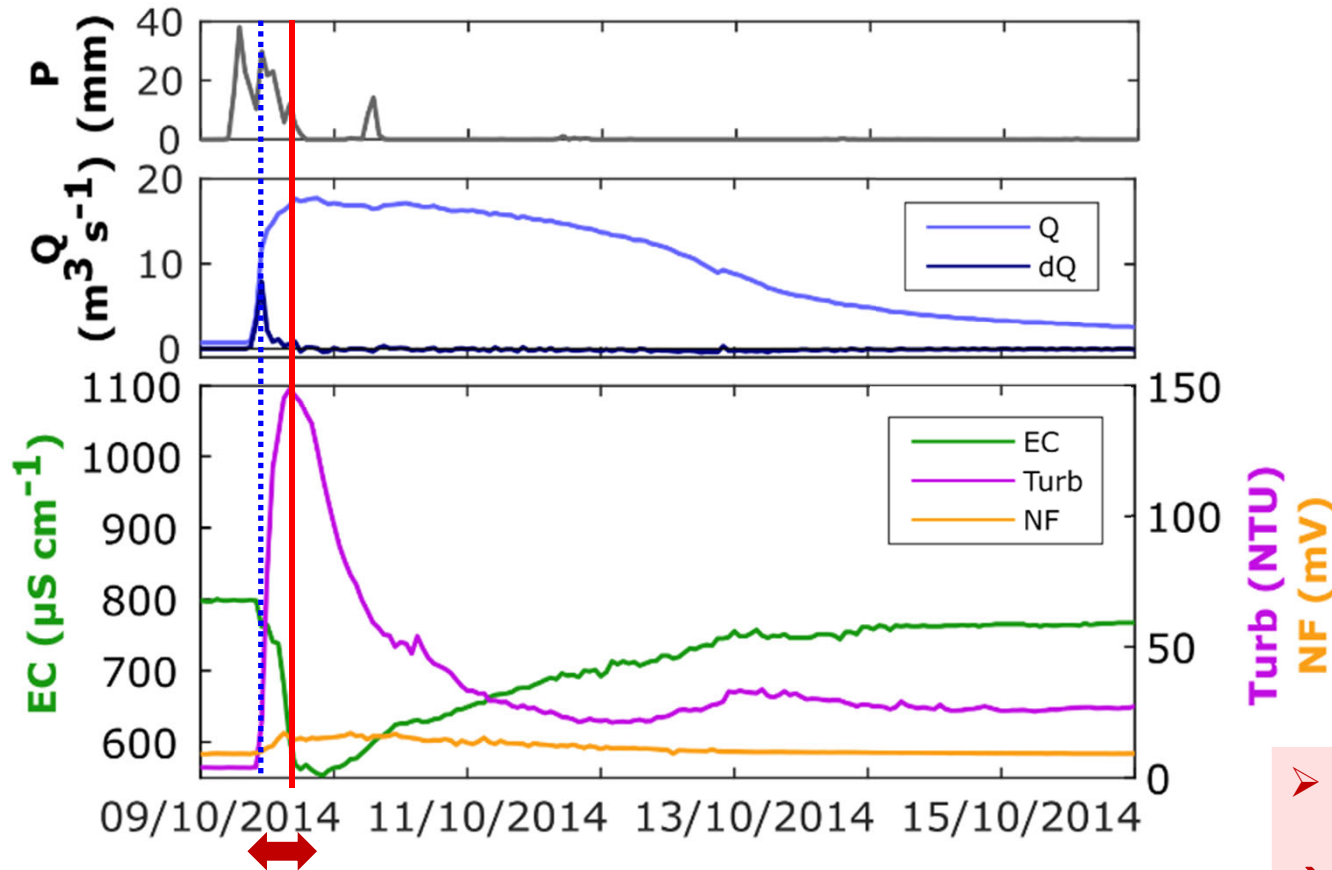
Début de la crue

(Charlier et al., 2021)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE HAUTES EAUX



Dilution par eau

Mobilisation particules

Eaux légèrement enrichies en MO

➤ Eau évènementielle

➔ TRANSFERT DE MASSE

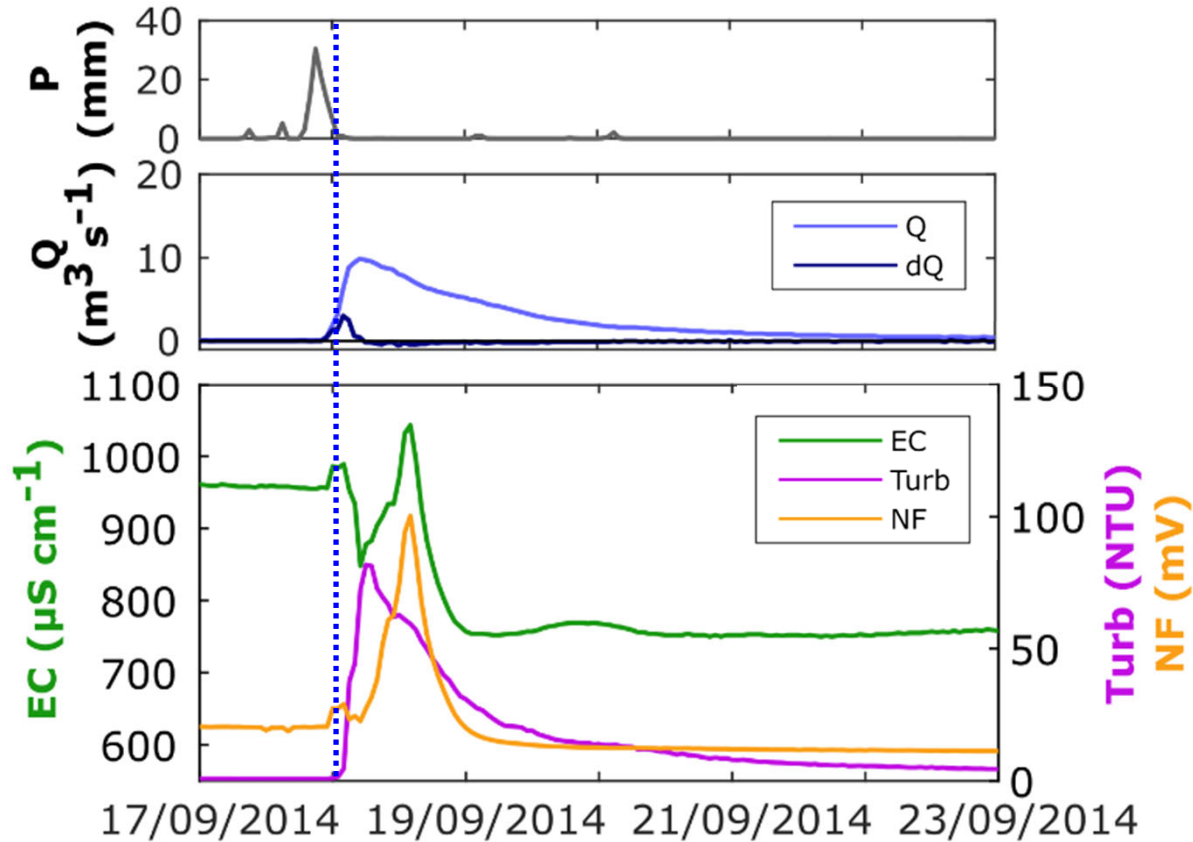
(Charlier et al., 2021)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE REPRISE AUTOMNALE

Début de la crue

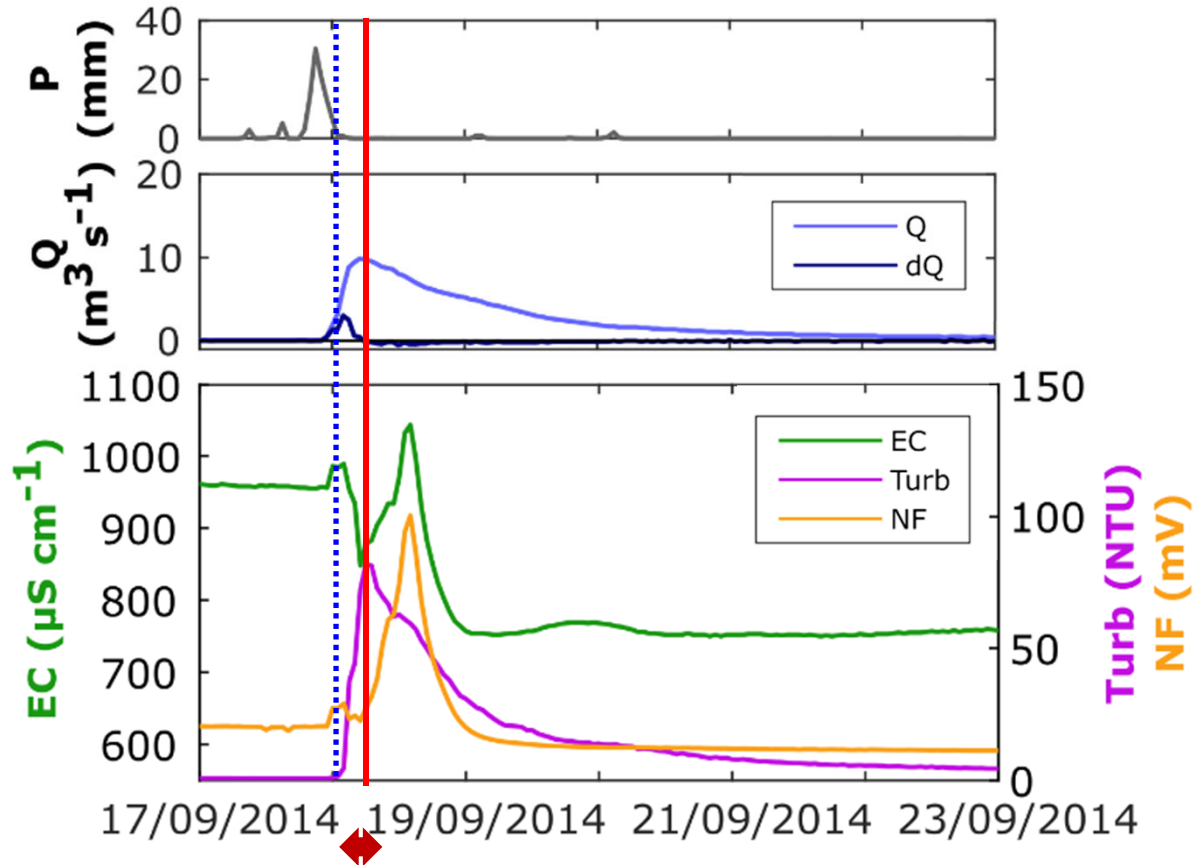


(Charlier et al., 2021)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE REPRISE AUTOMNALE



Mobilisation particules

Légère dilution

➤ Influence d'un sous-système de drainage de ce réseau

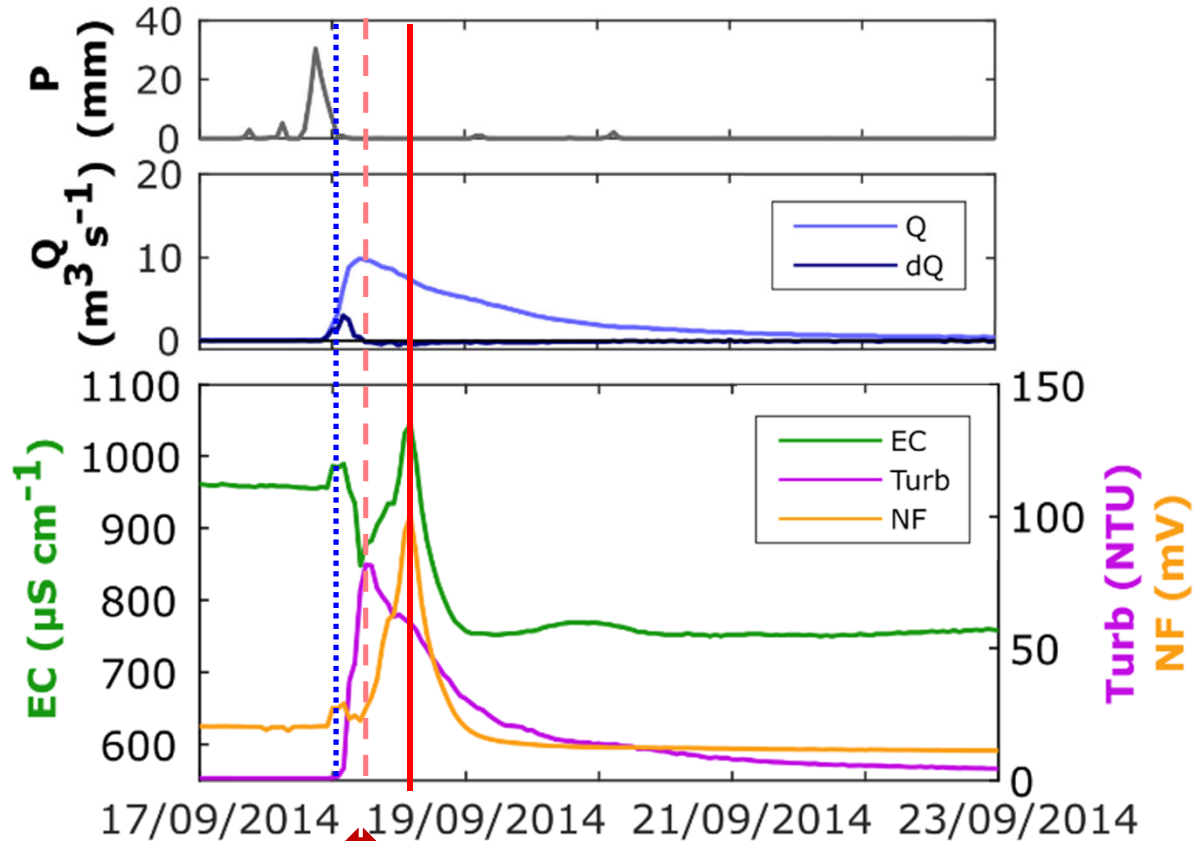
→ TRANSFERT DE MASSE

(Charlier et al., 2021)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE REPRISE AUTOMNALE



(Charlier et al., 2021)

Décrue

Mobilisation particules
toujours importantes

Augmentation de la
minéralisation

Mobilisation eaux enrichies
en MO

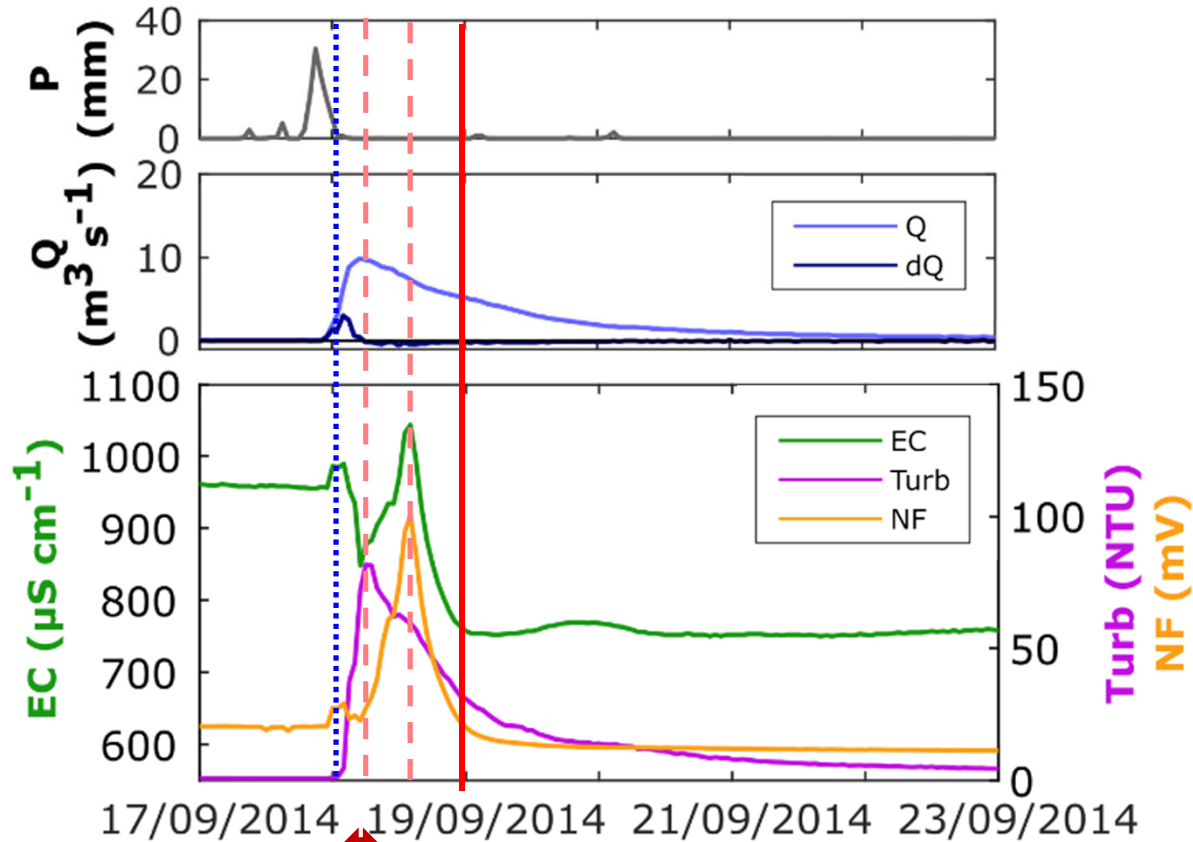
- Contribution d'eau pré-événementielle minéralisée
- Turbidité & MO proviennent de l'eau stockée préalablement dans la zone non saturée du karst

➔ TRANSFERT DE PRESSION (effet piston)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

CRUE DE REPRISE AUTOMNALE



Décrue

Dilution par eau
évènementielle par infiltration
rapide

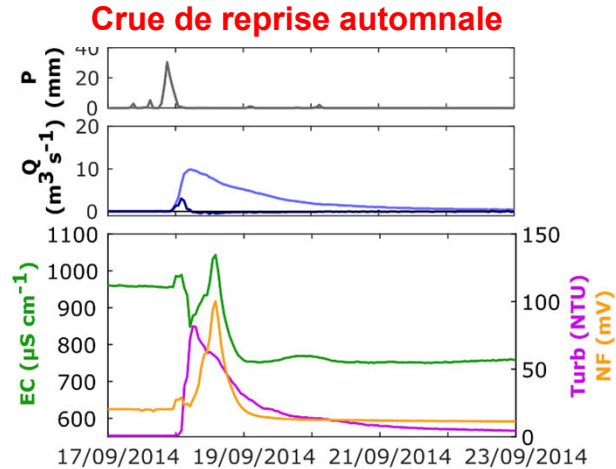
➤ Dilution eau évènementielle

→ TRANSFERT DE MASSE

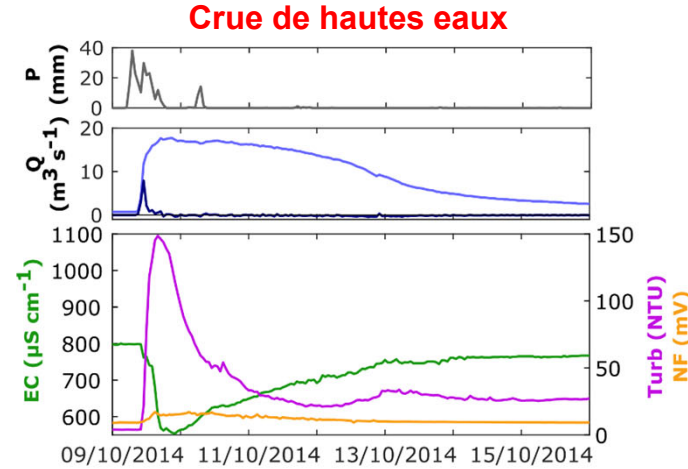
(Charlier et al., 2021)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes



Mobilisation d'un stockage d'eaux enrichies en MO pendant la période d'étiage



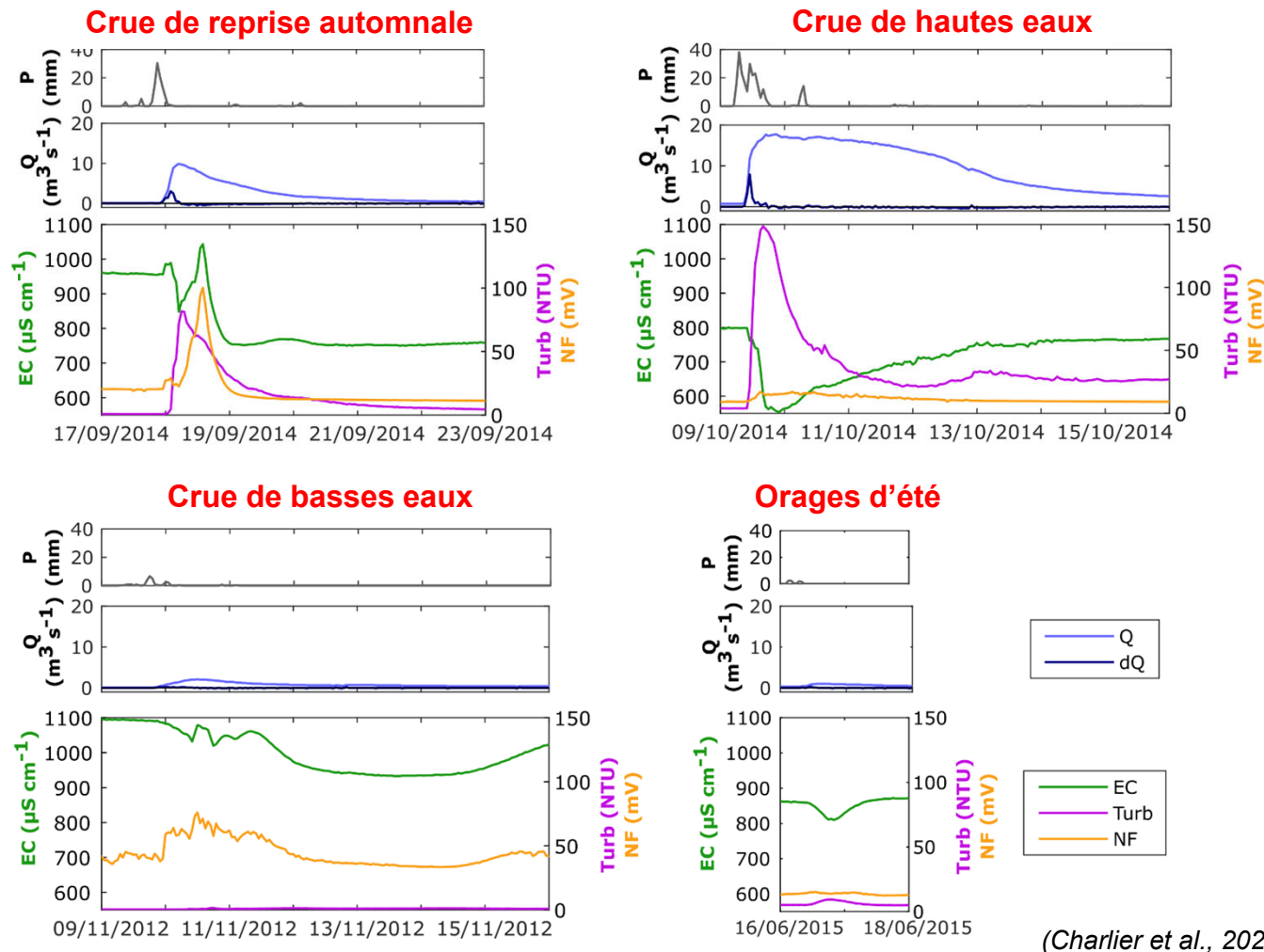
Absence de stockage qui a déjà été mobilisé pendant les crues de reprise

- Typologie de la réponse hydrochimique des crues (saisonnalité)

(Charlier et al., 2022)

Suivis physico-chimiques

Ex. Fontaine de Nîmes

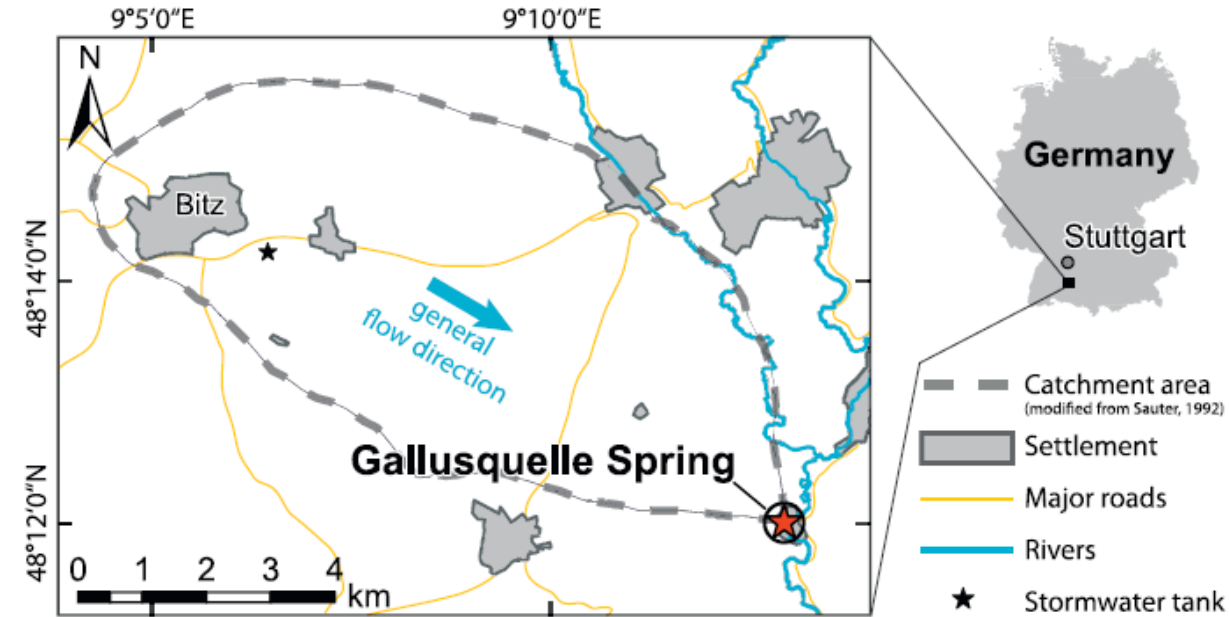


(Charlier et al., 2022)

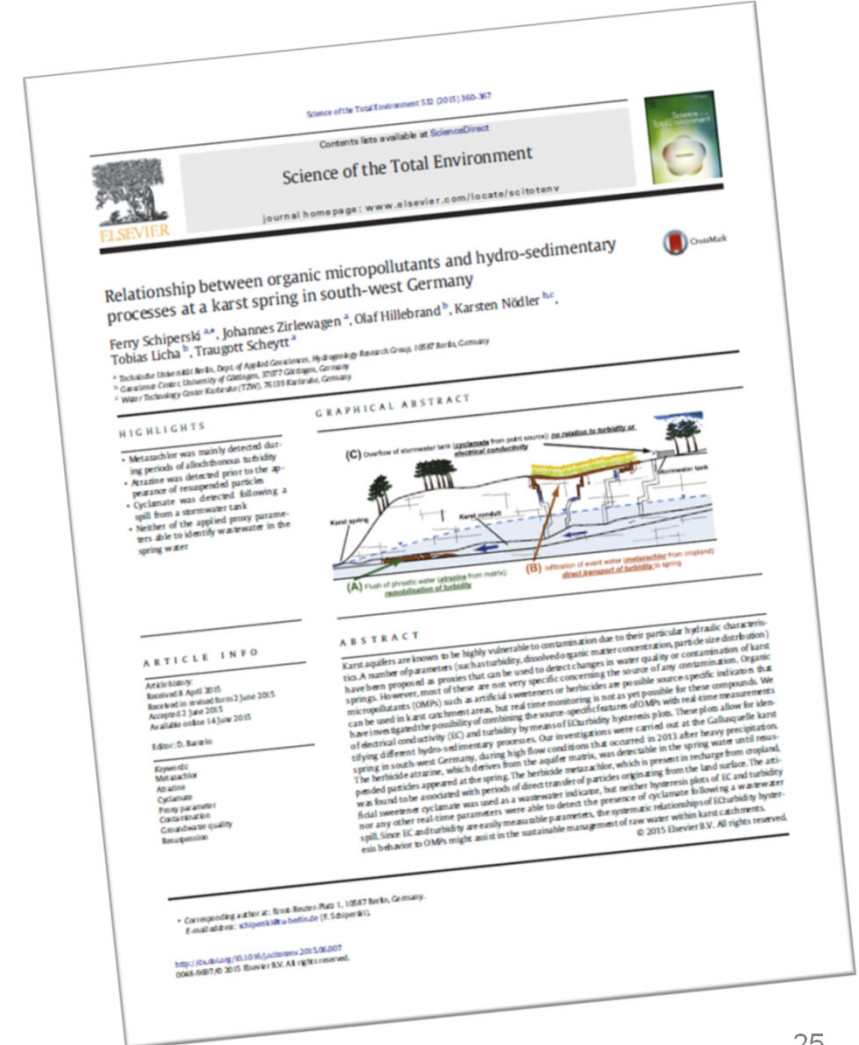
- Typologie de la réponse hydrochimique des crues (saisonnalité)
- Combinaison de différents traceurs pour mieux comprendre l'origine de l'eau et de sa turbidité en crue (évènementielle, pré-évènementielle)
- Donne des pistes de compréhension pour le transport de contaminants associé au transport dissous (ex. NO_3 ,...) et particulaire (ex. bactérie, P....)

Suivis physico-chimiques et pesticides

Ex. Gallusquelle spring (D)

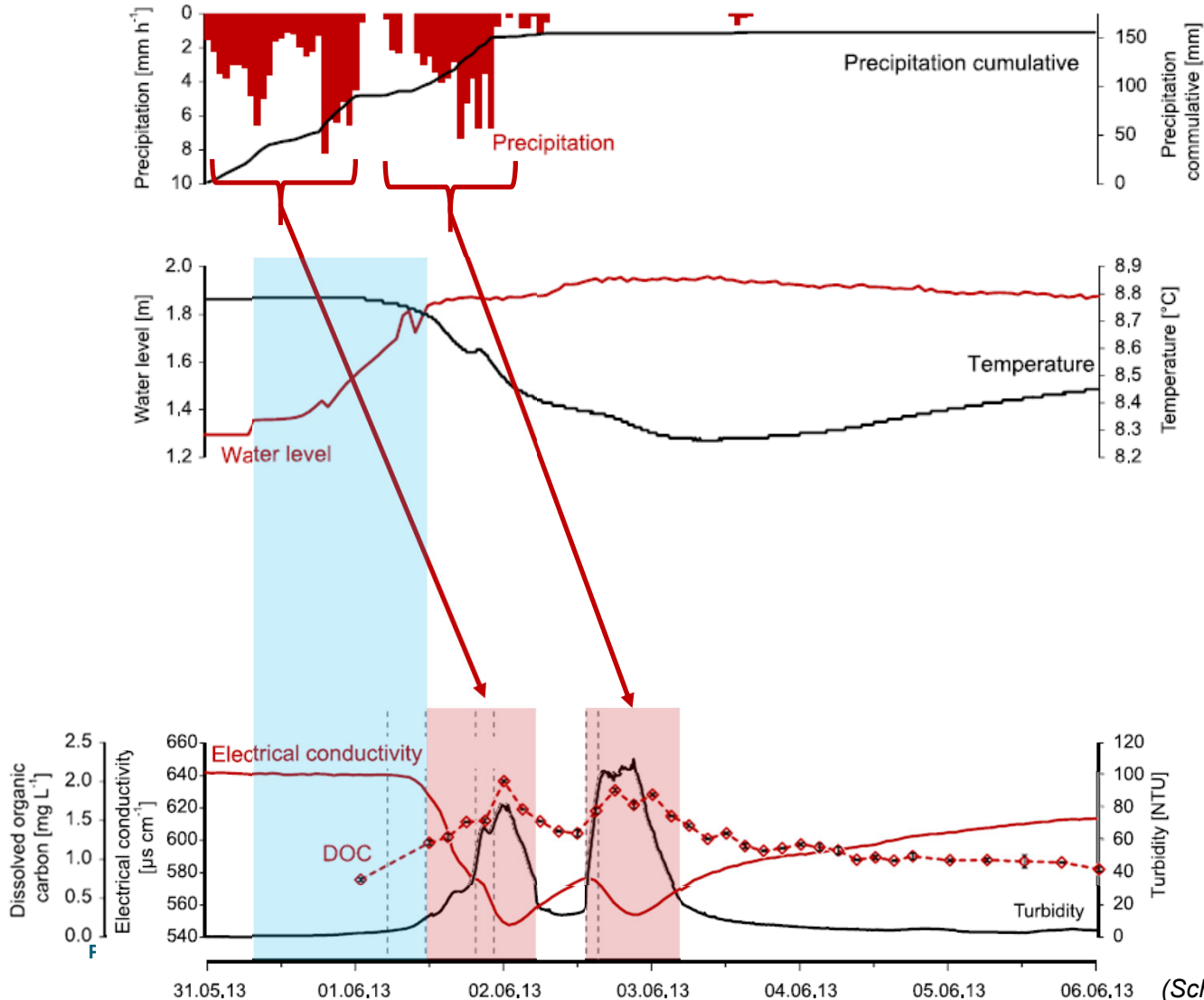


Débit moyen
de 500 l/s



Suivis physico-chimiques et pesticides

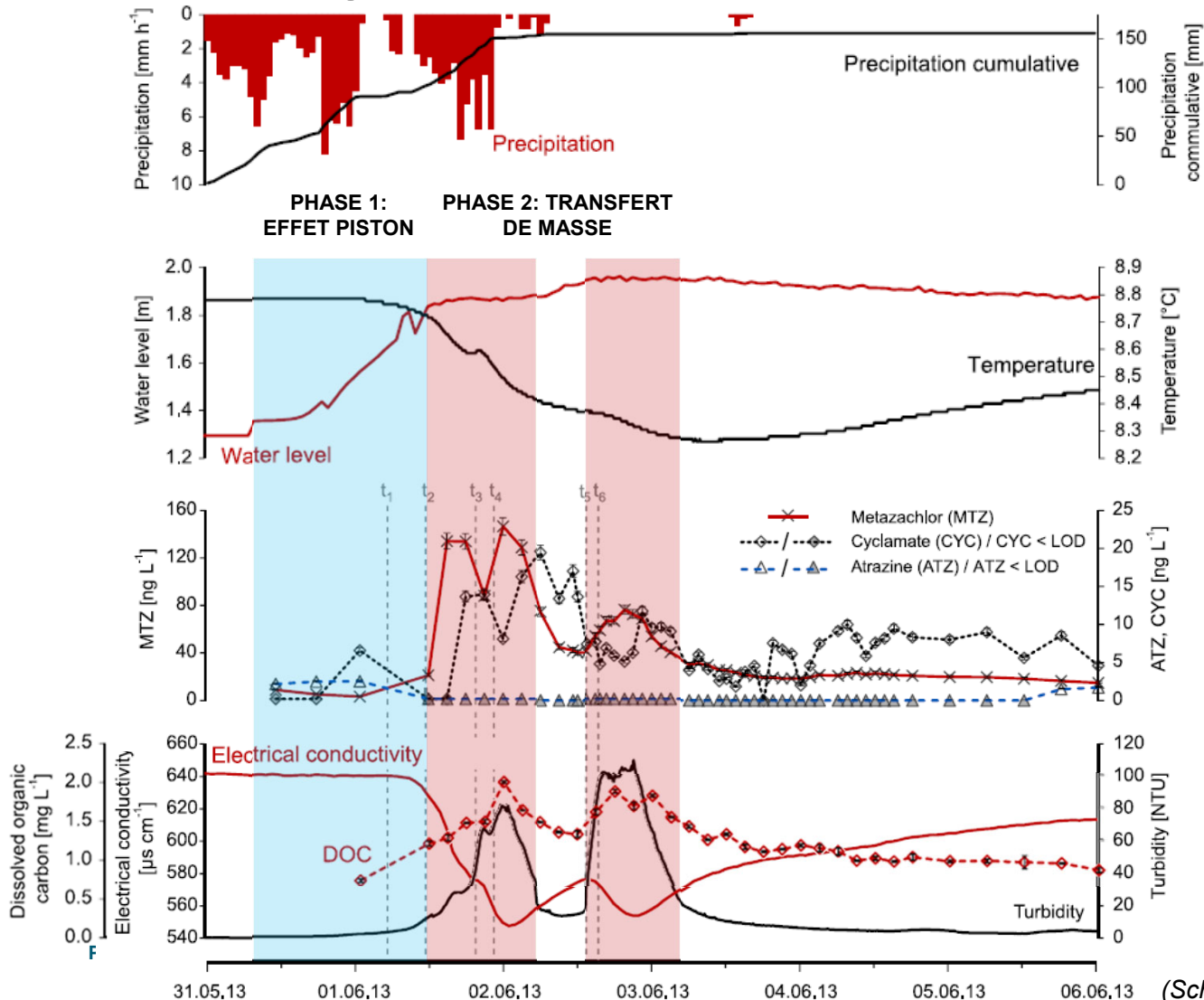
Ex. Gallusquelle spring (D)



- **PHASE 1: EFFET PISTON / CHASSE:** augmentation du débit avec une légère augmentation de la turbidité mais une absence de dilution
- **PHASE 2 (2 SÉQUENCES): ARRIVÉE D'EAU ÉVÈNEMENTIELLE:** Dilution et augmentation de la turbidité et du COD

(Schiperski et al., 2015)

Suivis physico-chimiques et pesticides



Ex. Gallusquelle spring (D)

- **ATRAZINE** (herbicide - interdit 1992)
 - PHASE 1 → Peu / pas influencé
 - PHASE 2 → Dilution (en dessous limite de détection)

- Δ - / - Δ - Atrazine (ATZ) / ATZ < LOD

- **MÉTAZACHLORE** (herbicide)
 - PHASE 1: Peu / pas influencé
 - PHASE 2: Pics de concentration

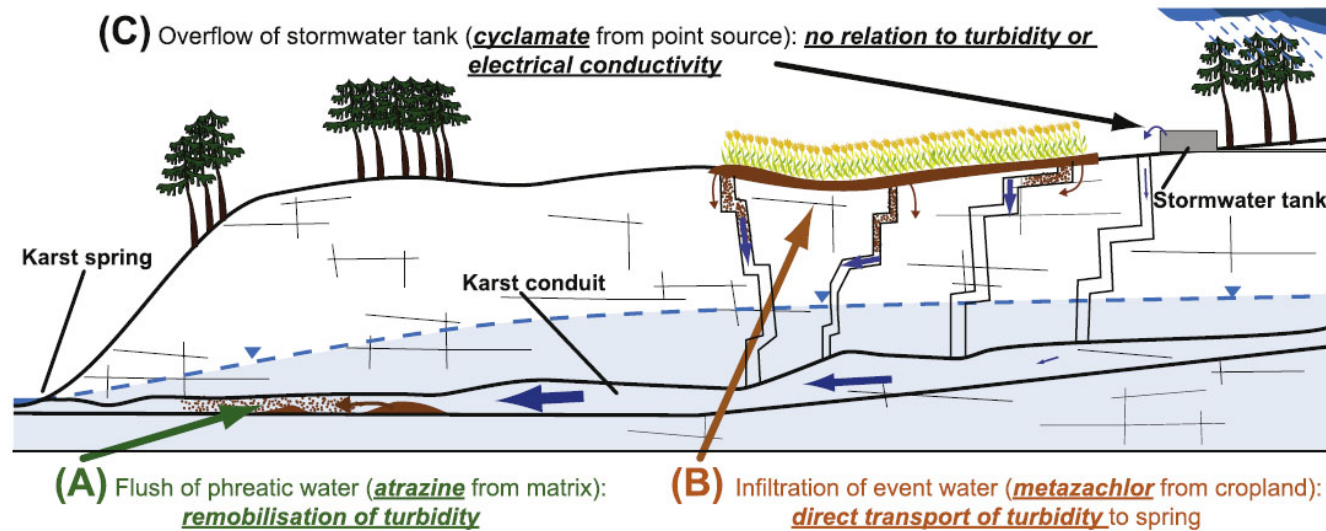
- x - Metazachlor (MTZ)

- **CYCLAMATE** (édulcorant artificiel utilisé comme indicateur des eaux usées)
 - PHASE 1: Peu / pas influencé
 - PHASE 2: Déphasage des pics de concentration – pas de corrélation évidente

- ◇ - / - ◇ - Cyclamate (CYC) / CYC < LOD

Suivis physico-chimiques et pesticides

Ex. Gallusquelle spring (D)

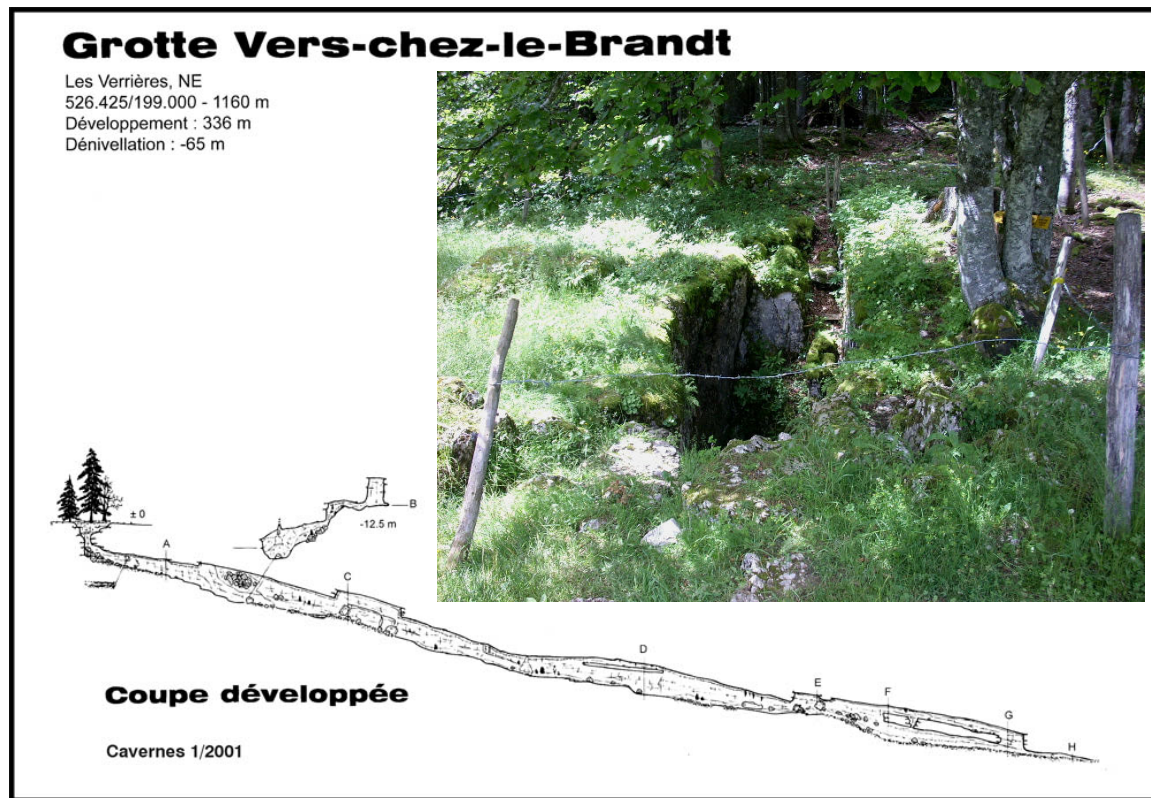


(Schiperski et al., 2015)

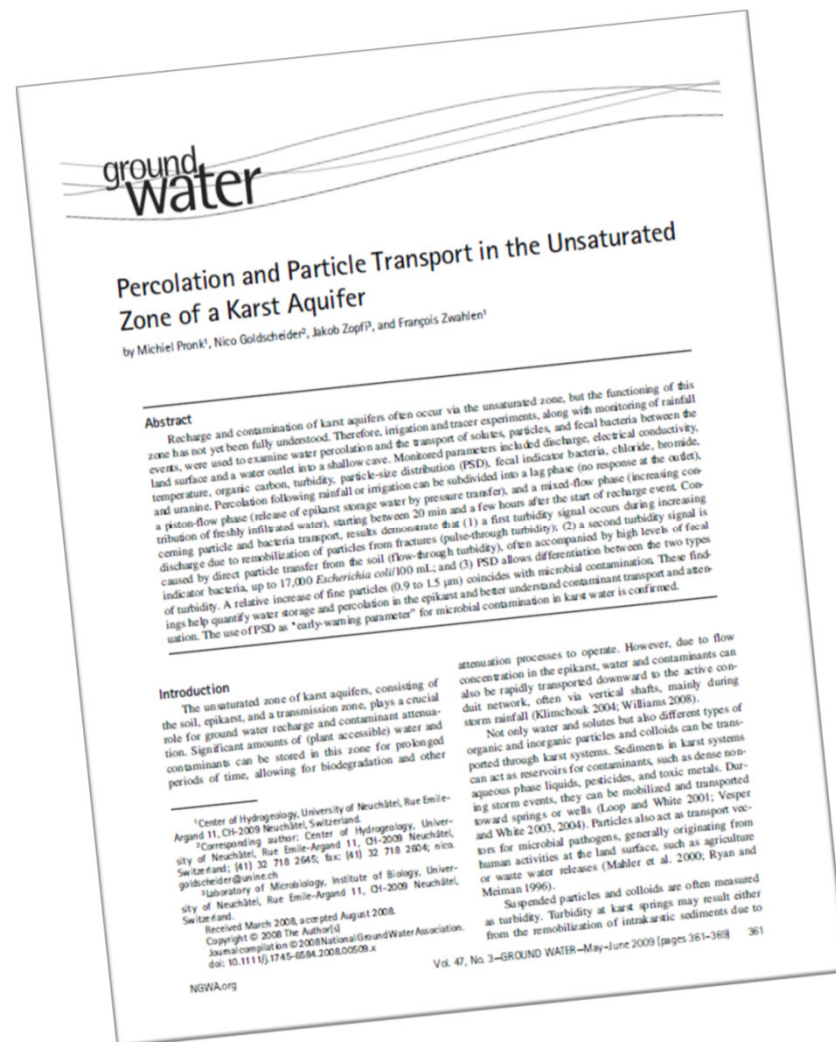
- **ATRAZINE** (herbicide)
Contamination liée à la fonction stockage de l'hydrosystème (matrice)
- **MÉTAZACHLORE** (herbicide)
Transfert direct de particules provenant du sol des zones cultivées
- **CYCLAMATE** (édulcorant artificiel)
Bassin de débordement (délais?)

Transport particulaire et bactériologique

Exemple Jura suisse (canton de Neuchâtel)

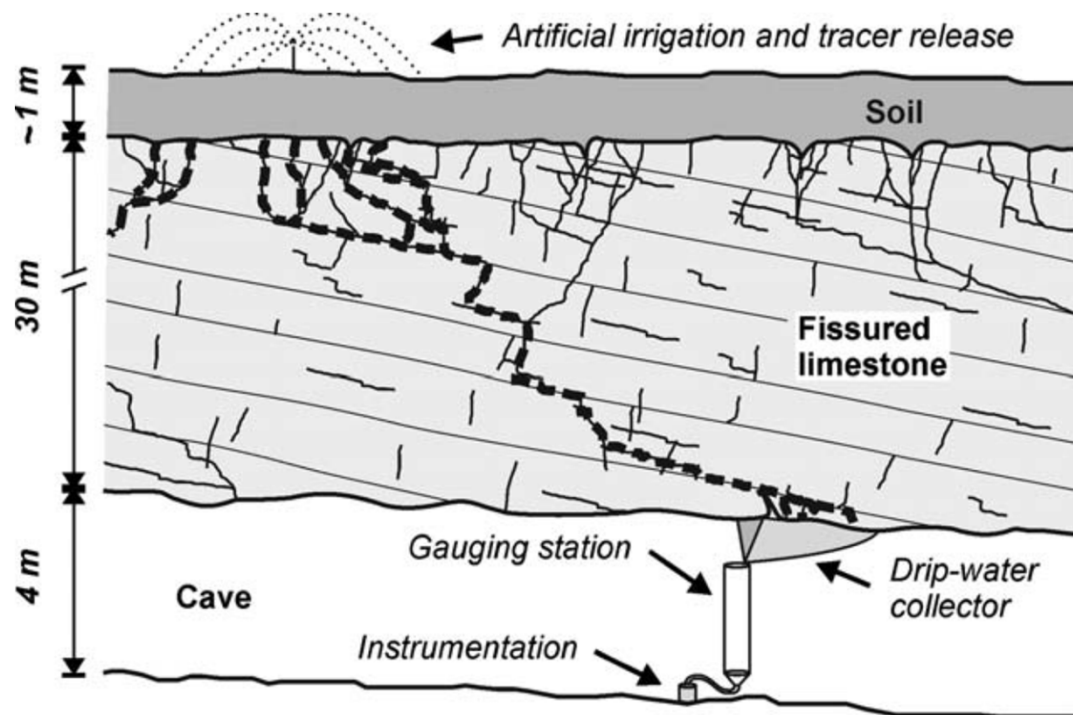


Etude de la zone non saturée au droit de la grotte Vers-chez-le-Brandt

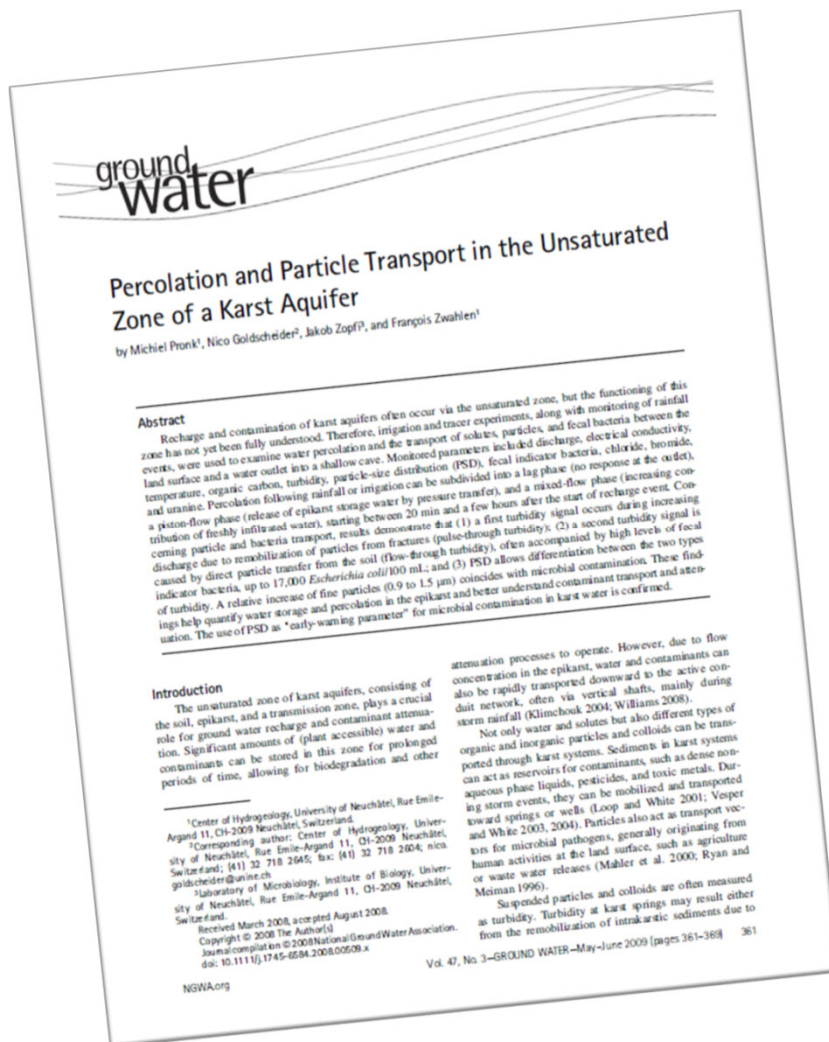


Transport particulaire et bactériologique

Exemple Jura suisse (canton de Neuchâtel)



Etude de la zone non saturée au droit de la grotte Vers-chez-le-Brandt

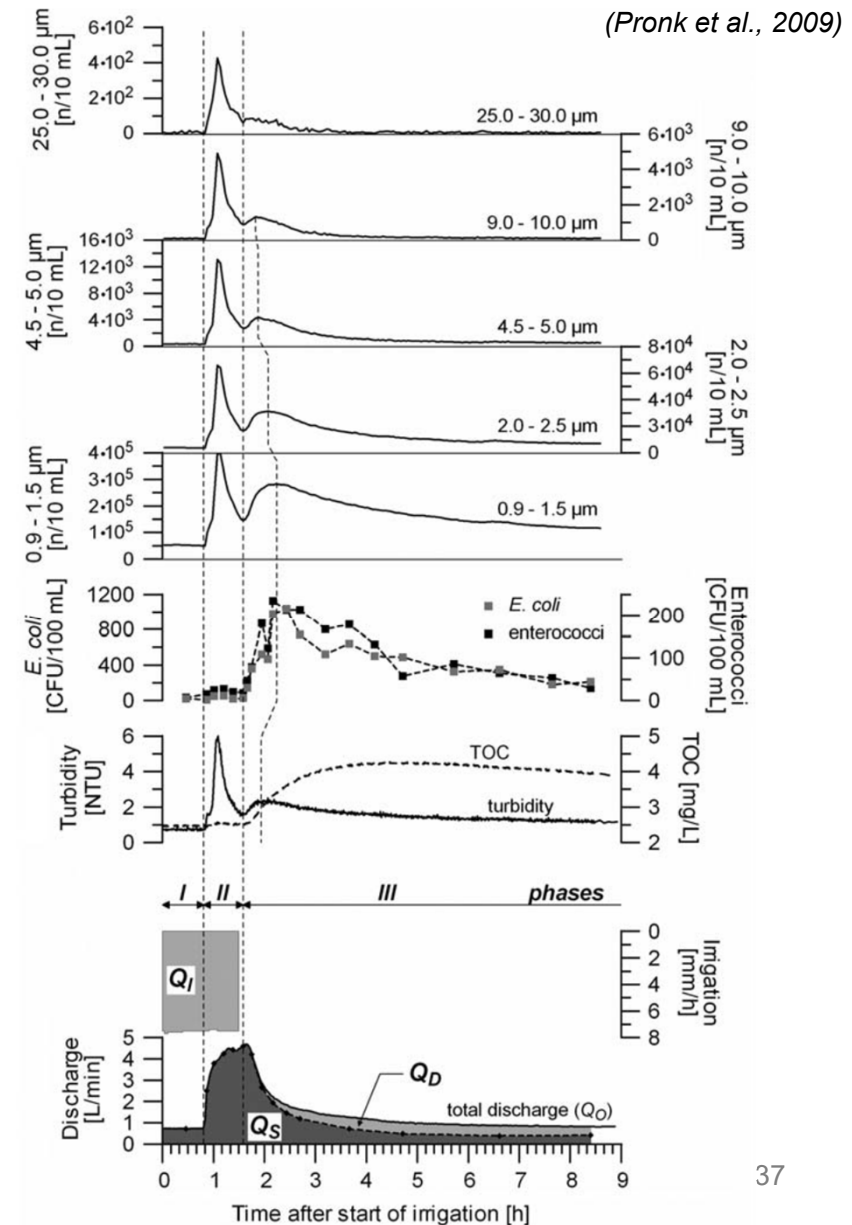


Transport particulaire et bactériologique

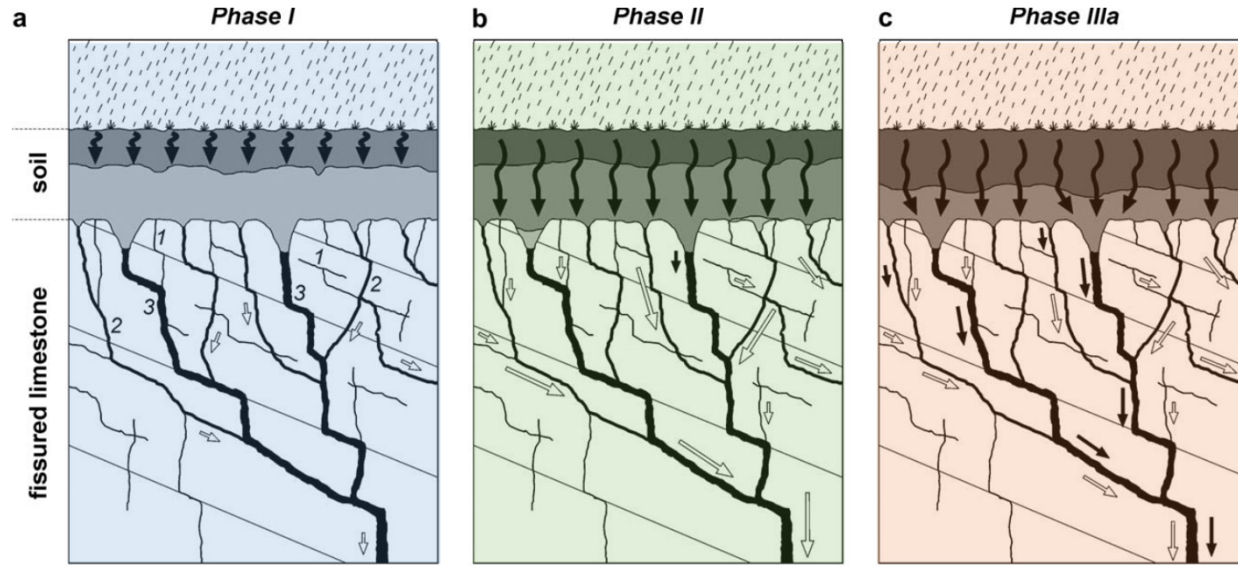
Exemple Jura suisse

Distribution des tailles des particules en suspension:

- Turbidité autochtone (particules remobilisées milieu souterrain):
 - Généralement pendant la phase de monté du débit
 - Augmentation de toutes les classes de taille des particules
- Turbidité allochtone (particules transportées depuis la surface):
 - Généralement plus tardive pendant la phase récession
 - Augmentation relative des petites particules ($\sim 1 \mu\text{m}$) qui ne sont pas ou peu affectées par la sédimentation



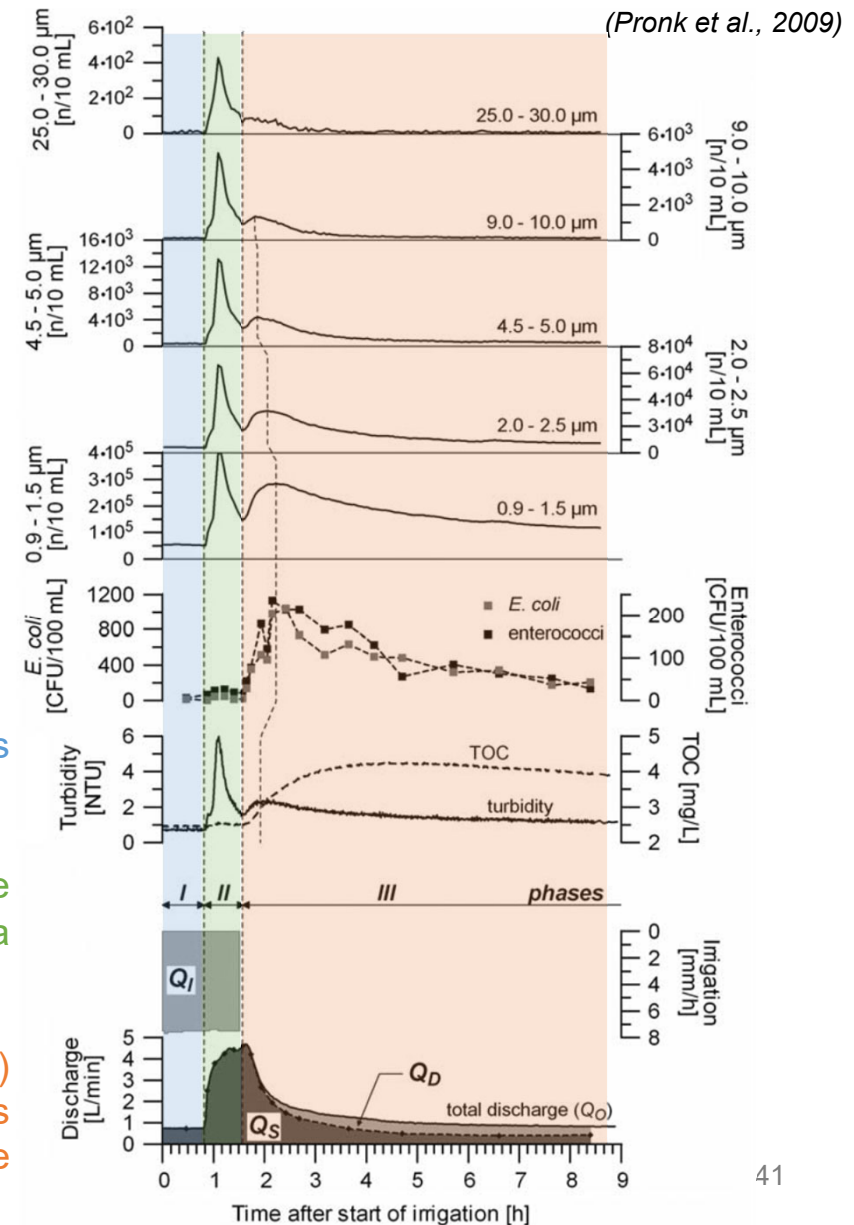
Transport particulaire et bactériologique



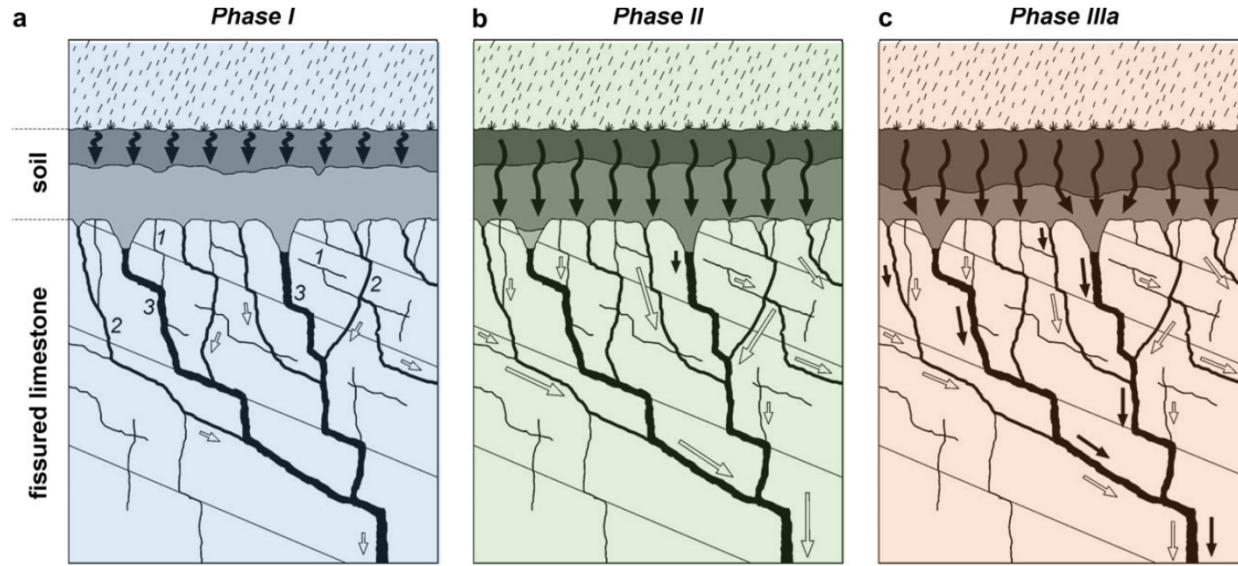
Phase I : état initial en début d'infiltration avec des paramètres stables et en faibles amplitudes

Phase II : un premier pic de turbidité sur toutes les tailles se produit lors d'une augmentation du débit en raison de la remobilisation des particules provenant des fractures

Phase III : un deuxième signal de turbidité (petits diamètres) est causé par le transfert direct de particules du sol (en plus de celles de l'épikarst), accompagné de niveaux élevés de bactéries fécales et suivi d'une augmentation de COT

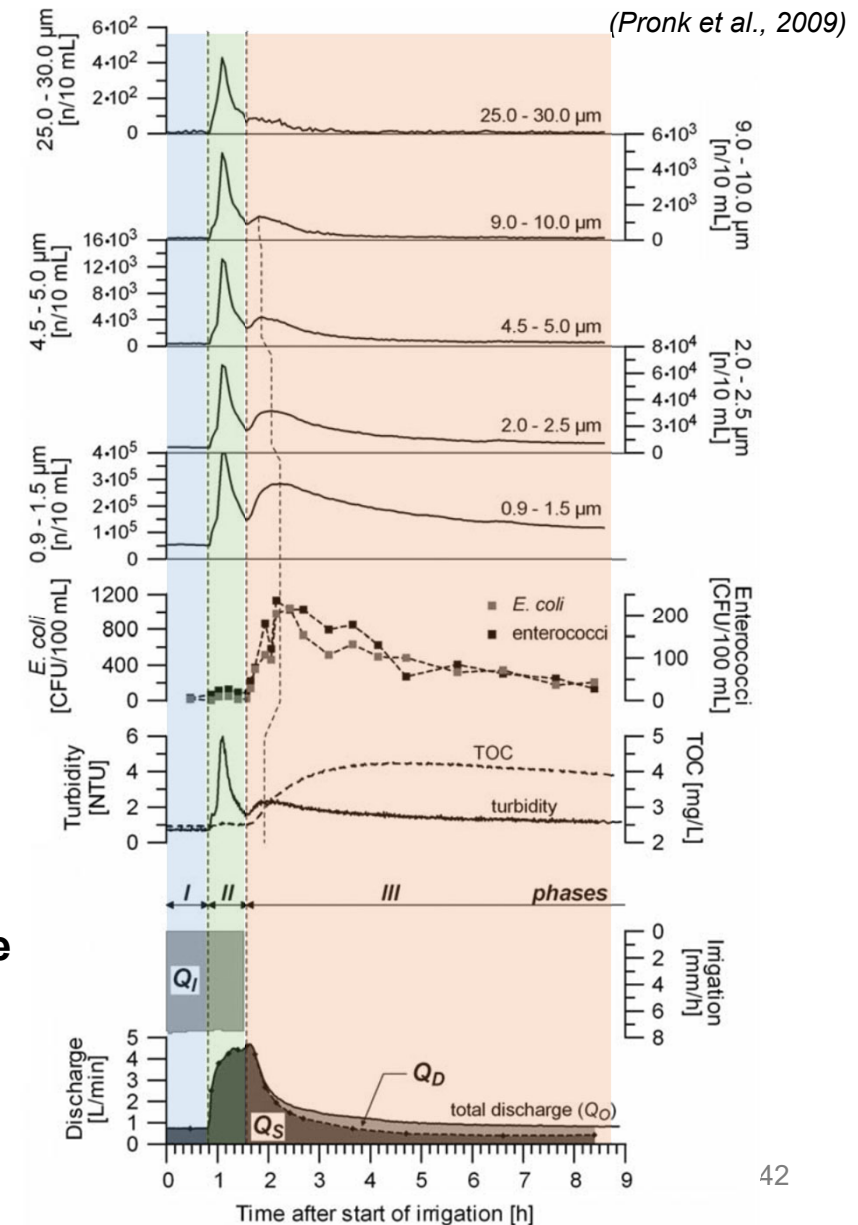


Transport particulaire et bactériologique



Bactéries fécales (tailles d'environ 1 μm) sont fortement corrélées avec les particules 0.9 – 1.5 μm ($R^2 \geq 0.85$)

Cette classe de particules peut être utilisée comme un paramètre d'alerte d'une contamination fécale, particulièrement pour les pollutions diffuses



Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

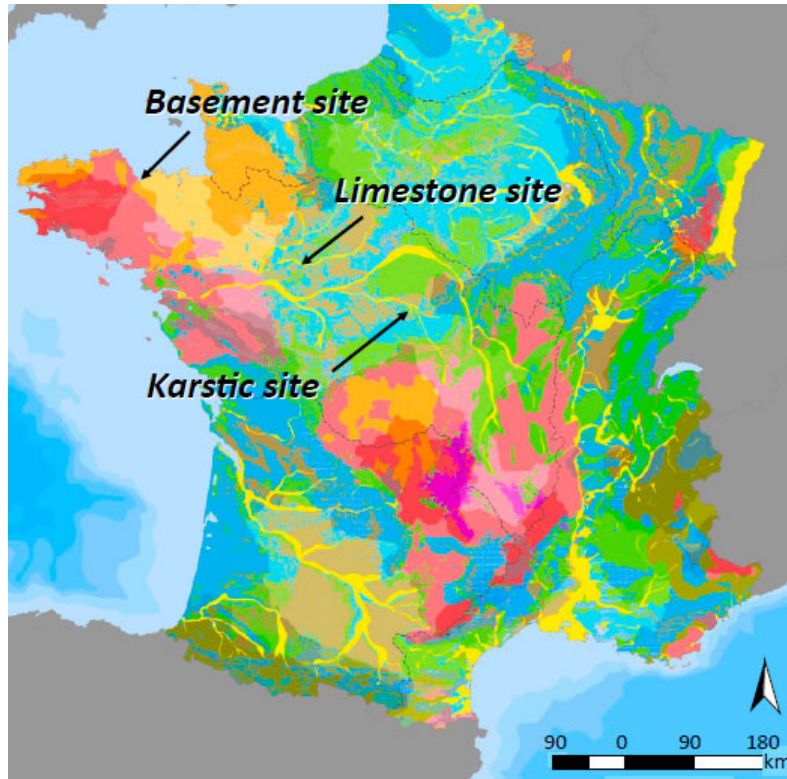
Modélisation de contaminants complexe en hydrogéologie

Encore plus compliqué à mettre en œuvre dans les milieux hétérogènes comme le karst

Rares modèles à base physique → principalement des modèles « réservoirs » conceptuels limités

Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst



Mise en œuvre d'un modèle réservoir avec bilan conservatif chimique du NO₃



Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

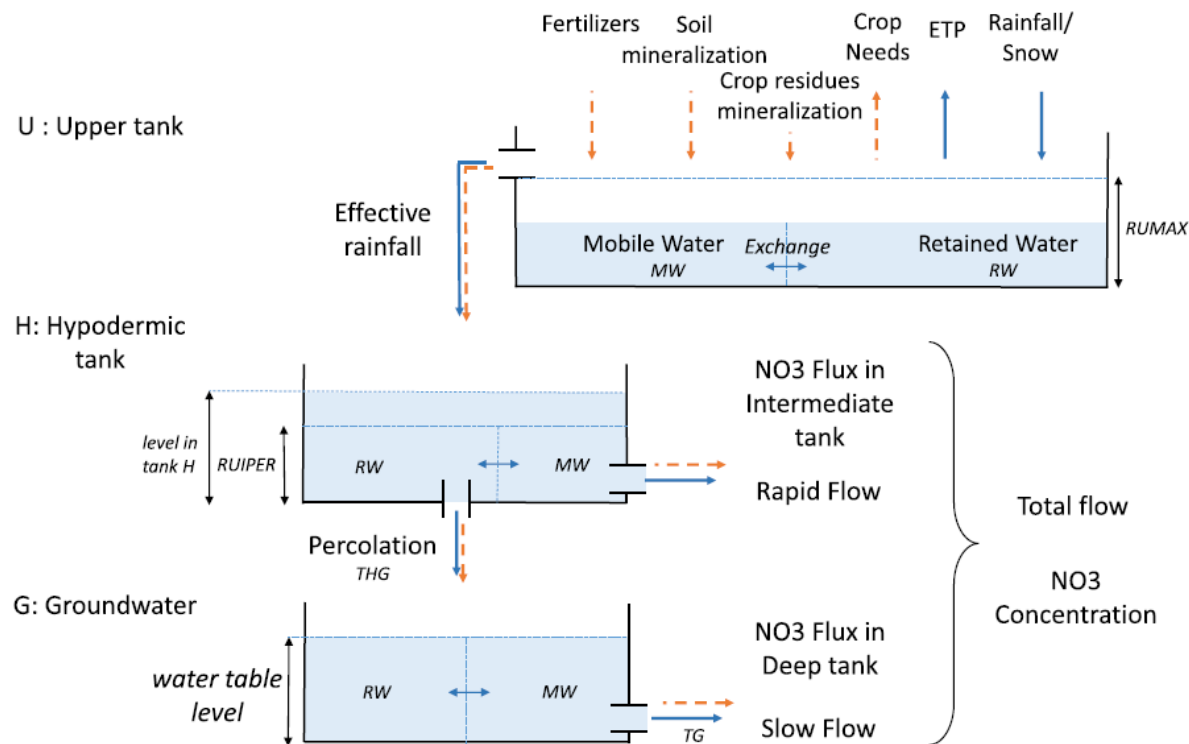


Fig. 1. Diagram of the BICHE model.

Modèle BICHE (Bilan CHimique des Eaux)
dérivé de GARDENIA

Modèle global avec 3 réservoirs: sol – rapide - lent

Possibilité d'optimiser d'abord le modèle hydrogéologique puis le modèle de transfert du NO₃

Echanges avec de l'eau immobile (RW) ou les effets d'adsorption sont pris en compte (effets de retard)

Pas de temps journalier à annuel

Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

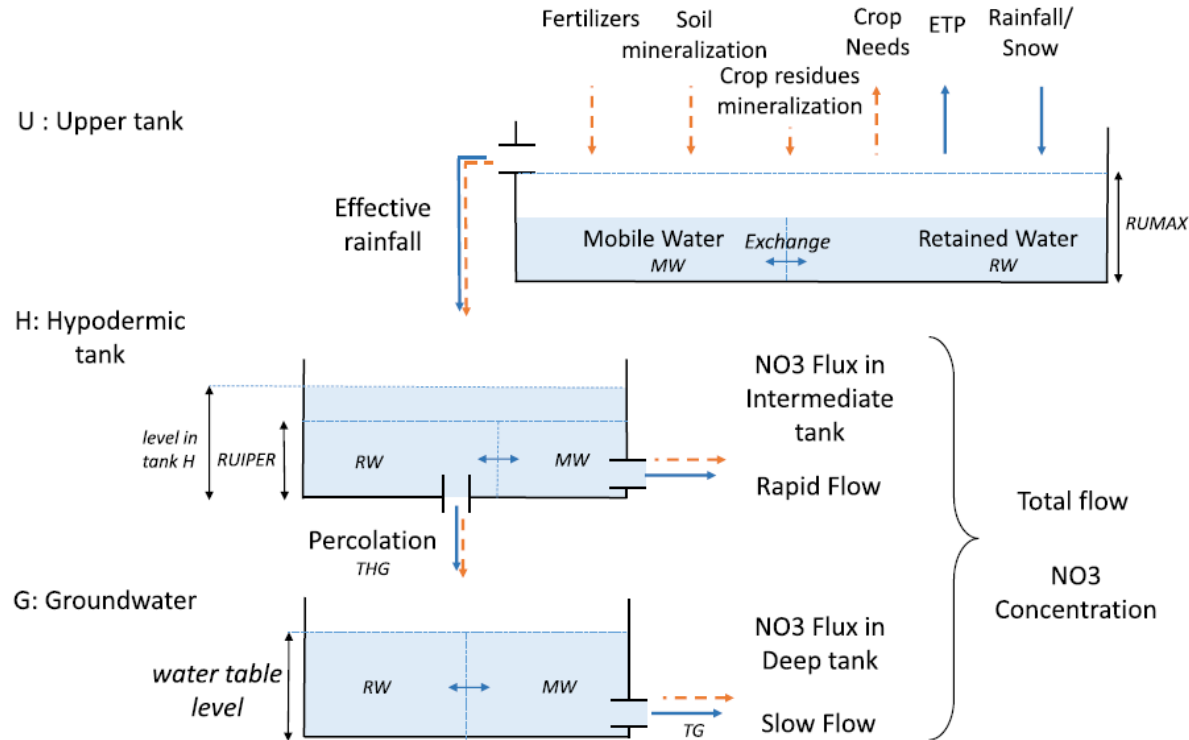


Fig. 1. Diagram of the BICHE model.

Données temporelles nécessaires:

Ecoulement:

- Précipitations
- ETP
- Piézométrie / Débit

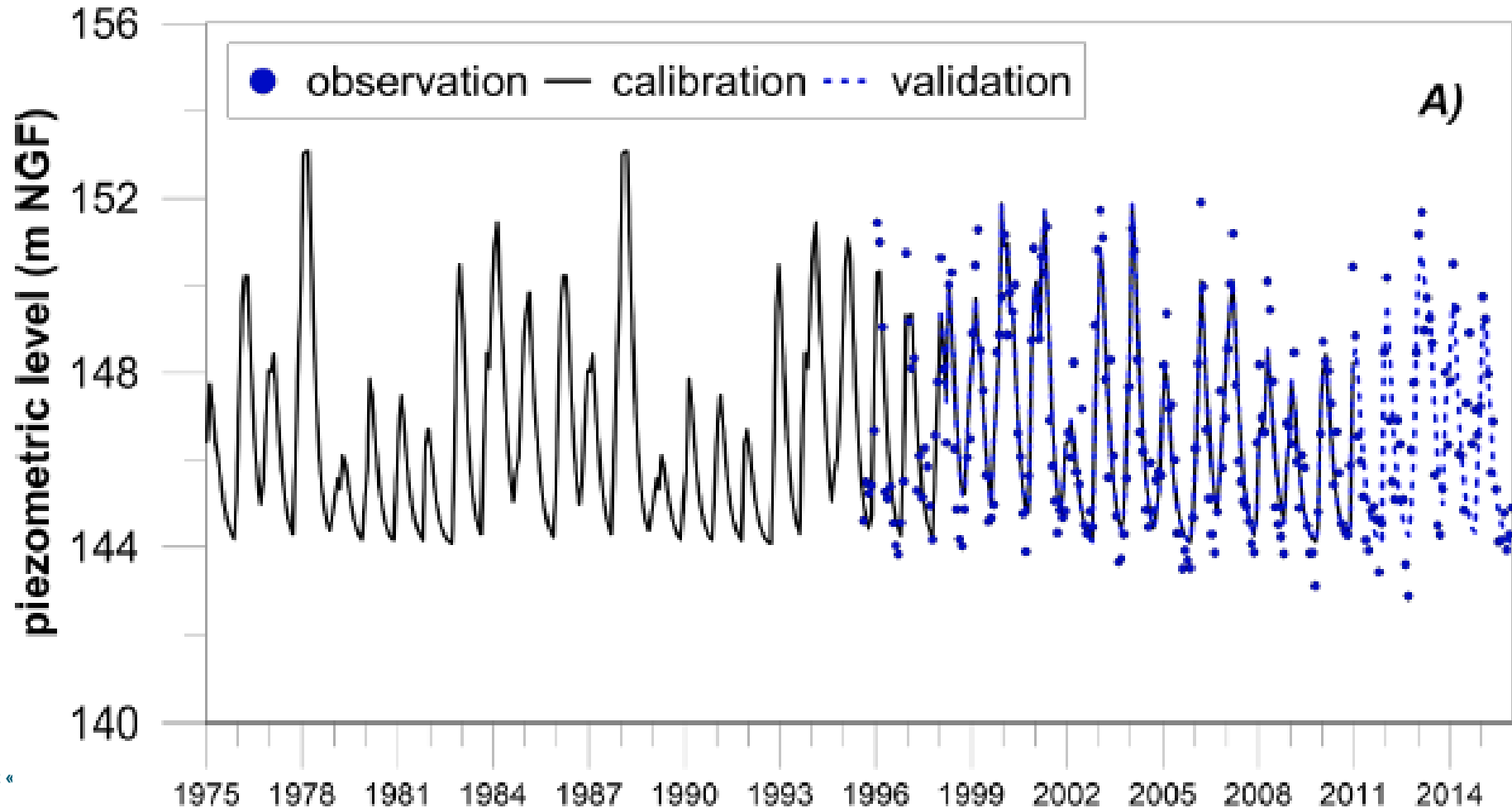
NO₃:

- Amendement NO₃
- Demande en NO₃ de la végétation
- Minéralisation naturelle du sol
- Minéralisation résiduelle de la végétation après la récolte
- Concentration en NO₃ à l'exutoire

Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

Coefficient de performance Nash: 0.79

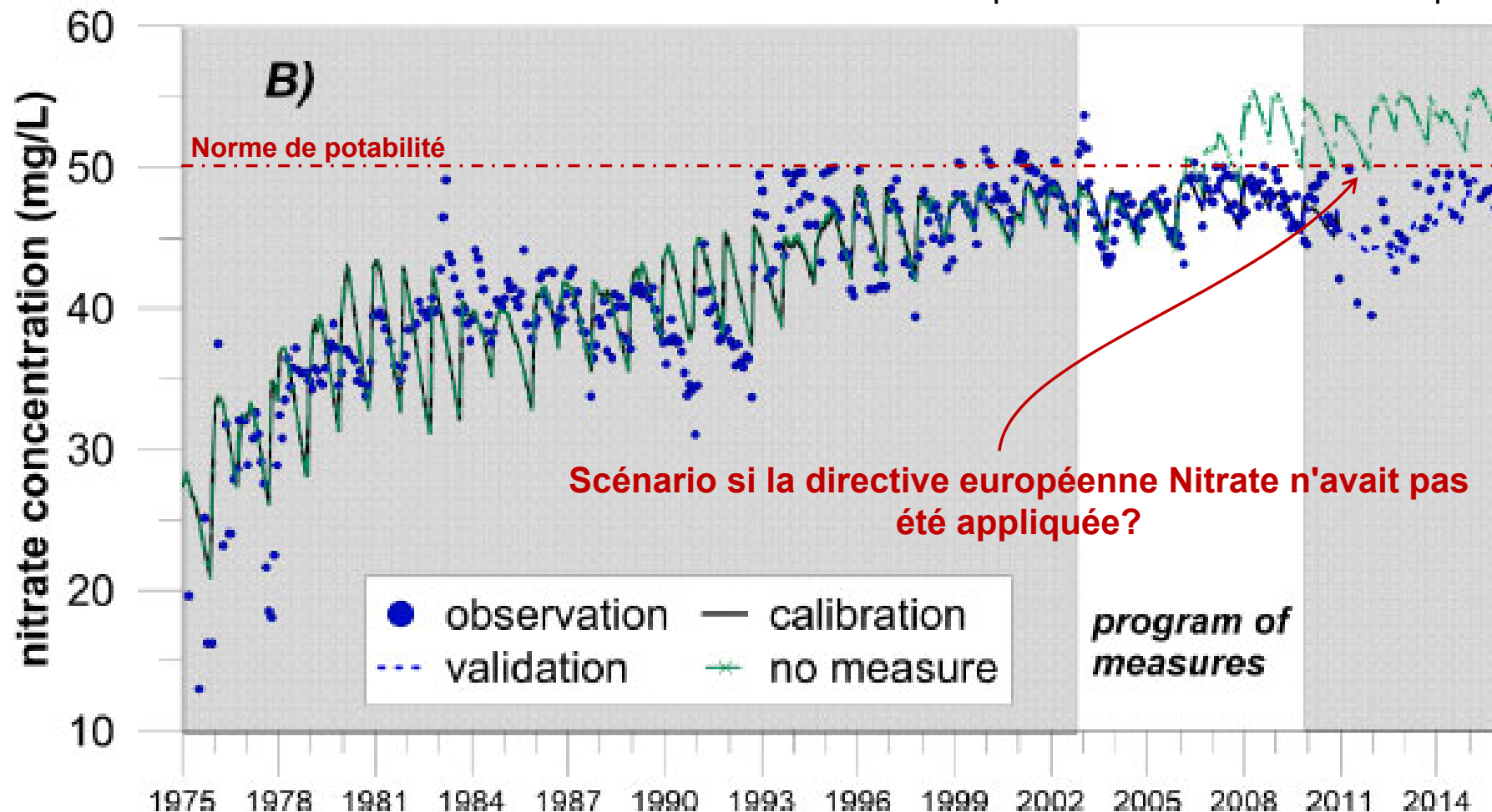


Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

Coefficient de performance Nash: 0.56

Satisfaisant pour simuler des tendances pluriannuelles

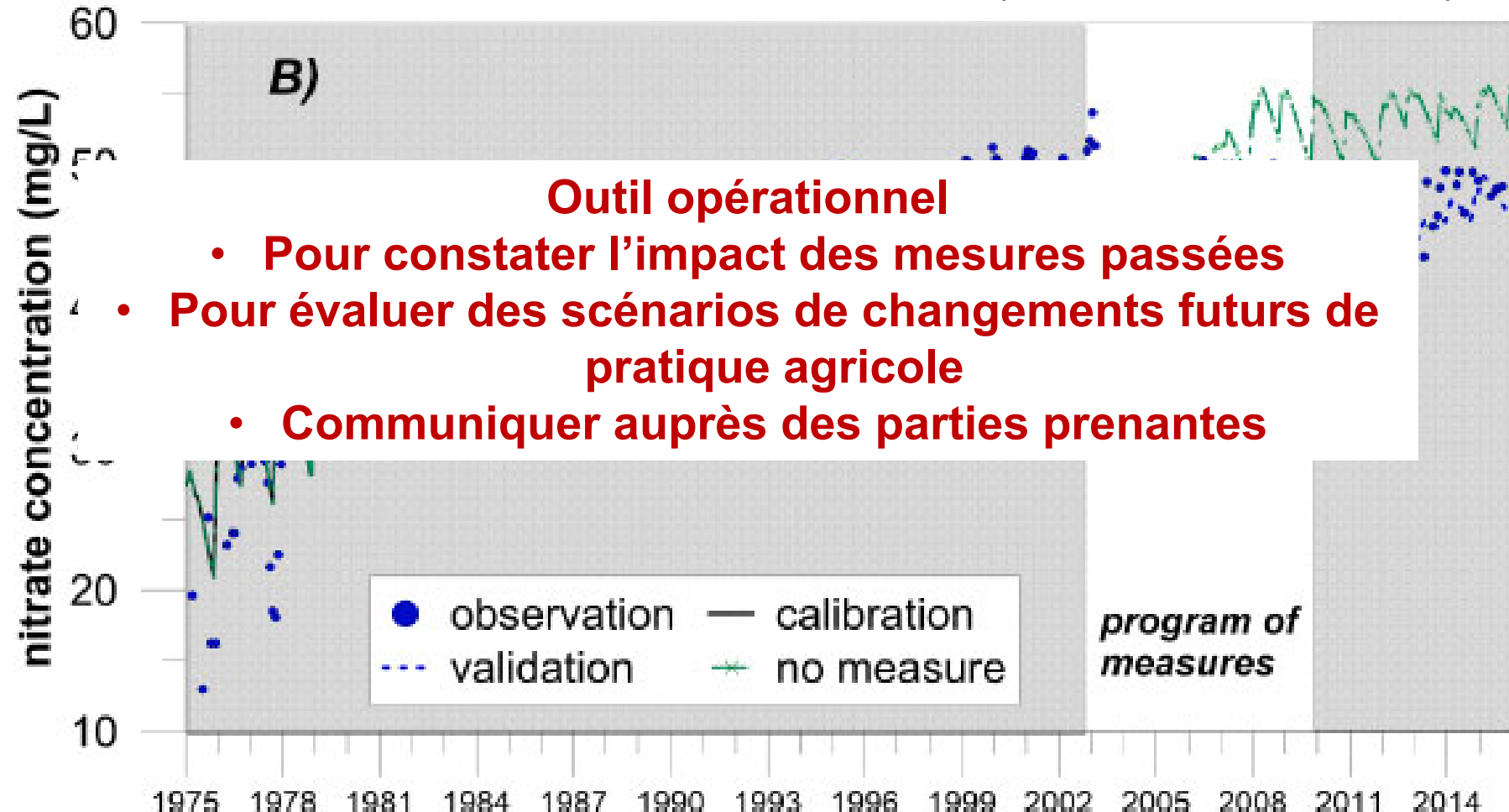


Modélisation à l'échelle de l'aquifère

Modélisation des NO₃ dans le karst

Coefficient de performance Nash: 0.56

Satisfaisant pour simuler des tendances pluriannuelles





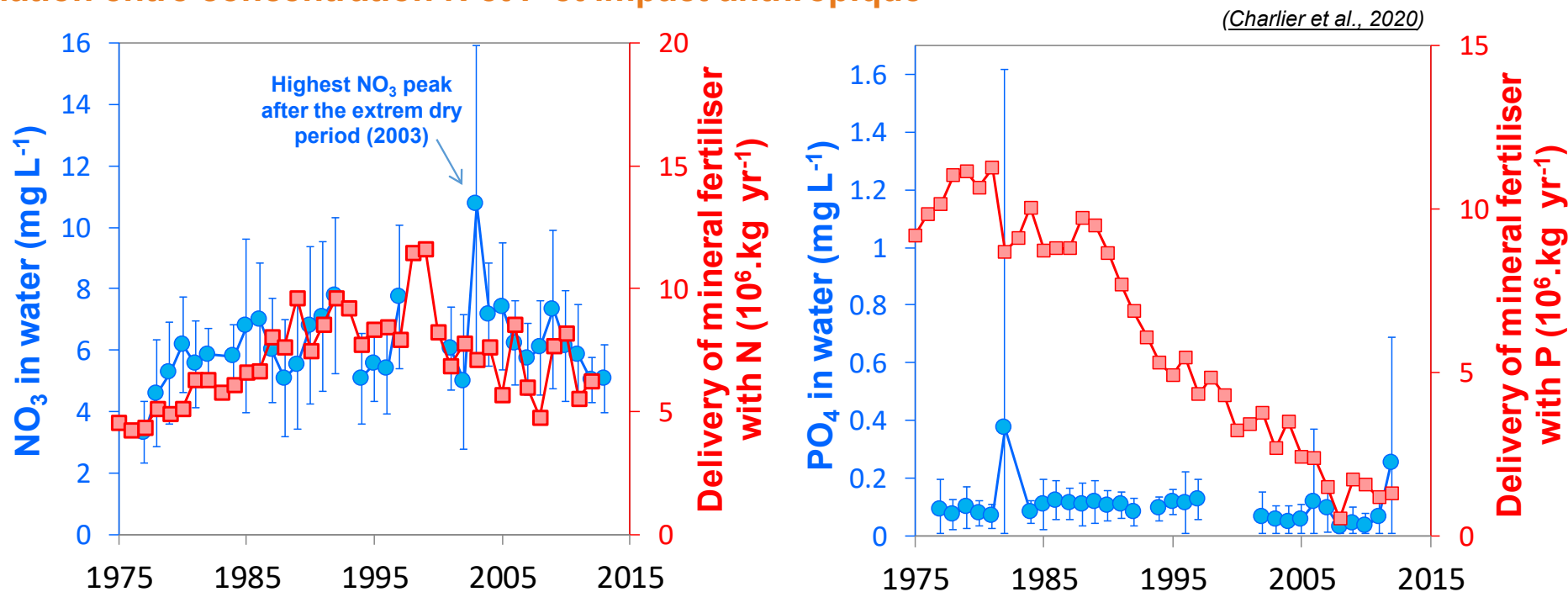
Exemples jurassien



Tendances en nutriments dans les eaux

Captage AEP de Besançon sur la Loue à
Chenecey-Buillon

Relation entre concentration N et P et impact anthropique

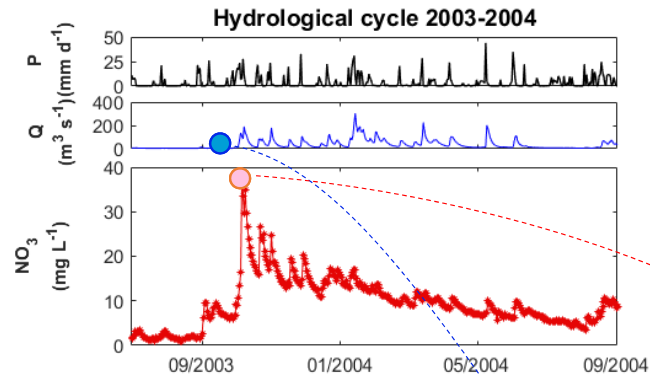


- **NO₃** → relation avec livraison d'engrais => **origine agricole**
- **PO₄** → pas de relation avec livraison d'engrais => **autre origine : domestique & industrielle**

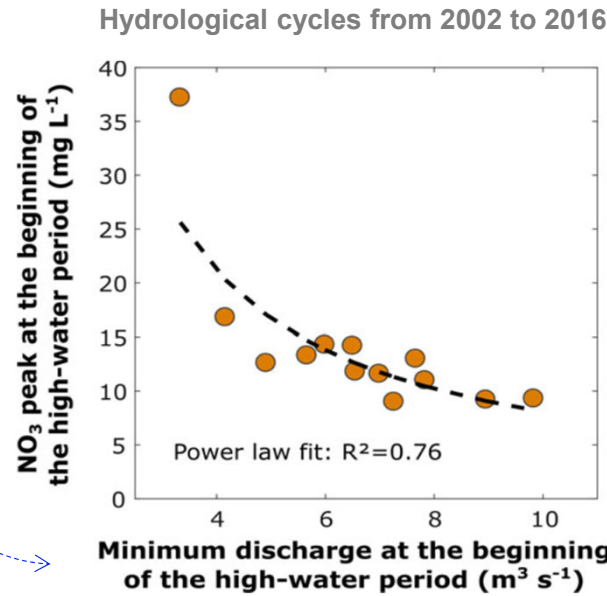
Dynamiques contrastées pour N et P reflètent des origines distinctes

Tendances en NO_3 dans les eaux

Influence des conditions climatiques sur le lessivage de NO_3



Indicateur des conditions
hydrologiques
=
Débit à la fin de l'été



(Charlier et al., 2020)

Corrélation entre l'intensité de la période de sécheresse et les pics de NO_3 dans les eaux

Périodes sèches:

SURFACE

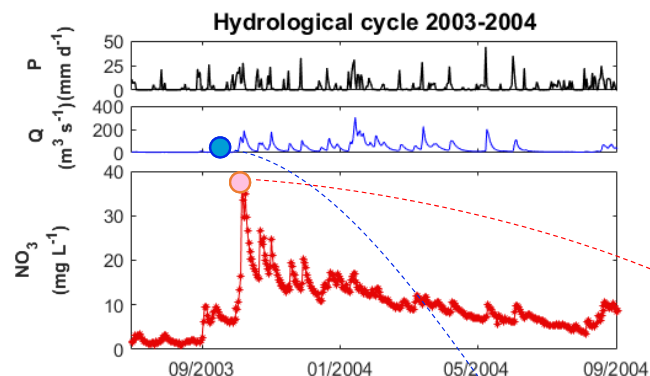
→ baisse des rendements agricoles
→ accumulation des nutriments dans le sol (peu de lessivage)
= augmentation de N dans le sol disponible au lessivage

SOUTERRAIN

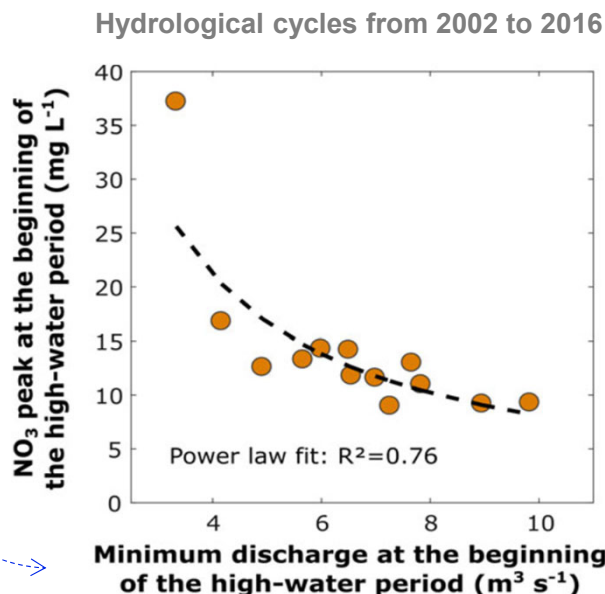
→ peu d'écoulement
→ stockage de NO_3 dans l'aquifère depuis le printemps/été
= stock mobilisable lors de des crues de reprises

Tendances en NO_3 dans les eaux

Influence des conditions climatiques sur le lessivage de NO_3



Indicateur des conditions
hydrologiques
=
Débit à la fin de l'été



(Charlier et al., 2020)

Corrélation entre l'intensité de la période de sécheresse et les pics de NO_3 dans les eaux

Périodes sèches:

= augmentation du stock N dans le sol et le milieu souterrain

Crue de reprises automnales:

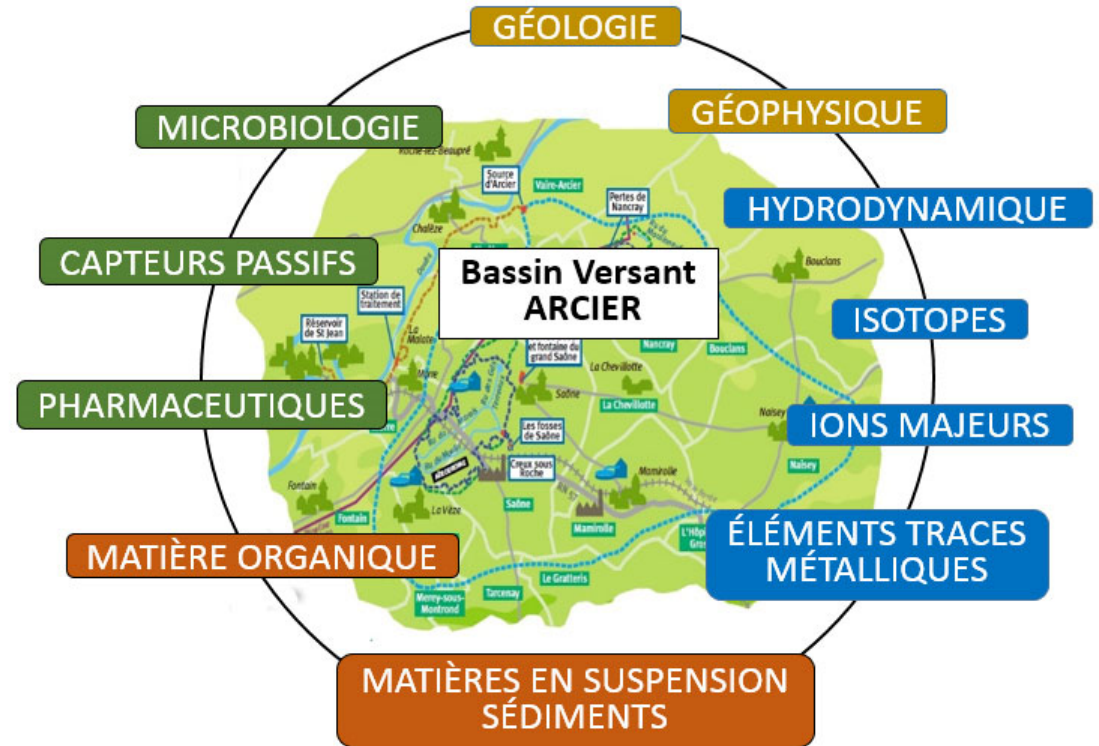
= fortes concentrations en NO_3 dans les eaux induites par le lessivage des sols et la mobilisation du stockage dans l'aquifère

Sensibilité aux épisodes de sécheresse est un facteur aggravant dans un contexte de changement climatique

Projet TRANSKARST: TRANSdisciplinary research on KARSTic waters

Rôle des circulations souterraines dans les transferts de contaminations minérale, organique et microbiologique à l'échelle des bassins versants karstiques

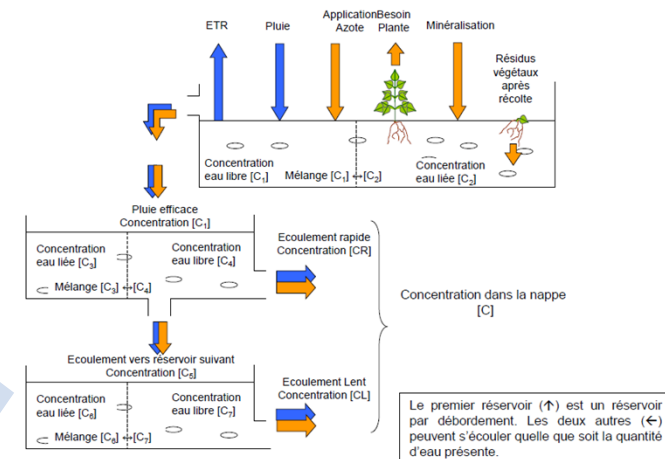
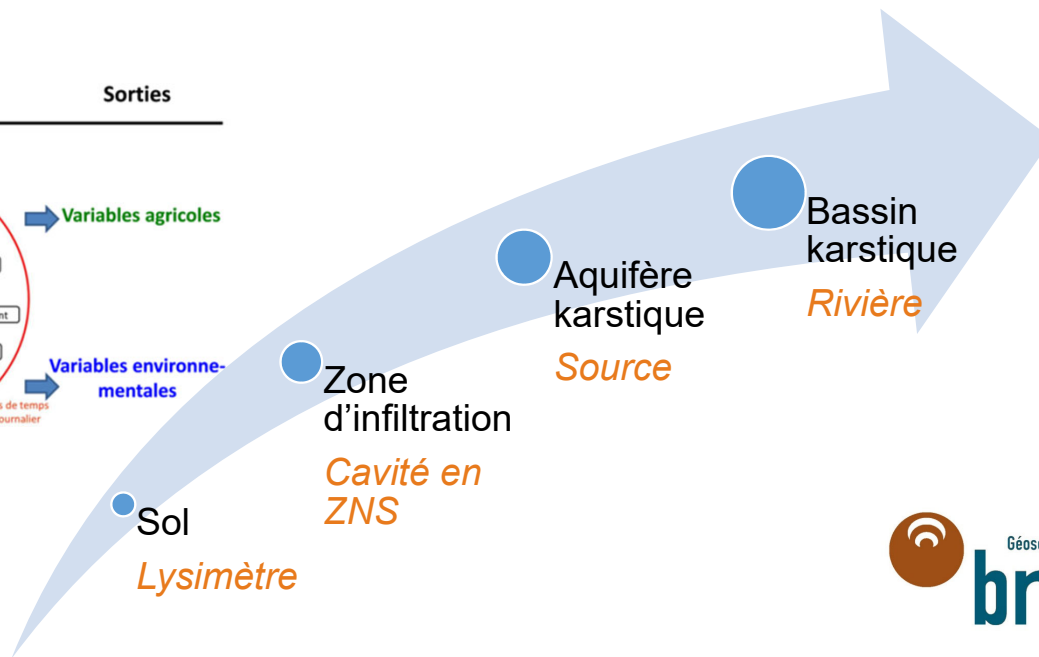
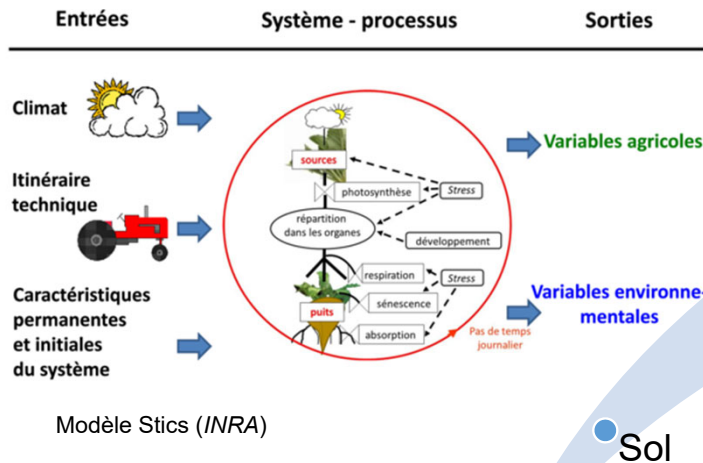
- Evaluer la contamination minérale, organique et microbiologique de l'hydrosystème karstique
- Comprendre la réactivité des milieux karstiques dans le transfert des contaminations par voie dissoute, colloïdale ou particulaire



Projet NUTRIKARST: Transferts de nutriments aux échelles du système karstique et du bassin

Tâche sur la modélisation des transferts

- **Modélisation du lessivage des sols** en fonction des pratiques agricoles
- **Modélisation des transferts** vers les ESO, puis changement d'échelle vers les ESU



Modèle BICHE (BRGM)



Processus mis en évidence et éléments de progrès

Combinaison des voies de transferts rapides et lents influence les dynamiques d'apparition des contaminants

Variabilité hydrologique (hétérogénéité spatiale et saisonnalité) conditionne le transfert de soluté, le transport particulaire et donc le transport de contaminants

Le suivi physico-chimique (conductivité élec. et turbidité) permet de comprendre les dynamiques de contamination selon les voies de transfert (dissous & particulaire)

Modélisation du transport de contaminants dans le karst reste un challenge énorme et encore peu robuste selon les cas

L'observation des concentrations et des flux hydriques permet de dégrossir le fonctionnement mais doit être associé à un suivi des pressions/rejets



Merci de votre attention