

#connaître #partager #accompagner

« Interroger le karst : monitoring des circulations en milieu karstique. Quels outils de surveillance pour quels objectifs ? »

Ornans, le 12 mars 2019

Sommaire

Introduction et programme (page 3)

Quantifier les dynamiques par l'hydrogéochimie. Monitoring dissous/particulaire dans le karst (paramètres suivis et processus attenants). Exemple du programme Jurassic Karst (page 6)

Marc Steinmann – Université Bourgogne Franche-Comté/Laboratoire Chrono-Environnement

Les traçages des eaux souterraines en domaine karstique. Principes, méthodes et mise en œuvre (page 49)

Alexandre Benoit-Gonin – Syndicat mixte du marais de Saône

Les traçages des eaux souterraines en domaine karstique. Bonnes pratiques & contexte régional (page 83)

Élodie Recchia – DREAL Bourgogne Franche-Comté

Quantifier les dynamiques par l'hydrologie. Mesure des hauteurs d'eau dans les drains et aux émergences karstiques. Exemple de suivis à la Grotte des Faux-Monnayeurs et à la source du Pontet (page 103)

Éric Georges – Groupe pour l'Inventaire, la Protection et l'Étude du Karst

Suivi haute fréquence des nutriments pour les eaux de surface et les eaux souterraines en domaine karstique basé sur une sonde spectrométrique in situ. Programme QUARSTIC (page 135)

Aurélien Vallet – BRGM Bourgogne Franche-Comté

D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC. Synthèse de la journée (page 162)

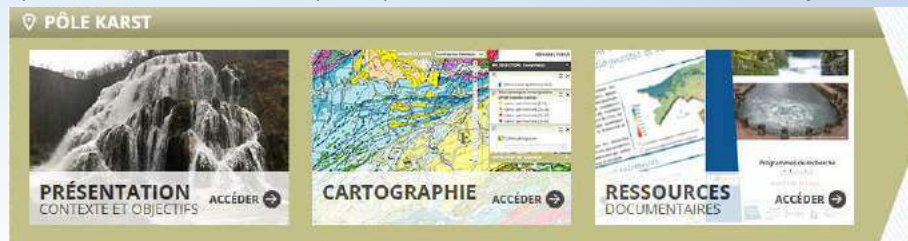
Thierry Marguet (AERMC) & Vincent Fister (Pôle Karst)

Listing des participants (page 186)

Un mot d'introduction sur le Pôle Karst

Axe 1 : Connaître

L'objectif de cet axe est celui de la **valorisation des données et connaissances produites sur le massif**. Il s'organise principalement autour d'une plateforme numérique qui a très récemment vu le jour et consultable ici : <http://www.orisk-bfc.fr/>.



Axe 2 : Partager

Qu'elles se réalisent sur le terrain ou par diffusion numérique, les actions associées à cet axe participent à **la mise en réseau et à la sensibilisation des acteurs régionaux** aux problématiques et enjeux actuels.

Quelques exemples de réalisations associées à cet axe:

Des productions



Des (re)présentations



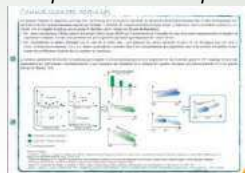
Des Journées d'Échanges



Axe 3 : Accompagner

Le Pôle accompagne également techniquement et scientifiquement les gestionnaires sur les projets/suivis en lien avec les hydrosystèmes karstiques. Ces missions d'accompagnement revêtent plusieurs formes.

Production de synthèses (note, livret) associées aux problématiques du massif



Transfert de connaissances via différents groupes de travail



Contribution aux réflexions et expertises locales



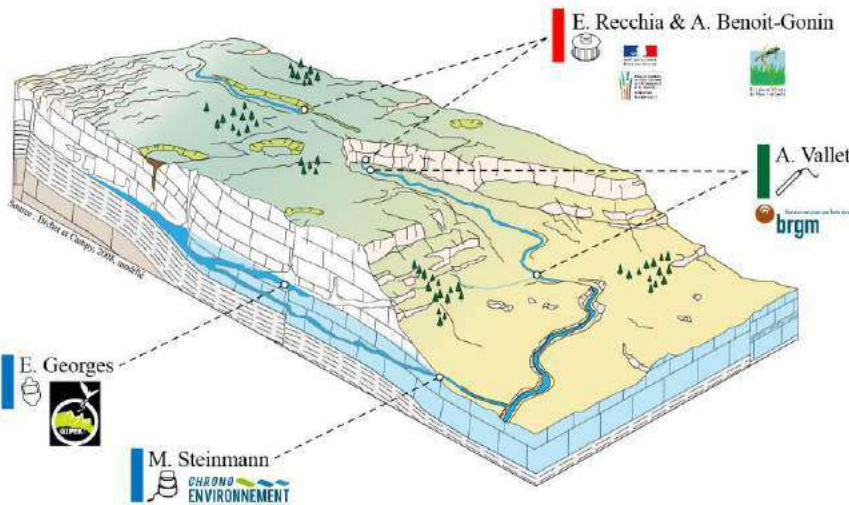
Compagnonnage de terrain



Programme de la journée

1. Quantifier les dynamiques par l'hydrogéochimie. Monitoring dissous/particulaire dans le karst (paramètres suivis et processus attenants). Exemple du programme Jurassic Karst.

Marc Steinmann – Université Bourgogne Franche-Comté/Laboratoire Chrono-Environnement



Légende

Quantifier les dynamiques de circulation par l'hydrologie et l'hydrogéochimie

Identifier les trajets de l'eau par traçages artificiels

Mesurer les nutriments

Sonde de pression

Préleveur automatique

Fluorimètre

Sonde spectrométrique

2. Les traçages des eaux souterraines en domaine karstique. Principes, méthodes et mise en œuvre.

Alexandre Benoit-Gonin – Syndicat mixte du marais de Saône

3. Les traçages des eaux souterraines en domaine karstique. Bonnes pratiques & contexte régional

Élodie Recchia – DREAL Bourgogne Franche-Comté

4. Quantifier les dynamiques par l'hydrologie. Mesure des hauteurs d'eau dans les drains et aux émergences karstiques. Exemple de suivis à la Grotte des Faux-Monnayeurs et à la source du Pontet

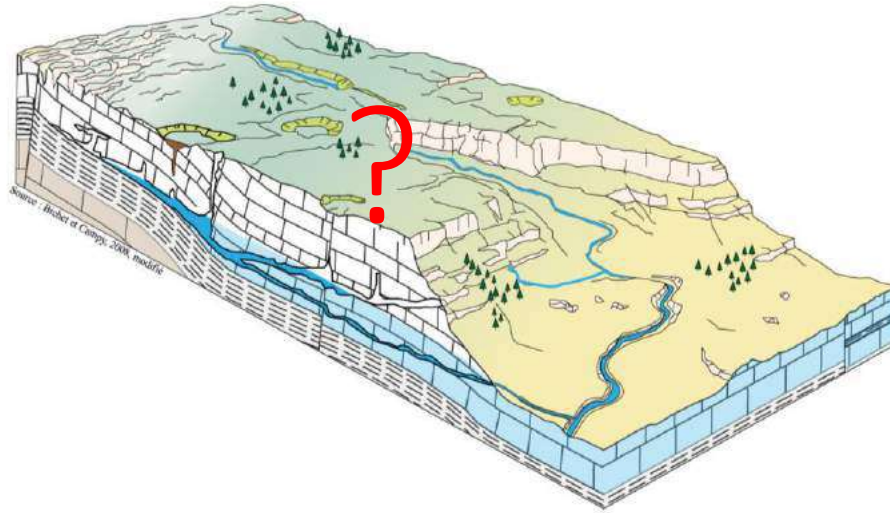
Éric Georges – Groupe pour l'Inventaire, la Protection et l'Étude du Karst

5. Suivi haute fréquence des nutriments pour les eaux de surface et les eaux souterraines en domaine karstique basé sur une sonde spectrométrique in situ. Programme QUARSTIC

Aurélien Vallet – BRGM Bourgogne Franche-Comté

6. D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC. Synthèse de la journée
Thierry Marguet (AERMC) & Vincent Fister (Pôle Karst)

Objectifs de la journée



- Présenter une partie du panel de méthodes/approches susceptibles d'être utilisées en milieu karstique (intérêts du type de suivi, processus étudiés, limites...)
- Aider à définir une/des méthode(s) selon des objectifs définis (étude exploratoire, délimitation d'un bassin versant, caractérisation qualitative/quantitative de la ressource...)
- Favoriser les échanges sur ces pratiques, faire dialoguer les différentes communautés du karst

Monitoring dissous/particulaire dans le karst : Exemple du programme Jurassic Karst

Marc Steinmann, Laboratoire de Chrono-environnement



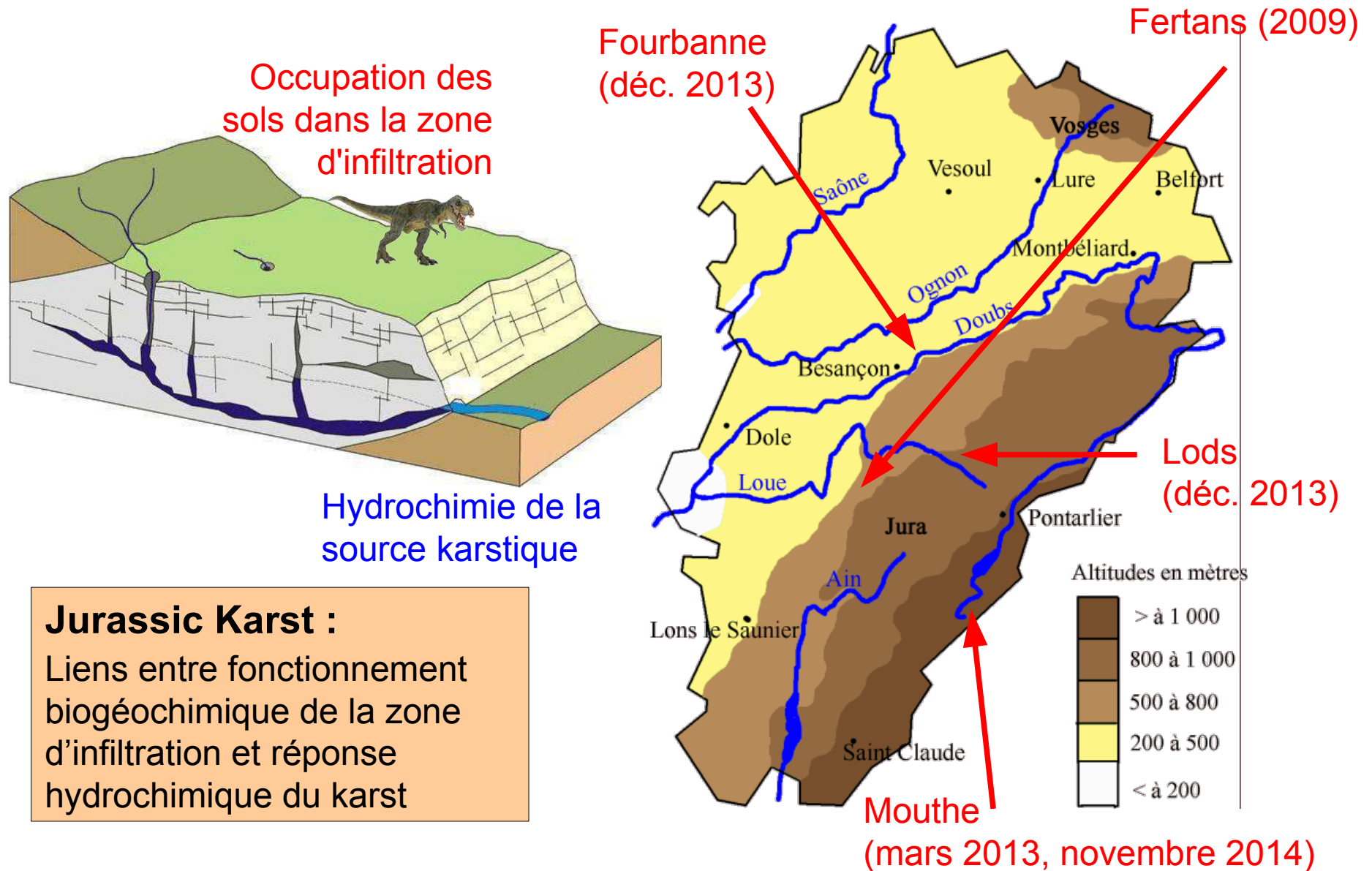
source du Grand Bief à Lods

Monitoring dissous/particulaire dans le karst

- 1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"
- 2) La durée et la fréquence de l'observation
- 3) Les suivis manuels et les suivis par préleveur automatique
- 4) Les suivis par sondes automatiques
- 5) L'importance de la fraction particulaire
- 6) L'intérêt des suivis de crue
- 7) Conclusions



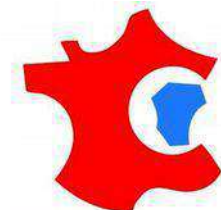
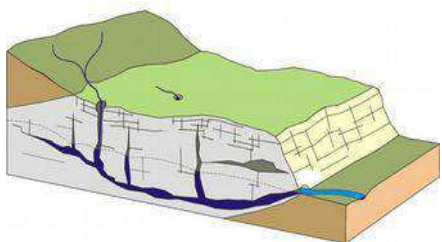
1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"



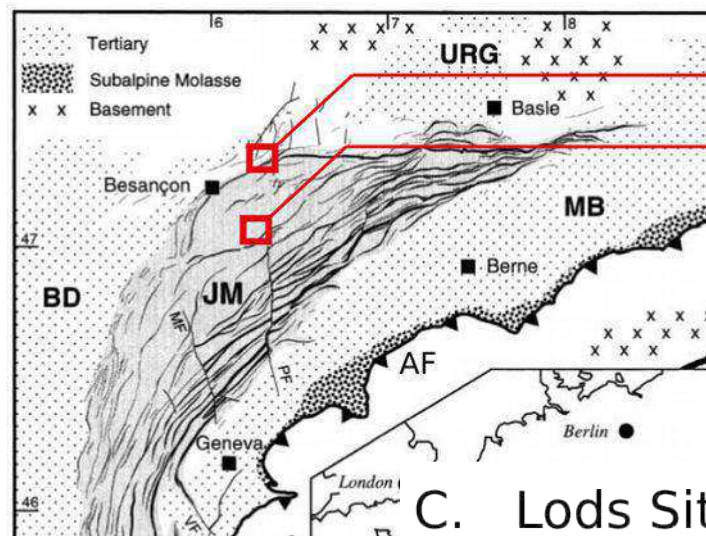
Les sites de Fourbanne et Lods

(installés en décembre 2013)

Dans le cadre de la thèse de C. Cholet (CRFC/BRGM), octobre 2013 - juin 2017



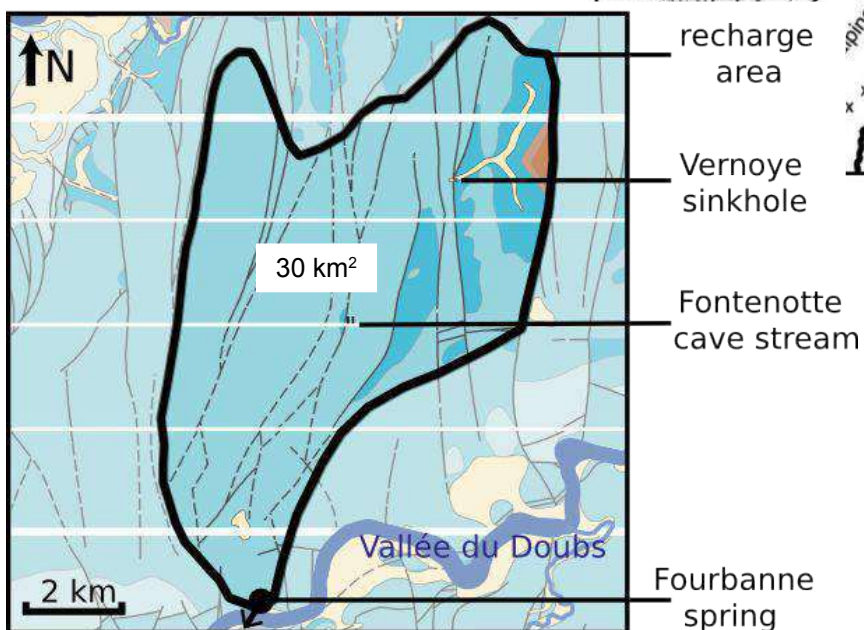
Franche-Comté
Conseil régional



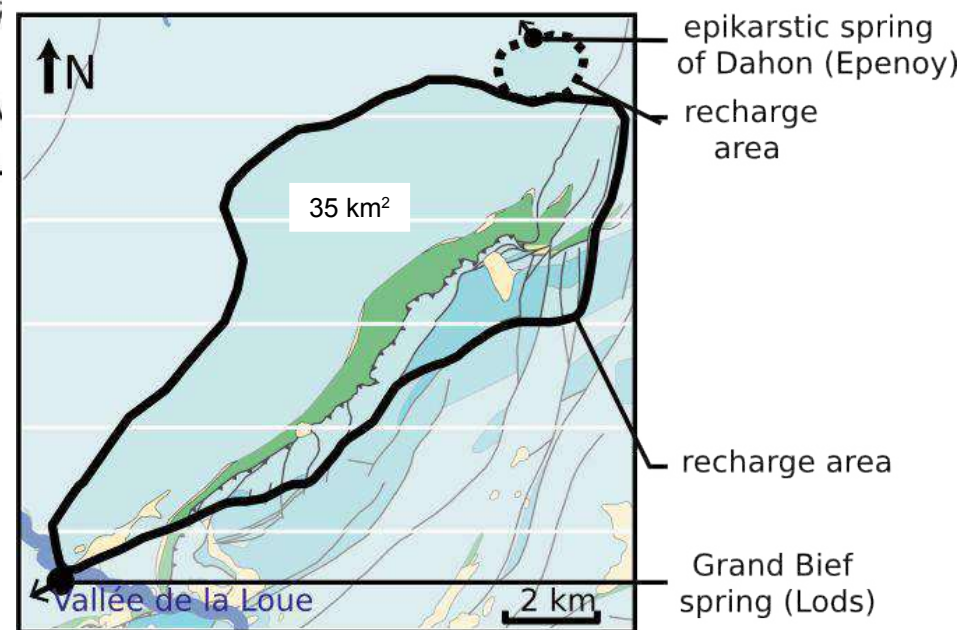
Fourbanne site

Lods site

B. Fourbanne Site

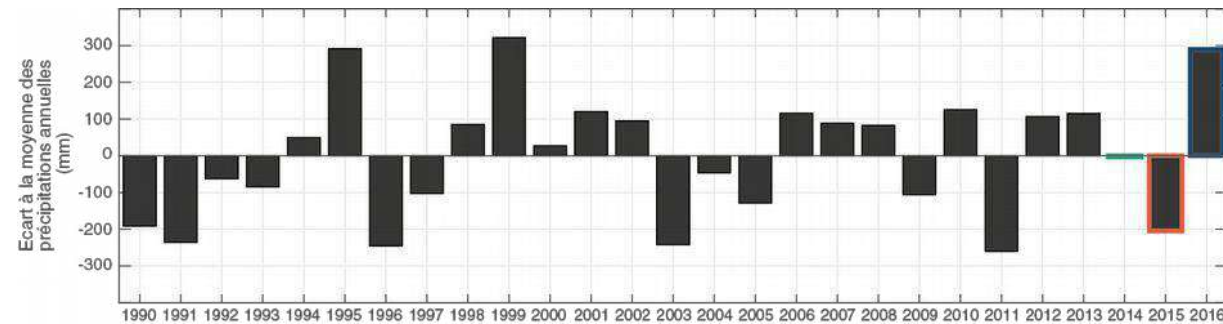


C. Lods Site



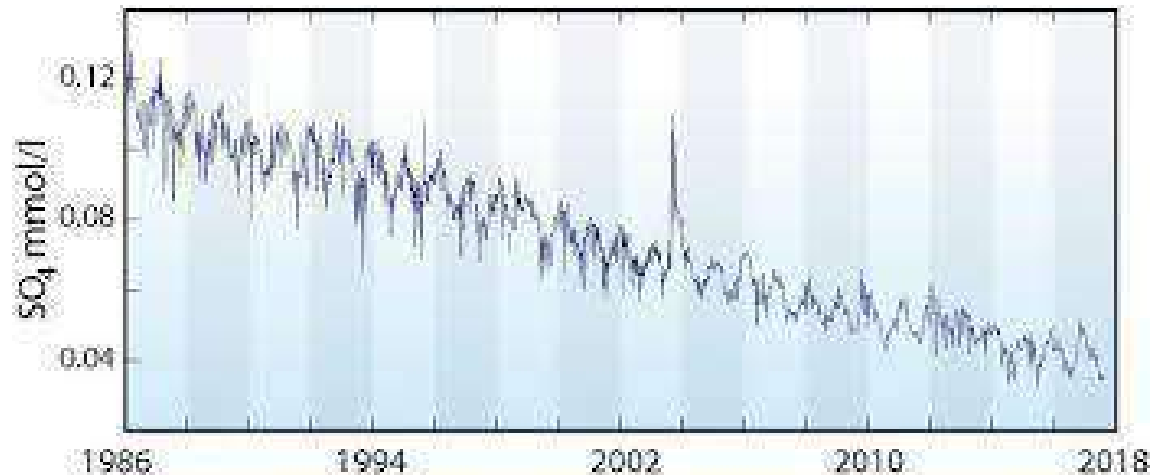
2) La durée et la fréquence de l'observation

Variabilité des conditions météorologiques



Précipitations annuelles à Besançon (Cholet 2017)

Évolutions sur le long-terme masquées par des cycles annuels

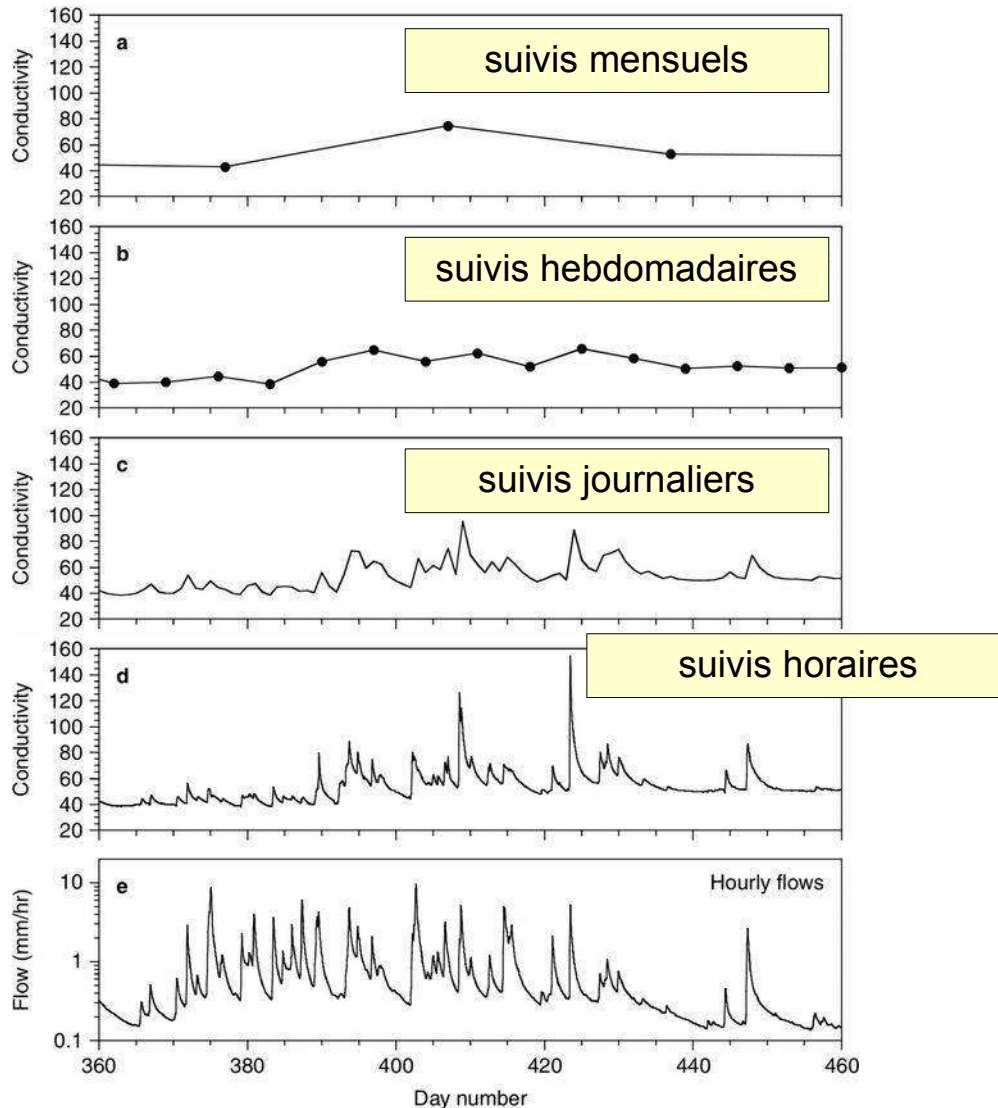


Teneurs en sulfates dans un ruisseau vosgien (OHGE Strengbach)

2) La durée et la fréquence de l'observation



J. W. KIRCHNER ET AL.



Imagine trying to understand a Beethoven symphony if one could only hear one note every minute or two!

That is what we are trying to do when we infer the hydrochemical functioning of a catchment from weekly or monthly grab samples.

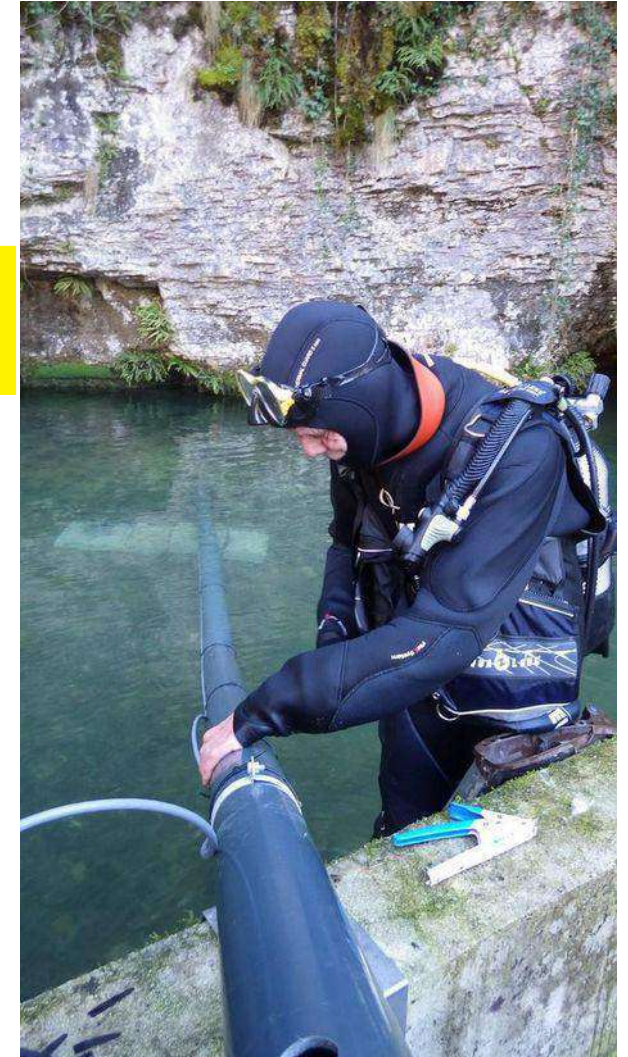
J.W. Kirchner et al. 2004

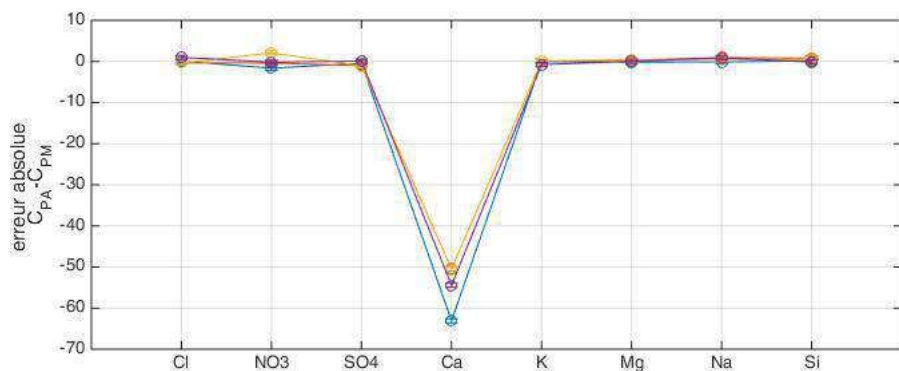
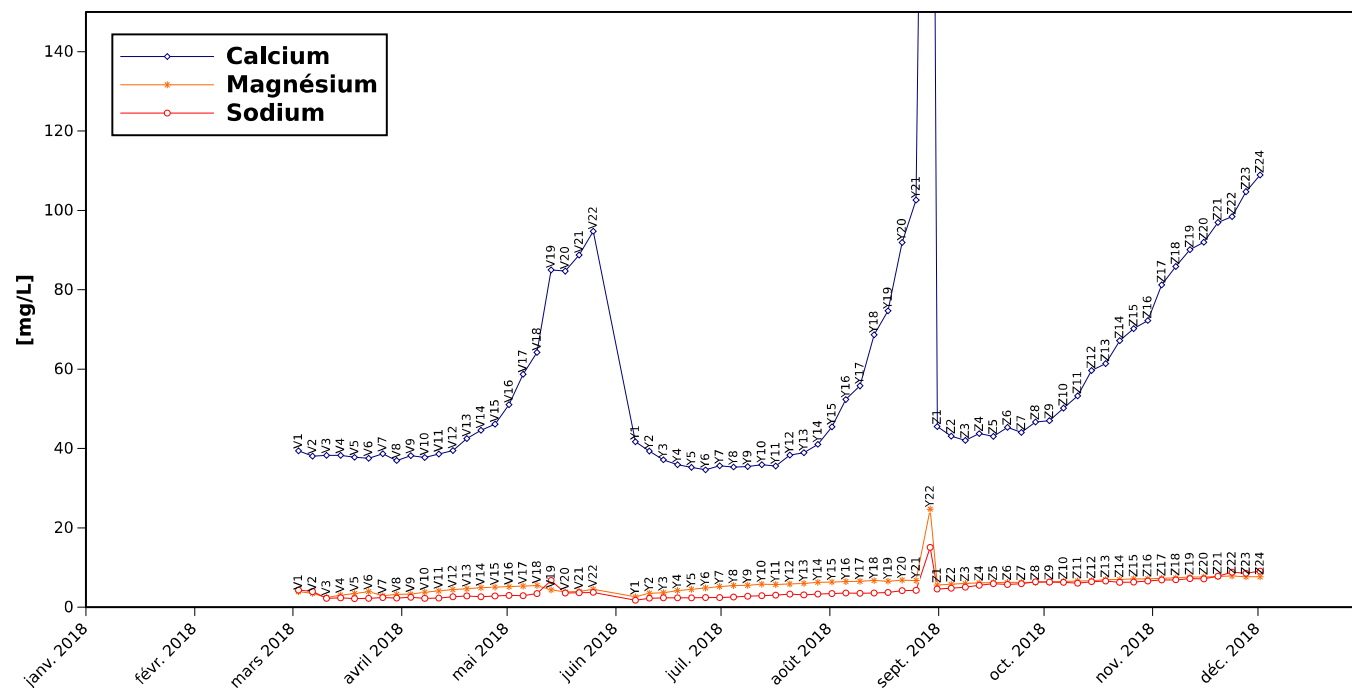
Haute fréquence :

- Intégration des crues dans les bilans annuels
- Variabilité des paramètres
- "Zoom" temporel, informations sur les mécanismes

Monitoring dissous/particulaire dans le karst

- 1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"
- 2) La durée et la fréquence de l'observation
- 3) Les suivis manuels et les suivis par préleveur automatique
- 4) Les suivis par sondes automatiques
- 5) L'importance de la fraction particulaire
- 6) L'intérêt des suivis de crue
- 7) Conclusions





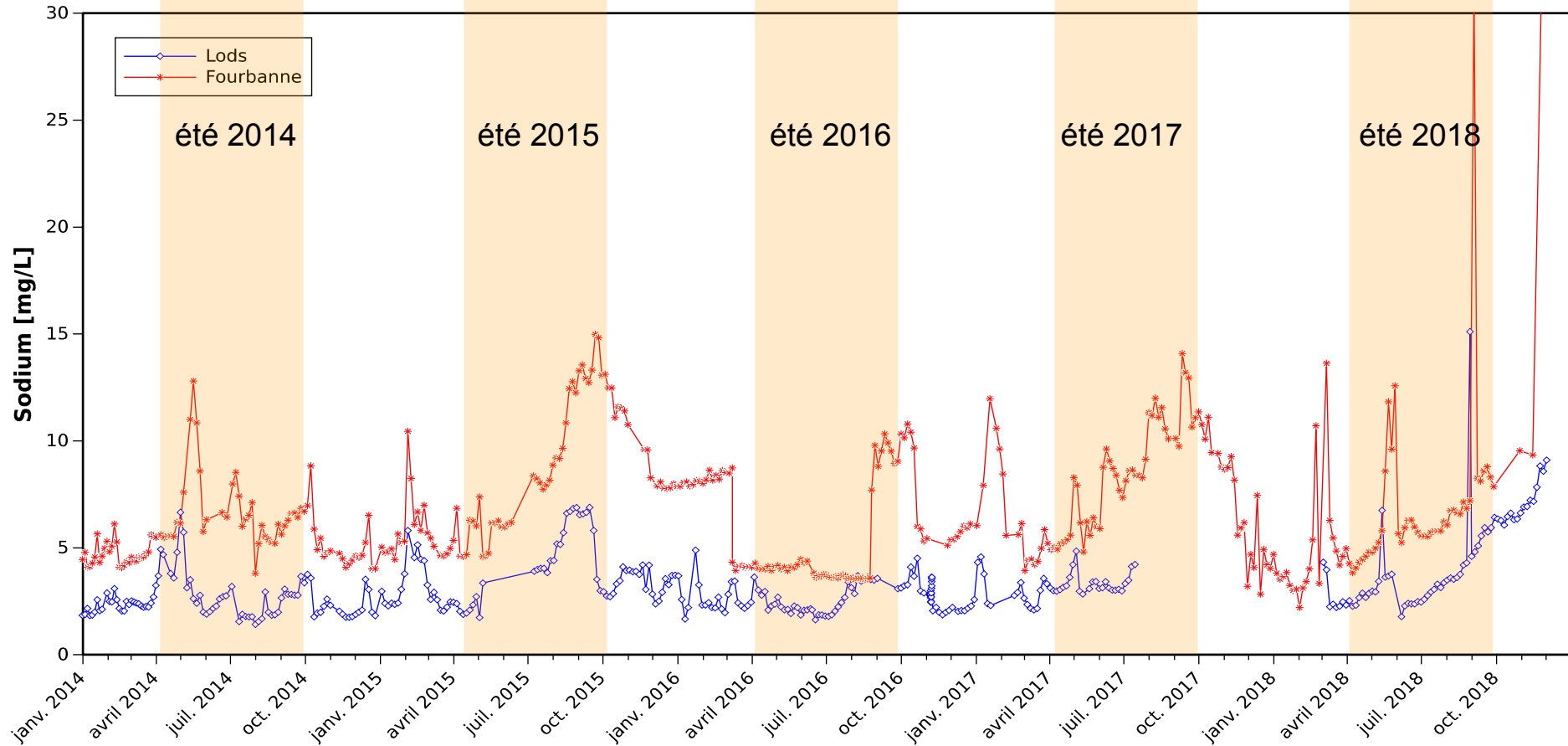
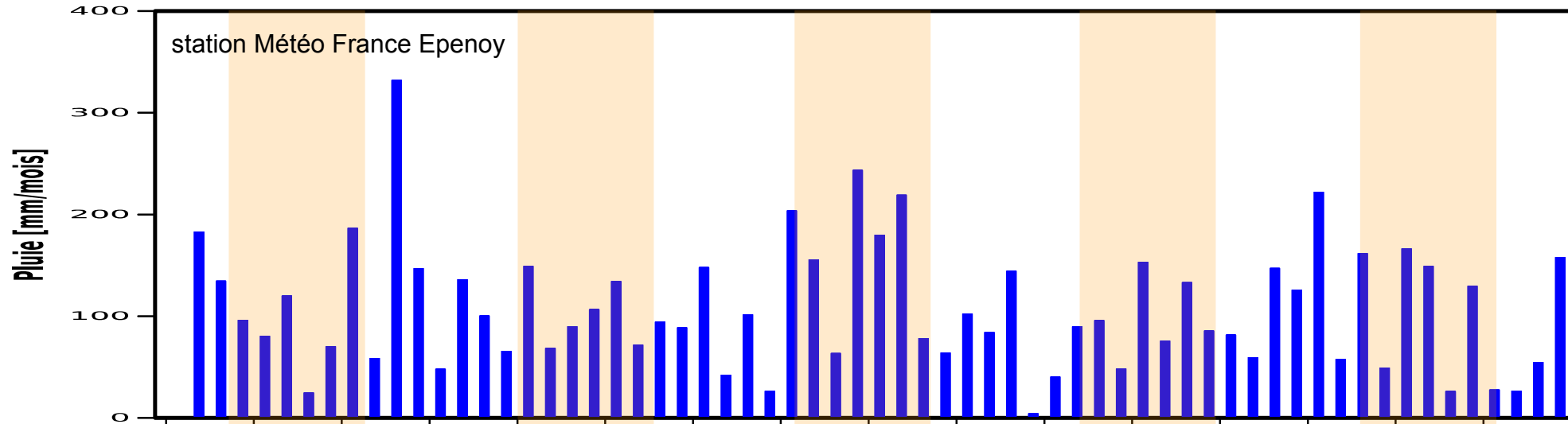
Cholet, 2017

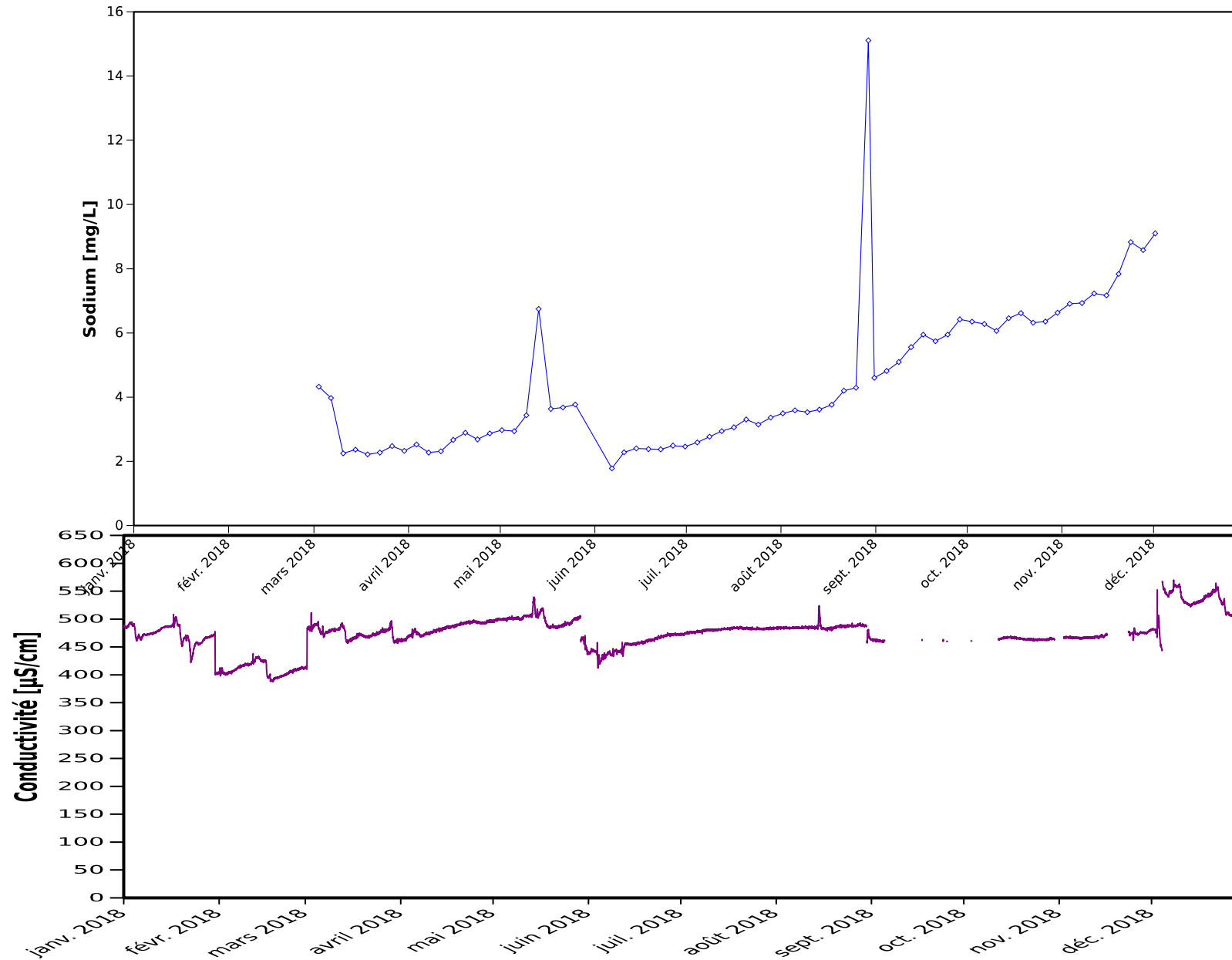
Préleveur automatique :

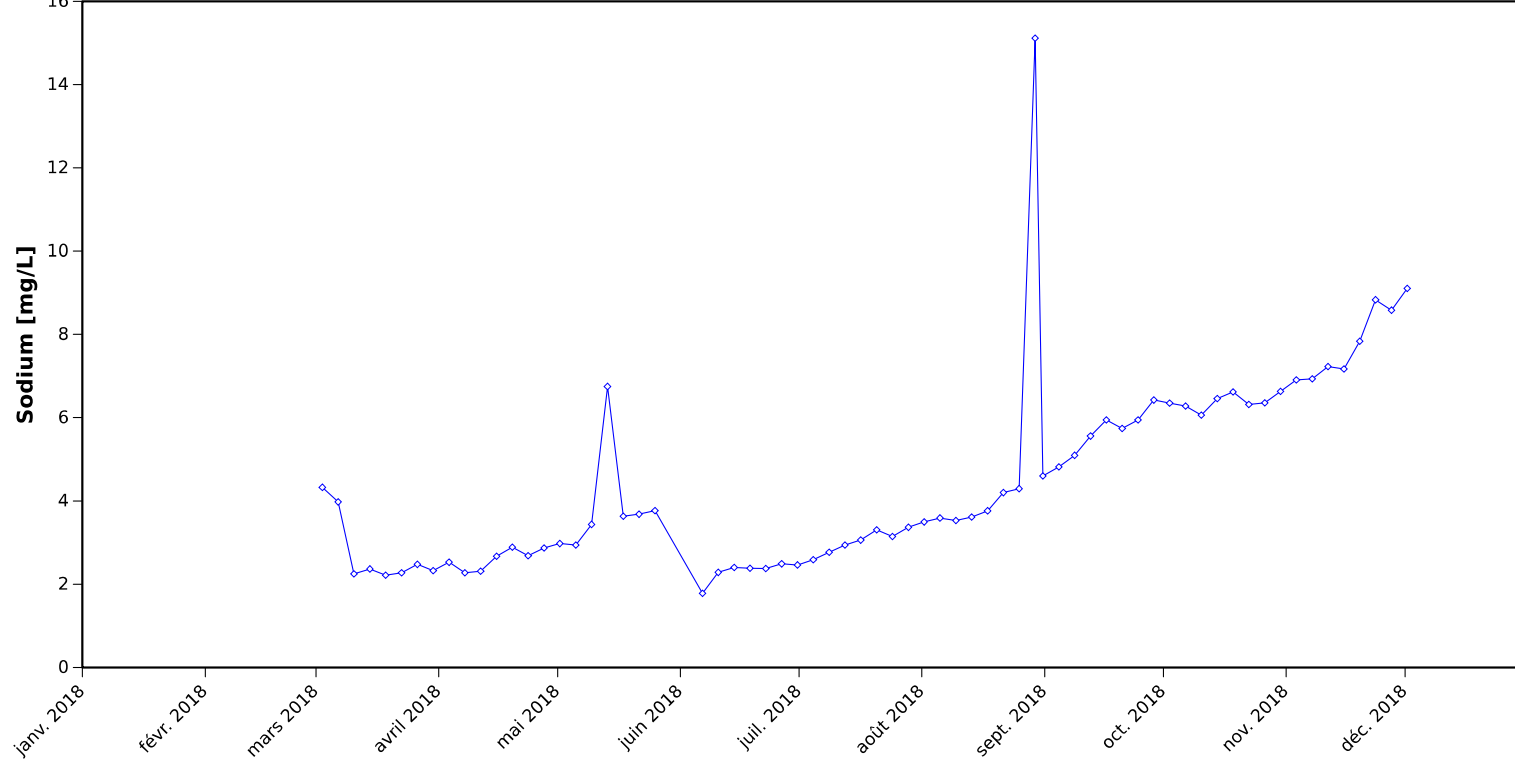
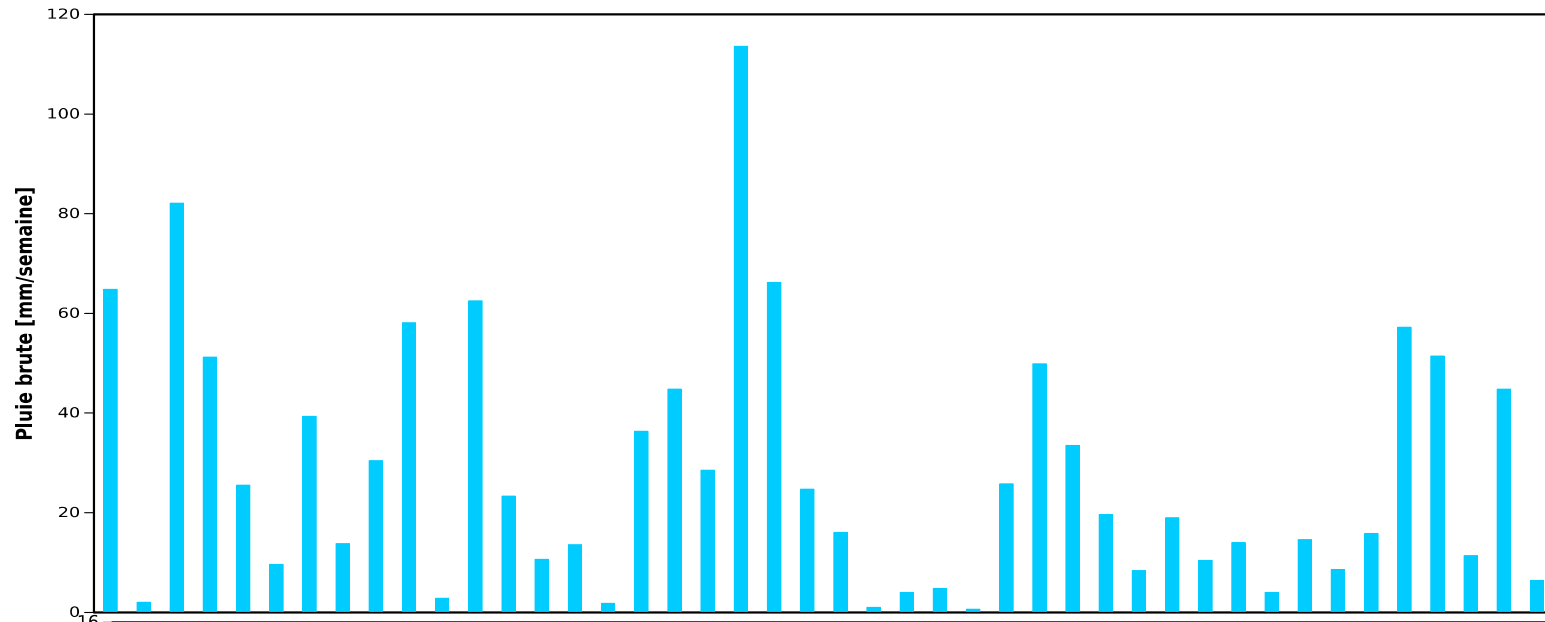
- Simple et robuste. Idéal pour les éléments majeurs.
- Permet de suivre des éléments chimiques non-mesurables par sondes automatiques.
- Utile pour vérifier/interpréter certains paramètres suivis par sondes automatiques (ex. conductivité, nitrates ...).

Limitations :

- *Suivis à fréquence élevée (≤ 1 jour)* : beaucoup de main d'œuvre et coûteux (analyses).
- *Conservation des échantillons* : problématique pour HCO₃⁻, Ca²⁺, carbone organique, éléments traces au-delà de 2-3 jours.







Monitoring dissous/particulaire dans le karst

- 1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"
- 2) La durée et la fréquence de l'observation
- 3) Les suivis manuels et les suivis par préleveur automatique
- 4) Les suivis par sondes automatiques
- 5) L'importance de la fraction particulaire
- 6) L'intérêt des suivis de crue
- 7) Conclusions



Les sondes automatiques de Jurassic Karst

Type d'appareil	Réf. appareil	Nombre d'appareils	Stations (+ année d'installation)	Nombre de paramètres	Paramètres de suivi	Intervalle de mesure
Sonde CTD	OTT CTD	4	Fontenotte (2013), 2*Fertans (2009), Epenoy (2013), Mouthe (2013)	3	température, hauteur d'eau, conductivité	30 min
Fluorimètre	GGUN-FL30	4	Fontenotte (2013), Fourbanne (2013), Epenoy (2013), Lods (2013)	2	COD, turbidité	30 min
Sonde multiparamètre	Hydrolab DS5X	3	Fourbanne (2013), Lods (2013), Mouthe (2014)	7	hauteur d'eau, température, conductivité, pH, oxygène dissous, turbidité, chlorures	30 min
Sonde UV	S::can spectro::lyser	2	Lods (2015) Fourbanne (2017)	3	NO3, COT, COD, turbidité	30 min

Les sondes CTD (conductivité, temp., hauteur d'eau)

Sonde
OTT CTD



Station d'acquisition OTT CTD

Station
d'acquisition
OTT CTD



et sonde
DIVER CTD

Sondes CTD :

- Tarif raisonnable (1600-2000 €)
- Paramètres de "base" indispensables.
- Simple et robuste. Bonne autonomie.

Les fluorimètres de terrain ("GGUN")



Sonde GGUN FL30



Sonde GGUN FL30
avec sonde CTD
(OTT CTD)



Sonde GGUN FL30

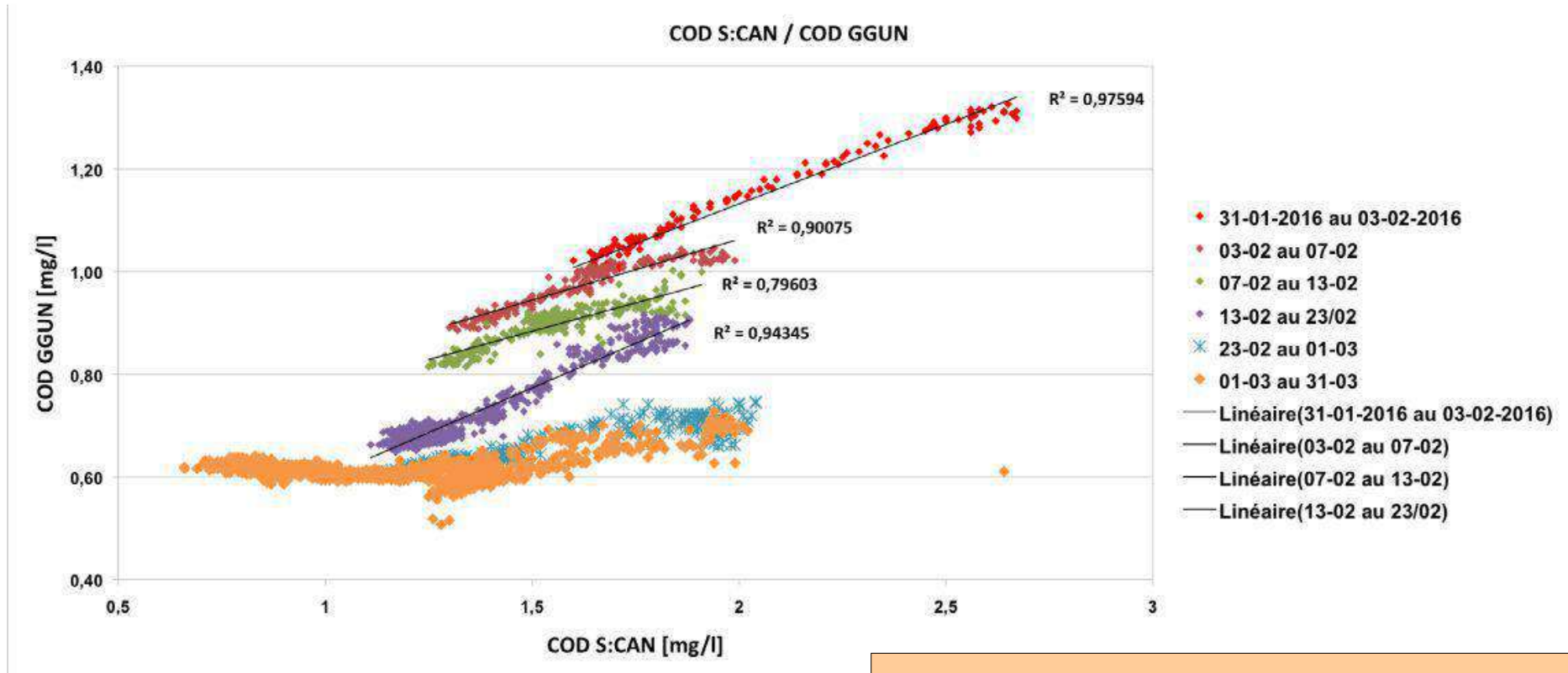


Station d'acquisition
GGUN FL30

Sonde GGUN FL30 :

- Tarif raisonnable (5000 €)
- Conçu pour les essais de traçage
- Utilisable pour mesurer la turbidité et le carbone organique dissous (COD).
- Simple et robuste. Bonne autonomie.

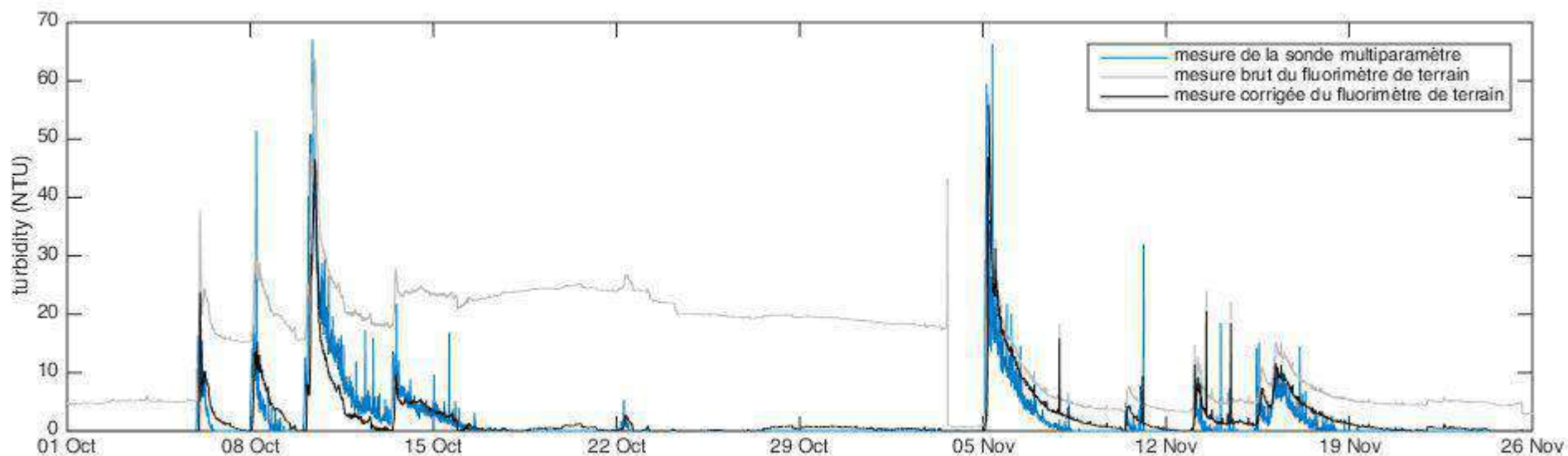
Mesure du carbone organique dissous avec sonde GGUN FL 30



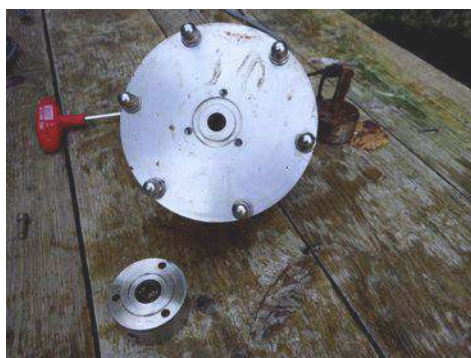
COD avec GGUN FL30 :

- Fluorescence du carbone organique évolue en fonction des saisons
→ étalonnage régulier indispensable.
- Bien adapté pour un suivi de crue.

Mesure de la turbidité avec sonde GGUN FL 30



Cholet, 2017



Turbidité avec GGUN FL30 :

- Encrassement du chemin optique
→ seulement pour des suivis ponctuels.
- Bien adapté pour un suivi de crue.

Les sondes automatiques de Jurassic Karst

Type d'appareil	Réf. appareil	Nombre d'appareils	Stations (+ année d'installation)	Nombre de paramètres	Paramètres de suivi	Intervalle de mesure
Sonde CTD	OTT CTD	4	Fontenotte (2013), 2*Fertans (2009), Epenoy (2013), Mouthe (2013)	3	température, hauteur d'eau, conductivité	30 min
Fluorimètre	GGUN-FL30	4	Fontenotte (2013), Fourbanne (2013), Epenoy (2013), Lods (2013)	2	COD, turbidité	30 min
Sonde multiparamètre	Hydrolab DS5X	3	Fourbanne (2013), Lods (2013), Mouthe (2014)	7	hauteur d'eau, température, conductivité, pH, oxygène dissous, turbidité, chlorures	30 min
Sonde UV	S::can spectro::lyser	2	Lods (2015) Fourbanne (2017)	3	NO3, COT, COD, turbidité	30 min

Les sondes multiparamètres (Hydrolab DS5X)

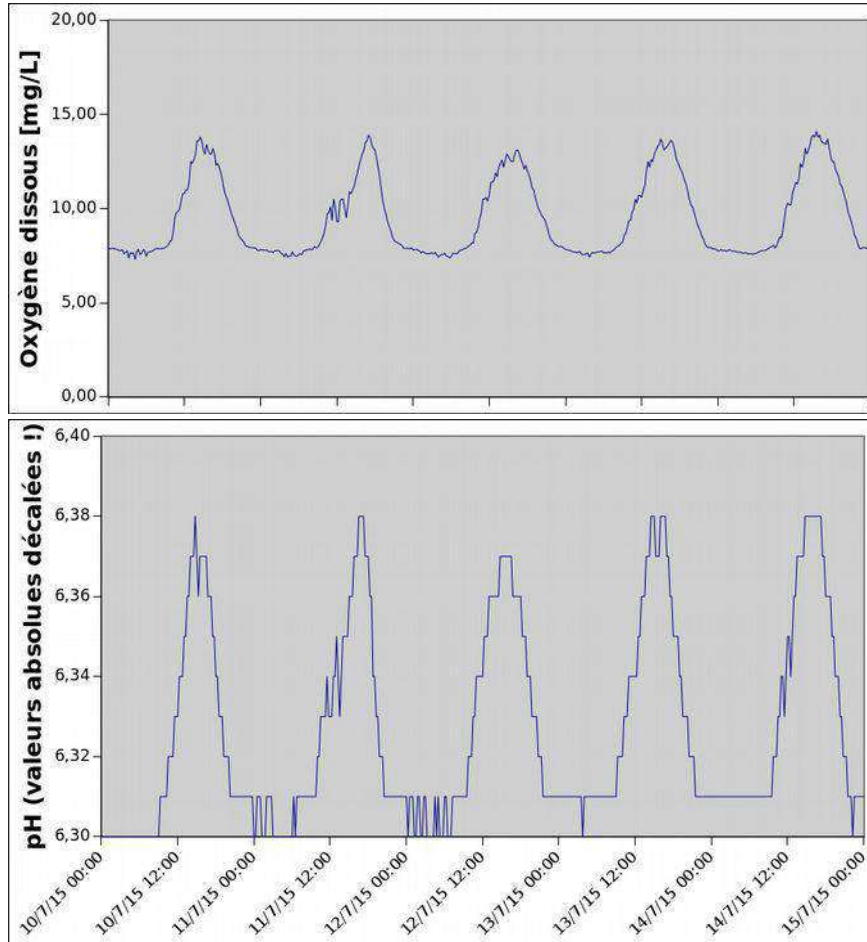


Hydrolab DS5X :

- Conductivité
- Température
- Hauteur d'eau
- pH (avec électrode de référence)
- O₂ dissous (optique)
- Turbidité
- Chlorures (électrode sélective)

Exemple : suivis O₂ et pH

(Site de Fourbanne)



Bilan Hydrolab DS5X après 5 ans d'utilisation

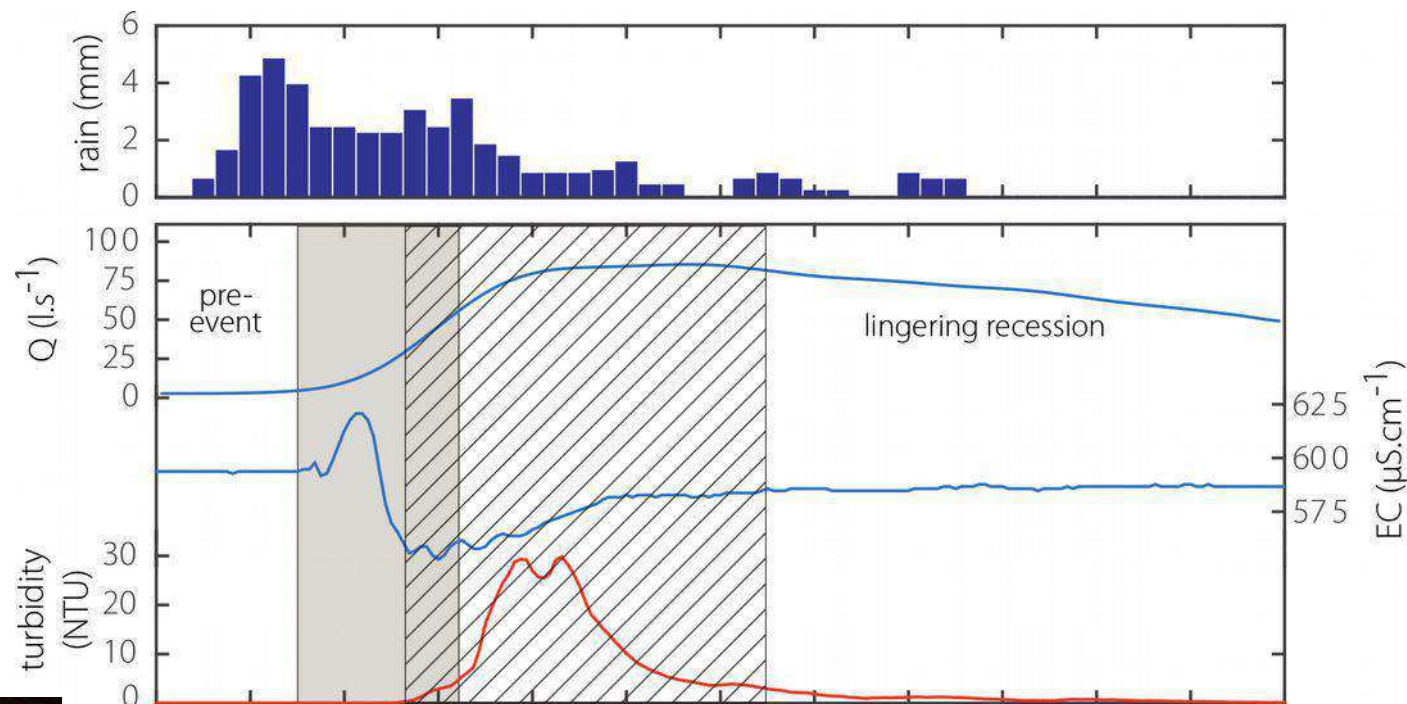
- Sonde fragile, très chère à l'achat (10 K€) et à l'entretien.
- SAV très peu arrangeant.
- Interface informatique préhistorique (RS232).
- **Conductivité, temp., hauteur d'eau** : fonctionne, mais une sonde CTD fait mieux !
- **O₂, pH** : très fortes dérives, données inutilisables sur le long terme !
- **Capteur de chlorures** : très forte dérive, peu fiable, à remplacer tous les ans (env. 1200 €).
- **Turbidité** : ok
- **Conclusion** : il vaut mieux utiliser une sonde CTD + turbidimètre



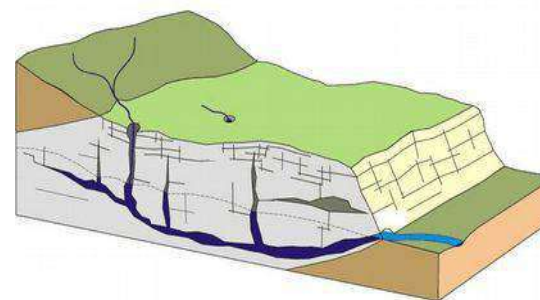
Le jeux de paramètres indispensables pour les suivis en continu

- hauteur d'eau → débits
- température
- conductivité
- turbidité

→ sonde CTD + turbidimètre



Cholet et al., 2019



Les sondes automatiques de Jurassic Karst

Type d'appareil	Réf. appareil	Nombre d'appareils	Stations (+ année d'installation)	Nombre de paramètres	Paramètres de suivi	Intervalle de mesure
Sonde CTD	OTT CTD	4	Fontenotte (2013), 2*Fertans (2009), Epenoy (2013), Mouthe (2013)	3	température, hauteur d'eau, conductivité	30 min
Fluorimètre	GGUN-FL30	4	Fontenotte (2013), Fourbanne (2013), Epenoy (2013), Lods (2013)	2	COD, turbidité	30 min
Sonde multiparamètre	Hydrolab DS5X	3	Fourbanne (2013), Lods (2013), Mouthe (2014)	7	hauteur d'eau, température, conductivité, pH, oxygène dissous, turbidité, chlorures	30 min
Sonde UV	S::can spectro::lyser	2	Lods (2015) Fourbanne (2017)	3	NO3, COT, COD, turbidité	30 min

Sonde UV pour NO₃, COT et COD

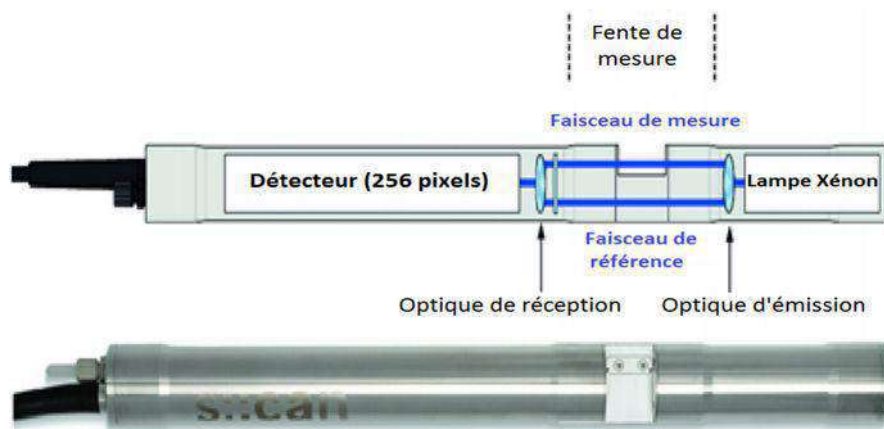
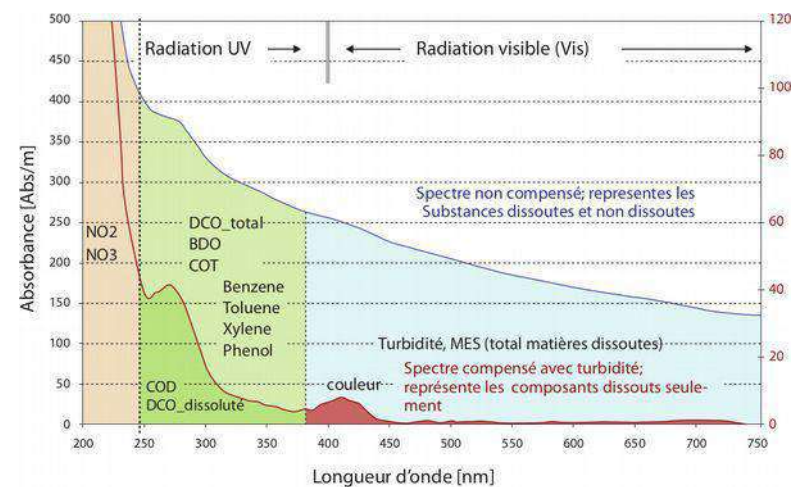


Figure 2. Spectrophotomètre UV/Visible spectrolyser de S::CAN Messtechnik GmbH

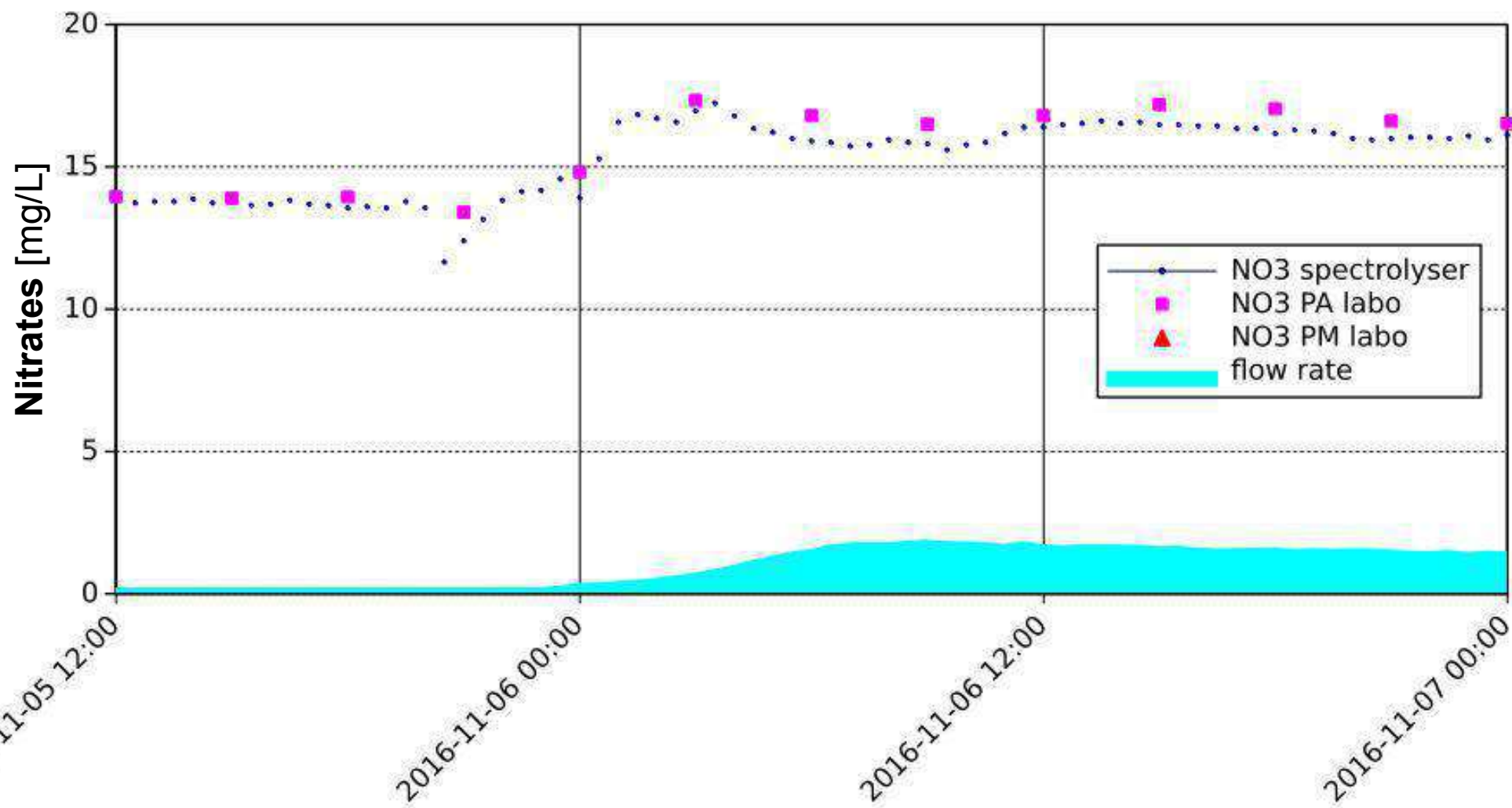
Photo (<http://www.s-can.at/text.php?kat=5&id=21&langcode=2>)



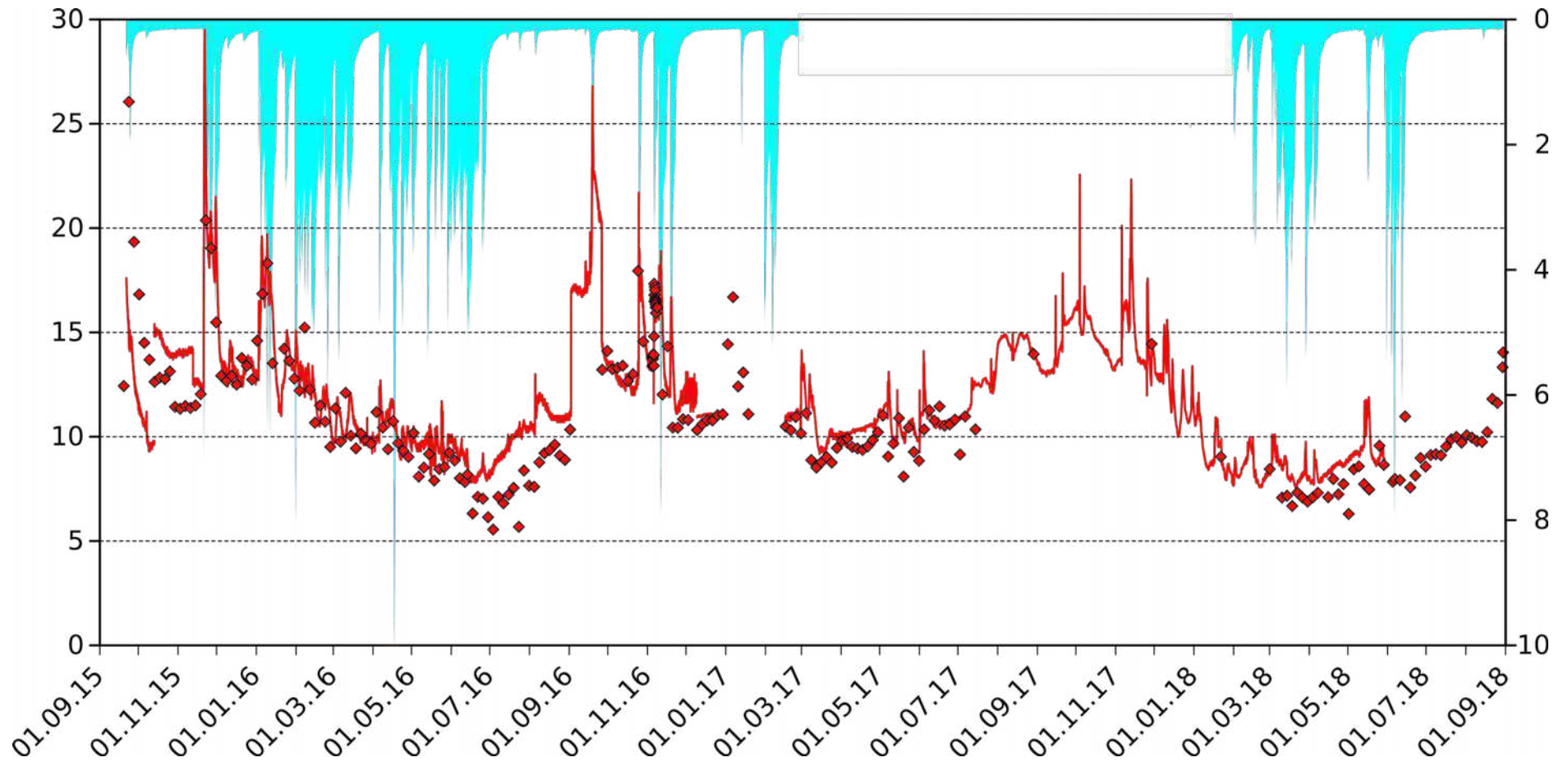
s::can méthode de mesure – "Fingerprint"

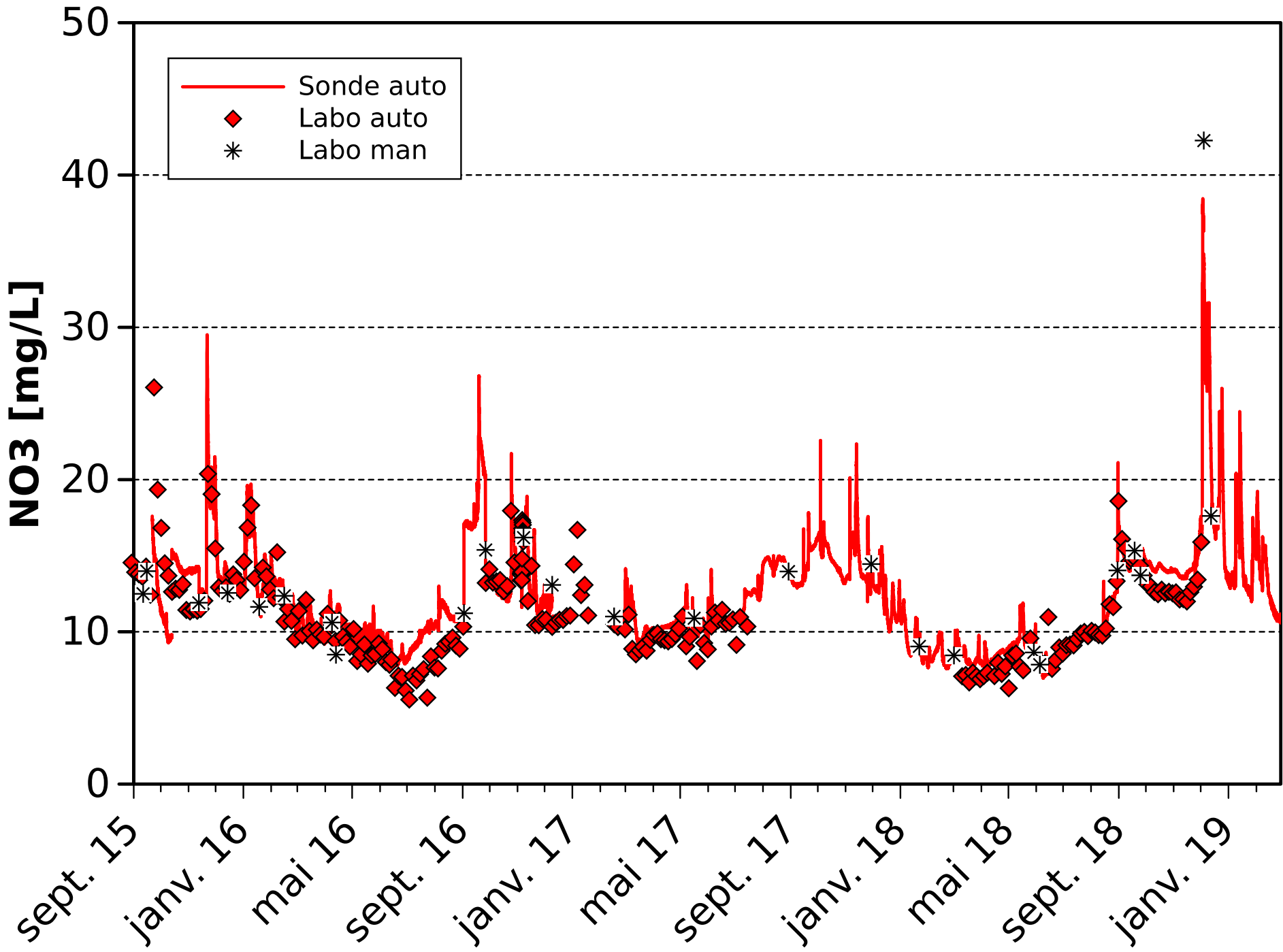


Détail nitrates mini-crue novembre 2016

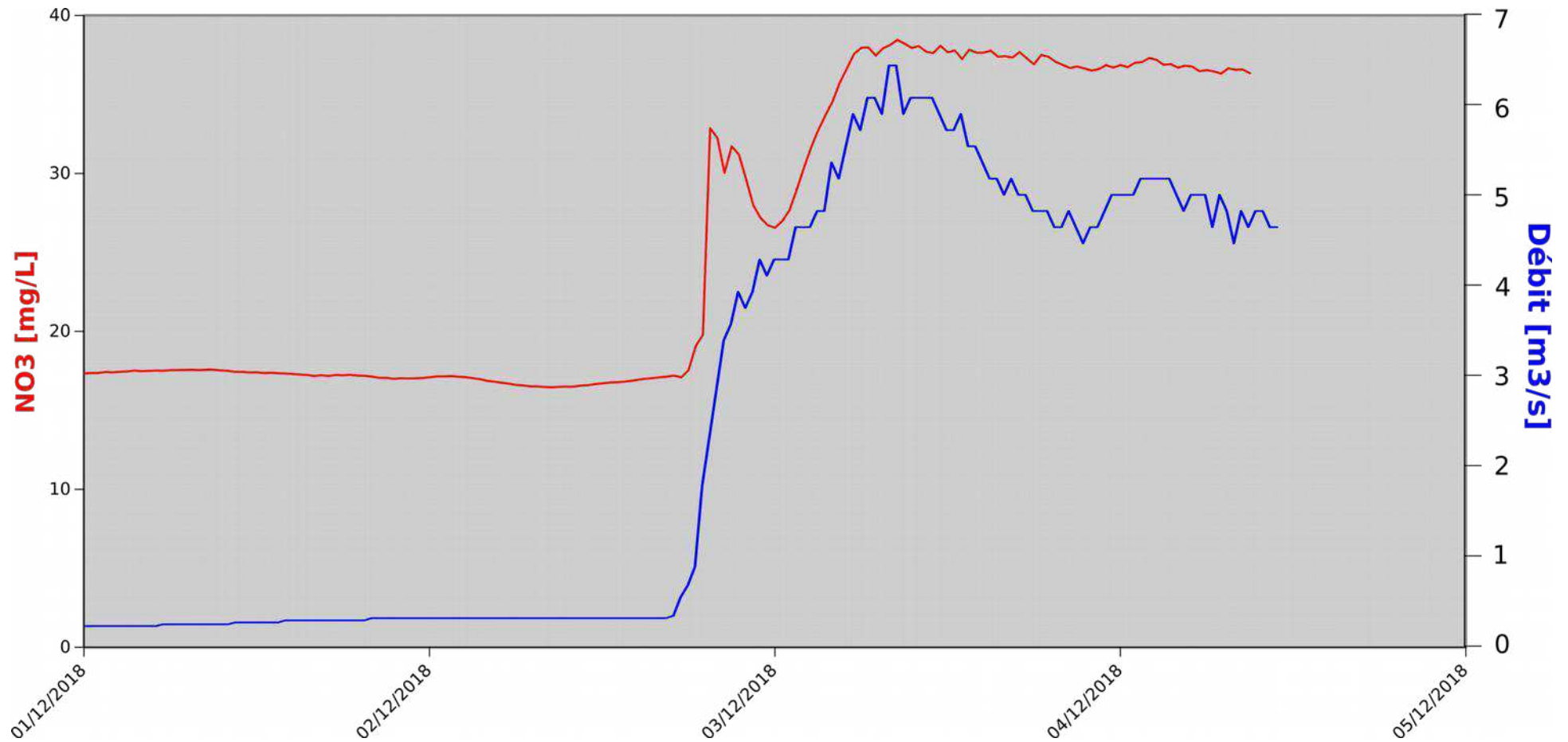


Suivis nitrates 2015-2018

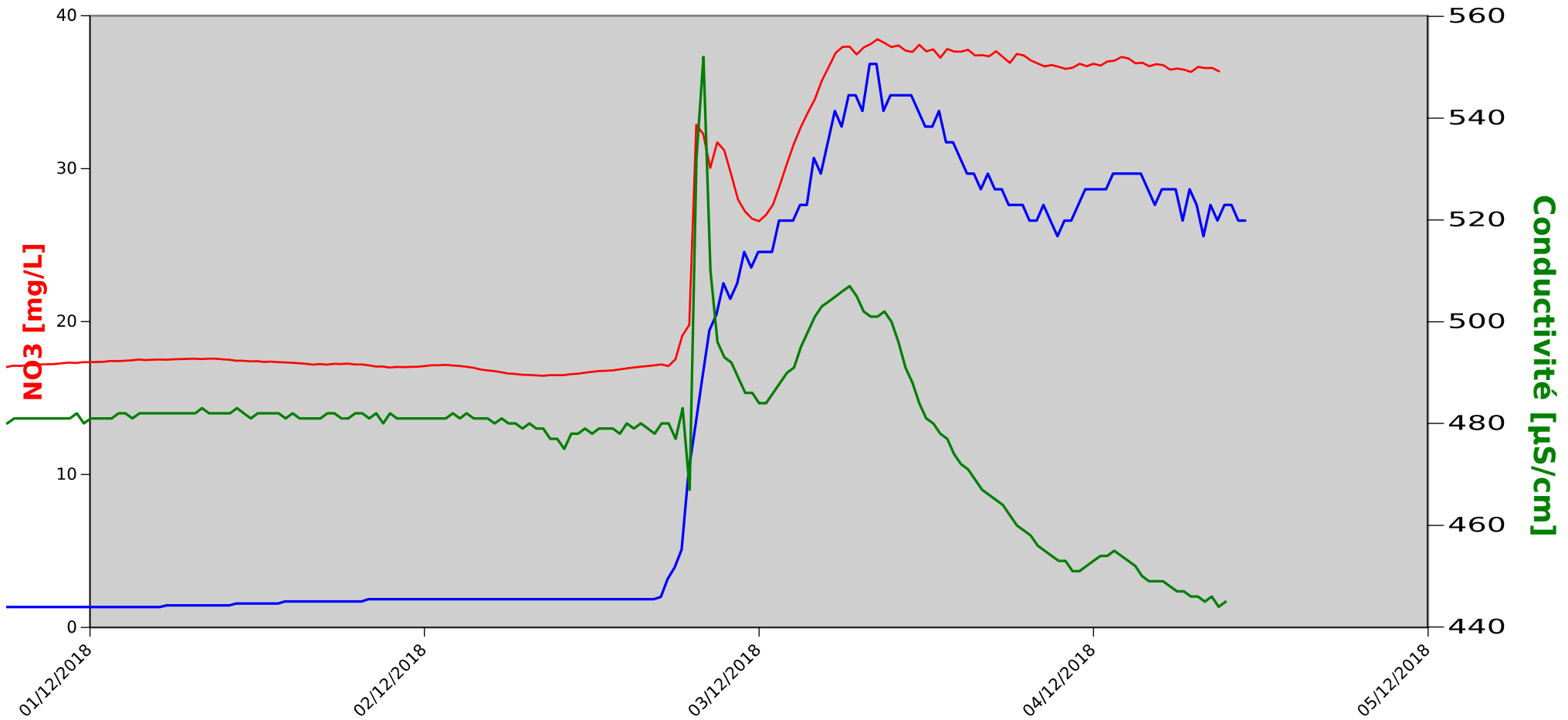




La crue du 2 au 5 décembre 2018



La crue du 2 au 5 décembre 2018



Bilan sonde UV après 3½ ans d'utilisation

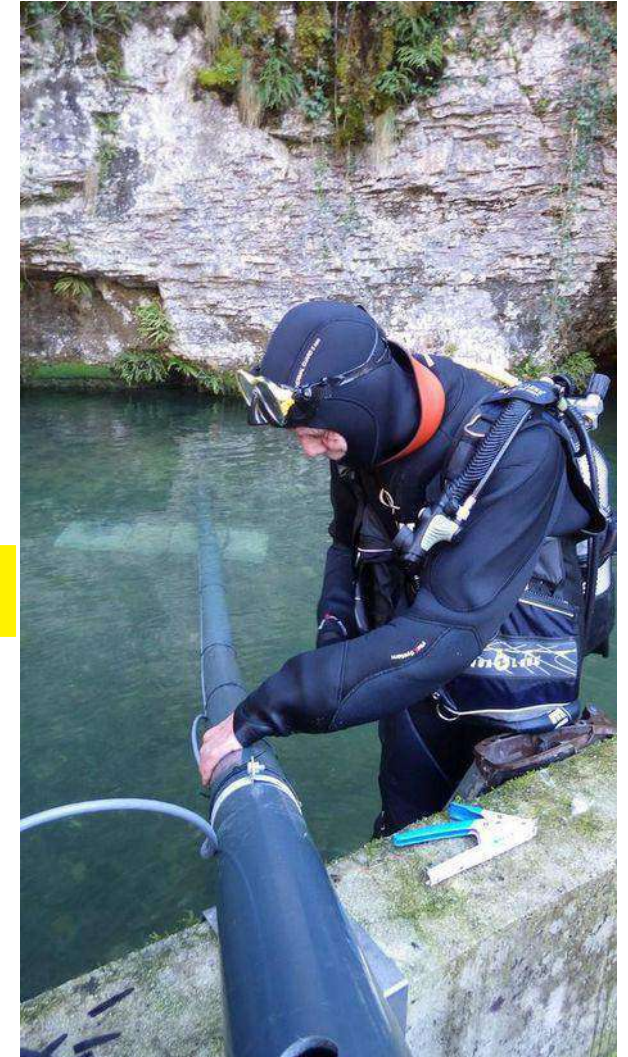


- Sonde très chère à l'achat (20 K€)
- **Très robuste et fiable**, nécessite peu d'entretien et pas de consommables !
- Jeux de paramètres intéressant pour le karst : pollution agricole (NO_3), lixiviation et érosion des sols (COD, COT).
- Consommation électrique importante (secteur conseillé).

- Teneurs en nitrates très variables sur une même source karstique.
- "Purge" des nitrates **lors des crues automnales**, surtout après un été sec.
- **teneurs crue = 2-3x teneurs étiage**
- → **Seulement identifiable avec des suivis à haute fréquence !**

Monitoring dissous/particulaire dans le karst

- 1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"
- 2) La durée et la fréquence de l'observation
- 3) Les suivis manuels et les suivis par préleveur automatique
- 4) Les suivis par sondes automatiques
- 5) L'importance de la fraction particulaire
- 6) L'intérêt des suivis de crue
- 7) Conclusions



Turbidité croissante de l'eau



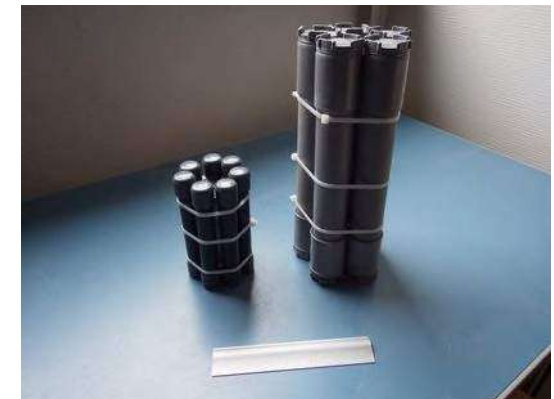
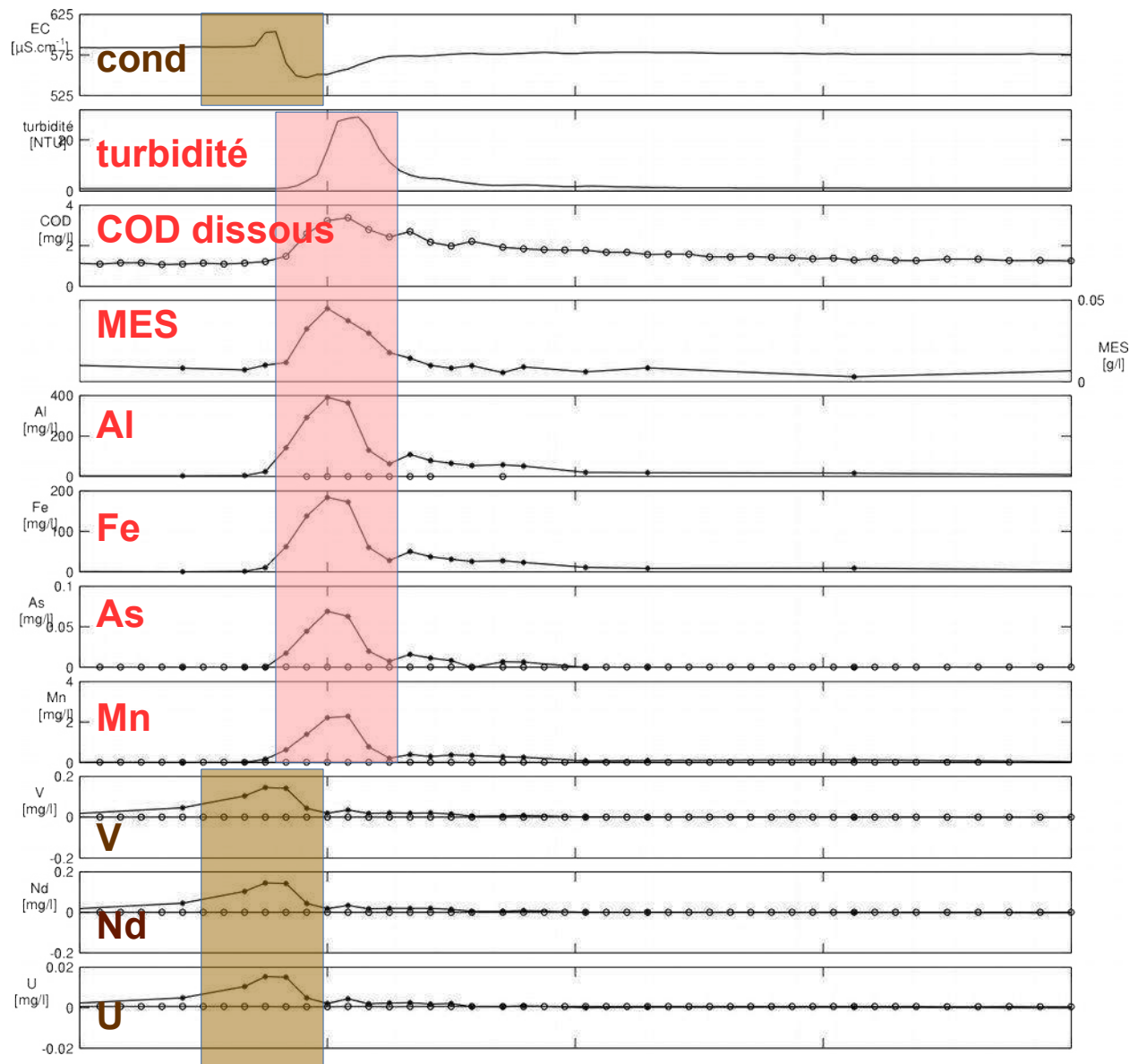
Plupart des produits phytosanitaires, des insecticides et des ETM peu ou pas solubles à pH >7 !

Hypothèse : transfert dans le karst lié aux MES

Origine probable de la turbidité croissante :

- labour trop profond dans les champs de céréales (plateaux < 700 m)
- labour des prairies dans la Haute Chaîne (contre la pullulation des campagnoles)

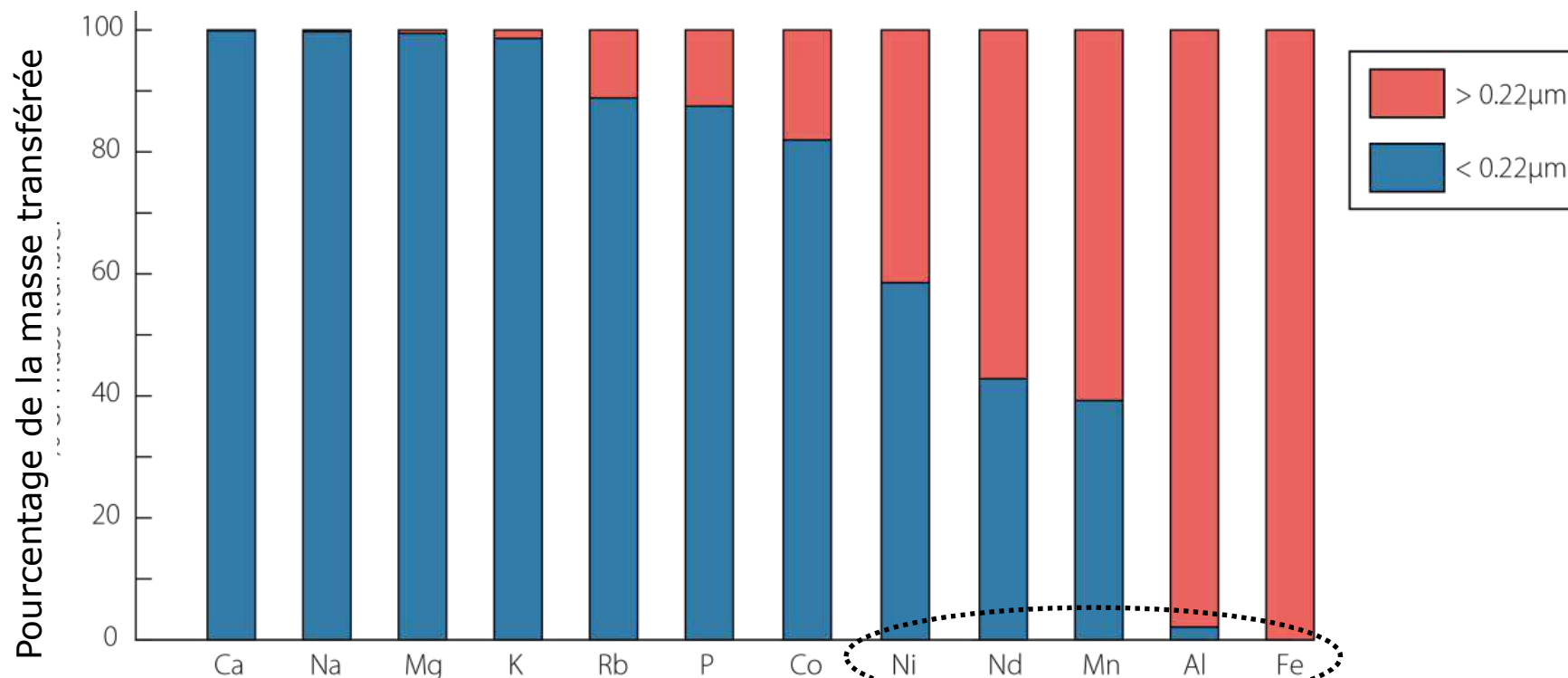
Suivi des MES à la source du Dahon (Epenoy)



> Fraction filtrée (< 0.22 µm)

Éléments dissous et colloïdes inf. à 0.22µm

> Fraction particulaire (> 0.22 µm)

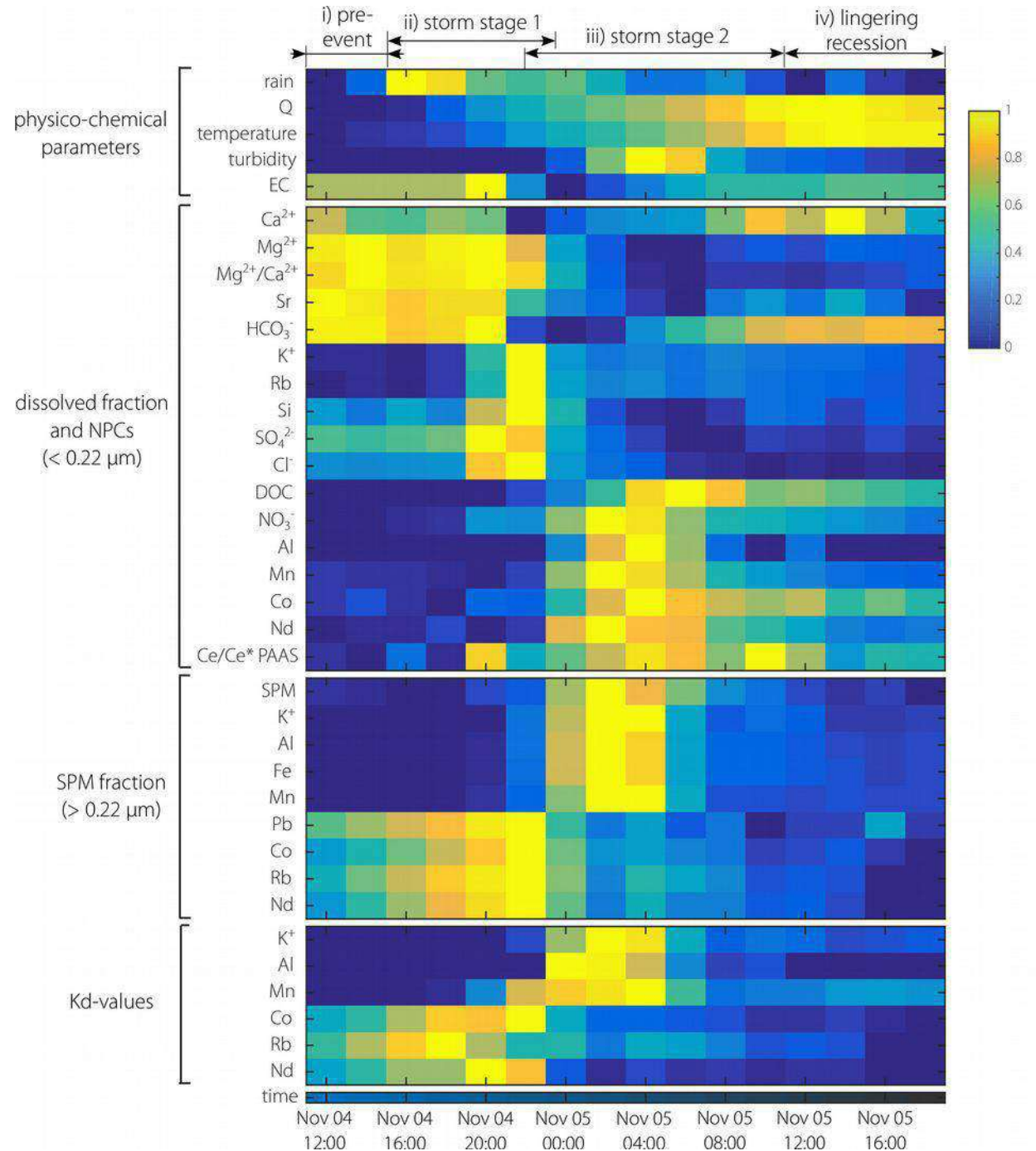


> Certains ETM transférés essentiellement par la fraction particulaire en fonction de leurs propriétés

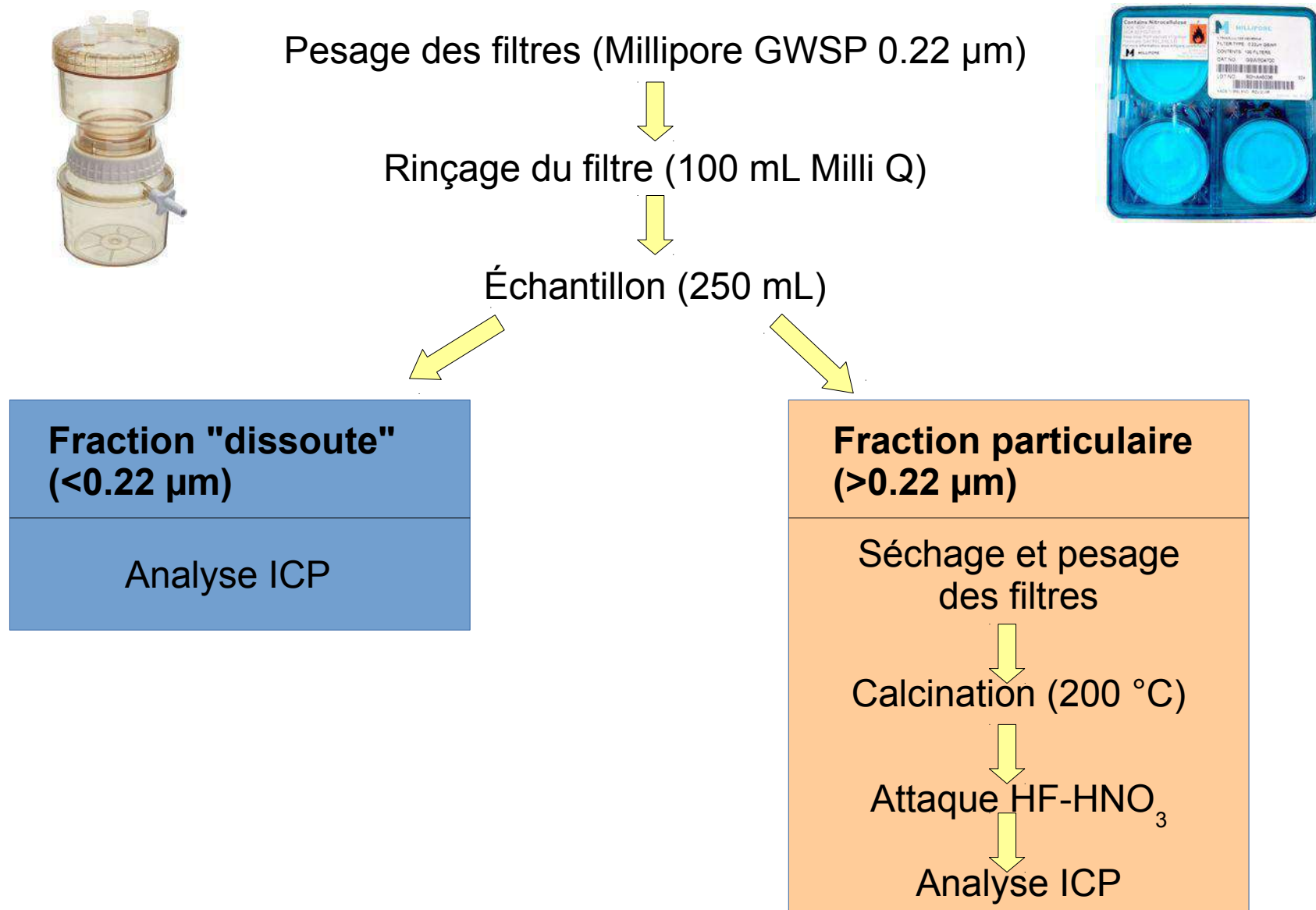
Suivi des matières en suspension (MES) lors d'une crue (Epenoy)

2 "peaks" de MES :

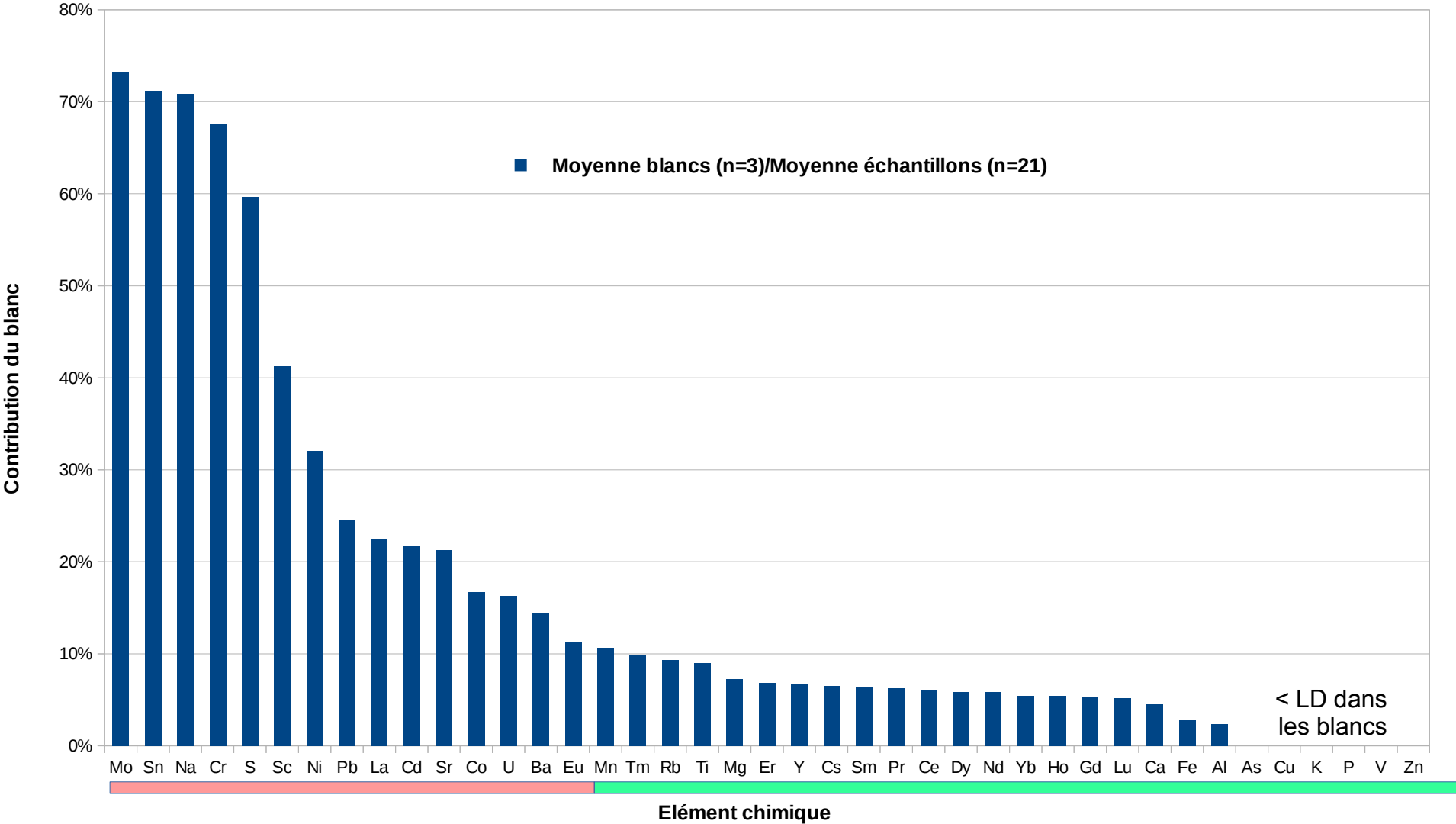
- chaque "peak" avec composition chimique spécifique.
- **"peak 1"** : arrive avec l'eau ancienne stockée dans le karst (riche en Mg, HCO₃)
→ **MES remaniées d'origine interne**
- **"peak 2"** : arrive avec l'eau d'infiltration (riche en mat. org NO₃)
→ **MES lessivés du sol**



Analyse de la fraction particulaire



Blanc des filtres (Millipore GSWP 0.22 µm, rincés avec 100 mL eau MQ)



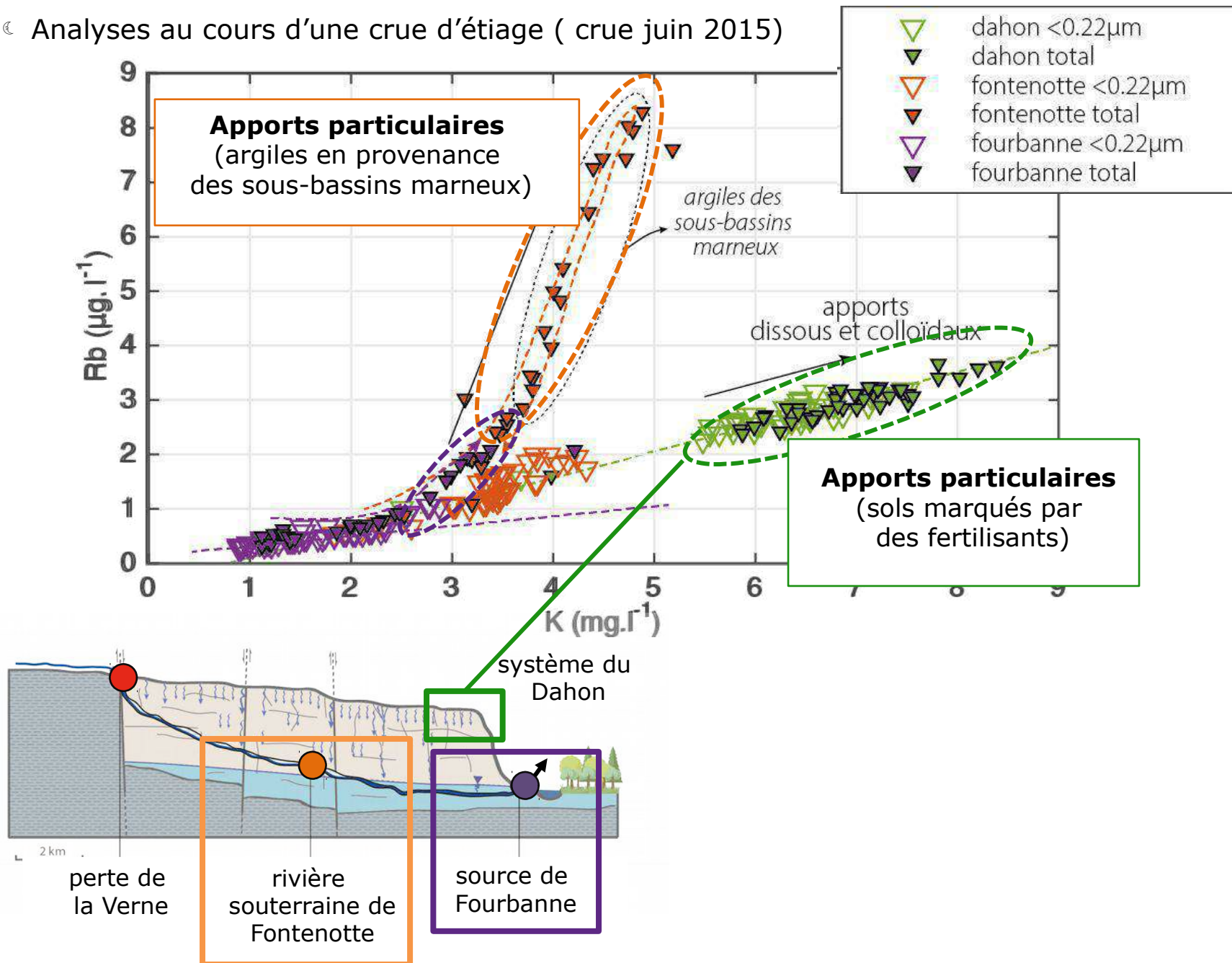
Bilan fraction particulaire

- **MES : vecteur important** (voire dominant) pour le transfert d'ETM et de polluants organiques dans le karst
- **Double pic** de MES à la source épikarstique :
 - peak 1 synchrone avec conductivité
 - peak 2 synchrone avec turbidité
- **Problèmes analytiques :**
 - Blanc des filtres
 - Matière organique non mesurable
 - Mise en solution des filtres extrêmement chronophage !
- **Approche alternative :**
 - Analyse échantillons non-filtrés (évaporation, attaque acide) = Fraction totale
 - Fraction MES = Fraction totale – fraction filtrée



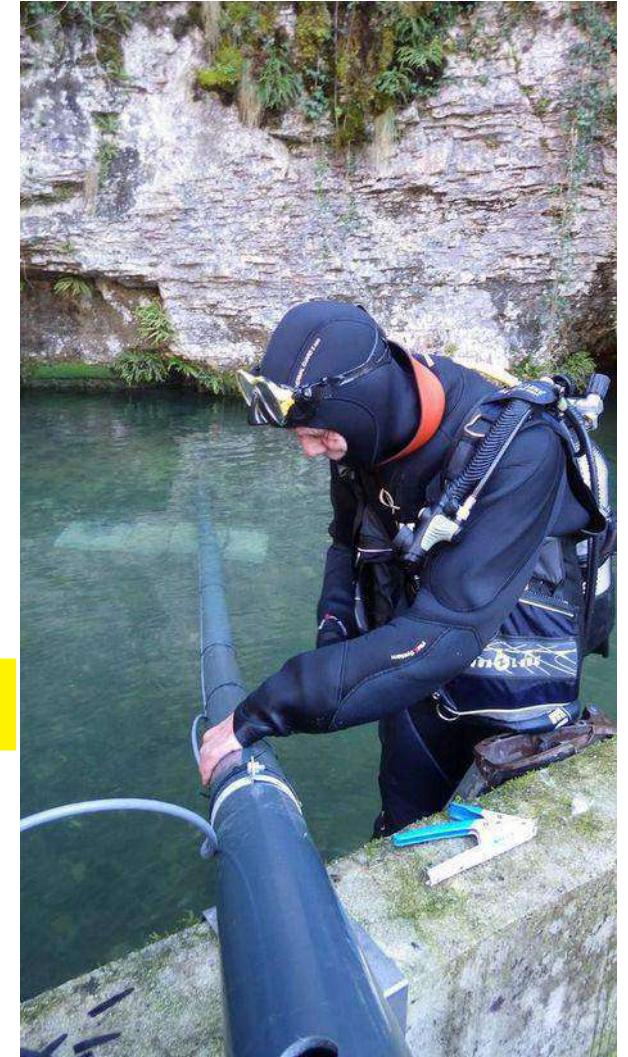
Exemple : analyse de fraction totale (après évaporation)

Analyses au cours d'une crue d'étiage (crue juin 2015)

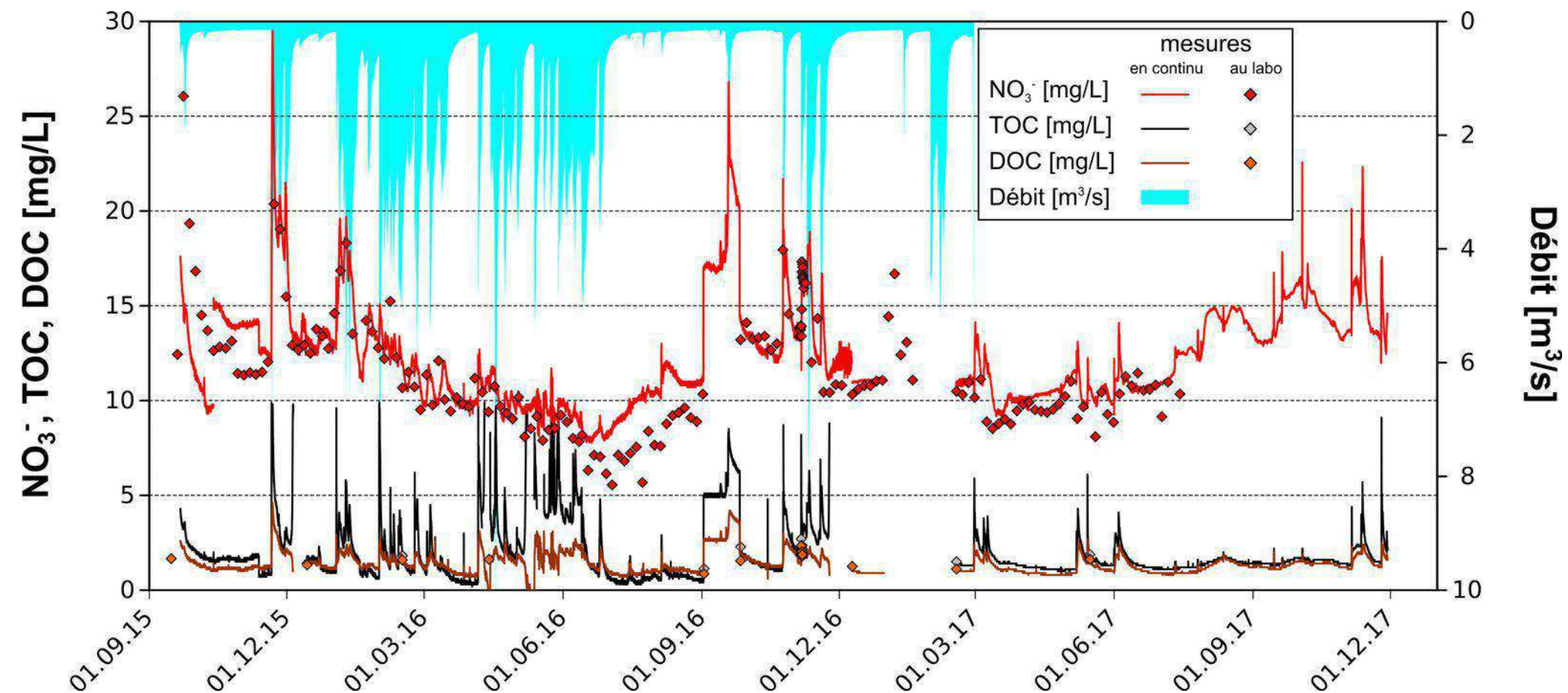


Monitoring dissous/particulaire dans le karst

- 1) L'observatoire hydrogéologique "Jurassic Karst"
- 2) La durée et la fréquence de l'observation
- 3) Les suivis manuels et les suivis par préleveur automatique
- 4) Les suivis par sondes automatiques
- 5) L'importance de la fraction particulaire
- 6) L'intérêt des suivis de crue
- 7) Conclusions



L'intérêt des suivis de crue



L'essentiel des transferts dissous et particulaires pendant les crues !

Conclusions

Équipement "de base" :

- Mieux plusieurs sondes indépendantes.
- **Paramètres essentiels** : sonde CTD + sonde de turbidité.

Équipement "de luxe" :

- Préleveur automatique
- Sonde UV

Suivi des MES :

- Chronophage et cher
- Dépend des paramètres à doser
- Analyse de la fraction totale

Suivi des crues :

- Moments clés du cycle hydrologique



Merci pour votre attention !



Merci à

Sophie Denimal
Cybèle Cholet
Bruno Régent
Thibaut Garin
Vanessa Stefani

pour leur aide sur le
terrain et au labo !



Traçages des eaux souterraines en domaine karstique

Principes, méthodes et mise en œuvre



Alexandre BENOIT-GONIN, Smix marais de Saône

12 mars 2019



Préambule

Principes et méthodes

- Objectifs et contexte
- Choix du traceur
- Mode de surveillance de la restitution
- Méthodes d'analyses
- Interprétation

Mise en œuvre des traçages

- Opérations préalables
- Echantillonnage de témoin
- Mise en place du réseau de surveillance
- Réalisation des injection
- Suivi
- Exemple





Préambule

Définition et principe d'un traçage des eaux souterraines

Suivi des molécules d'eau dans leur parcours à partir de substances chimiques, isotopiques, biologiques ou même physiques.

Ces molécules peuvent être :

- Naturelles : suivi des paramètres présents dans l'environnement – « traçage global »
- Artificielles : introduction d'un produit dans le cycle de l'eau – « traçage ponctuel »

Préambule

Possibilités d'application

Types d'aquifères	Possibilités d'application des traceurs
Aquifères karstiques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reconnaissance régionale des écoulements souterrains ▪ Elaboration de modèles conceptuels des systèmes karstiques ▪ Mise en évidence de cheminement des eaux karstiques ▪ Délimitation de bassins d'alimentation de sources karstiques
Aquifères en roches meubles	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etudes régionales de l'écoulement souterrain ▪ Délimitation de bassins d'alimentation ▪ Délimitation de zones d'apport de matières polluantes ▪ Détermination de paramètres de l'aquifère ▪ Simulation expérimentale de propagation de polluants
Écoulements de versant et aquifères en roches fissurées	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mise en évidence d'écoulements en roches cohérentes ▪ Etudes de structures aquifères (fissures, failles, sillons, limites de bancs, etc.) ▪ Mise en évidence d'écoulements préférentiels dans les versants (veines d'eau)

Traçages en domaine karstique

- Parmi les outils les plus employés pour l'étude de ce type d'aquifère particulier
- Le plus souvent analysés d'un point de vue qualitatif pour la mise en évidence « rapides » des connexions souterraines et la délimitation du bassin versant d'un exutoire défini.
- Approche quantitative du problème plus complexe mais parfois nécessaire (ex : impact d'une activité sur la qualité d'une source, cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de l'aquifère)
 - Mise en œuvre plus complexe et coûteuse
 - Modèles difficilement applicables par manque de connaissance de la géométrie et la densité système

Les principes et méthodes

Objectifs et contexte

Choix du ou des traceurs

Mode de surveillance de la
restitution

Analyses

Interprétation

Objectif et contexte

► Pourquoi réaliser un traçage ?

- Pour définir les limites du bassin d'alimentation d'une source ?
- Pour déterminer l'impact d'une activité sur la qualité et la quantité de l'eau d'une source ou d'un aquifère ?
- Les deux ?

► Dans quel contexte ?

- S'agit-il d'un captage AEP ?
- S'agit-il d'un multitraçage ?
- Où seront réalisées les injections de traceurs ?
- Quelles sont les conditions climatiques et hydrologiques ?

Les principes et méthodes

Choix du traceur : Qu'est qu'un bon traceur ?

- Soluble dans l'eau
- Pour un traçage artificiel : absent naturellement ou en très faible quantité
- Bonne stabilité chimique dans le milieu
- Pas d'interaction chimique, biologique ou physique (adsorption) au cours de son temps de séjour
- Non toxique et non « polluant »
- Facile à mettre en œuvre
- Facilement détectable et simple à analyser
- Coût limité (à l'achat et à l'analyse)

Les principes et méthodes

Choix du traceur :

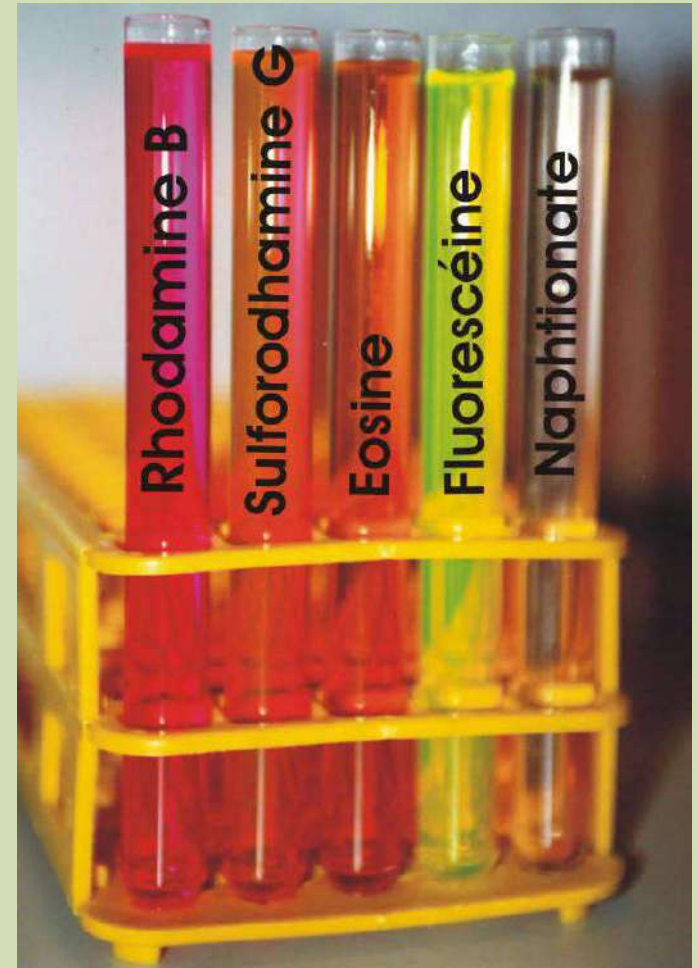
Type	Avantages	Inconvénients
Traceurs fluorescents	Adsorption souvent faible, Bruit de fond naturel souvent faible, Limite de détection basse, Généralement bonne solubilité à l'eau, Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse	Ne se comportent pas exactement comme l'eau, La plupart perdent leur caractère fluorescent en présence d'oxydants puissants (chlore notamment) ou lors d'exposition à la lumière (UV principalement). Sensibles à certains paramètres (pH principalement)
Traceurs salins	Se dégradent peu dans le milieu naturel Faible adsorption pour les anions, Généralement bonne solubilité à l'eau, Attention ! → Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse Invisibles et stables à la lumière	Ne se comportent pas exactement comme l'eau, Phénomènes d'adsorption souvent importants (cations), Bruit de fond naturel élevé et variable Limites de détection assez fortes
Tensioactifs, colorants alimentaires, aromatiques composés	Bruit de fond assez faible, Se dégradent peu dans le milieu naturel, Généralement bonne solubilité à l'eau, Le plus souvent sans impact sur le milieu naturel, Faible coût d'achat et d'analyse	Ne se comportent pas exactement comme l'eau, Phénomènes d'adsorption souvent importants, Limites de détection très fortes
Traceurs radioactifs de la molécule d'eau	Se comportent comme la molécule d'eau, Pas de phénomène d'adsorption, Bruit de fond faible, Limites de détection très faible, Ne se dégradent pas dans le milieu naturel, Très bonne solubilité à l'eau	Impact psychologique négatif sur les populations, Coût d'achat et d'analyse importants. Mise en œuvre réglementaire difficile.
Spores	Facile à détecter au microscope	Echantillonnage cumulatif ne permettant pas de décrire fidèlement la restitution
Microsphères fluorescentes	Assez facile à analyser	Phénomènes d'adsorption souvent importants,
Bactéries	Simulation du transport de germes pathogènes	Manipulations délicates Coûts analytiques élevés
Bactériophages	Bon comportement dans le milieu souterrain (préférable aux bactéries) Absence de toxicité pour le milieu aquatique et l'homme Seuil de détection assez bas	Manipulations délicates et très spécifiques faites dans des instituts spécialisés Coûts analytiques élevés

Les principes et méthodes

Choix du traceur : les traceurs fluorescents sont parmi les plus utilisés

- Les plus répandus : fluorescéine, éosine, rhodamines, naphthionate
- Moins courants : duasyne, pyranine, Tinopal, lissamine

Attention : tous n'ont pas les mêmes caractéristiques !



Les principes et méthodes

Tableau 2.1 : Aperçu de quelques caractéristiques des traceurs fluorescents.

Dénomination (Synonymes entre parenthèses)	Index couleur I.C.	Spectre excitation / émission [nm] ⁴	Evaluation toxicologique ⁵	Limite de détection ++++ = très bonne + = moyen	Retardement (dû à l'adsorption réversible) - = faible --- = élevé	Restitution du traceur ++++ = élevée + = faible	Rapport qualité/prix du traceur ⁶ ++++ = très bon + = mauvais	Propriétés particulières	Remarques (voir aussi commentaires du chap. 2.3.2)
Uranine (Fluorescéine disodique) (Fluorescéine hydraulique)	45350	490 / 515	inoffensif	++++	-	++++	++++	peut être endommagée par des oxydants (p. ex. chlore, ozone)	globalement, le meilleur traceur
Eosine (Eosin Y) (Acid Red 316)	45380	512 / 537	inoffensif	+++	--	+++	+++	grande sensibilité à la lumière	ne pas utiliser en même temps que du bromure
Naphtionate		323 / 418	inoffensif	+	-	++	++	bruit de fond élevé à la mesure	
Acide Amino G	351/446	inoffensif+	-	++	++	bruit de fond			
Amidorhodamine G (Sulforhodamine G extra)	45220	530 / 555	inoffensif	+++	---	+	++		
Sulforhodamine B (Acide duasyne-rhodamine B 01, Amidorhodamine B)	45100	561 / 586	toxique pour l'environnement	++	---	++	++		limiter son utilisation dans les eaux de surface
Rhodamine B (Basazolrot 71 L)	45170	551 / 576	à déconseiller	+++	---	+	+	très forte adsorption	ne plus utiliser
Rhodamine WT (Acid red 388)		558 / 583	à déconseiller	++	---	+	+		à n'utiliser que dans les cas d'exception
Pyranine	59040	460 / 512	inoffensif	++	-	+	++	faible taux de restitution	
Duasyne Duasyne jaune fluorescent T		449 / 474		++	--	++	++		n'est plus fabriqué
Tinopal (T-CBS-X, T-ABP liquide)		346 / 435	inoffensif	+	---	+	+	bruit de fond élevé à la mesure	

Les principes et méthodes

Tableau 2.2 : Qualification technique des traceurs artificiels pour différents milieux hydrogéologiques.

Evaluation : ++ bon
+ satisfaisant
0 en général peu indiqué, utilisation possible dans des conditions favorables
– à déconseiller

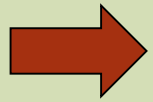
D'après Groupe de travail Traçage de la société suisse d'hydrogéologie SSH, 2002

Traceur	Milieu karstique		Milieu poreux			Milieu fissuré	Infiltration de cours d'eau
	Injection en liaison directe avec le réseau karstique	Injection en liaison diffuse avec le réseau karstique	Injection directe dans l'eau souterraine	Injection en zone non saturée bien perméable	Injection dans les terrains de couverture à perméabilité limitée (p. ex. fouille en moraine)		
Uranine	++	++	++	++	++	++	++
Eosine	++	++	++	+	+	+	+
Naphthionate	++	+	++	+	0	0	+
Amidorhodamine G	++	+	+	0	0	0	0
Sulforhodamine B	++	+	+	0	0	0	0
Pyranine	++	+	+	0	0	0	–
Duasyne ⁷	++	+	+	0	0	0	–
Tinopal	+	0	0	–	–	–	–
Chlorures	++	+	++	0	–	–	–
Bromures	++	+	++	0	–	–	–
Lithium	++	0	+	–	–	–	–
Borax	+	0	0	–	–	–	–
Bactériophages	++	+	+	0	–	0	–
Microsphères	+	0	0	–	–	–	–

Les principes et méthodes

Modes de surveillance : Qualitative ou quantitative ?

- Surveillance qualitative : on définit la présence ou non du traceur sans le quantifier



Fluocapteurs (sachets de charbon actifs)



Les principes et méthodes

Modes de surveillance : Qualitative (Fluocapteurs)

► Avantages des fluocapteurs :

- Acquisition d'informations sur la restitution sur tout le temps d'exposition
- L'accumulation de traces de traceur durant un temps prolongé augmente la sensibilité de la détection par rapport aux prélèvements d'eau ponctuels
- Matériel de suivi peu onéreux

► Inconvénients des fluocapteurs :

- Méthode uniquement qualitative
- Détermination du temps d'apparition du traceur et du pic de restitution impossible
- Adsorption des autres substances organiques contenues dans les eaux à l'origine de l'apparition d'un signal de fluorescence naturelle préjudiciable à la détection de certains traceurs.
- Il n'est pas possible de détecter le naphthionate ou le tinopal sur des fluocapteurs.
- Certaines eaux de mauvaise qualité ou certains phénomènes (crue) peuvent engendrer l'apparition d'un bruit de fond ou même de pics parasites.
- Analyse plus complexe et donc plus onéreuse que la simple analyse d'eau

Les principes et méthodes

Mode de surveillance : Quantitative

Fluorimètre de terrain



Préleveur automatique



Les principes et méthodes

Mode de surveillance : Quantitative

Fluorimètre de terrain



► Avantages :

Excellente résolution temporelle

Résultats immédiats

Personnel et coût d'analyse réduit

Permettent d'obtenir des courbes de restitution du traceur

► Inconvénients

Sensibilité à la turbidité

Pertes des données en cas de problème

Coût si surveillance étendue



Préleveur automatique

► Avantages :

Permet d'adapter facilement le pas de temps de prélèvement

Résultats d'analyses précis

► Inconvénients

Logistique et installation plus lourde

Risque d'auto-contamination en cas de forte restitution

Coût si surveillance étendue

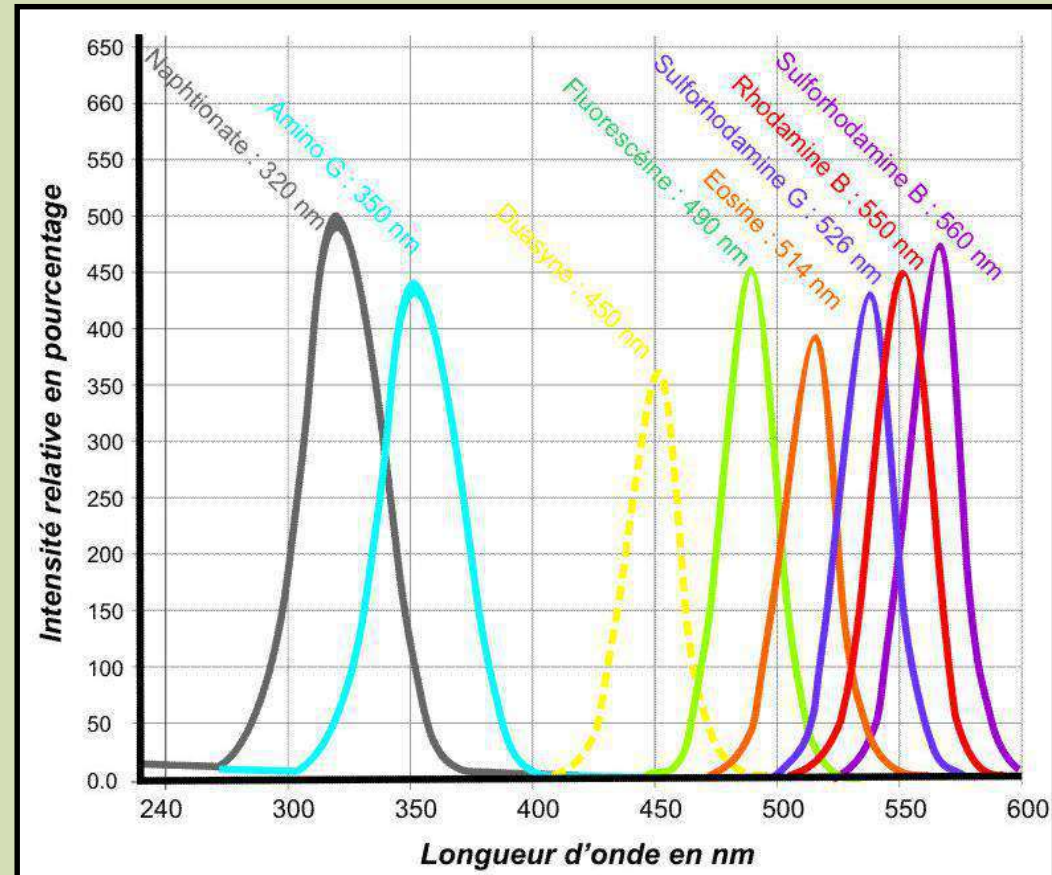
Les principes et méthodes

Principe d'analyse des traceurs fluorescents : La fluorimétrie

Le principe de base des appareils d'analyses utilise la **relation linéaire** qu'il existe **entre l'intensité de fluorescence** d'une longueur d'onde spécifique pour chaque traceur et la **concentration** en colorant.

La méthode standard d'analyse : **La spectrofluorimétrie**

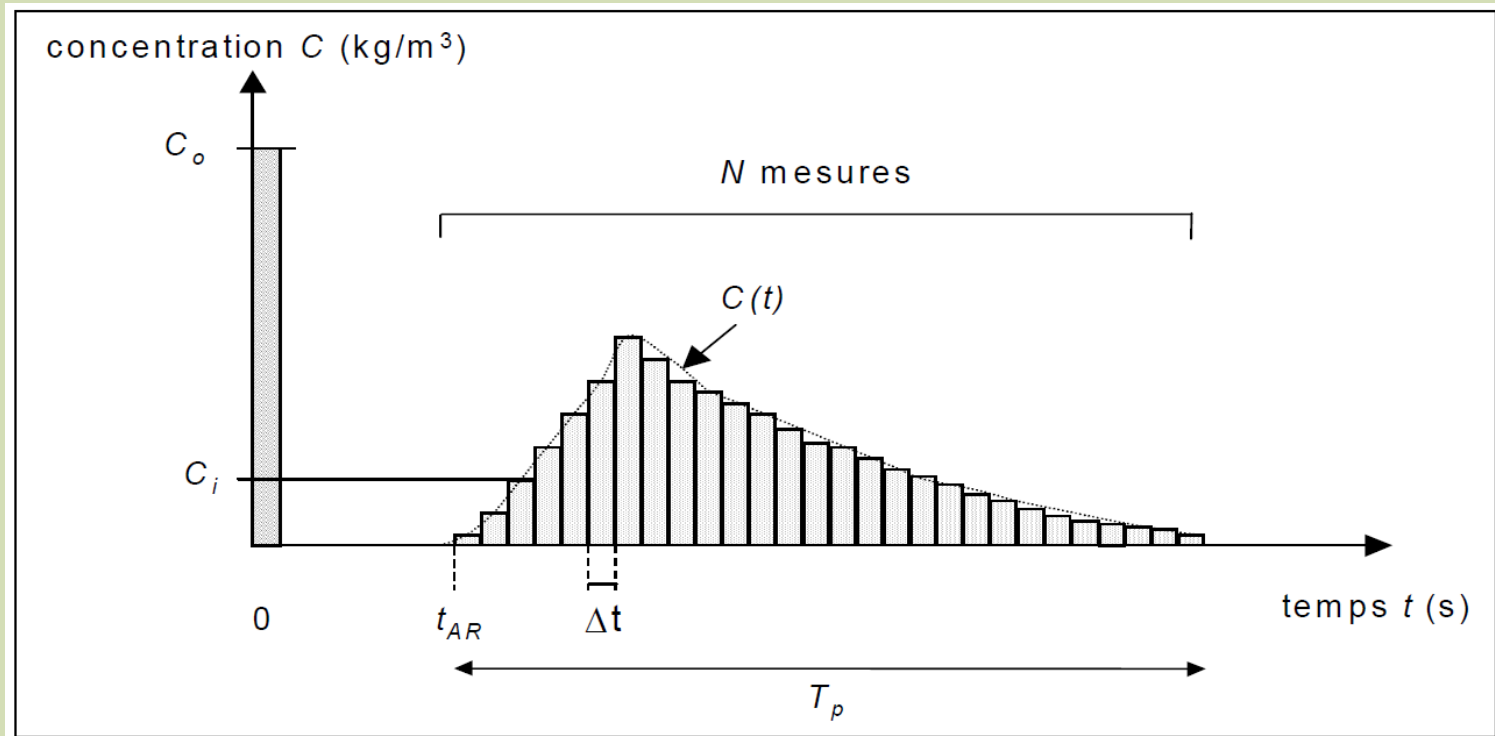
Les spectrofluorimètres ou spectromètres à fluorescence (ou luminescence) permettent de réaliser différents types de spectres de fluorescence sur les longueurs d'onde concernées.



Les principes et méthodes

Interprétation d'un suivi quantitatif de la restitution d'un traceur : calcul du taux de restitution

Rapport entre la masse de traceur restituée (m_2) et la masse initialement injectée (m_1) :

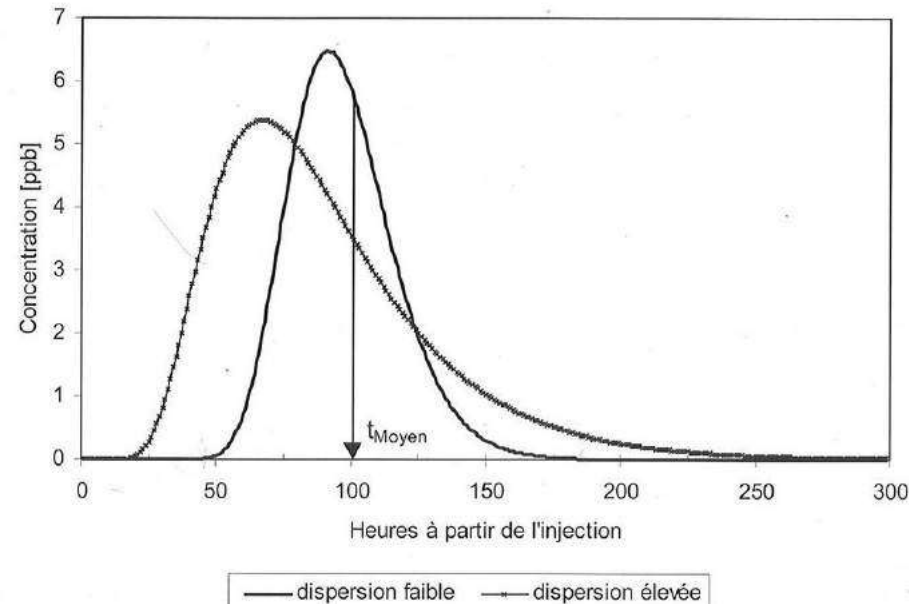
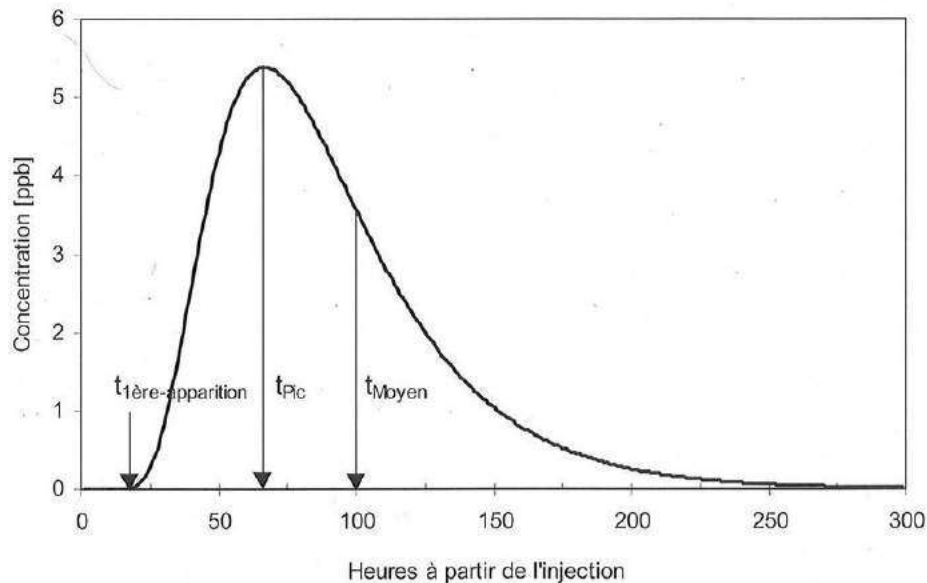
$$R = m_2 / m_1 = Q \cdot \int C \cdot dt / m_1$$


Les principes et méthodes

Interprétation d'un suivi quantitatif de la restitution d'un traceur : Paramètres de base

➤ A partir de la courbe de restitution :

- temps de première apparition : vitesse maximale
- temps de transit au pic (temps modal) : vitesse de transit au pic
- temps de transit moyen (temps nécessaire pour la restitution de $\frac{1}{2}$ du traceur réapparu)





La mise en œuvre des traçages

Quelques remarques :

L'organisation, déjà délicate, d'un essai de traçage nécessite également un certain nombre de précautions supplémentaires :

- stabilité météorologique (idéalement),
- échantillonnage serré du point d'apparition,
- bonne connaissance préalable du type de système à étudier.

Un essai de traçage fournit un résultat qui n'est (en principe) valable **que pour des conditions hydrologiques précises**.

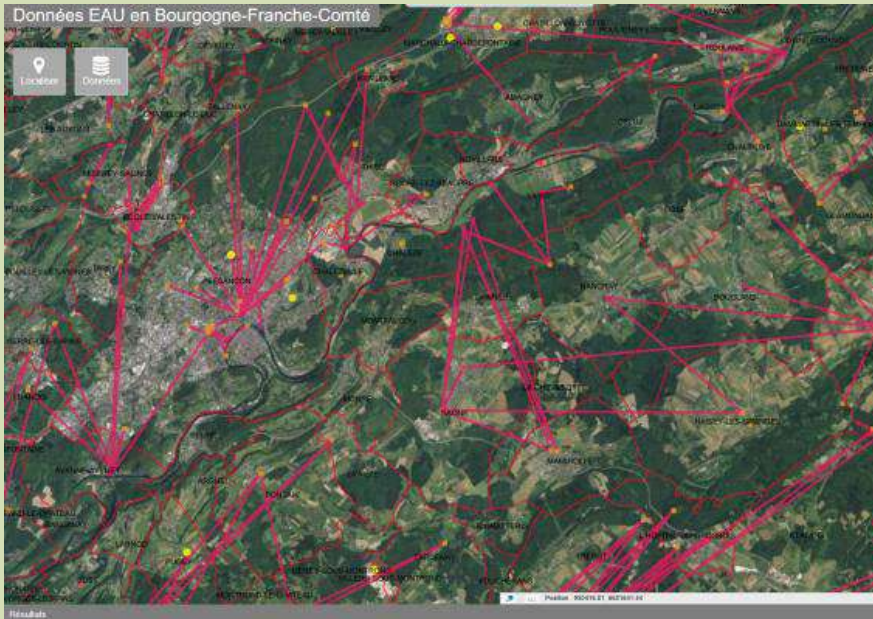
Un traçage est aussi souvent réalisé dans un but bien particulier qui peut en limiter les moyens et donc compromettre une interprétation ultérieure.

La mise en œuvre des traçages

Opérations préalables pour un traçage en domaine karstique

► Bibliographie :

- Collecter un maximum de renseignements sur les études déjà réalisées dans le secteur
- Consultation des bases de données
 - IDEO BFC
 - ORISK



La mise en œuvre des traçages

Opérations préalables pour un traçage en domaine karstique

- Informations aux services de l'état, aux collectivités et aux services de secours :

Services de l'Etat

- DREAL
- ARS
- DDT

Collectivités et organismes divers

- Mairie
- ComCom
- Associations de pêche

Services de Secours

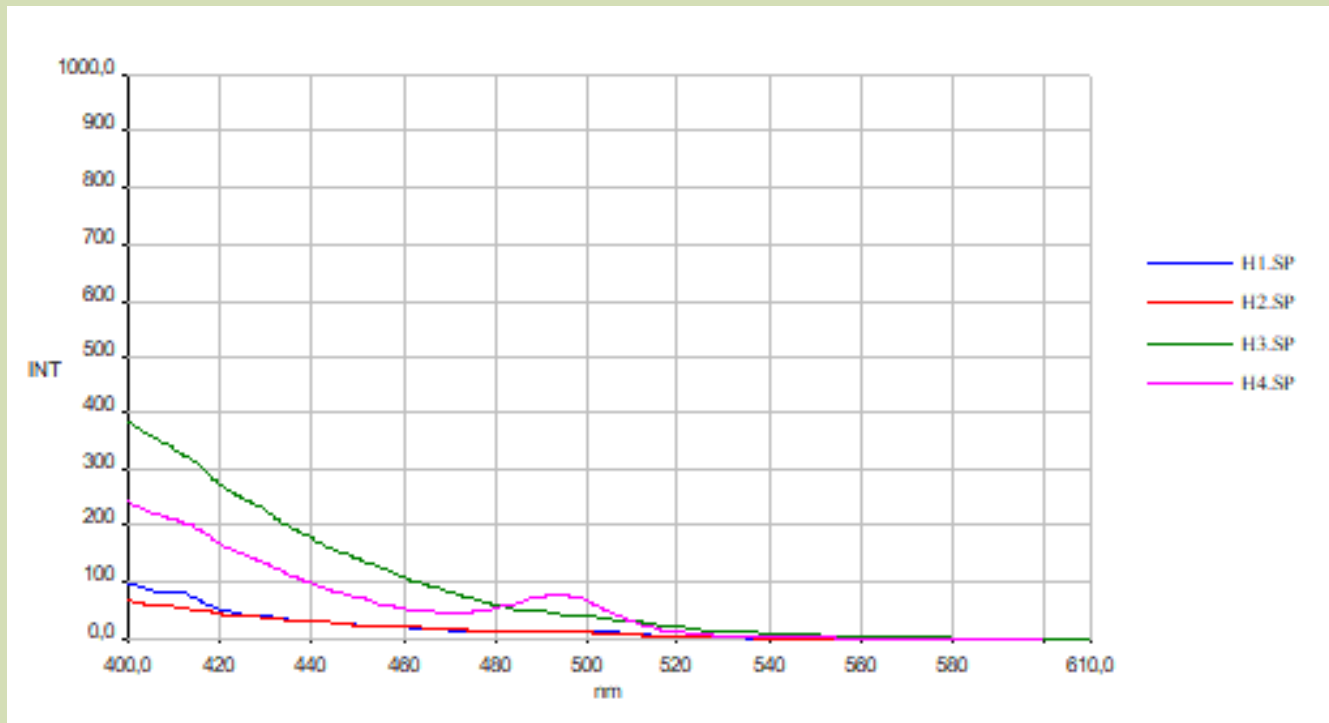
- Gendarmerie
- Pompiers

- Toute autre entité selon les cas spécifiques (pisciculture, ...)

La mise en œuvre des traçages

Echantillonnage de témoins :

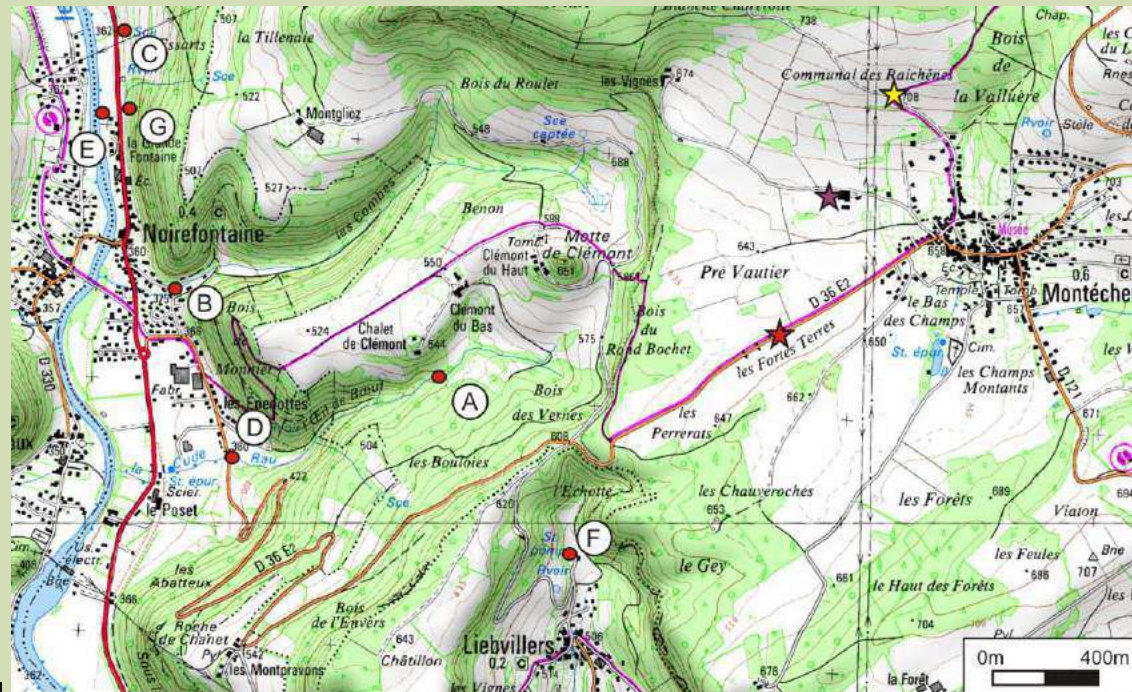
- ▶ Permettent de s'assurer de l'absence de traceurs résiduels liés à des traçages antérieurs.
- ▶ Permettent de connaître le bruit de fond de la fluorescence « naturelle ».




La mise en œuvre des traçages

Mise en place du dispositif de surveillance :


- À réaliser avant les opérations d'injection pour éviter les risques de contamination post injection et ne pas manquer la restitution en cas de réapparition rapide
- Quel que soit le mode choisi (fluocapteurs, préleveurs automatiques, prélèvements manuels, fluorimètres de terrain), ne pas lésiner sur les points de surveillance



Légende :

 Point d'injection de la fluorescéine

 Point d'injection de l'Eosine

 Point d'injection de la sulforhodamine B

 Point de surveillance par fluocapteurs



La mise en œuvre des traçages

Réalisation des injections : Le traceur

- Possibilité d'injecter le traceur sous forme de poudre (risque de formation de grumeaux) ou diluée



La mise en œuvre des traçages

Réalisation des injections : L'hygiène et la sécurité

Les traceurs fluorescents sous forme de poudre ou en solution concentrée peuvent présenter une certaine toxicité sous leur forme concentrée.

Il est donc très important pour les opérateurs d'observer certaines règles afin de ne pas s'exposer à ce risque toxicologique :

- Porter une combinaison étanche (jetable), bottes et gants étanches
- Porter un masque respiratoire permettant la filtration des poussières fines
- Porter des lunettes de protection
- Opérer dans de bonnes conditions de sécurité



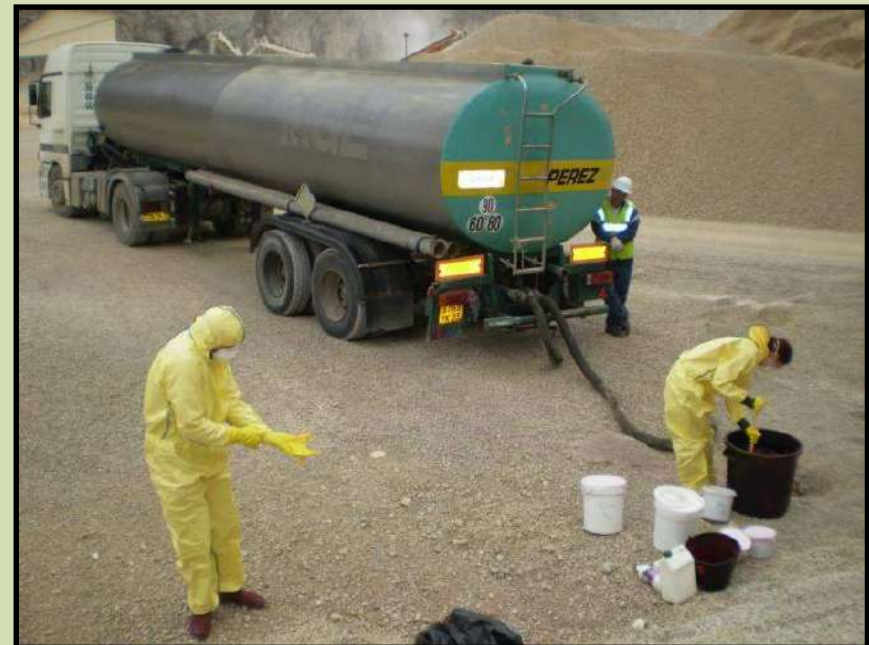
ATTENTION : les personnes ayant participé à l'injection ne peuvent être impliquées dans l'échantillonnage qu'après une toilette soignée. Il est préférable de laisser s'écouler quelques jours.

La mise en œuvre des traçages

Réalisation des injections : les conditions d'injection



Injection dans
une doline



Injection dans
un forage

La mise en œuvre des traçages

Réalisation des injections : les conditions d'injection



Injection dans une fosse

- La plupart du temps, un apport d'eau de plusieurs m³ est nécessaire pour favoriser l'injection et permettre au traceur d'atteindre rapidement la zone saturée.



La mise en œuvre des traçages

Suivi quantitatif de la restitution :

- Soigner l'étiquetage
- Rincer, éviter toute contamination
- Conservation au frais et à l'abri de la lumière
- Eviter (proscrire) les prélèvements sur eau traitée
- Suivi dans les piézomètres : éviter les appareils de puisage (ou alors à usage unique)
- Préleveurs automatiques : prévoir l'imprévisible, renforcer le dispositif sur les exutoires « importants »
- Fluorimètres de terrain : toujours prévoir un échantillonnage manuel ponctuel pour le calibrage de l'appareil et un fluocapteur pour confirmer la restitution.



Attention ! Pour être complète la surveillance quantitative des exutoires doit s'accompagner de mesures de débits qui permettront notamment un calcul précis de la valeur du taux de restitution.

La mise en œuvre des traçages

Un exemple : Multitraçage depuis le BV de la source d'Arcier (déc. 2018)

Caractéristiques de l'essai

- Objectif de suivi qualitatif et quantitatif
- Injections simultanées dans deux pertes
- Nécessité d'utiliser des traceurs faciles à mettre en œuvre et faciles à dissocier à l'analyse
- Protocole de suivi complexe : (fluocapteurs + préleveurs + fluorimètres de terrain)

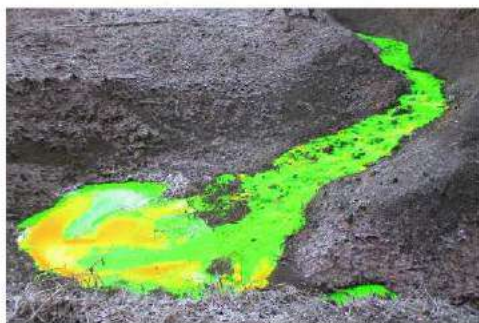
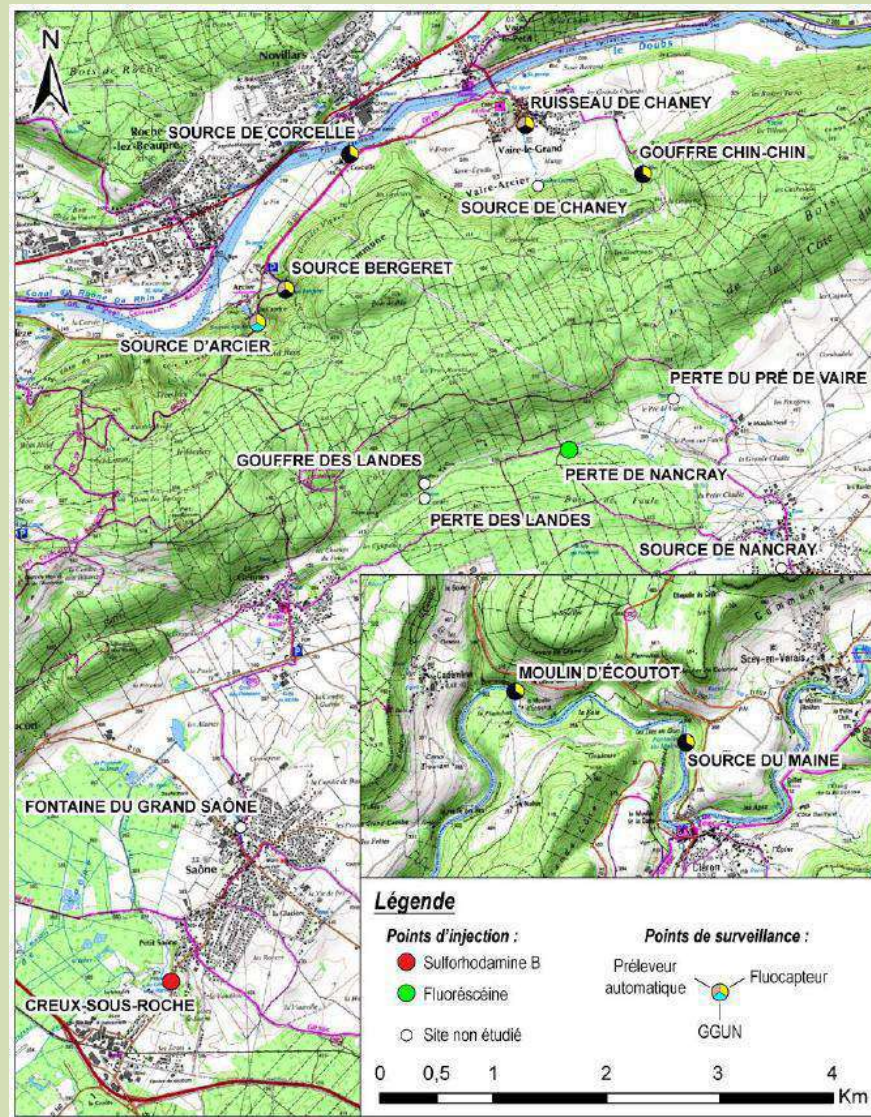


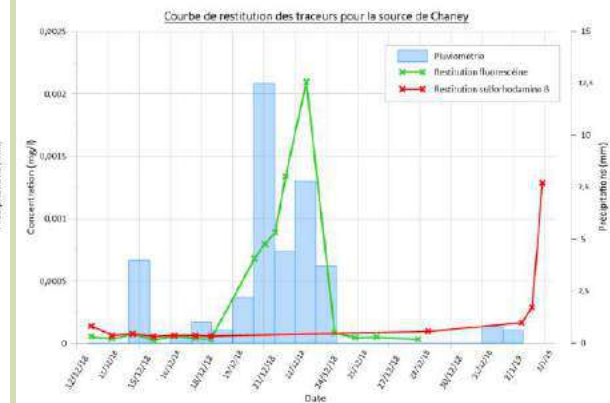
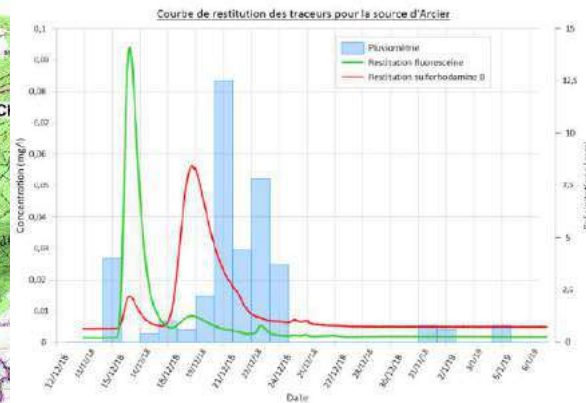
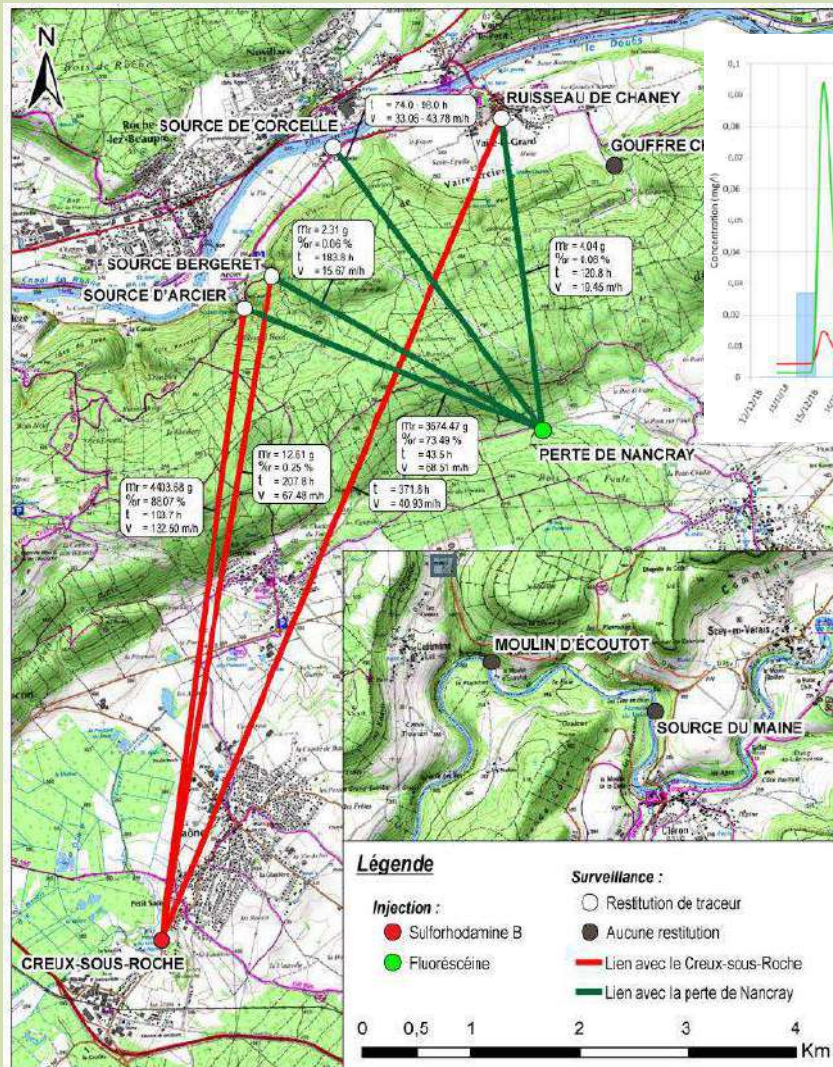
Photo 21: Injection de la fluorescéine à la perte de Nancray



Photo 22: Injection de la Sulforhodamine B au Creux-sous-Roche

La mise en œuvre des traçages

Un exemple : Multitraçage depuis le BV de la source d'Arcier (déc. 2018)



Fluorescéine injectée depuis la perte de Nancray				
Points de surveillance	Source d'Arcier	Source Bergeret	Ruisseau de Chaney	Total
Quantité restituée (g)	3674	2,886	3,967	3680,853
Taux de restitution sur TRAC	73,48%	0,06%	0,08%	73,62%
Taux de restitution calculé	73,49%	0,06%	0,08%	73,63%
Différence	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%
Sulfurohodamine B injectée depuis le Creux-sous-Roche				
Points de surveillance	Source d'Arcier	Source Bergeret	Ruisseau de Chaney	Total
Quantité restituée (g)	4107	13,06		4120,060
Taux de restitution sur TRAC	82,14%	0,26%		82,40%
Taux de restitution calculé	88,07%	0,25%		88,34%
Différence	5,93%	0,01%		5,94%

Tableau 18: Comparatif des taux de restitution entre la méthode manuelle et TRAC

La mise en œuvre des traçages

Un exemple : Multitraçage depuis le BV de la source d'Arcier (déc. 2018)



Photo 24: Restitution de la fluorescéine sous la source d'Arcier le 15/12/2018



Photo 26: Fluorescéine dans le ruisseau avant la confluence avec le Doubs le 15/12/2018



Photo 25: Restitution de la fluorescéine à la sortie de la source d'Arcier le 15/12/2018

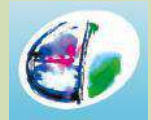
La mise en œuvre des traçages

Merci de votre attention

Ressources bibliographiques

Illustrations

- Sciences Environnement



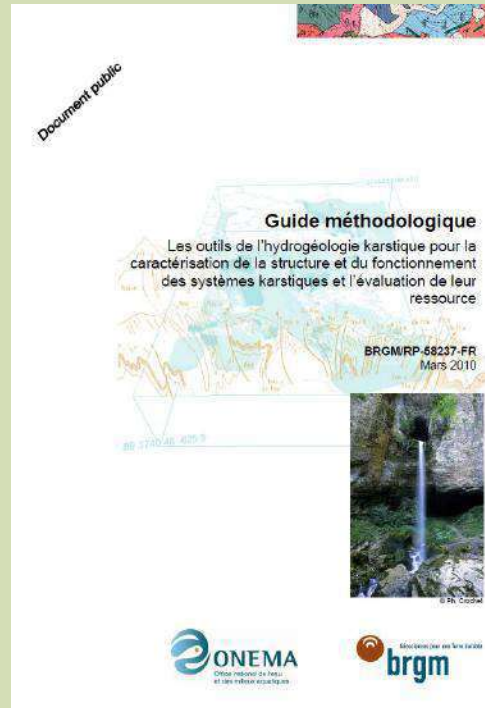
- Alexandre BENOIT-GONIN



Utilisation des traceurs artificiels en hydrogéologie
Guide pratique

Groupe de travail Traçage de la Société suisse d'hydrogéologie SSH

Série des 234^e, Série Zoologie - Rapports de l'OFEG, Série Zoologie - Rapports de l'UTAG, Série Zoologie
 No 3 - Birmo, 2002



Document public

Guide méthodologique

Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la
caractérisation de la structure et du fonctionnement
des systèmes karstiques et l'évaluation de leur
ressource

BRGM/RP-58237-FR
Mars 2010



Traçages des eaux souterraines en domaine karstique

Bonnes pratiques & contexte régional

Elodie RECCHIA

DREAL BFC

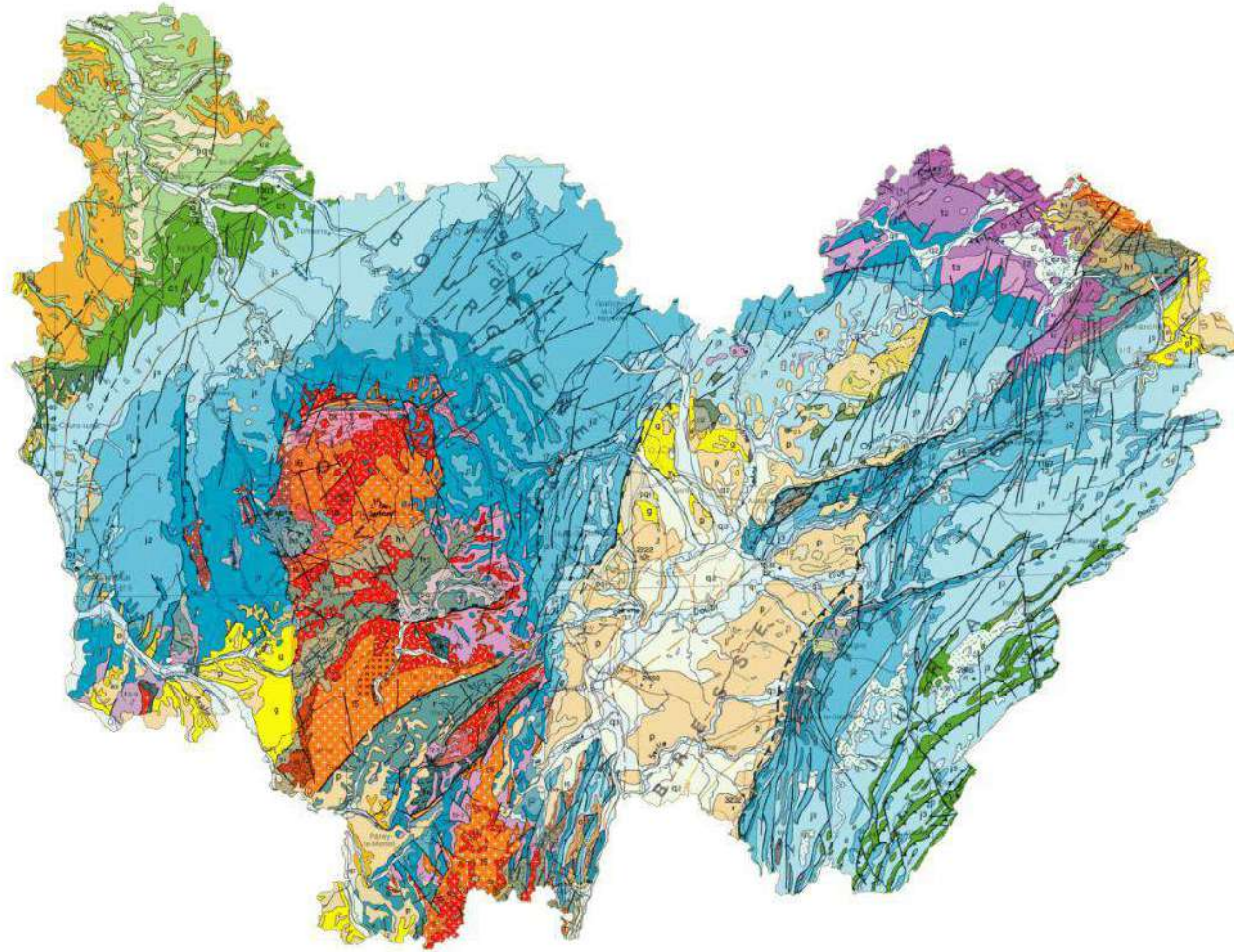
Service Biodiversité Eau Patrimoine

12 mars 2019



La région Bourgogne Franche-Comté

Un contexte géologique a dominante karstique



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFET
DE LA RÉGION
BOURGOGNE-
FRANCHE-COMTÉ

Le karst : l' enjeu « eau »

- Particularités des eaux souterraines
 - Non visibles, mais présentes partout et vulnérables
 - Niveau et qualité variant au rythme des saisons
 - Accès : prélèvement à la source, forage, exploration spéléologique
- Objectif : gérer et protéger ... en surveillant
Surveiller & étudier → connaître → comprendre → gérer et protéger
- Des acteurs multiples
 - État : DREAL, DDT, ARS
 - Collectivités : Région, département, communes
 - Établissements publics : Agence de l'eau, ONEMA, BRGM
 - Autres partenaires : bureaux d'études, universités, clubs spéléologiques

Le karst : l' enjeu « eau »

■ Objectif

- Récupérer toutes les données existantes concernant les traçages réalisés en milieu karstique, et les archiver dans un espace unique
- Pouvoir utiliser ces données dans un système d'information géographique
- Mieux comprendre le fonctionnement du système karstique et ainsi améliorer la prévention contre les dégradations de la qualité (nitrates et pesticides), notamment pour la protection des captages AEP
- Améliorer le lien avec les milieux aquatiques associés

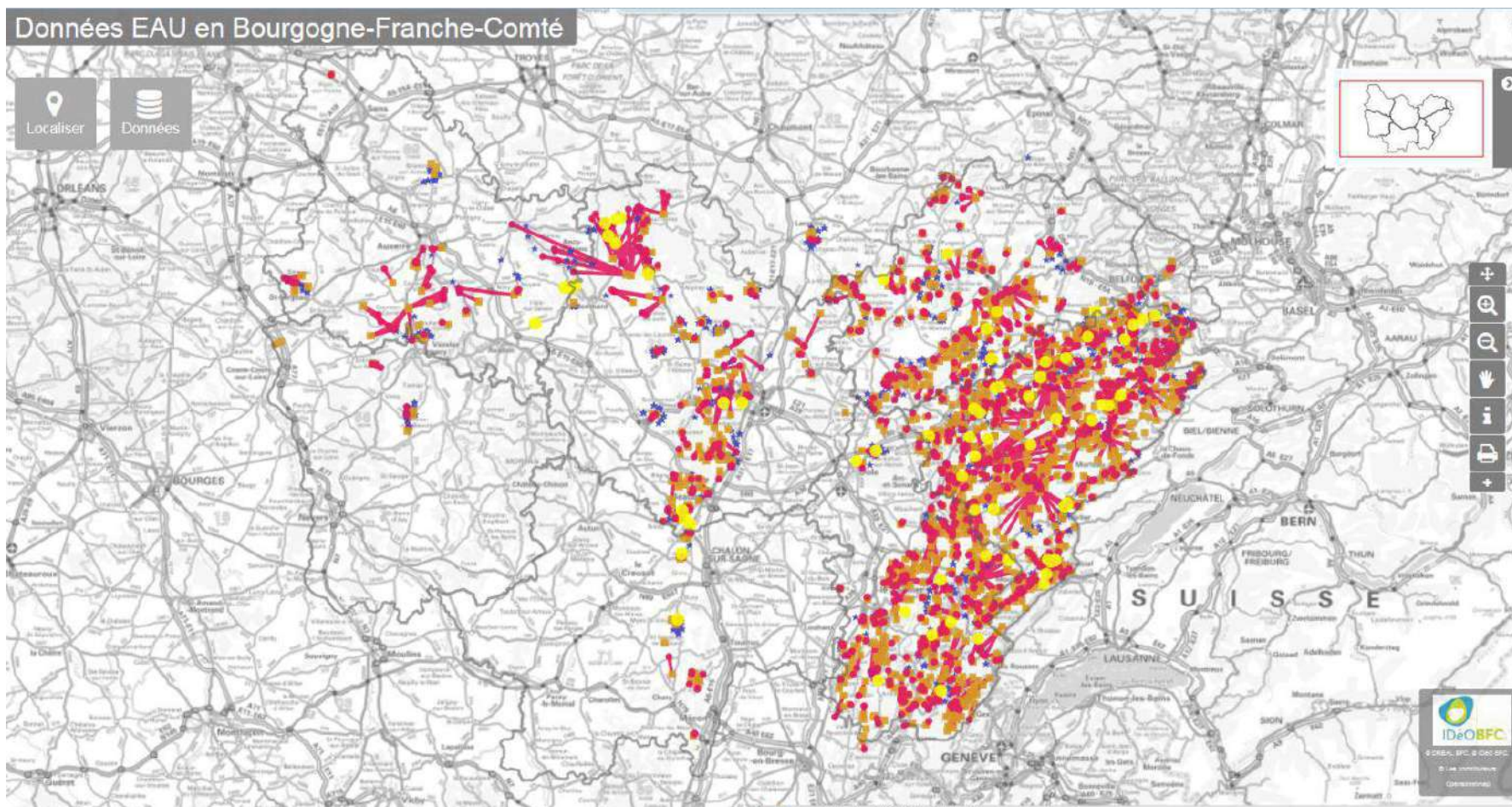
Des outils : inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage de la DREAL BFC

- Objectif : garder la mémoire des traçages réalisés sur le territoire, et ce depuis plus d'un siècle
- La DREAL Bourgogne-Franche-Comté a développé depuis 15 ans une application qui enregistre, inventorie et partage les différentes opérations de traçages hydrogéologiques. Cette application, associée au logiciel cartographique IDEOBFC, est destinée aux bureaux d'études, services instructeurs, collectivités, associations ou tout autre organisme intéressés par le fonctionnement des systèmes karstiques.
- https://carto.ideobfc.fr/1/carte_eau_dreal_bfc.map

Des outils : inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage de la DREAL BFC

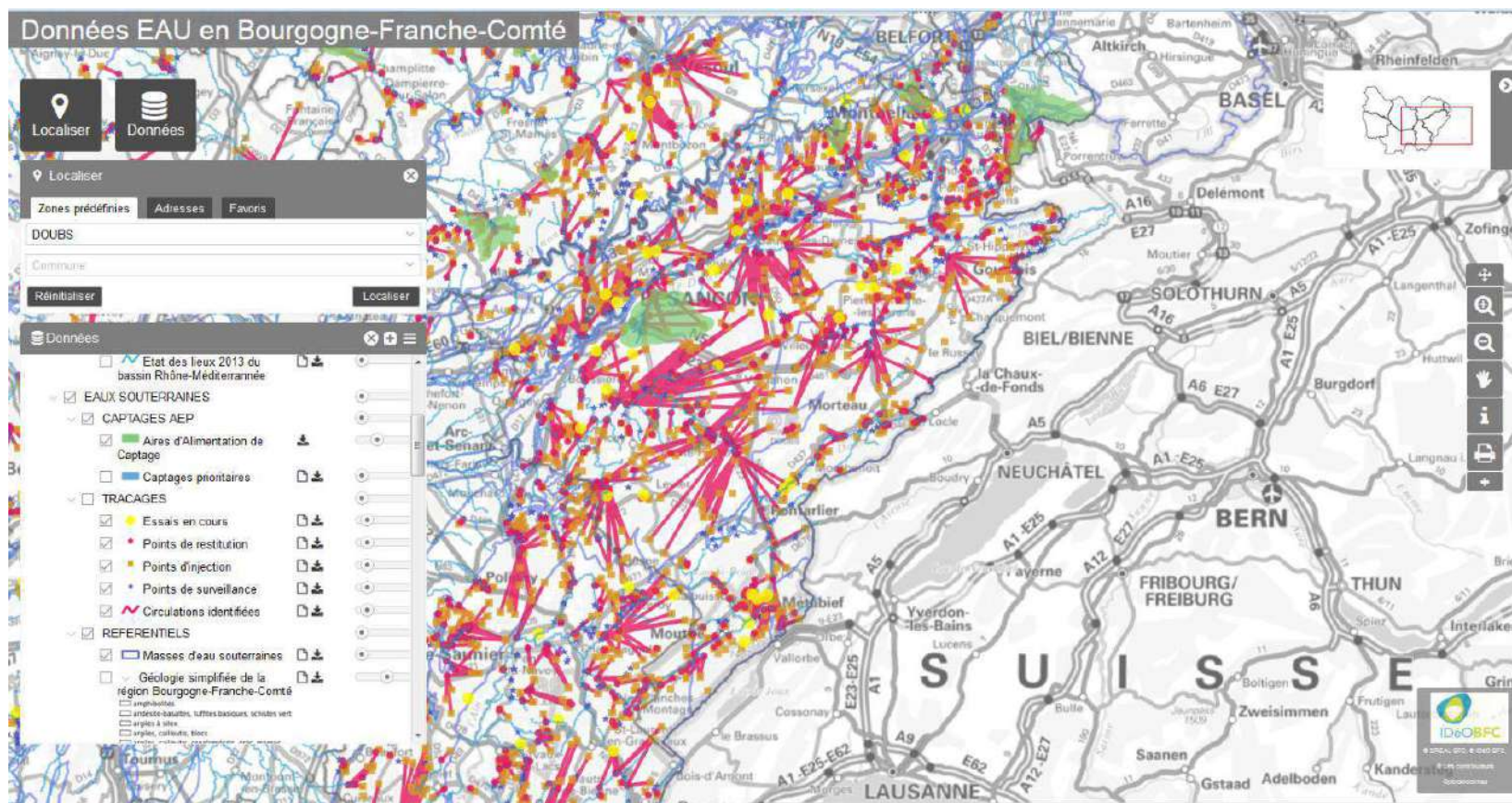
- Plus de 2000 traçages actuellement référencés
- Source : bureaux d'études, clubs spéléologiques, services de l'État
- 192 nouveaux traçages référencés et/ou maj/corrigés (1 jour/semaine environ) en 2018
- Objectif depuis la fusion des régions : développer l'inventaire sur la partie bourguignonne
- Maj cartographique sous IDEO BFC tous les deux-trois mois
- Identification des avis de traçage transmis à la DREAL (rond jaune fluo)
- Aide ponctuelle aux clubs spéléologiques via la fourniture de produits fluorescents

Des outils : inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage de la DREAL BFC



Des outils : inventaire des circulations souterraines reconnues par traçage de la DREAL BFC

- Les différents objets cartographiques sont cliquables et renverront vers une boîte de dialogue contenant les données techniques



PRÉFET
DE LA RÉGION
BOURGOGNE-
FRANCHE-COMTÉ

Des outils : la BD Traçages

(Base de Données des traçages hydrogéologiques)

- Base de données nationale (BRGM)
- <https://bdtracages.brgm.fr/>
- Outil de bancarisation centralisée des opérations de traçages
- Mise en ligne en mai 2016
- Il est nécessaire de créer un compte (identification/mot de passe) pour pouvoir se connecter et accéder à l'application
- L'outil de saisie
- La consultation des données via le SIGES
- Les fiches descriptives
- Création d'un dictionnaire de données SANDRE

Des outils : Inventaire du territoire Seine-Amont des opérations de traçage

- SIGES Seine-Normandie
- <http://sigessn.brgm.fr/?page=carto>
- L'AESN Territoire Seine-amont a demandé au BRGM BFC de mettre en ligne cet inventaire à partir de la base de données nationale

Des outils : Inventaire du territoire Seine-Amont des opérations de traçage

The screenshot displays the SIGES Seine-Normandie web application. At the top, there is a navigation bar with links for 'Espace cartographique', 'Consultation des données', 'Actualités', 'Sites web', and 'Contact'. Below this is the main title 'SIGES Seine-Normandie' and a subtitle 'Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Seine-Normandie'. A search bar is present with a dropdown menu for 'Sélectionner un territoire :'. The main content area features a map of the Paris basin with various data layers overlaid. A legend on the right side, titled 'Clé des couches', lists the following layers:

- Catalogue
 - Fonds de cartes
 - Hydrologie
 - Géologie (BRGM)
 - Points d'eau (BRGM)
 - BD Traçage - Karst (BRGM)
 - Point d'injection
 - Point de surveillance
 - Traçage positif
 - Traçage négatif
 - BD Traçage-Karst Normandie
 - Référentiels
 - Piezométrie
 - Remontée de nappes (BRGM)
 - Vulnérabilité
 - Usages/Pressions
 - BD Drainage
 - Milieu naturel
 - Zonages administratifs
 - Formations du modèle géologique du Territoire du Bassin Parisien (BRGM, DRI)
 - Log géo-hydrogéologique (modèle du Territoire et modèle Albiens)
- Coches externes

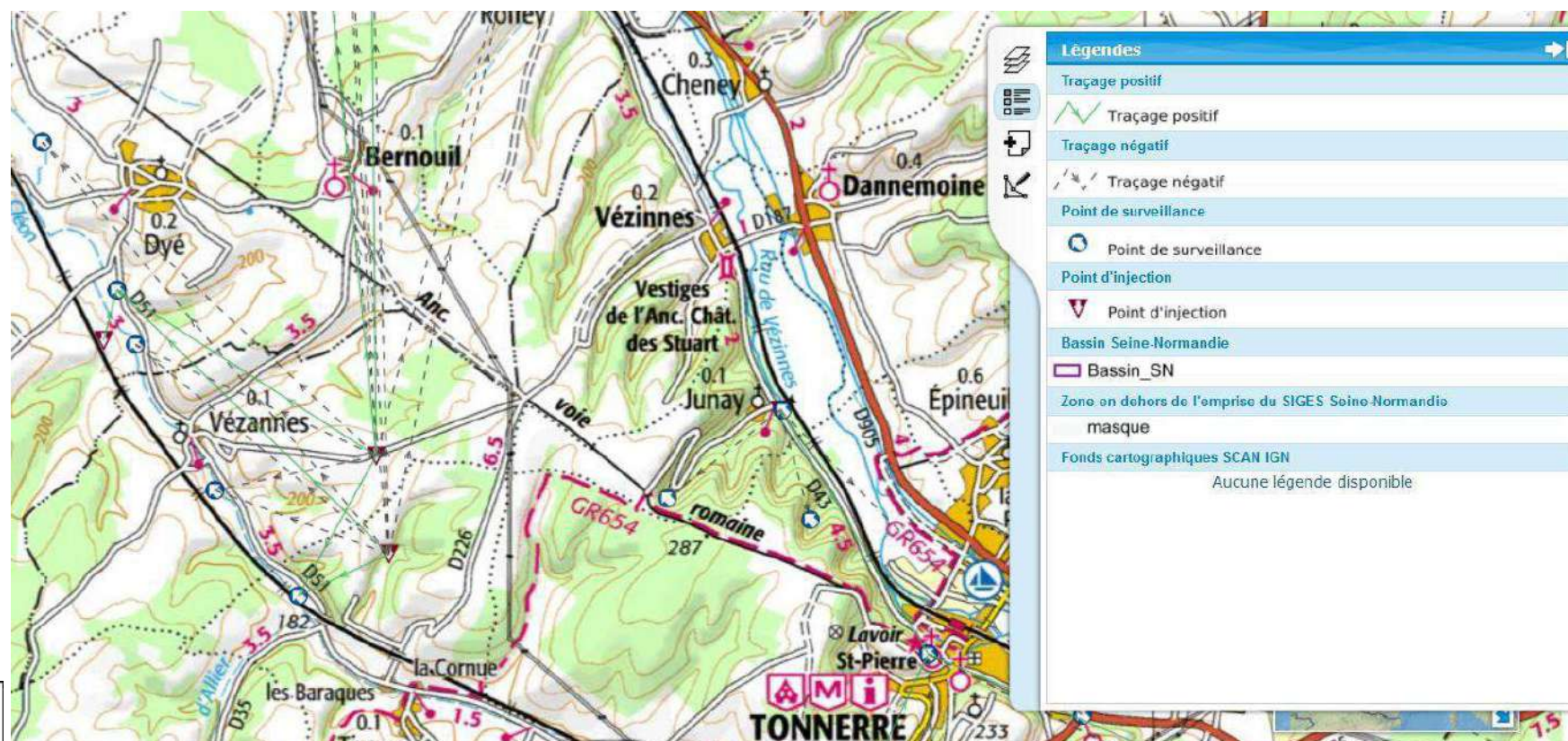


Liberté • Egalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PRÉFET
DE LA RÉGION
BOURGOGNE-
FRANCHE-COMTÉ




Des outils : Inventaire du territoire Seine-Amont des opérations de traçage

- Les différents objets cartographiques sont cliquables et renverront vers des fiches de consultations publiques



Des outils : Inventaire du territoire Seine-Amont des opérations de traçage

■ Fiche Traçage

 Fiche Traçage   Références pour une terre d'avenir

Objectif du traçage : vérifier les limites du BAC du captage, considérées comme trop sécuritaires

Milieu : - Multi-traçage : Oui [voir les traçages associés](#)

Opération accidentelle : Non

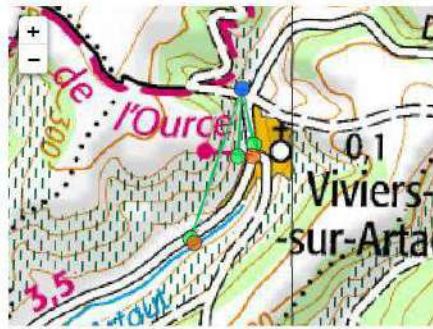
Conditions climatiques : - Conditions hydrogéologiques : Moyennes eaux

Commentaire conditions climatiques : -

Maîtres d'ouvrage : - Opérateur : ICF Environnement

Producteur de données : ICF Environnement

Remarque générale : -



INJECTION

POINT ET OBSERVATION		INJECTION DU TRACEUR	
Identifiant du point : 647	Commune : VIVIERS-SUR-ARTAULT (10)	Date de l'injection : 17/11/2014 à 00:00	Durée : -
<u>Désignation(s) du point</u> : PUIS communal - chemin de Chervey		<u>Mode d'injection</u> : Instantanée (impulsion de DIRAC)	
<u>Date de l'observation</u> : -	<u>Nature du point</u> : -	<u>Traceur</u> : Fluorescéine	<u>Traceur opportuniste</u> : -
<u>Contexte géomorpho</u> : Vallons en "V"		<u>Qté. de traceur</u> : 1 Kg.	<u>Concentration de traceur</u> : -
<u>Commentaire nature</u> : PUIS communal - chemin de Chervey		<u>Chasse</u> : - (Injection simple (sans chasse))	<u>Volume de solution</u> : 30 litre
		<u>Vitesse d'absorption</u> : Inconnue	<u>Epaisseur ZNS</u> : -
		<u>Aménagements</u> : -	
		<u>Commentaires</u> : -	

SURVEILLANCES

Des outils : Inventaire du territoire Seine-Amont des opérations de traçage

- **Point de surveillance 850** - Désignation(s) : rue de l'église - Commune : VIVIERS-SUR-ARTAUT (10)

POINT ET OBSERVATION

Date de l'observation : -	Contexte geomorpho : Vallons en "V"	Nature du point : -
Commentaire nature : rue de l'église		

SURVEILLANCE

Début : 17/11/2014 à 00:00	Fin : 23/12/2014 à 00:00	Voir les résultats
Restitution : Oui		
<u>Type de surveillance</u> : Qualitatif		
Commentaire : détection sûre du 26/11/14 au 04/12/14, et probablement du 04/12/14 au 12/12/14 (douteux)		
Notes de fiabilité :		
Note	Référentiel	Commentaire
2	Muet-Mondain-Jozja - Traçage positif	fluocapteur, un (plusieurs tournées), spectrofluorimétrie, spectre, peu structuré

+ **Point de surveillance 851** - Désignation(s) : source de l'Artaut - Commune : VIVIERS-SUR-ARTAUT (10)

+ **Point de surveillance 852** - Désignation(s) : Puits communal - Commune : VIVIERS-SUR-ARTAUT (10)

+ **Point de surveillance 853** - Désignation(s) : Captage AEP - Commune : VIVIERS-SUR-ARTAUT (10)

+ **Point de surveillance 854** - Désignation(s) : Source PPI - Commune : VIVIERS-SUR-ARTAUT (10)

BIBLIOGRAPHIE

Nature	Référence	URL	Localisation	Année	Titre	Auteurs	Organismes	Fichier
Thèse	-	-	-	2009	Rapport des Impacts des changements environnementaux sur la ressource : Construction d'un modèle hydrogéologique sur le Val d'Orléans, pp 19-20.	Ali Salim Joodi	Laboratoire d'Hydrogéologie de l'université d'Orléans et ISTO.	-

MULTI-TRAÇAGE

Des outils : le pôle karst

- <http://www.orisk-bfc.fr/>
- Espace cartographique

The screenshot displays the ORISK web application interface. At the top, the ORISK logo is accompanied by the tagline "Mieux connaître nos rivières de Bourgogne-Franche-Comté". To the right, there are logos for the French Republic, the Bourgogne-Franche-Comté region, and the "saône & doubs" department. A navigation menu includes "L'OBSERVATOIRE", "TEMPS RÉEL", "CARTOGRAPHIE", "HISTOIRE", "PÔLE KARST", "THÉMATIQUES", and "VOUS ÊTES...". The main content area features a map titled "CARTOGRAPHIE" with a "FONDS DE CARTE" dropdown set to "ScanExpress Classique". A layer selection panel on the right, titled "MA SÉLECTION : 10 couches(s)", lists various data layers such as "Agriculture", "Assainissement", "Base de données phénomènes karstiques", "Eaux de surface (hydrographie & écoulement)", and "Eaux souterraines (surveillance & connaissance)". A small inset map at the bottom right shows the location of the main map area within France.

Quelles informations ?

- **Le traçage** : code, maître d'ouvrage, opérateur, date, objectif
- **Les points d'injection et de surveillance** : localisation, code BSS, caractéristiques (profondeur, dimensions, etc), type de cavité, formation géologique
- **Les injections du traceur** : type de traceur, quantité, durée d'injection, type de chasse, vitesse d'infiltration, état hydrique
- **Les surveillances** : méthode de surveillance, fréquence de prélèvement, durée, méthode d'analyse
- **Les résultats** : temps de transfert, vitesse de transfert, fiabilité des résultats
- **Bibliographie associée**

Fiabilité des données

- Les données mises à disposition sont issues de références bibliographiques diverses et n'ont pas fait l'objet d'une vérification (sur le terrain)
- L'exactitude, la mise à jour, l'intégrité et l'exhaustivité des données ne peuvent être garantis
- Les données ne sont pas exemptes d'erreurs (localisation, restitution)
- Les données n'ont aucune valeur réglementaire

Les bonnes pratiques

- Préalablement à la réalisation d'un traçage, il est nécessaire de consulter les inventaires existants
- Préalablement à la réalisation d'un traçage, il est nécessaire de contacter divers organismes ...
- Prévenir toutes les personnes pouvant être concernées par la coloration
- Éviter tout dérangement de l'espace public (coloration visible à l'œil nu)
- Profiter de la présence de certains organismes sur le terrain
- ... dont la DREAL
- Rôle de veille afin d'éviter des interférences dans les résultats (avec les limites liées à l'information disponible)

Les bonnes pratiques

- Site de la DREAL BFC
- Formulaire de saisie des traçages
- <http://www.bourgogne-franche-comte.developpement-durable.gouv.fr/formulaire-de-saisie-des-tracages-a7363.html>

- Site national de la BD Traçages
- Identifiant de connexion
- Accès à l'application de saisie en ligne (les données sont soumises à validation avant mise en ligne, via l'outil SIGES)



Les bonnes pratiques

- L'inventaire est un outil « participatif »
- Faire remonter les résultats des traçages de manière plus systématique
- Veiller à la précision lors de la rédaction des rapports (carte de localisation, échelle, coordonnées des points, code BSS)
- Informer des erreurs et anomalies pouvant être relevées, afin d'apporter les modifications adaptées

Merci de votre attention



Mesures hydrologiques dans les drains karstiques



Par des spéléologues

Avec des budgets
très limités

Mesures des hauteurs de mises en charge

1

L'exploration spéléologique

- ✓ Zone épinoyée
- ✓ Mise en charge

Pourquoi :

- ✓ Étude
- ✓ Sécurité



Mesures des hauteurs de mises en charge

1

Comment : Sensus Ultra

- ✓ Mesure la pression (absolue) et la température
- ✓ Enregistre les mesures (pendant plus d'un an avec un intervalle d'échantillonnage d'une minute)
- ✓ Conçue pour les plongeurs par la société canadienne Reefnet : <https://reefnet.ca/>
- ✓ Réglages possibles :
 - Intervalle d'échantillonnage : de 1s à plus de 18h
 - Choix de 1 mesure, 2 mesures ou 4 mesures (pour un calcul de moyenne)
 - Pression de déclenchement
- ✓ Bon marché par rapport à d'autres appareils comparables
Environ 200€ pièce



Mesures des hauteurs de mises en charge

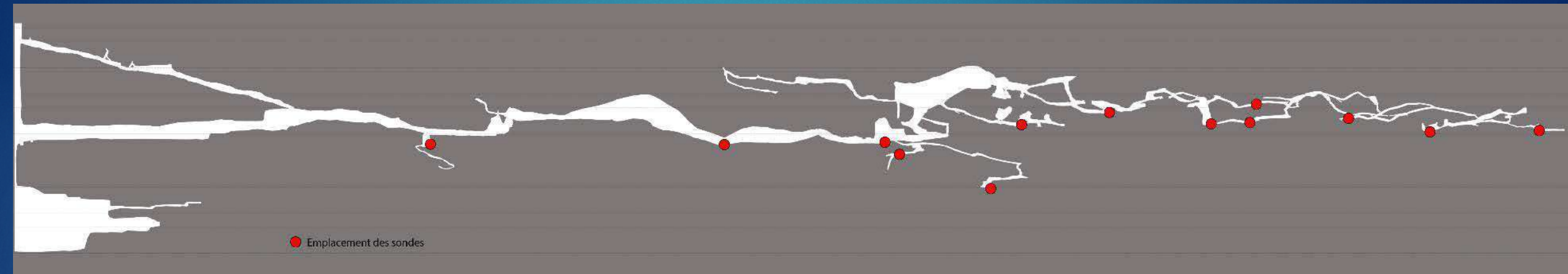
Mise en œuvre



Mesures des hauteurs de mises en charge

1

Mise en place de Sensus Ultra dans la grotte des Faux Monnayeurs (Mouthier Hautepierre – Doubs)



13 emplacements – Seulement 3 sondes installées en même temps

Mesures des hauteurs de mises en charge

Hauteur d'eau en fonction de la pression :

La hauteur d'eau (h) est proportionnel à la variation de pression (Δp)

Le coefficient de proportionnalité dépend de la masse volumique de l'eau (ρ) et de l'accélération de la pesanteur (g)

$$h = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g}$$

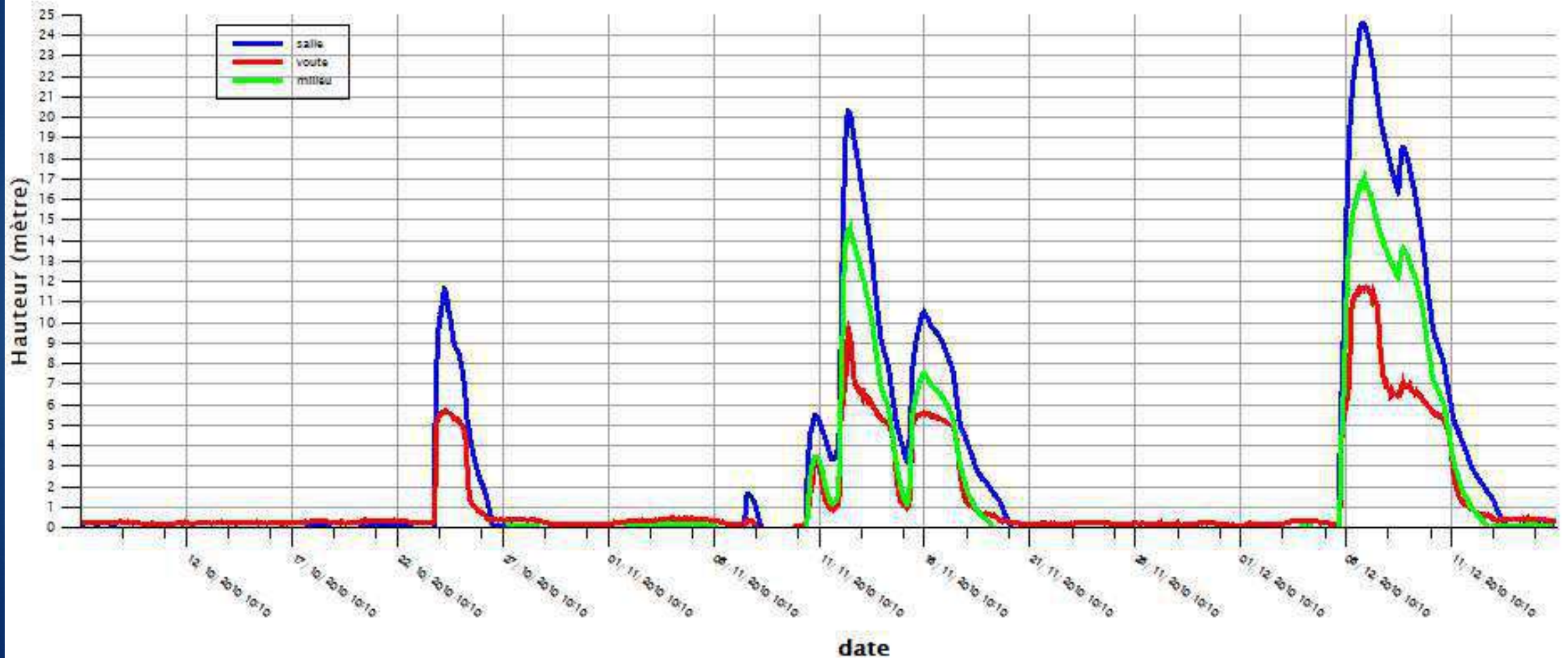
ρ dépend de la température et des solides dissous

1mbar \leftrightarrow 1,0197 cm d'eau

Mesures des hauteurs de mises en charge

1

Hauteur d'eau en fonction du temps pour 3 sondes dans la cavité



Mesures des hauteurs de mises en charge

Caractéristiques des Sensus Ultra

- ✓ Résolution :
 - 1mbar soit environ 1cm de hauteur d'eau
 - 0,01°C pour la température

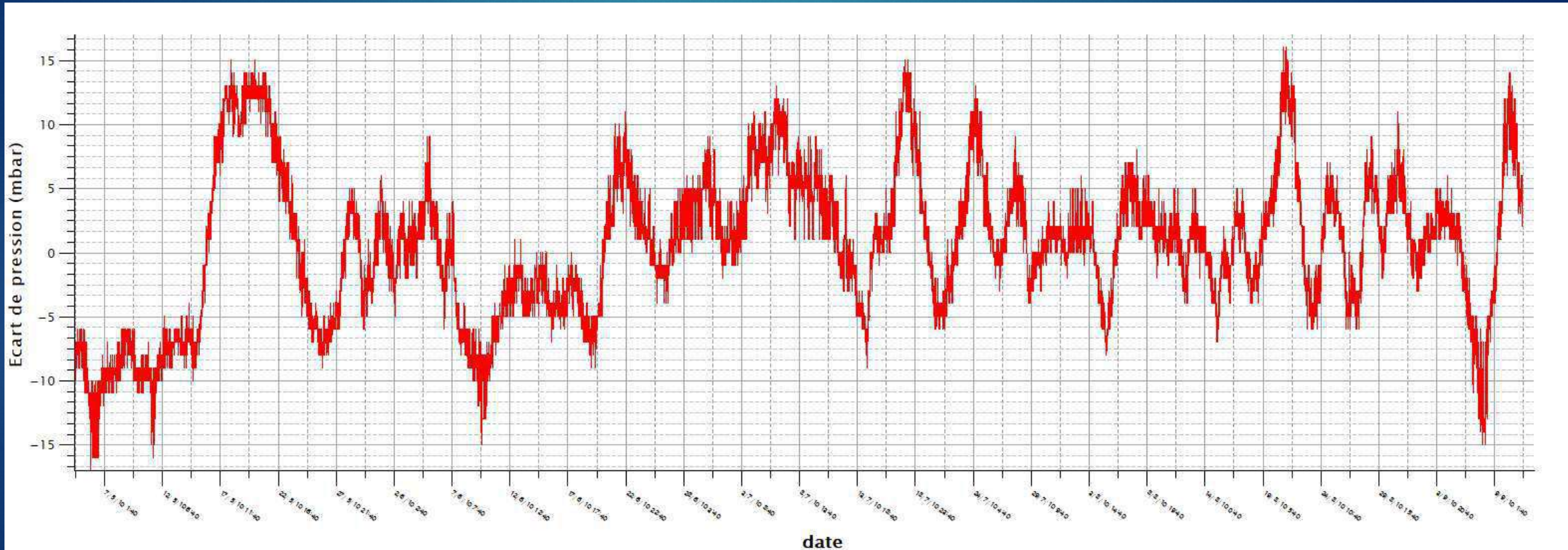
- ✓ Le constructeur indique une « accuracy » (sans autre information – il s'agit probablement d'une incertitude)
 - 30 cm environ de hauteur d'eau
 - $\pm 0,7^\circ\text{C}$ pour la température

- ✓ Supporte une pression correspondant à environ 150m de hauteur d'eau

Mesures des hauteurs de mises en charge

1

Suivi pendant 4 mois de la pression mesurée par une Sensus Ultra placé à une profondeur fixe

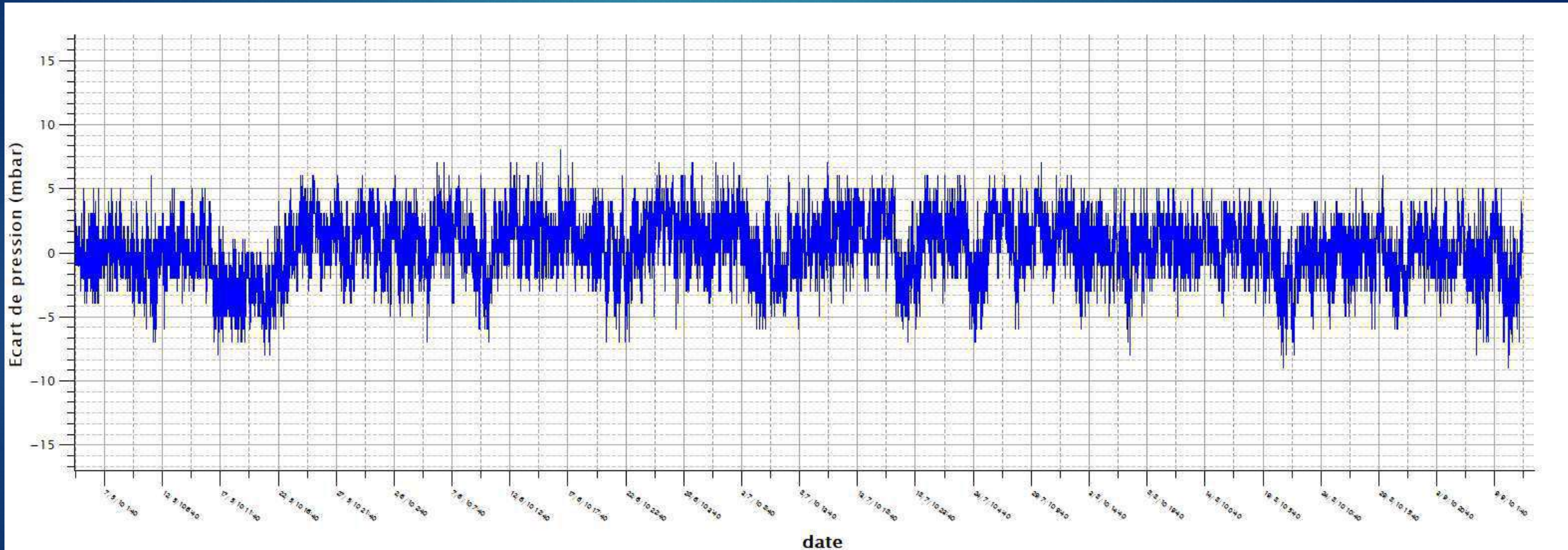


Les variations de l'évolution de la pression atmosphérique au cours du temps sont nettement visible. Ceci confirme l'incertitude d'une trentaine de cm donné par le constructeur ; c'est donc l'incertitude sans correction

Mesures des hauteurs de mises en charge

1

Le même suivi avec une seconde Sensus Ultra à l'air libre qui permet de compenser les variations de pression atmosphérique – la pression est obtenue par soustraction des 2 mesures



écart-type : 2 mbar – l'incertitude à 3 écart-type : ± 6 mbar (environ ± 6 cm d'hauteur d'eau)

Mesures des hauteurs de mises en charge

Limites et problèmes de l'utilisation des Sensus Ultra

- ✓ Tout à fait adaptée aux études de mises en charge (plusieurs dizaines de cm de variation minimum) mais pas adaptée à l'étude de variations de quelques cm (rivière en écoulement libre par exemple)
- ✓ Il est préférable d'utiliser une sonde de référence (hors d'eau) pour compenser les variations de pression atmosphérique.
L'utilisation des données de pression d'une station météo proche donne également de bons résultats
- ✓ La justesse : Peu importe, chaque sonde est calé en profondeur lors de son installation
- ✓ La fiabilité dans le temps
- ✓ La solidité
- ✓ Le problème d'encroutement

Mesures des hauteurs de mises en charge

Un logiciel pour simplifier l'utilisation des Sensus Ultra : [Lancer](#)

The screenshot displays the SensusKarst software interface. At the top, there is a navigation bar with the following elements: the SensusKarst logo, a 'Communication Sensus Ultra' button with a square icon, a 'Graphique' button with a line graph icon, and a 'Paramètres' button with a gear icon. Below the navigation bar, there are five buttons: 'Lecture des paramètres de la sonde', 'Lecture des mesure de la sonde', 'Liste ports COM disponibles', 'Démarrer les mesures de la sonde', and 'Arrêter les mesures de la sonde'. The main area contains several input fields for configuration: 'Port série COM' (set to 6), 'Modèle' (Sensus Ultra 3.2), 'Numéro de série' (U-14738), 'Intervale' (65000 s), 'Déclenchement' (2000 mbar), 'Tension' (3.535 V), 'Température' (23.51 °C), and 'Pression' (992 mbar). At the bottom, a 'Data' section shows the device ID 'sensus ultra : U-14738' and the number of measurements retrieved: 'nombre de série de mesures récupéré : 9'. A list of measurement records follows, each showing a date and time range, the number of measurements, and the interval between measurements.

Port série COM: 6

Modèle: Sensus Ultra 3.2

Numéro de série: U-14738

Intervale: 65000 s

Déclenchement: 2000 mbar

Tension: 3.535 V

Température: 23.51 °C

Pression: 992 mbar

Data: sensus ultra : U-14738
nombre de série de mesures récupéré : 9

Mesures du : 10/10/2016 05:00:49 au 10/10/2016 05:09:39 (Nombre de mesures : 54 | Intervale entre les mesures : 10 s)
Mesures du : 09/02/2017 18:13:10 au 09/02/2017 18:13:10 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 09/02/2017 18:21:57 au 15/02/2018 11:21:57 (Nombre de mesures : 35589 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 11:37:09 au 15/02/2018 11:37:09 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 12:10:48 au 15/02/2018 12:10:48 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 12:12:57 au 15/02/2018 12:12:57 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 12:13:08 au 15/02/2018 12:13:08 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 12:13:54 au 15/02/2018 12:13:54 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)
Mesures du : 15/02/2018 12:19:33 au 15/02/2018 12:19:33 (Nombre de mesures : 1 | Intervale entre les mesures : 900 s)

Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Suivi de la hauteur d'eau

- ✓ Capteur de pression relative 4-20mA
Incertitude : 0,1% de la pleine échelle
(soit 0,5cm pour un 0-5m)
- ✓ Enregistreur Metrolog 420MET
- ✓ Enregistreur Lascar Electronics EL-USB-4
(environ 60€)



On obtient directement la hauteur d'eau en fonction du temps

Les hauteurs d'eau en direct : instrumentation de la source du Pontet

TRMC-19 :

- Enregistreurs de données (différents modules d'entrée)
- Transmission des données en GPRS et 3G
Les données sont alors consultable sur Internet
- Conçu par la société Suisse : <http://www.tetraedre.com>
- Environ 2000€ au total



Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Les mesures de débits (jaugeages) Méthode par dilution de sel

✓ Le principe :

basé sur la conservation de la masse de sel

✓ Matériels :

- Du sel de cuisine
- Un conductimètre enregistreur
- Eventuellement un seau pour diluer le sel

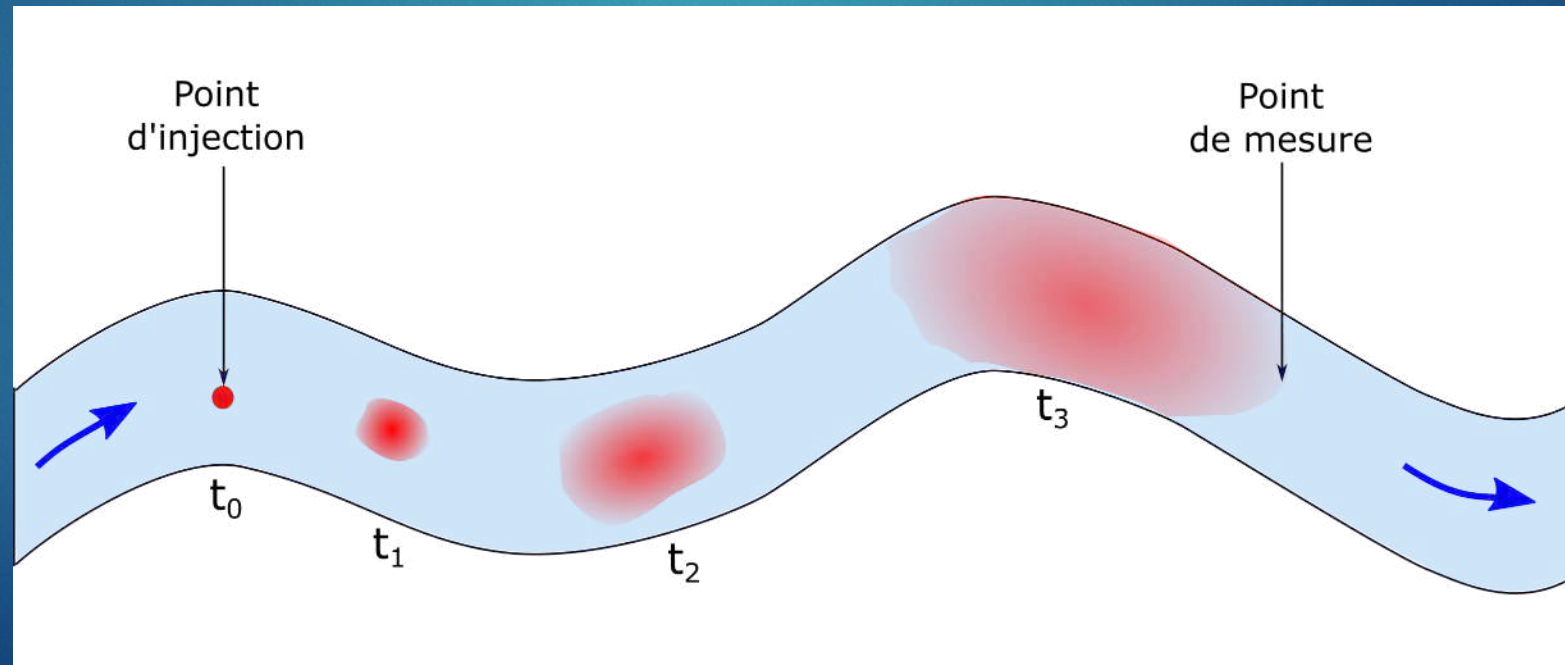


Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Méthode :

- ✓ On injecte une masse connue M de sel en un point de la rivière (entre 2 et 10 g de sel par L/s de débit)
- ✓ On mesure la conductivité de l'eau quelques dizaines de mètres à l'aval
Le sel doit être mélangé de manière homogène



Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Interprétation :

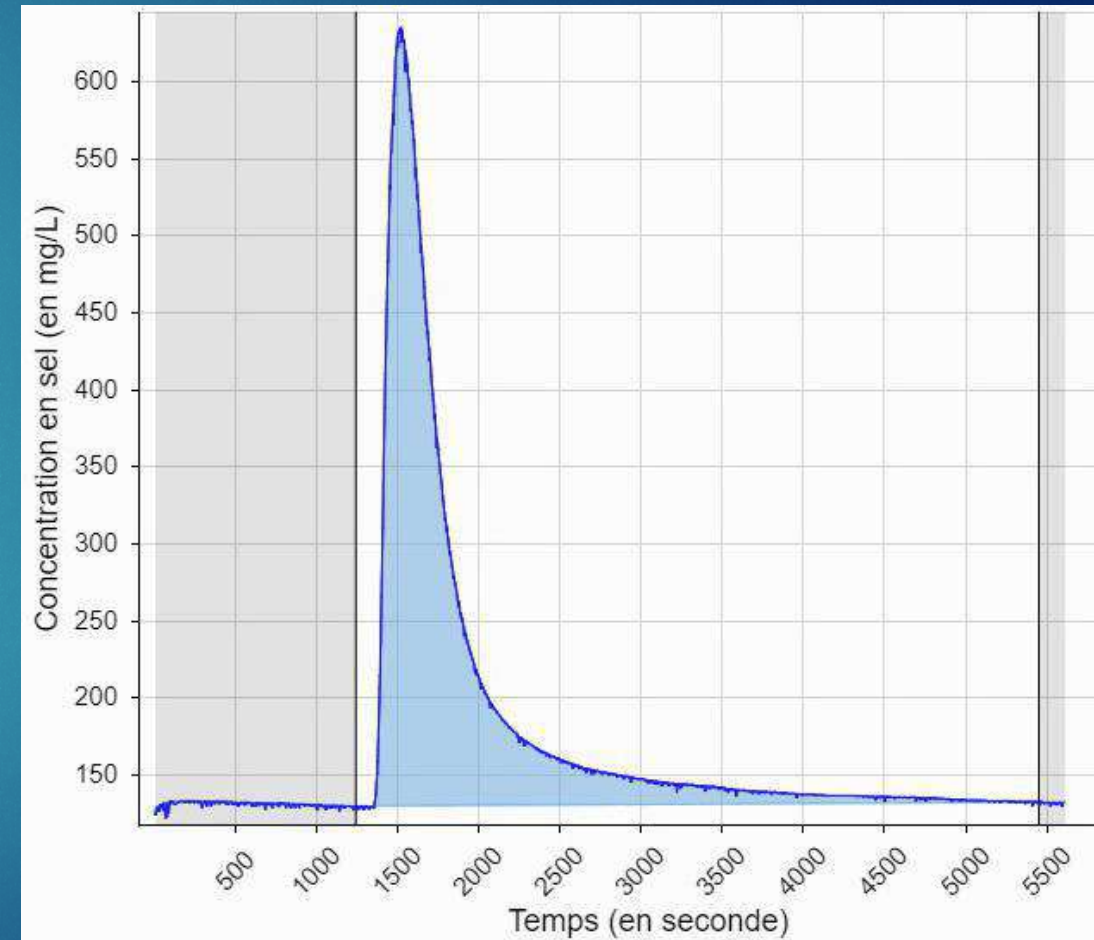
- ✓ Il faut étalonner le conductimètre :
La concentration en sel est proportionnel à la conductivité
Typiquement : 1 g/L \leftrightarrow 2083 μ S
- ✓ On obtient la concentration en sel en fonction du temps à partir de la conductivité

- ✓ Conservation de la masse :
 $M(t_0) = M(t_3)$

$$M = \int m(t).dt = \int Q . c . dt$$

- ✓ On en déduit :

$$Q = \frac{M}{\int c . dt}$$



Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Intérêts et limites de la méthode

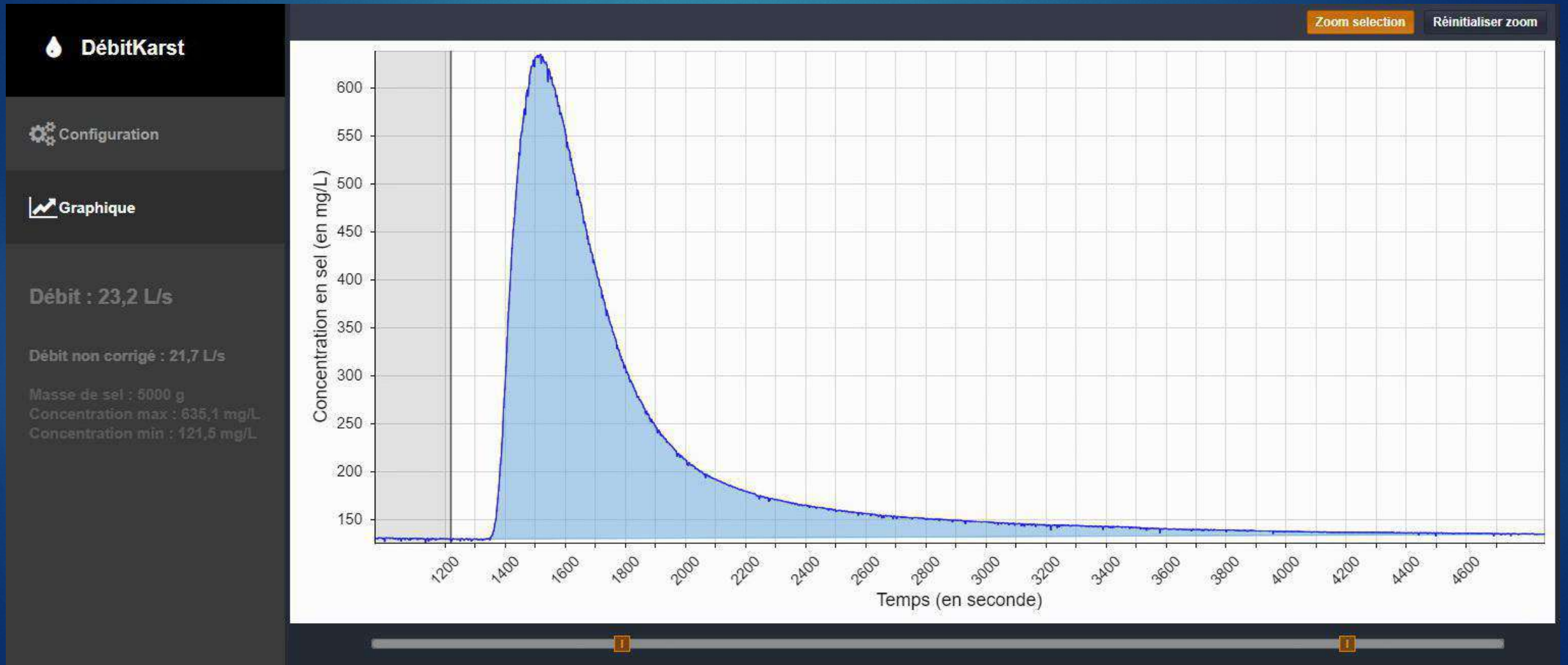
- ✓ Bien adaptée aux rivières torrentielles souvent rencontrées sous terre et au niveau des sources karstiques
- ✓ Il est indispensable d'effectuer la mesure à une distance suffisante de l'injection pour que le mélange soit homogène
- ✓ Le débit ne doit pas varier pendant la mesure
- ✓ Faible coût
- ✓ Matériel peu encombrant, facile à transporter sous terre
- ✓ L'incertitude de mesure est difficile à évaluer, elle dépend de nombreux paramètres

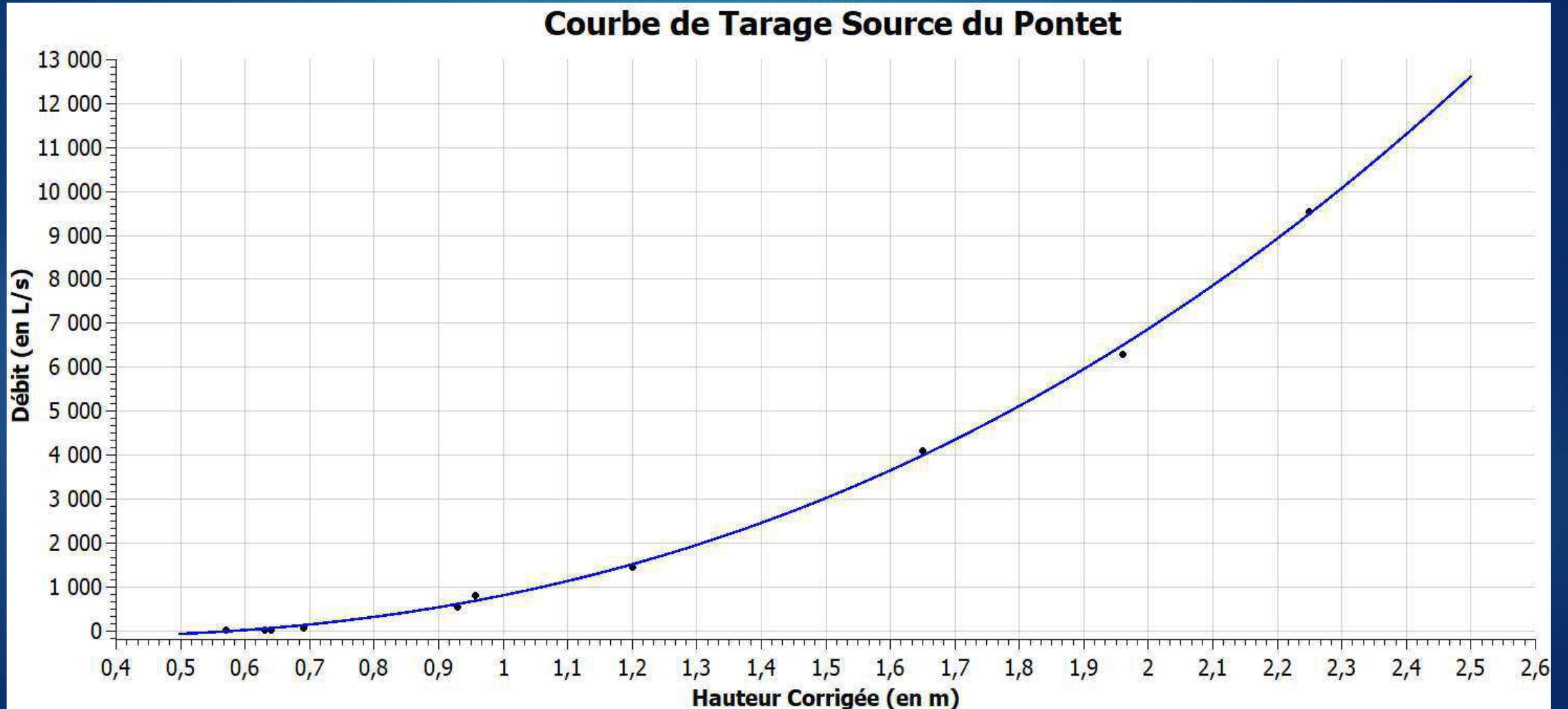


Chroniques des débits de rivières ou sources

2

Un logiciel pour le calcul du débit : [Lancer](#)

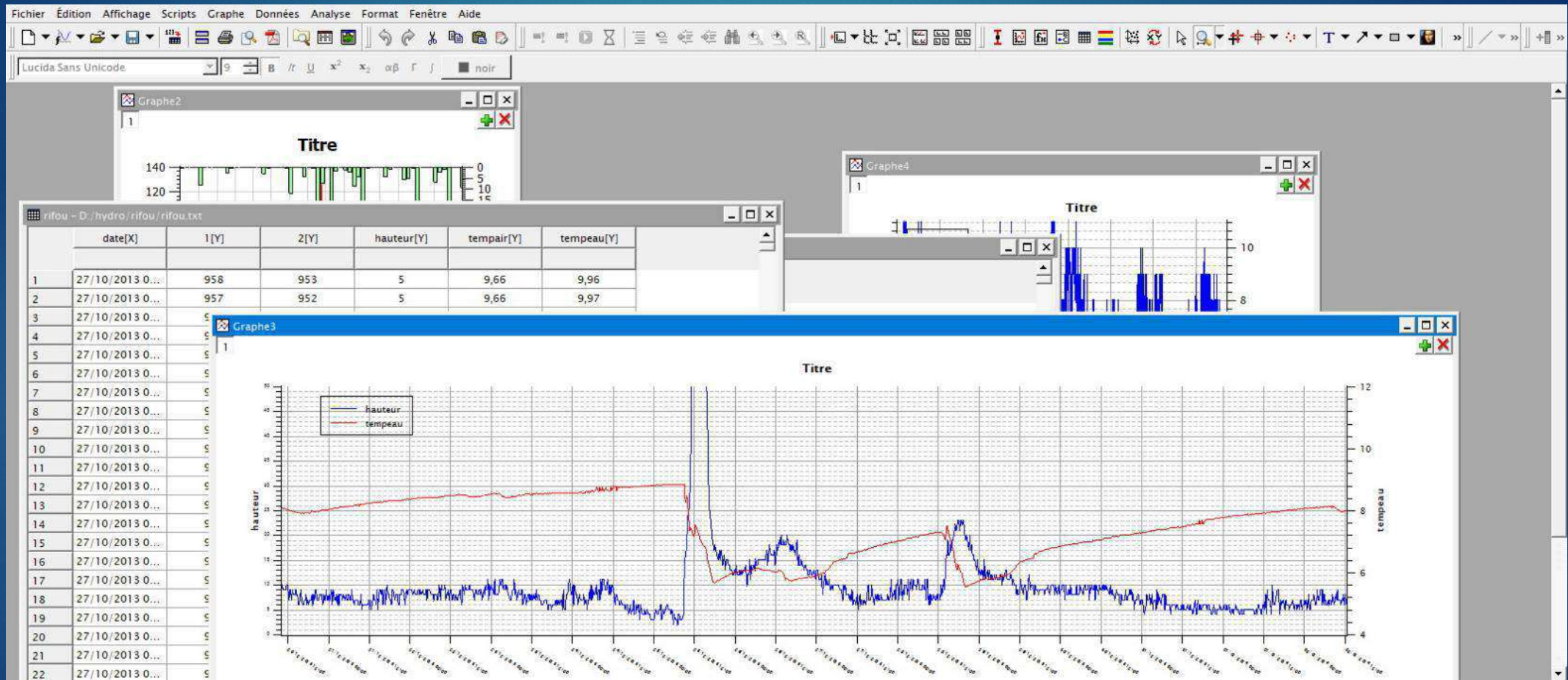




Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

QtiPlot : un logiciel pour visualiser et traiter les données



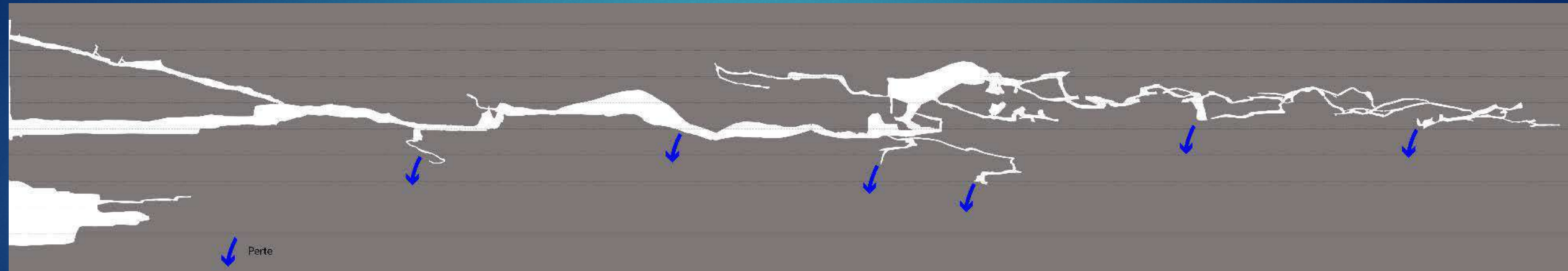
<https://www.qtiplot.com>

- environ 20€ pour une licence

Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Une succession de pertes et de seuils



Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Modèle des débits dans la cavité

les écoulements par les pertes s'effectuent en régime noyé turbulent

$$\Delta h = h - h_0 = k \times Q_p^2$$

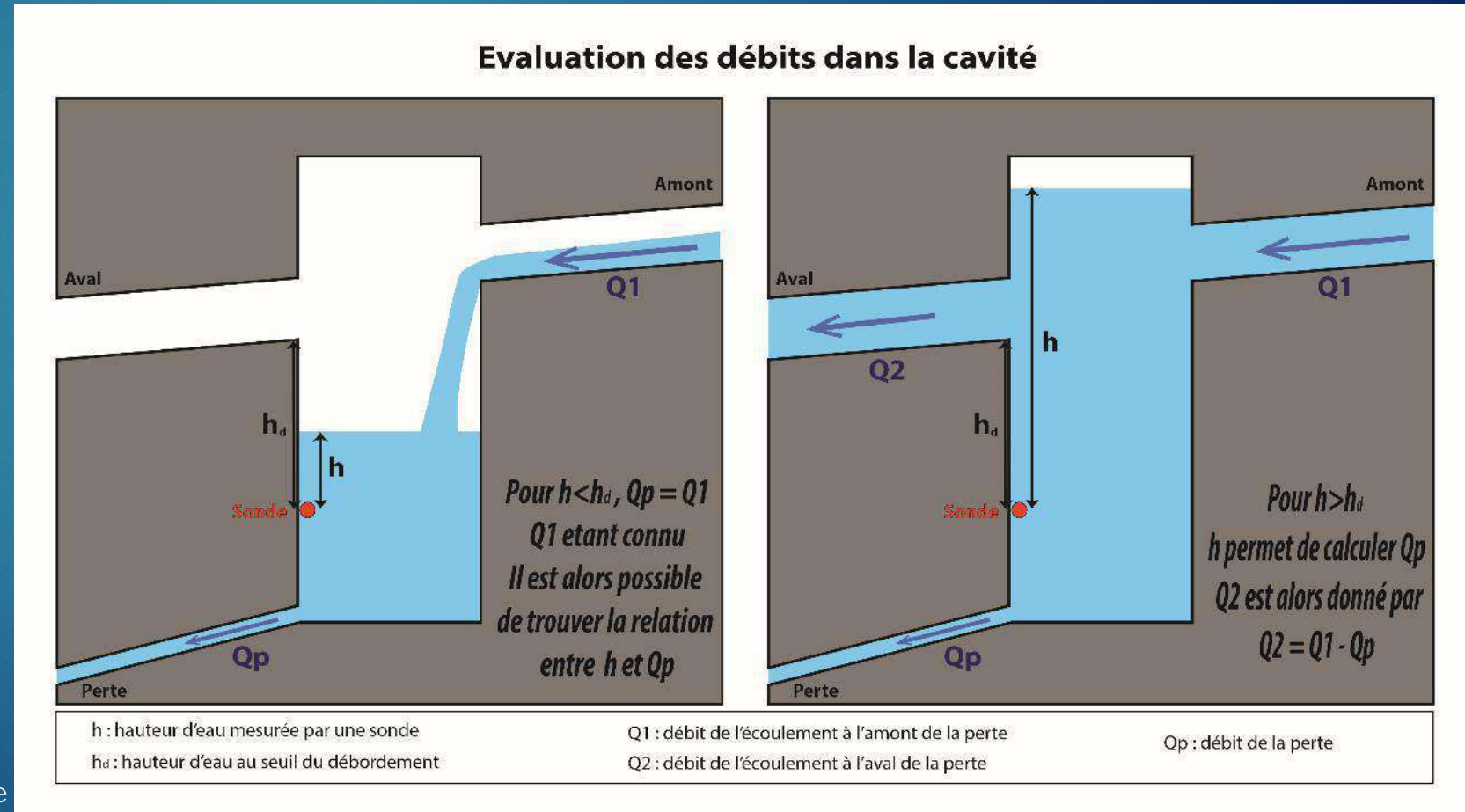
Δh : hauteur d'eau mesurée (h)
à une constante près (h_0)
 Q_p : débit de la perte

Donc :

$$Q_p = \sqrt{(h - h_0) / k}$$

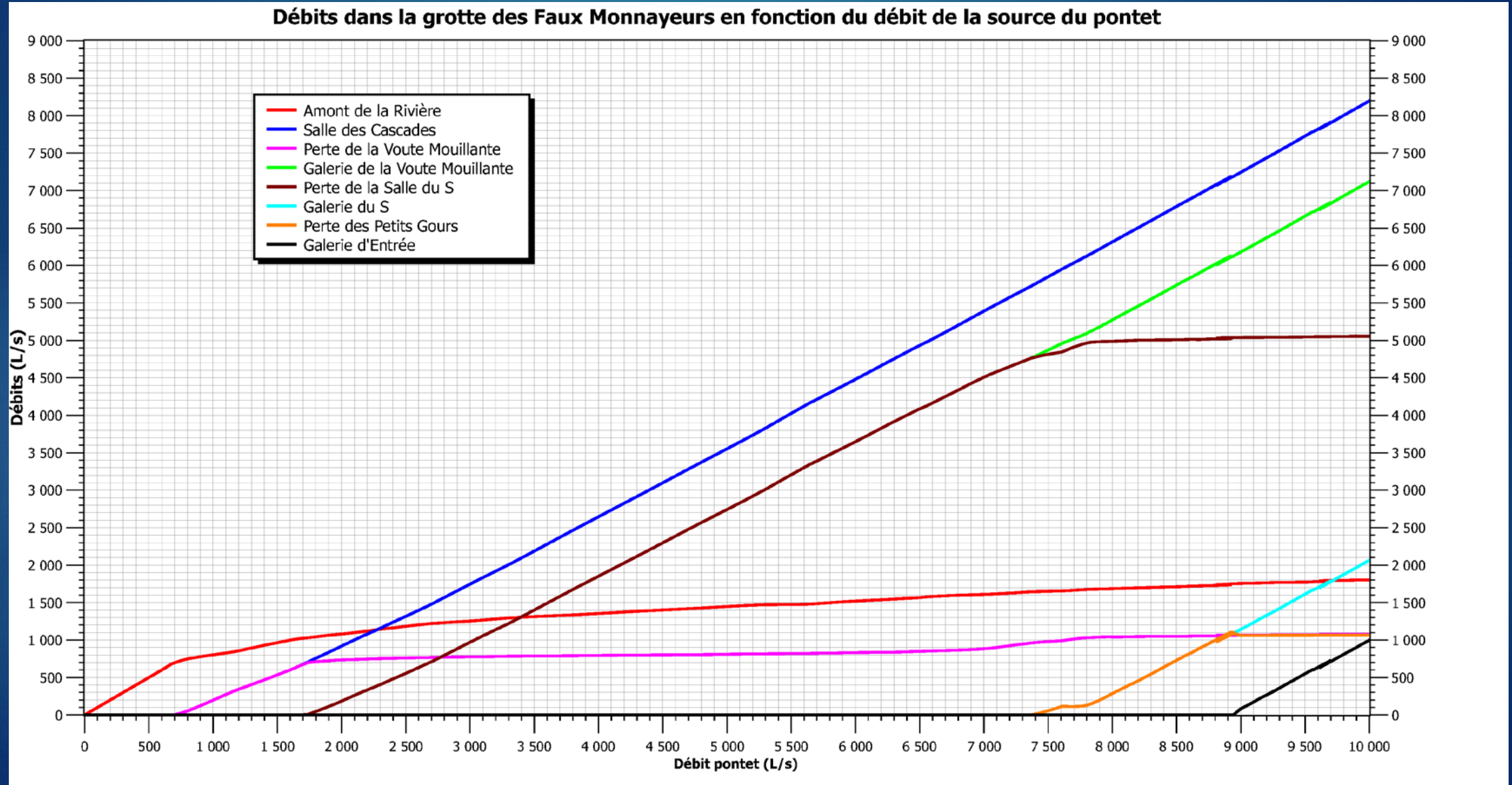
Le débit de l'eau débordant par-dessus le seuil est obtenu en retranchant le débit de la perte au débit de la source du Pontet .

Nous utilisons la même méthode pour obtenir, de proche en proche, les débits au niveau de chaque perte et seuil de la cavité



Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

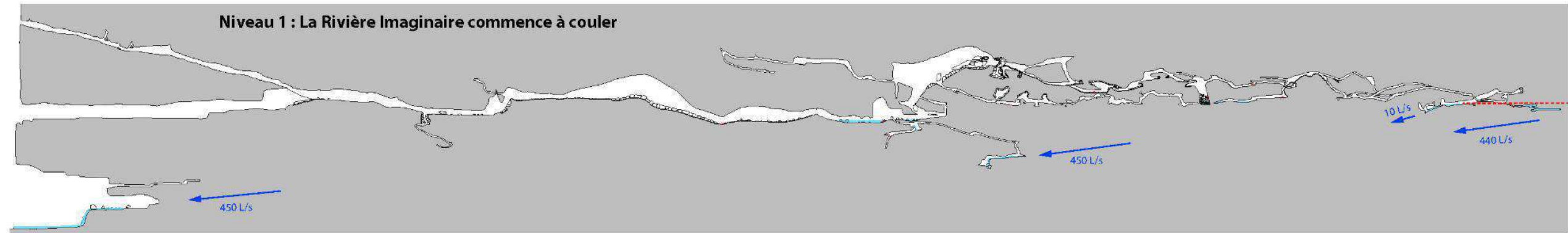
3



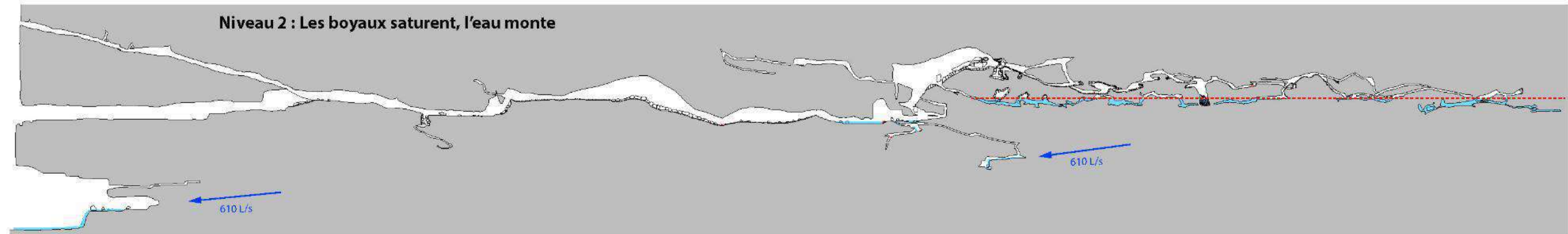
Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Niveau 1 : La Rivière Imaginaire commence à couler



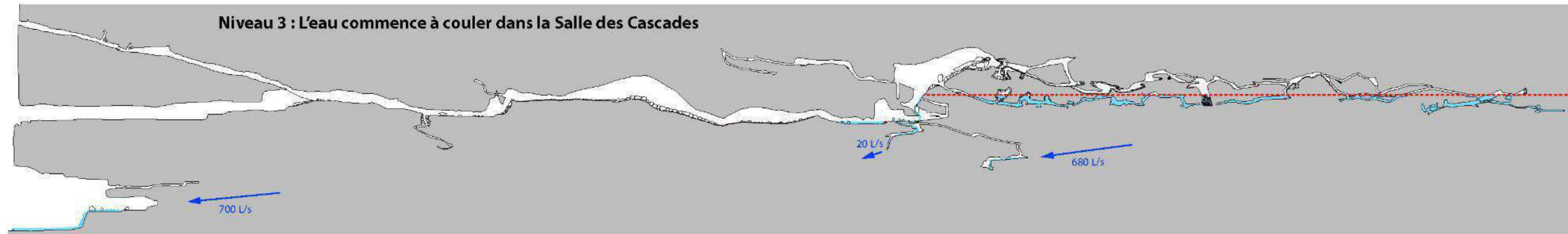
Niveau 2 : Les boyaux saturent, l'eau monte



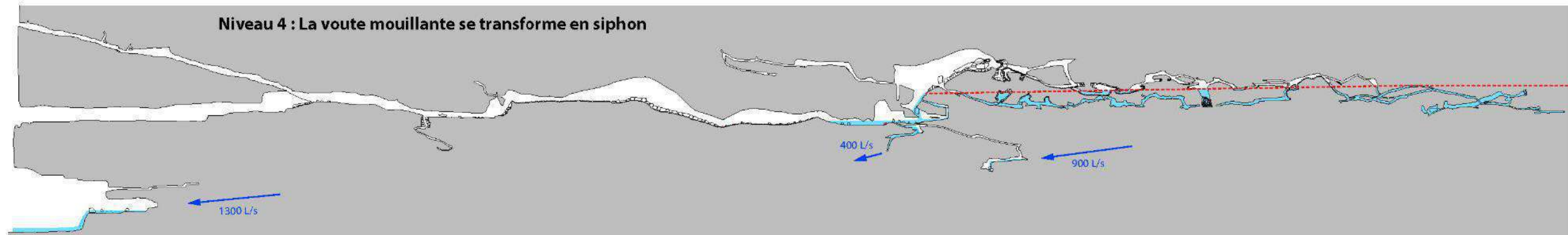
Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Niveau 3 : L'eau commence à couler dans la Salle des Cascades



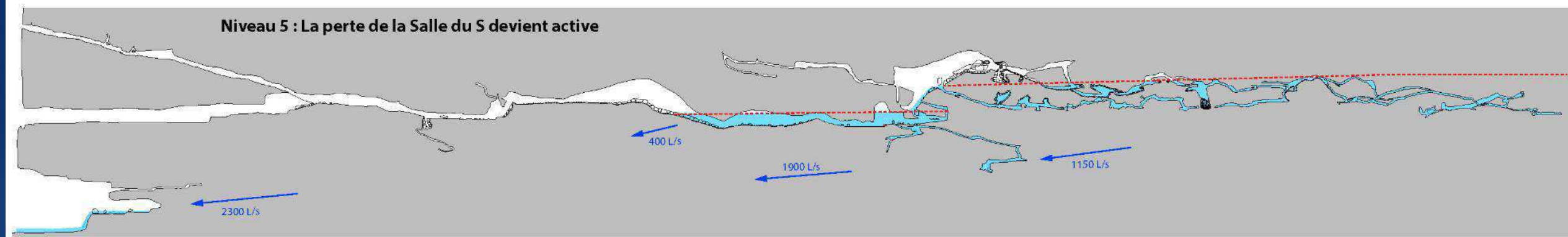
Niveau 4 : La voute mouillante se transforme en siphon



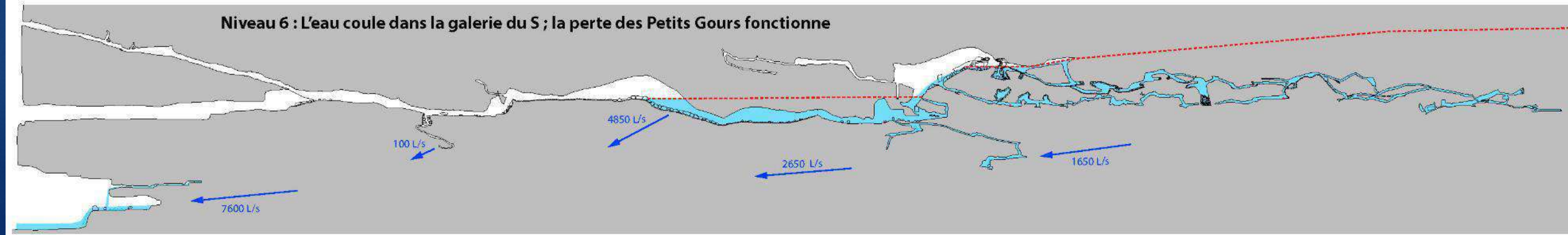
Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Niveau 5 : La perte de la Salle du S devient active



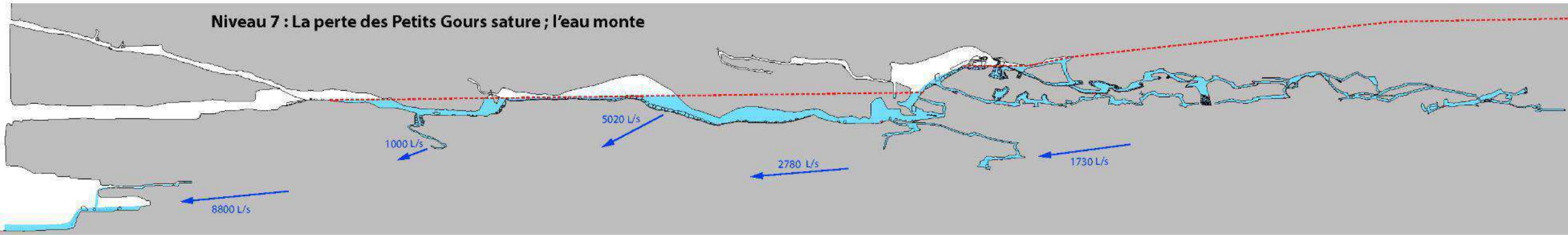
Niveau 6 : L'eau coule dans la galerie du S ; la perte des Petits Gours fonctionne



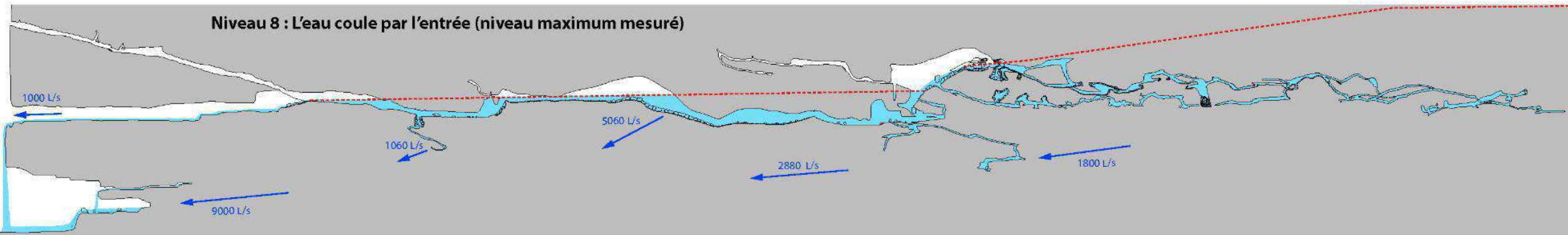
Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Niveau 7 : La perte des Petits Gours sature ; l'eau monte



Niveau 8 : L'eau coule par l'entrée (niveau maximum mesuré)



Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

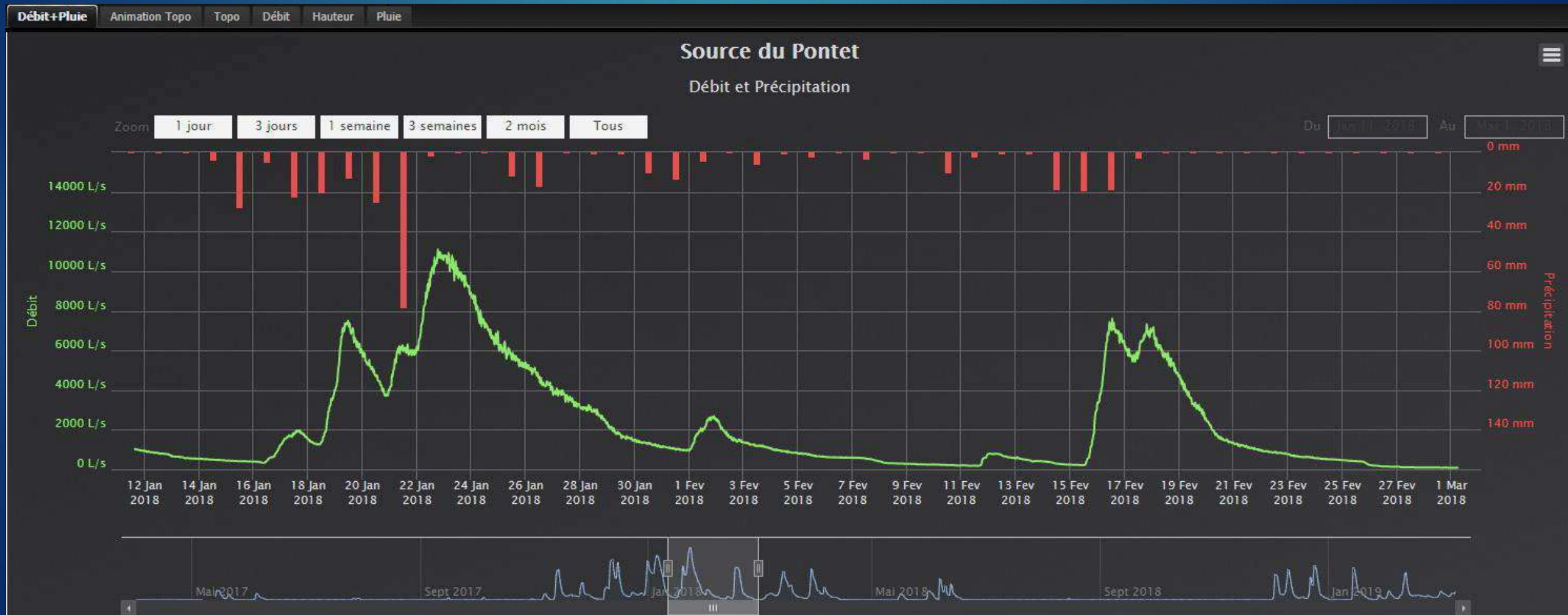
Quelques vérifications in situ



Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

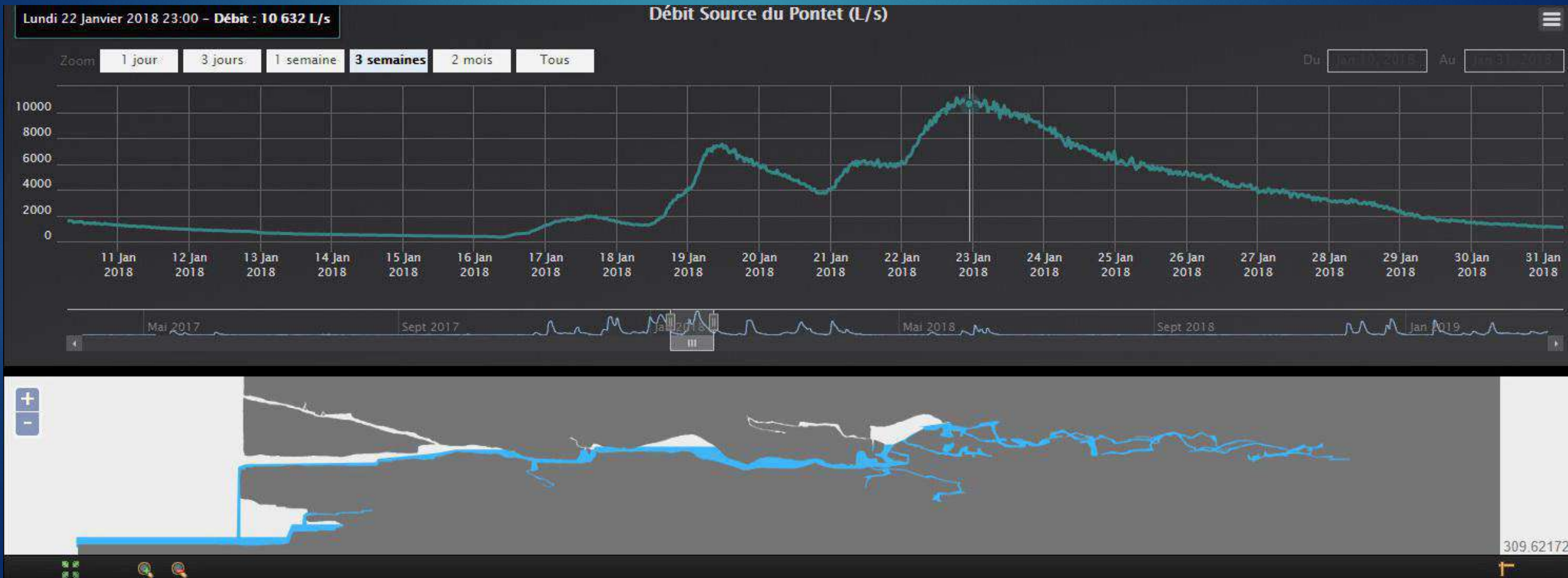
Les débits en temps réel en ligne : <http://mesures.spiteurs-fous.fr>



Modèle hydrologie grotte des Faux Monnayeurs

3

Les mises en charge en temps réel en ligne : <http://mesures.spiteurs-fous.fr>



Réalisé par Éric GEORGES

- Spéléologue
- Membre du Groupe Spéléologique des Spiteurs Fous

<http://spiteurs-fous.fr>



- Dans le cadre du **GIPEK**

Groupement pour L'Inventaire, la Protection et l'Etude du Karst du massif jurassien

<http://gipek.fr>



- Retrouver les publications du GIPEK sur :

<http://boutique.gipek.fr>

SUIVI HAUTE FRÉQUENCE DES NUTRIMENTS EN MILIEU KARSTIQUE

Calibration d'un spectromètre de terrain UV-Visible

A. VALLET¹, F. MOIROUX², J.-B. CHARLIER²

1 BRGM, DIJON, FRANCE

2 BRGM MONTPELLIER, FRANCE

12/03/2019



Géosciences pour une Terre durable

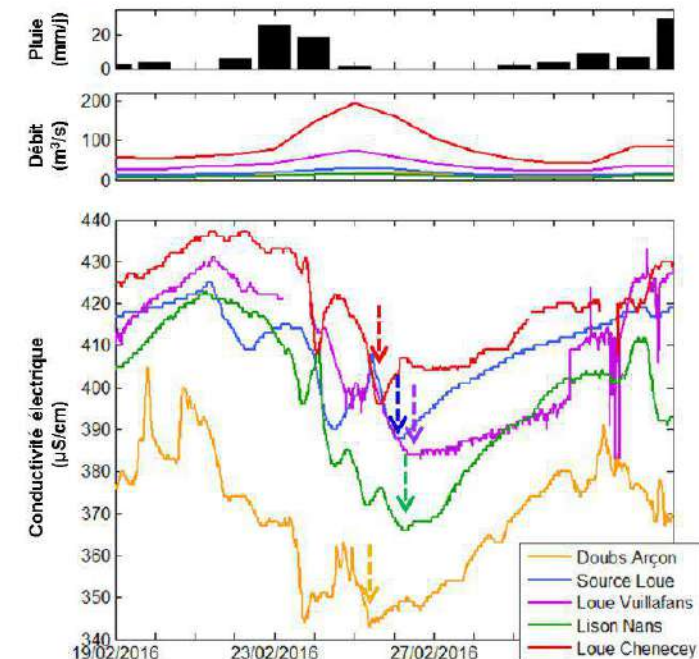
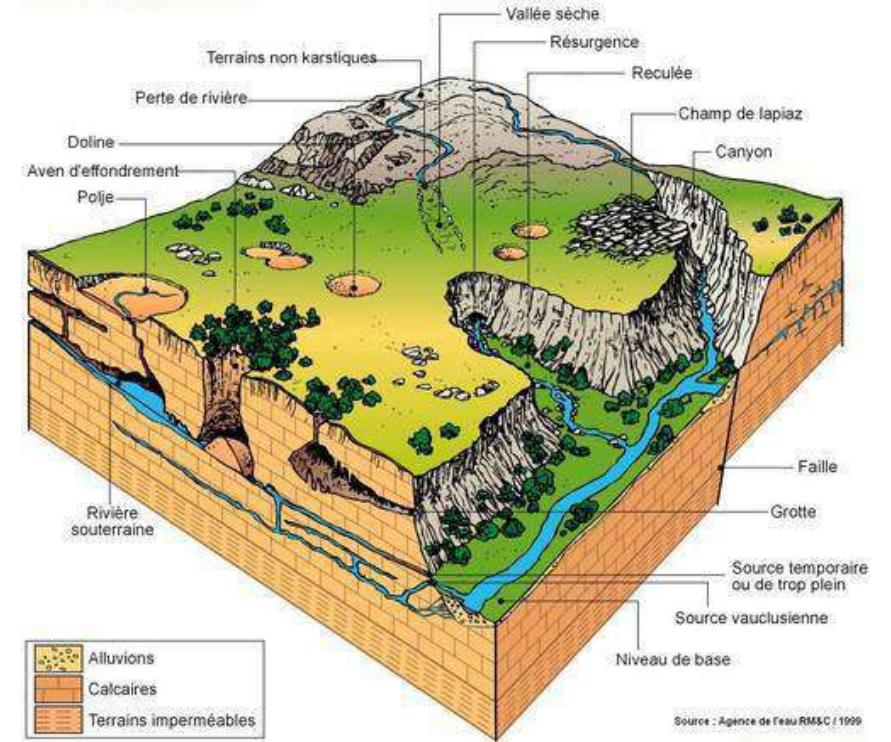
brgm

Contexte

Importance d'un suivi haute-fréquence pour les aquifère karstiques

Aquifère karstique

- Complexe : double porosité, hétérogène, transferts rapides
- Vulnérable : processus de rétention et d'auto-épuration des polluants limités



Contexte

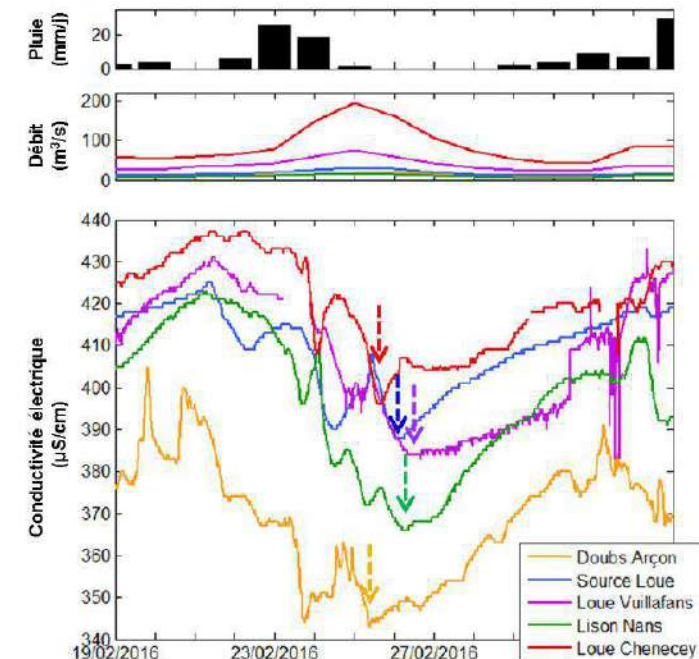
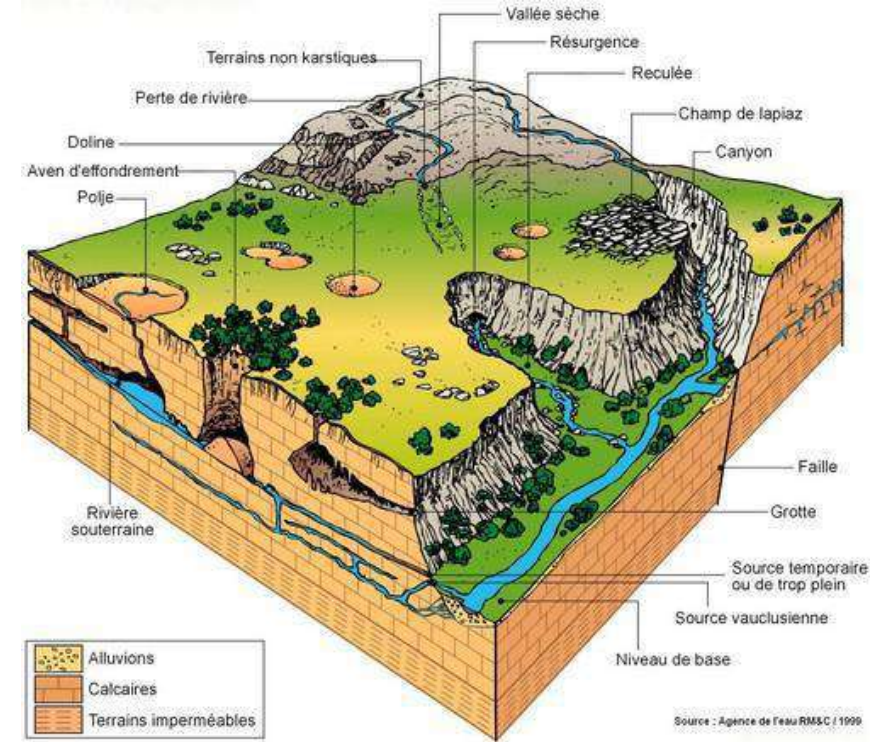
Importance d'un suivi haute-fréquence pour les aquifère karstiques

Aquifère karstique

- Complexe : double porosité, hétérogène, transferts rapides
- Vulnérable : processus de rétention et d'auto-épuration des polluants limités

Eaux de surface en milieu karstique

- Dynamique qualité et quantité des ESU principalement contrôlée par les ESO karstiques



Contexte

Importance d'un suivi haute-fréquence pour les aquifère karstiques

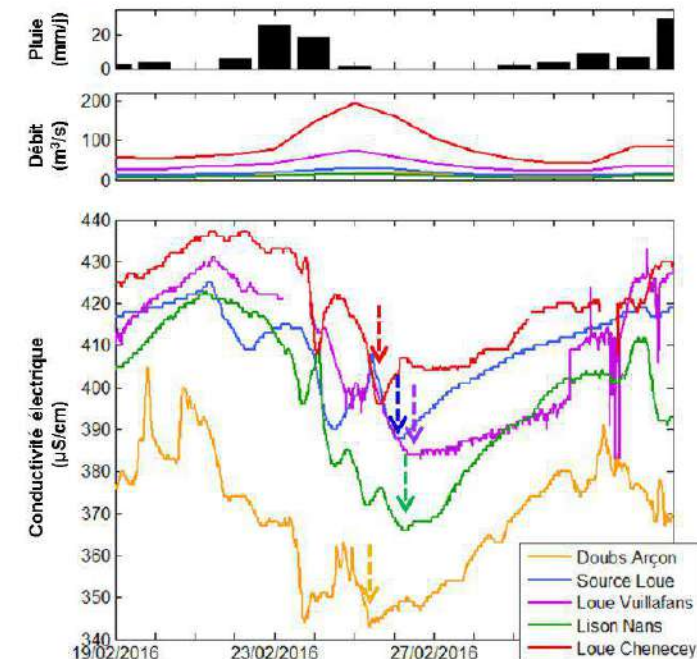
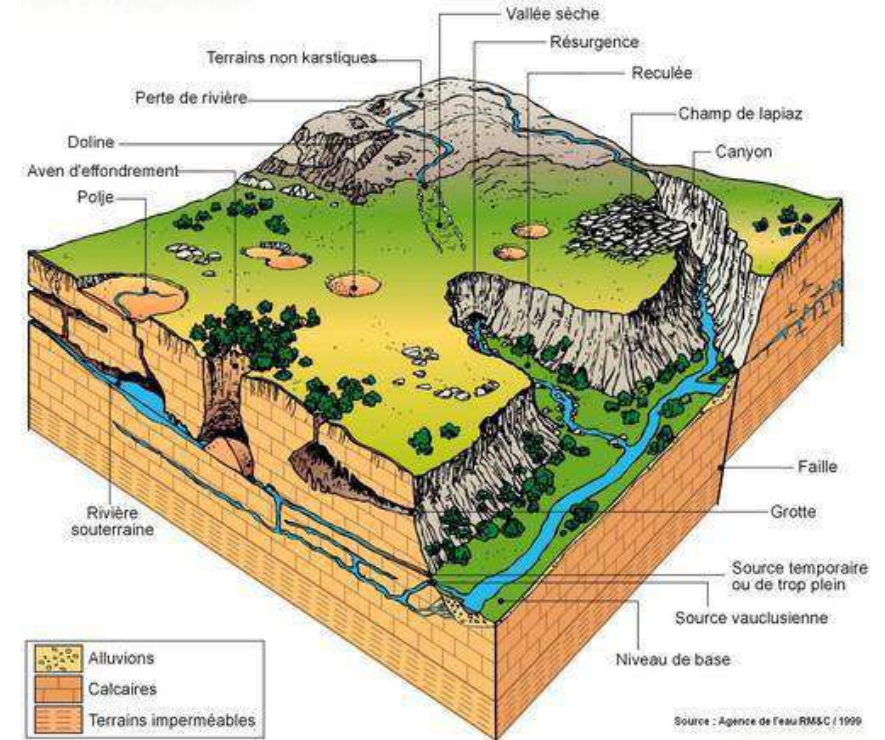
Aquifère karstique

- Complexe : double porosité, hétérogène, transferts rapides
- Vulnérable : processus de rétention et d'auto-épuration des polluants limités

Eaux de surface en milieu karstique

- Dynamique qualité et quantité des ESU principalement contrôlée par les ESO karstiques

→ Variation rapide des concentrations



Contexte

Importance d'un suivi haute-fréquence pour les aquifères karstiques

Aquifère karstique

- Complexe : do
- Vulnérable : pr
polluants limité

Eaux de surface

- Dynamique qualité et quantité des ESU principalement contrôlée par les ESO karstiques

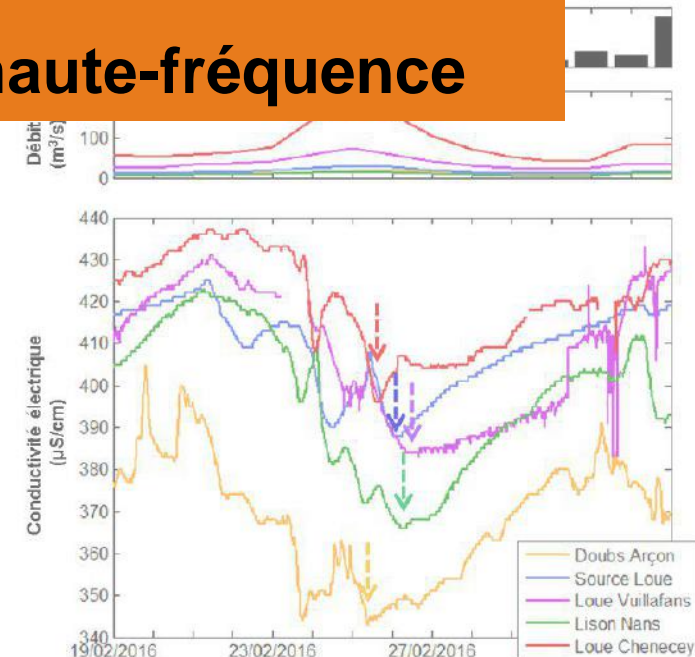
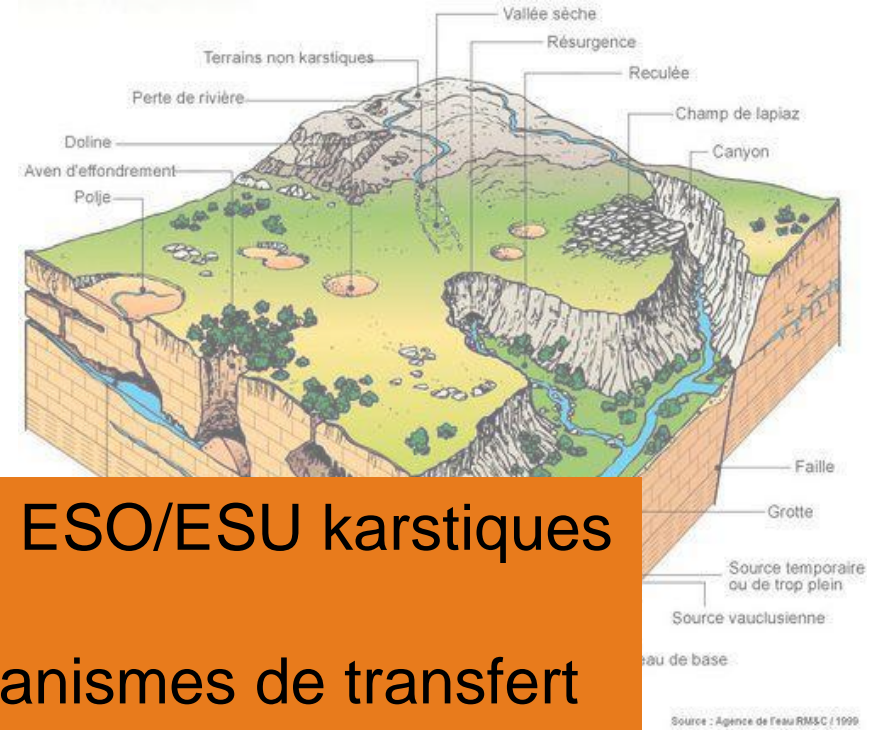
→ Variation rapide des concentrations

Caractérisation des dynamiques des ESO/ESU karstiques

=

Identification des processus et mécanismes de transfert

Nécessité de disposer d'un suivi haute-fréquence



Contexte

Importance d'un suivi haute-fréquence pour les aquifères karstiques

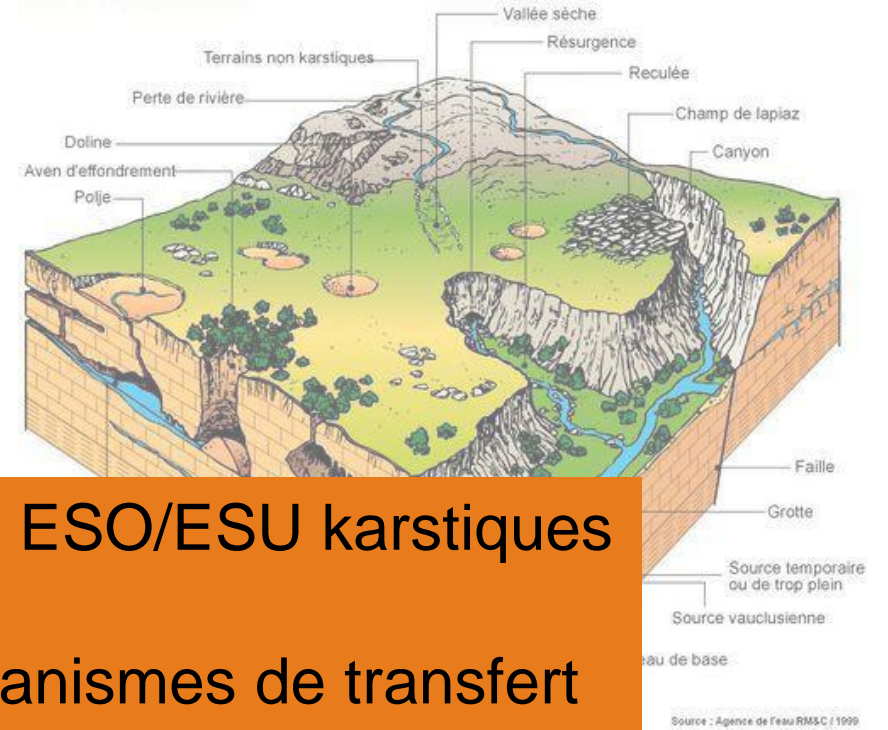
Aquifère karstique

- Complexe : do
- Vulnérable : pr
polluants limités

Eaux de surface

- Dynamique qu
contrôlée par l

→ Variation rapide des concentrations



Caractérisation des dynamiques des ESO/ESU karstiques

=

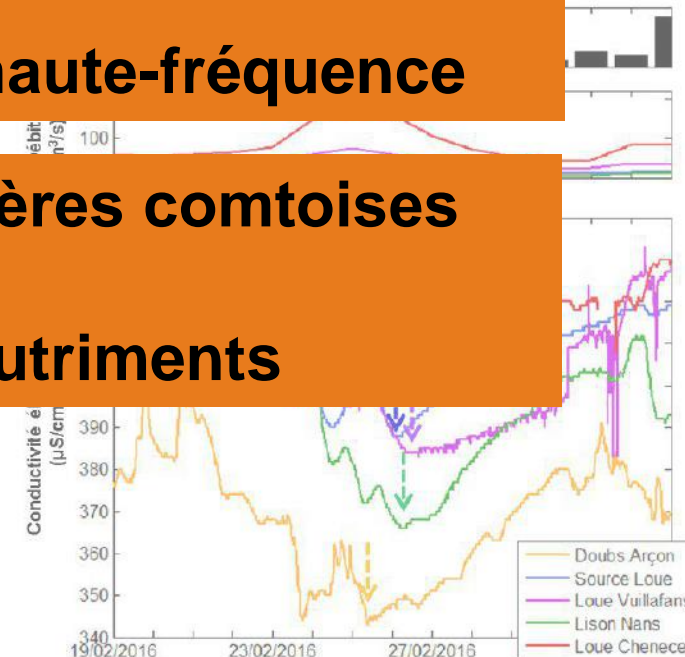
Identification des processus et mécanismes de transfert

Nécessité de disposer d'un suivi haute-fréquence

Contexte d'eutrophisation des rivières comtoises

=

Suivi haute-fréquence des nutriments



Suivi haute-fréquence des nutriments

Quelles solutions?

Analyses chimiques

- Analyses relativement couteuses
- Contraintes logistiques importantes (prélèvement, stockage, conservation, expédition, consommables...)
- Faible résolution d'échantillonnage (journalière à hebdomadaire)
- Haute résolution (horaire) sur de l'évènementiel (suivi d'un pic de crue par exemple)

Suivi haute-fréquence des nutriments

Quelles solutions?

Analyses chimiques

- Analyses relativement coûteuses
- Contraintes logistiques importantes (prélèvement, stockage, conservation, expédition, consommables...)
- Faible résolution d'échantillonnage (journalière à hebdomadaire)
- Haute résolution (horaire) sur de l'évènementiel (suivi d'un pic de crue par exemple)

Sonde électrochimique (électrodes sélectives d'ions)

- Haute-résolution (à partir de 5 minutes)
- Maintenance et entretien importants (notamment étalonnage régulier pour éviter les dérives)
- Fréquemment conçus pour un seul paramètre, multipliant ainsi les coûts et la maintenance

Suivi haute-fréquence des nutriments

Quelles solutions?

Analyses chimiques

- Analyses relativement coûteuses
- Contraintes logistiques importantes (prélèvement, stockage, conservation, expédition, consommables...)
- Faible résolution d'échantillonnage (journalière à hebdomadaire)
- Haute résolution (horaire) sur de l'évènementiel (suivi d'un pic de crue par exemple)

Sonde électrochimique (électrodes sélectives d'ions)

- Haute-résolution (à partir de 5 minutes)
- Maintenance et entretien importants (notamment étalonnage régulier pour éviter les dérives)
- Fréquemment conçus pour un seul paramètre, multipliant ainsi les coûts et la maintenance



Sonde optique

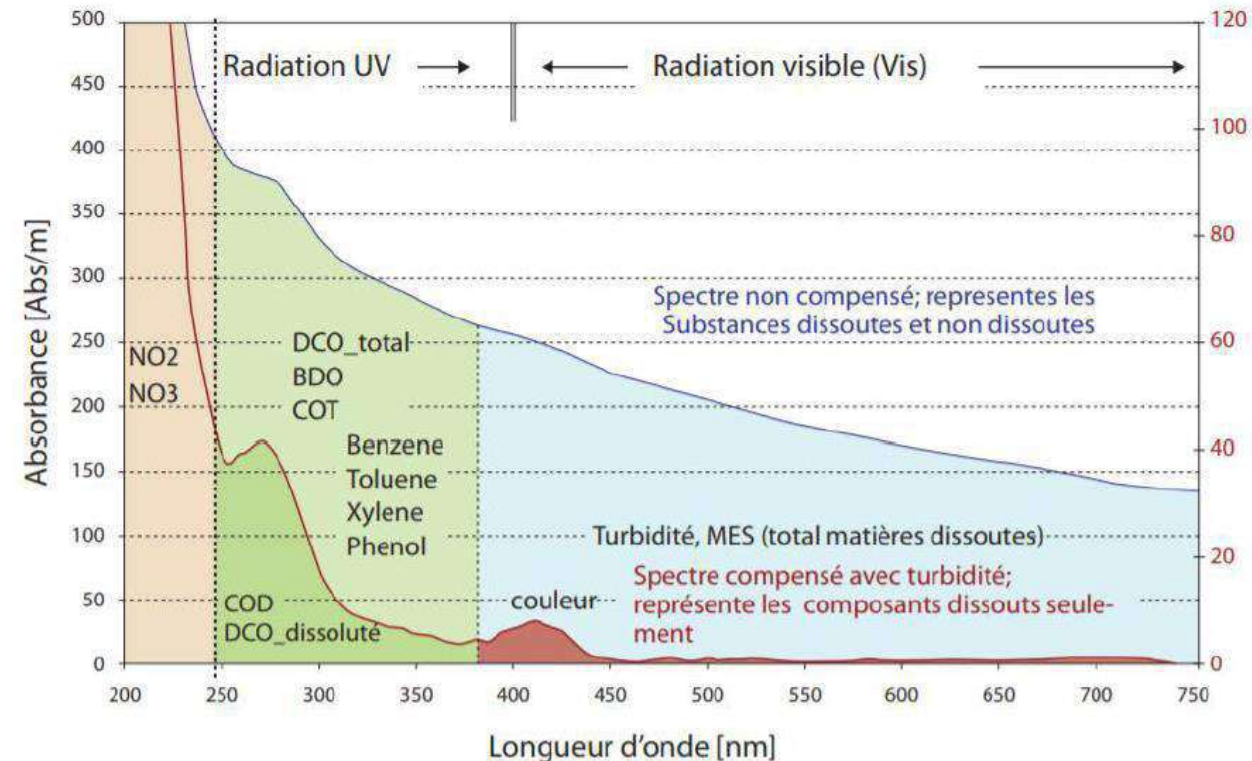
Sonde spectrométrique UV-VIS

Spectro::lyser™ S::CAN©

Principe de fonctionnement

- Spectre d'absorption entre 220 et 732,5 nm avec un intervalle de 2,5 nm soit un spectre composé de 206 variables
- Gammes de spectre spécifiques à certains paramètres chimiques (NO₃, COT, MES...)

→ Signature spectrale d'une mesure peut être convertie en concentration de nutriments et COT/MES



Sonde spectrométrique UV-VIS

Spectro::lyser™ S::CAN©

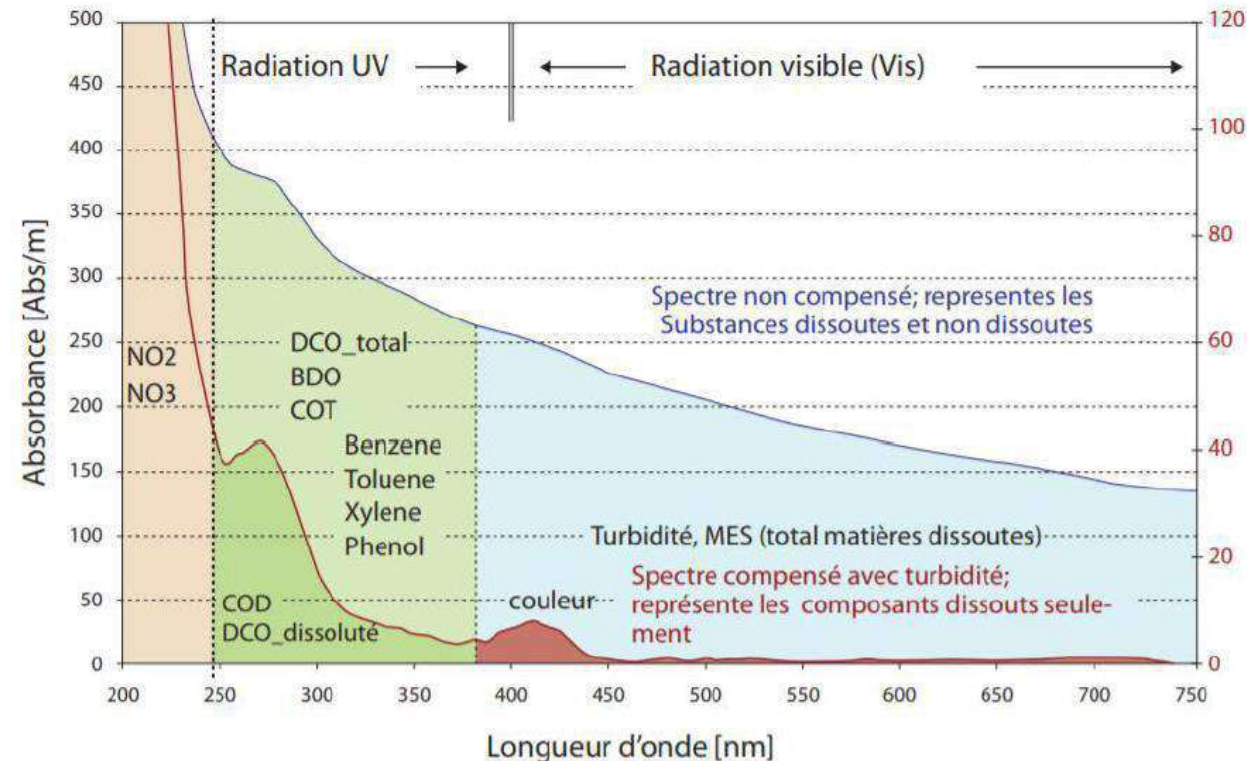
Principe de fonctionnement

- Spectre d'absorption entre 220 et 732,5 nm avec un intervalle de 2,5 nm soit un spectre composé de 206 variables
- Gammes de spectre spécifiques à certains paramètres chimiques (NO₃, COT, MES...)

→ Signature spectrale d'une mesure peut être convertie en concentration de nutriments et COT/MES

Intérêt

- Performances reconnues pour le suivi des nutriments (*Rieger et al, 2008 ; Bende-Michl et al, 2010 ; Huebsch et al, 2015 ; Tournebize et al, 2015*)
- Haute-fréquence adaptée à la réactivité des aquifères karstiques
- Entretien et maintenance limités (brosse d'auto-nettoyage et pas de calibration in-situ)
- Calibration usine globale et correction locale pour plusieurs paramètres (NO₃, COT, turbidité et demande chimique en oxygène (DCO))



Sonde spectrométrique UV-VIS

Spectro::lyser™ S::CAN©

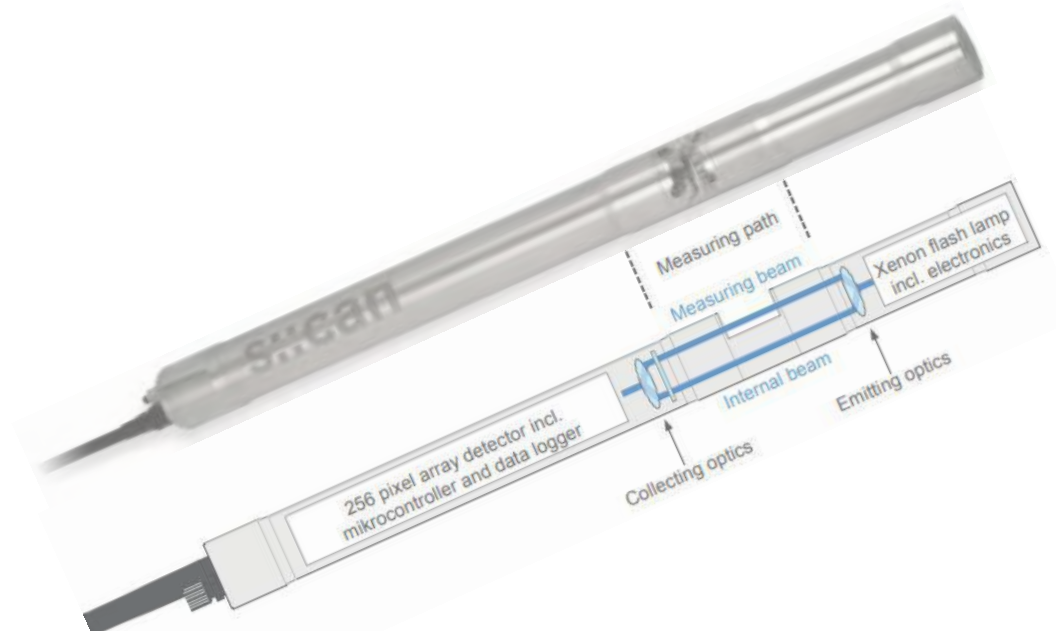
Principe de fonctionnement

- Spectre d'absorption entre 220 et 732,5 nm avec un intervalle de 2,5 nm soit un spectre composé de 206 variables
- Gammes de spectre spécifiques à certains paramètres chimiques (NO₃, COT, MES...)

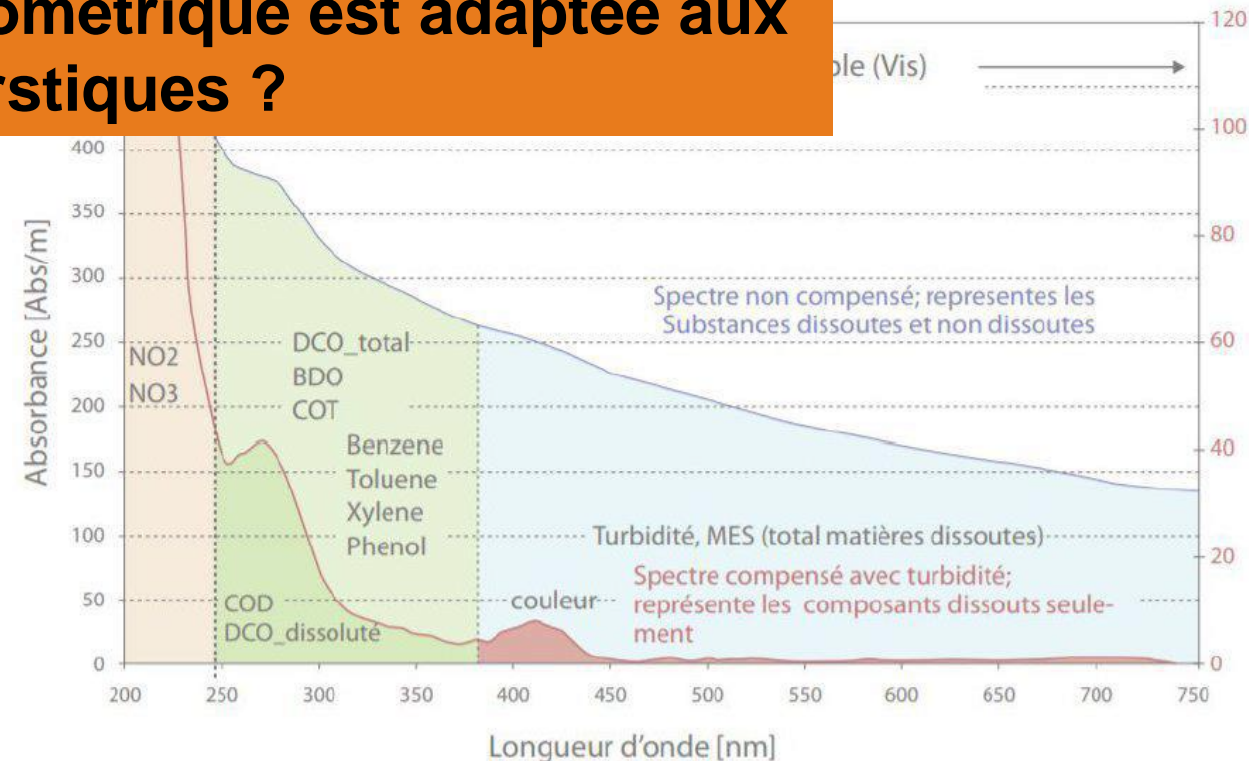
→ Signature spectrale d'une mesure peut être convertie en concentration de nutriments et COT/MES

Intérêt

- Performances reconnues (Bende-Michl et al, 2008 ; Bende-Michl et al, 2010 ; Huebsch et al, 2015 ; Tournebize et al, 2015)
- Haute-fréquence adaptée à la réactivité des aquifères karstiques
- Entretien et maintenance limités (brosse d'auto-nettoyage et pas de calibration in-situ)
- Calibration usine globale et correction locale pour plusieurs paramètres (NO₃, COT, turbidité et demande chimique en oxygène (DCO))



Est-ce que la sonde spectrométrique est adaptée aux milieux karstiques ?

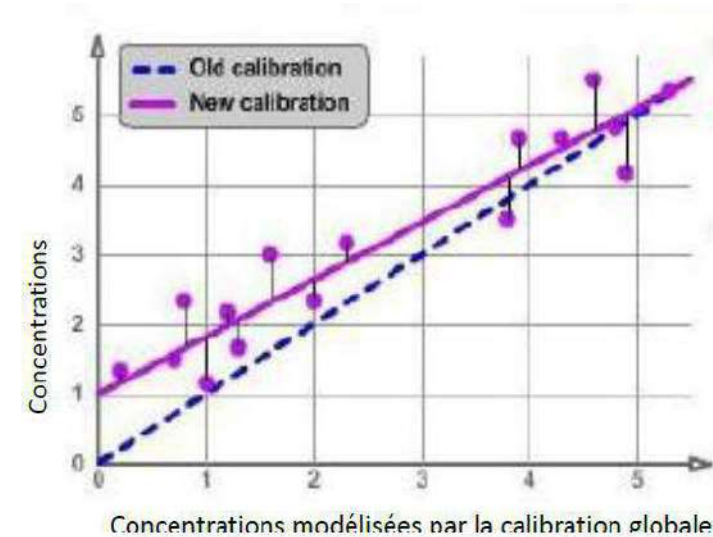


Sonde spectrométrique UV-VIS en milieu karstique ?

Spectro::lyser™ S::CAN©

Etat de l'art

- Calibration d'usine globale et locale (ajustement linéaire à partir d'analyses in-situ) basée sur un jeu de données d'analyses chimiques d'eau de surface **non spécifique au milieu karstique**
- Plusieurs études ont développé des méthodes de calibration spécifiques et locales du spectromètre S::CAN© dans différents environnements (*Rieger et al., 2004; Etheridge et al., 2014; Grayson et Holden, 2016; Van den Broeke, 2007*), **mais peu d'entre elles ont été réalisées en milieu karstique** (*Huebsch et al., 2015; Perfler et al., 2002*).
- Turbidité dans les eaux karstiques peut être élevée et ce paramètre est connu pour **perturber l'acquisition des sondes optiques**

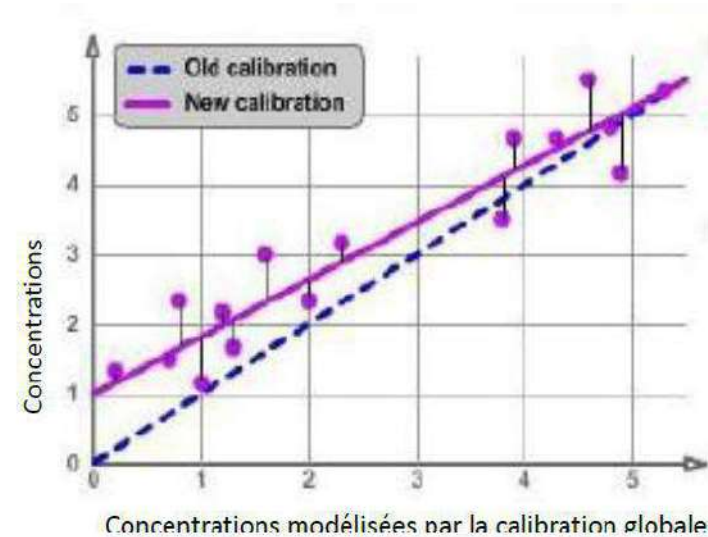


Sonde spectrométrique UV-VIS en milieu karstique ?

Spectro::lyser™ S::CAN©

Etat de l'art

- Calibration d'usine globale et locale (ajustement linéaire à partir d'analyses in-situ) basée sur un jeu de données d'analyses chimiques d'eau de surface **non spécifique au milieu karstique**
- Plusieurs études ont développé des méthodes de calibration spécifiques et locales du spectromètre S::CAN© dans différents environnements (*Rieger et al., 2004; Etheridge et al., 2014; Grayson et Holden, 2016; Van den Broeke, 2007*), **mais peu d'entre elles ont été réalisées en milieu karstique** (*Huebsch et al., 2015; Perfler et al., 2002*).
- Turbidité dans les eaux karstiques peut être élevée et ce paramètre est connu pour **perturber l'acquisition des sondes optiques**



Les performances et la pertinence du modèle globale usine et de la correction locale en domaine karstique sont à évaluer

Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

Objectifs

- **Tester la validité et la fiabilité du spectromètre UV-Visible en milieu karstique (turbidité), en contexte d'eau ESO (Source de la Loue) et ESU (la Loue à Chenecey-Buillon)**
 - Pour les paramètres proposés par défaut par le fabricant (NO₃, COT, Turbidité et DCO)
 - Pour des paramètres non proposés (NTK, P_{tot}, MES, PO₄)
 - Pertinence de la calibration globale usine et de la correction locale
 - Pertinence de mise en œuvre de méthodes de prétraitement du spectre

Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

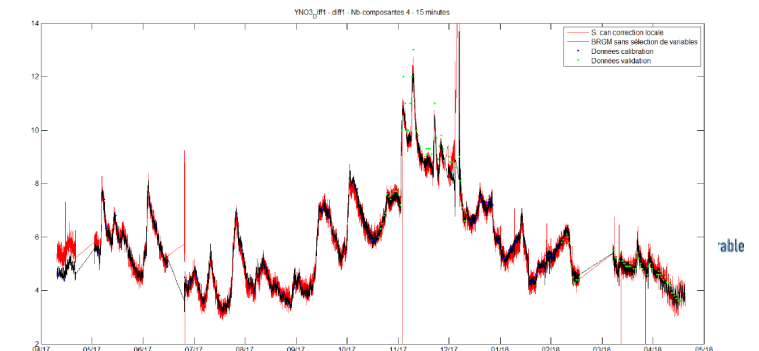
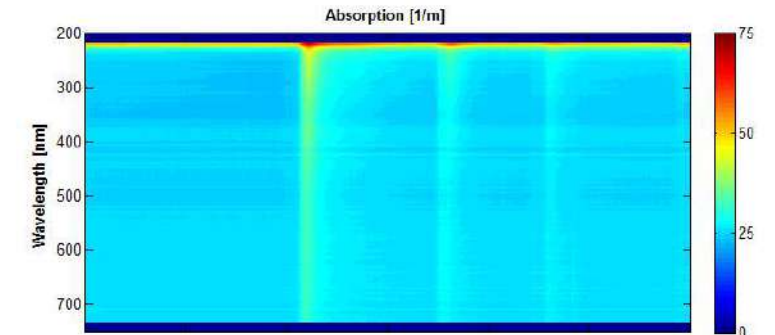
Objectifs

- **Tester la validité et la fiabilité du spectromètre UV-Visible en milieu karstique (turbidité), en contexte d'eau ESO (Source de la Loue) et ESU (la Loue à Chenecey-Buillon)**

- Pour les paramètres proposés par défaut par le fabricant (NO₃, COT, Turbidité et DCO)
- Pour des paramètres non proposés (NTK, P_{tot}, MES, PO₄)
- Pertinence de la calibration globale usine et de la correction locale
- Pertinence de mise en œuvre de méthodes de prétraitement du spectre

→ **Développement d'un modèle de calibration locale, appliqué directement aux spectres bruts mesurés par la sonde**

- A partir d'analyses chimiques in-situ
- Méthode de régression des moindres carrés partiels (PLSR).
- Prétraitement des données de spectre pour compenser l'influence de la turbidité
- Méthodes de pré-sélection de variables du spectre (diminuer le bruit)



Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

Acquisition des données

Chimie : données de références

- Préleveur automatique avec une fréquence 1 à 4 jours: NO₃, N Kjeldahl, PO₄, Phosphore total et COT
- Prélèvement manuel hebdomadaire: MES
 - Environ 300 analyses par paramètre pour la source de la Loue
 - Environ 200 analyses par paramètre pour Chenecey-Buillon



Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

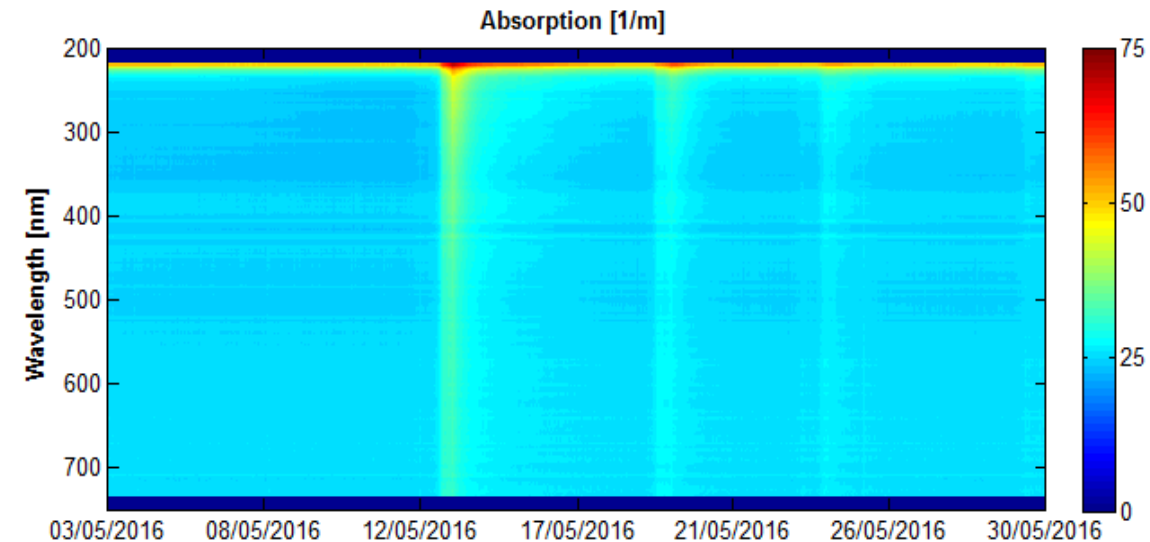
Acquisition des données

Chimie : données de références

- Préleveur automatique avec une fréquence 1 à 4 jours: NO₃, N Kjeldahl, PO₄, Phosphore total et COT
- Prélèvement manuel hebdomadaire: MES
 - Environ 300 analyses par paramètre pour la source de la Loue
 - Environ 200 analyses par paramètre pour Chenecey-Buillon

Sonde S:CAN

- Mesure toutes les 15 minutes
- Fenêtre optique du spectromètre localisé directement à côté de la crépine de perlint du préleveur automatique
 - Environ 33 000 spectres pour la source de la Loue
 - Environ 37 000 spectres pour Chenecey-Buillon



Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

Méthodes

- **Test du spectromètre sur 2 sites ESO / ESU**
 - Source de la Loue: du 3 mai 2016 au 10 avril 2017
 - Chenecey-Buillon: depuis le 10 avril 2017
- **Calibration prédictive :**
 - Intervalles de calibration et de validation indépendants
 - **Objectif: Evaluer les performances et le potentiel prédictif d'un modèle**
- **Calibration opérationnelle :**
 - Intervalles de calibration et de validation non indépendants (plusieurs scénarios de suivi testés)
 - **Objectif: Simuler une surveillance opérationnelle et optimiser la fréquence d'analyse chimique pour la calibration**

Test d'une sonde spectrométrique

Suivi haute-fréquence des nutriments en milieu karstique

Méthodes

- Test du spectromètre sur 2 sites ESO / ESU
 - Source de la Loue: du 3 mai 2016 au 10 avril 2017
 - C...

Modèle : 113 valeurs pour cal. et 114 valeurs pour val.		Composante	R ² Cal	R ² Val	RMSE Cal	RMSE Val	Nash Cal	Nash Val	Nash-log Cal	Nash-log Val	KGE Cal	KGE Val	Moy. Cal	Moy. Val
● Sans sélection de variables	<u>Spectre brut*</u>	3	0.99	0.99	0.13	0.22	0.99	0.98	0.99	0.98	0.99	0.95	0.99	0.98
	Spectre compensé MSC	5	0.88	0.89	0.49	0.82	0.88	0.78	0.83	0.71	0.91	0.72	0.88	0.78
	<u>Spectre compensé Dérivé 1*</u>	1	0.99	0.99	0.13	0.21	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.95	0.99	0.98
● Sélection de variables BI-PLS	Spectre brut*	6	1	0.99	0.09	0.23	1	0.98	0.99	0.98	1	0.97	1.00	0.98
	Spectre compensé MSC	3	0.58	0.95	0.92	0.97	0.58	0.7	0.44	0.56	0.67	0.53	0.57	0.68
	Spectre compensé Dérivé 1	4	1	0.99	0.09	0.23	1	0.98	0.99	0.98	1	0.97	1.00	0.98
Sélection de variables GA-PLS	Spectre brut	3	0.99	0.99	0.11	0.22	0.99	0.98	0.99	0.98	1	0.96	0.99	0.98
	Spectre compensé Dérivé 1	1	1	0.98	0.1	0.24	1	0.98	0.99	0.98	1	0.96	1.00	0.98
● Modèle scan	<u>Correction locale*</u>		0.97	0.97	0.23	0.34	0.97	0.96	0.96	0.96	0.98	0.95	0.97	0.96
	Modèle global		0.97	0.97	0.51	0.62	0.86	0.87	0.8	0.81	0.76	0.79	0.99	0.98

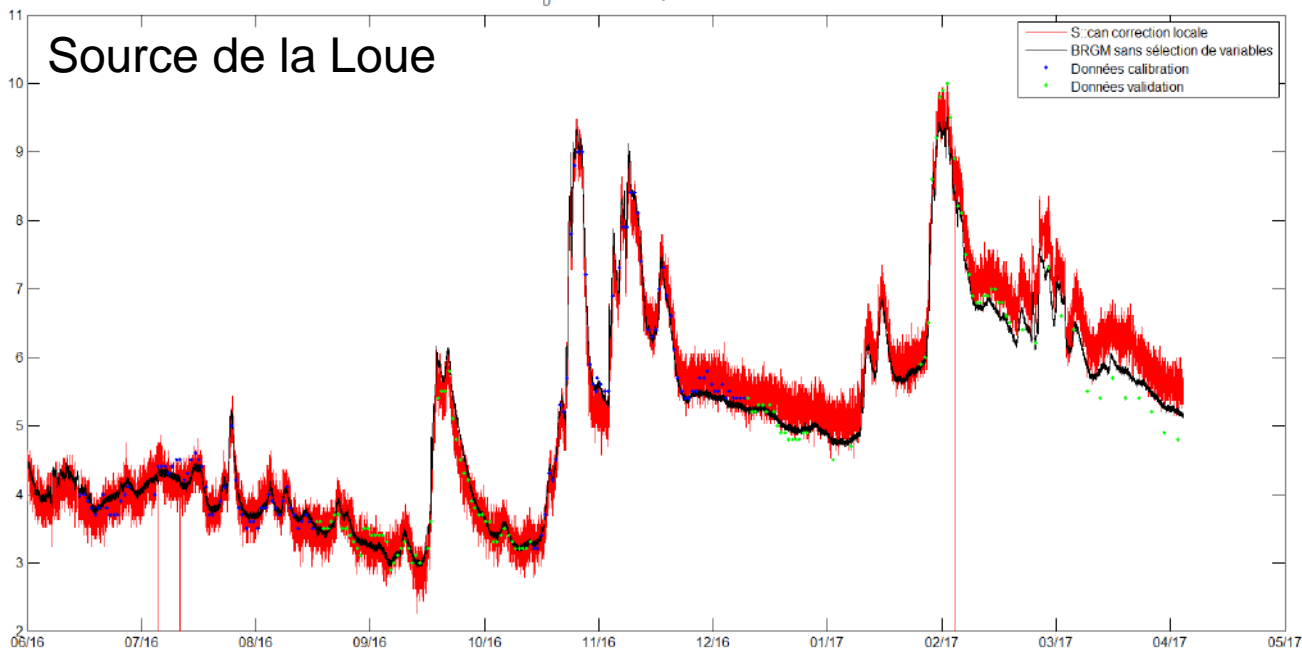
Test d'une sonde spectrométrique

Calibration prédictive: Evaluer les performances et le potentiel prédictif d'un modèle

Résultats NO3

YNO3_diff1 - diff1 - Nb-composantes 1 - 15 minutes

Source de la Loue

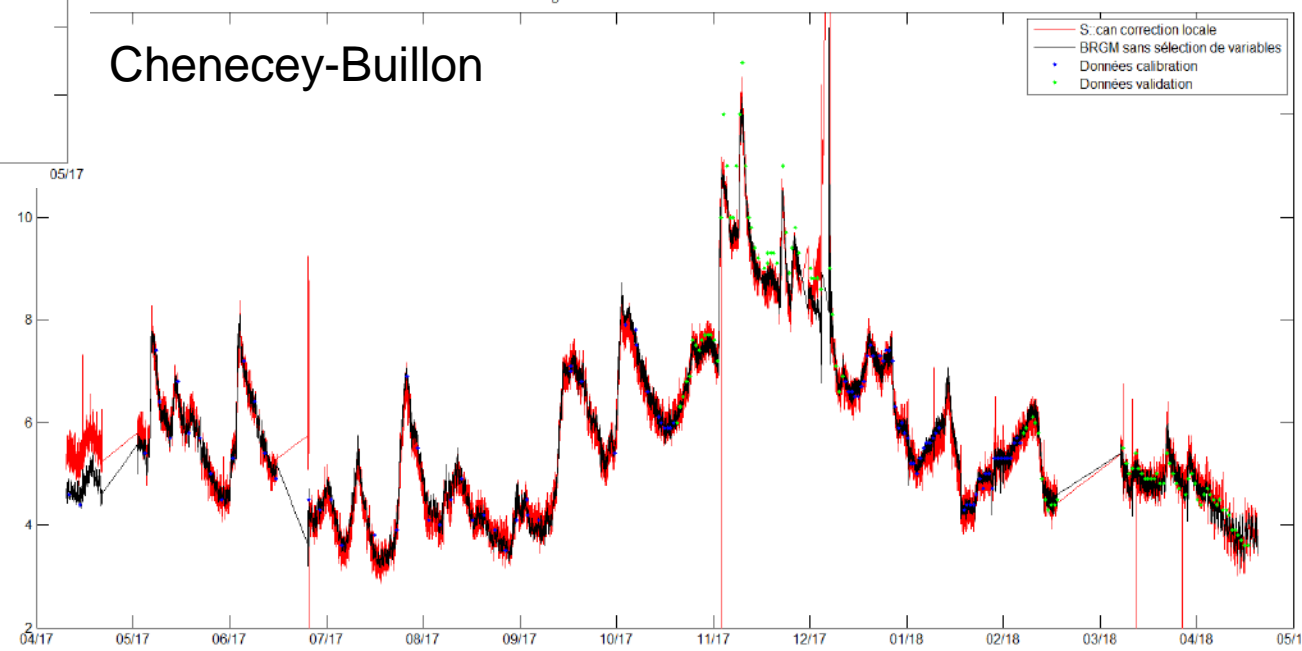


Opérationnalité	
- : non opérationnel	
+ : concentrations moyennes	
++ : et variations de base	
+++ : et amplitudes des pics	
Suivi Infra-journalier à journalier	Suivi Hebdomadaire à mensuel
ESO : +++	ESU : +++
ESU : +++	ESU : +++

Le spectromètre peut remplacer un préleveur automatique pour le suivi des NO3 à partir d'un pas de temps journalier à infra-journalier.

YNO3_diff1 - diff1 - Nb-composantes 4 - 15 minutes

Chenecey-Buillon



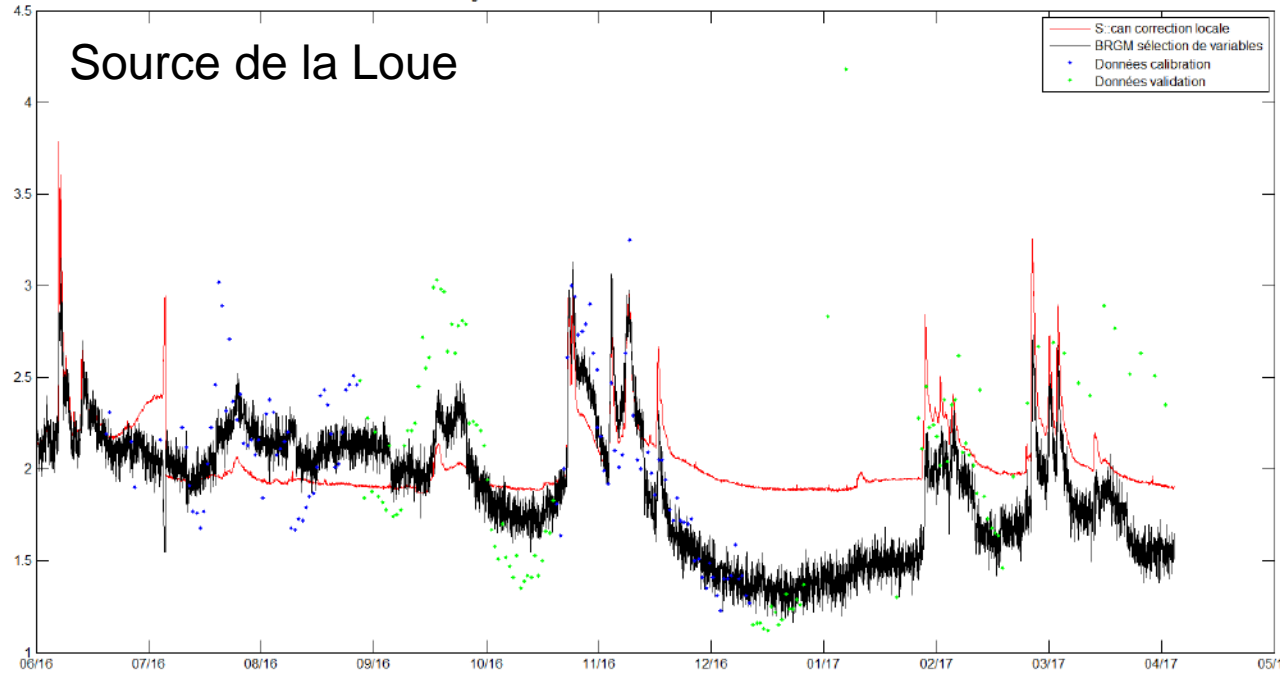
Test d'une sonde spectrométrique

Calibration prédictive: Evaluer les performances et le potentiel prédictif d'un modèle

Résultats COT

YCOT₀diff1 - diff1 - Nb-composantes-sélection-variables 3 - moyenne horaire

Source de la Loue



Sorties bruitées reproduisant convenablement le signal moyen ainsi que les variations de base

Variations de moyennes et de fortes amplitudes

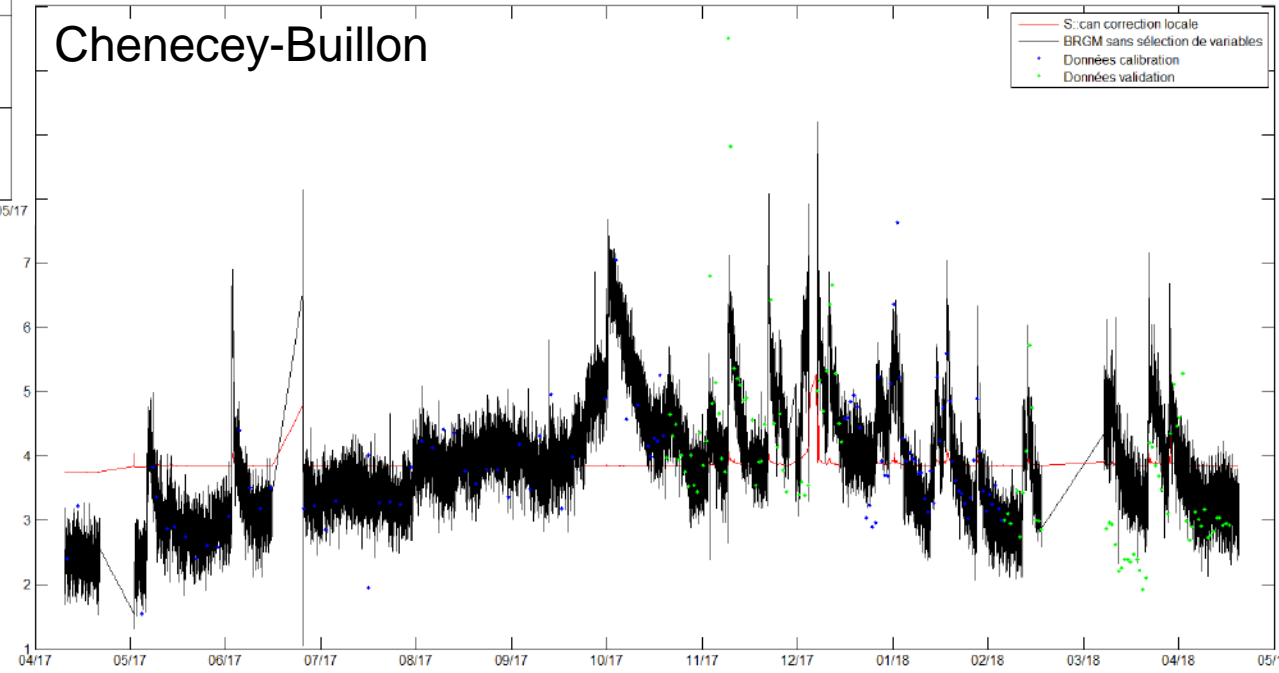
- partiellement simulées et sous-estimées en ESO
- généralement convenablement simulées en ESU

Le modèle s::can corrigé localement n'est pas pertinent sur les ESO/ESU testées.

Opérationnalité	
- : non opérationnel	
+ : concentrations moyennes	
++ : et variations de base	
+++ : et amplitudes des pics	
Suivi	Suivi
Infra-journalier à journalier	Hebdomadaire à mensuel
ESO : +	ESO : ++
ESU : ++	ESU : +++

YCOT - raw - Nb-composantes 6 - 15 minutes

Chenecey-Buillon



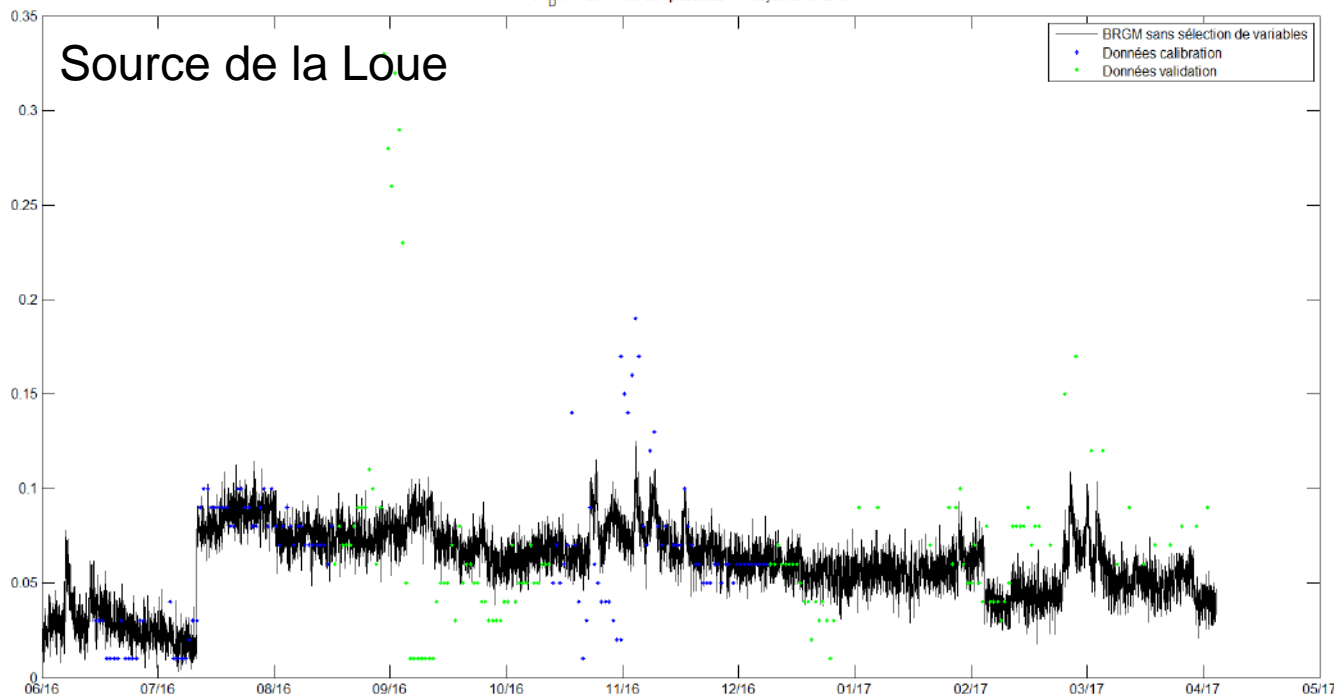
Test d'une sonde spectrométrique

Calibration prédictive: Evaluer les performances et le potentiel prédictif d'un modèle

Résultats PO4

YPO4_{diff1} - diff1 - Nb-composantes 4 - moyenne horaire

Source de la Loue



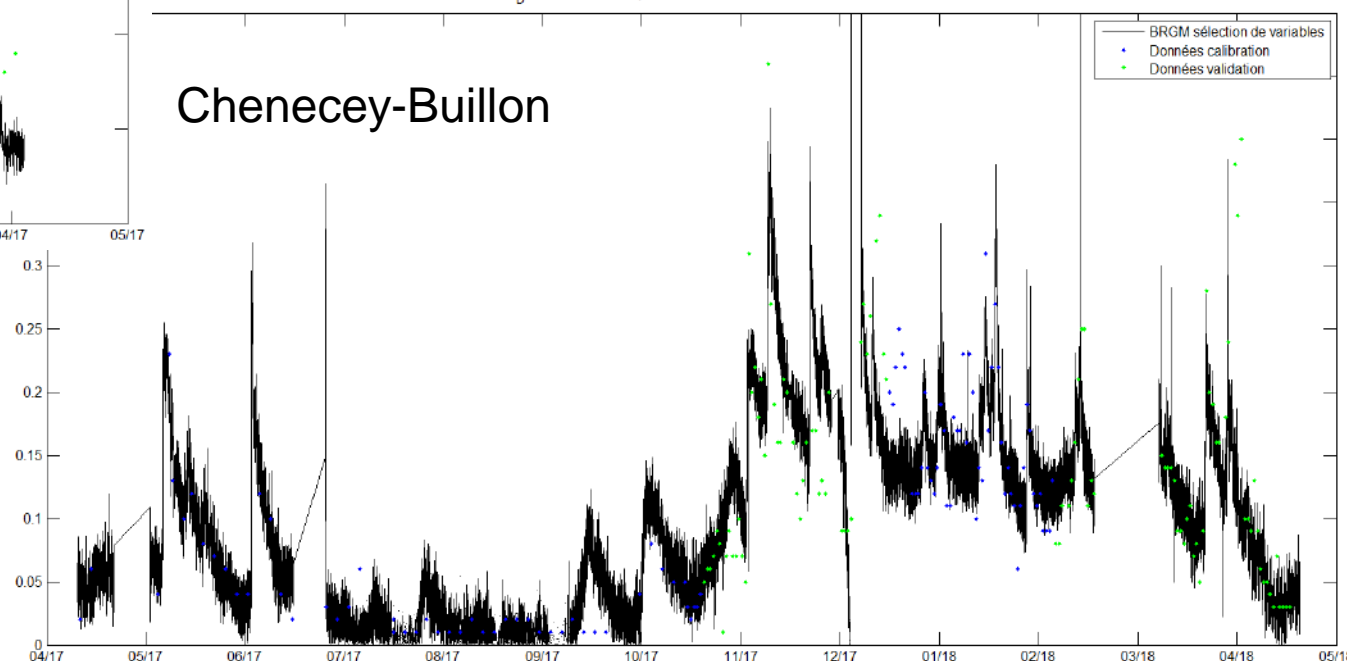
Mauvaises performances pour un suivi opérationnel du PO4 en ESO (lié aux trop faibles concentrations sur le cas d'étude) mais est pertinente en ESU pour un suivi hebdomadaire à mensuel.

Une utilisation à une fréquence journalière est possible avec précaution en ESU pour le suivi des concentrations moyennes et des variations de base.

Opérationnalité	
- : non opérationnel	
+ : concentrations moyennes	
++ : et variations de base	
+++ : et amplitudes des pics	
Suivi Infra-journalier à journalier	Suivi Hebdomadaire à mensuel
ESO : -	ESO : +
ESU : ++	ESU : +++

YPO4_{diff1} - diff1 - Nb-composantes-sélection-variables 4 - 15 minutes

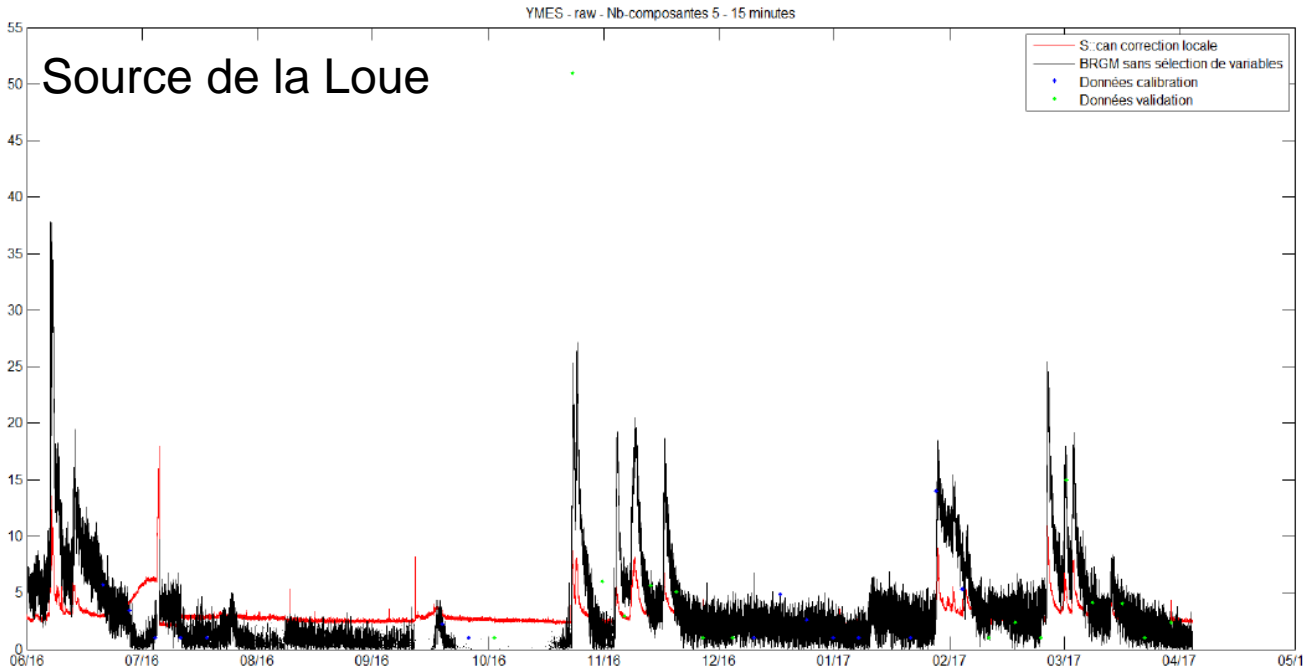
Chenecey-Buillon



Test d'une sonde spectrométrique

Calibration prédictive: Evaluer les performances et le potentiel prédictif d'un modèle

Résultats MES

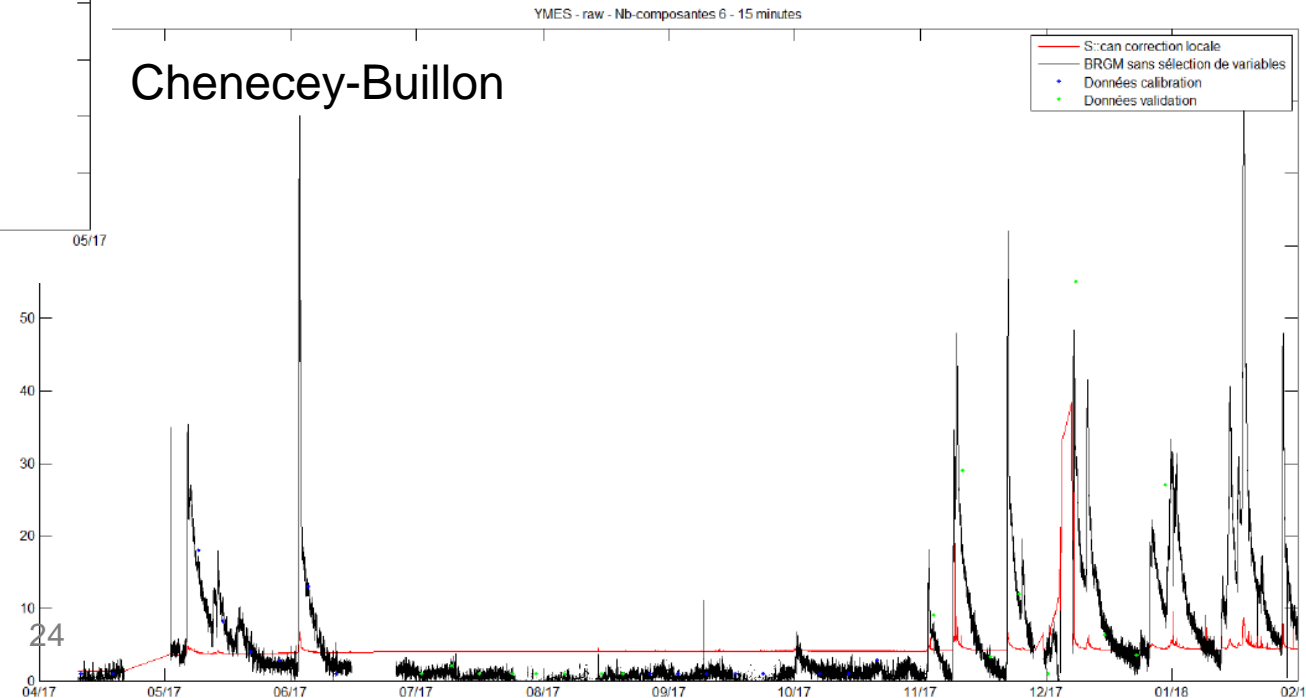


Le spectromètre est pertinent pour un suivi opérationnel des MES à partir d'un pas de temps journalier en ESU.

En ESO, les performances à cette fréquence devraient être réévaluées à la lumière de nouvelles données de calibration présentant plus de fortes valeurs.

A l'heure actuelle, la sonde s::can peut être utilisée pour le suivi des concentrations moyennes et des variations de base en ESO à cette fréquence.

Opérationnalité	
- : non opérationnel	
+ : concentrations moyennes	
++ : et variations de base	
+++ : et amplitudes des pics	
Suivi	Suivi
Infra-journalier à journalier	Hebdomadaire à mensuel
ESO : ++	ESO : ++
ESU : +++	ESU : +++



Test d'une sonde spectrométrique

Calibration opérationnel: optimiser la fréquence d'analyse chimique pour la calibration

Scénario

Calibration les six premiers mois à un pas de temps journalier puis les 6 mois suivants :

- Contrôle hebdomadaire (Scénario 1)
- Contrôle bimensuel (Scénario 2)
- Contrôle mensuel (Scénario 3)

Contrôle à pas de temps régulier sur une année:

- Contrôle hebdomadaire (Scénario 4)
- Contrôle bimensuel (Scénario 5)
- Contrôle mensuel (Scénario 6)

Influence du nombre et de la répartition des données de calibration sur les performances des modèles de calibration de la sonde spectrométrique

→ Aide à la décision pour nouvelle installation de sonde

s::can

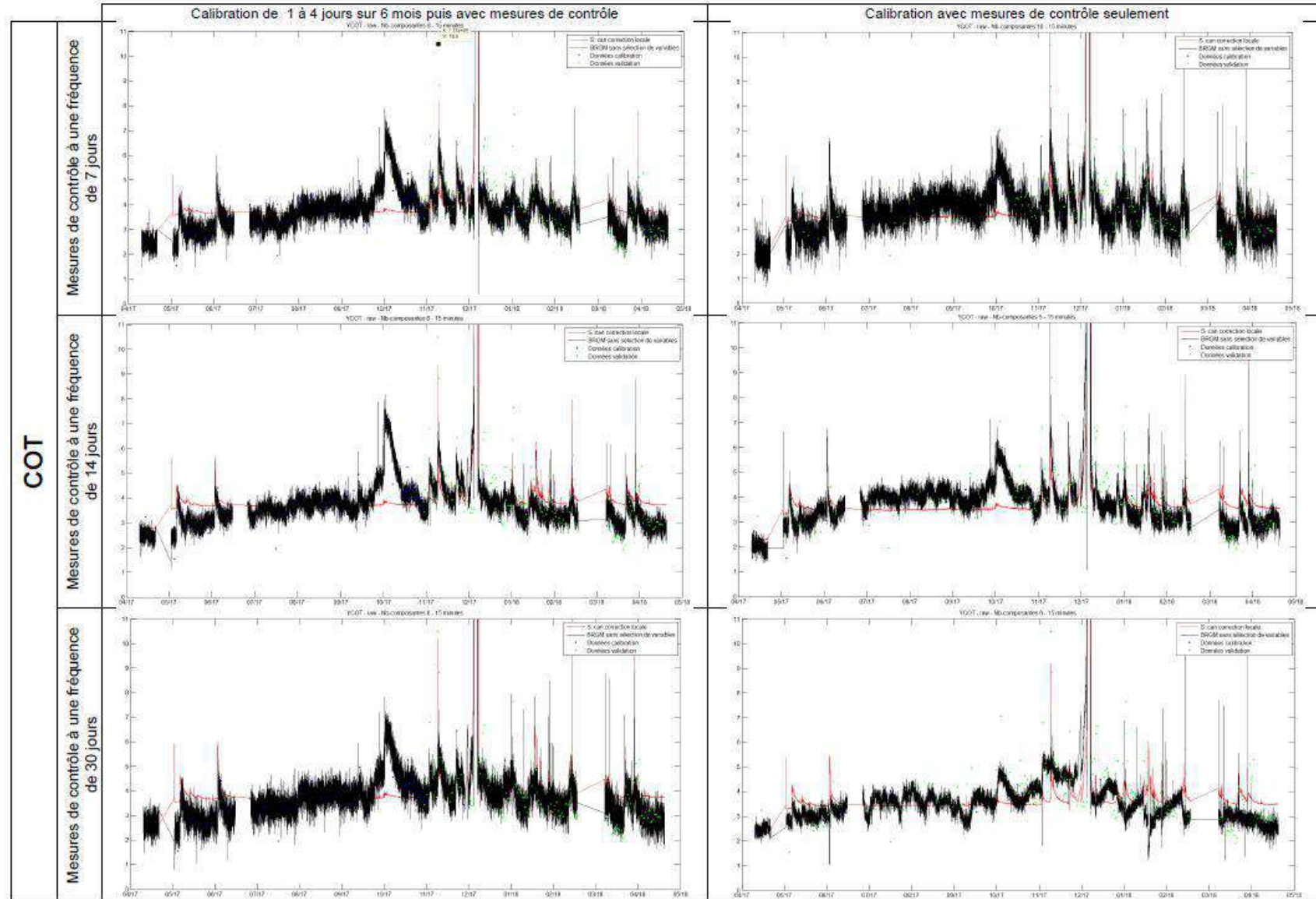


Illustration 109 – Calibration opérationnelle : résultats graphiques pour le CO2

Conclusion

Test d'une sonde spectrométrique

- **Bonnes performances de la sonde spectrométrique** pour le suivi des nutriments
 - Bonnes à très bonnes performances pour NO₃ et MES en ESO/ESU
 - Bonnes performances pour PO₄, P_{tot}, COT en ESU
 - Performances moyennes pour P_{tot} et COT en ESO
 - Mauvaises performances pour azote kjeldahl
- **Développement de calibration pour des paramètres non proposés par le fabricant (PO₄, PT, MES)**
- **Sonde spectrométrique présente un réel avantage pour l'acquisition de données hautes fréquences pour les études scientifiques**

Paramètre	Capacité prédictive	Opérationnalité		Fréquence analytique pour la calibration en ESU
		Suivi Infra-journalier à journalier	Suivi Hebdomadaire à mensuel	
NO ₃	ESO : Très bonne ESU : Très bonne	ESO : +++ ESU : +++	ESO : +++ ESU : +++	Mesures de contrôle hebdomadaires à mensuelles
Azote Kjeldahl	ESO : Nulle ESU : Limité	ESO : - ESU : -	ESO : - ESU : -	Non évaluée
PO ₄	ESO : nulle ESU : Bonne	ESO : - ESU : ++	ESO : + ESU : +++	Mesures de contrôle hebdomadaires à mensuelles
Phosphore total	ESO : Moyenne ESU : Bonne	ESO : + ESU : ++	ESO : ++ ESU : +++	Non évalué mais très probablement similaire à PO ₄
COT	ESO : Moyenne ESU : Bonne	ESO : + ESU : ++	ESO : ++ ESU : +++	Mesures de contrôle de 1 à 4 jours sur une période recoupant les basses eaux et hautes eaux puis hebdomadaires à mensuelles
MES	ESO : Bonne ESU : Très bonne	ESO : ++ ESU : +++	ESO : ++ ESU : +++	Non évaluée



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Document public

Projet QUARSTIC : QUALité des eaux et Réseau de Surveillance des rivières Comtoises Rapport final BRGM/RP-68315-FR Octobre 2018



Captages prioritaires du bassin RM :

Estimation du temps de renouvellement moyen de la ressource par datation des CFC et SF6



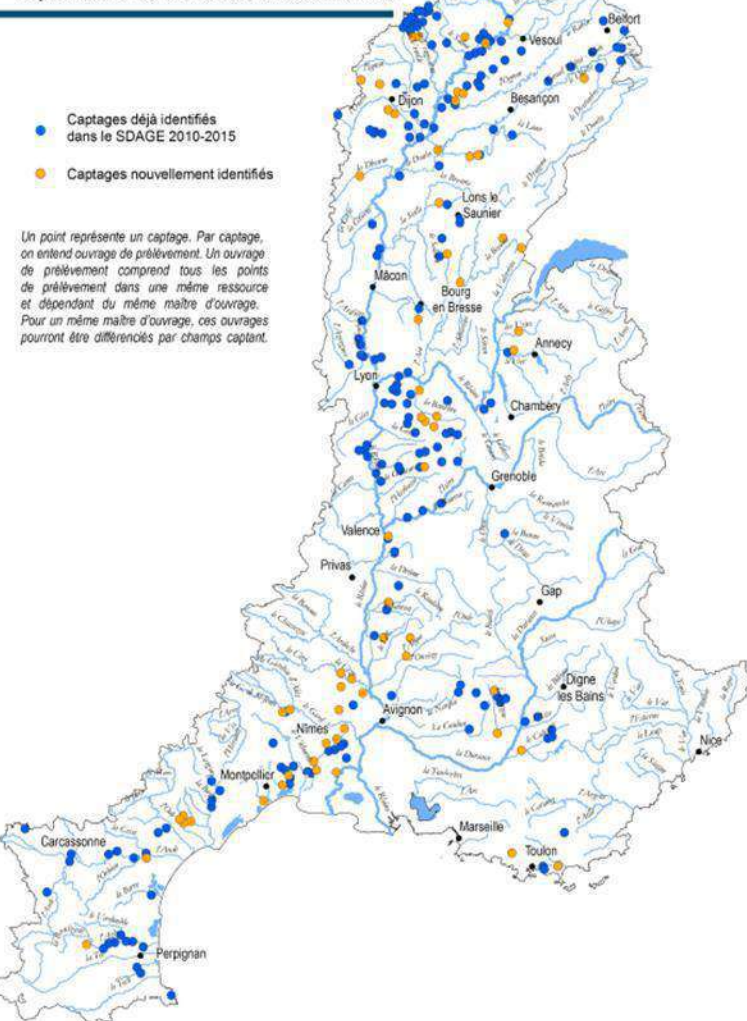
Objectifs de l'étude

Estimer le temps moyen de renouvellement de la ressource alimentant les captages prioritaires du bassin RM

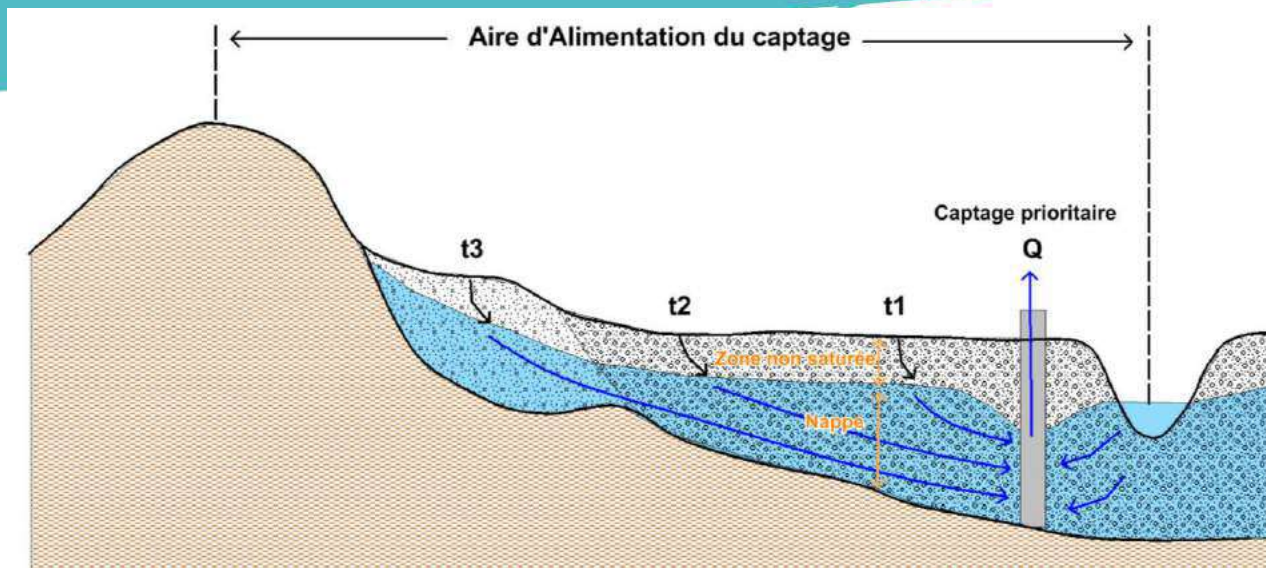
Cette donnée permet :

- de mieux appréhender le fonctionnement global de la nappe
- d'estimer le délai à envisager pour obtenir **la totalité** des bénéfices du programme d'actions engagé pour restaurer la qualité des eaux

CARTE 5E-C
Captages prioritaires pour la mise en place de programme d'actions vis à vis des pollutions diffuses nitrates et pesticides à l'échelle de leurs aires d'alimentation



Définition de l'âge moyen d'une nappe



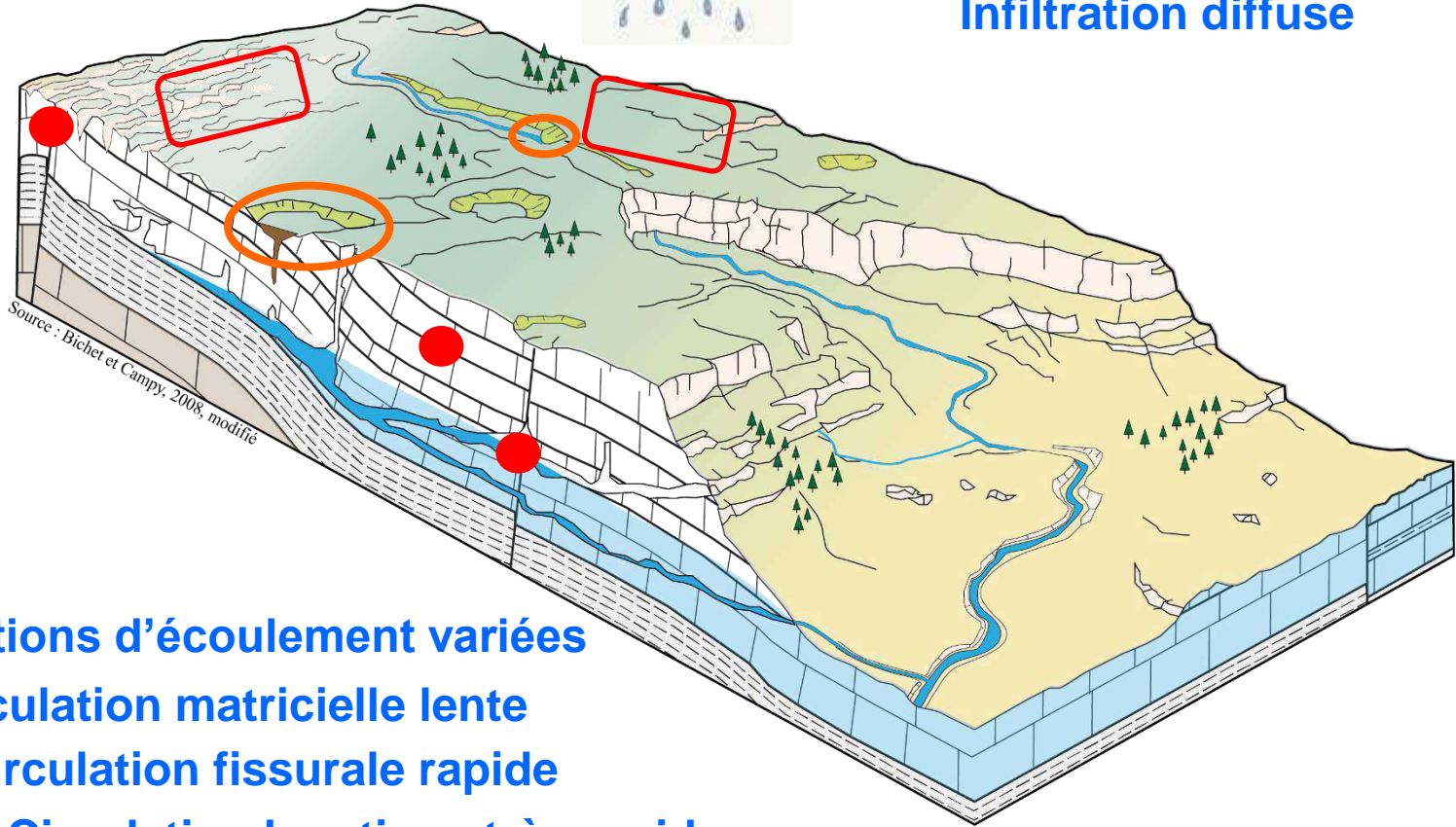
Age moyen =
moyenne (âge t1,
âge t2, âge t3 ...)

L'âge de l'eau souterraine (ou son temps de résidence) correspond à la durée que l'eau a mis de son point d'infiltration jusqu'au point où elle est prélevée

Un captage est alimenté par une **multitude de filets d'eau** qui ont des âges **différents**. L'eau captée représente donc l'intégration de tous les écoulements souterrains qui alimentent le captage : **les datations ne donnent pas un âge unique mais une moyenne pondérée**, c'est pourquoi on parle d'âge moyen (ou apparent)



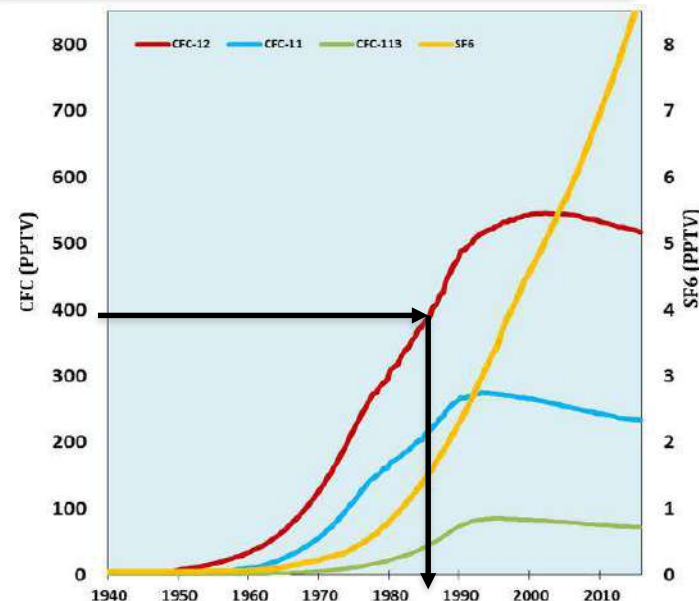
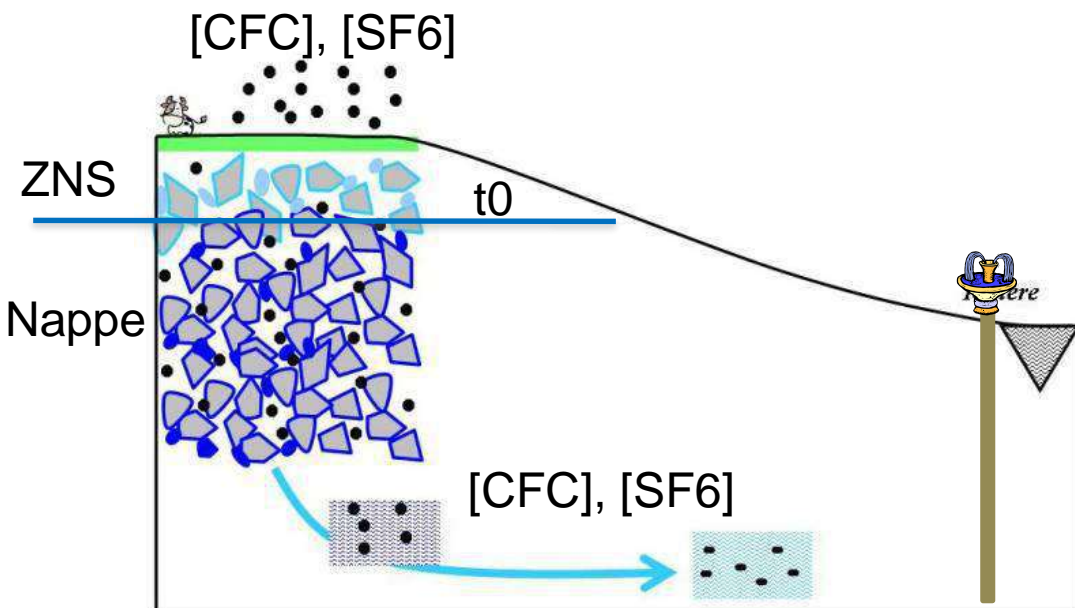
- 1) Conditions de recharge variée
- Infiltration rapide
- Infiltration diffuse



- 2) Conditions d'écoulement variées
- Circulation matricielle lente
- Circulation fissurale rapide
- Circulation karstique très rapide

Principe de la méthode de datation

La méthode est basée sur la détermination des concentrations en CFC (fréons) et SF6 : gaz propulseurs / réfrigérants / isolants.



Les gaz, une fois dissous dans la nappe, s'isolent de l'atmosphère et conservent leur signature atmosphérique.

La datation se base sur la comparaison des [gaz dissous] dans les eaux et les concentrations connues dans l'atmosphère

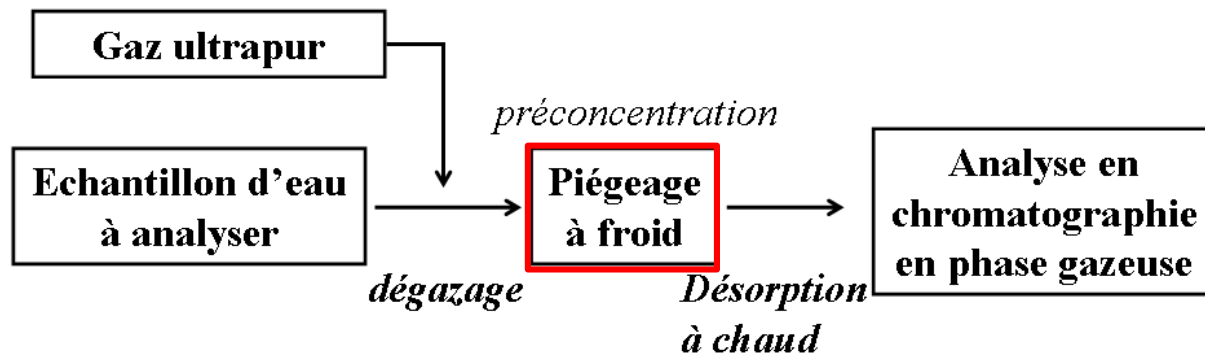
Les concentrations mesurées dans l'eau sont très faibles : Attention aux contaminations lors du prélèvement



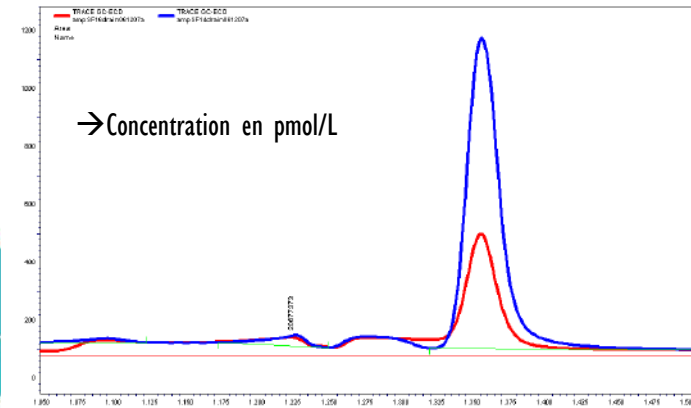
Unité pptv:
Partie par trillion

pmol/L (CFCs) 10^{-12}

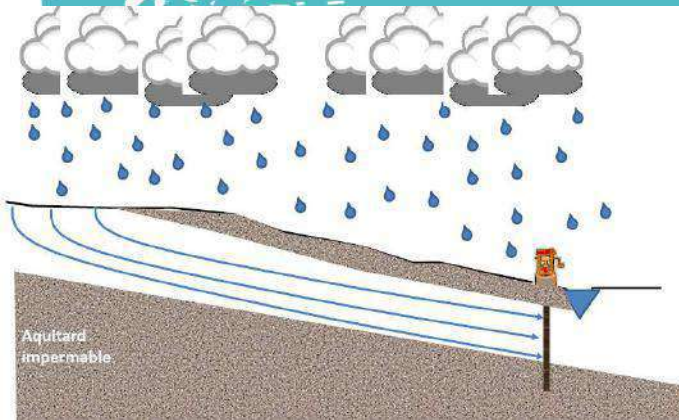
fmol/L (SF6) 10^{-15}



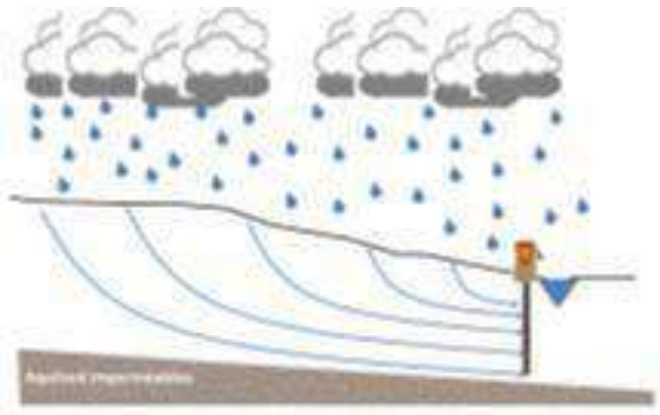
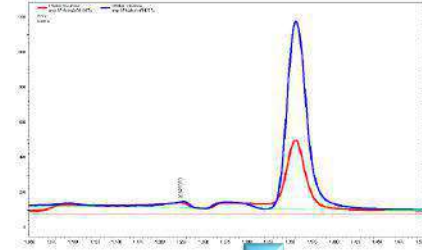
- Incertitude analytique +/- 3ans



Interprétation : modèle qui schématise le mode d'infiltration de l'eau dans la nappe

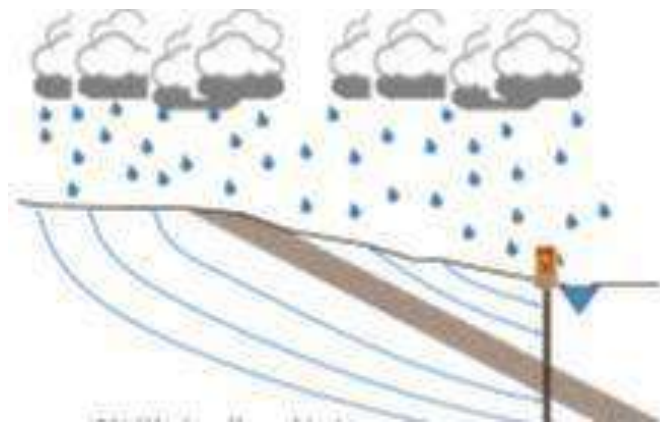
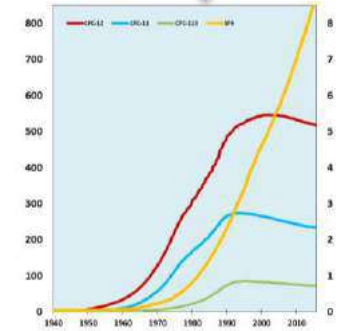


Modèle piston zone de recharge localisée, écoulement isolé de la surface

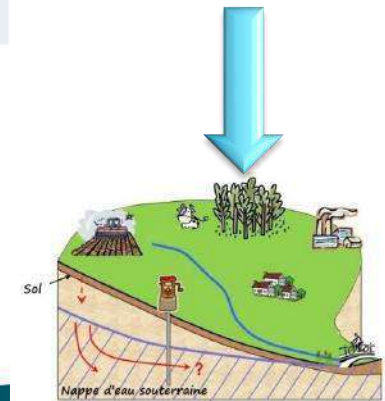


Modèle exponentiel
Recharge tout le long du BV

Exponentiel	3%
Mélange	50%
Piston	48%



Modèle mélange :
Mélange entre 2 eau d'âge distinct

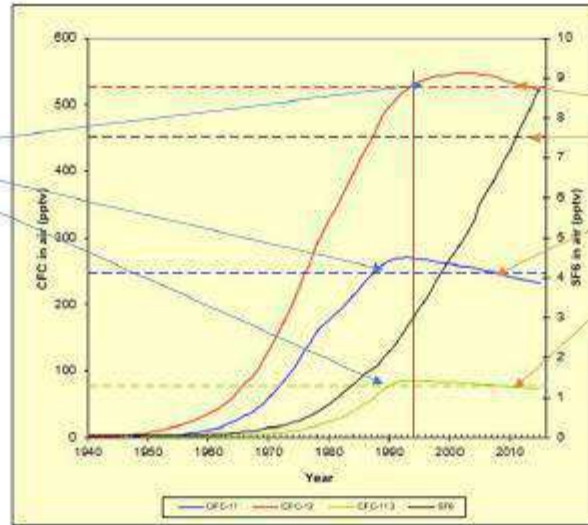


Intérêts et limites de la méthode



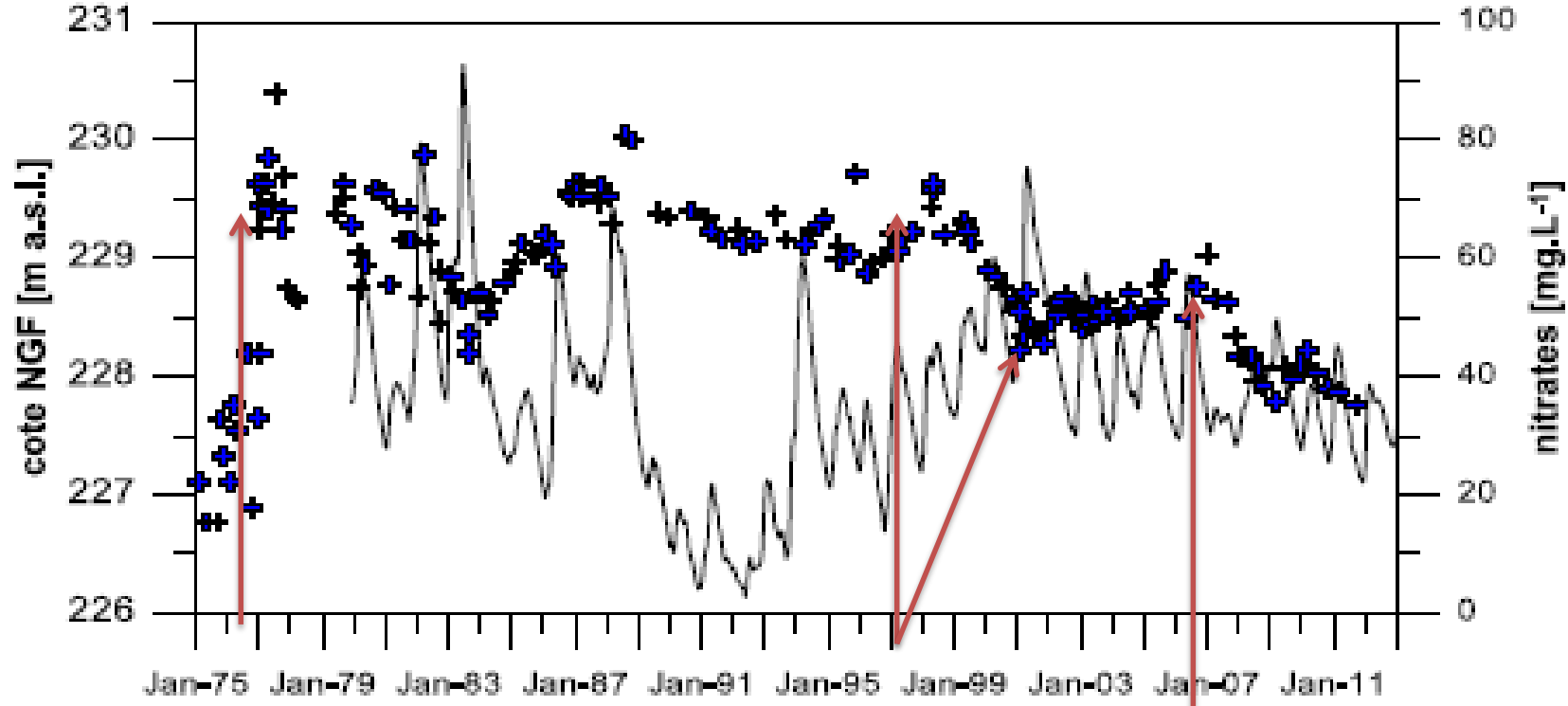
Âges « anciens »
(1988-1993)

Âges « jeunes »
(2007-2013)



- Excès d'air
- Estimation de la température et altitude de recharge
- Epaisseur de la zone non saturée
- Dégradation en conditions réductrices pour les CFCs
- Contamination (pollution) ou fonds géochimique,

Le prélèvement est une étape clé



Captage de la Râcle : MAE 1997-2000 ; fermeture sucrerie en 2007; hausse année 1975 => inertie du système au changement de pratique : 2 ans

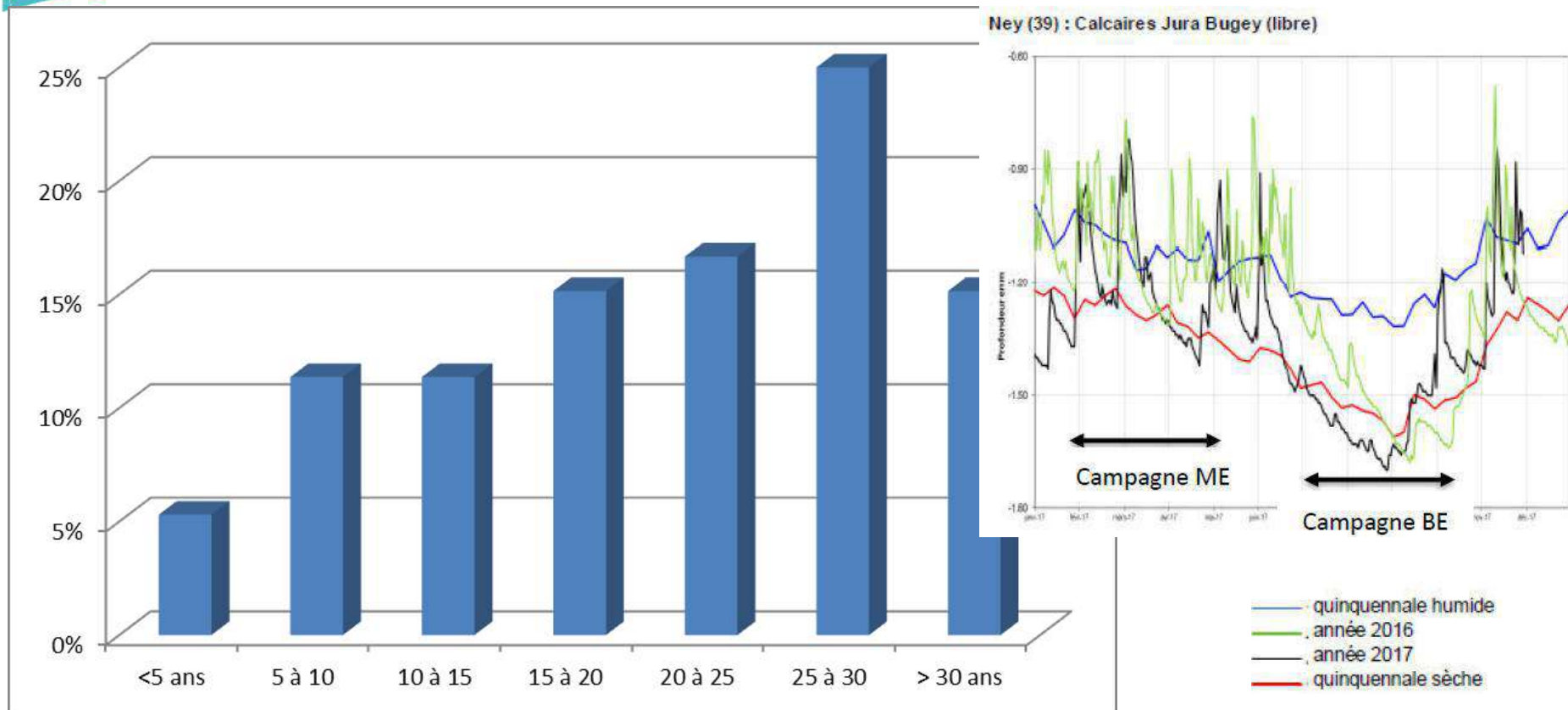
RESULTATS DES CAMPAGNES DE DATATION CFC/SF6 Modèle Exponentiel

ME 17 - Degré de confiance : Moyen Temps de résidence moyen : 21 ans

BE 17 - Degré de confiance : Bon Temps de résidence moyen : 23 ans

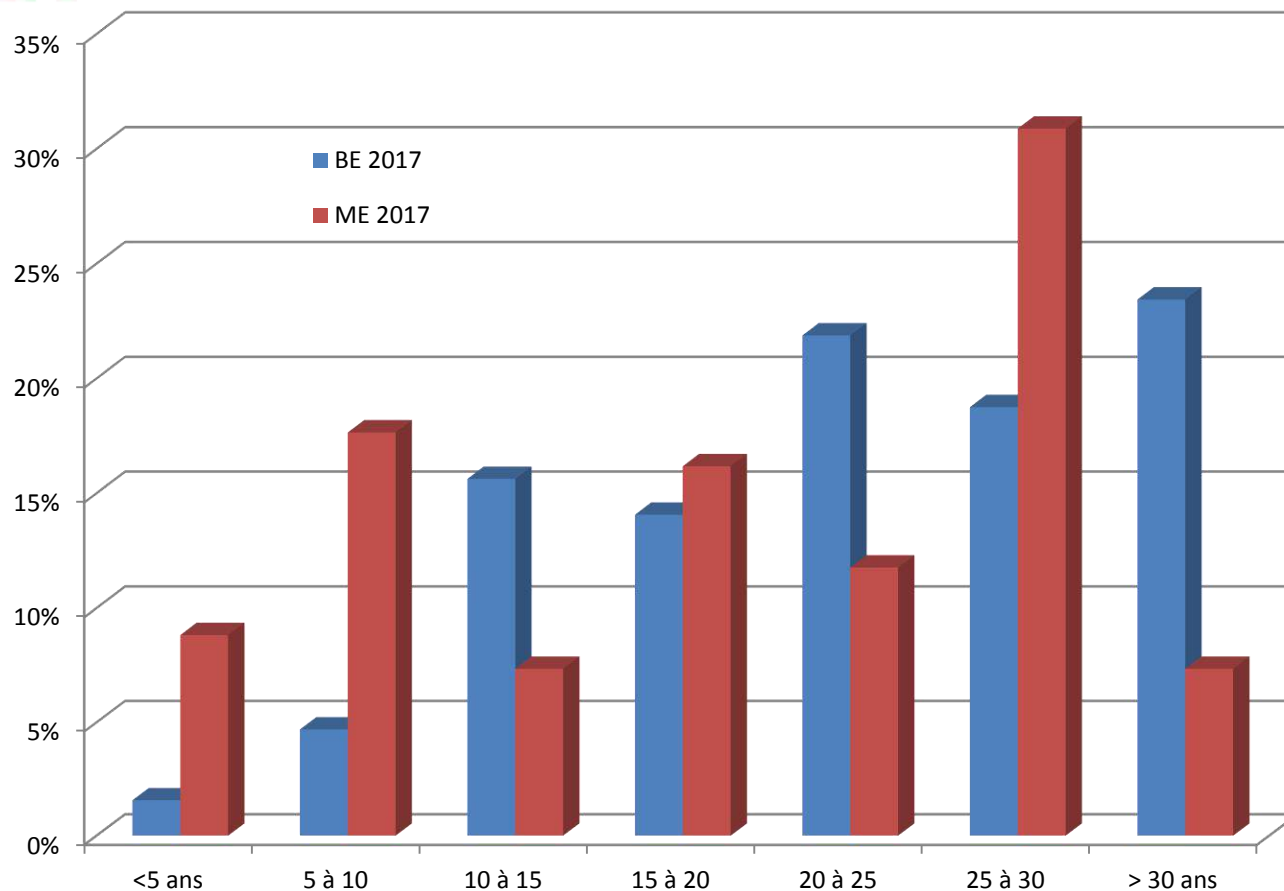
BRGM Août 2012: 7 ans (86% eau jeune), modèle binaire (avec eau > à 50 ans)

Quels résultats dans le karst ?



La moitié des 70 captages dans le karst a un temps de résidence moyen > 24 ans en 2017

Quels résultats dans le karst ?



sur 64 captages
14% eau plus jeune en BE
38% même âge
48% eau plus jeune en ME

3 messages à retenir :

Datation = Temps de résidence de l'eau

⇒ *Délai pour obtenir la totalité des bénéfices des actions engagées*

≠ Réactivité de la nappe (qualité)

⇒ *Caractérise les circulations contributives les plus rapides*

Systemes karstiques siège de fortes variabilités temporelles hydrologiques (crue rapide)

- variabilité et large distribution des temps de séjour,
 - *»peu favorables »* à des datations ponctuelles
- nécessite une approche croisée (Analyse complète de l'hydrogéologie et hydrochimie)

Datation CFC SF6 : prélèvement délicat, expérience nécessaire pour interpréter et valider la donnée (choix du modèle, prise en compte des processus affectant le signal, ...

Résultats des campagnes 2017

Secteur des Vosges :

- âge moyen < 10 ans pour 2 captages
- les autres captages ont des âges apparents de 15 à 30 ans

P. de Langres :

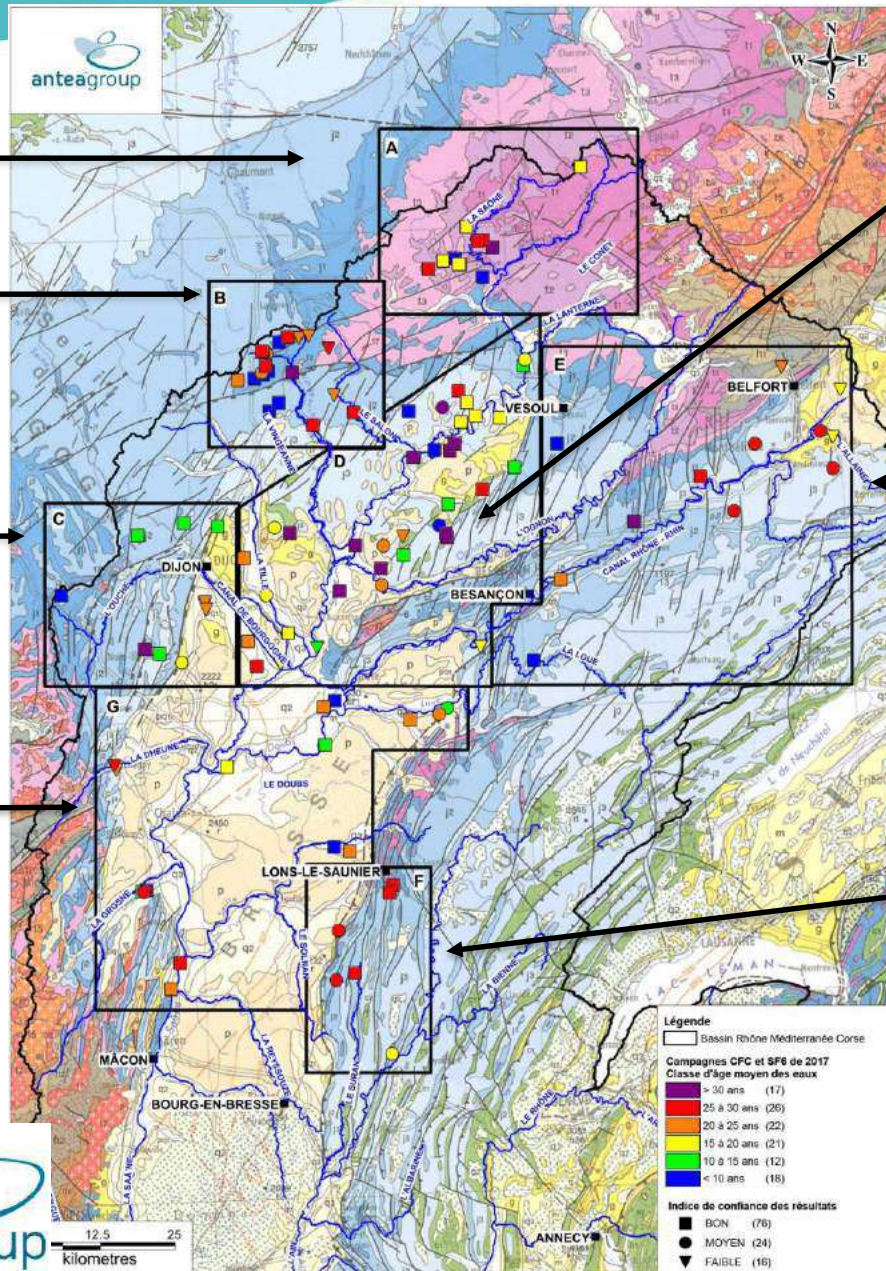
- soit des eaux d'âge moyen < 10 ans
- soit des eaux d'âge moyen compris entre 20 et 30 ans

Côte Dijonnaise :

- la majorité des eaux ont un âge moyen compris entre 10 et 15 ans

Fossé Bressan :

- soit des eaux d'âge moyen < 10 ans correspondant aux alluvions
- soit des eaux d'âge moyen > 20 ans marquées par une alimentation de versant



Partie septentrionale du Fossé Bressan :

- eaux sont plutôt anciennes > 30 ans

Partie amont de la vallée du Doubs (dont sources karstiques de part et d'autre de la vallée) :

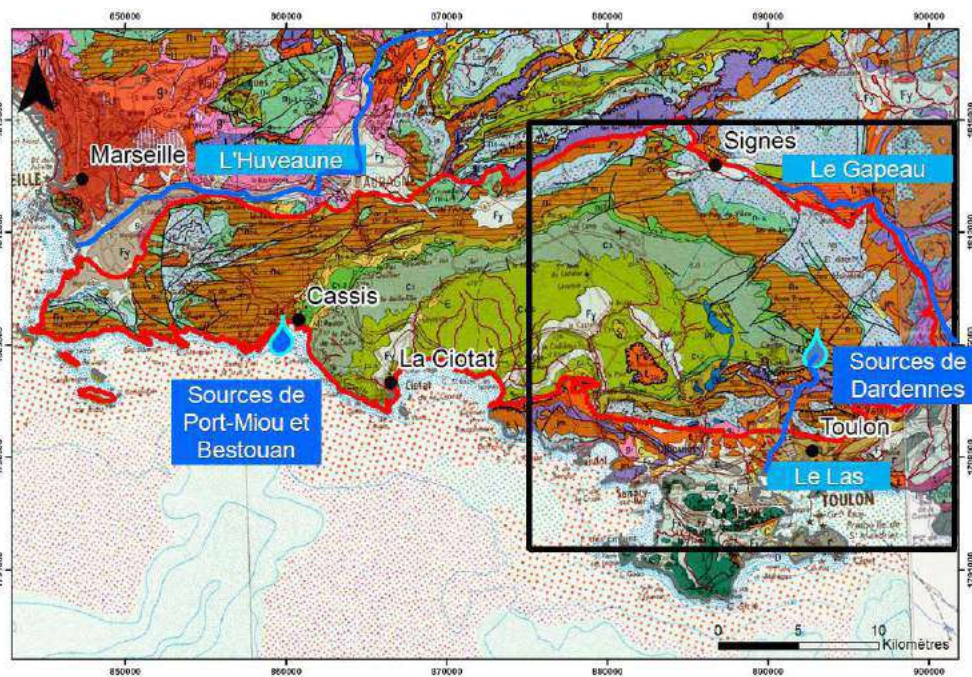
- eaux de plus de 25 ans

Pied du massif du Jura :

- les quelques sources prélevées montrent des eaux de plus de 25 ans d'âge moyen

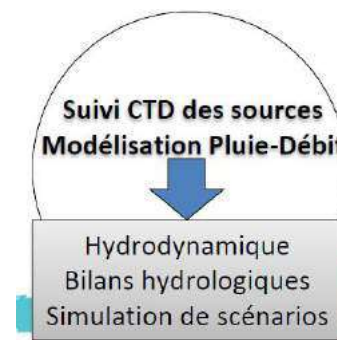
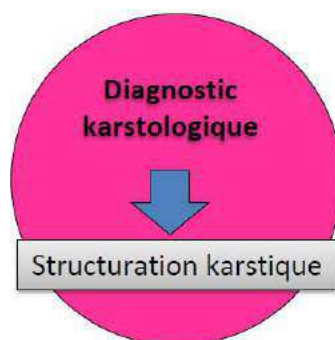
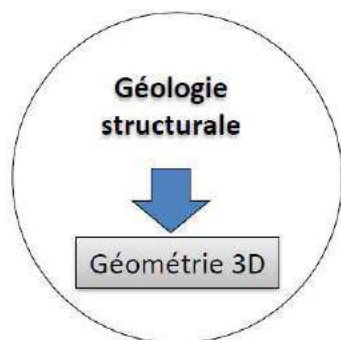
D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Projet DARDENNES : Estimation des volumes d'eau souterraine exploitables dans les structures karstiques à l'échelle régionale : Application à l'estimation des réserves karstiques Toulonnaises (Var).



Objectifs :

- Etudier une « ressource en eau stratégique »
- Relation entre la karstification et les flux d'eau souterraine
- Evaluer la faisabilité d'une gestion active d'un aquifère karstique
- Transformer la connaissance en recommandations pour l'exploitation et la gestion future

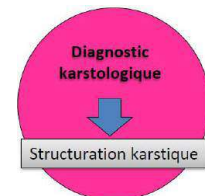


D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Projet DARDENNES : Estimation des volumes d'eau souterraine exploitables dans les structures karstiques à l'échelle régionale : Application à l'estimation des réserves karstiques Toulonnaises (Var).

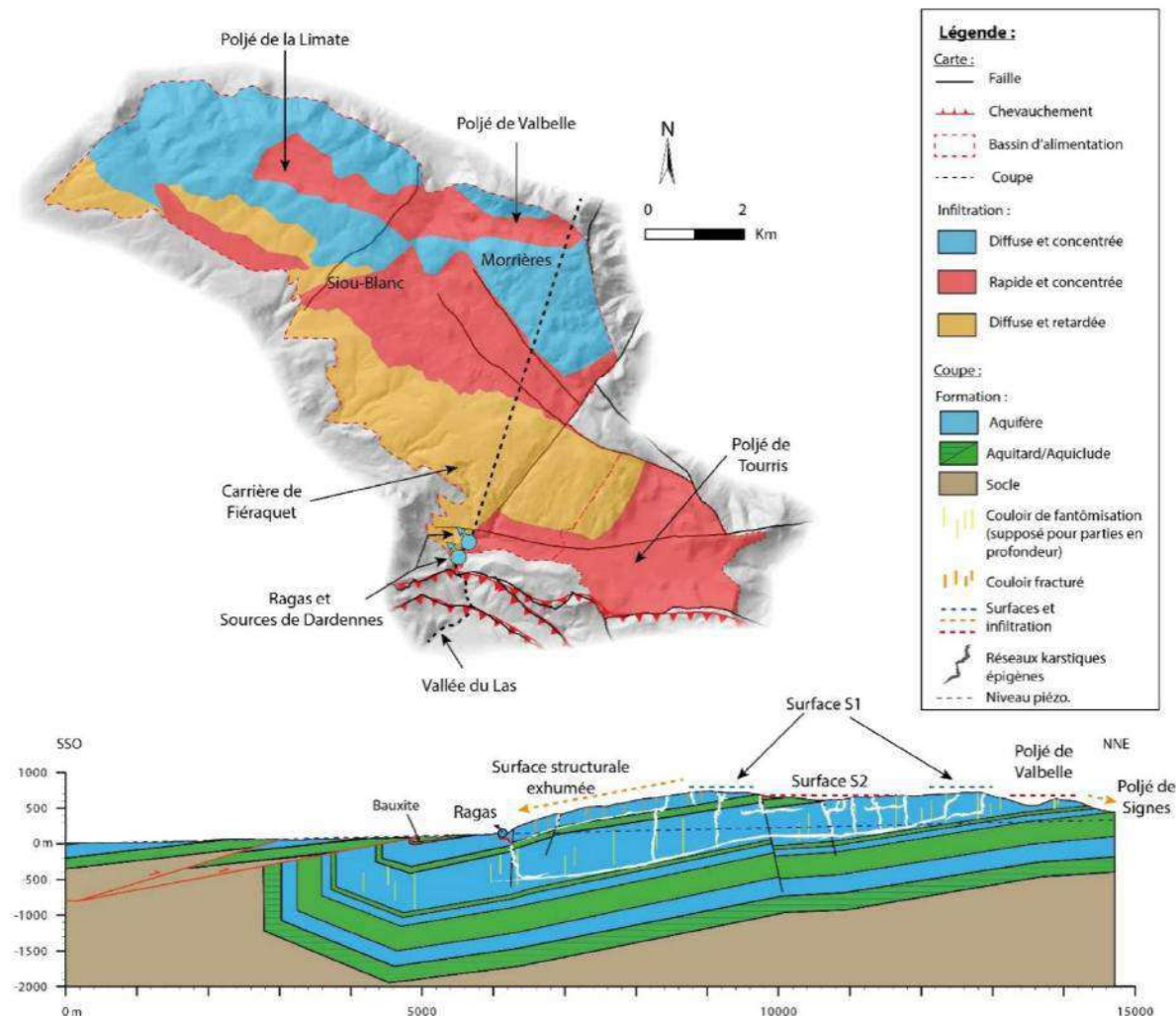
«Décrypter les différents stades d'évolution des systèmes karstiques successifs permet alors d'appréhender l'organisation de ces systèmes et de **reconstruire pas à pas l'établissement des réseaux de drainage**. Pour cela, l'étude des morphologies endo- et exokarstiques, des formations superficielles, et des dépôts piégés dans les cavités karstiques offre une méthodologie permettant de reconstituer plusieurs événements majeurs dans l'évolution géomorphologique et de la structuration karstique des massifs. Cette approche de "**diagnostic karstologique**" permet, de manière pragmatique, d'évaluer (i) les différents stades d'évolution des systèmes karstiques successifs, (ii) les modalités d'infiltration et (iii) l'évolution des propriétés réservoir d'un massif karstique. Cette approche vise à répondre à trois questions principales :

- Comment se sont développées les structures karstiques ?
- D'où provient l'eau émergeant aux sources ?
- Quelles sont les réserves disponibles et où se localisent-elles ? » (Johan Jouves, 2018)



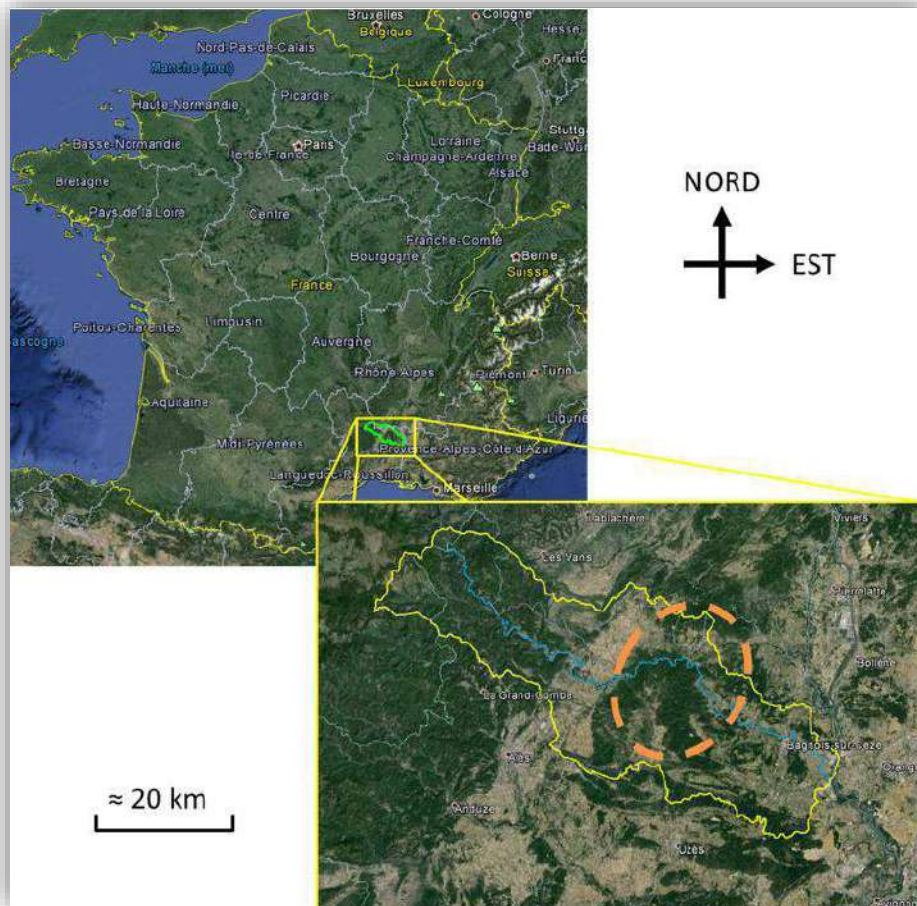
D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Projet DARDENNES : Estimation des volumes d'eau souterraine exploitables dans les structures karstiques à l'échelle régionale : Application à l'estimation des réserves karstiques Toulonnaises (Var).



D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)

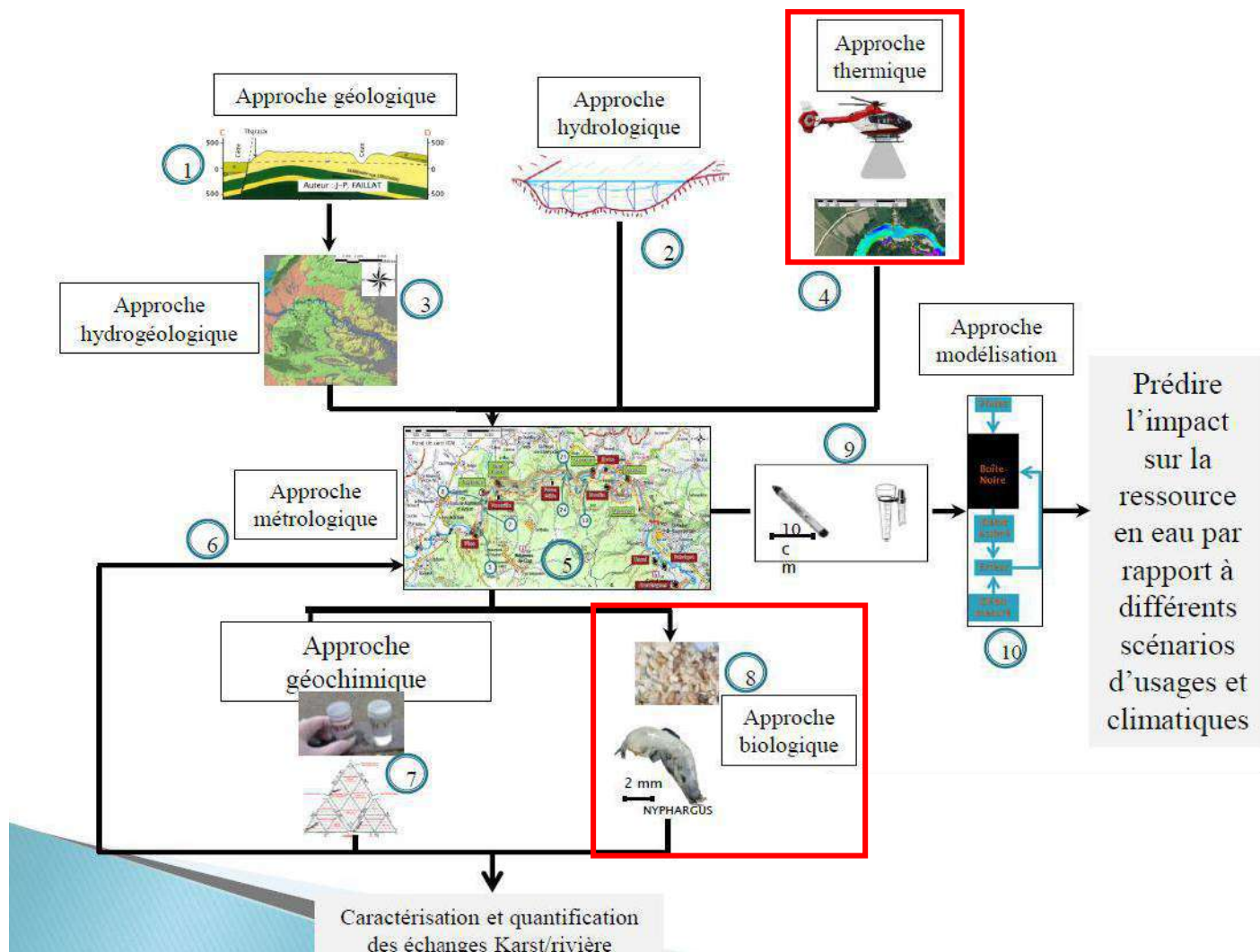


Objectif :

Mise au point d'une méthode permettant d'évaluer les échanges entre nappes phréatiques et rivières dans un contexte hydrogéologique de type karstique.

D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

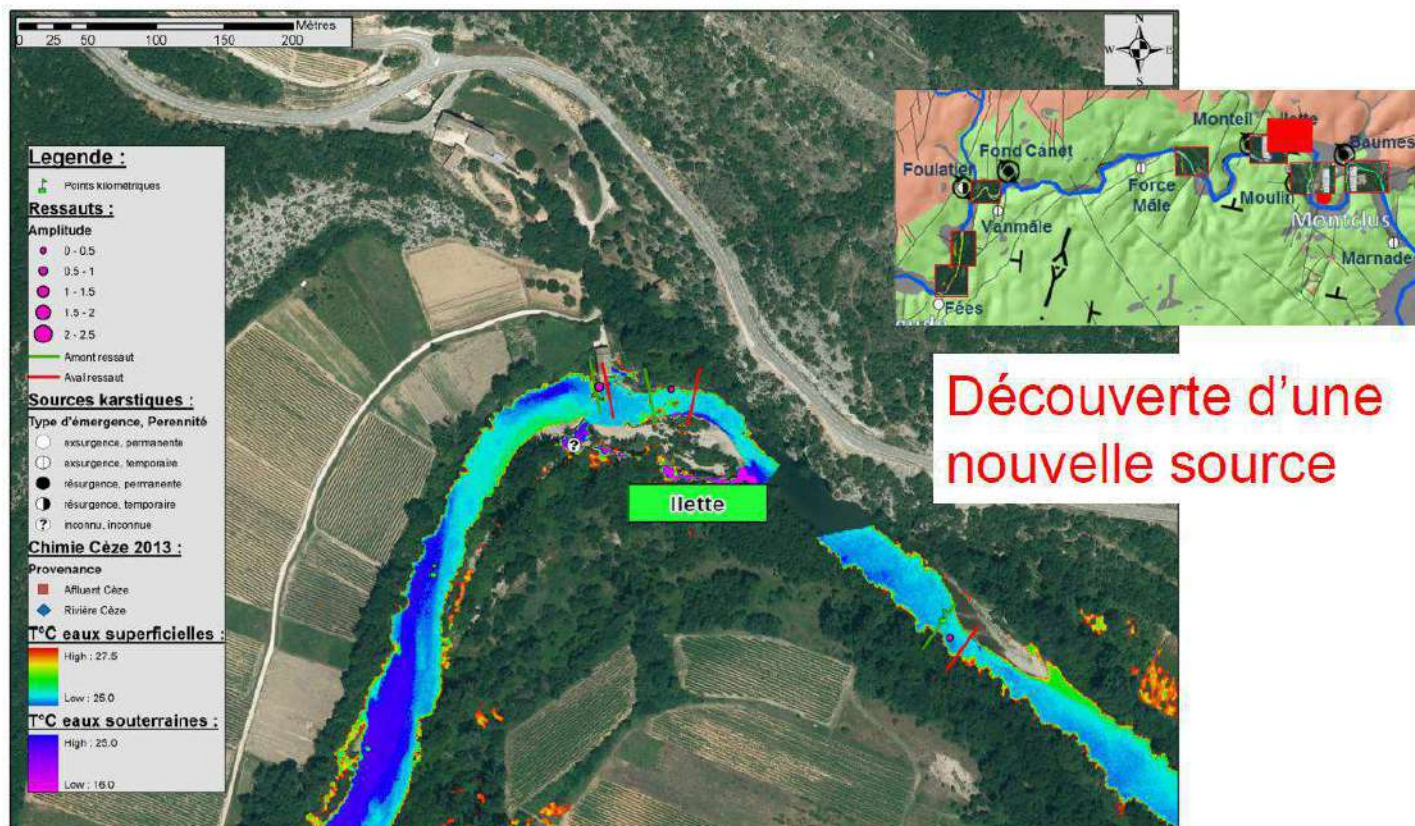
- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)



D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)

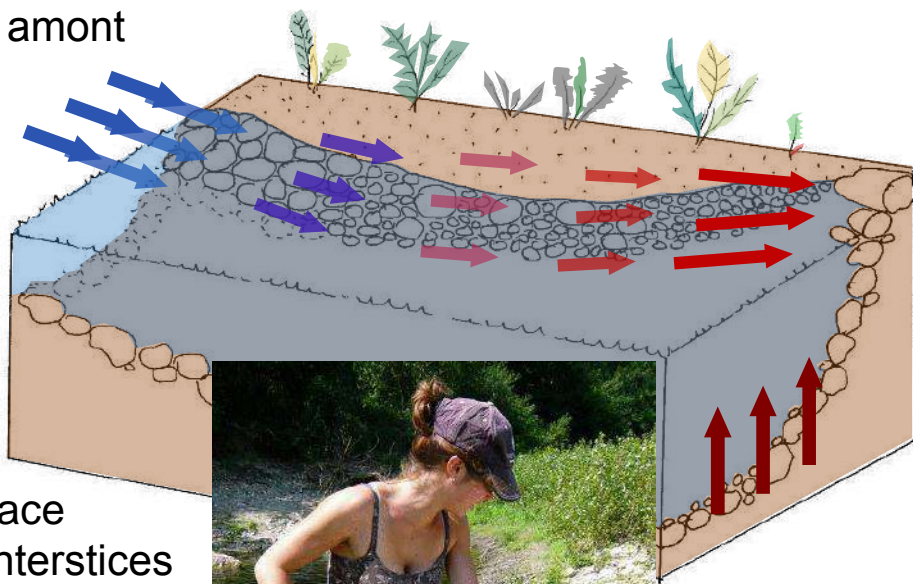
IMAGERIE INFRAROUGE THERMIQUE



D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)

L'eau de la rivière s'infiltré en amont des bancs



L'eau se transforme et reçoit parfois des apports profonds



Avec son cortège de faune souterraine

De la faune de surface s'installe dans les interstices

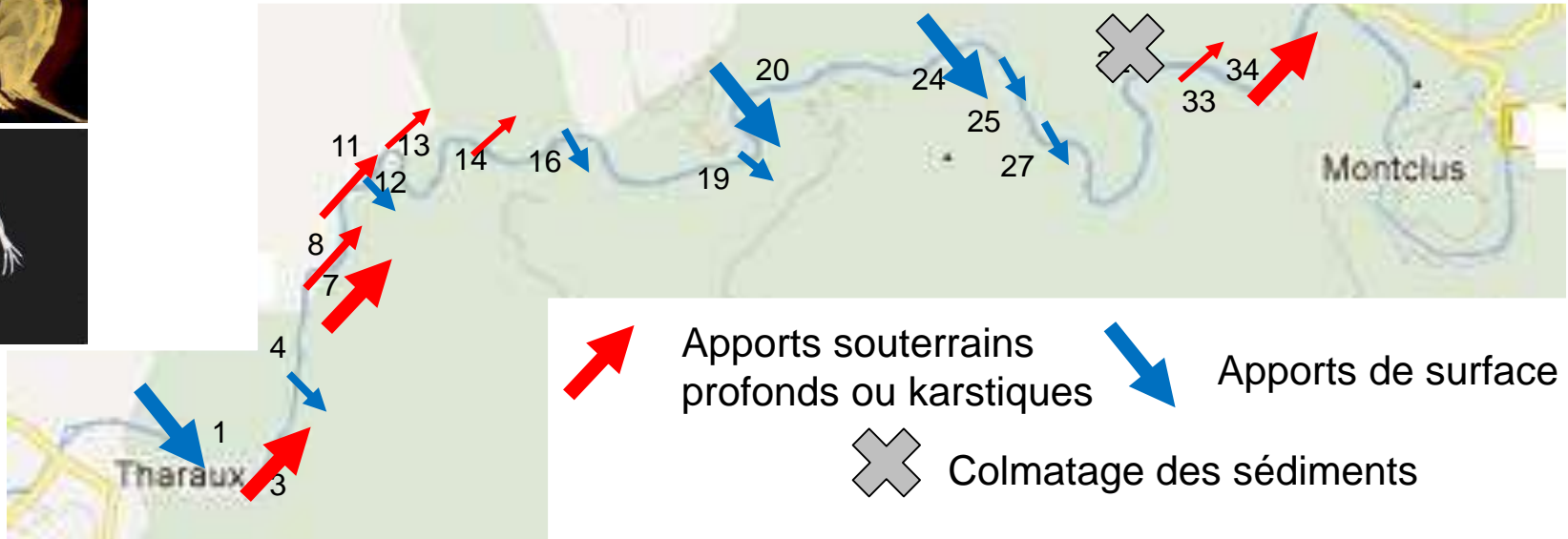
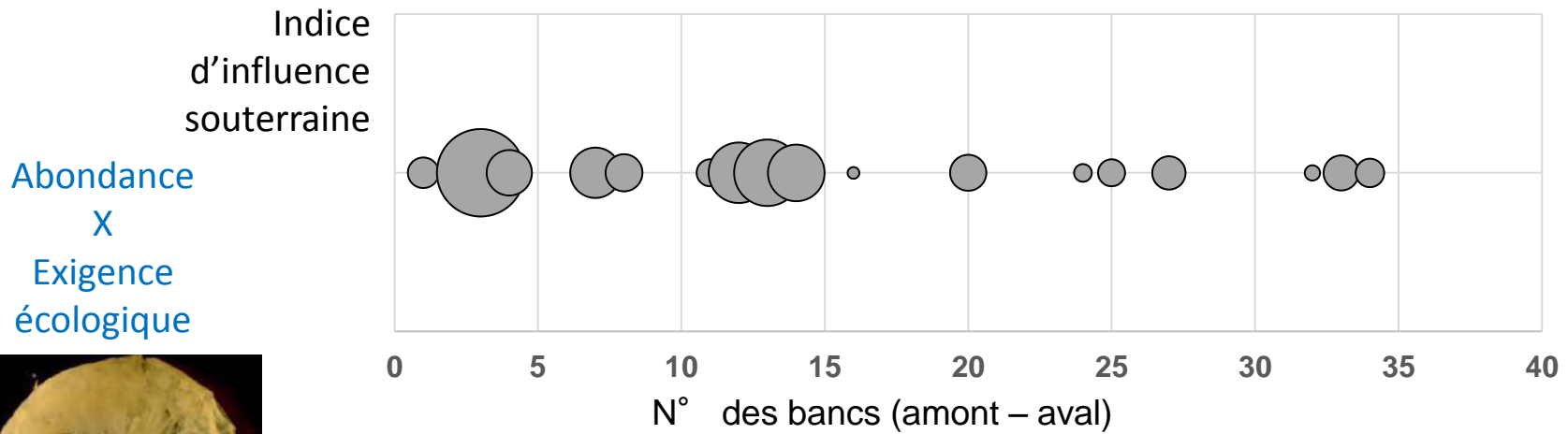
Pompage de 10 L d'eau interstitielle en aval de 18 bancs de galets



Chimie interstitielle
(Cond., O₂, Mg, Na, K, Cl, SO₄, NO₃, NH₄)
Faune interstitielle
(114 espèces/genres)

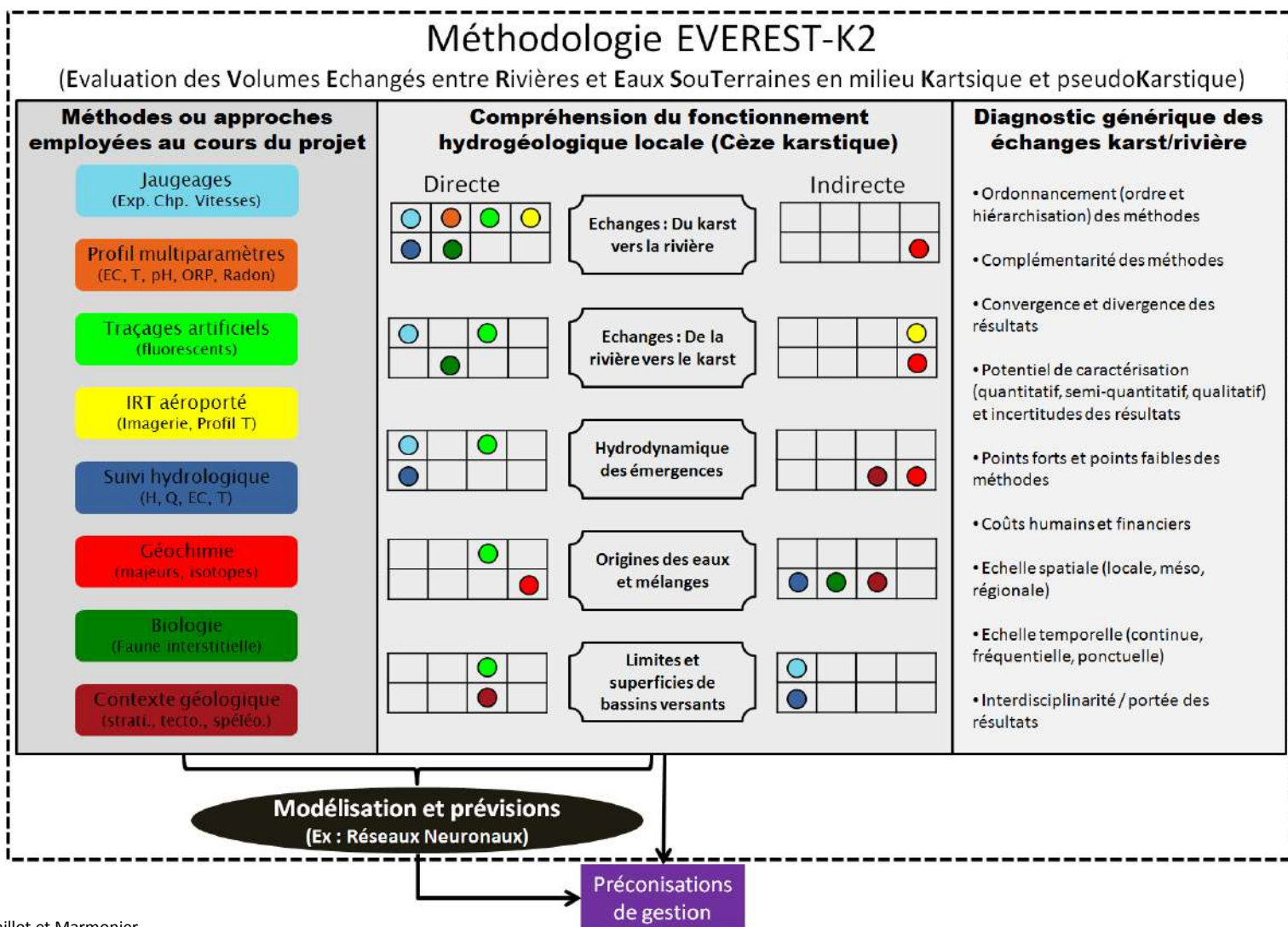
D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)



D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

- Relations cours d'eau / aquifère : Cas de la Cèze dans sa traversée du plateau calcaire de Méjannes-le-Clap (30)



D'autres outils sur d'autres massifs karstiques, rapide tour d'horizon à l'échelle RMC

Projet CFC SF6

ESTIMATION DU TEMPS MOYEN DE RENOUVELLEMENT DE L'EAU PAR DATATION À PARTIR DES CFC ET SF6
 Résultats 2017 sur les captages prioritaires en eau souterraine du Nord du bassin - Rapport

BASSIN RHÔNE-MÉDITERRANÉE Février 2018

SAUVONS L'EAU

Projet Cèze

Z.A.B.R.
 Zone Amont Bassin de la Cèze

Rapport phase 2 du projet :
Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique.
 Bassin d'un affluent du Rhône, la Cèze (30)

Rapport phase 2
 Janvier 2015-2016

Article n°46
 au titre de l'accord cadre Apave de l'Eau ZABR

2016
 2015

Guide technique Interactions nappe/rivière
 Des outils pour comprendre et mesurer les échanges

21
 Eau
 Air
 ARMINES

Projet Dardennes

Synthèse des résultats du projet Dardennes, recommandations et scénarios de gestion de la ressource en eau de l'aquifère karstique de Dardennes-Siou-Blanc (Var)

Auteurs : Arnaud J., Stéphane B., Clément B.
 Date : 09/03/2018

Rapport CENOTE 2018-0142

SAUVONS L'EAU

DARDENNES
 Modélisation

La modélisation Pluie-Débit-Niveau de l'aquifère karstique de Dardennes - synthèse des modèles proposés au cours du projet Dardennes (2014-2018)

Auteurs : Thibaut GARNIER et Stéphan HOFFMANN
 Date : 09/03/2018

SAUVONS L'EAU

Synthèse des résultats du projet Dardennes.
Hydrogéologie et karstologie de l'aquifère karstique de Dardennes-Siou-Blanc (Est de l'estrie de Beaumont, Var)

Auteurs : Arnaud J., Stéphane B., Clément B.
 07 décembre 2018

SAUVONS L'EAU

CENOTE

Diagnostic karstologique du réservoir de Dardennes-Siou-Blanc

Rapport CENOTE 2018-0143
 Date : 27/12/2018

Auteurs : Clément B. et Stéphane B.
 Avec la collaboration de S. ARNE, C. BARDONNET et T. HOFFMANN (CENOTE), G. NARON et B. CHASTAGNY (CENOTE)

SAUVONS L'EAU

KarstEAU
 Amélioration des connaissances sur les ressources en eau souterraine dans les formations carbonatées

Présentation du projet de recherche DARDENNES 2013-2018

SAUVONS L'EAU

Nom	Prénom	Mail	Téléphone	Structure
Auguste	Valérie	valerie.auguste@bourgognefranchecomte.fr	0380443334	CRBFC
Barbier	Manuel	manuel.barbier@afbiodiversite.fr	0672081335	AFB SD 39
Bellimaz	Herve	herve.aih.uni@gmail.com	0384432956	FNE-BFC
Cote	Henri	pisciculture.cote@wanadoo.fr	0381592026	EARL LES PISCICULTURES COTE
Denimal	Sophie	Sophie.Denimal@univ-fcomte.fr	0381666171	Université de Franche-comté - UMR Chrono environnement
Fagot	Jean-Baptiste	jean-baptiste.fagot@peche-jura.com	0384242521	FJPPMA
Fayoux	Xavier	xavier.fayoux@developpement-durable.gouv.fr	0345832212	DREAL BFC
Fister	Vincent	vincent.fister@eptb-saone-doubs.fr	0381571791	EPTB Saône et Doubs
Froger	Jean-François	jean-francois.froger@eptb-saone-doubs.fr	0381571449	EPTB SD
Fumey	Cédric	cedric.fumey@chasseurdujura.com	06.08.17.69.05	FDCJ
Gauthier	Benoît	benoitgauthier.sbs@gmail.com	0380643015	SB Serein
Gerbaud	Alexandre	a.gerbaud@haut-rhone.com	0769485537	Syndicat du Haut Rhône
Hube	Camille	cml.hube@gmail.com	0686011715	Fédération Départementale des Chasseurs du Jura
Lepeule	Pauline	pauline.lepeule@eptb-saone-doubs.fr	0676101723	EPTB Saône et Doubs
Marguet	Thierry	thierry.marguet@eamrc.fr	0426223183	AERMC
Marquis	David	david.marquis@doubs.gouv.fr	0381656214	DDT du Doubs
Mennetrier	Anne-Sophie	menne.anne@hotmail.fr	0619425307	Fédération départementale des chasseurs
Messin	Michel	michel.messin@educagri.fr	0381559200	ENIL Mamirolle
Moronval	Julien	j.moronval@parc-haut-jura.fr	0620557542	Parc Naturel Régional du Haut-Jura
Nevers	Florence	florence.nevers@grandbesancon.fr	0381878867	CAGB
Orofino	Stephane	s.orofino@brgm.fr	0771852239	BRGM
Paul	Valérie	valerie.paul@eamrc.fr	0426233159	Agence de l'eau RMC
Petit	Catherine	catherine.petit@eamrc.fr	0426223184	Agence de l'eau RMC
Pourreau	Jérémy	jpourreau@smix-dessoubre.fr	0675109577	syndicat du dessoubre
Ramond	Stérenn	sterenn.ramond@chasseurdujura.com	0635530558	FDC 39
Renaud	Claire	crenaud@jura.fr	0384873567	Département du Jura
Renaud	Xavier	xrenaud@fredonfc.com	0381477924	FREDON de Franche-Comté
Rojo-Diaz	Emmanuel	e.rojodiaz@sybtb.fr	0673859277	SyBTB
Savier	Henri-Pierre	henri-pierre.savier@onf.fr	0628680492	Office national des forêts, Direction territoriale de BFC
Vial	Quentin	q.vial@sybtb.fr	0787566882	SyBTB
Werochowski	Antoine	antoine.werochowski@bourgognefranchecomte.fr	0380444079	CRBFC