

# Récentes avancées sur le fonctionnement hydrogéologique et les interactions surface-souterrain dans le bassin de la Loue

**PROJET NUTRI-KARST**

**RV du karst de Bourgogne Franche-Comté**

**J.-B. Charlier<sup>1</sup>, B. Ladouche<sup>1</sup>, A. Vallet<sup>2</sup>, A. Idoux<sup>2</sup>, C. Allanic<sup>3</sup>, V. Bailly-Comte<sup>1</sup>, A. Selles<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> BRGM, Montpellier - [j.charlier@brgm.fr](mailto:j.charlier@brgm.fr)

<sup>2</sup> BRGM, Dijon

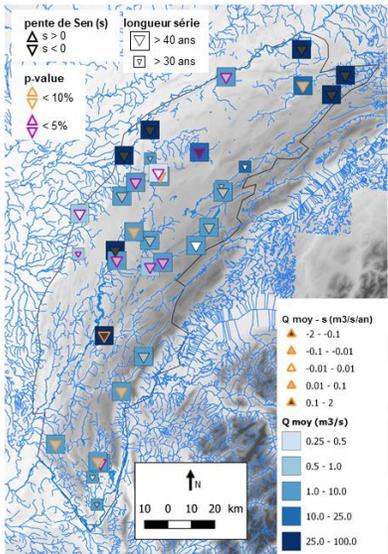
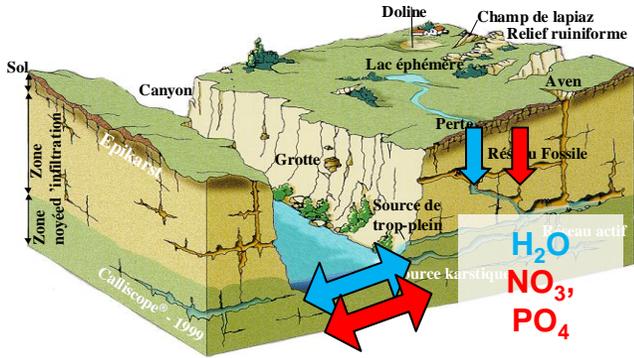
<sup>3</sup> BRGM, Orléans

12 déc. 2024, Besançon



- **Projet NUTRI-Karst**
- **Processus de recharge des aquifères karstiques**
- **Hydrosystème des sources de la Loue**
- **Hydrosystème Brême – Maine - Ecoutôt**
- **Interactions eaux de surface – eaux souterraines**
- **Schémas conceptuels**

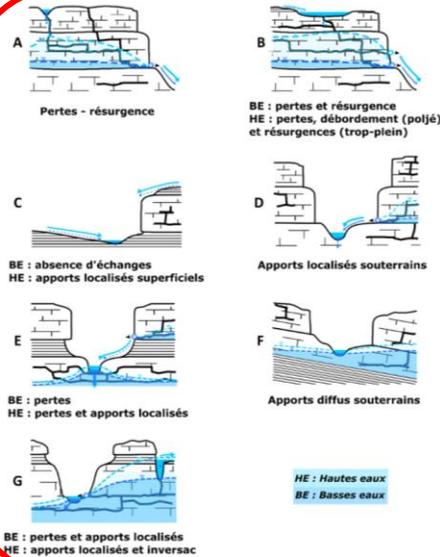
# Projet NUTRI-Karst



## Tâche 1

**Réponse des hydrosystèmes au CG**  
Tendance long terme & variabilité spatiale large échelle

## Tâche 2



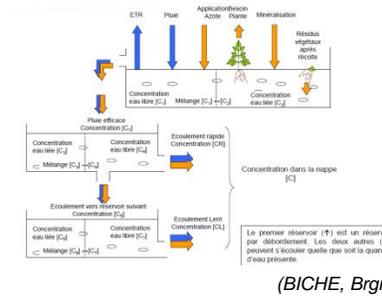
HE : Hautes eaux  
BE : Basses eaux

## Tâche 4



**Porter à connaissance**  
Ateliers multi-acteurs  
Communication & formations

## Tâche 3



**Transfert de nutriments**  
Impact des pratiques agricoles aux différentes échelles du sol, de la source, jusqu'au bassin

**Caractérisation hydrogéologique et interactions surface/souterrain**  
Modèle 3D, typologie des échanges, identification des zones contributives

## Partenaires

- BRGM (coordinateur)
- Chambre d'Agriculture 25-90
- Agence RMC (financeur)

# Tâche 2 : Hydrogéologie & interactions surface/souterrain

## Objectifs

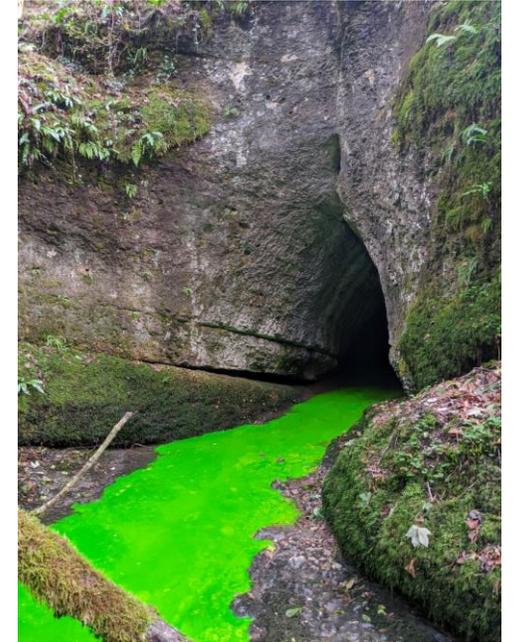
- mieux comprendre ce qui conditionne les **interactions surface/souterrain aux différentes échelles de l'aquifère et du bassin versant** afin d'aboutir à un **modèle hydrogéologique 3D** et à la délimitation des **zones contributives** au débit des rivières



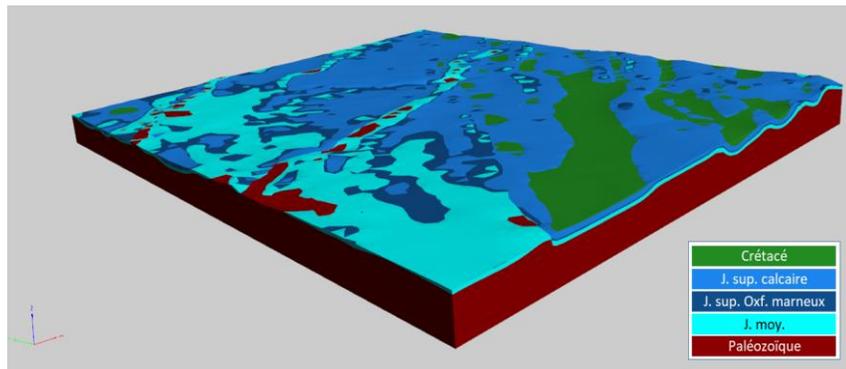
Pluviomètre collecteur pour analyse isotopiques des pluies



Campagne de prélèvement pour analyses géochimiques des sources et rivières



Traçage artificiel, Verneau



Modèle géologique 3D

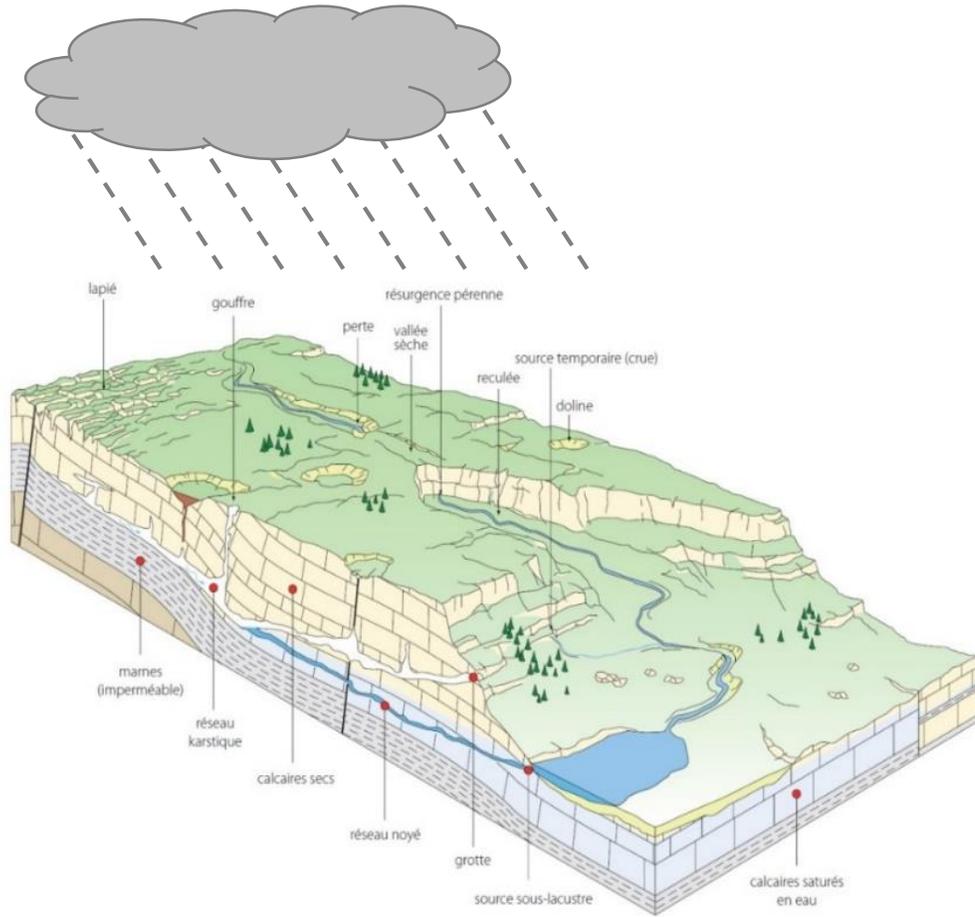
## Moyens mis en œuvre

- **Jaugeages** différentiels, **profils** physico-chimiques en rivière
- **Traçages artificiels** : Doubs-Loue et Verneau
- **Hydrogéochimie** : isotopie, datation
- **Modèle conceptuel hydrogéologique 3D**

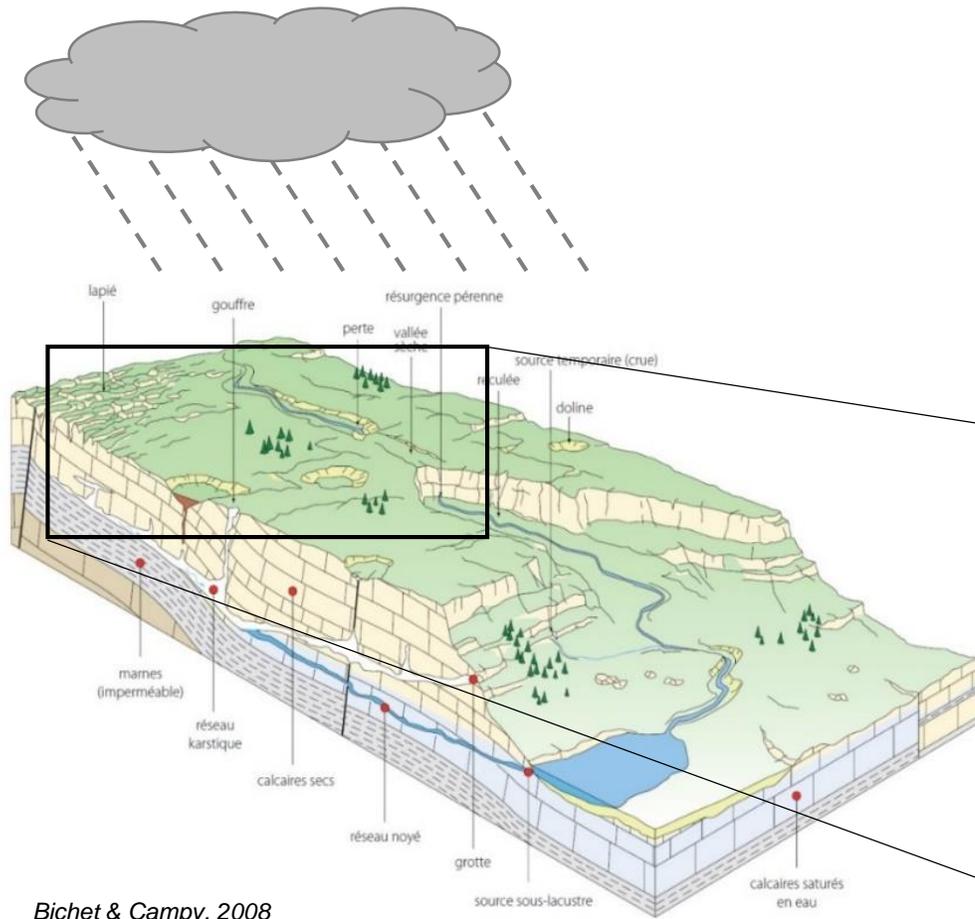


# Processus de recharge des aquifères karstiques

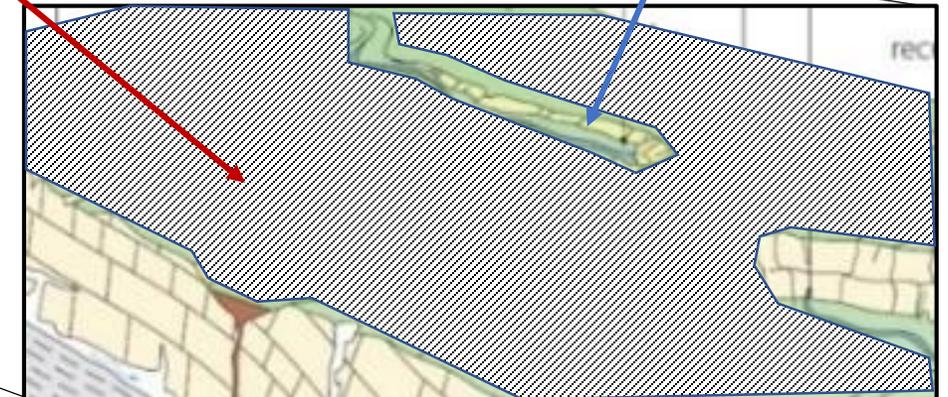
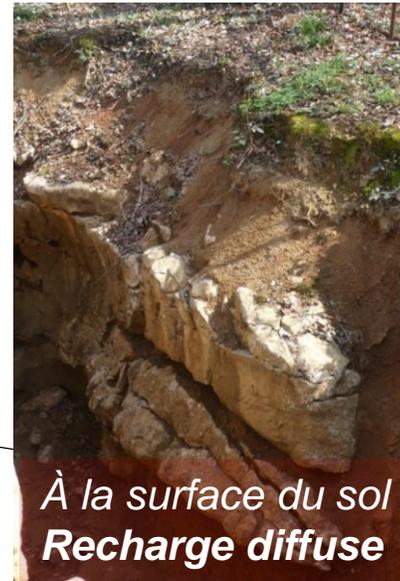
# Recharge des aquifères karstiques



# Recharge des aquifères karstiques

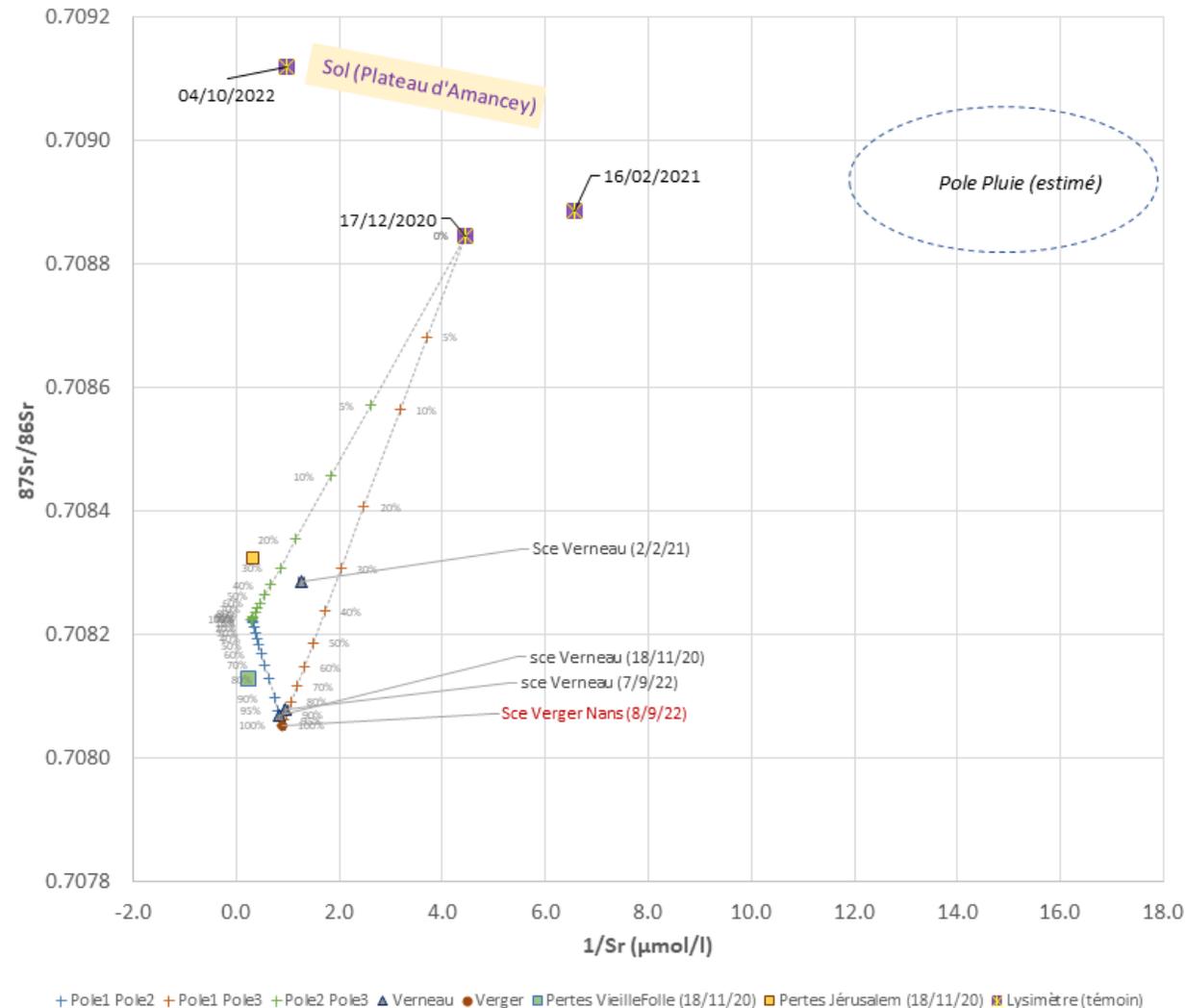


Bichet & Campy, 2008



# Contributions des modalités de recharge diffuse et localisée

## Ex. du Verneau

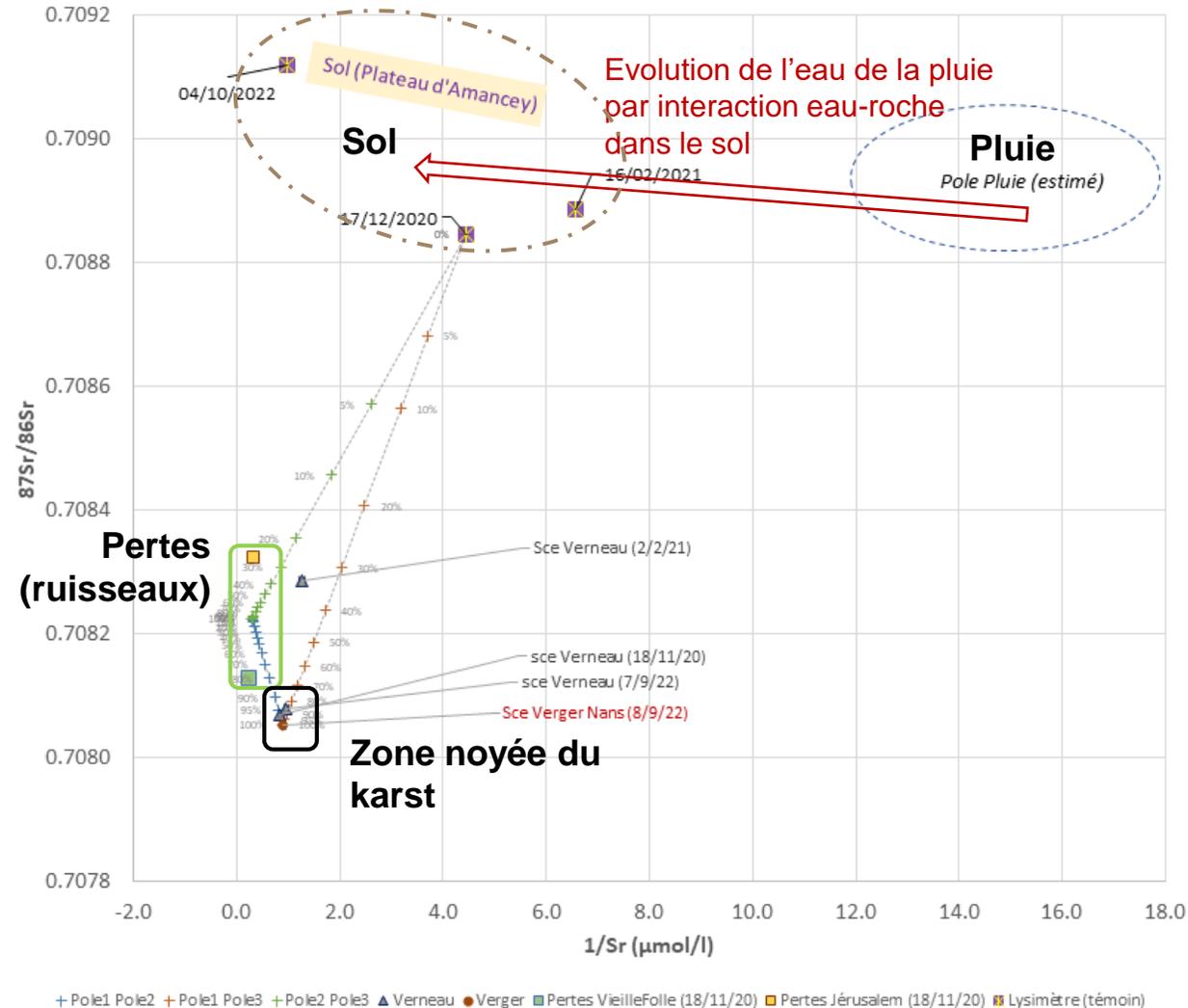


isotopes du strontium ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) peuvent être utilisés comme **traceurs dans les études environnementales** puisqu'ils sont naturellement présents dans le milieu

- préciser le **fonctionnement hydrogéologique** des systèmes karstiques
- apporter des informations sur les **interactions eaux-roche**
- mettre en évidence et quantifier des **mélanges d'eaux** de diverses origines

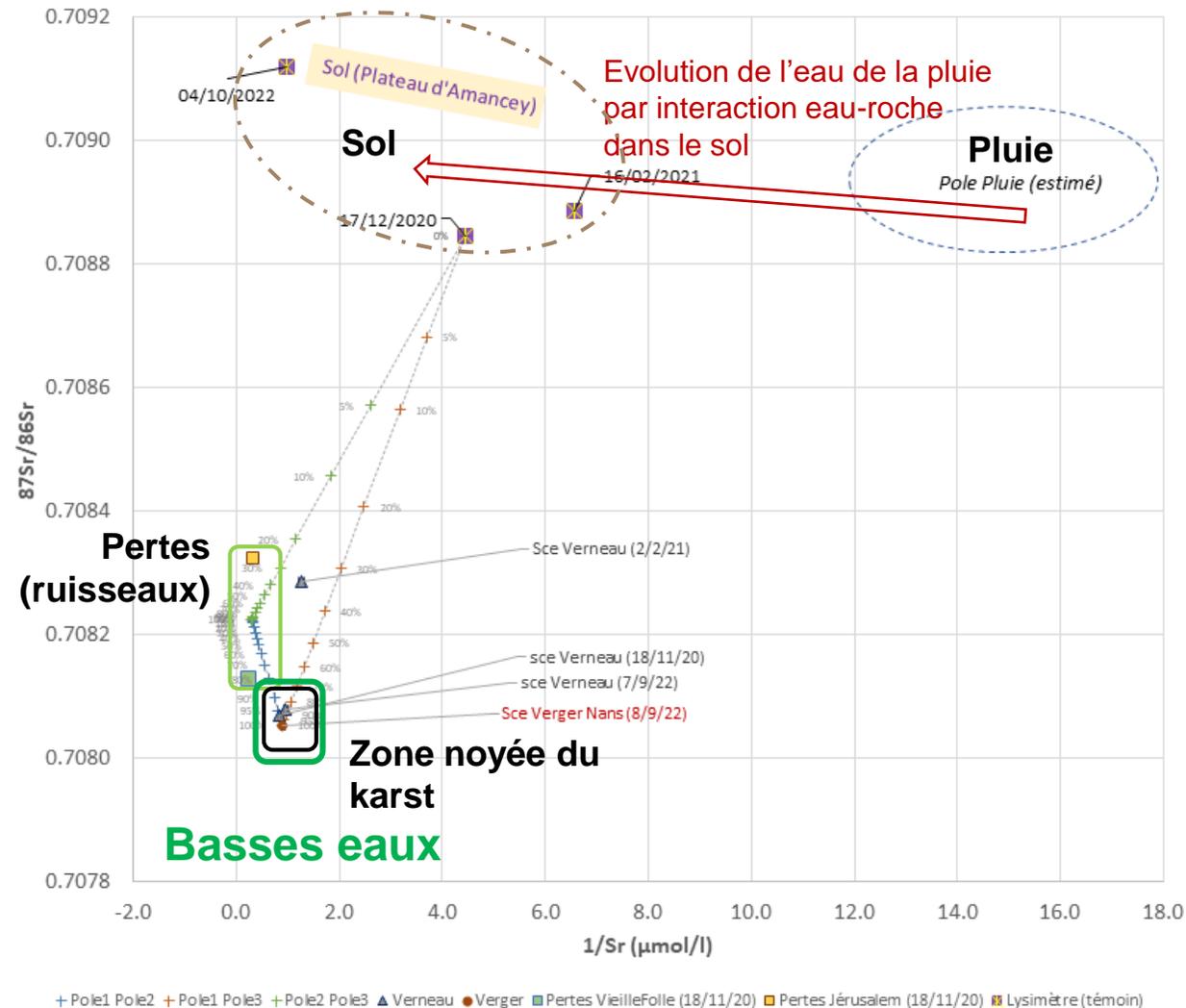
# Contributions des modalités de recharge diffuse et localisée

## Ex. du Verneau



# Contributions des modalités de recharge diffuse et localisée

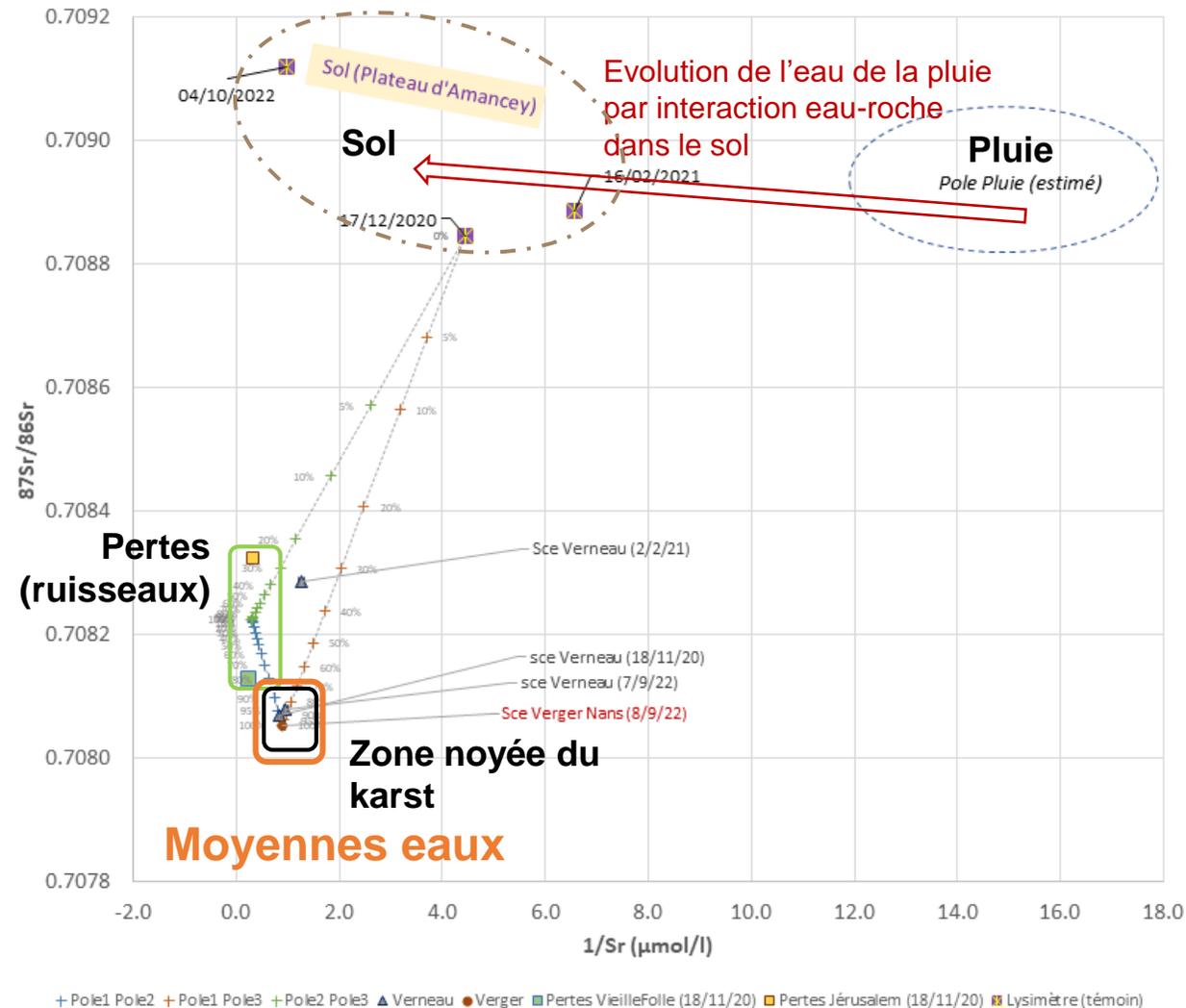
## Ex. du Verneau



**Basses eaux** : signature source = signature de la zone noyée (97%)

# Contributions des modalités de recharge diffuse et localisée

## Ex. du Verneau

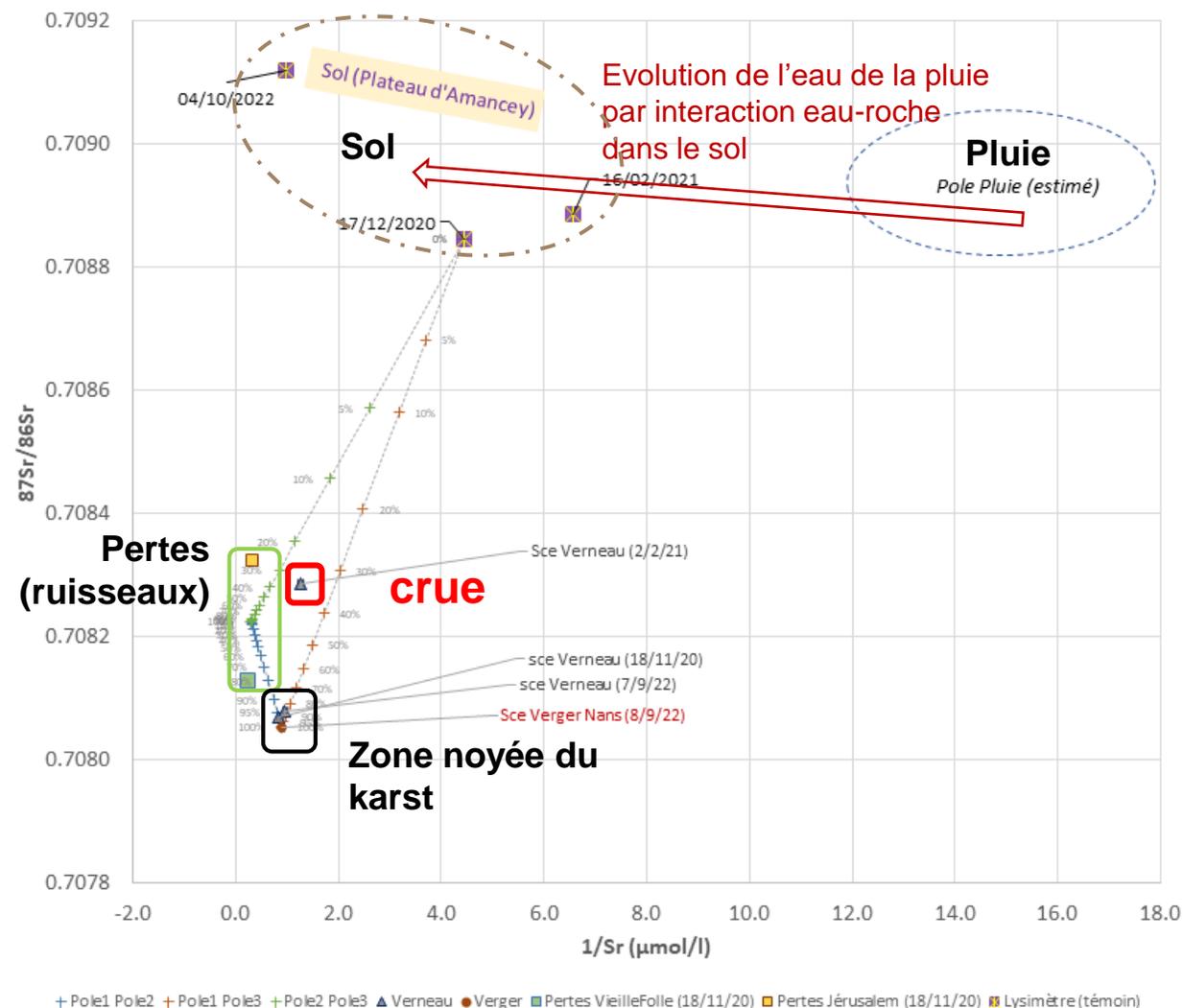


**Basses eaux** : signature source = signature de la zone noyée (97%)

**Moyennes eaux** : idem

# Contributions des modalités de recharge diffuse et localisée

## Ex. du Verneau



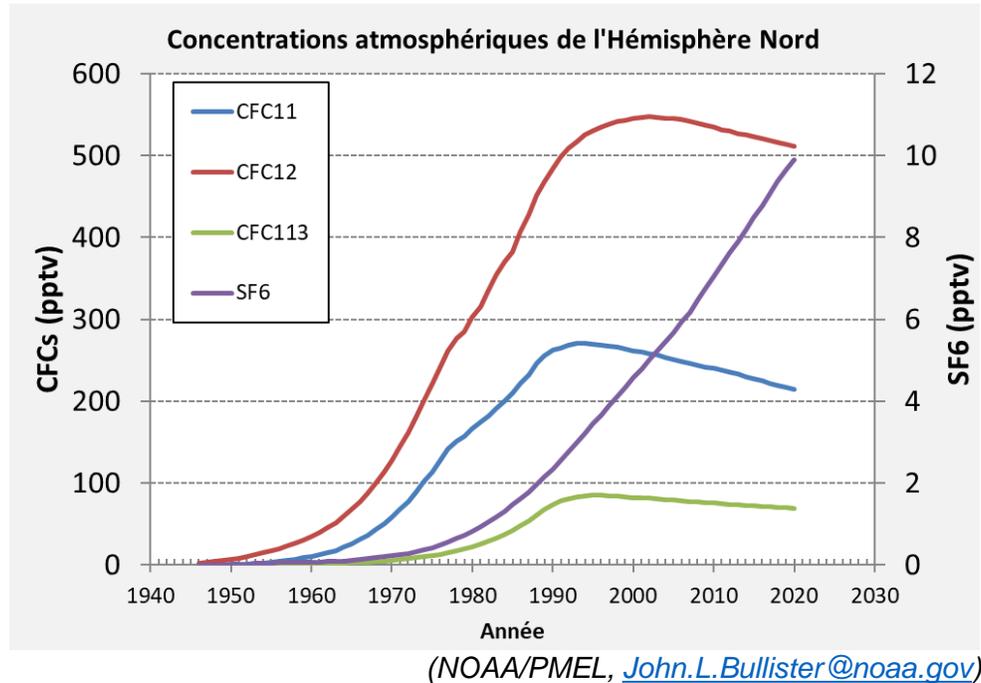
**Basses eaux** : signature source = signature de la zone noyée (97%)

**Moyennes eaux** : idem

**Hautes eaux / crue** (février 2021), forte augmentation du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , qui souligne la forte influence des eaux de recharge à travers le sol

**=> Même en crue, les pertes contribuent à moins de 20%, le reste est rechargé par le sol (recharge diffuse)**

# Recharge et temps de résidence dans l'aquifère



## Analyses CFC/SF6 et gaz noble (Ne, Ar) pour datation des eaux

=> comparaison des teneurs des différents **gaz dissous** dans l'eau à l'état de traces par rapport aux teneurs connues dans l'atmosphère permet d'estimer un **temps moyen de séjour de l'eau** dans les aquifères

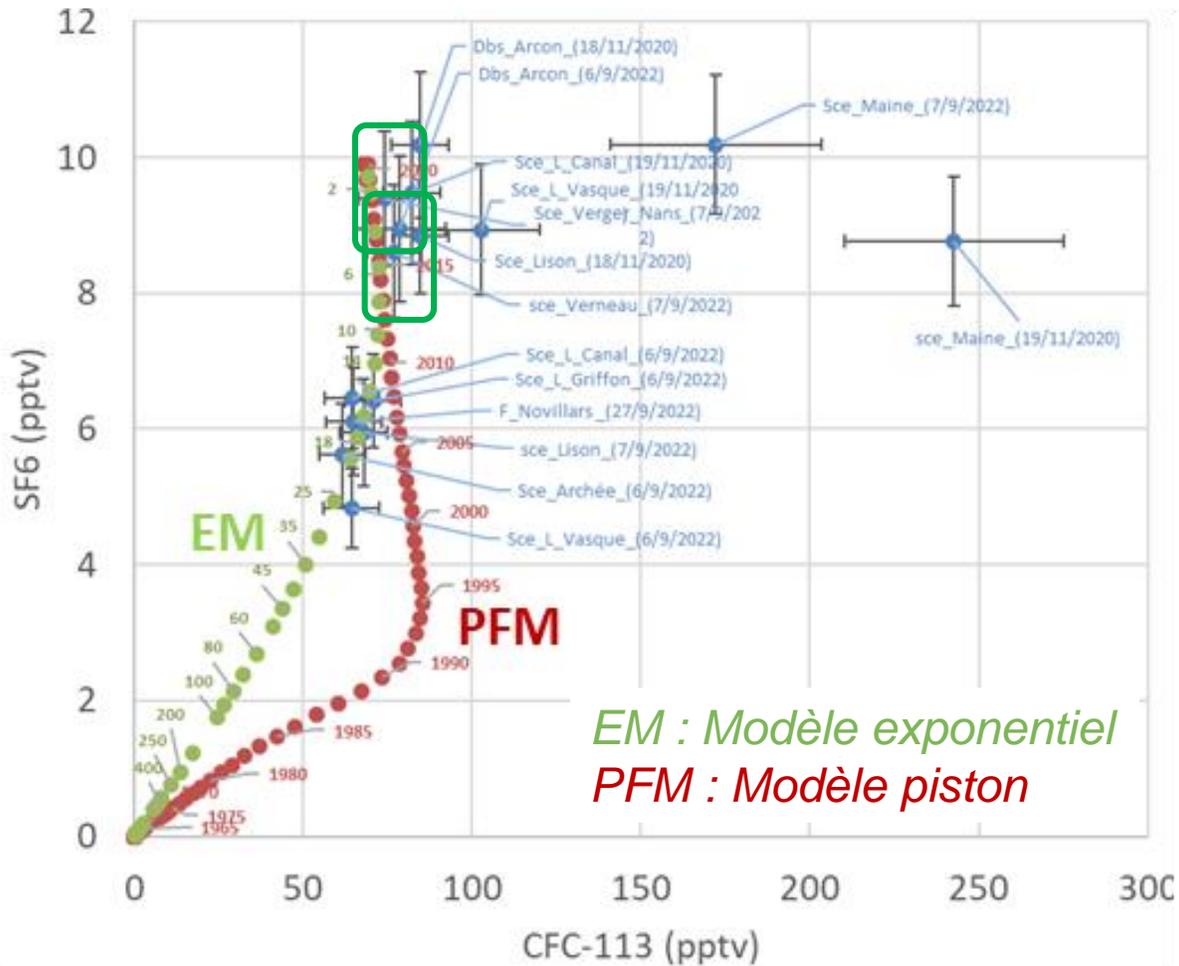
➤ Âge apparent de l'eau repose sur l'utilisation de **modèles de transfert** (Maloszewski et Zuber, 1982)

**Gaz nobles** -> stabilité dans le réservoir & dans le transfert en phase dissoute dans les aquifères

=> utilisés comme marqueurs des conditions environnementales de la recharge des aquifères

# Recharge et temps de résidence dans l'aquifère

## Ex. du Verneau



Analyses CFC/SF6 et gaz noble (Ne, Ar) pour datation des eaux

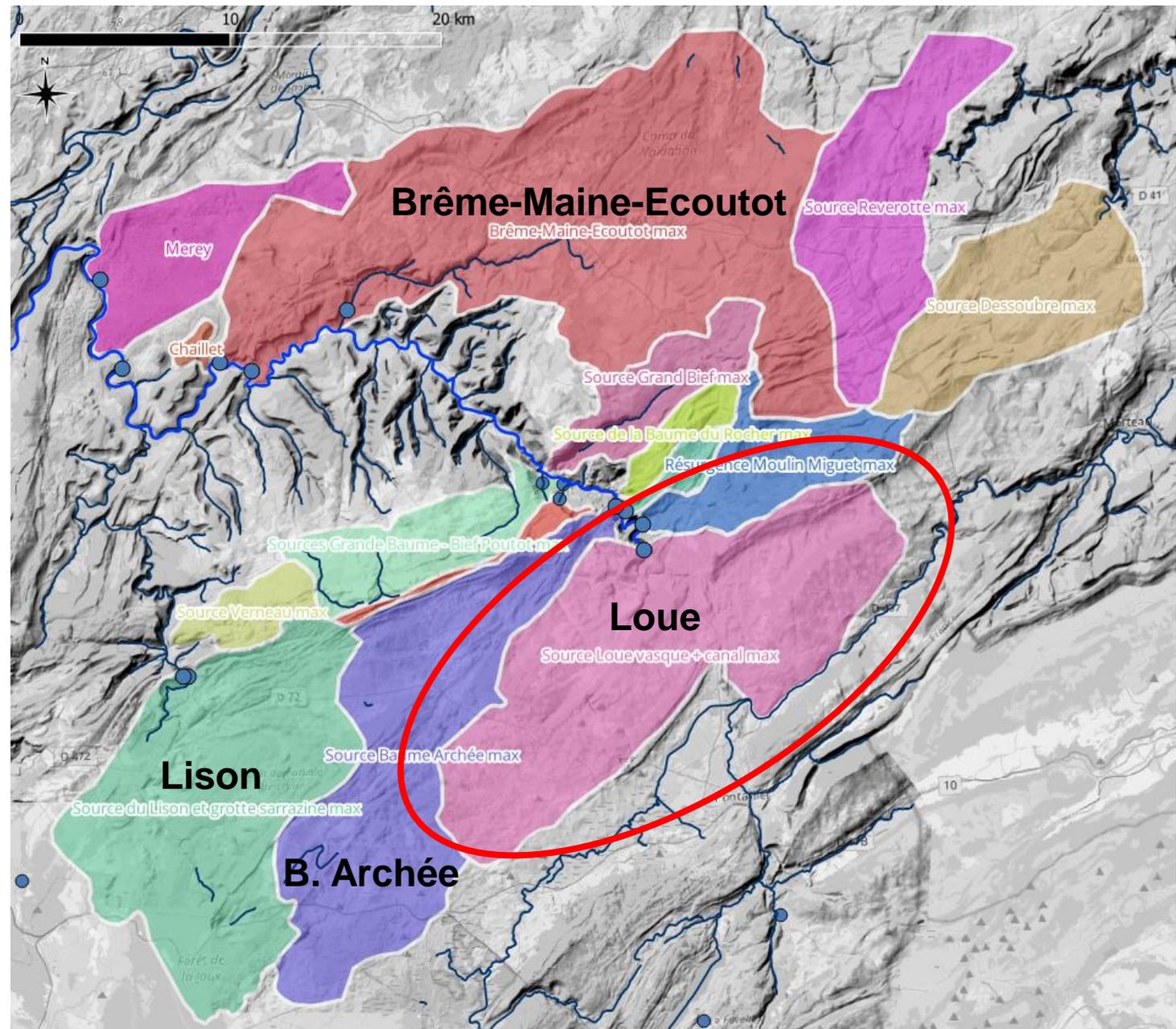
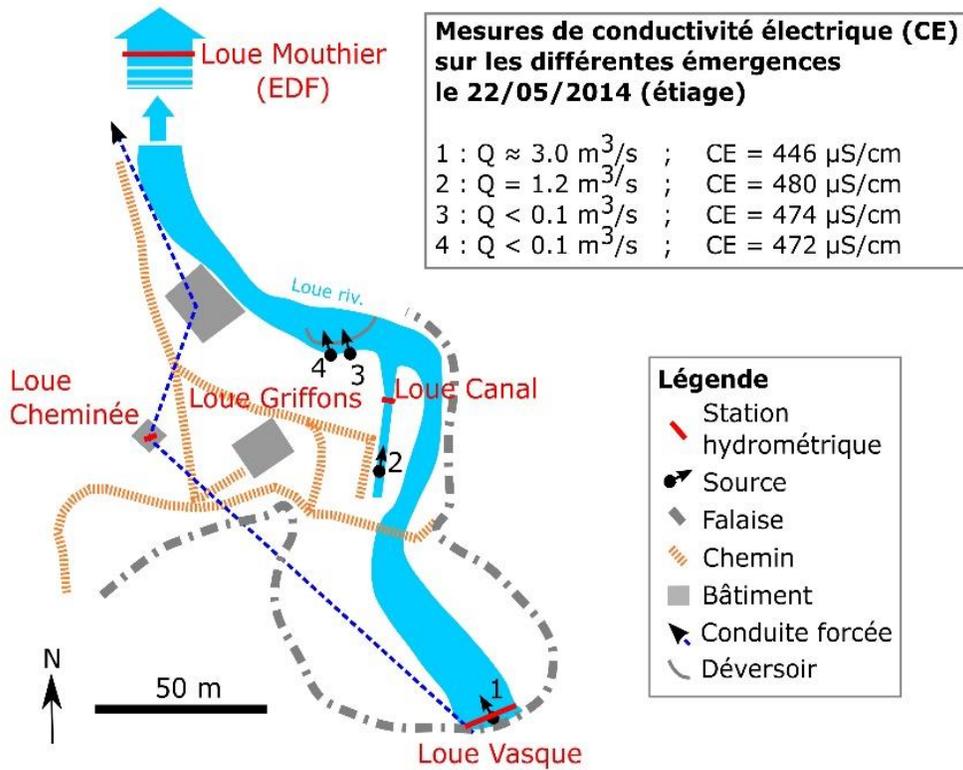
Verneau & source 'Verger' (Nans-ss-Ste-Anne)

➤ Basses eaux : temps résidence ~ 5 ans

➤ Cohérent avec ré-interprétation données Tritium – années 75-80



# Hydrosystème des sources de la Loue

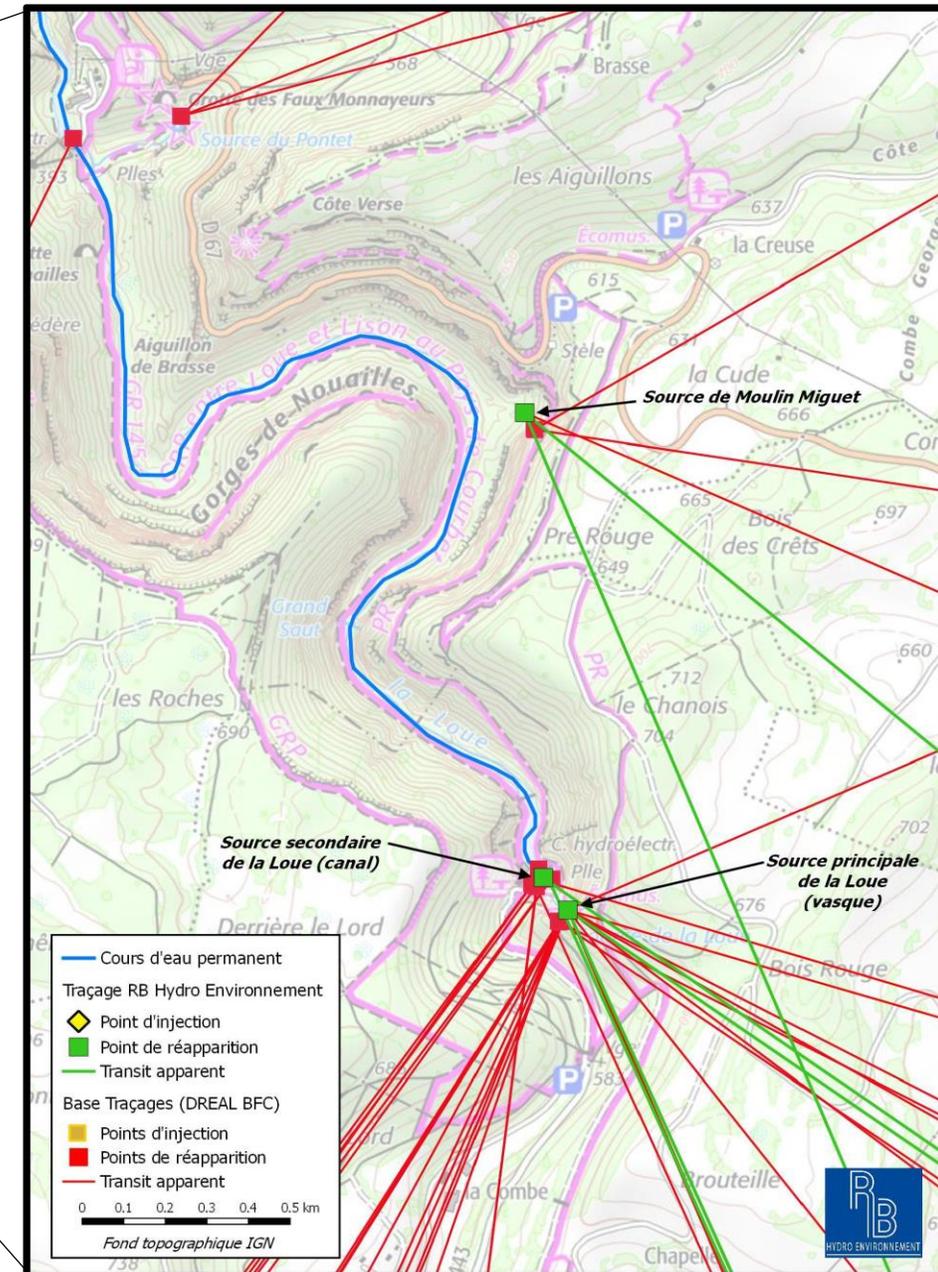
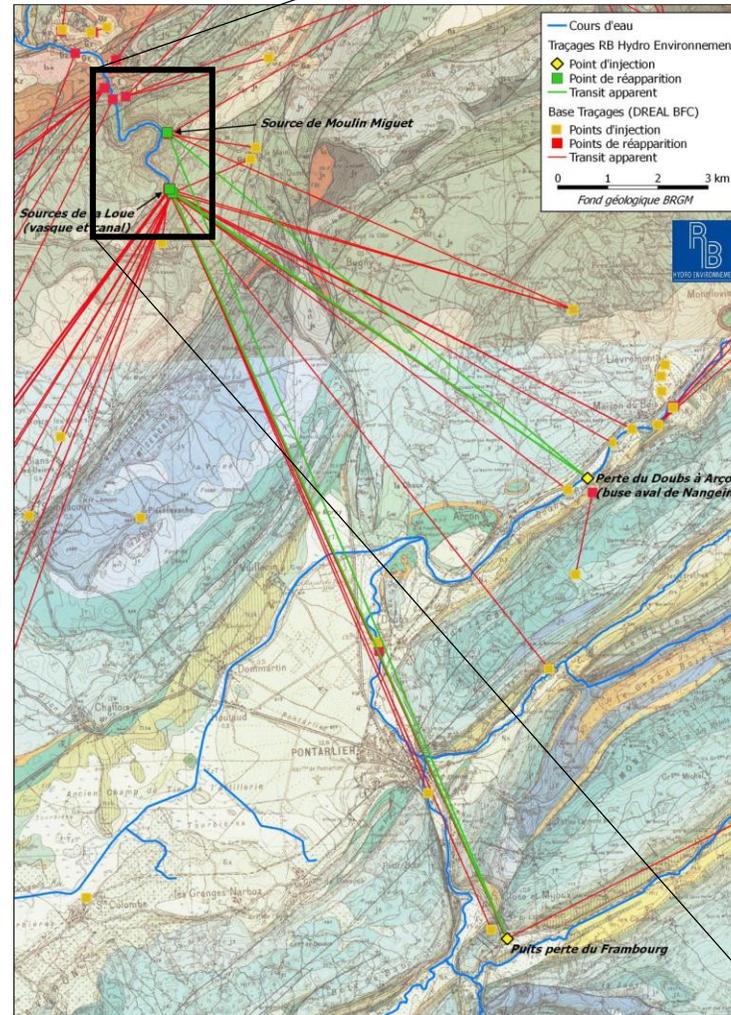


# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : traçages artificiels

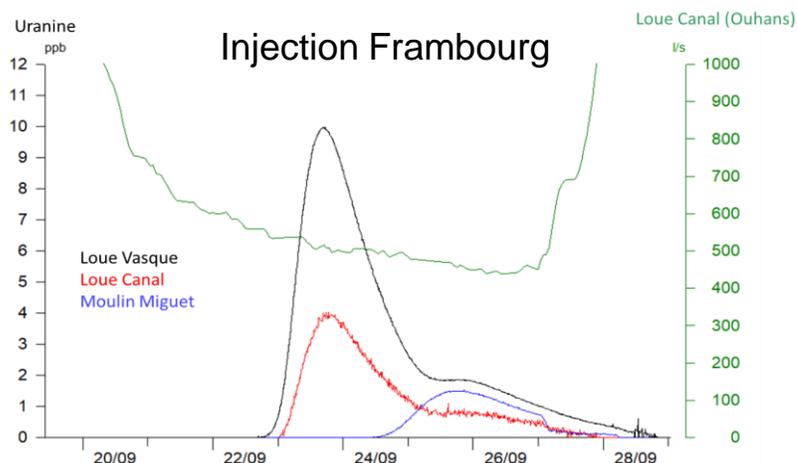
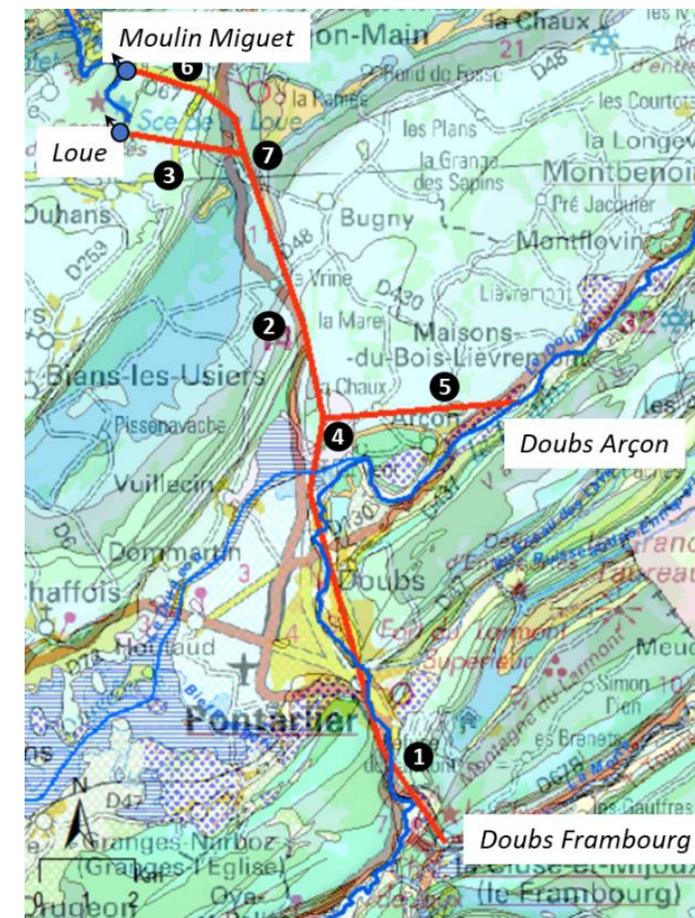
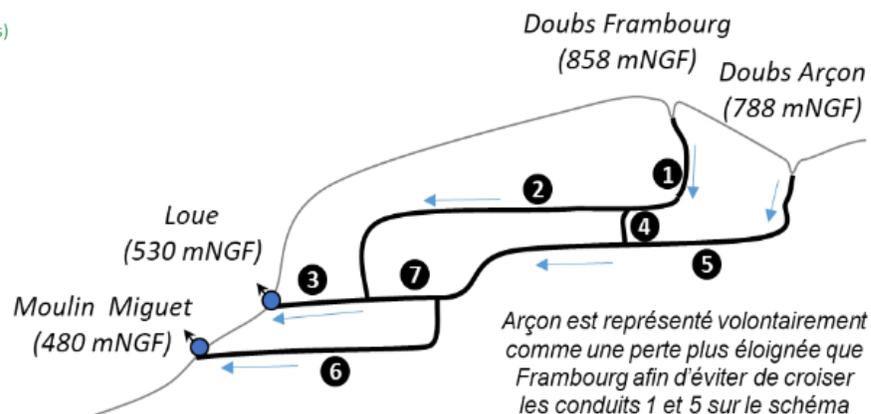
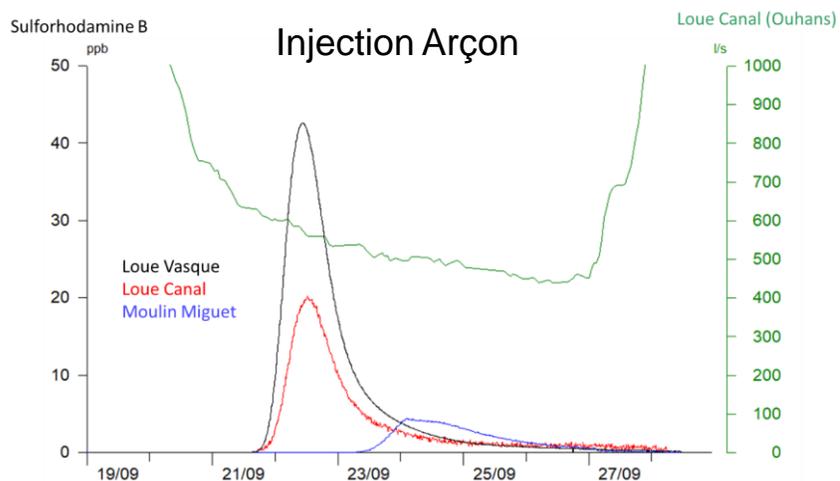
Multitraçage des zones de pertes du Doubs (Arçon et Frambour)

- Restitution :
  - Loue vasque
  - Loue canal
  - Moulin-Miguet
- Réalisation et suivi : RB Environnement



# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : traçages artificiels

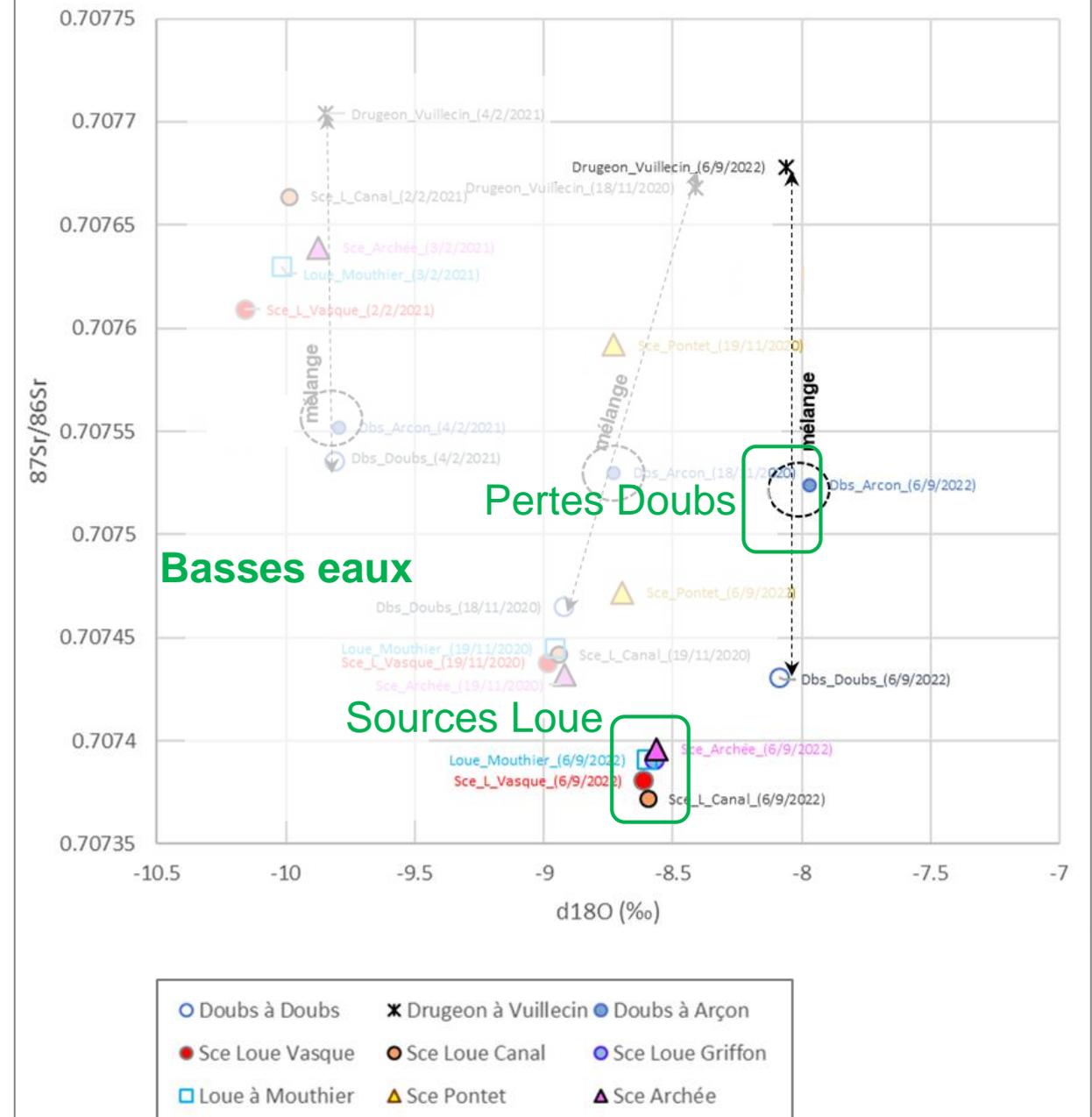
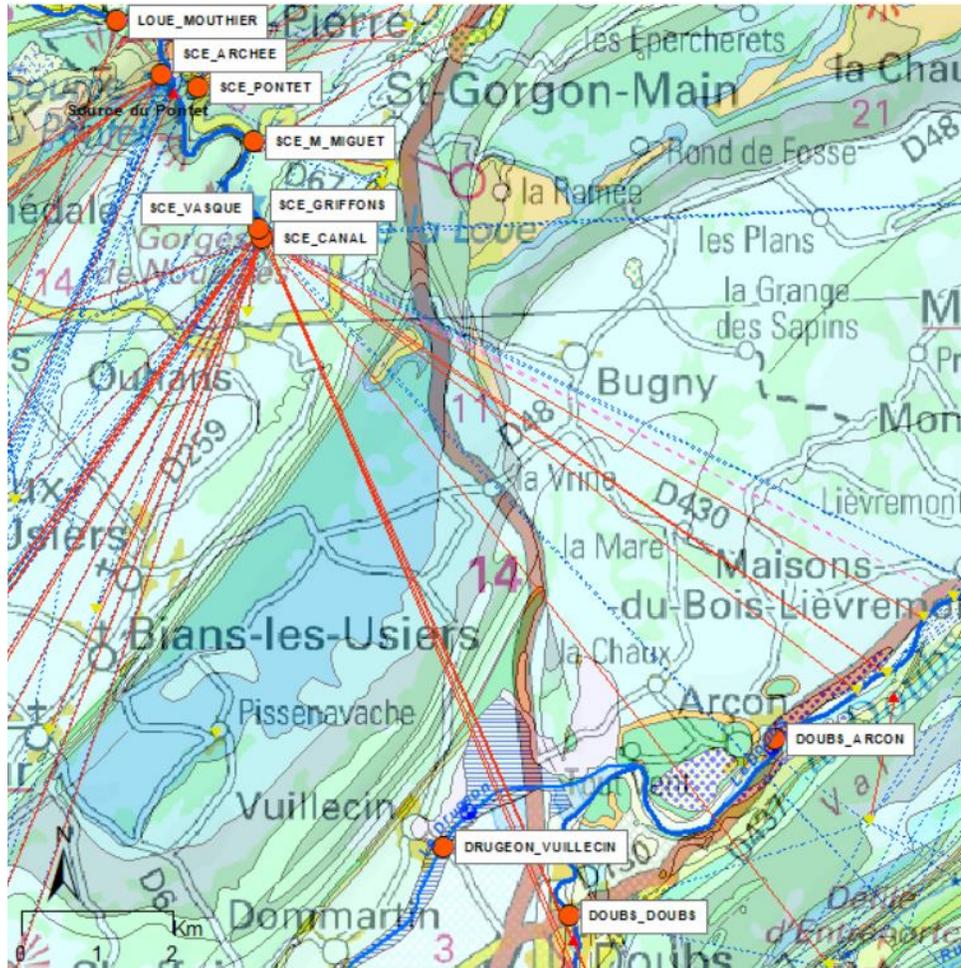


- **2 chemins indépendants**
- diffluence 2-4 depuis Frambourg
- diffluence 6-7 entre Loue et M. Miguet

**=> polyphasage du réseau cohérent avec l'existence de plusieurs réseaux & exutoires étagés**

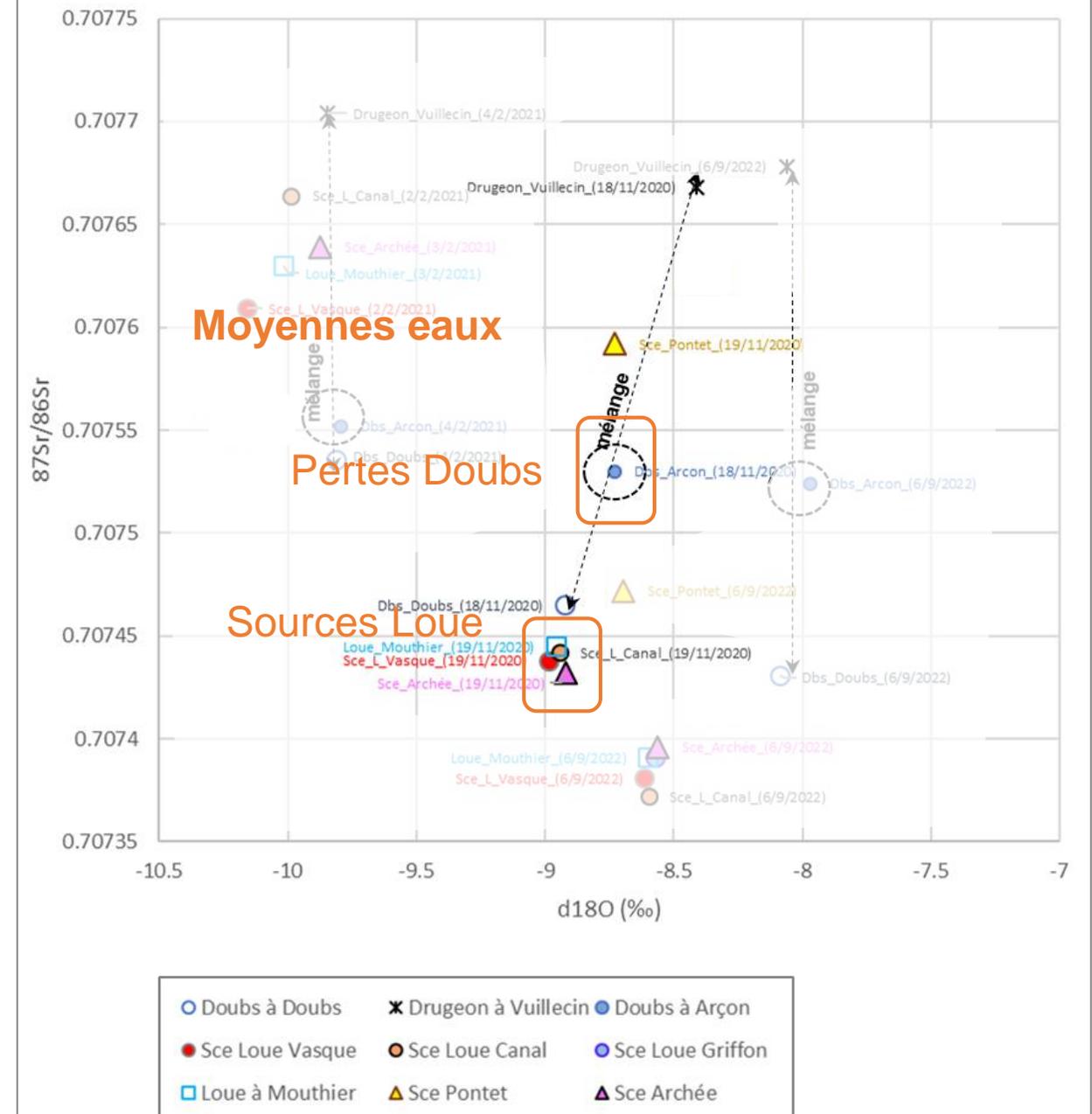
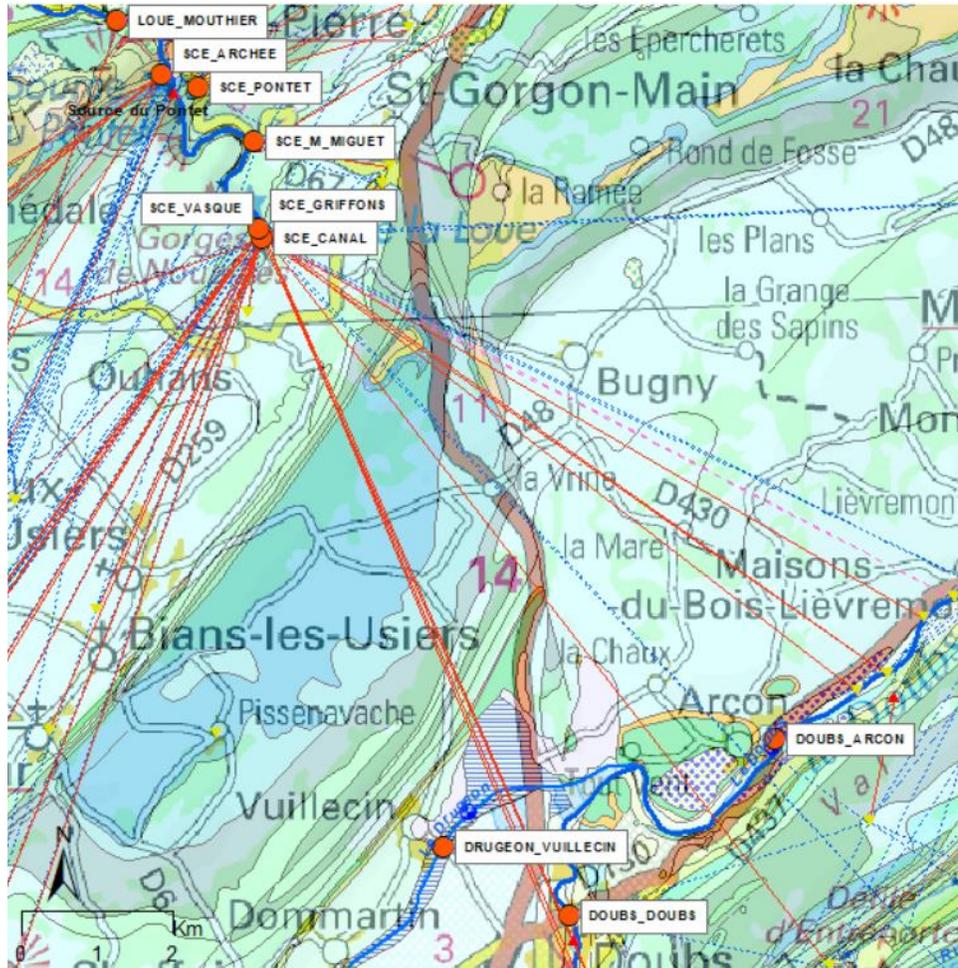
# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : approche isotopique



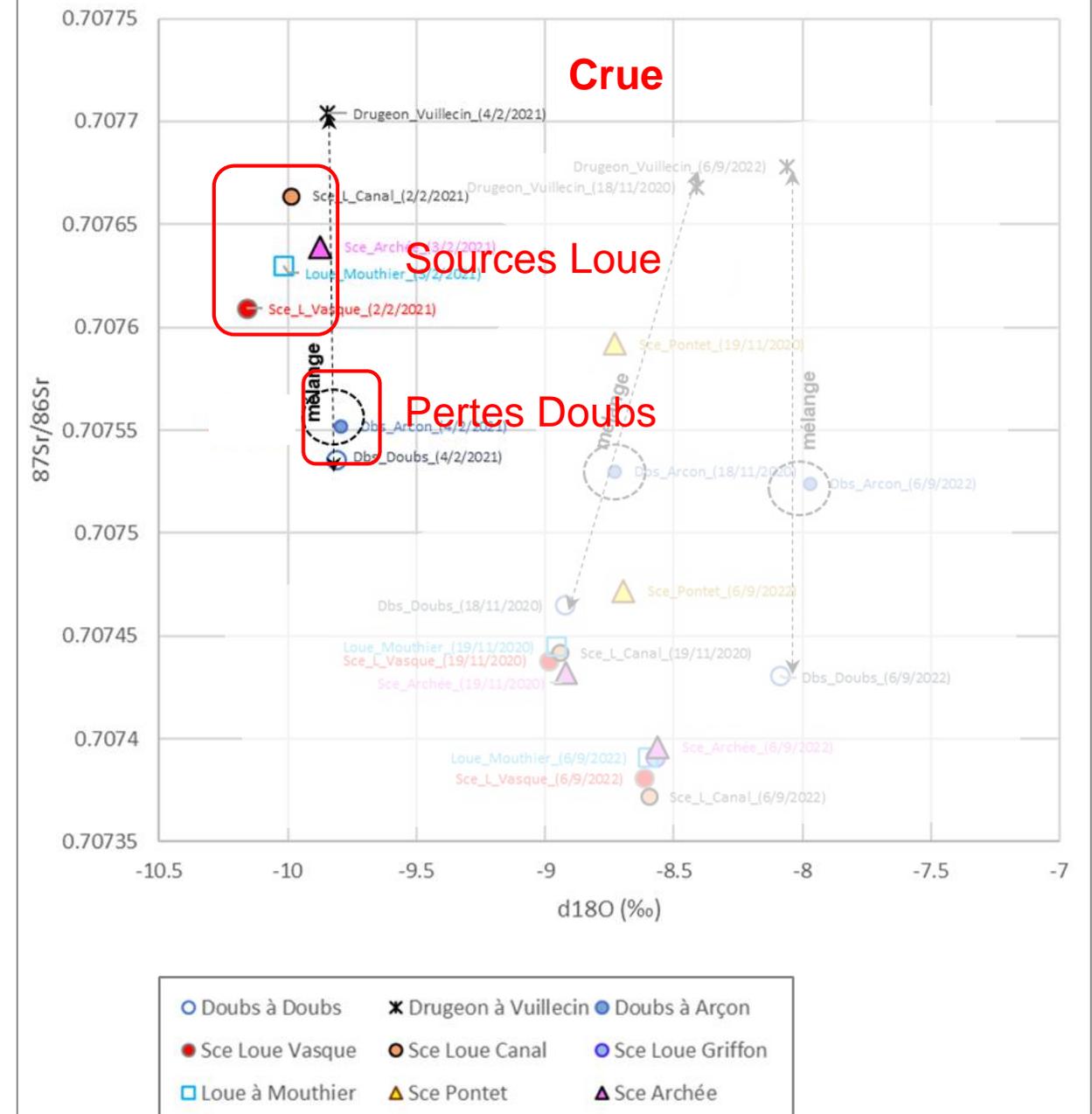
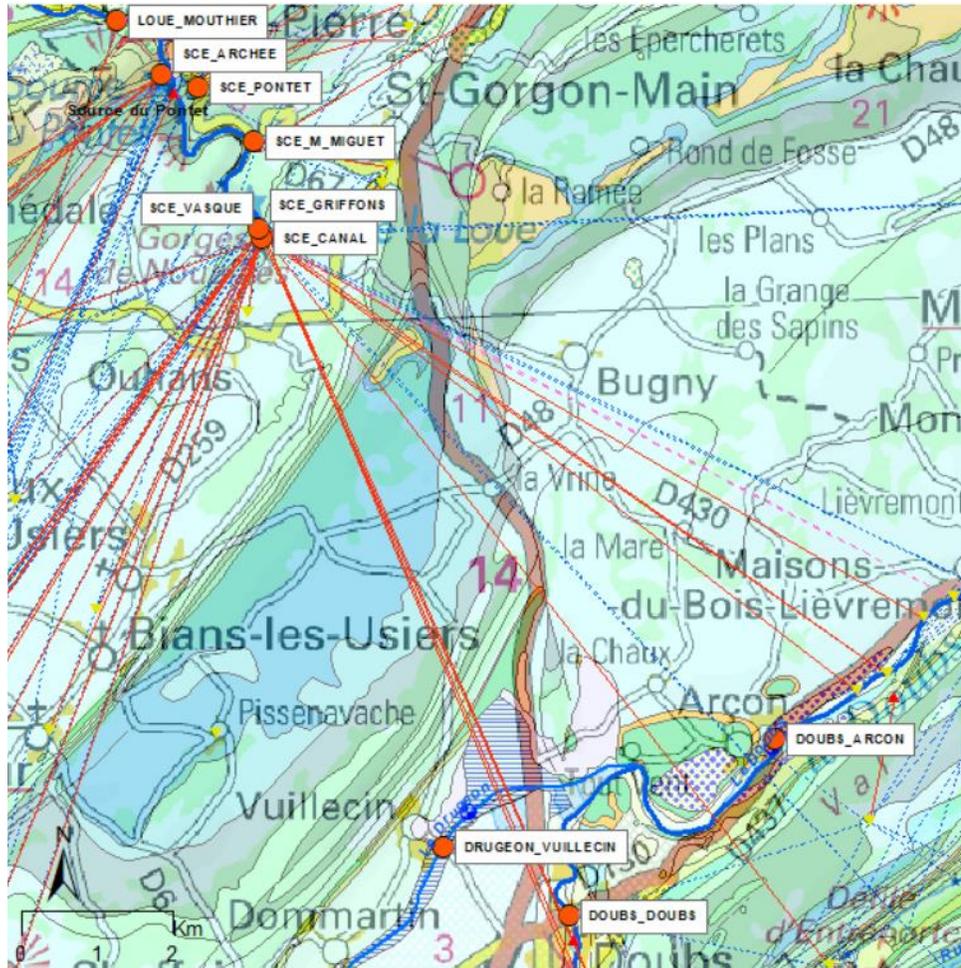
# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : approche isotopique



# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : approche isotopique



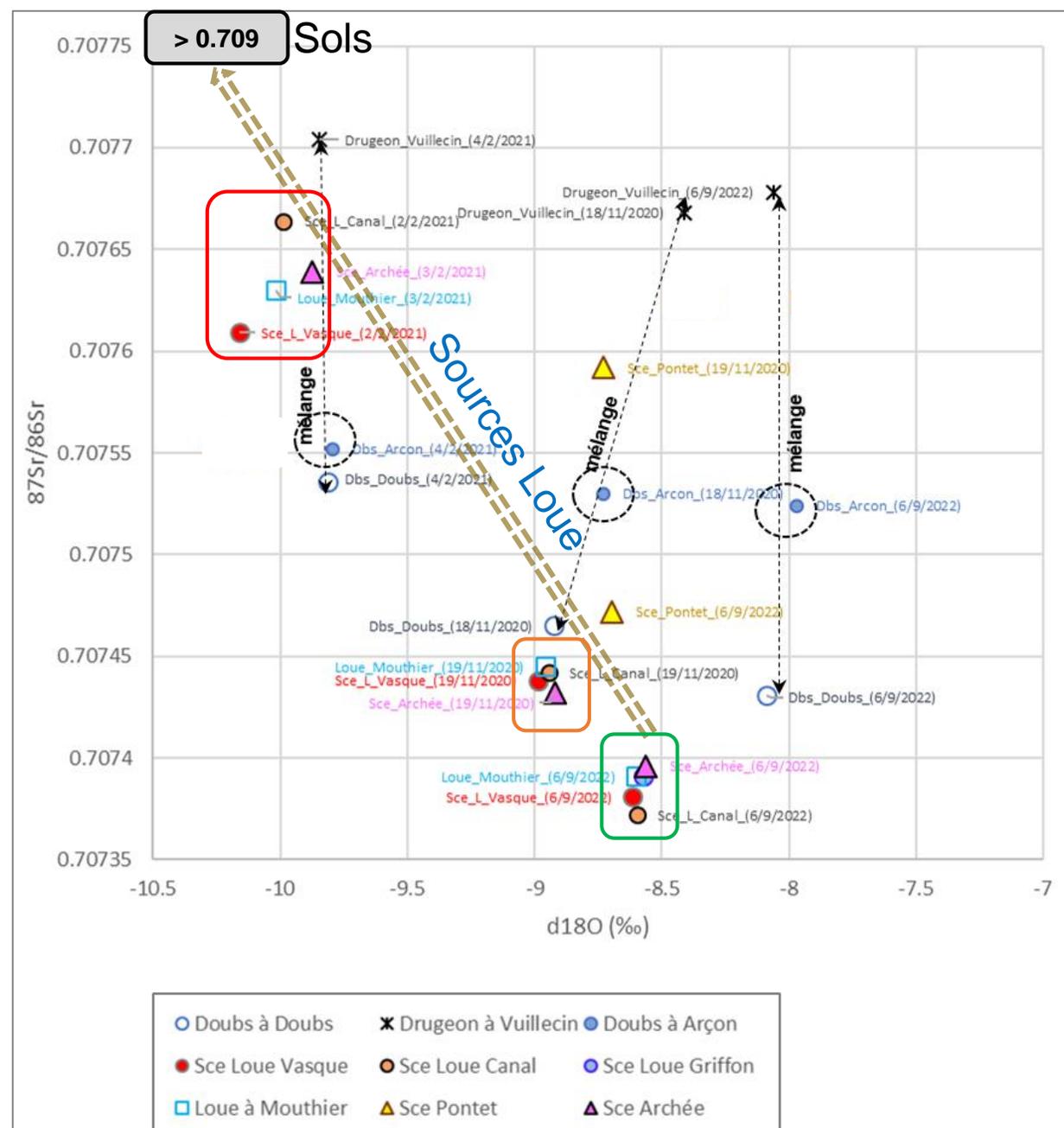
# Hydrosystème des sources de la Loue

## Relations Doubs-Loue : approche isotopique

Signature géochimique des **sources de la Loue** :

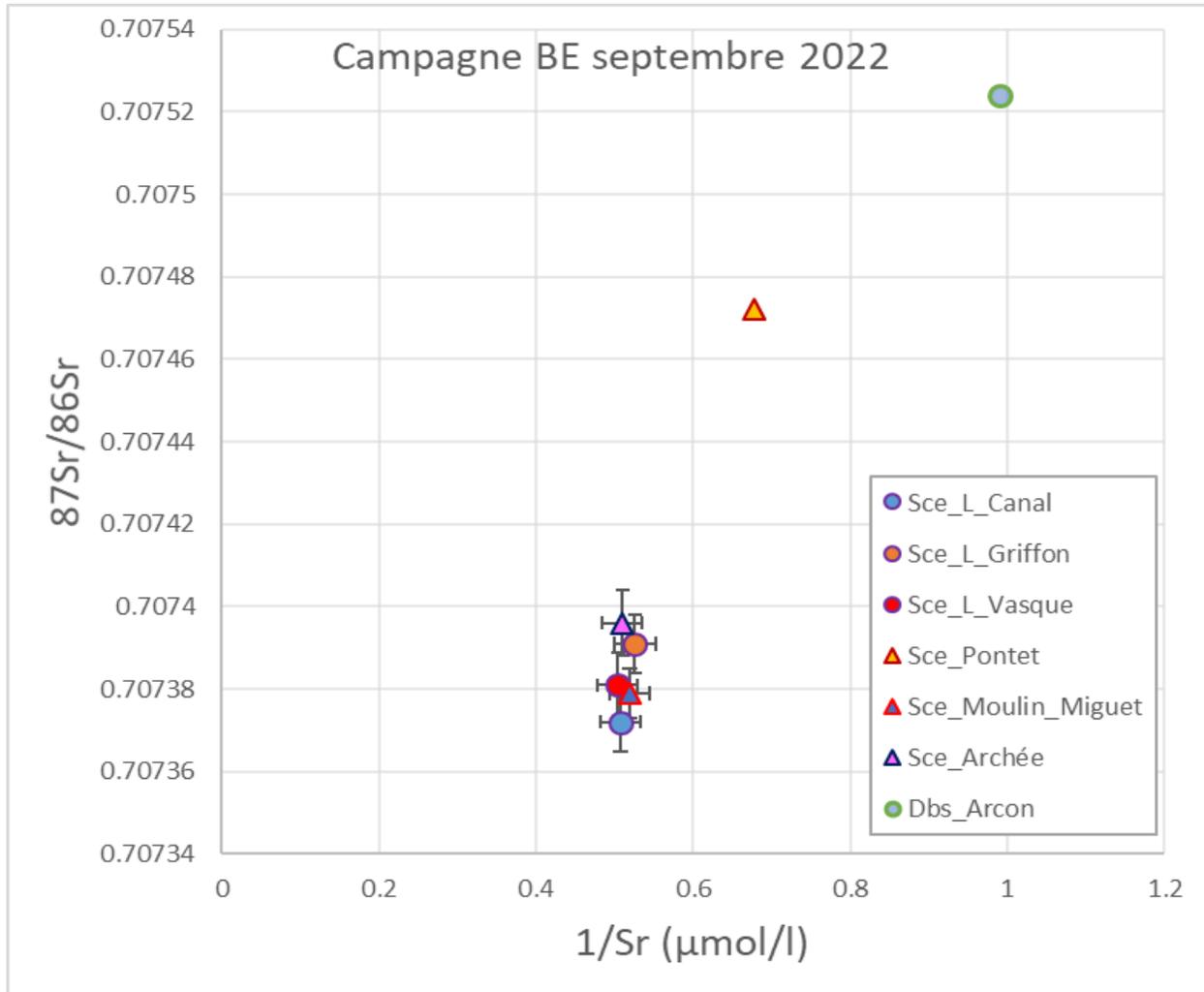
- **peu expliquée par les pertes du Doubs**, quel que soit les conditions hydrologiques
- **influencée par la recharge diffuse** (signature « sols »)
- Ex. de la forte crue de février 2021 : part de l'eau d'infiltration ayant transité par le sol à l'écoulement =  $75\% \pm 5\%$

⇒ **Signature des pertes du Doubs masquées par l'importance de la recharge diffuse quel que soit les conditions hydrologiques**



# Hydrosystème des sources de la Loue

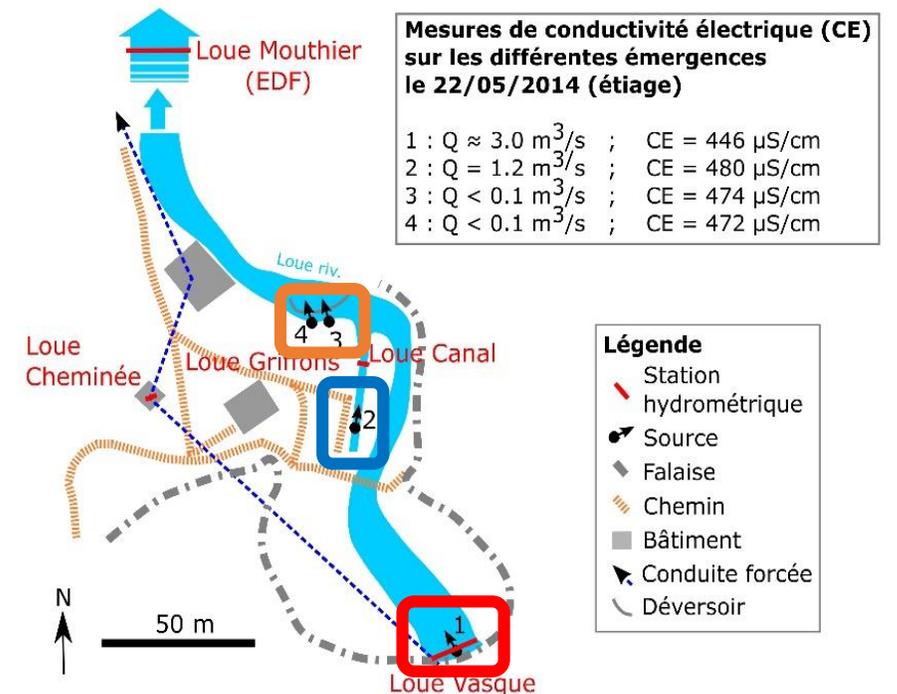
## Différenciation de la signature géochimique des émergences



Différenciation entre :

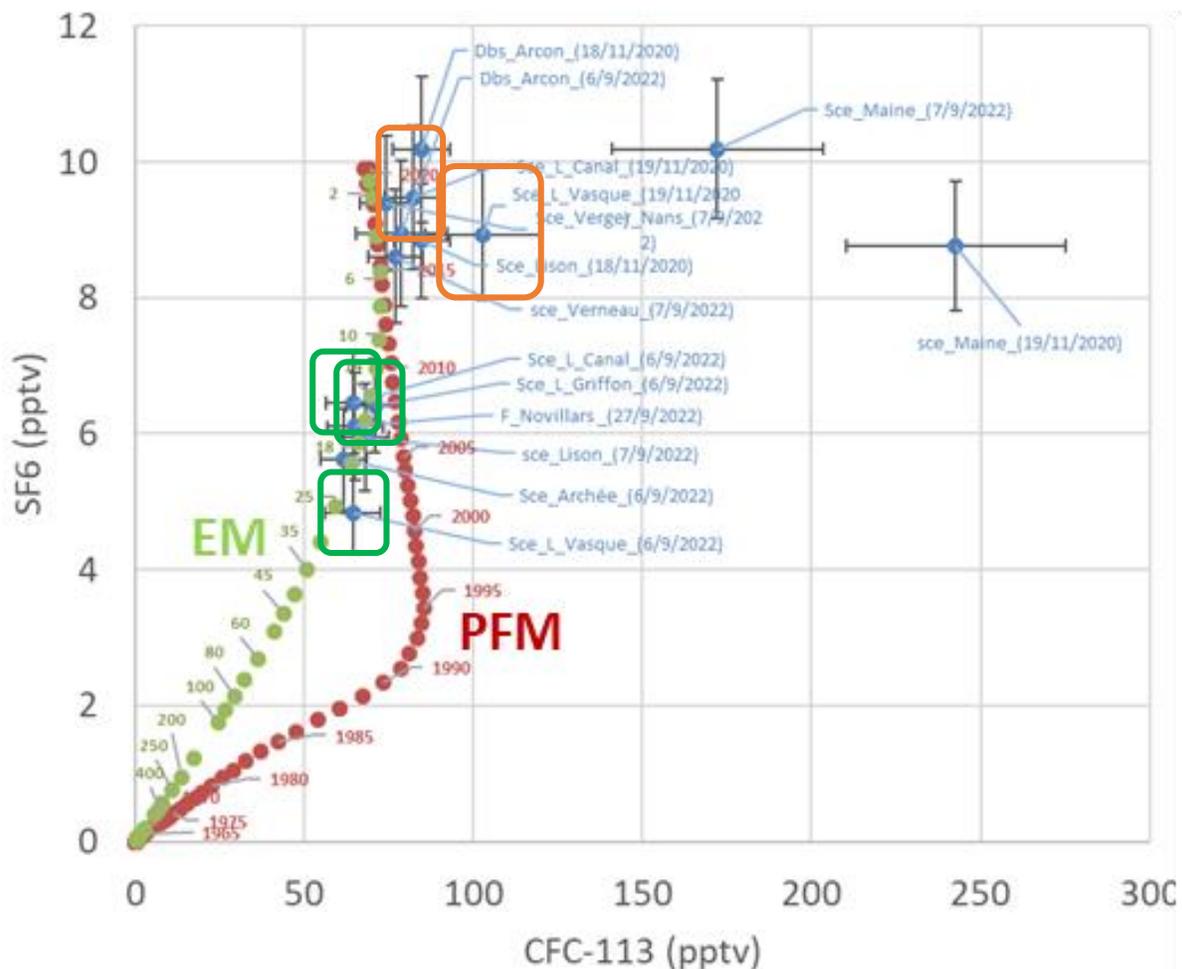
- Loue vasque & M. Miguet
- Loue canal
- Loue Griffon proche de B. Archée

=> compartimentation de l'aquifère



# Hydrosystème des sources de la Loue

## Datation des eaux – temps de résidence



=> Modèle exponentiel 'EM' = nappe libre avec mélange

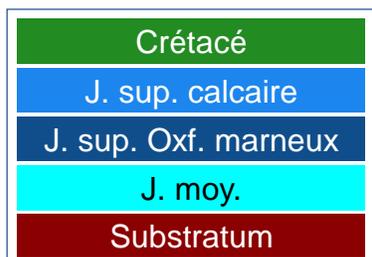
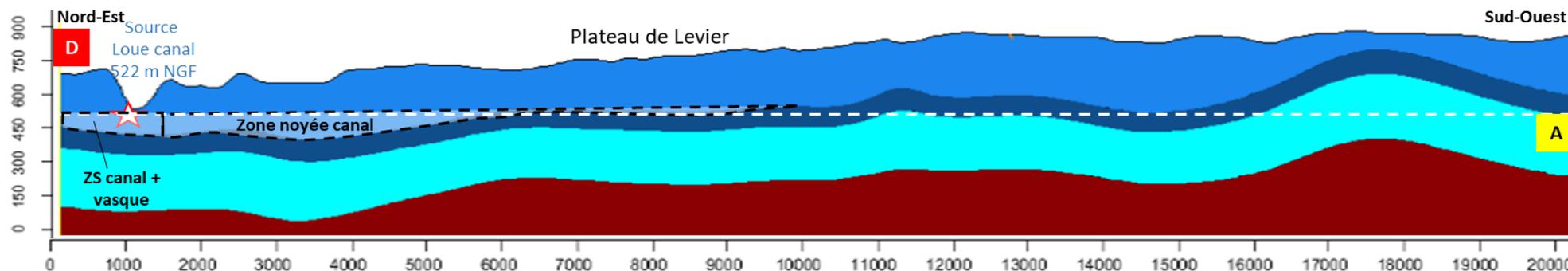
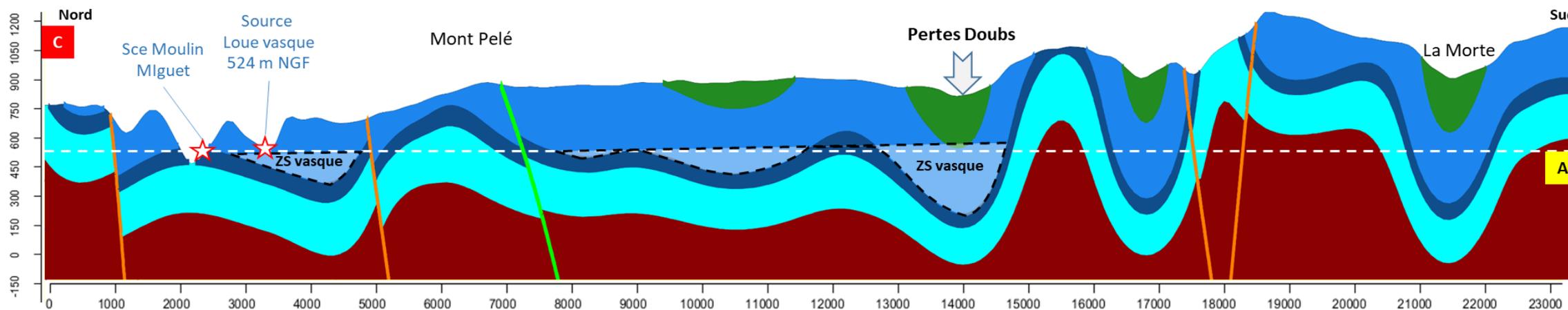
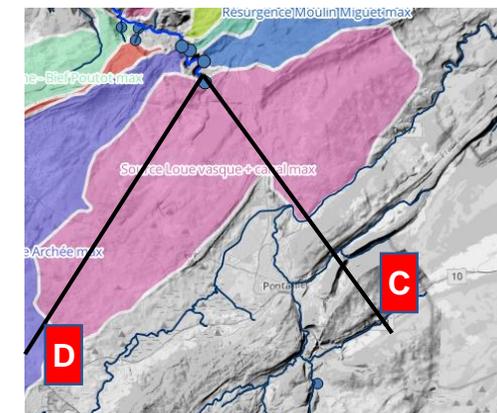
## Analyses CFC/SF6 et gaz noble (Ne, Ar) pour datation des eaux

- *Loue vasque*
  - *Loue canal*
  - *Loue griffons*
- **Basses eaux** : temps résidence ~ 15-20 ans
- **Moyennes eaux** : temps résidence (<1 an), en lien avec recharge des précipitations
- *Cohérent avec ré-interprétation données Tritium – années 75-80*

# Hydrosystème des sources de la Loue

## Schéma conceptuel

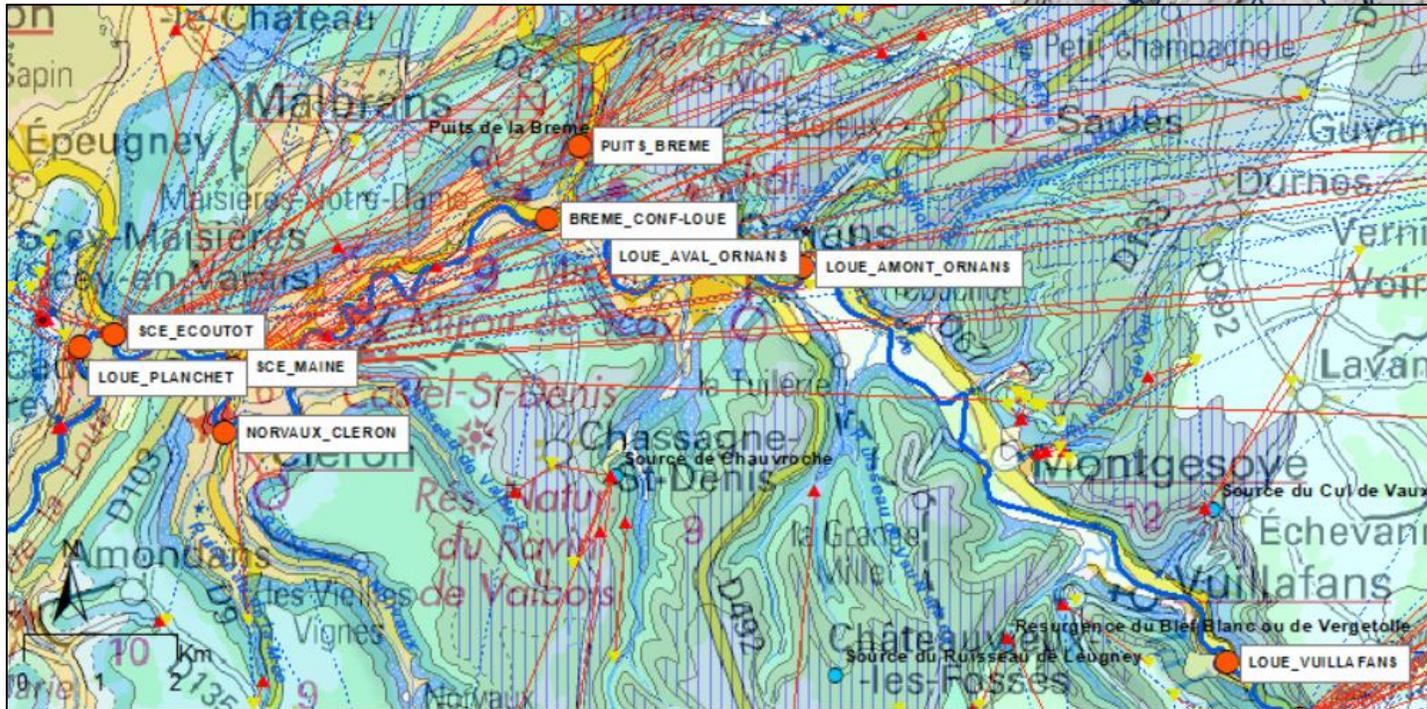
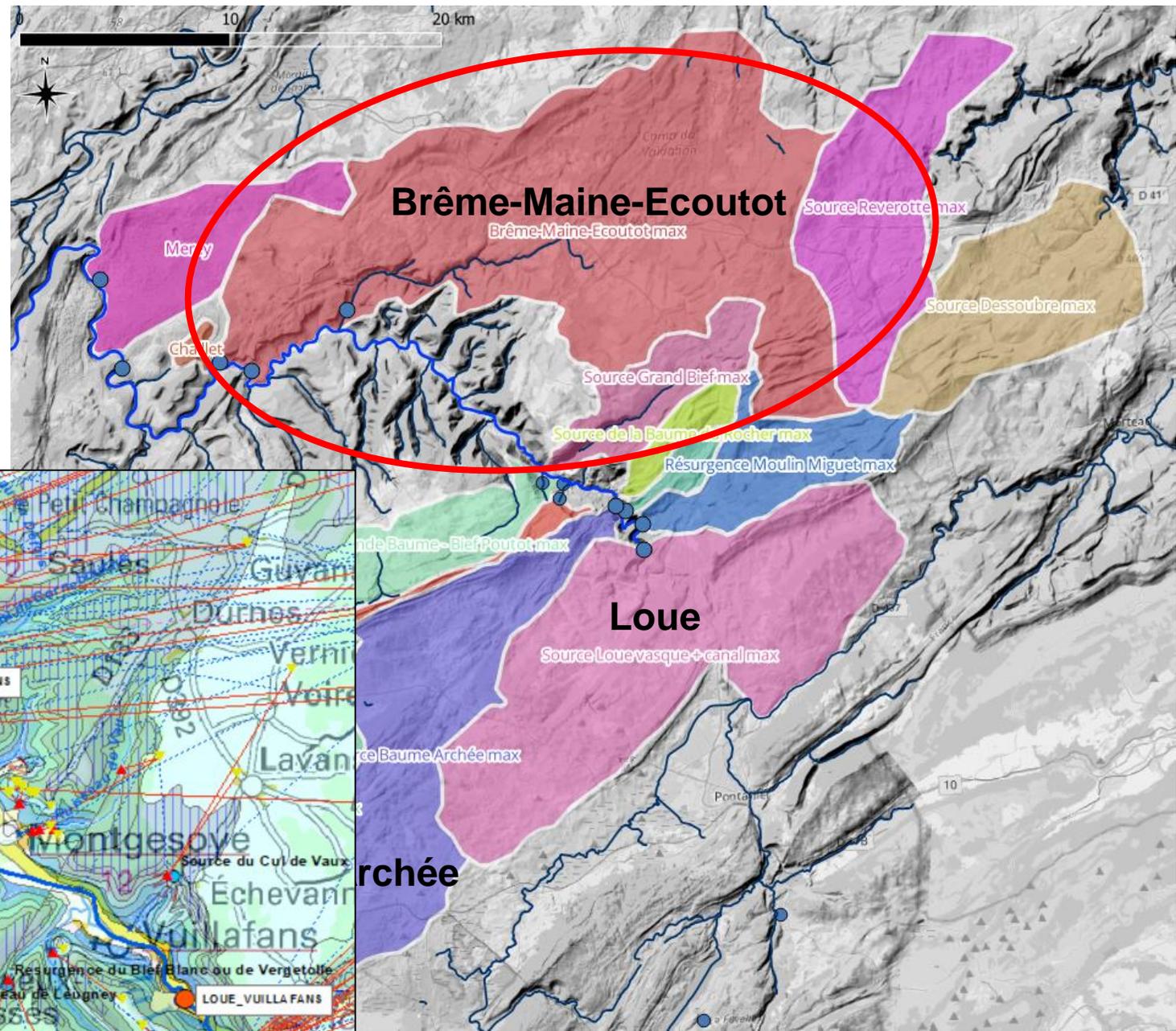
- **Compartimentation Est-Ouest** : Vasque / canal / griffons
- Etagement du karst -> connection Moulin Miguet
- **Zone noyée conséquente dans Jurassique sup.** -> synclinaux Haute-Chaîne?
- **Recharge diffuse contribue fortement au débit** malgré l'importance des pertes du Doubs





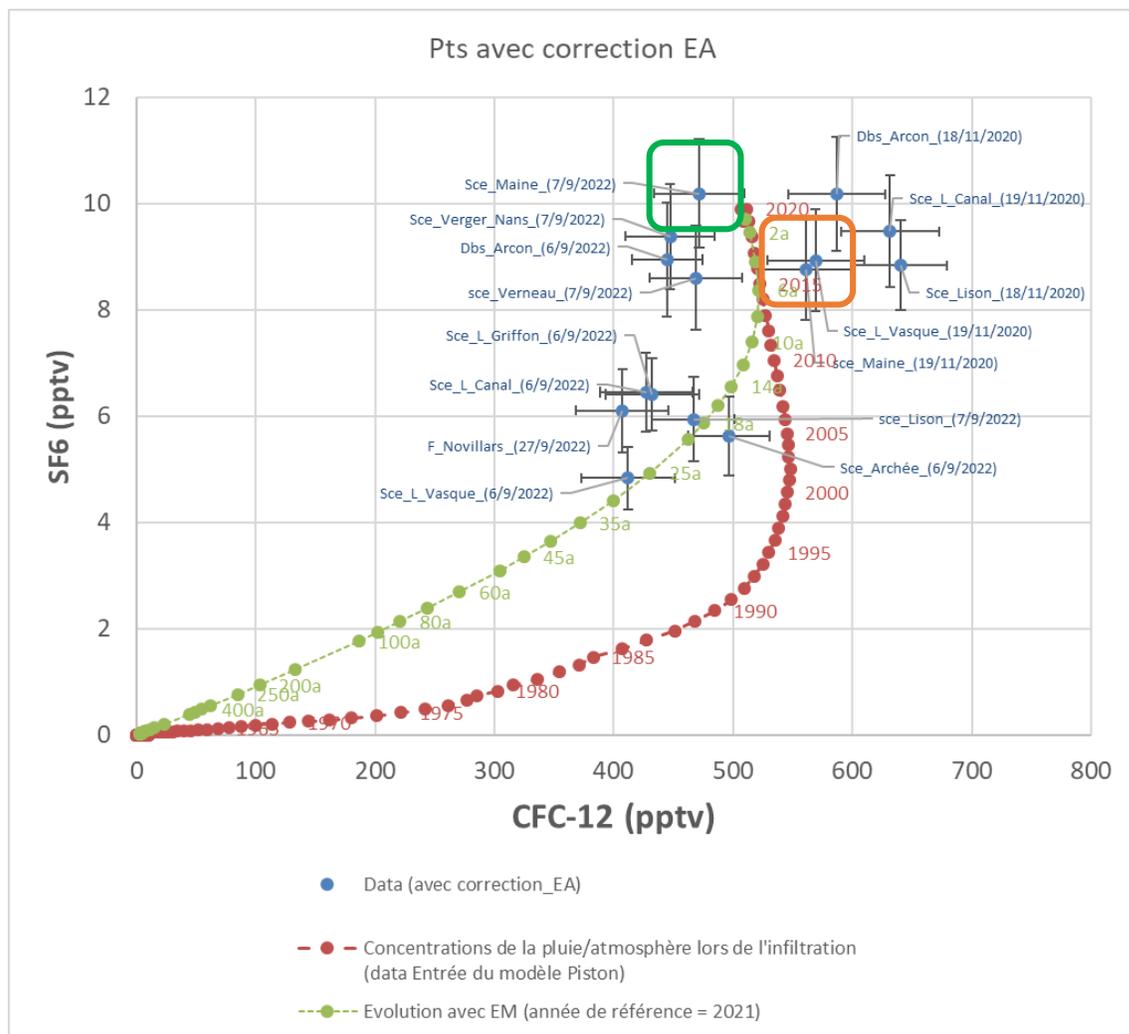
# Hydrosystème Brême – Maine - Ecoutôt

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Datation des eaux – temps de résidence



## Analyses CFC/SF6 et gaz noble (Ne, Ar) pour datation des eaux

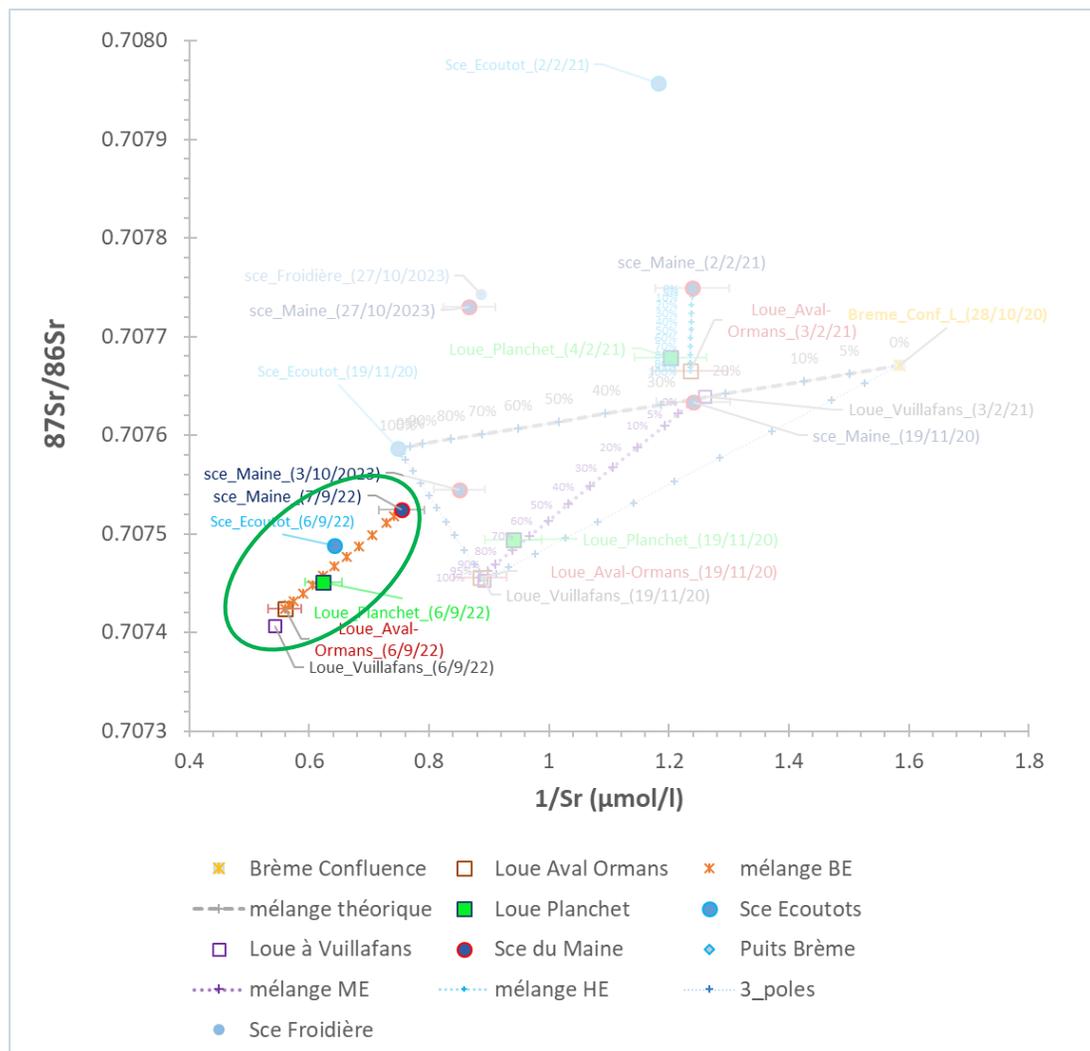
- Basses eaux : temps résidence ~ 1 an
- Moyennes eaux : ~ 1.5 ans
- Cohérent avec ré-interprétation données Tritium – années 75-80

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Débit de la source du Maine

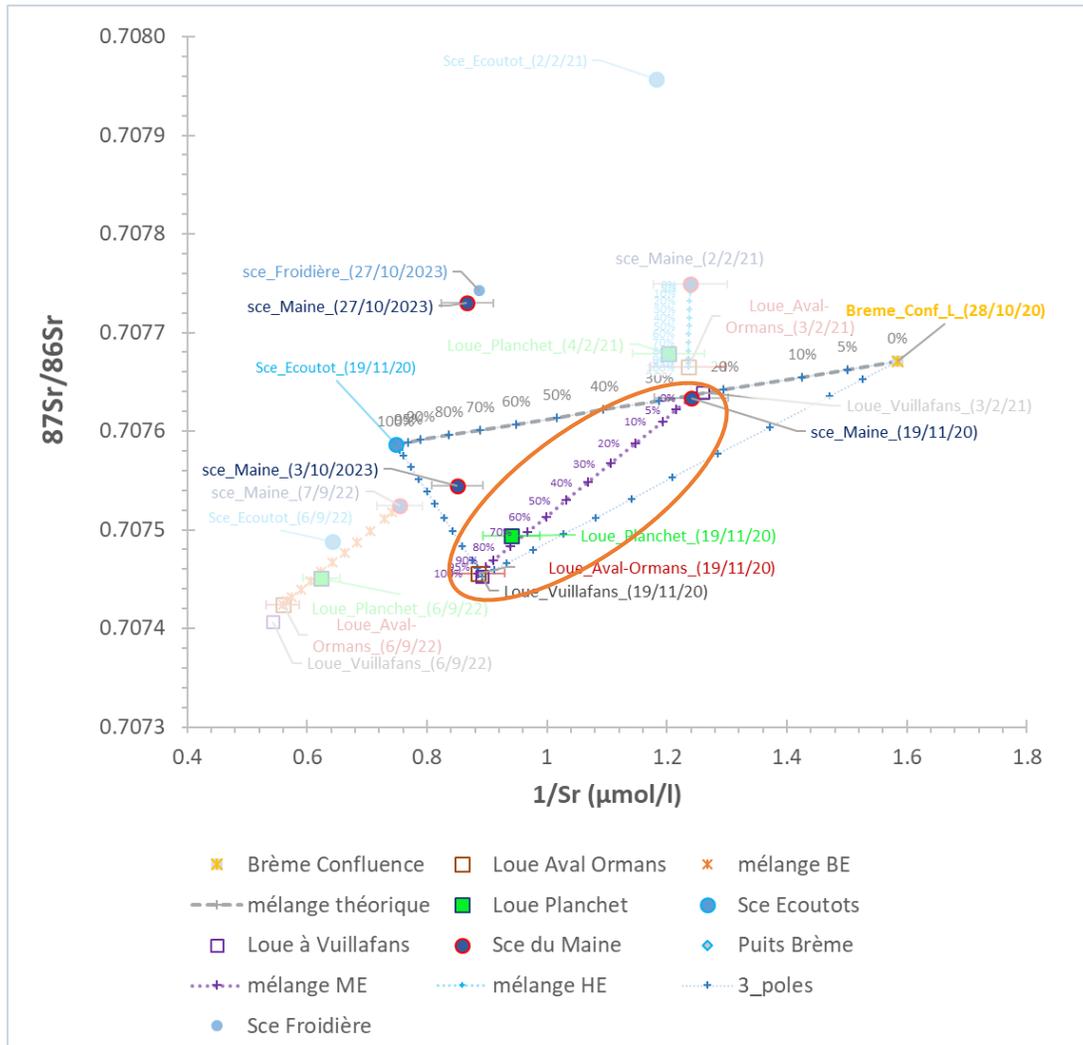
## Maine

➤ Basses eaux : 35% de la Loue



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Débit de la source du Maine



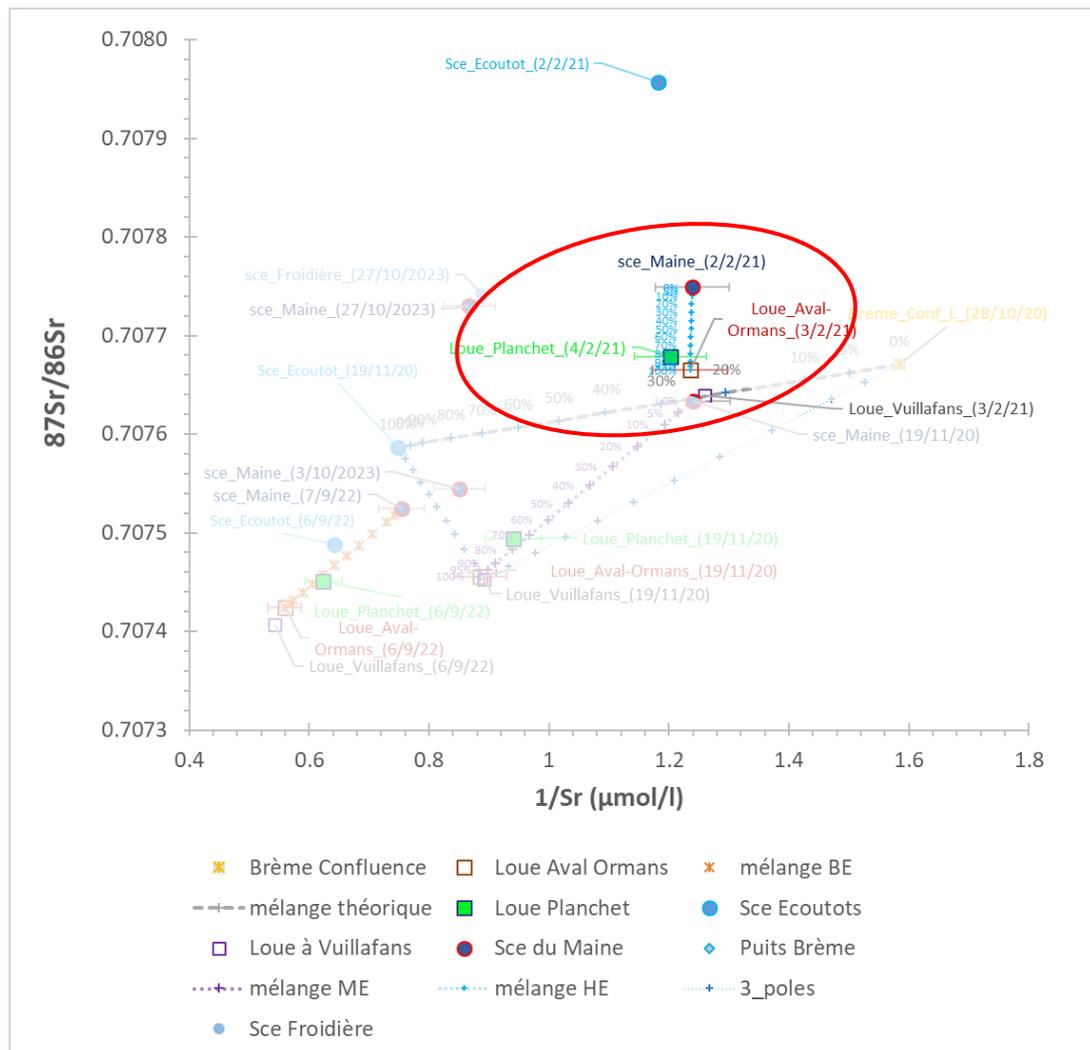
## Maine

➤ **Basses eaux** : 35% de la Loue

➤ **Moyennes eaux** : 25% de la Loue

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Débit de la source du Maine



## Maine

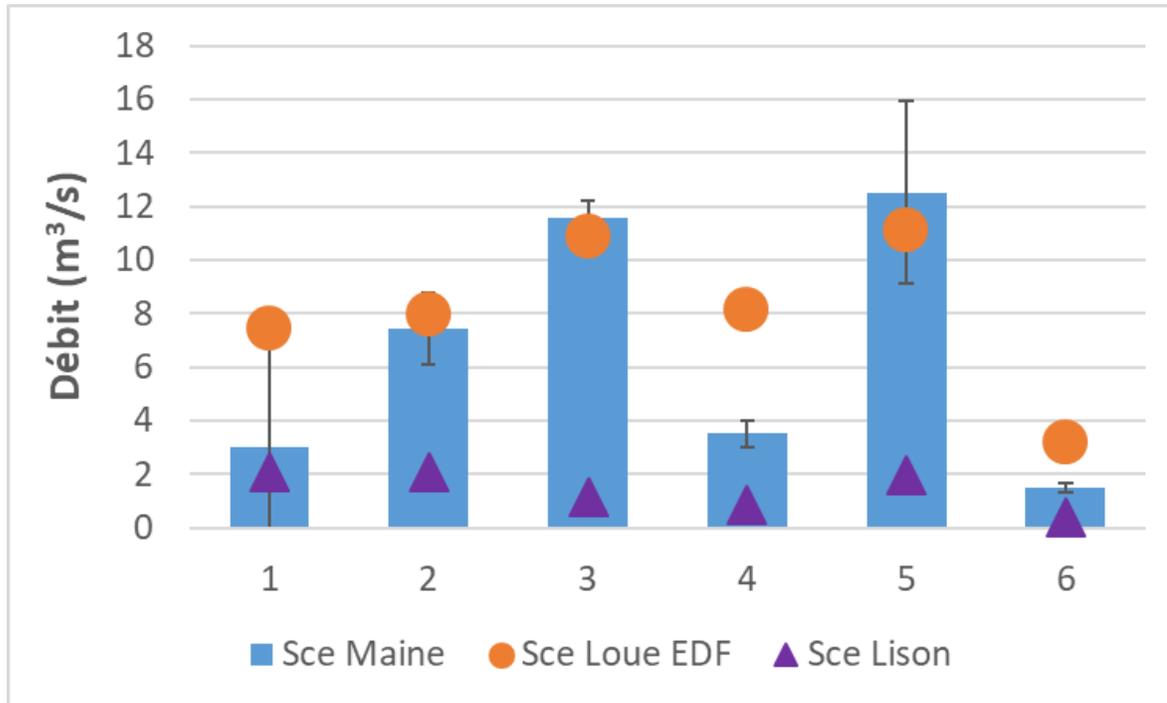
- **Basses eaux** : 35% de la Loue
- **Moyennes eaux** : 25% de la Loue
- **Hautes eaux** : masqué par le fort débit de la Loue

## Ecoutôt

Se différencie de Maine quel que soit les conditions hydrologiques

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Débit de la source du Maine



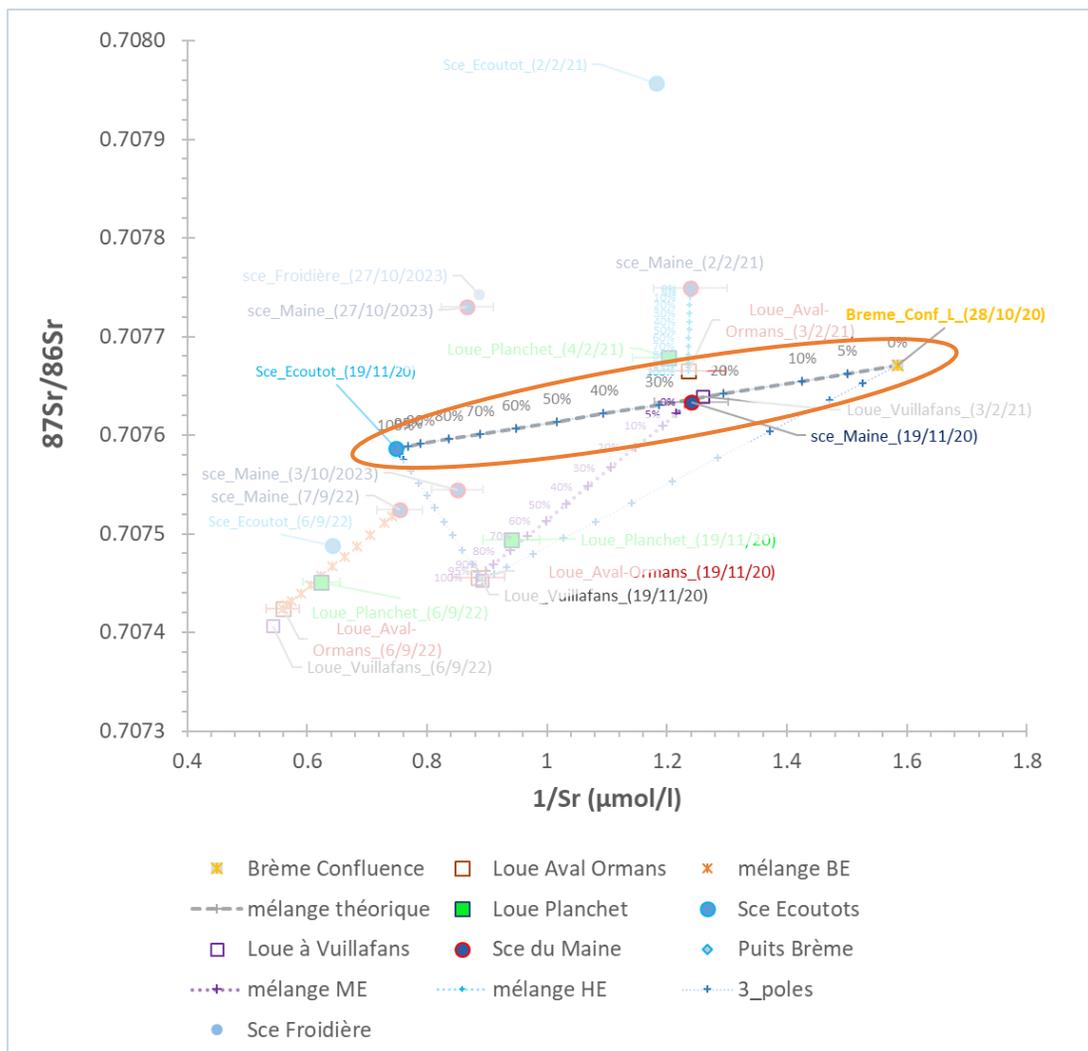
**Estimation du débit du Maine à partir des contrastes géochimiques et des stations DREAL (Vuillafans, Myon et Chenecey-Buillon)**

**Basses eaux** : débit du Maine compris entre les débits des sources du Lison et de la Loue  
 $Q \sim 1.5 - 4 \text{ m}^3/\text{s}$

**Moyennes eaux** : débit proche de celui des sources de la Loue  
 $Q \sim 6 - 15 \text{ m}^3/\text{s}$

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Echanges Karst-rivière (Brême)



**Brême – Maine – Ecoutot**  
*lorsque le Puits de la Brême fonctionne en perte (recharge du karst)*

### ➤ Moyennes eaux :

- Ecoutôt = zone noyée du karst
  - Brême = eaux de surface (pas d'inversac)
- ⇒ Maine = 75% Brême et 25% Ecoutôt



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

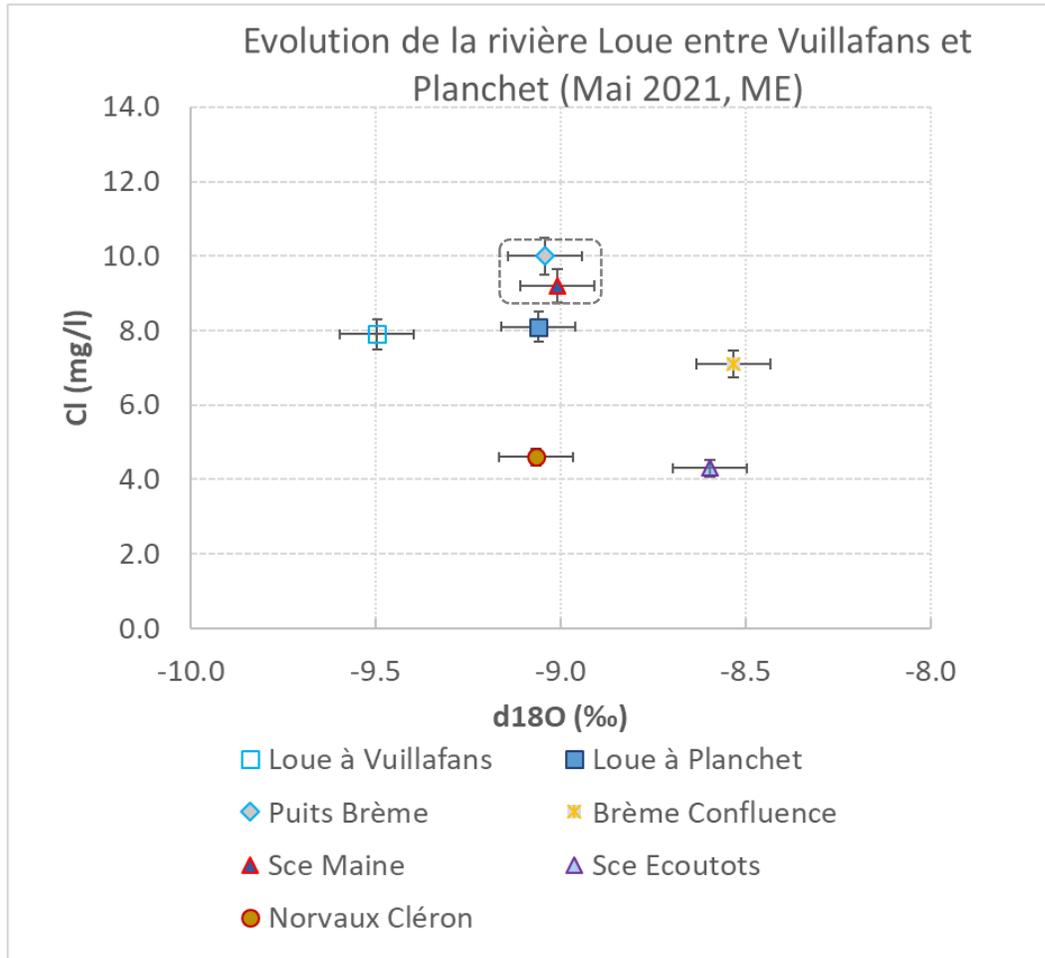
## Echanges Karst-rivière (Brême)

### Brême – Maine – Ecoutot

*lorsque le Puits de la Brême fonctionne en inversac*

➤ **Hautes eaux :**

- Puits de la Brême = Maine



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

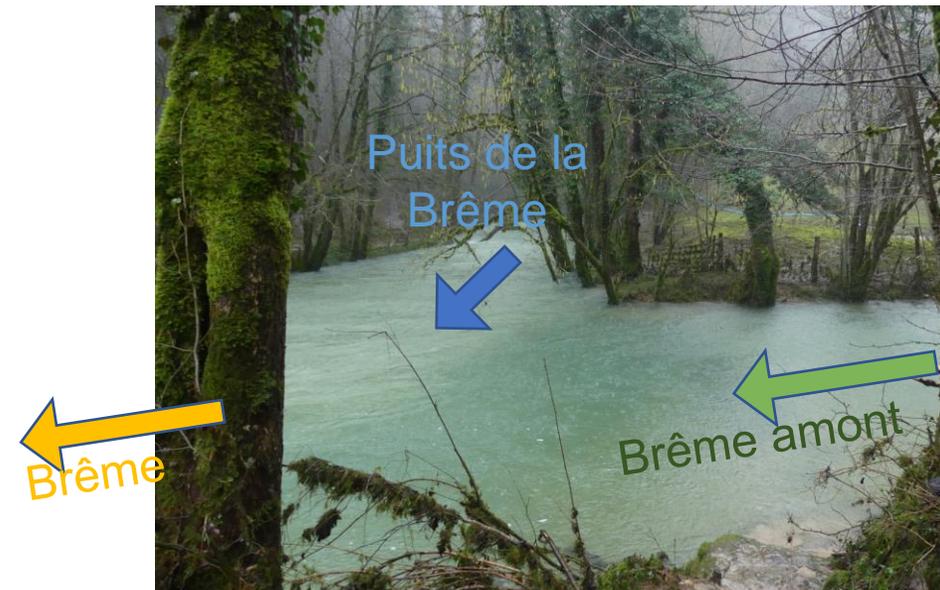
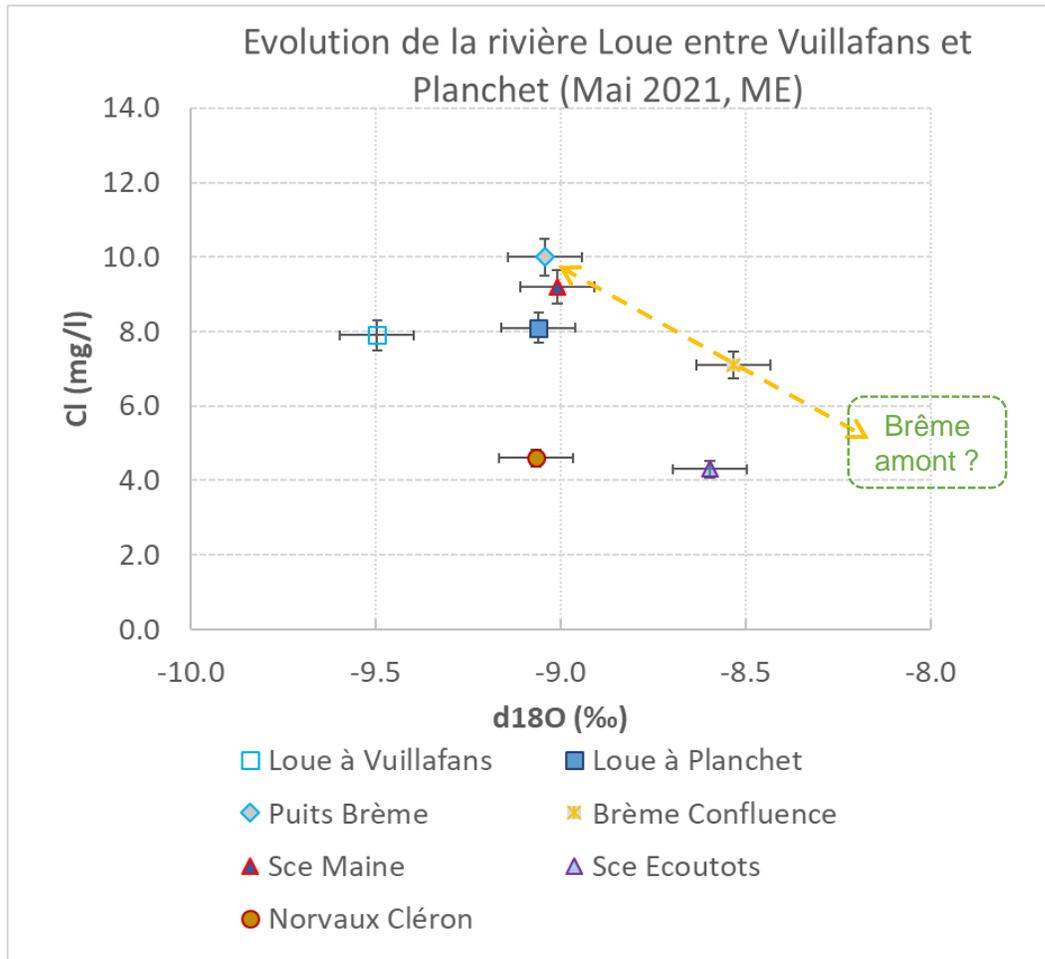
## Echanges Karst-rivière (Brême)

### Brême – Maine – Ecoutot

*lorsque le Puits de la Brême fonctionne en inversac*

➤ **Hautes eaux :**

- Puits de la Brême = Maine
- Brême = mélange Puits Brême + Brême amont



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

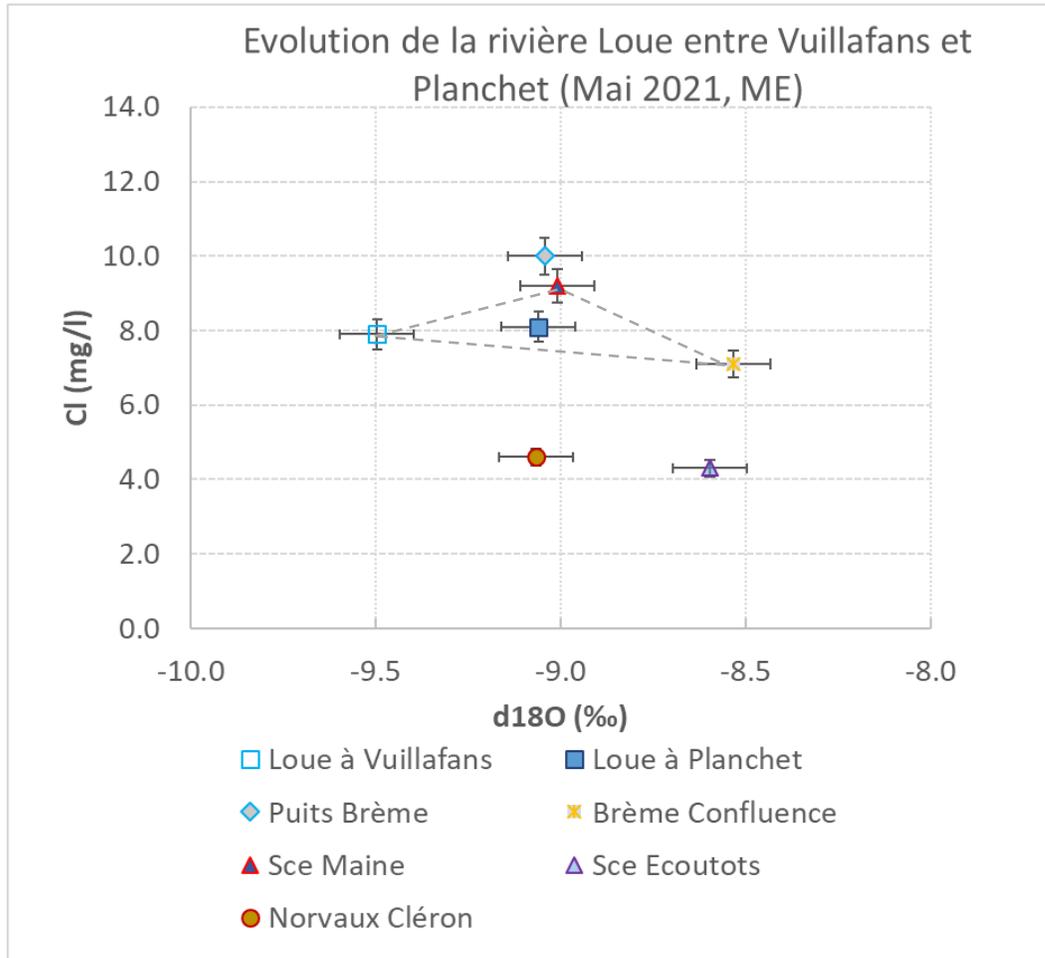
## Echanges Karst-rivière (Brême)

### Brême – Maine – Ecoutot

*lorsque le Puits de la Brême fonctionne en inversac*

#### ➤ Hautes eaux :

- Puits de la Brême = Maine
- Brême = mélange Puits Brême + Brême amont
- Loue aval (Planchet) influencée par Maine + Brême



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

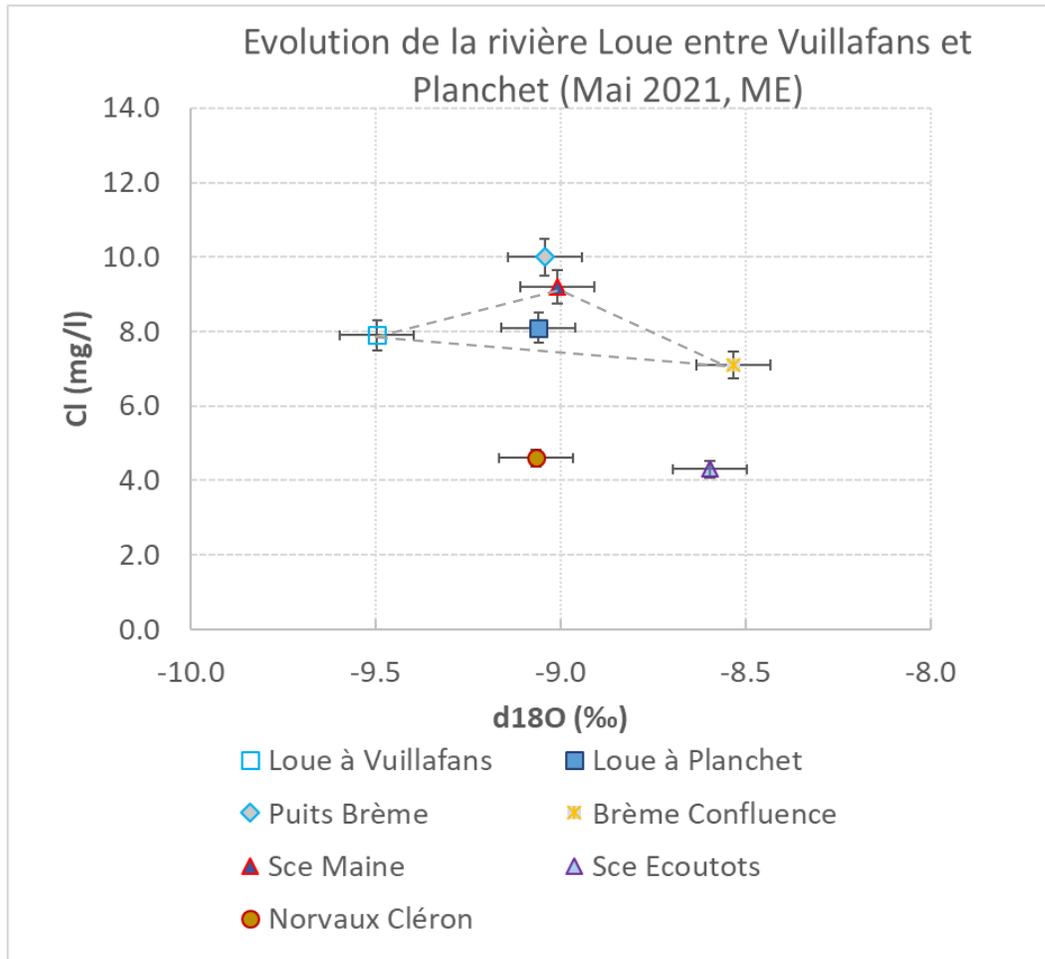
## Echanges Karst-rivière (Brême)

### Brême – Maine – Ecoutot

*lorsque le Puits de la Brême fonctionne en inversac*

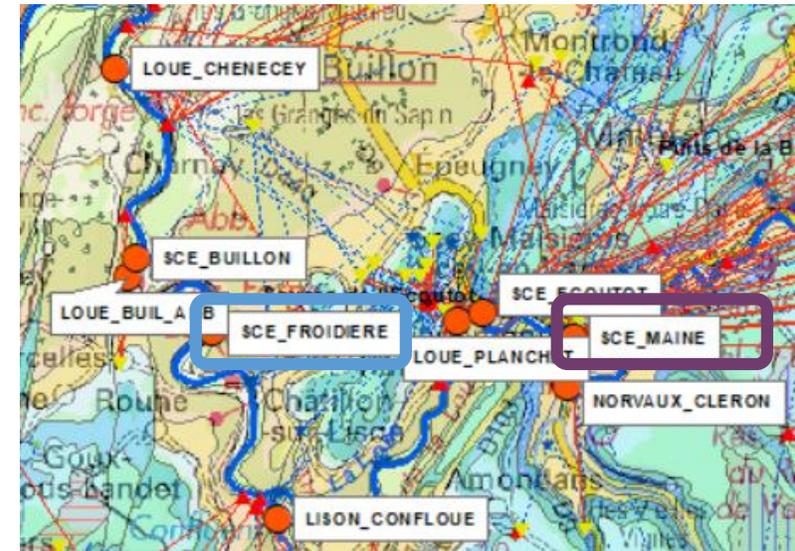
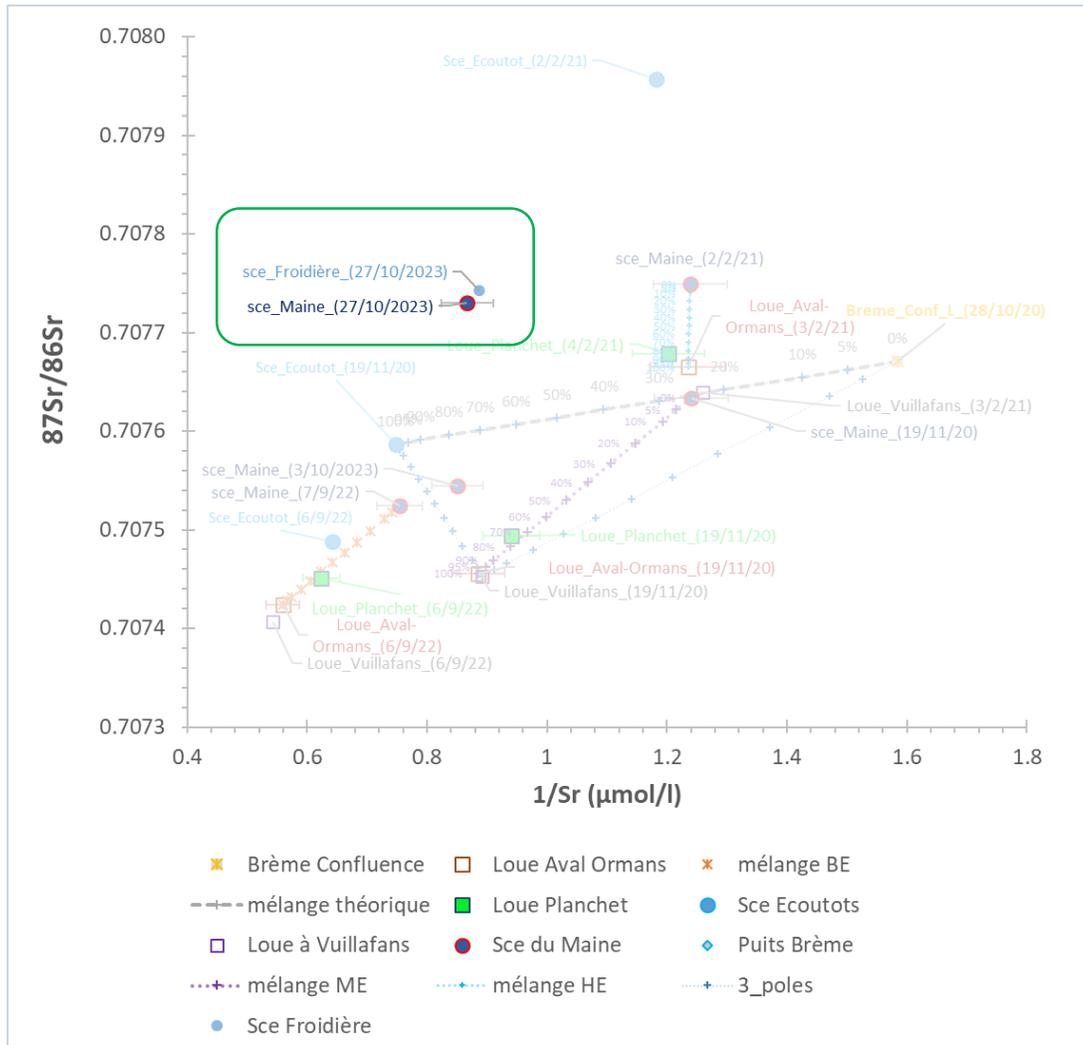
#### ➤ Hautes eaux :

- Puits de la Brême = Maine
- Brême = mélange Puits Brême + Brême amont
- Loue aval (Planchet) influencée par Maine + Brême



# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

## Extension de l'hydrosystème ?



## Source Froidière

### ➤ Basses eaux

Signature géochimique très proche entre **Maine** et source de la **Froidière** (rive droite)

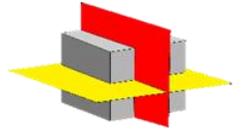
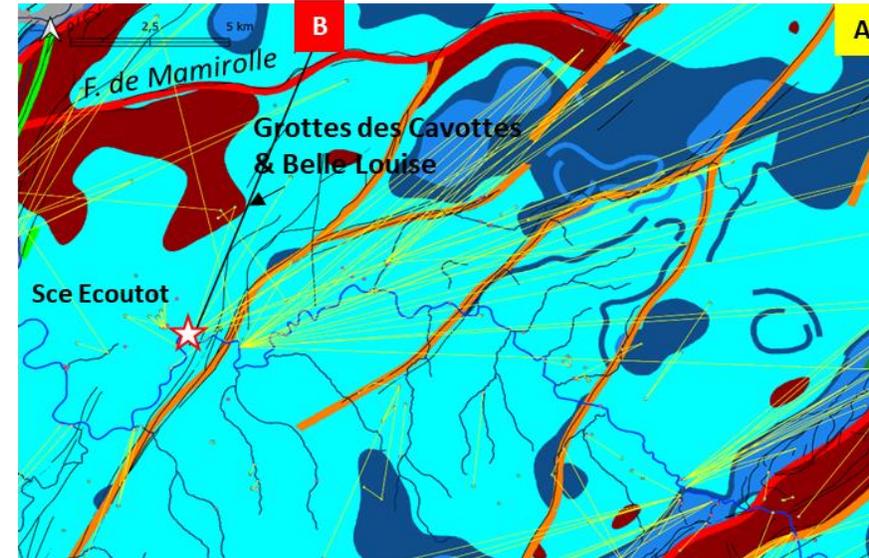
=> Hypothèse d'une extension de l'hydrosystème vers l'aval

# Hydrosystème Brême-Maine-Ecoutot

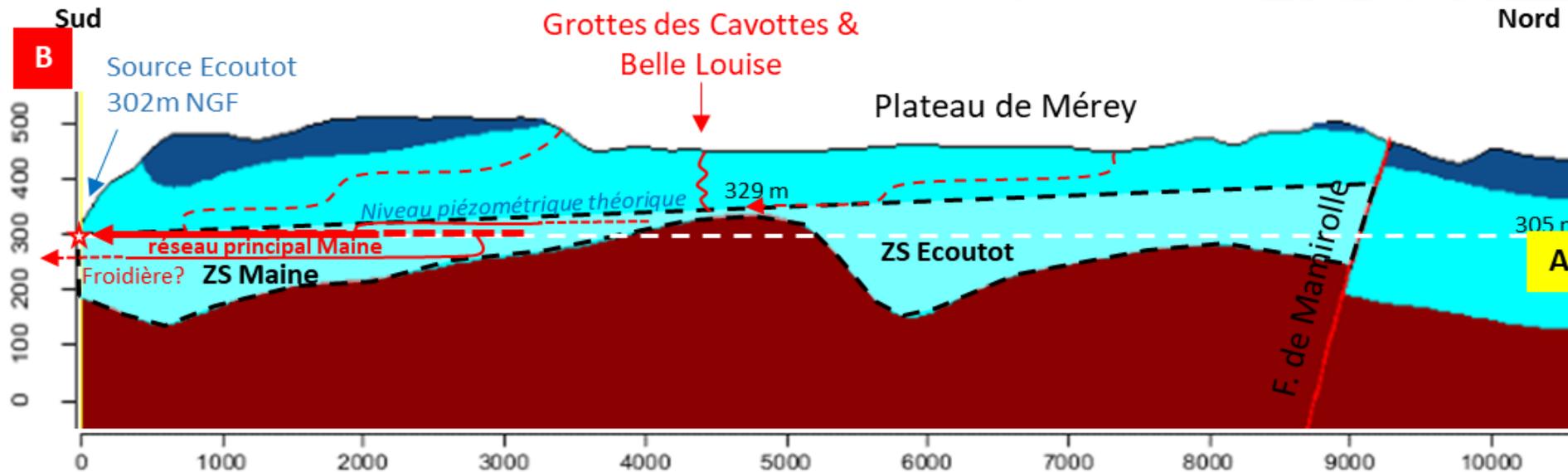
## Schéma conceptuel

- **Compartimentation** Maine et Ecoutôt notamment en basses eaux
- **Zone noyée Jurassique moyen** avec apports Eaux de surface depuis la Brême
- **Faible débit** en basses eaux
- **Connection** avec la Froidière?

Coupe horizontale à l'altitude 305 m (Source Maine)



Crétacé
J. sup. calcaire
J. sup. Oxf. marneux
J. moy.
Substratum

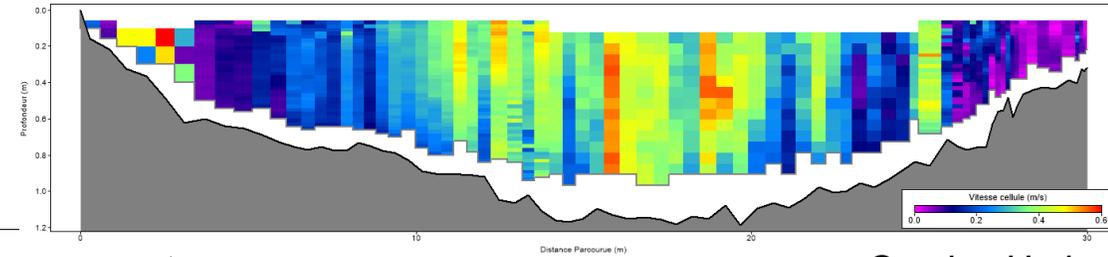




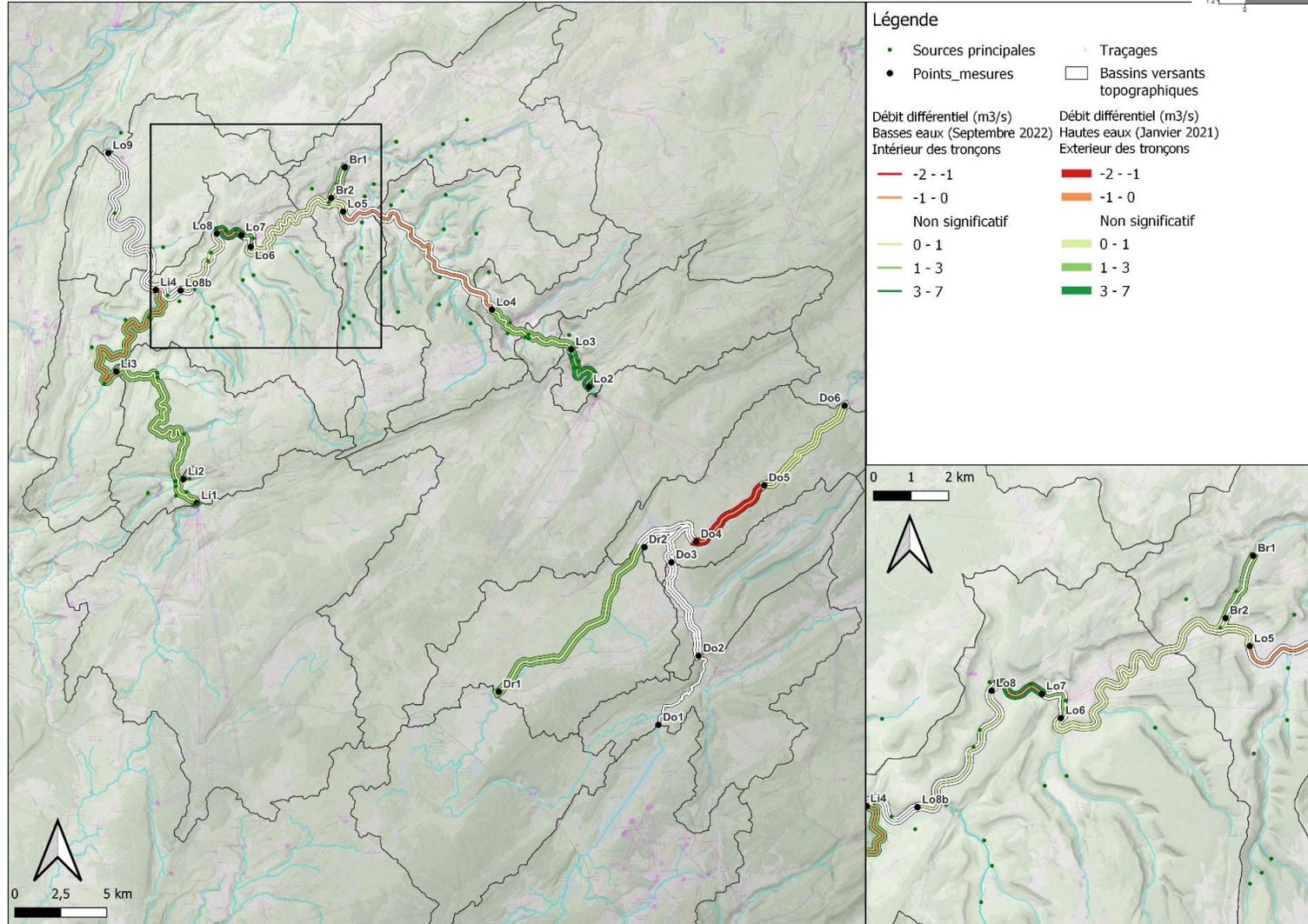
# Interactions eaux de surface – eaux souterraines

# Tronçons en perte et en apport

## Jaugeages différentiels



Gestion Hydro



## 2 campagnes Basses & Moyennes eaux

### ➤ Tronçons en perte :

- Doubs aval Pontarlier
- Loue aval Vuillafans
- Loue (Maine -> Ecoutôt)
- Lison aval Myon

### ➤ Tronçons sans échanges détectés :

- Doubs amont Pontarlier
- Loue aval

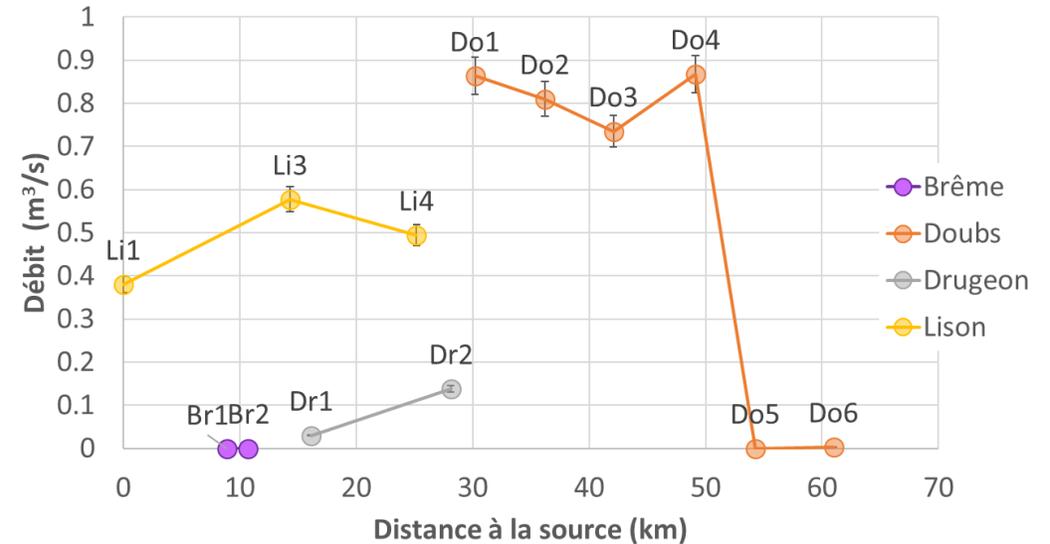
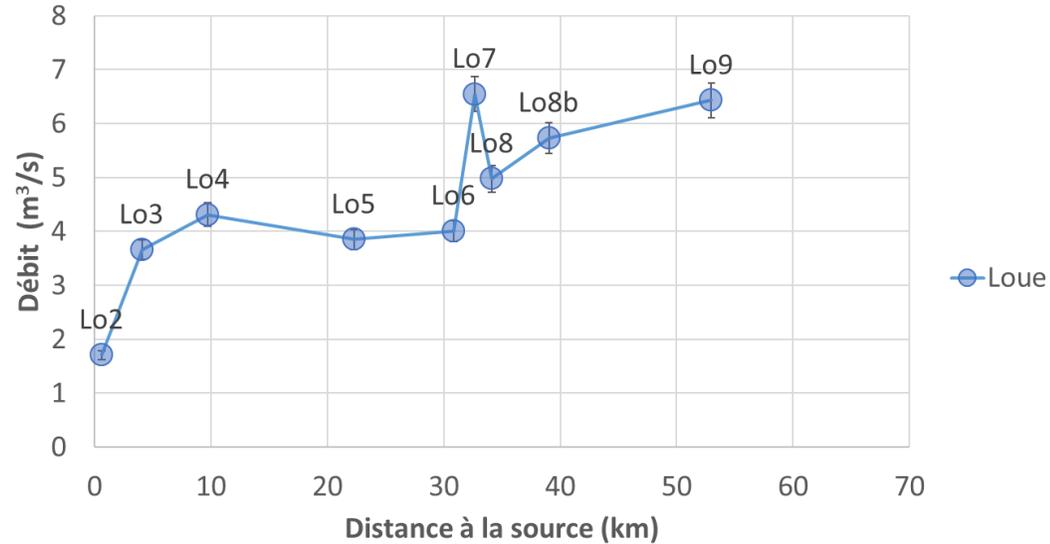
### ➤ Tronçons en apports

- Drugeon
- Haute Loue
- Lison amont

# Tronçons en perte et en apport

## Jaugeages différentiels

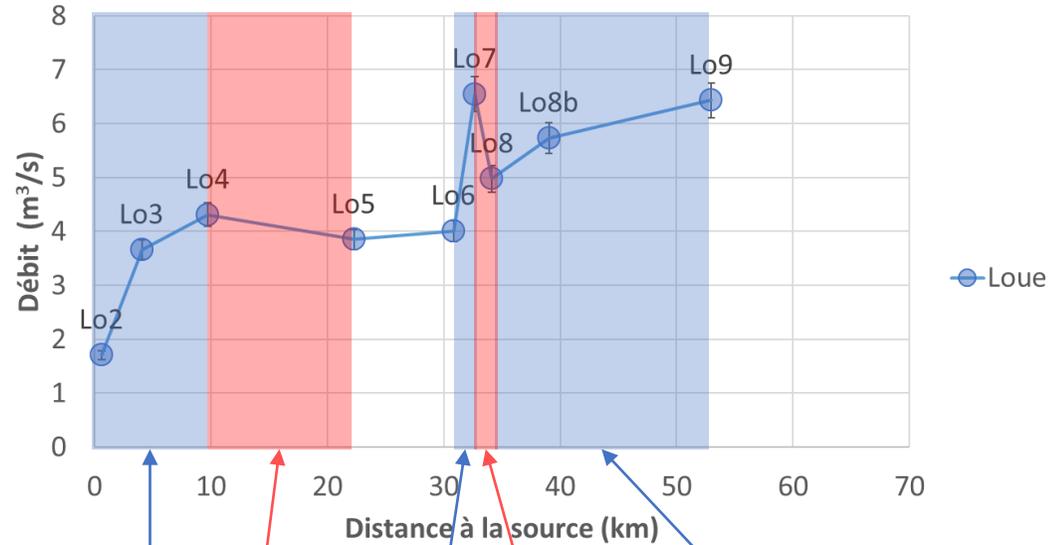
Basses eaux (sept. 2022)



# Tronçons en perte et en apport

## Jaugeages différentiels

Basses eaux (sept. 2022)



**Gorges de Nouailles**  
M. Miguet + Pontet + B. Archée

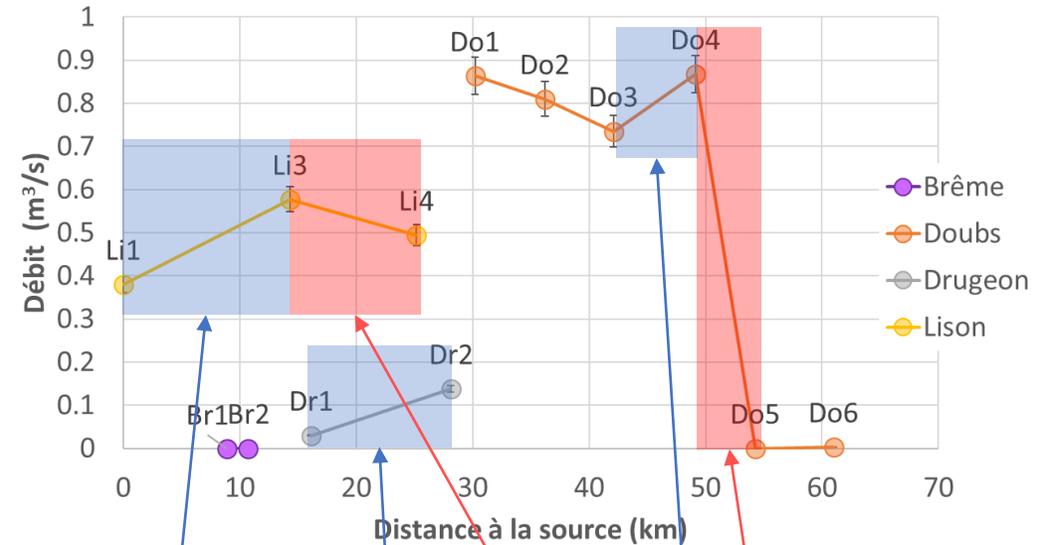
**Maine = 2.2 m³/s**

**Pertes Dogger**  
Vuillafans à Ornans

**Pertes Dogger**  
Entre Maine et Ecoutôt

*Incertitude sur les mesures?*

**Apports Lison**  
+ autres sources (non significatives)  
+ retours pertes Lo7-Lo8 ?



**Verneau**  
+ autres sources

**Nappe de l'Arlier**

**Pertes Lison**  
aval

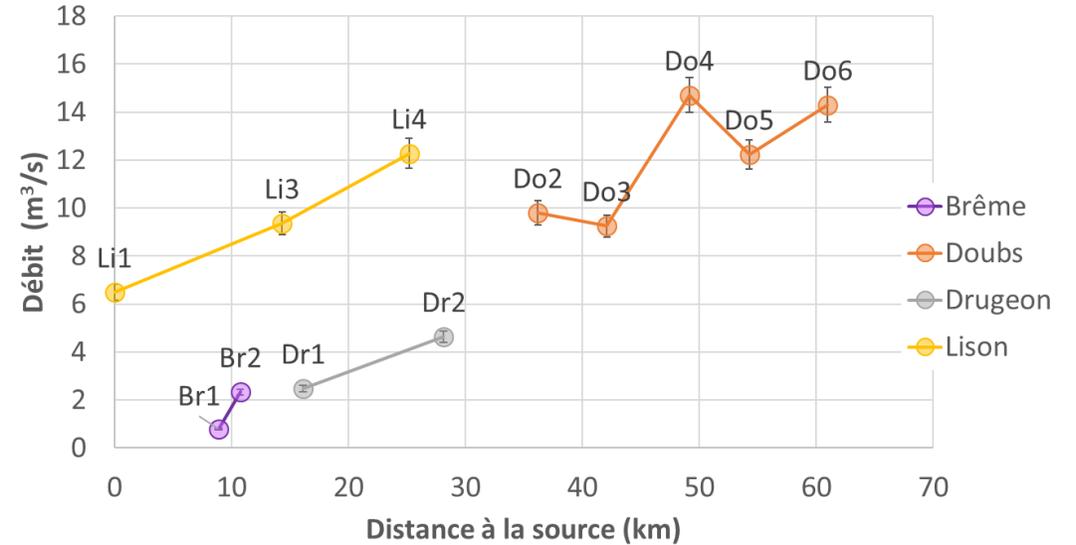
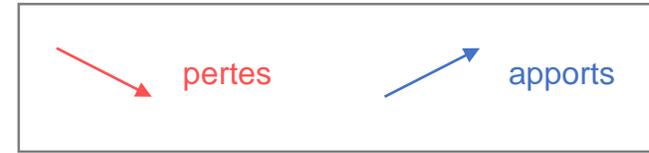
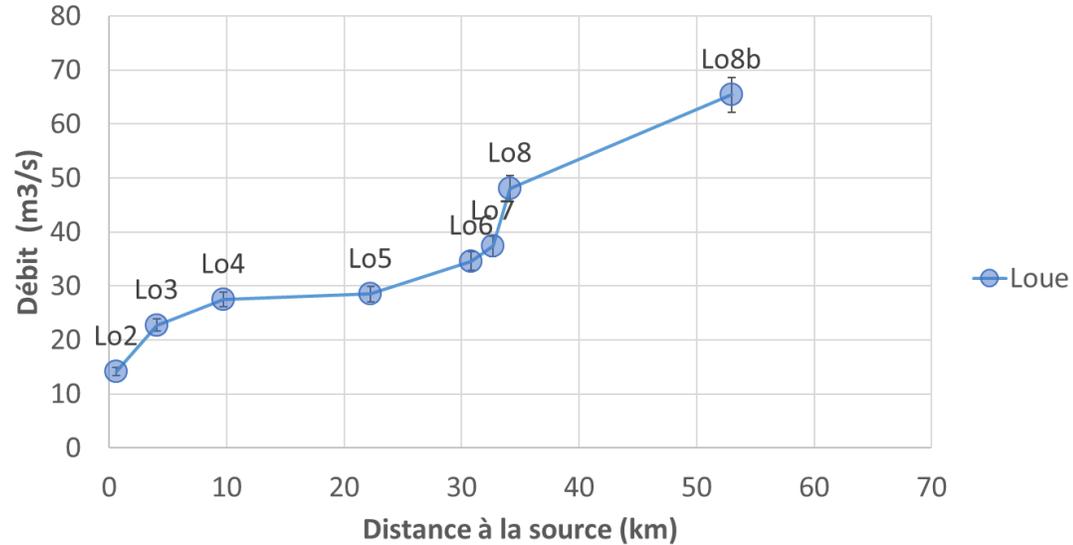
**Dugeon**

**Pertes Arçon**

# Tronçons en perte et en apport

## Jaugeages différentiels

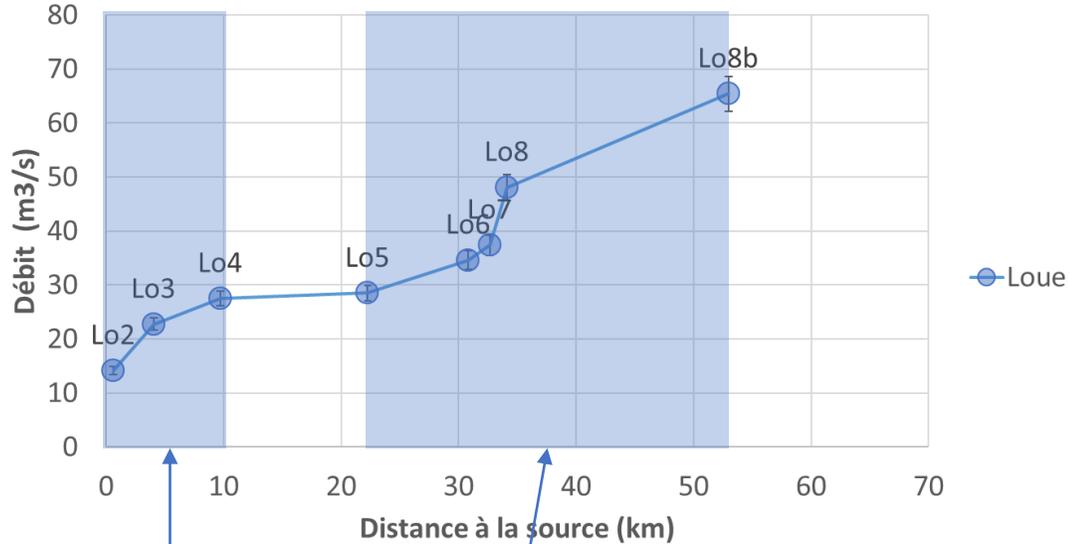
Moyennes eaux (janvier 2021)



# Tronçons en perte et en apport

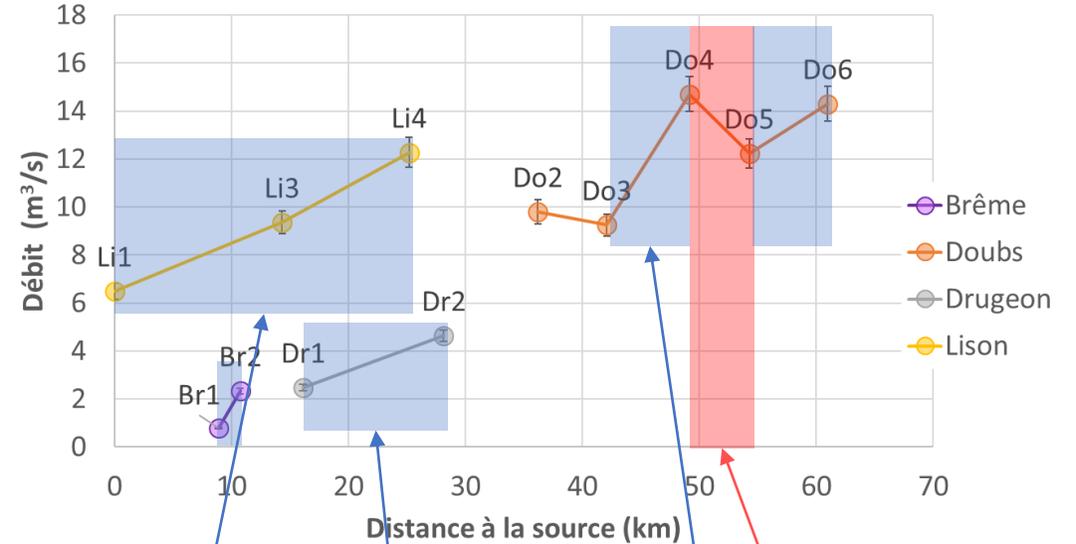
## Jaugeages différentiels

Moyennes eaux (janvier 2021)



**Gorges de Nouailles**  
M. Miguet + Pontet + B. Archée

**Brême, Maine, Ecoutôt,  
Lison**  
+ autres sources



**Verneau**  
+ autres sources

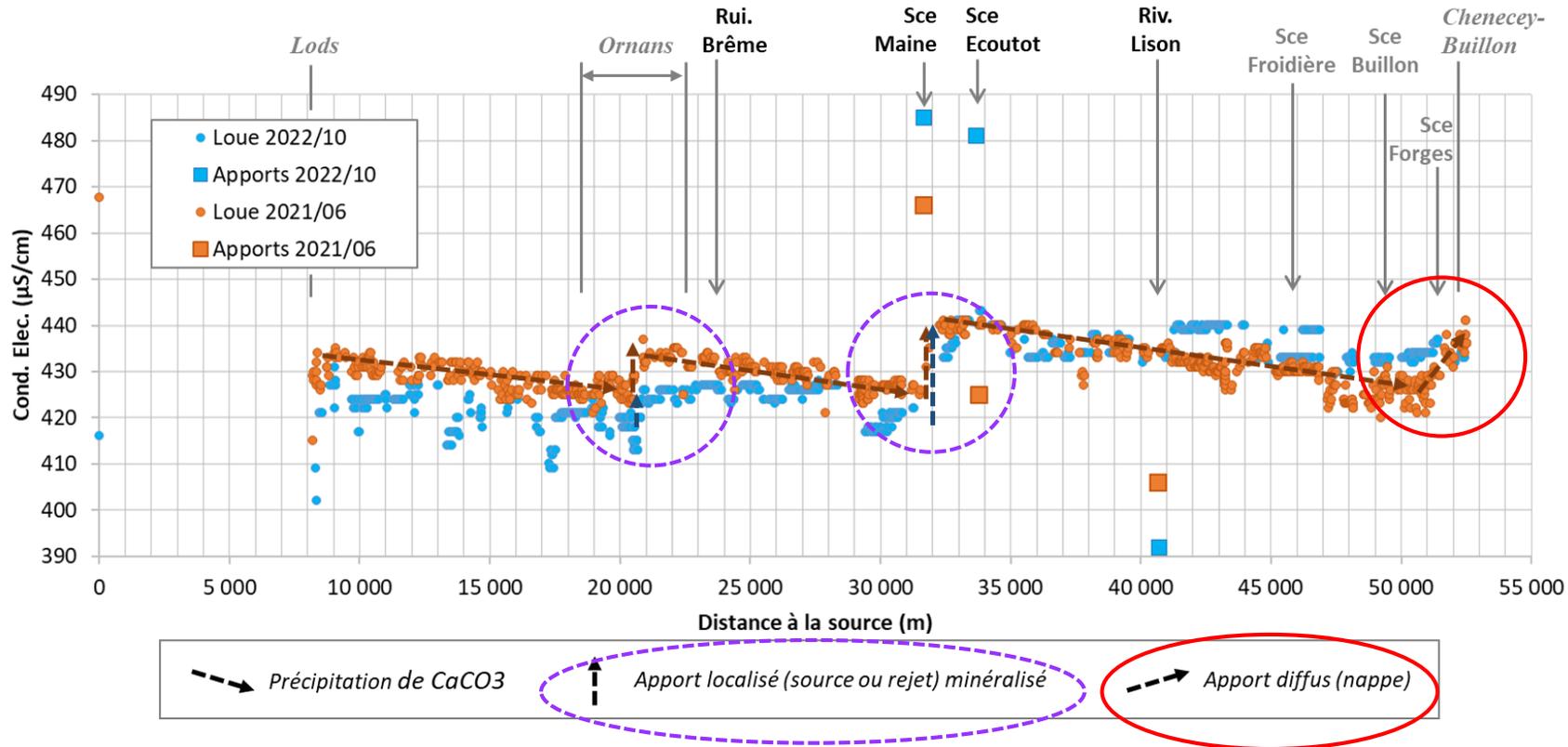
**Nappe de l'Arlier**

**Drugeon**

**Pertes Arçon**

# Origine des apports

## Profil conductivité électrique sur la Loue



## Profil en long sur la Loue

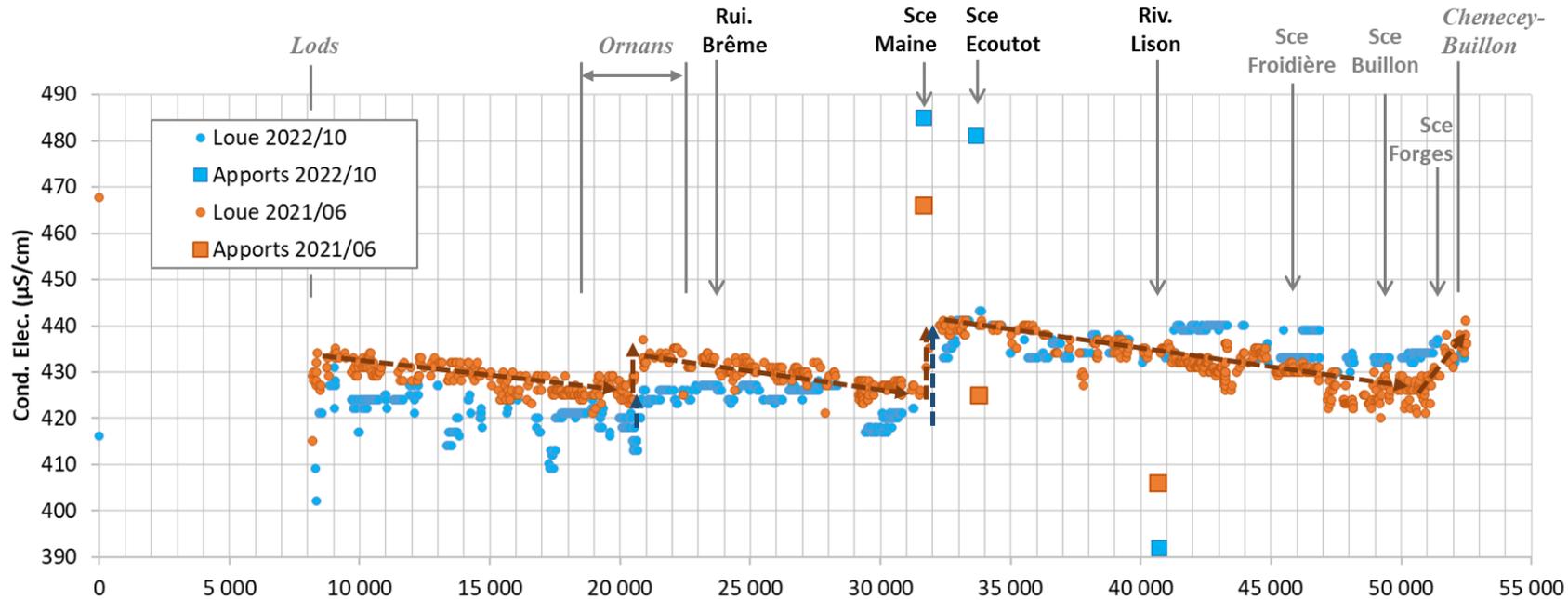
- 2 campagnes sur réseau hydro principal
- Mesures continues physico-chimiques :
  - Temp., Cond. Elec.
  - $\text{NO}_3$ , COT



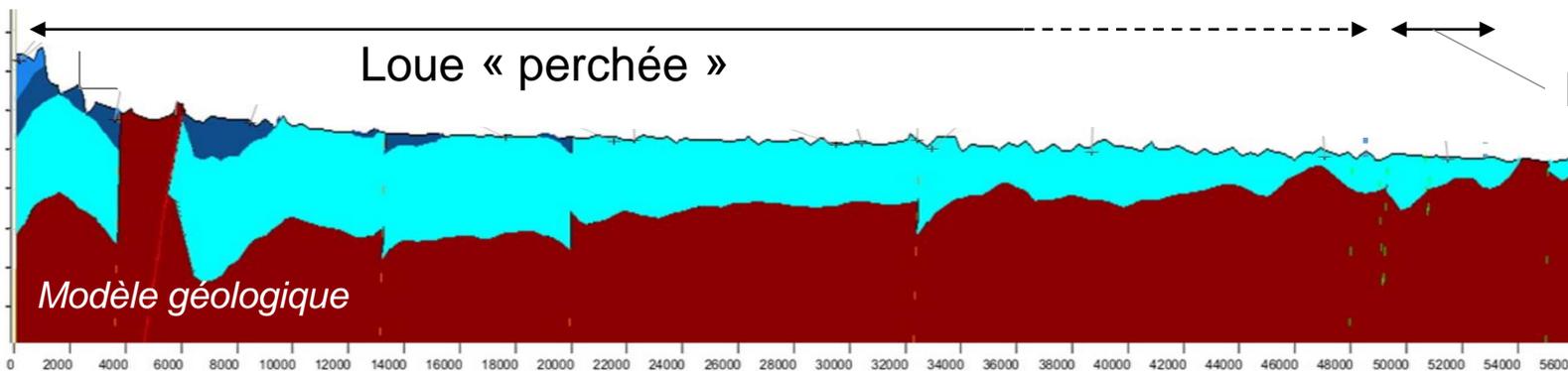
- Mise en évidence des apports localisés principaux
- Nouvelle zone d'apports diffus identifiée à l'aval

# Origine des apports

## Profil conductivité électrique sur la Loue



Remontée du **Lias**  
=> barrière à l'écoulement  
dans le **Dogger**



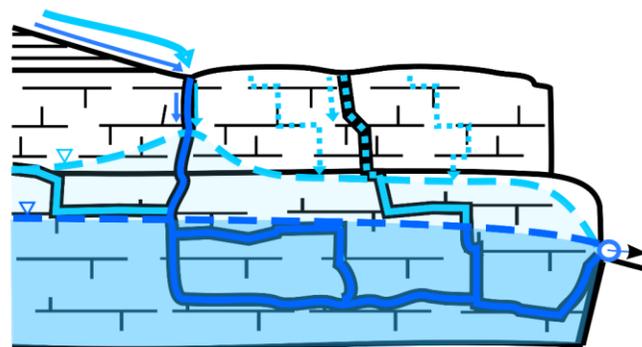
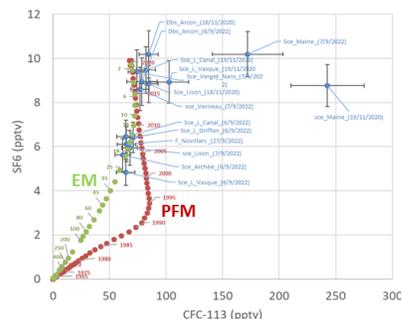
Loue draine une zone noyée



# Schémas conceptuels

# Temps de résidence au sein des aquifères

analyses CFC/SF6 et gaz noble  
(Ne, Ar) pour la datation des  
eaux

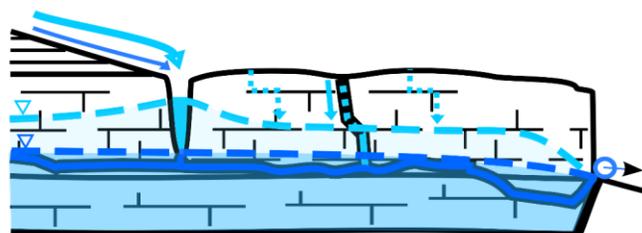


Réserves importantes  
dans la zone noyée

Temps de résidence

15 - 20 ans

<1 - 3 jours



Pas ou peu de réserves  
dans la zone noyée

Temps de résidence

<1 an

<1 jour

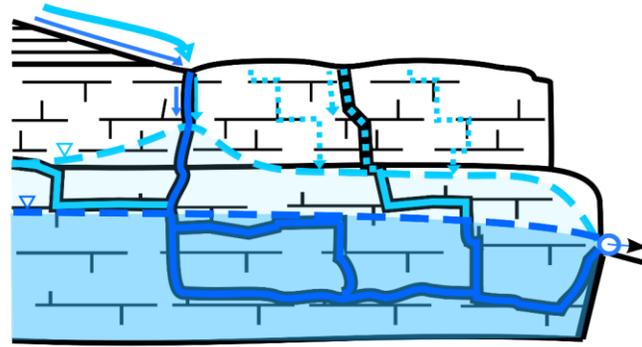
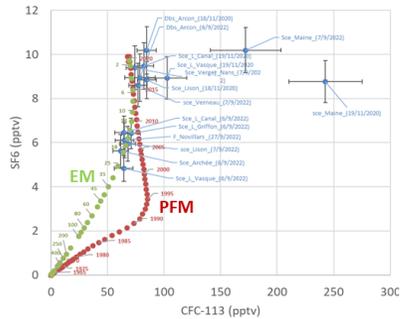
BE : Basses eaux

HE : Hautes eaux

- Basses eaux : âge apparent des eaux issue des zones noyées compris entre 1 et 20 ans
- Hautes eaux : eaux subactuelles

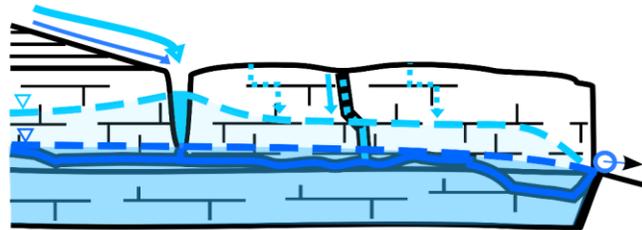
# Temps de résidence au sein des aquifères

analyses CFC/SF6 et gaz noble (Ne, Ar) pour la datation des eaux



Réserves importantes dans la zone noyée

Temps de résidence  
15 - 20 ans  
<1 - 3 jours



Pas ou peu de réserves dans la zone noyée

Temps de résidence  
<1 an  
<1 jour

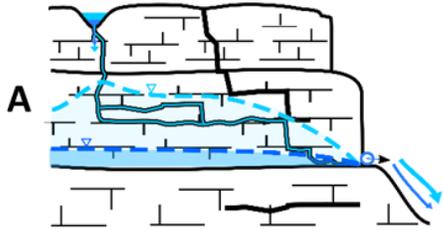
BE : Basses eaux  
HE : Hautes eaux

- Basses eaux : âge apparent des eaux issue des zones noyées compris entre 1 et 20 ans
- Hautes eaux : eaux subactuelles

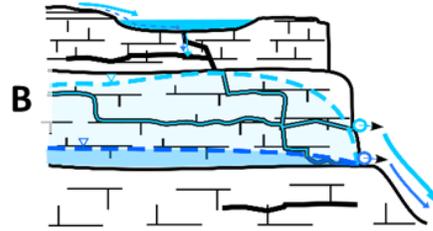
## Impact sur Eaux de surface

- Basses eaux de la rivière de la Loue sont issues d'une recharge qui date de plusieurs années
- tenir compte de la saisonnalité afin d'évaluer les bénéfices de réduction des apports en nutriments
  - Basses eaux => effet long terme
  - Hautes eaux => effets court terme

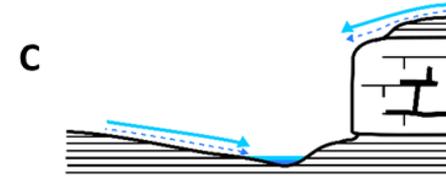
# Typologie des échanges karst / rivière



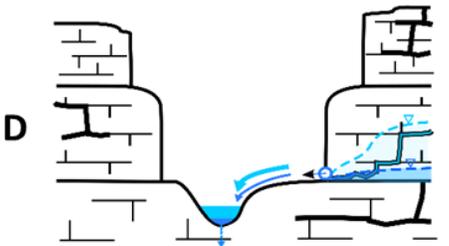
**Pertes - résurgence**



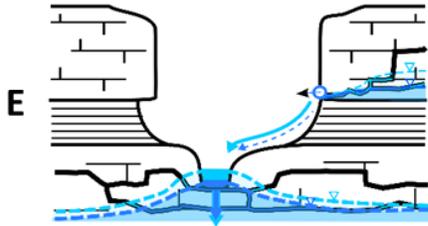
**BE : pertes et résurgence**  
**HE : pertes, débordement (poljé) et résurgences (trop-plein)**



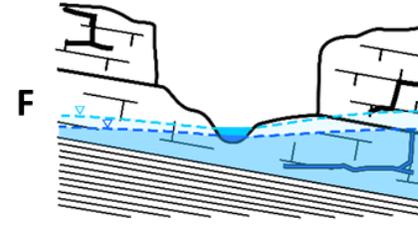
**BE : absence d'échanges**  
**HE : apports localisés superficiels**



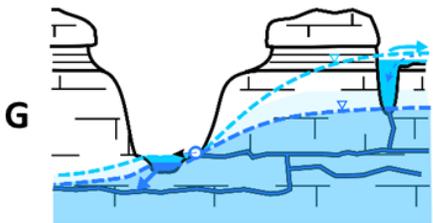
**Apports localisés souterrains**



**BE : pertes**  
**HE : pertes et apports localisés**



**Apports diffus souterrains**



**BE : pertes et apports localisés**  
**HE : apports localisés et inversac**

**HE : Hautes eaux**  
**BE : Basses eaux**

Diversité des échanges karst-rivière sur le bassin de la Loue

=> typologie des interactions surface-souterrain

## sens des interactions

- pertes des eaux superficielles
- apports du souterrain
- débordement par refus à l'infiltration
- Inversac

## modalités d'échanges

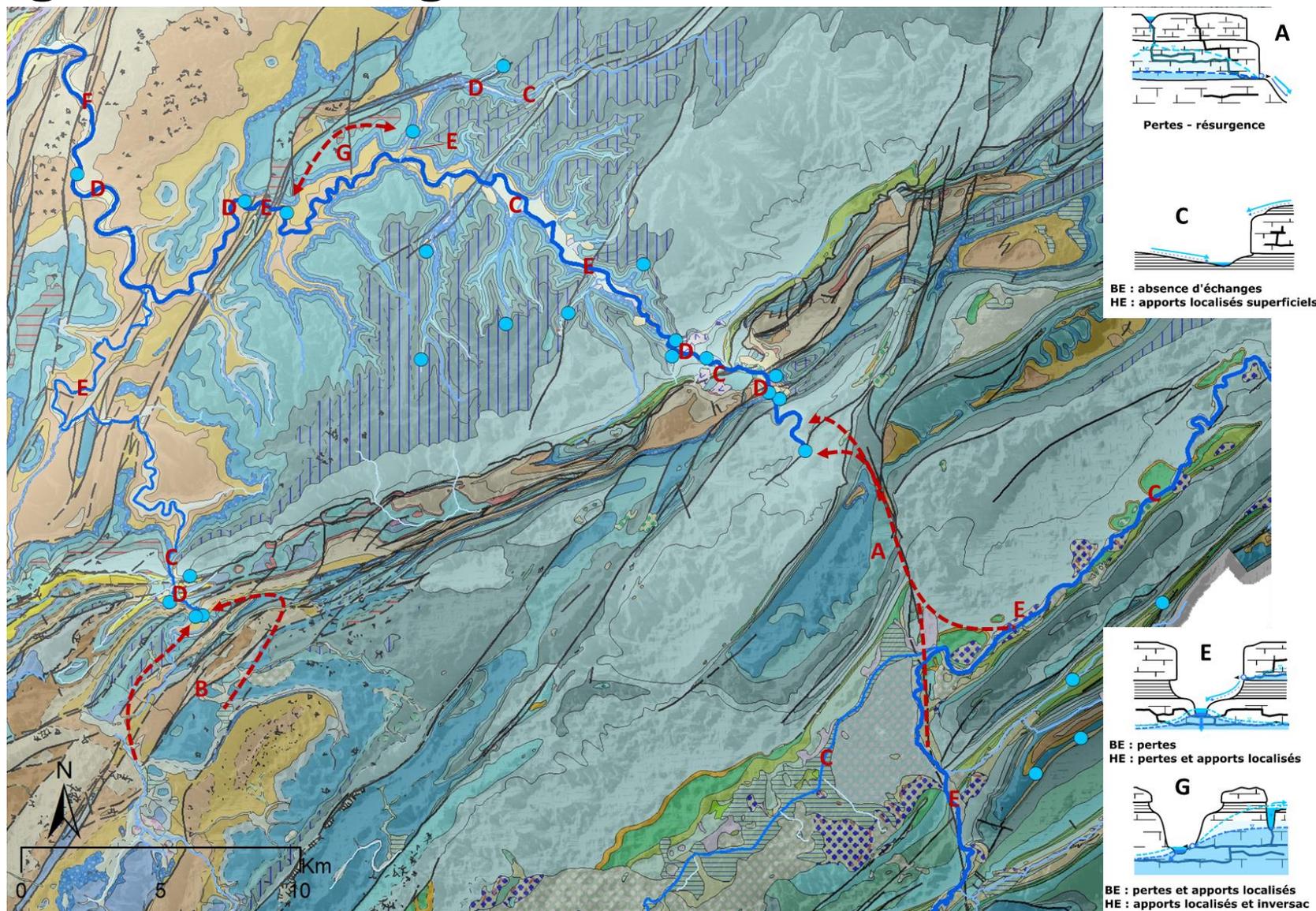
- localisés au niveaux des conduits karstiques
- diffus induits par des zones moyennement perméables

## conditions hydrologiques

- Basses eaux : lors des étiages estivaux
- Hautes eaux : pendant ou suite à des périodes de crue

➤ générique aux bassins karstiques de plateaux

# Typologie des échanges karst / rivière



# Modèle conceptuel du bassin de la Loue

Sectorisation en plateaux et faisceaux



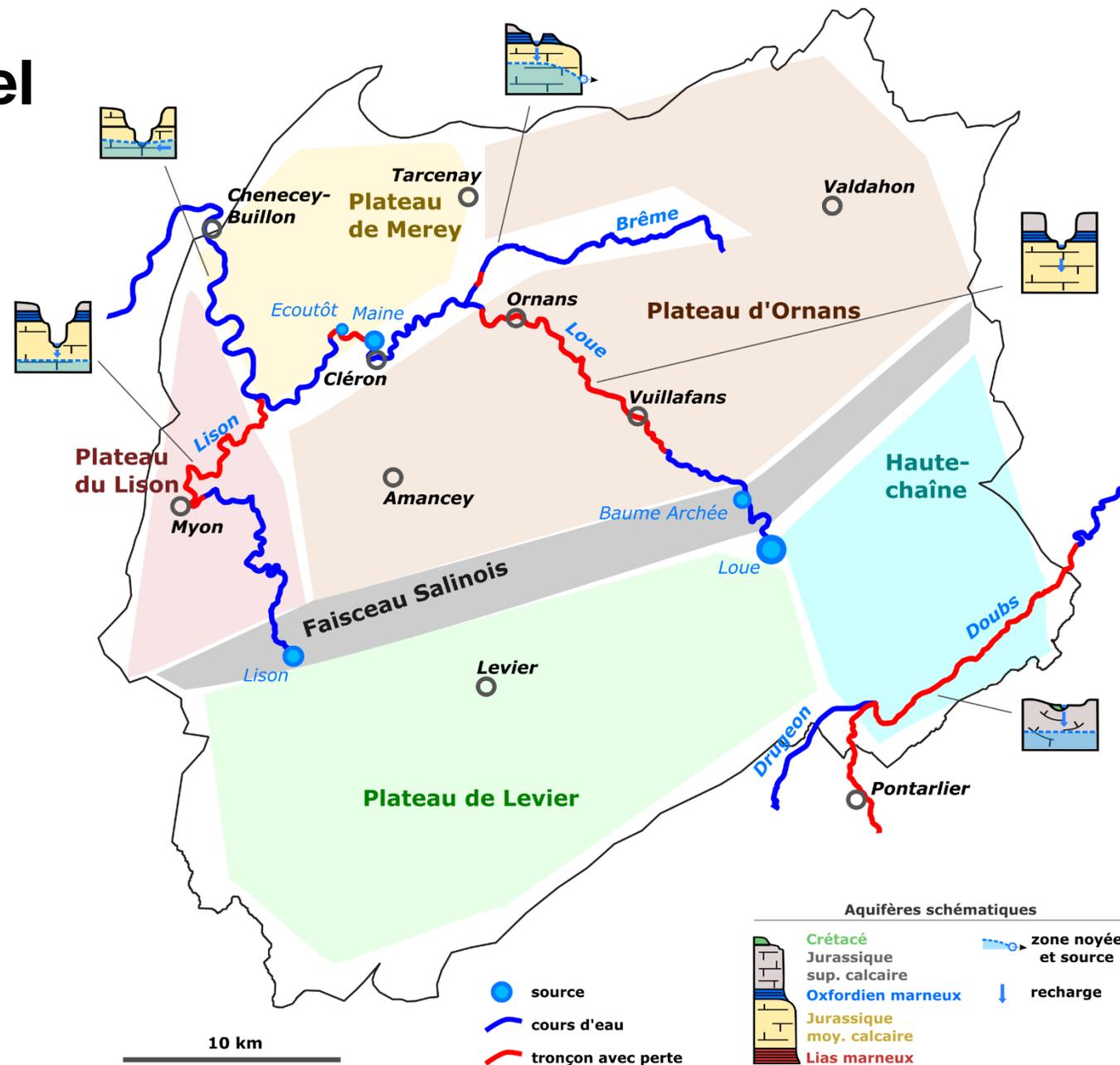
# Modèle conceptuel du bassin de la Loue

Aquifères karstiques



# Modèle conceptuel du bassin de la Loue

Échanges karst / rivière



# Modèle conceptuel du bassin de la Loue

Diversité des contextes hydrogéologiques des plateaux, reculées et faisceaux du Jura engendre une grande variabilité des interactions surface-souterrain





# Conclusion & Perspectives

# Principaux enseignements sur le bassin de la Loue

## ➤ Réservoirs Jurassique moy. et Jurassique sup.

- différences de **karstification** qui se reflètent dans le **fonctionnement hydrogéologique**
- **Jurassique moyen** : + forte perméabilité? -> pertes 'systématique' des cours d'eau (Lison, Loue en aval de Vuillafans)
- **Jurassique sup.** : stockage + important en altitude en lien avec synclinaux de la Haute-Chaîne

## ➤ Ressource en eau

- Identification des **secteurs abritant des réserves d'eau conséquentes**, à préserver pour une exploitation potentielle de la ressource:
  - Compartiment Est de l'aquifère des sources de la Loue (Jurassique sup.)
  - Aval du bassin de la Loue (Jurassique moy.)

## ➤ Saisonnalité

- clés de compréhension de la **variabilité des échanges surface-souterrain**
- La dynamique saisonnière de la recharge va faire varier les **temps de résidence** des eaux drainées à la source (<1 à > 15 ans) et influencer l'**origine de l'eau** à l'exutoire des systèmes



## ⇒ Typologie des interactions surface-souterrain

- **Grande diversité du contexte hydrogéologique** -> variabilité des échanges karst/rivière
- **typologie** qui se veut **générique** aux bassins karstiques
- **La Loue est composée de l'ensemble de cette diversité, ce qui la rend unique en terme de paysages mais fortement complexe en terme de fonctionnement**

# Principaux enseignements méthodologiques

## ➤ Intérêt d'une approche pluri-disciplinaire

- Jaugeages différentiels
- Profils de conductivité électrique
- Traçages artificiels
- Hydrochimie
- Isotopie
- Datation
- Modèle géologique 3D

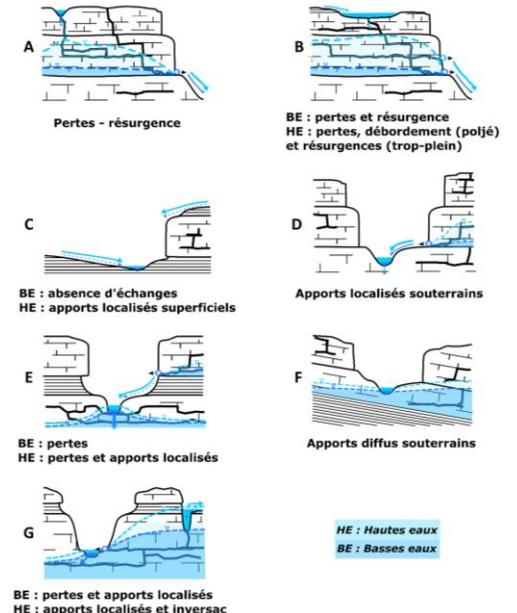
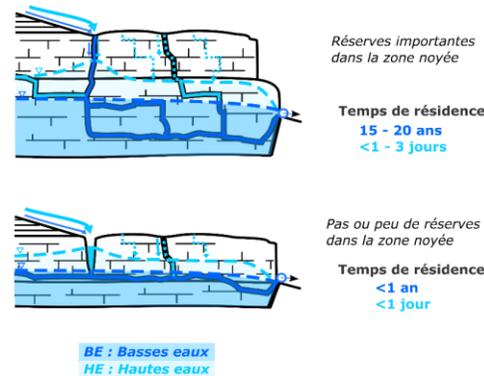
### Modèle hydrogéologique conceptuel

- modalités de recharge et de transferts vers les sources
- principaux flux selon les saisons
- bassins d'alimentation



### Modèle conceptuel des échanges karst/rivière

- tronçons infiltrants et en apports
- Inversion des échanges
- Lien avec contexte hydrogéologique



=> Développement d'une démarche générique pour mieux comprendre les modalités de recharge des aquifères karstiques et les échanges karst / rivière

# MERCI DE VOTRE ATTENTION

[j.charlier@brgm.fr](mailto:j.charlier@brgm.fr)

