

Interactions nappes/rivières : des outils pour comprendre et mesurer les échanges

Vendredi 27 novembre 2015 – Orléans
Auditorium du Centre scientifique et technique du BRGM
3 Avenue Claude Guillemin, 45 100 Orléans



Le Loiret à l'aval de la source du Bouillon au Parc Floral à Orléans

1. [Enjeux des relations entre eaux de surface et eaux souterraines. Pourquoi caractériser les échanges nappes/rivières ?](#)
Bénédicte Augeard (ONEMA)
2. [Interactions nappes/rivière. Enjeux réglementaires.](#)
Alexandra Lequien (MEDDE)
3. [Deux programmes de recherche ambitieux pour deux sorties opérationnelles Comment caractériser les échanges nappes/rivières ? De l'approche scientifique à l'approche opérationnelle.](#)
Frédéric Paran (EMSE, UMR 5600 EVS)
4. [Analyse géomatique. Identifier et quantifier les échanges nappes/rivières à partir d'une modélisation simplifiée.](#)
Frédéric Paran (EMSE, UMR 5600 EVS)
5. [Utilisation de la température comme traceur des écoulements: dispositifs de mesure et méthodologie d'estimation. Modélisation hydrothermique et dispositif de mesures MOLONARI.](#)
Agnès Rivière (EMP)
6. [Modélisation distribuée à base physique des échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bassin versant. Modélisation hydrodynamique.](#)
Nicolas Flipo (EMP)
7. [Végétation aquatique. Outils pour la caractérisation des échanges nappes/rivières.](#)
Gudrun Bornette (UMR 6249 CHRONO-environnement) et Florent Arthaud (UMR 042 CARRTEL)
8. [Utilisation des invertébrés souterrains pour la localisation des zones d'échange nappe – rivière.](#)
Pierre Marmonier (UMR 5023 LENA) et Christophe Piscart (UMR 6553 ECOBIO)
9. [Caractérisation des échanges entre Karst / Rivière : La Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-clap. Focus sur les contrastes thermiques et chimiques entre ESO et ESU. Images infrarouges thermiques et géochimie.](#)
Jordan Ré-Babuand (EMSE, UMR 5600 EVS)
10. [Synthétiser les différents diagnostics : proposition de méthodologie. Exemple de démarche.](#)
Frédéric Paran (EMSE, UMR 5600 EVS)
11. [Atelier 1 : Analyse géomatique.](#)
Frédéric Paran (EMSE, UMR 5600 EVS)
12. [Atelier 2 : Modélisation hydrodynamique.](#)
Olivier Douez et Marion Chatelier (BRGM)

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

1. Enjeux des relations entre eaux de surface et eaux souterraines

Pourquoi caractériser les échanges nappes/rivières ?

Bénédicte AUGEARD

ONEMA

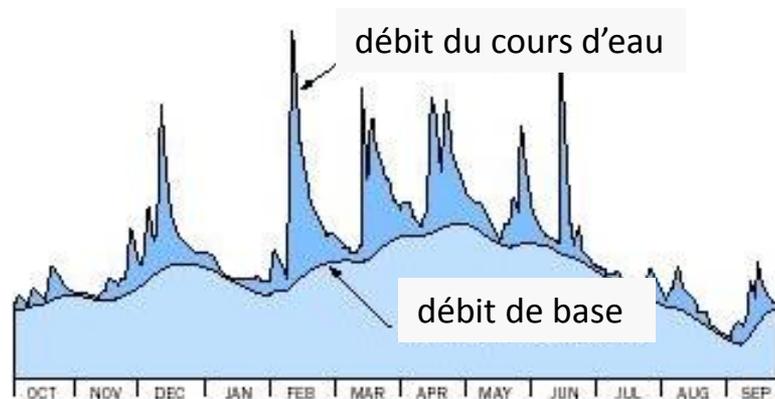
Introduction

- Séminaire de fin de projet de recherche NAPROM (NAPpes-Rivières, Observation et Modélisation) 2011-2015
 - Partenariat entre 9 équipes de recherche (co-financement Onema)
 - Comité de suivi composé d'une dizaine de gestionnaires (services de l'état, agences de l'eau, associations, merci !)
- Objectif du projet : développement et tests de méthodes de caractérisation des échanges nappes/rivières
 - par métrique expérimentale à l'échelle du tronçon ou du linéaire
 - par modélisation jusqu'à l'échelle régionale
- Présentation : diversité des contextes et enjeux opérationnels aux différentes échelles (cf réponses au questionnaire)



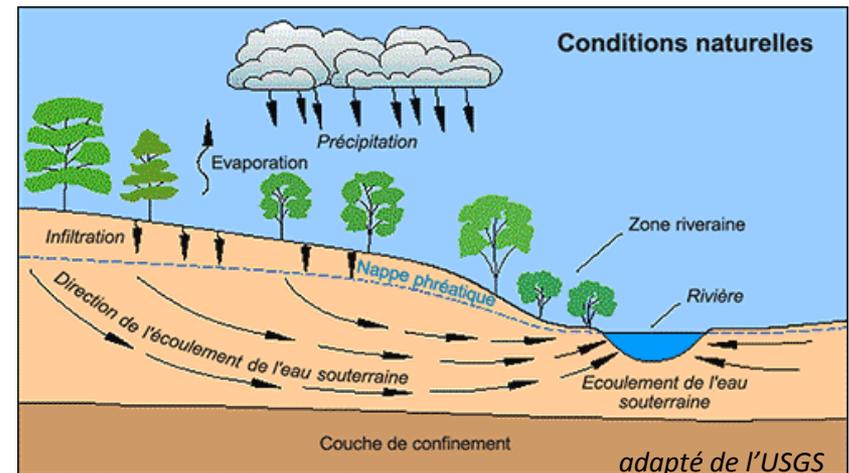
Les eaux souterraines et les eaux de surface sont connectées dans la plupart des bassins versants...

Les eaux souterraines contribuent aux débits des rivières notamment en étiage (débit de base)



source : water encyclopedia

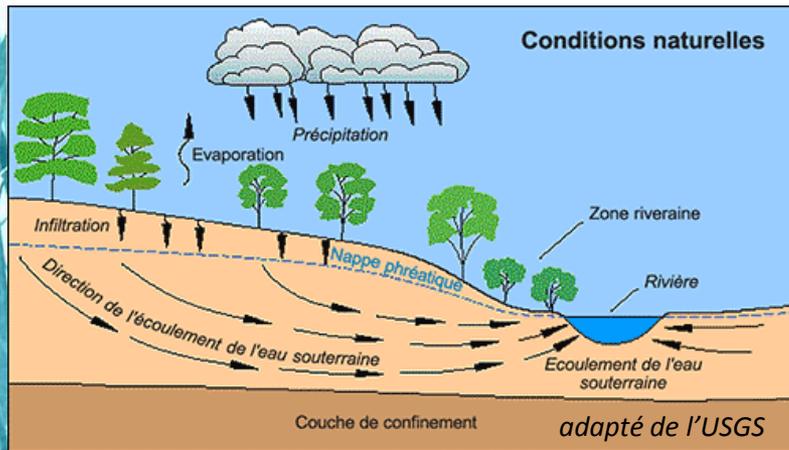
Les eaux souterraines ont généralement pour exutoire une eau de surface (rivière, plan d'eau, mer)



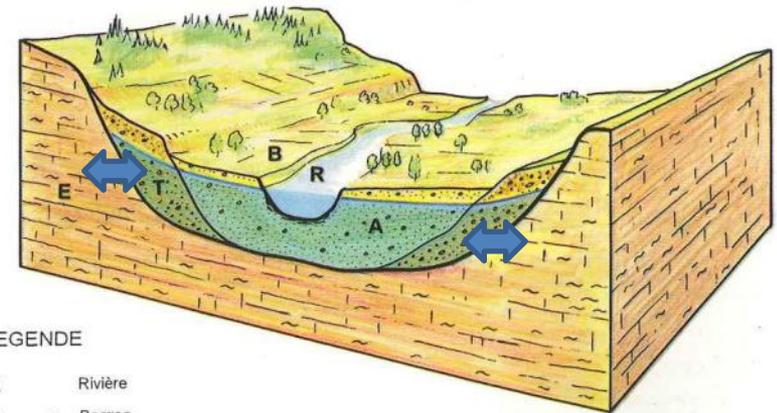
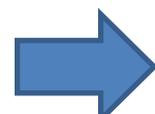
Exemple d'une nappe **phréatique** (première nappe accessible) **libre** (pas de couche imperméable au-dessus)

...mais les connexions dépendent du contexte hydrogéologique

De l'hydrologie simplifiée du versant...



...à la réalité géomorphologique



LEGENDE

- R Rivière
- B Berges
- A Alluvions
- T Terrasses
- E Terrains encaissants

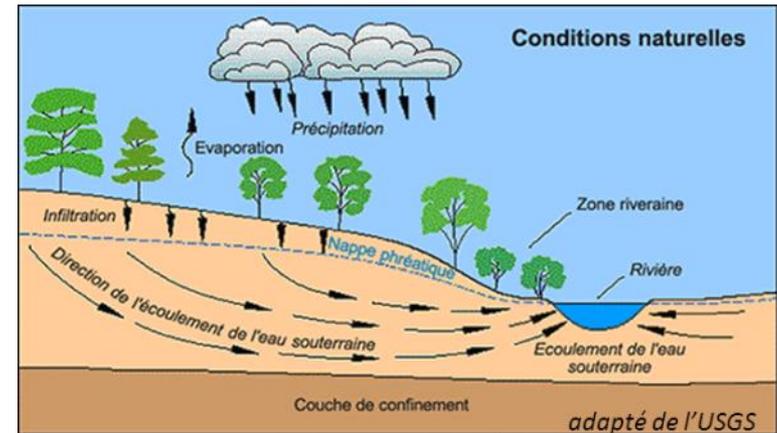
source Daum et al, 1997

Alluvions plus ou moins larges et profonds
 Roche encaissante plus ou moins perméable

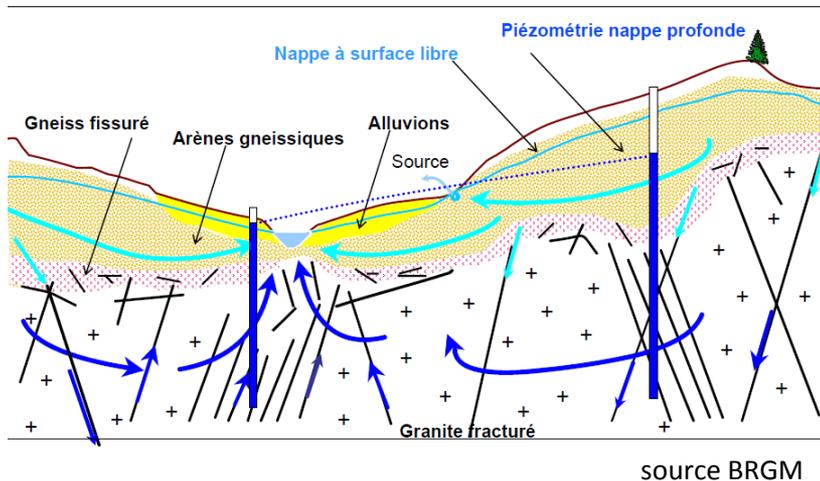
→ nappe **alluviale** +/- importante
 → nappe **régionale** +/- importante

Rôles respectifs de la nappe alluviale et de la nappe régionale à comprendre !

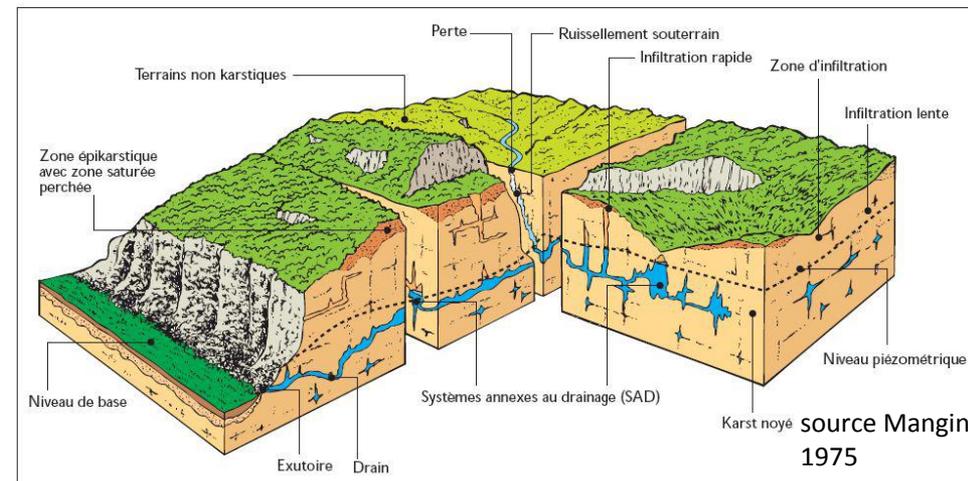
La dynamique des écoulements de la nappe régionale dépend de la nature de la roche encaissante aquifère



Milieu poreux : permet d'appliquer la loi de Darcy



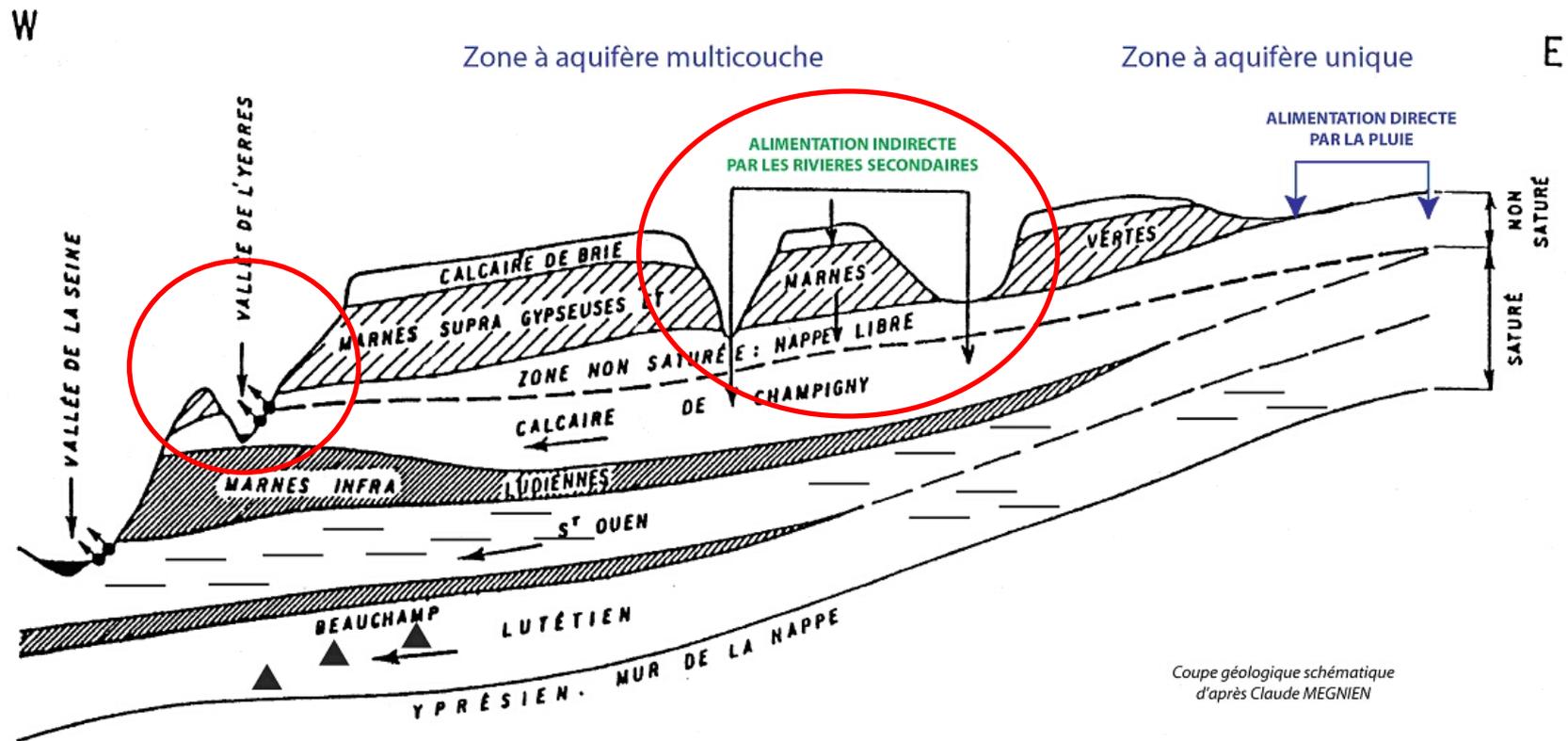
Milieu fracturé (socle) : hétérogénéité des vitesses et directions d'écoulement



Milieu karstique : écoulements potentiellement très rapides vers la nappe (pertes), comportement non linéaire en sortie

La dynamique des écoulements de la nappe régionale peut dépendre des interactions avec d'autres aquifères.

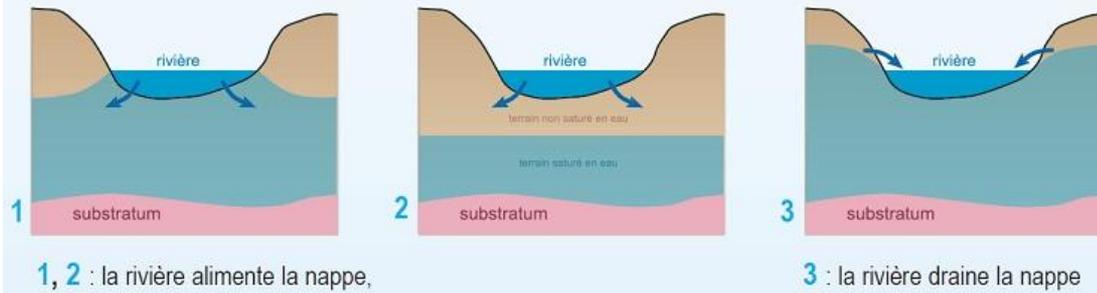
Cas des aquifères multicouches



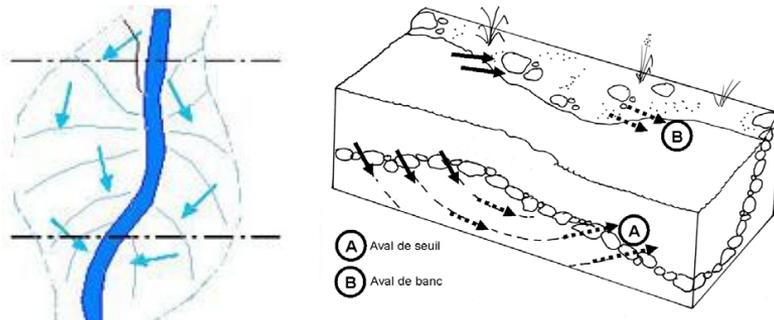
Les connexions peuvent se faire dans les deux sens

en fonction de la configuration hydrogéologique

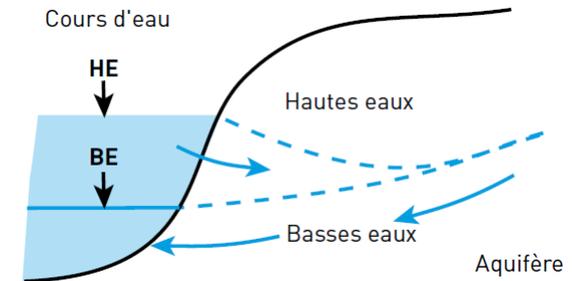
Représentation schématique des échanges nappe / rivière :



en fonction de variations spatiales



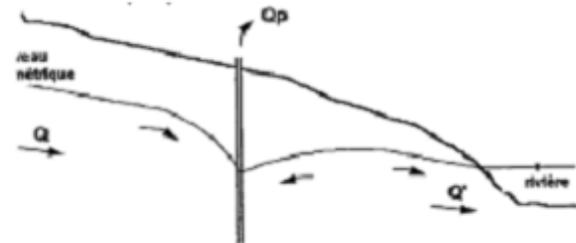
en fonction des variations saisonnières



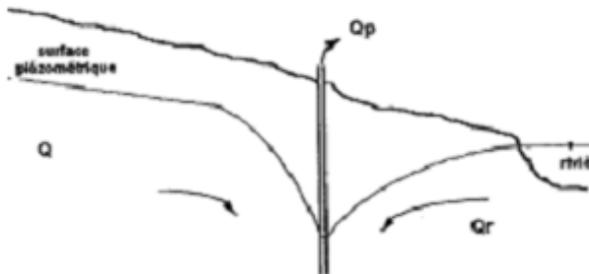
Il faut se donner une échelle d'observation (spatiale, temporelle) ! Elle dépend des enjeux

Enjeux quantitatifs (1/2)

Impact des prélèvements d'eau souterraine sur les débits des rivières



Le pompage induit un manque à gagner pour la rivière
 → diminution de son débit de base



Le pompage soutire directement de l'eau à la rivière

Questions : quel décalage temporel de l'impact (pompage saisonnier) ? où sont les zones préférentielles d'infiltration ? et si le fond de la rivière est peu perméable ?



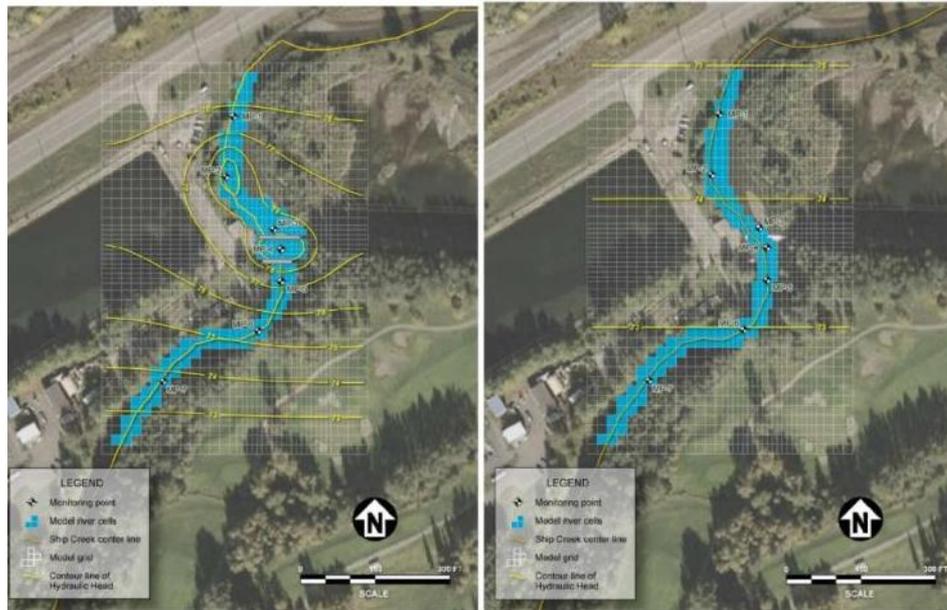
Approche échelle locale pour un ouvrage (doc incidence, pompage d'essai)



Approche échelle régionale si multiplicité des pompages (EVP, DCE)

Enjeux quantitatifs (2/2)

Impact de la gestion des débits des rivières sur les eaux souterraines ex : l'effacement de seuil



Modélisation de l'effet local d'une suppression de seuil (avant à gauche, après à droite, shaw environmental 2006) mais conditions aux limites très simplifiées !

➔ Approche échelle locale et régionale suivant les nappes impactées

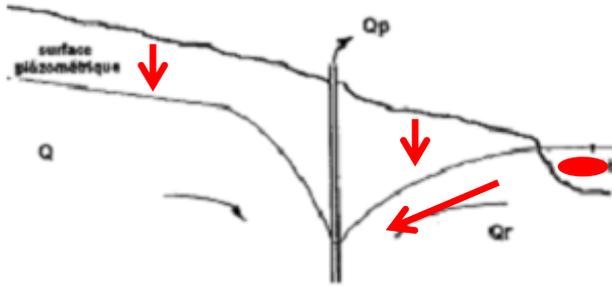
Enjeux qualitatifs (1/2)

Impact d'une pollution des eaux de surface sur les eaux souterraines (vulnérabilité des pompages en nappe)

67% de l'AEP prélevée en eau souterraine

Une partie dans les plaines alluviales (ressource en eau abondante)

Importance de préserver la qualité (risque pollution par infiltration verticale et par transfert depuis les eaux de surface)



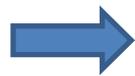
Approche échelle locale

B. Enjeux qualitatifs (2/2)

Impact des pollutions des eaux souterraines sur la qualité des eaux de surface



- vulnérabilité des usages en aval de la rivière (prélèvement AEP eau de surface)
- dégradation de la qualité des eaux de surface et de son état écologique (enjeux DCE)



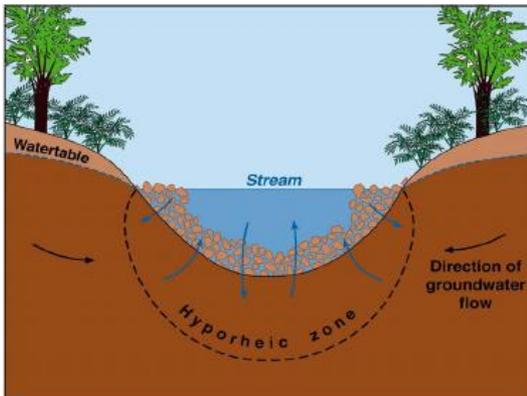
Approche échelle locale pour pollution ponctuelle



Approche échelle régionale pour pollution diffuse

Enjeux qualitatifs et biologiques (1/2)

La zone hyporhéique et les zones humides riveraines

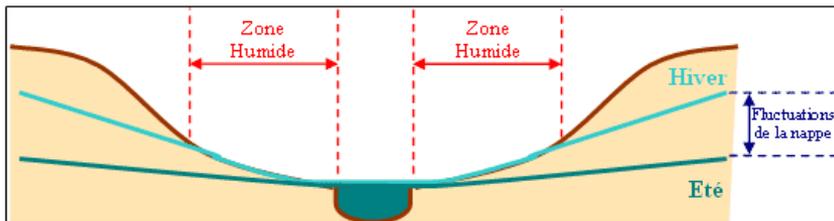


Rôle important de la biogéochimie de l'interface nappe / rivière : la zone hyporhéique
Possibilité d'atténuation des pollutions (autoépuration), mais aussi de relargage de polluants piégés

Question de l'impact du colmatage ou de dragage



Approche échelle locale



Les zones humides alluviales ou de fond de vallée à l'interface entre eaux de surface et eaux souterraines

Intérêt de comprendre et préserver leur fonctionnement



Approche échelle locale
(ex: impact d'un drainage, fct d'une zh)

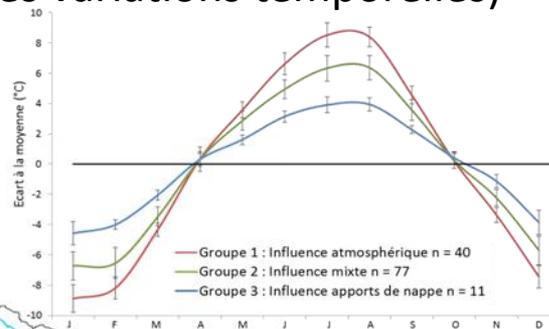


Approche échelle régionale (ex: DCE lien eau souterraine et écosystème terrestre dépendant)

Enjeux qualitatifs et biologiques (2/2)

La température de l'eau

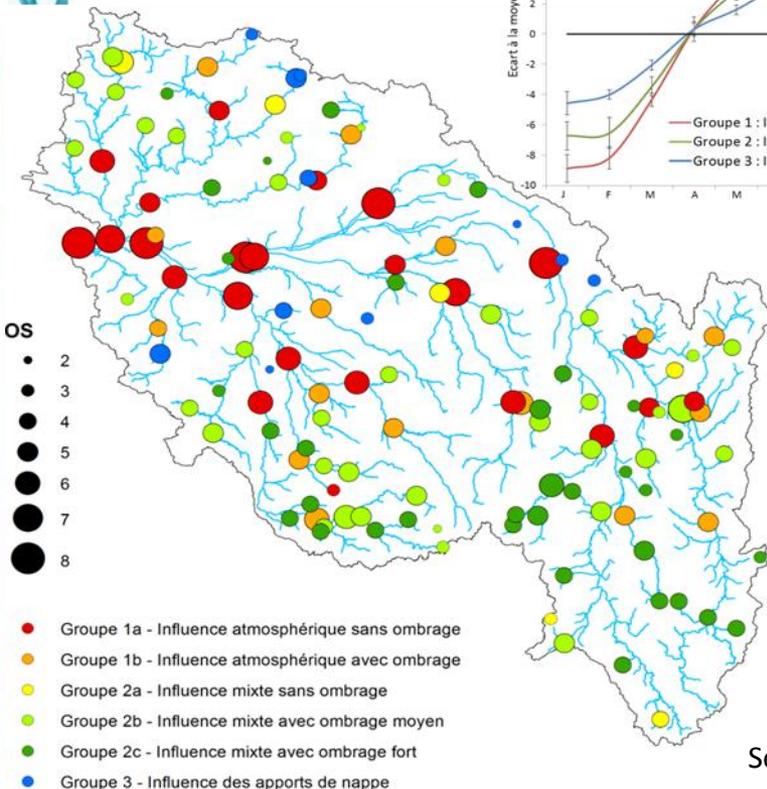
Les apports d'eau souterraine à la rivière modifient son régime thermique (atténuation des variations temporelles)



Approche échelle locale (ex :
identification des zones refuge)



Approche échelle régionale
(compréhension du régime
thermique dans son ensemble)



Source : université de Tours

L'organisation de la journée

- Contexte hydrogéologique divers, enjeux variés → un panel de méthodes
- Matin : présentation des méthodes testées par les équipes de recherche
 - présenter les principes et montrer les résultats obtenus
 - proposer des pistes pour croiser plusieurs méthodesnb: il existe d'autres méthodes !!! (jaugeage différentiel, essai de nappe, traçages divers etc)
- Deux guides complètent ces présentations
 - guide méthodologique sur les milieux alluvionnaires paru (une partie des méthodes seulement)
 - guide technique national à paraître en 2016 (couvrant toutes les méthodes présentées aujourd'hui)
- Un après-midi plus tourné vers des applications concrètes
 - deux groupes pour suivre les ateliers en parallèle
 - un temps d'échanges plus important

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

2. Interactions nappes/rivière.

Enjeux réglementaires



*Alexandra LEQUIEN
MEDDE*

Plan

1. Les exigences réglementaires

2. Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

- ***Etat quantitatif***
- ***Etat chimique***

3. Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

Les exigences réglementaires

1. Les exigences réglementaires

2. *Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?*

- *Etat quantitatif*
- *Etat chimique*

3. *Retour d'expérience Etat des Lieux 2013*

Les exigences réglementaires

La directive cadre sur l'eau

Annexe 2 Caractérisation initiale des eaux souterraines

- *« les masses d'eau souterraines pour lesquelles il existe des écosystèmes d'eaux de surface ou des écosystèmes terrestres directement dépendants. »*

Annexe 2 Caractérisation plus détaillée (masses d'eau à risque)

- *« un inventaire des systèmes de surface associés, y compris les écosystèmes terrestres et les masses d'eau de surface auxquels la masse d'eau souterraine est dynamiquement liée,*
- *des estimations des directions et taux d'échange de l'eau entre la masse souterraine et les systèmes de surface associés »*

Les exigences réglementaires

La directive cadre sur l'eau

Annexe 5 Définition du bon état quantitatif

« En conséquence, le niveau de l'eau souterraine n'est pas soumis à des modifications anthropogéniques telles qu'elles :

- *empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux déterminés au titre de l'article 4 pour les eaux de surface associées,*
- *entraîneraient une détérioration importante de l'état de ces eaux,*
- *occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine et des modifications de la direction d'écoulement dues à des modifications du niveau peuvent se produire temporairement, ou continuellement dans une zone limitée, mais n'occasionnent pas d'invasion d'eau salée ou autre et ne montrent aucune tendance durable et clairement identifiée induite par une action anthropogénique dans la direction d'écoulement qui soit susceptible d'entraîner de telles invasions. »*

Les exigences réglementaires

La directive cadre sur l'eau

Annexe 5 Définition du bon état chimique

« La composition chimique de la masse d'eau souterraine est telle que les concentrations de polluants :

- comme précisé ci-après, ne montrent pas d'effets d'une invasion salée ou autre,
- ne dépassent pas les normes de qualité applicables au titre d'autres dispositions législatives communautaires pertinentes conformément à l'article 17,
- ne sont pas telles qu'elles empêcheraient d'atteindre les objectifs environnementaux spécifiés au titre de l'article 4 pour les eaux de surface associées, entraîneraient une diminution importante de la qualité écologique ou chimique de ces masses ou occasionneraient des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine. »*

Les exigences réglementaires

La directive fille « eaux souterraines »

Article 3

« Les valeurs seuils pour un bon état chimique des eaux souterraines sont axées sur la protection des masses d'eaux souterraines conformément à l'annexe II, partie A, points 1, 2 et 3, en s'attachant spécialement à leur impact sur les eaux de surfaces associées et sur les écosystèmes terrestres et les zones humides directement dépendants, ainsi qu'à leur interaction avec ceux-ci, et tiennent compte, entre autres, des connaissances en matière de toxicologie humaine et d'écotoxicologie. »

Les exigences réglementaires

Rapportage DCE

Indiquer si la MESO est associée à une ou plusieurs masses d'eau de surface

La relation Eaux de Surface / Ecosystèmes terrestres peut être rapportée dans le cas de masses d'eau à risque quantitatif et chimique ou pour la non atteinte du bon état

Etat des lieux Arrêté du 12 janvier 2010 –MESO à risque

« un inventaire des systèmes de surface associés, y compris les écosystèmes terrestres et les masses d'eau de surface auxquels la masse d'eau souterraine est dynamiquement liée,

des estimations des directions et taux d'échange de l'eau entre la masse souterraine et les systèmes de surface associés »

SDAGE Arrêté du 17 mars 2006

Une carte présentant les objectifs d'état quantitatif et identifiant les masses d'eau souterraines qui ont un rôle essentiel dans l'alimentation des masses d'eau de surface pour le maintien de leur état écologique

Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

1. Les exigences réglementaires

2. Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

- *Etat quantitatif*
- *Etat chimique*

3. Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

Evaluation de l'état des eaux souterraines

- L' [arrêté du 17 décembre 2008](#) établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines
- La [circulaire du 23 octobre 2012](#) d'application de cet arrêté avec en annexe :
 - Annexe 3 guide d'évaluation de l'état chimique
 - Annexe 5 guide d'évaluation de l'état quantitatif

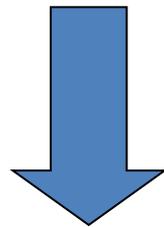
Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

La prise en compte des interactions nappe-rivière

-Pour évaluer l'état chimique

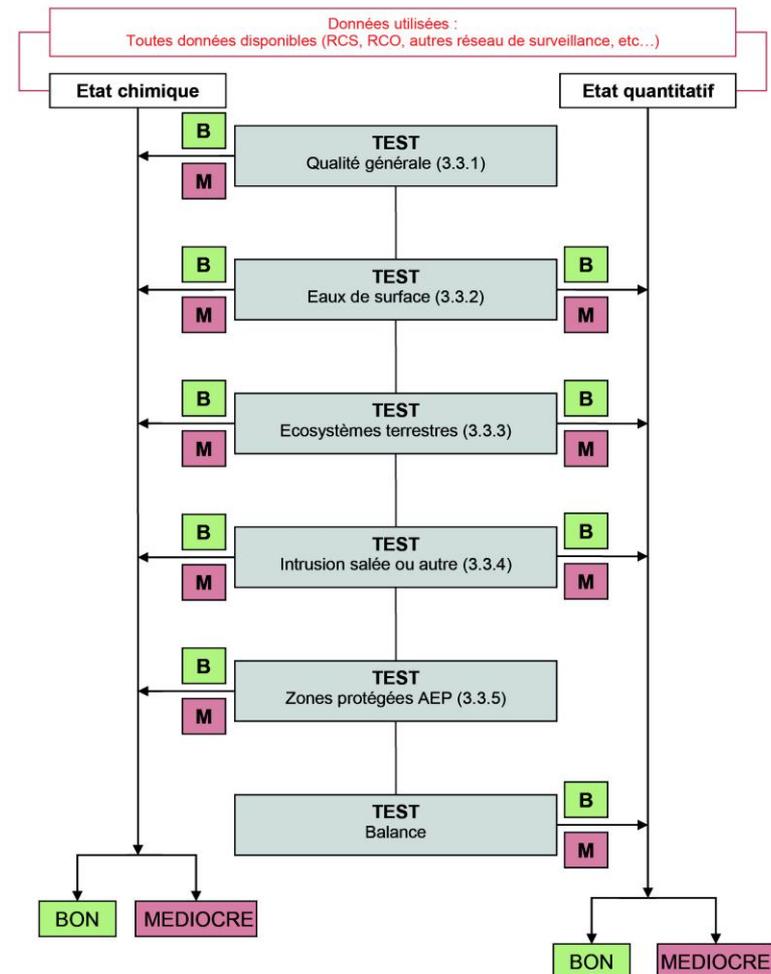
ET

-Pour évaluer l'état quantitatif



« LE TEST EAUX DE SURFACE »

(Guides annexes 3 et 5)



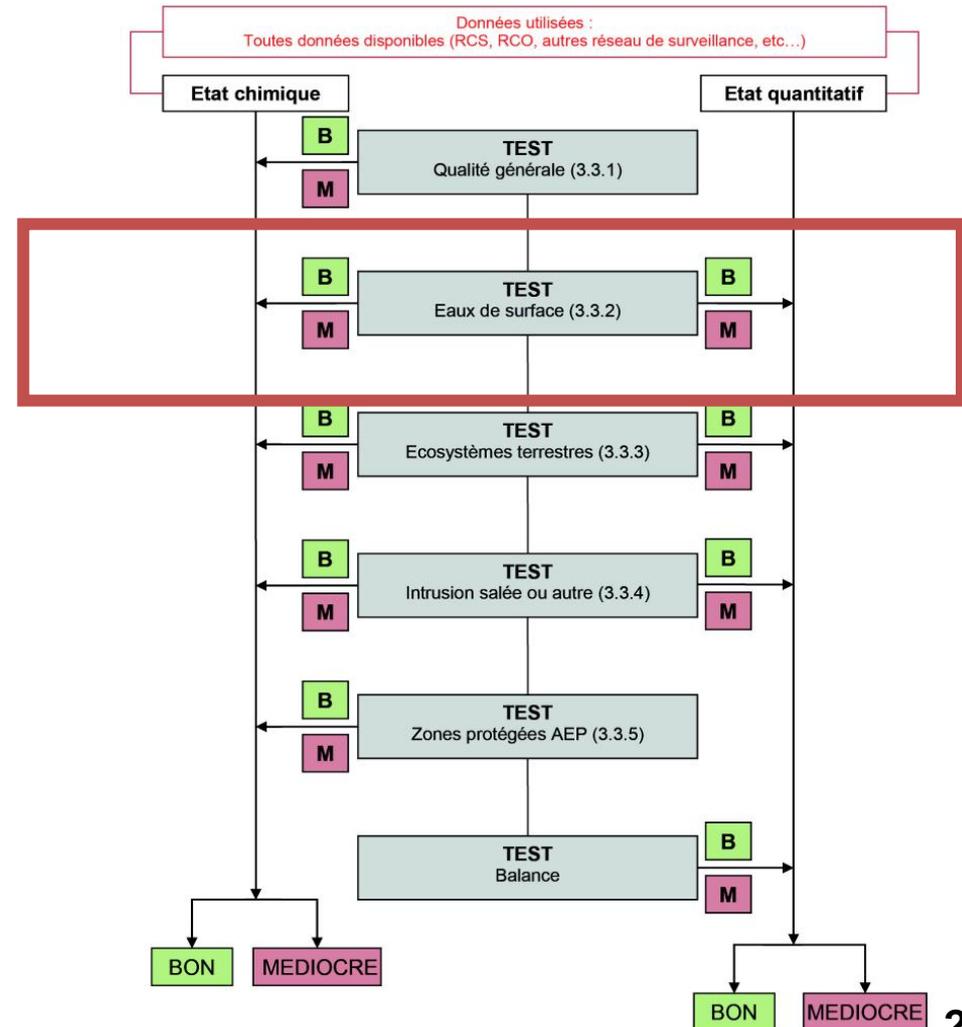
Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

ETAT CHIMIQUE

Identifier si MESU sont dégradées à cause d'une pollution des eaux souterraines

ETAT QUANTITATIF

Identifier si MESU sont dégradées à cause des prélèvements dans les eaux souterraines



Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

1. Les exigences réglementaires

2. Quelle prise en compte dans l'évaluation de l'état des masses d'eaux souterraines?

- *Etat quantitatif*
- *Etat chimique*

3. Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

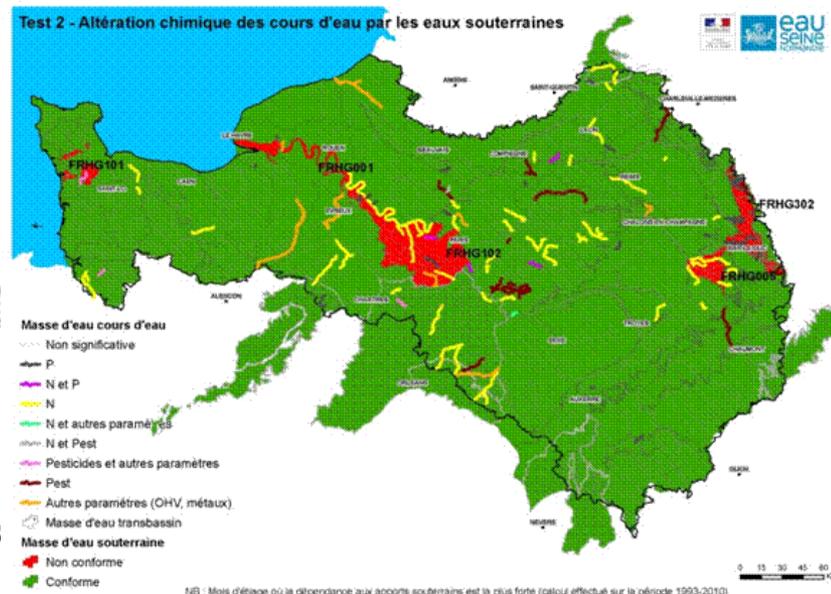
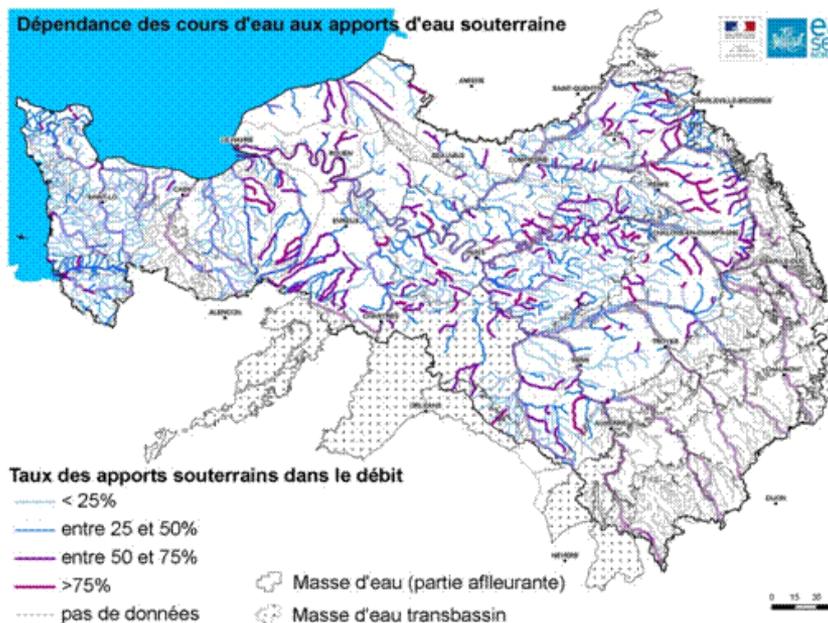
Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

RETOUR D'EXPERIENCE ETAT DES LIEUX 2013

Données, études et modèles mobilisables différentes selon les bassins

ETAT CHIMIQUE

Test Eaux de surface sur SEINE NORMANDIE



5 MESO

Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

RETOUR D'EXPERIENCE ETAT DES LIEUX 2013

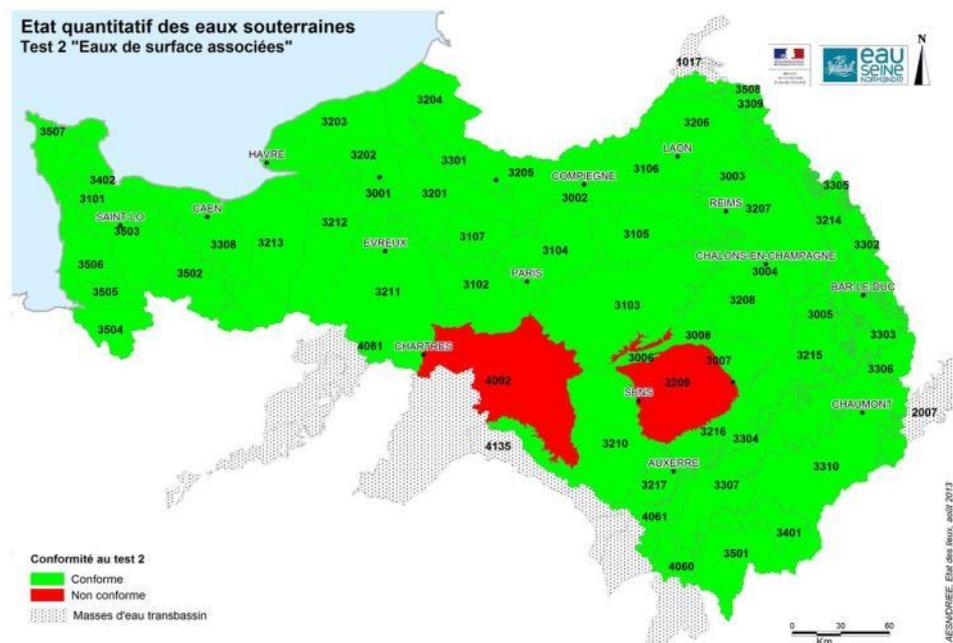
Données, études et modèles mobilisables différentes selon les bassins

ETAT QUANTITATIF

Test Eaux de surface sur SEINE NORMANDIE

Objectif: évaluer l'impact des prélèvements en eau souterraine sur les débits d'étiage (QMNA5) et sur les habitats aquatiques (pertes d'habitat par diminution du débit) des cours d'eau qu'elles alimentent

2 MESO



Retour d'expérience Etat des Lieux 2013

RETOUR D'EXPERIENCE ETAT DES LIEUX 2013

Données, études et modèles mobilisables différentes selon les bassins

ETAT QUANTITATIF

Test Eaux de surface sur LOIRE-BRETAGNE

3 indices:

-état écologique MESU moins que bon

-débit d'étiage interpolé inférieur à 1/10e du module

-débit prélevé en nappe et réellement consommé rapporté au débit d'étiage de la masse d'eau cours d'eau supérieur à 50%

→ 15 MESO



Conclusion

LE BILAN

- Des méthodologies différentes selon les bassins (EDL 2013)
- Test eaux de surface
 - à l'échelle nationale pour l'état quantitatif: 38 MESO (FR: 599 ME)
 - autres tests qualité générale / balance déclassants
- Difficulté majeure: changement d'échelle → du tronçon à la ME

PERSPECTIVES

Proposition d'amélioration du test Eaux de Surface en GT national QUANTITE en lien avec les travaux présentés aujourd'hui

Prioriser les travaux ESU/ESO sur les territoires (en fonction des connaissances et du risque identifié).

Vers un indicateur du lien/échange ESU/ESO



Merci pour
votre
attention

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

3. Deux programmes de recherche ambitieux pour deux sorties opérationnelles

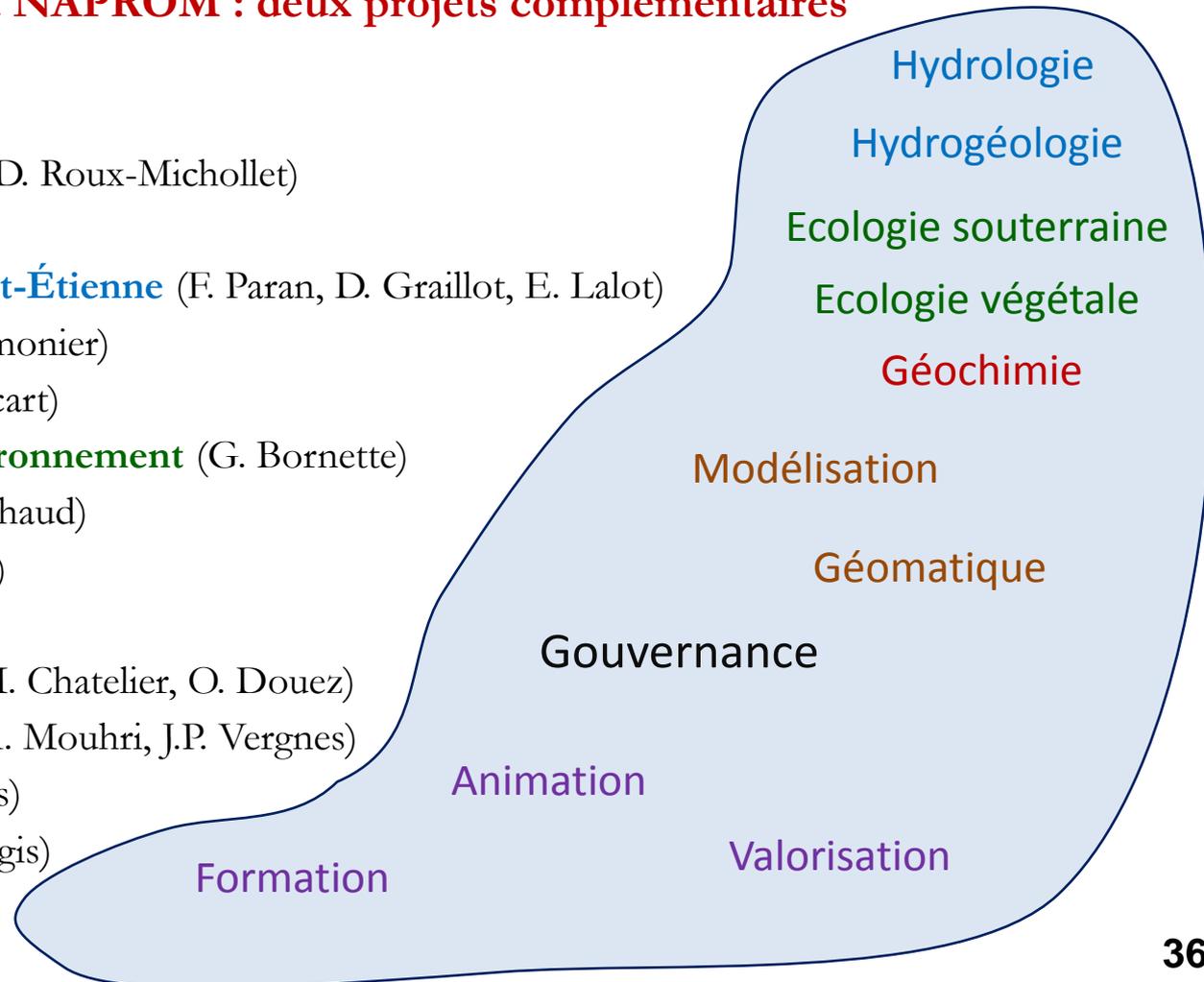
Comment caractériser les échanges nappes/rivières ?
De l'approche scientifique à l'outil opérationnel

Frédéric PARAN
EMSE, UMR 5600 EVS

Une logique interdisciplinaire

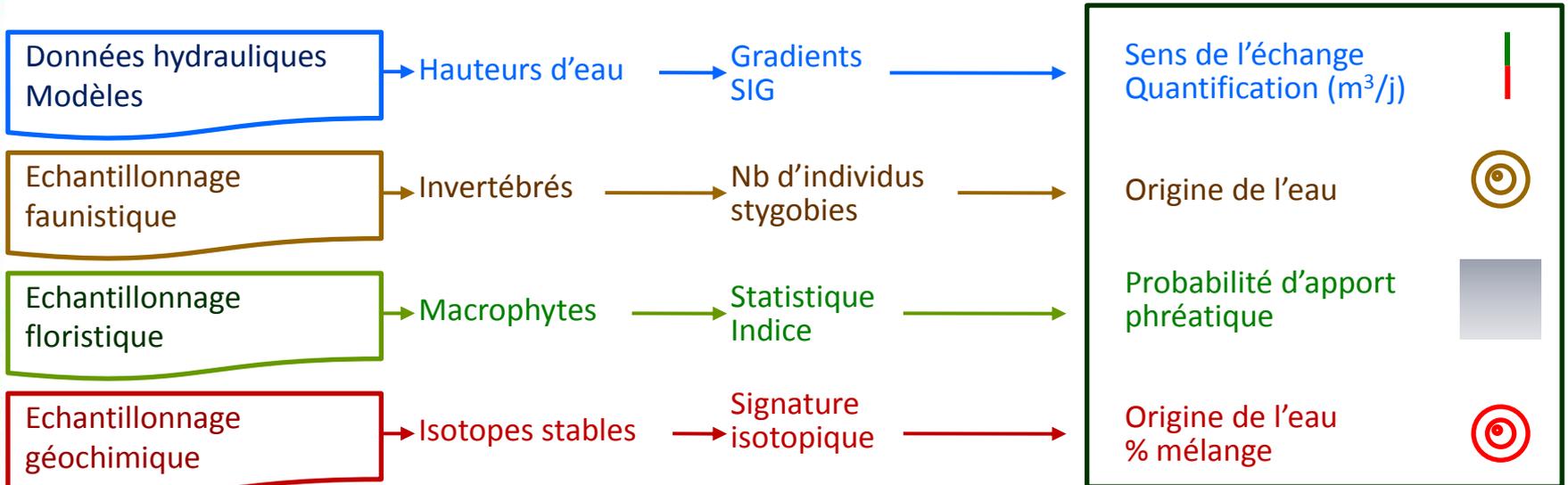
Echanges Nappes-Rhône et NAPROM : deux projets complémentaires

- **AE-RMC** (L. Cadilhac)
- **GRAIE-ZABR** (A. Clemens, D. Roux-Michollet)
- **ONEMA** (B. Augéard)
- **UMR 5600 EVS, Mines Saint-Étienne** (F. Paran, D. Graillot, E. Lalot)
- **UMR 5023 LENA**H (P. Marmonier)
- **UMR 6553 ECOBIO** (C. Piscart)
- **UMR 6249 CHRONO-Environnement** (G. Bornette)
- **UMR 042 CARTEL** (F. Arthaud)
- **UMR 6524 LMV** (V. Lavastre)
- **UAPV LHA** (Y. Travi)
- **BRGM Poitou-Charentes** (M. Chatelier, O. Douez)
- **Mines ParisTech** (N. Flipo, A. Mouhri, J.P. Vergnes)
- **UMR 7619 METIS** (F. Habets)
- **UMR 8212 MOSAIC** (P. Maugis)
- **Irstea** (G. Tallec)



Mise au point méthodologique

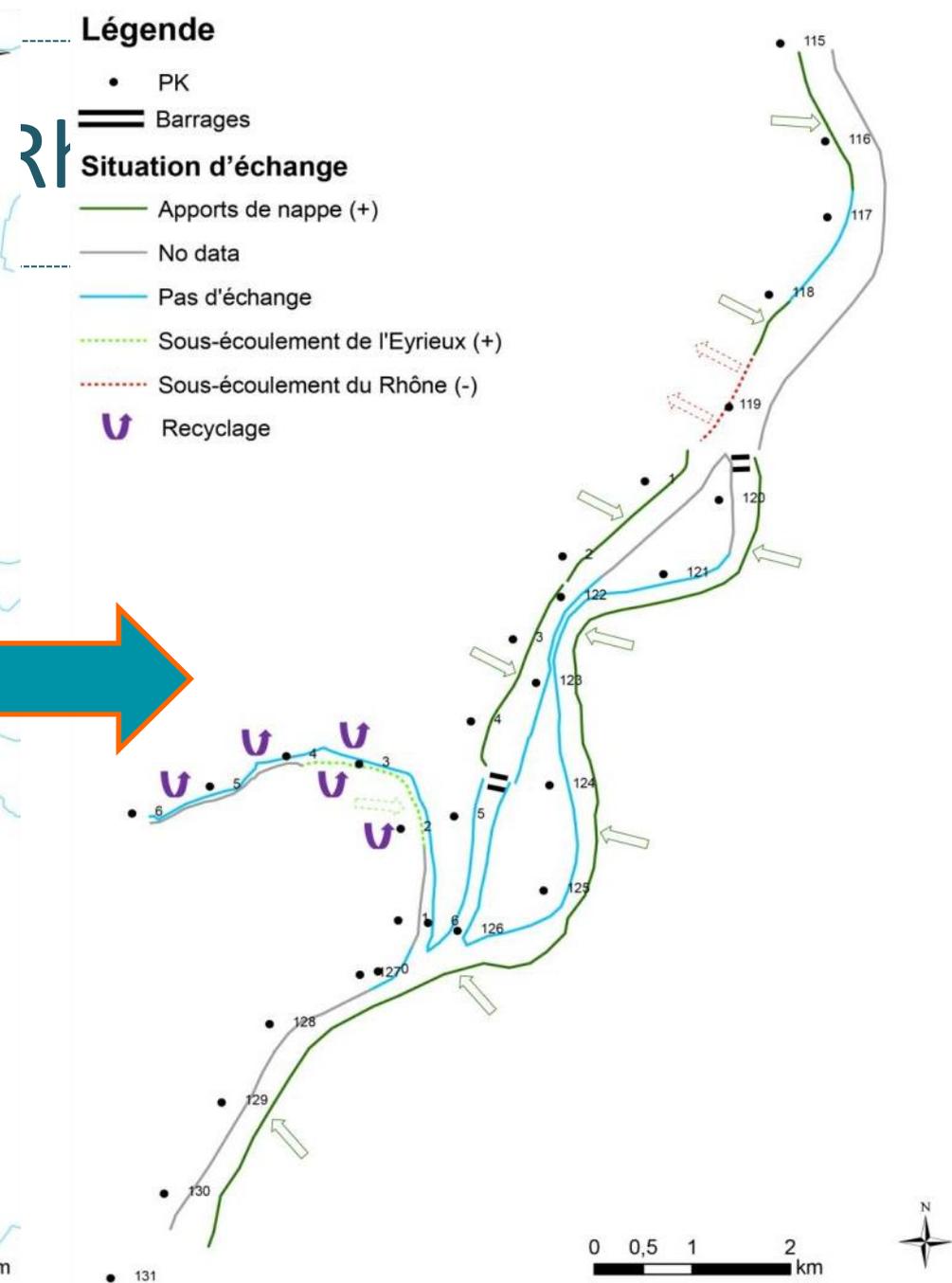
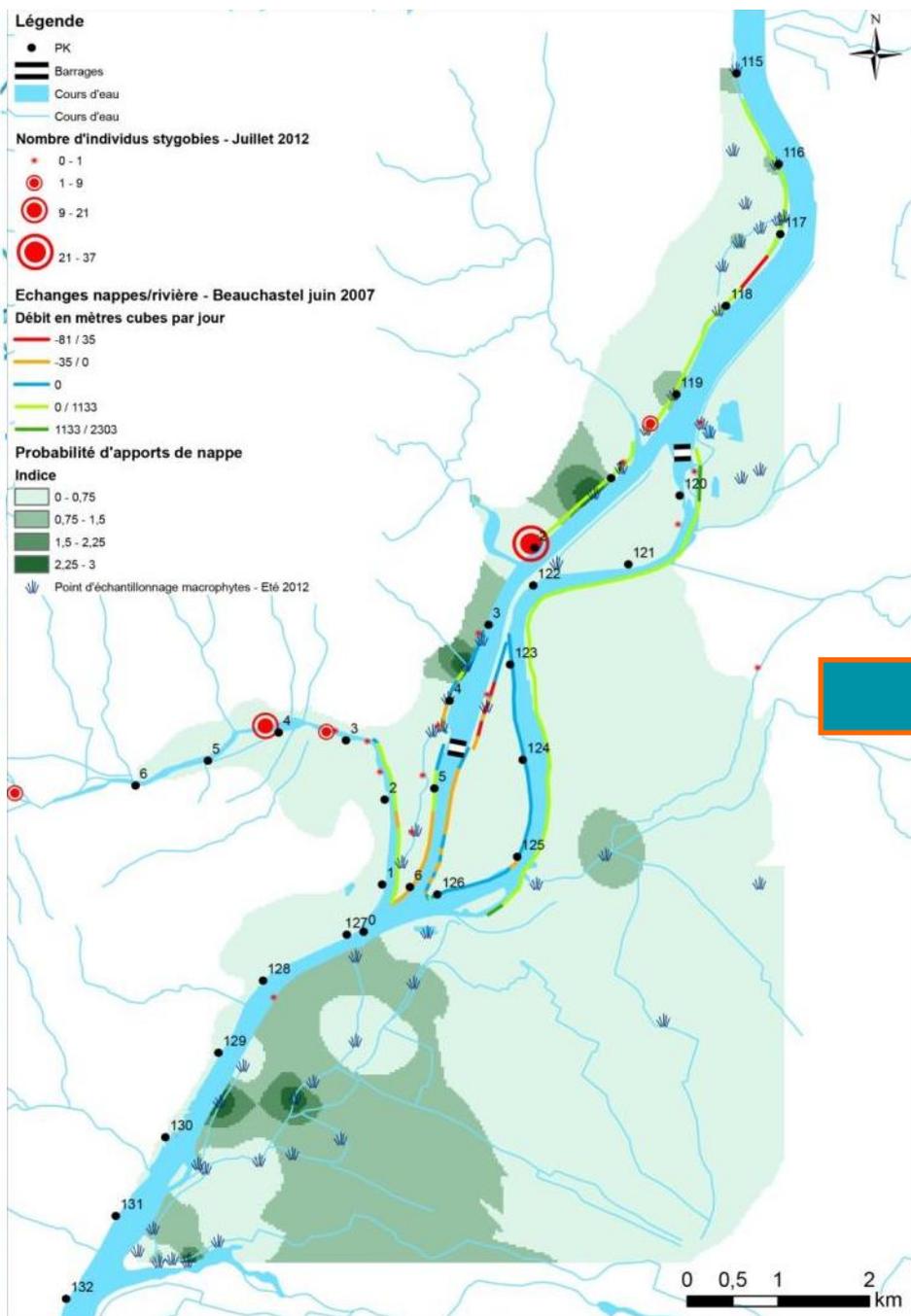
Principe et démarche du projet Echanges Nappes-Rhône (2006-2015)



Diagnostic interdisciplinaire
synthétique des échanges
nappes-Rhône

Vers un outil
opérationnel ?

- Croisement des métriques (méthodes)
- compréhension mutuelle : concepts et vocabulaire
 - identification des points d'achoppement
 - robustesse et limites des métriques (outils)
 - convergence / divergence des diagnostics
 - maintien du cap par rapport au projet et aux attentes du commanditaire
 - lien avec d'autres projets
 - ...



Perfectionnement méthodologique

Apports et compléments du projet NAPROM (2011-2016)

→ Fleuve Rhône – Donzère-Mondragon (ZABR)

Aquifère alluvial libre à semi-captif (>10m) – Aménagements lourds

Méthodes : Géomatique / Géochimie / Macrophytes / Invertébrés

→ Plaine Forez – Fleuve Loire (PLGN3)

Aquifère alluvial libre (<10m) – Incision du lit du fleuve

Méthodes : Géomatique / Modèle de nappe

→ Orgeval – Bassin de la Seine

Aquifère multi-couches – Petits cours d'eau

Méthodes : Géomatique / Invertébrés / Dispositif Molonari /
Modèle couplée thermie/hydrogéologie Metis

→ Plaine de l'Il – Bassin du Rhin

Aquifère très épais (max : 250m) – Vaste zone d'étude

Méthodes : Géomatique / Invertébrés /
Modèle hydrogéologique-hydrologique plateforme Eau-Dyssée

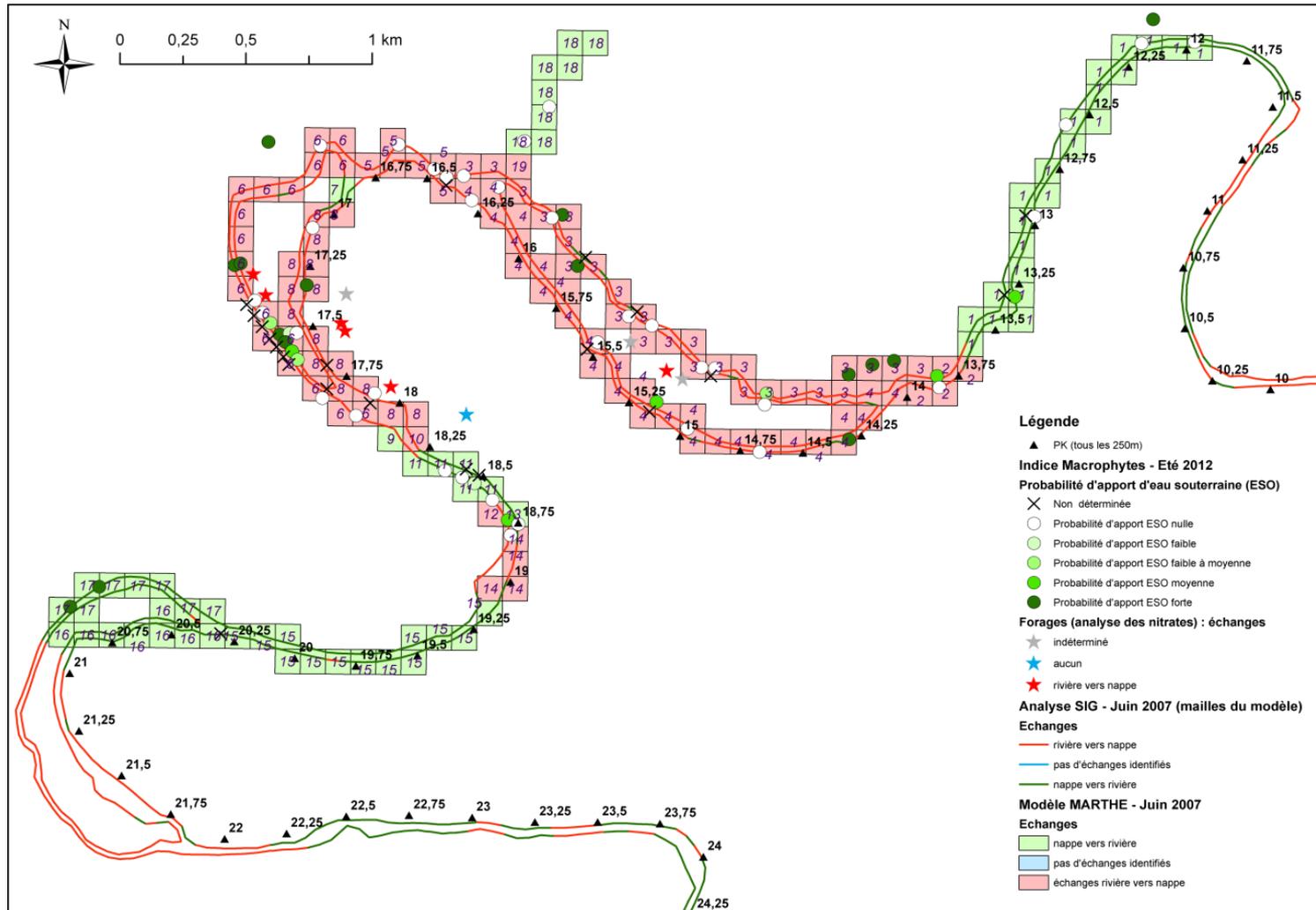
→ Sèvre-Niortaise – fleuve côtier

Aquifère multi-couches – Champ captant – Fort méandrage

Méthodes : Géomatique / Géochimie / Macrophytes /
Modèle hydrogéologique-hydrologique Marthes



Diagnostic sur la Sèvre-Niortaise



Guide méthodologique (1/3)

Eau et connaissance : un guide « somme »

→ Fondements

Apports et acquis du projet « Echanges Nappes-Rhône »

<http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>

→ Concept et objectif du guide

Quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluvionnaires pour caractériser les échanges nappe-rivière ?

Comment procéder et quelle est la marche à suivre pour caractériser les échanges nappe-rivière ?

→ Destination du guide – « acteurs » de l'eau

SAGE, Contrats de milieux, Agences de l'Eau, BE, ONEMA, Administrations, Collectivités, Syndicats mixtes...

EBU CONNAISSANCE Avertissement aux utilisateurs du guide

Avertissement aux utilisateurs du guide

Un seuil sur le Rhône (Source : M. Mendo)



A lire avant tout et absolument !

Ce document est un guide méthodologique rédigé comme un « document somme » sur la question des échanges nappes/rivières et non comme un guide technique. Son contenu est donc à la fois dense en information et détaillé du point de vue technique.

Attention, avant de se lancer tête baissée dans la caractérisation des échanges nappes/rivières sur un site, il est important de garder à l'esprit que la méthodologie proposée dans les pages qui suivent n'est pas adaptée à tous les contextes hydrogéologiques et territoriaux.

La méthodologie de caractérisation des échanges nappes/rivières ne fonctionne que pour les échanges nappes/rivières en milieux alluvionnaires.

Il faut aussi garder en tête que la démarche proposée implique de bien définir au préalable les objectifs et les enjeux spécifiques du secteur d'étude (utilisation de la ressource en eau, état écologique, restauration, ...).

En parallèle, il est aussi important de bien cerner les moyens humains et financiers à disposition, afin de s'assurer au préalable de la faisabilité du diagnostic des échanges nappes/rivières. Il est aussi nécessaire de disposer d'une bonne connaissance du territoire d'étude du point de vue géographique, hydrogéologique, géomorphologique et anthropique, pour s'assurer de la pertinence du diagnostic.

Ainsi les enjeux territoriaux, les objectifs à atteindre, les moyens et données disponibles conditionneront le choix de la ou des méthodes et de la démarche à suivre pour caractériser et quantifier, si cela est possible, les échanges nappes/rivières.

Ce guide peut être utilisé par le maître d'ouvrage qui souhaite faire réaliser une étude par un prestataire extérieur. Dans ce cas, ce document guidera le gestionnaire dans la rédaction du cahier des charges, le suivi et l'évaluation du travail effectué. Ce guide peut aussi être utilisé par le gestionnaire qui ambitionne de réaliser une telle étude en interne.

S'il est possible de lire le guide dans l'ordre des chapitres, il faut bien assimiler le Chapitre 2 (Présentation des outils) et le Chapitre 4 (Choix des méthodes) avant de se lancer dans le diagnostic des échanges nappes/rivières.

Guide méthodologique (2/3)

Contenu

→ Choix de la méthode selon :

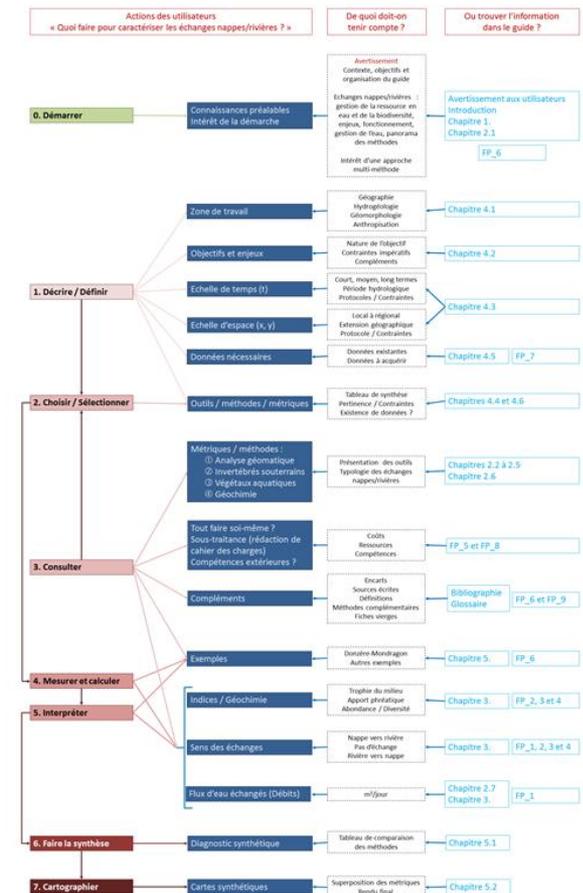
- **zone de travail** (contextes géographiques, hydrogéologiques, géomorphologiques, anthropiques...)
- **objectifs et enjeux** (connaissance, restauration / réhabilitation, pollution / protection, impact des captages, réserve / infiltration, DCE,...) et les moyens
- **échelle spatio-temporelle** pertinente
- **existence ou non de données** appropriées (densité, fiabilité, précision, continuité temporelle et spatiale,...)

→ Interprétation des résultats :

- par métrique (méthode)
- tableau de synthèse comparatif
- cartographie des résultats

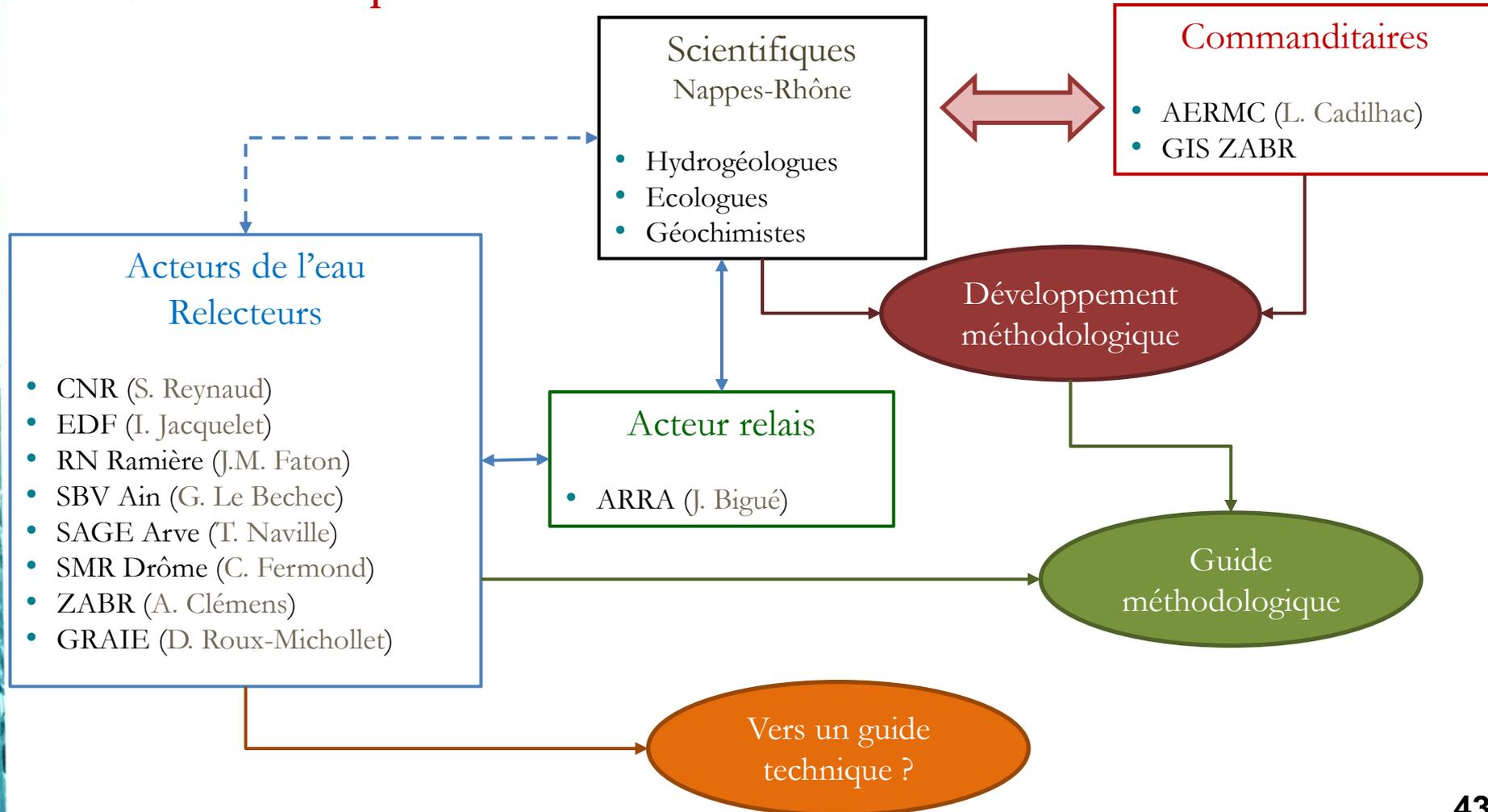
→ Un glossaire et des annexes pour aller plus loin

Figure 1 : Démarche complète de cheminement dans le guide méthodologique



Guide méthodologique (3/3)

Validation du contenu par les acteurs de l'eau



Guide technique (1/3)

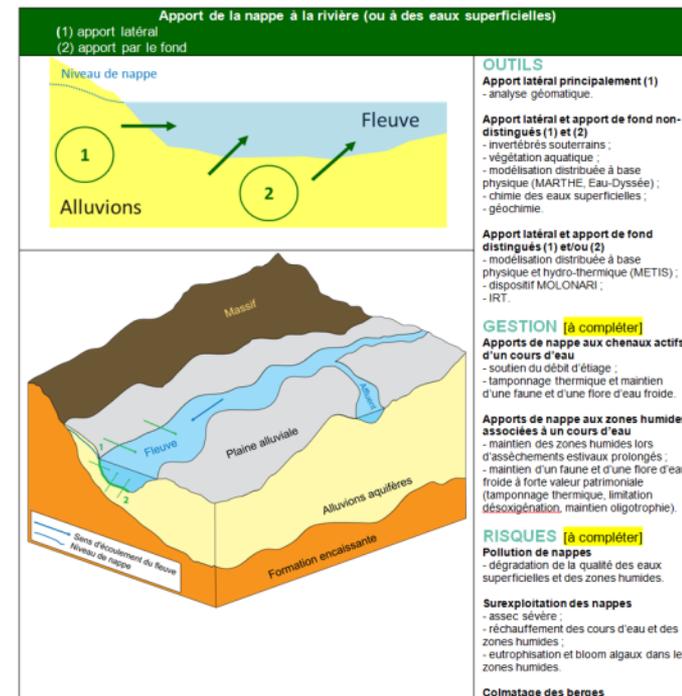
Comprendre et agir : un guide « light »

→ Fondements

- valoriser les apports et acquis des projets « **Nappes-Rhône** » et **NAPROM**
- mettre à profit l'**expérience acquise** lors de la réalisation du guide méthodologique
- aller plus loin dans le travail en relation avec les **acteurs de l'eau**

→ Concept et objectif du guide

- proposer une aide à la caractérisation et au choix des sites d'études
- intégrer de **nouveaux outils** dans la démarche
- étendre le champ d'utilisation du guide au **domaine sédimentaire** et la typologie des configuration d'échanges nappe-rivière
- proposer un **format plus léger** avec une information plus facilement et plus rapidement accessible



Guide technique (2/3)

PARTIE 1 : démarche

- 1 - Enjeux des échanges nappe-rivière et échelles de travail
- 2 - Importance, collecte et validation des données
- 3 - Typologie des configurations d'échange
- 4 - Choix et caractérisation multi-critères des sites d'étude
- 5 - Choisir la ou les bonnes méthodes
- 6 - Diagnostic synthétique

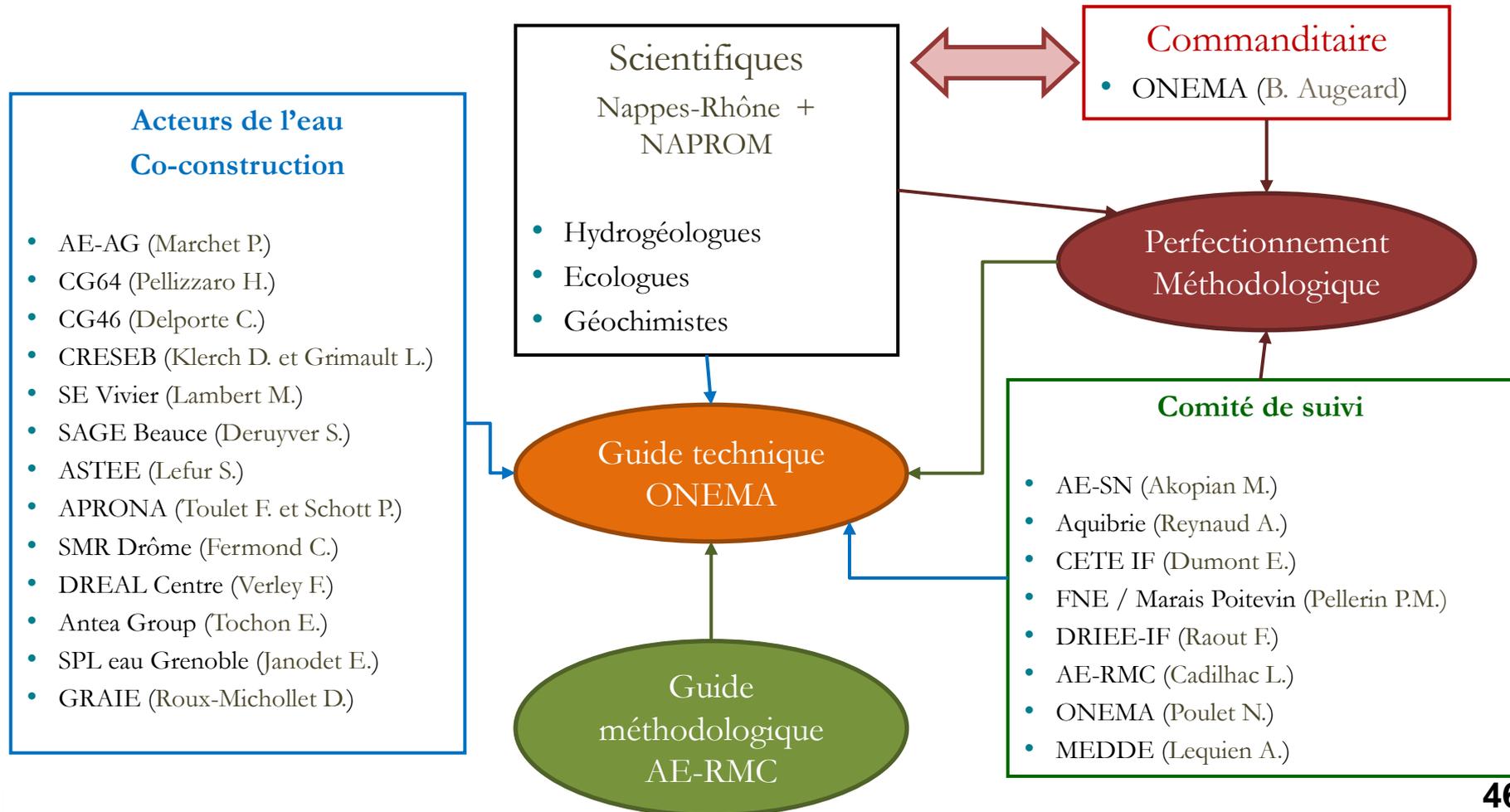
PARTIE 2 : outils

- 1 - Analyse géomatique
- 2 - Modèles hydrodynamiques à base physique
- 3 - Modèles hydrothermiques à base physique et dispositifs MOLONARI
- 4 - Image thermique infrarouge
- 5 - Géochimie
- 6 - Végétation aquatique
- 7 - Invertébrés souterrains
- 8 - Autres méthodes



Guide technique (3/3)

Co-construction avec les acteurs de l'eau



Séminaire de lancement

Septembre 2014 – GRAIE-ZABR – RN de l'Île de la Platière

→ Environ 100 participants :

- de toute la France (72% Rhône-Alpes)
- de différentes catégories socio-professionnelles (privées, administrations, agences, chercheurs...)

→ Transmission et partage de connaissance

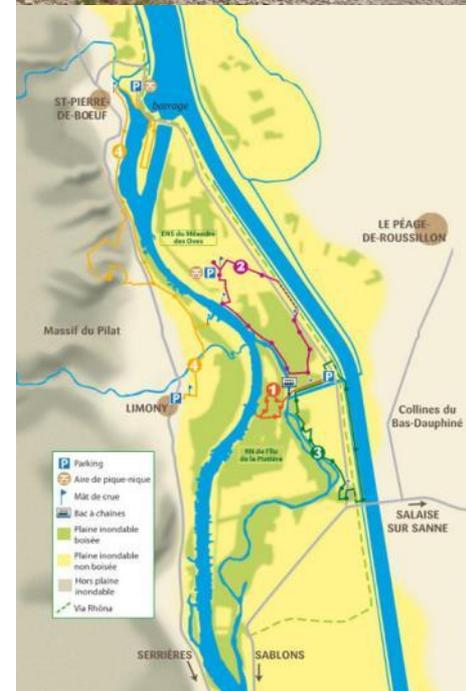
- retour positif des participants
- fort intérêt pour :
 - . l'approche pluridisciplinaire
 - . le socle de connaissance
 - . la description des outils
 - . l'usage à destination de la restauration de rivières et des zones humides

→ Préfiguration de sessions de formations

ateliers théoriques et ateliers pratiques

Septembre 2015 – Le guide Nappes-Rhône est terminé

http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VF.pdf



Source : site web de l'Île de la Platière

<http://www.ile.platiere.reserves-naturelles.org>

47

Conclusion et perspectives

Des suites à donner au guide...

- Sessions de formation
- Domaine karstique et cristallin
- Aspects qualité de l'eau
- Diagnostic à l'échelle masse d'eau

- Information : vers un site web ?
- Retour d'expérience / forum ?

Pour aller encore plus loin...

- Identification milieux humides dépendants des eaux souterraines (besoin DCE)
- Services écosystémiques
 - Stockage
 - Régulation (T C)
 - Autoépuration



Rivière Cèze : Grotte des fées
Source : projet « Echanges Karst-Cèze »

A suivre...

Pour aller plus loin...

Quelques références bibliographiques

- Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015) Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 178p. (http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VE.pdf)
- Lalot E. (2014) Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône. Thèse de Doctorat. ENSM-SE.
- Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges. SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.
- Graillot D., F. Paran, E. Lalot, P. Marmonier, G. Bornette, C. Piscart, F. Arthaud, N. Flipo, A. Mouhri, F. Habets, C. Thierion, F. Rejiba, L. Bodet, R. Guérin, G. Tallec, M. Chatelier, O. Douez, P. Maugis (2012 et 2013) Caractérisation des échanges nappes/rivières à l'échelle du tronçon ou du linéaire par métrique expérimentale ou par modélisation jusqu'à l'échelle régionale. NAPROM (NAPPes-Rivières : Observation et Modélisation). ONEMA, Rapport année 1 et 2.
- Paran F., Graillot D., G. Bornette, Marmonier P., Arthaud F., Piscart C., Cadilhac L. (2012) Development of practical guidebook for water managers: a tree structured approach to characterize exchanges between alluvial aquifers and the Rhône River. IS RIVER, Conférence internationale, Lyon, France, Juin 2012.
- Arthaud F., Baillet H., Bornette G., Creuzé des Châteliers M., Déchomets R., Dole-Olivier M.J., Ferreira D., Germain A., Gibert J., Graillot D., Jezequel C., Lafont M., Lalot E., Marmonier P., Novel M., Paran F., Piscart C., Pujalon S., Rodriguez C., Simon L., Travi Y., Winiarski T. (2007, 2008, 2010 2012)et 2015) - Evaluation des échanges nappes/rivière et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides). Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapports finaux phases 1, 2, 3, 4 et 5 Action recherche valorisation ZABR, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (ENSM-SE).Université Claude Bernard Lyon 1 (UCBL), CEMAGREF Lyon. (<http://www.graie.org/zabr/projetstrans/index.htm>).
- Graillot D., Paran F., Mimoun D., Bornette G., Gibert J., Cadilhac L. (2008) Coupling groundwater modeling with biology to identify strategic water resources. In. Proceedings of the conference “ModFlow and More: Ground Water and Public Policy”, organisée par Colorado School of Mines, Golden, USA, May 2008, pp209-213.
- Paran F., Dechomets R., Graillot D., Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale. Géomatique expert, 2008 (64), pp. 73-79.

Merci pour votre attention

**Merci à tous ceux ayant participés de près ou de loin
aux projets Nappes-Rhône et NAPROM**



La Drôme en tresse et en fleur du côté d'Alex (France)

Mars 2014

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

4. Analyse géomatique

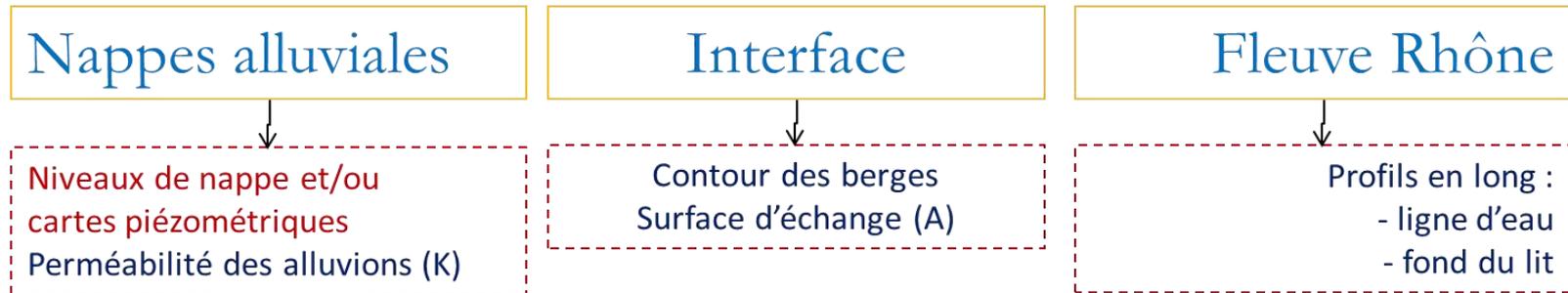
Identifier et quantifier les échanges nappes/rivières
à partir d'une modélisation simplifiée



Frédéric PARAN
EMSE, UMR 5600 EVS

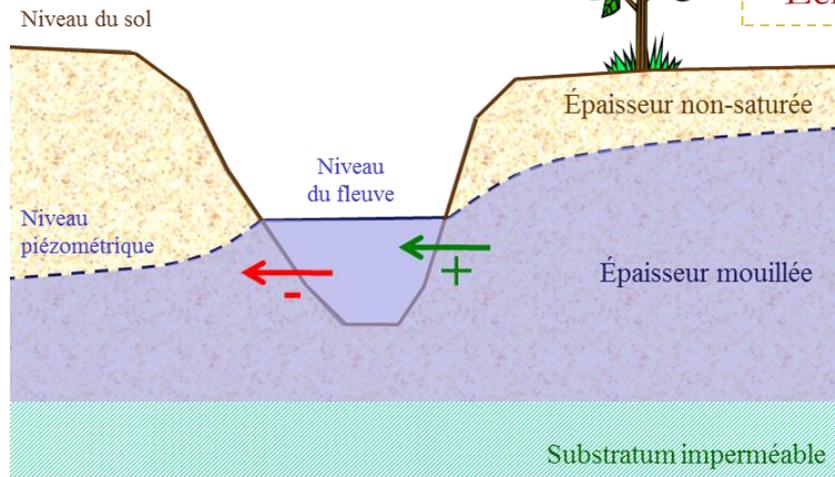
Principes de la méthode

Une méthode uniquement destinée aux milieux poreux (ex : alluvions, sédiments)



Convention :

- Échanges nappe vers fleuve : +
- Échange fleuve vers nappe : -



Loi de Darcy $Q = K.A.i$

Q : débit en m^3/s

K : perméabilité en m/s

A : section d'écoulement en m^2

i : gradient hydraulique ($i = \frac{dH}{dL}$)

Intérêt d'un modèle simplifié

Contraintes liées aux problématiques environnemental

→ Nombreuses données, mais :

- fragmentées et hétérogènes
- éparées, lacunaires, parfois anciennes
- empreintes d'incertitudes, asynchrones
- de sources variées

→ + Nombreuses influences humaines :

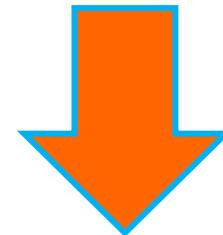
- centrales nucléaires ;
- barrages hydroélectriques / réservoirs
- écluses
- canaux de dérivation, contre-canaux, canaux
- digues, épis Girardon, seuils
- pompages, rejets
- urbanisation

→ Utilisation des modèles contraignantes :

- très couteux en temps de travail
- très gourmands en données

Nous avons donc mis en œuvre
une méthode :

- simple
- peu couteuse
- reproductible
- adaptées aux contraintes



Outils SIG
d'analyse spatiale des
hauteurs d'eau en nappe
et en rivière

Acquisition et préparation des données

Un travail préparatoire important

→ Récupération de données :

- Littérature : rapports, études...
- Données existantes : bases de données, bureaux d'études, gestionnaires...

→ Acquisition de données :

- Nivellement des ouvrages (puits, piézomètres...) au GPS
- Niveaux de nappe (sonde piézométrique, sonde de pression)
- Profils en long de la ligne d'eau (canoë et GPS)
- Profils en long du fond du lit (sonde bathymétrique et GPS)

→ Préparation des données :

- Cohérence des systèmes de coordonnées xy
- Cohérence du référentiel altimétrique (z)
- Géoréférencement
- Digitalisation
- Compatibilité et format des données (ArcGIS, MapInfo, Excel, Access...)

Présentation rapide de la méthode

Sens d'écoulement du cours d'eau : TIN cours d'eau

→ Berges du cours d'eau :

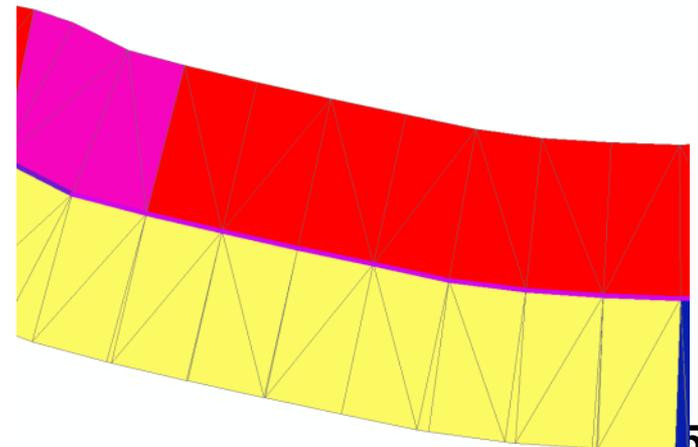
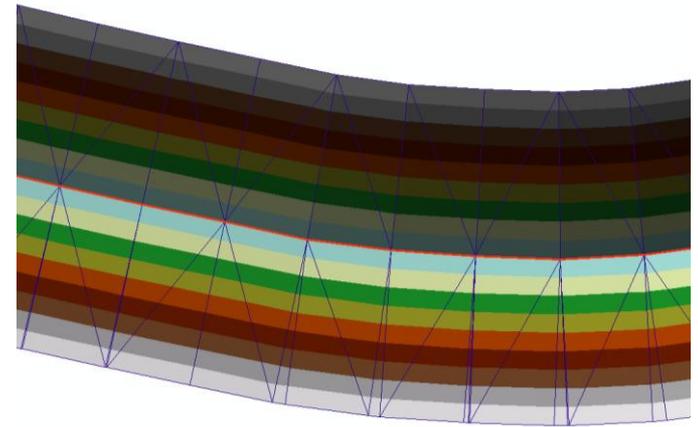
- Digitalisation à partir de Scan 25 IGN ou Photographies aériennes (Create Features)
- Segmentation régulière des polygones (Split line at vertices, COGO Toolbars)

→ Création du TIN :

- Zone tampon de 100m autour de la polyligne de cours d'eau (Buffer)
- Génération du TIN à partir de la polyligne de berge et de la zone tampon (Create TIN)

→ Affectation de l'angle du TIN aux segments de berge :

- Transformation du TIN en triangle (Tin to Triangle)
- Intersection des triangles et de la polyligne de berge (Intersect)
- Calcul de l'angle d'écoulement : correction de $\pm 90^\circ$



Présentation rapide de la méthode

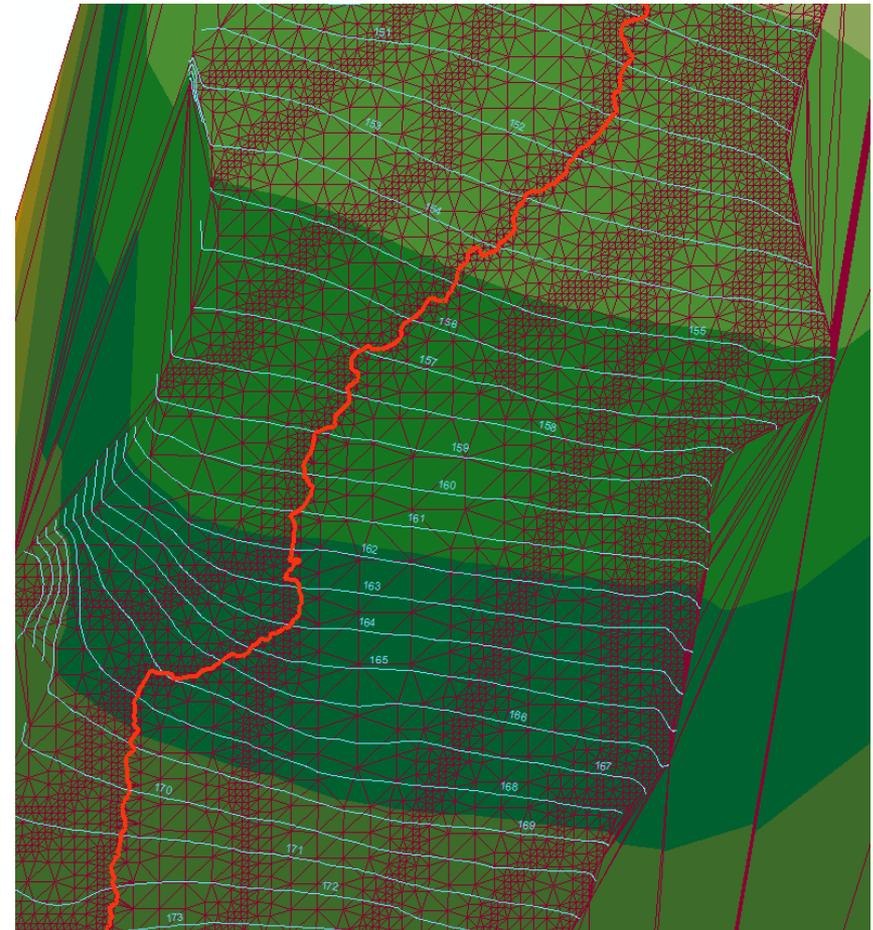
Sens d'écoulement de la nappe : TIN nappe

→ Création du TIN (Create TIN) :

- Courbes Isopièzes ou niveaux ponctuels
- Niveaux d'eau dans la rivière

→ Affectation des valeurs du TIN aux segments de berge :

- Transformation du TIN en triangle (Tin to Triangle)
- Intersection des triangles et de la polyligne de berge (Intersect) pour affectation du sens d'écoulement et du gradient de nappe à chaque segment de la polyligne de berge



Présentation rapide de la méthode

Angle et débit d'échange : calcul dans les tables attributaires

→ Angle d'échange

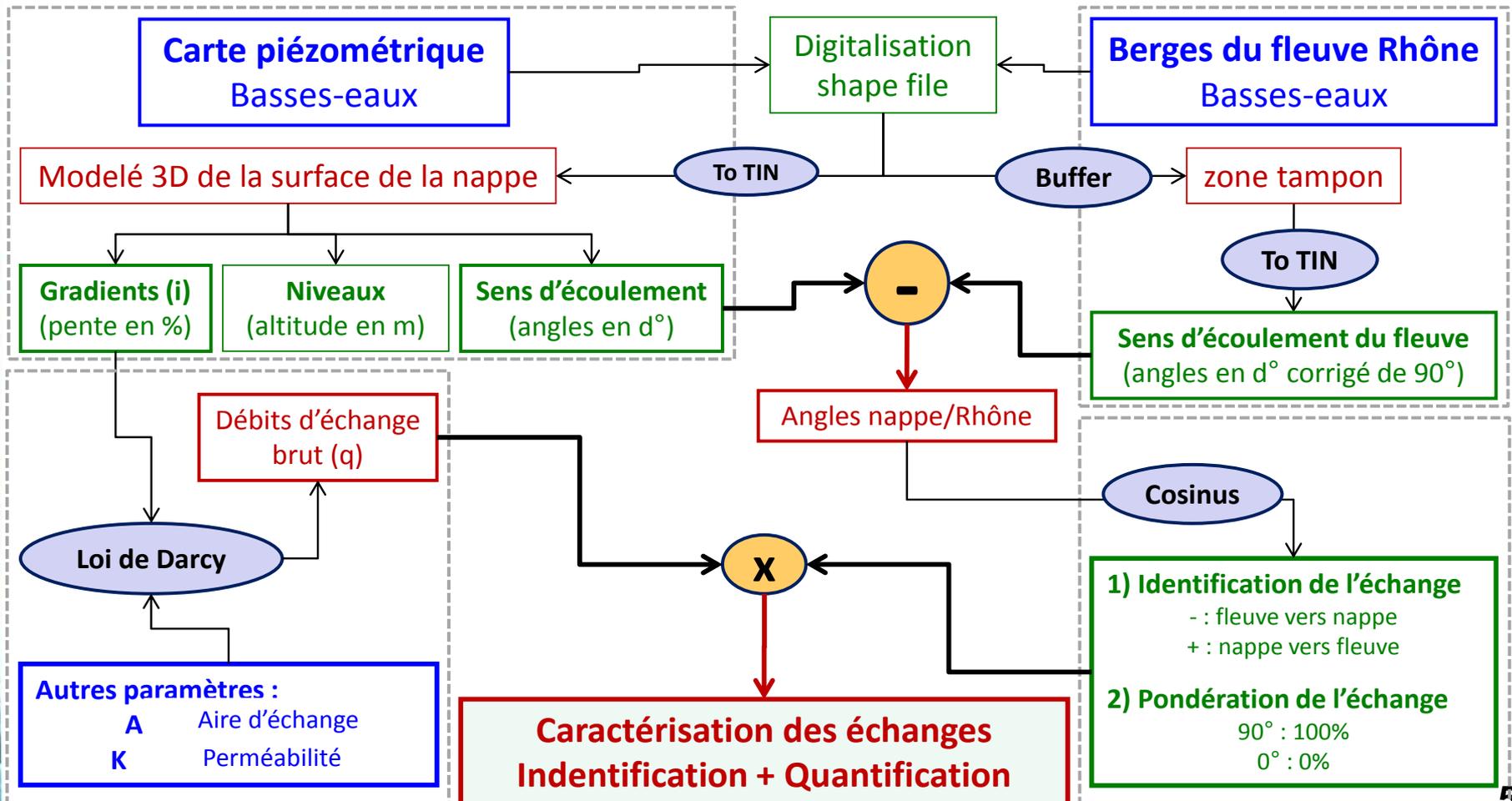
Angle cours d'eau – Angle de nappe = Angle d'échange

→ Débit d'échange (selon les données disponibles) :

- Intégration au préalable des données disponibles ou de valeurs estimées pour chaque segment de polyligne de berge dans la table attributaire : perméabilité (K), surface d'échange (A)
- Calcul du débit d'échange avec la Loi de Darcy
- Pondération du débit en fonction de l'angle d'échange
- Détermination de l'incertitude (erreur relative sur le débit calculé)

Une démarche géomatique

SIG et fonctions d'analyse spatiale

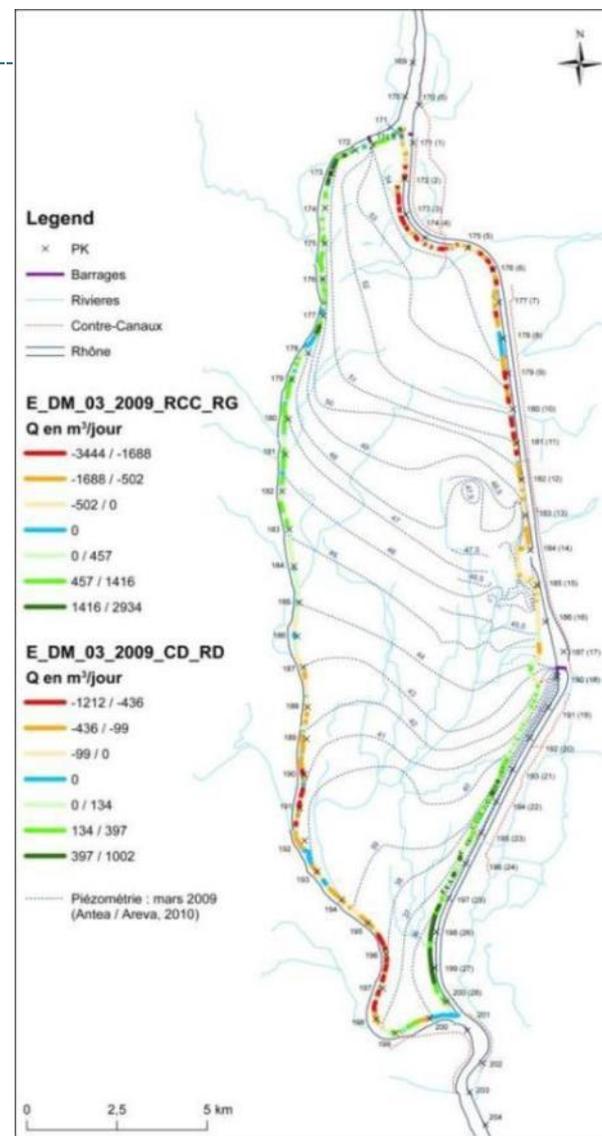


Potentiel de caractérisation des échanges

Résultats spatialisés : agrégation par tronçons et cartographie

Secteur_Rive_Date	Q+	Q-	Qu+	Qu-	imoy+	imoy-
	m ³ /j	m ³ /j	m ³ /j/km	m ³ /j/km	%	%
RCC_RG_1968	146 704	-4 762	6 380	-3 240	1,5	1,6
RCC_RG_1969	134 837	-7 213	6 228	-2 569	1,4	1,5
RCC_RG_2008	60 482	-13 322	3 044	-2 414	0,9	0,8
RCC_RG_2009	131 257	-96 935	8 786	-7 721	3,2	1,3

PK	Secteur_Rive_Date	Q+	Q-	Qu+	Qu-
		m ³ /j	m ³ /j	m ³ /j/km	m ³ /j/km
171 à 172,5	RCC_RG_1968	827	-3 964	2 405	-3 600
172,5 à 195	RCC_RG_1968	145 887	-797	6 440	-2 163
172 à 173,5	RCC_RG_1969	806	-3 863	2 429	-4 020
173,5 à 196	RCC_RG_1969	134 031	-1 763	6 287	-2 389
196 à 197	RCC_RG_1969	0	-1 587	0	-1 432
171,5 à 179,5	RCC_RG_2008	32 824	-1 534	4 285	-5 442
179,5 à 180,5	RCC_RG_2008	870	-1 692	1 462	-2 164
180,5 à 188	RCC_RG_2008	19 211	-429	2 607	-1 550
188 à 192	RCC_RG_2008	617	-6 985	902	-2 307
192 à 196	RCC_RG_2008	6 959	-213	1 955	-403
196 à 196,5	RCC_RG_2008	0	-247	0	-398
171 à 185,5	RCC_RG_2009	126 361	-1 637	9 256	-2 488
185,5 à 199	RCC_RG_2009	653	-93 674	1 406	-8 190
199 à 200	RCC_RG_2009	4 242	-1 624	5 102	-3 537



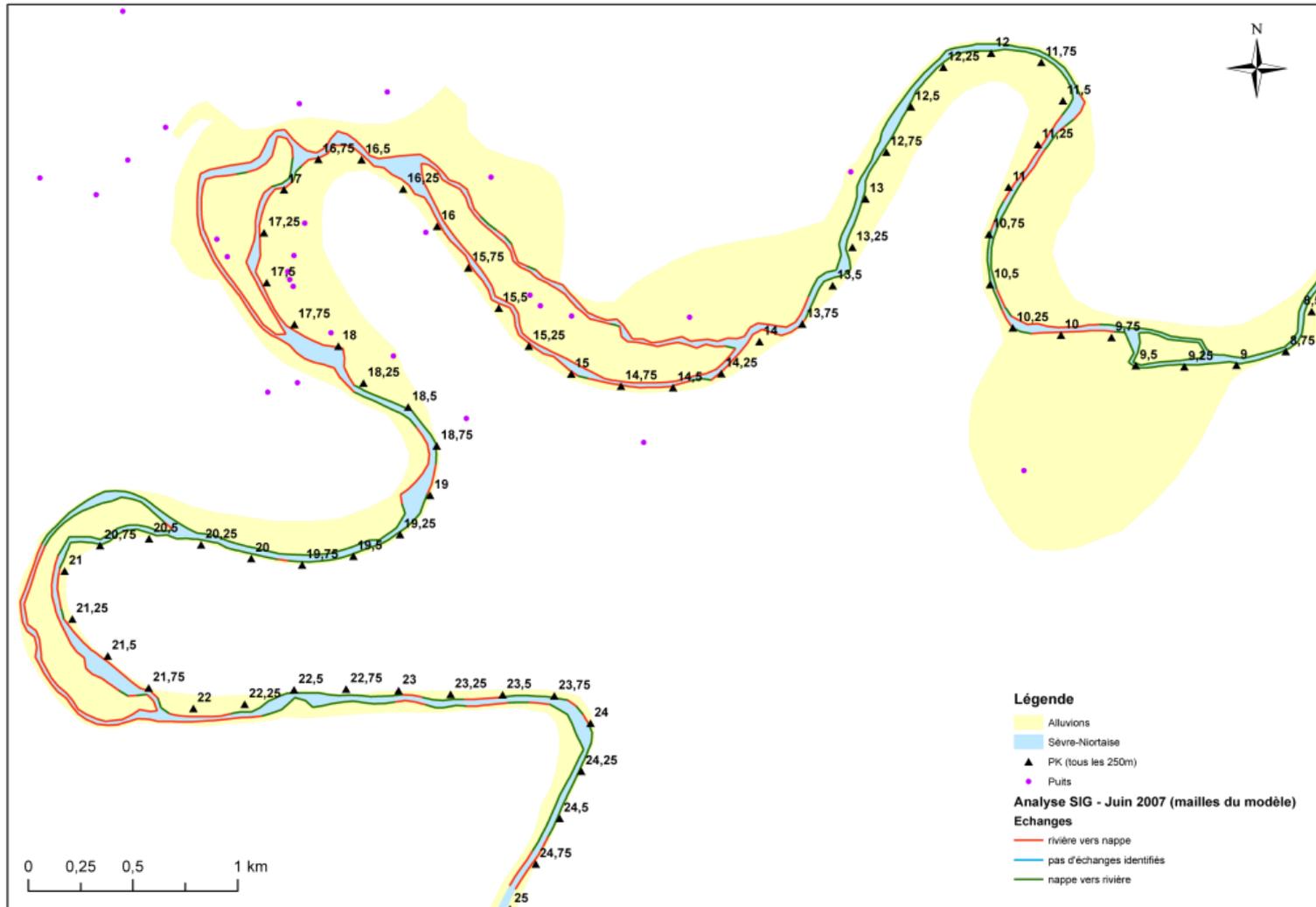
Potentiel de caractérisation des échanges

Localisation	Secteurs (chutes CNR)	Estimation de l'apport de la nappe au Rhône (m ³ /j)	
		Rive gauche	Rive droite
Rhône-Amont	Brégnier-Cordon	Données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 111 à 99 en m ³ /j : [32 370 ; 61 950]	-
Rhône-Moyen	Péage-de-Roussillon	Modèle BURGEAP, données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 51 à 63 en m ³ /j : [17 200 ; 46 880] Modèle de nappe (Thèse E. Lalot)	Modèle de nappe (Thèse E. Lalot)
Rhône-Aval	Beauchastel	Données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 119,5 à 126 en m ³ /j : [13 870 ; 18 740] Apports de nappe à l'Eyrieux PK 0 à 3 en m ³ /j : [1 230 ; 1 670]	Apports de nappe au fleuve PK 122,5 à 126 en m ³ /j : [3 ; 5 370]
Rhône-Aval	Donzère-Mondragon	Modèle ANTEA, données CNR	
		Apports de nappe au fleuve PK 170 à 195 en m ³ /j : [126 360 ; 145 890] Apports de nappe à l'Ardèche PK 0 à 8 en m ³ /j : [1 830]	Apports de nappe au fleuve PK 186 à 182 en m ³ /j : [1 150]

Estimation quantitative des apports de nappe au fleuve Rhône

Agrégation par secteurs

Potentiel de caractérisation des échanges



Coûts (hommes/jour)

Coûts (hommes/jour)		
Tâches	Temps	Coût
TERRAIN		
Reconnaissance	2	2
Nivellement des puits (GPS)	10 puits/j	2
Relevé de la ligne d'eau d'un cours d'eau (GPS)	15km/j	4
Relevé bathymétrique de la profondeur d'un cours d'eau	4 tronçons/j	3
Relevé piézométrique	25 puits/j	2
Jaugeage (mesure de débit)	4 sections/j	4
TRAITEMENT SIG		
Préparation des données pour l'analyse géomatique	10	1
Analyse géomatique (traitement SIG)	5	1
Calcul des débits	2	1

Matériel nécessaire

Matériel de mesure

Sonde piézométrique
Sonde bathymétrique
Conductimètre
Thermomètre
GPS + antenne
Appareil photographique
Matériel d'enregistrement en continu
Sondes enregistreuses,
Socles des sondes
Système de fixation des sondes
Ordinateur de terrain



Logiciels

SIG
GPS



Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier

Orientation et informations

Cartes IGN 1/25 000
Cartes géologiques BRGM 1/50 000
Boussole
Marteau de géologue
Rapports et études

Outils et petit matériel

Trousse de secours
Caisse à outils
Topofil

Navigation

Bateau gonflable (Photo 1) + rames
Gonfleur électrique et à pied
Gilets de sauvetage + casques
Moteur électrique + batterie + support
Socle pour GPS et antenne
Bidons et sacs étanches

Merci pour votre attention

Pour plus de détail sur cette méthode

Atelier n°1 cet après-midi

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Echelle de temps	Niveau d'information nécessaire	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation			Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
					 .			 .	 .
Nappes alluviales libres connectées à la rivière	Ponctuelle	0,5 à 1km	Entité hydrogéologique	Instantanés (t) Saisonnier (Δt)	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

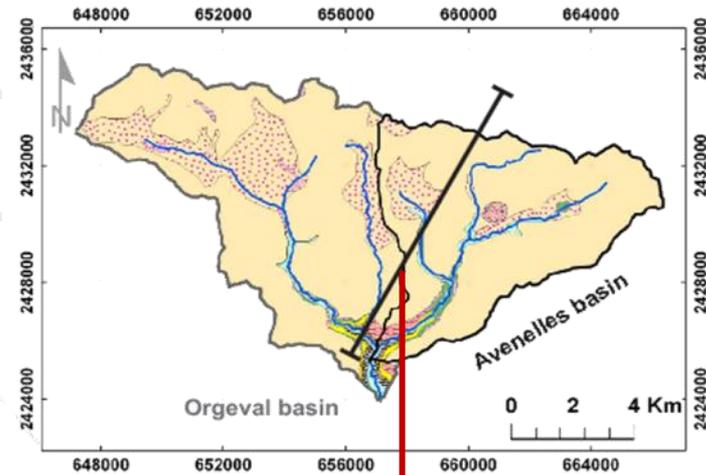
5. Utilisation de la température comme traceur des écoulements

Dispositifs de mesure et méthodologie d'estimation

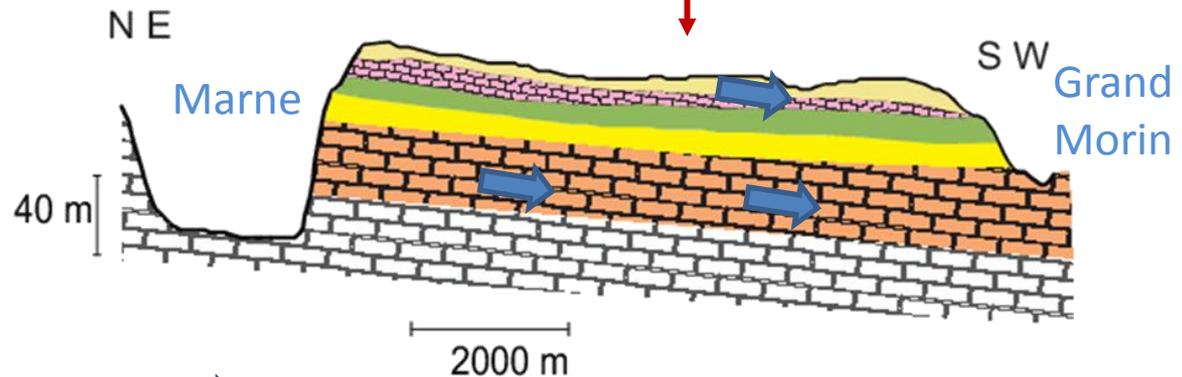
Agnès Rivière

Contributeurs : Nicolas Flipo, Amer Mouhri, Jean Marie Mouchel, Karina Cucchi, Sylvain Pasquet, Ludovic Bodet, Fayçal Rejiba, Anne Jost, Edmée Cuisinier, Véronique Durand, Patrick Ansart, Gaëlle Tallec, Emmanuel Cocher, Gaghik Hovhannissian, Aurélien Baudin, Asma Berrhouma, Yoram Rubin, Patrick Goblet

Bassin des Avenelles



- C, Colluvions
- Fz, Alluvium
- LP, Silt
- LPg1b, Silt
- Lprm, Silt and clay
- Rm, Clay
- Lpg2, Silt and sand
- g2, Stampian sand
- g1b, Rupelian (Brie) limestone
- g1a, Priabonian mudstone
- e7b, Bartonian marl
- e7a, Bartonian (Champiny) limestone
- e6b, Bartonian limestone and marl (Saint Ouen limestone)



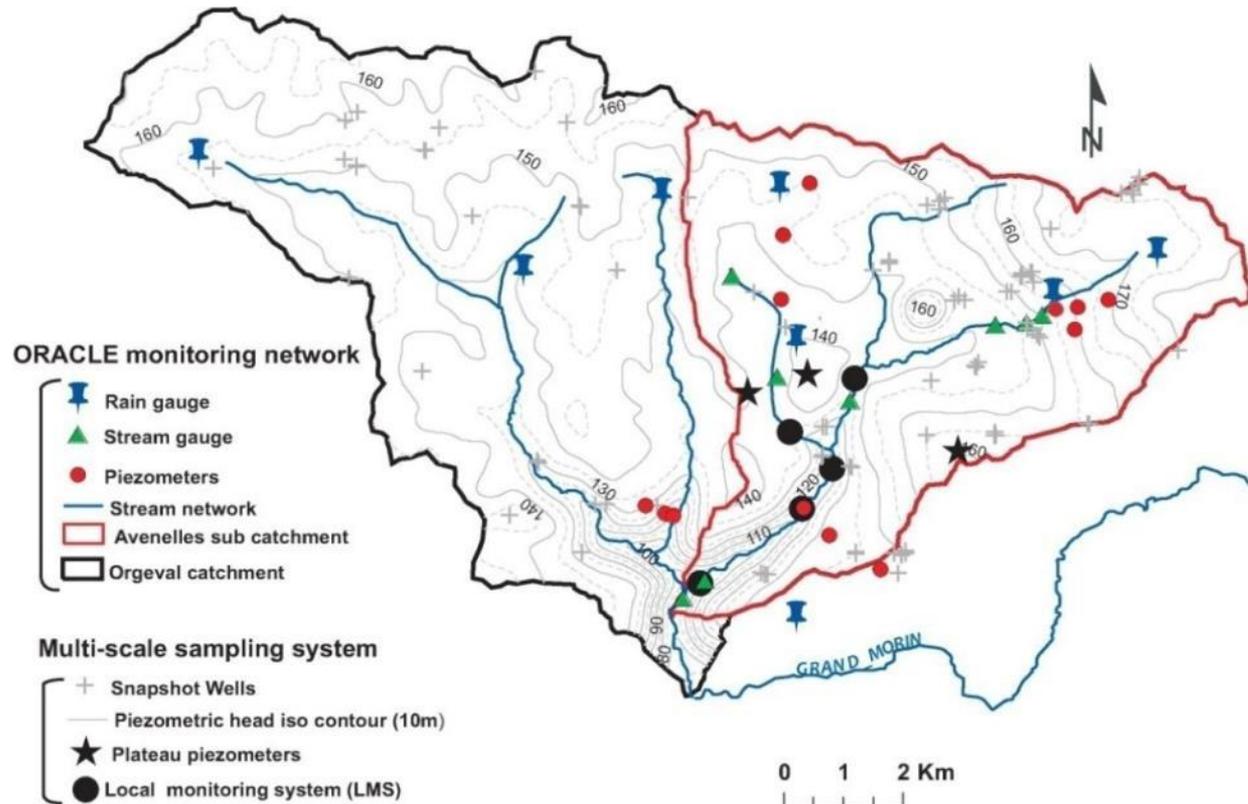
➔ Direction principale de l'écoulement

Mouhri et al. 2013, JH, 504

Objectifs

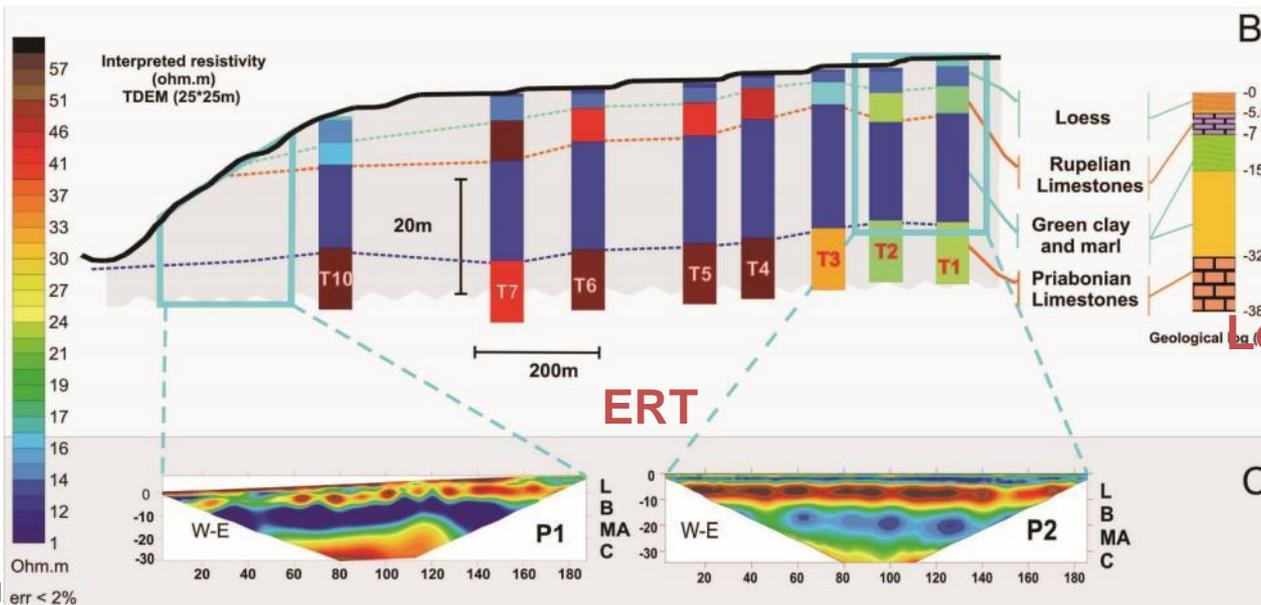
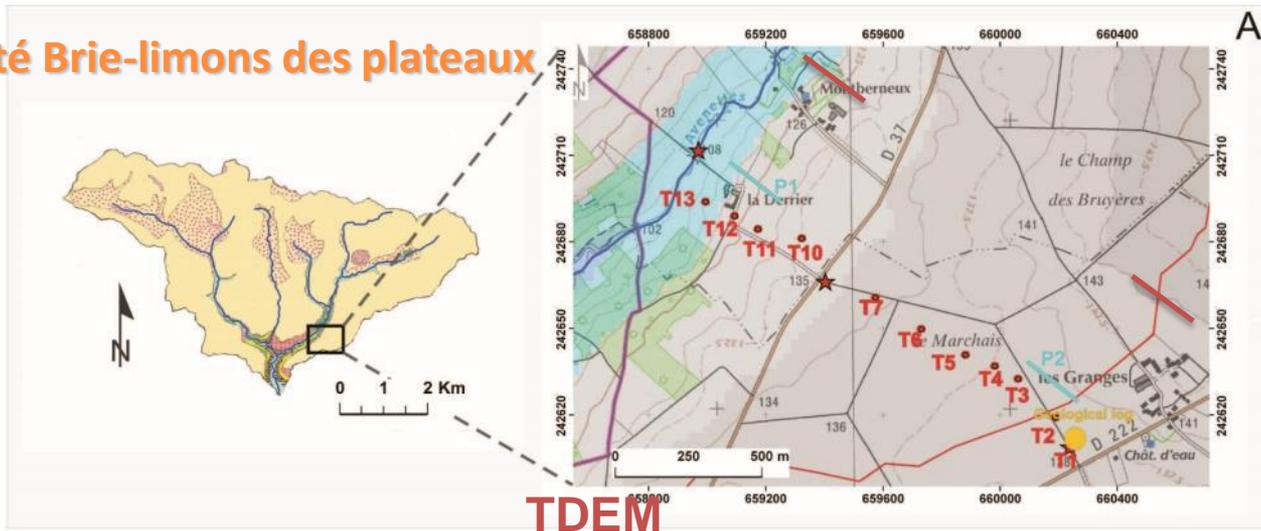
- Estimation du flux total d'eau à l'échelle locale
- Spatialisation des échanges à l'échelle d'un réseau hydrographique

GIS ORACLE

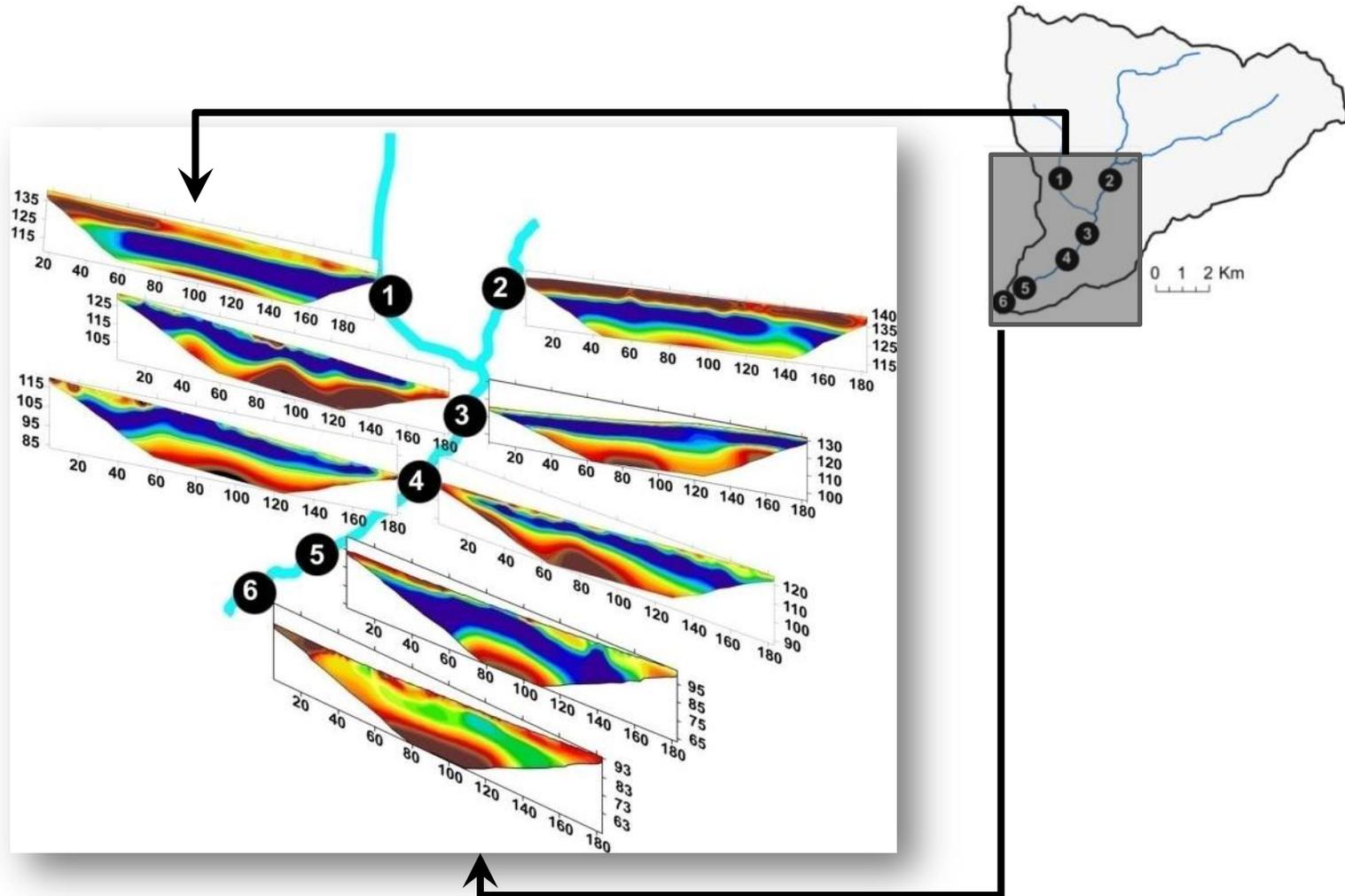
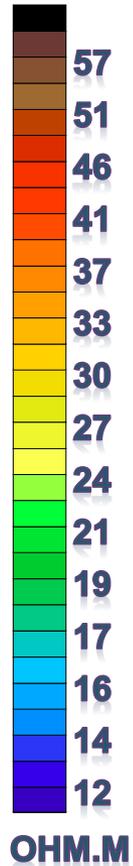


Utilisation de la géophysique

Connectivité Brie-limons des plateaux

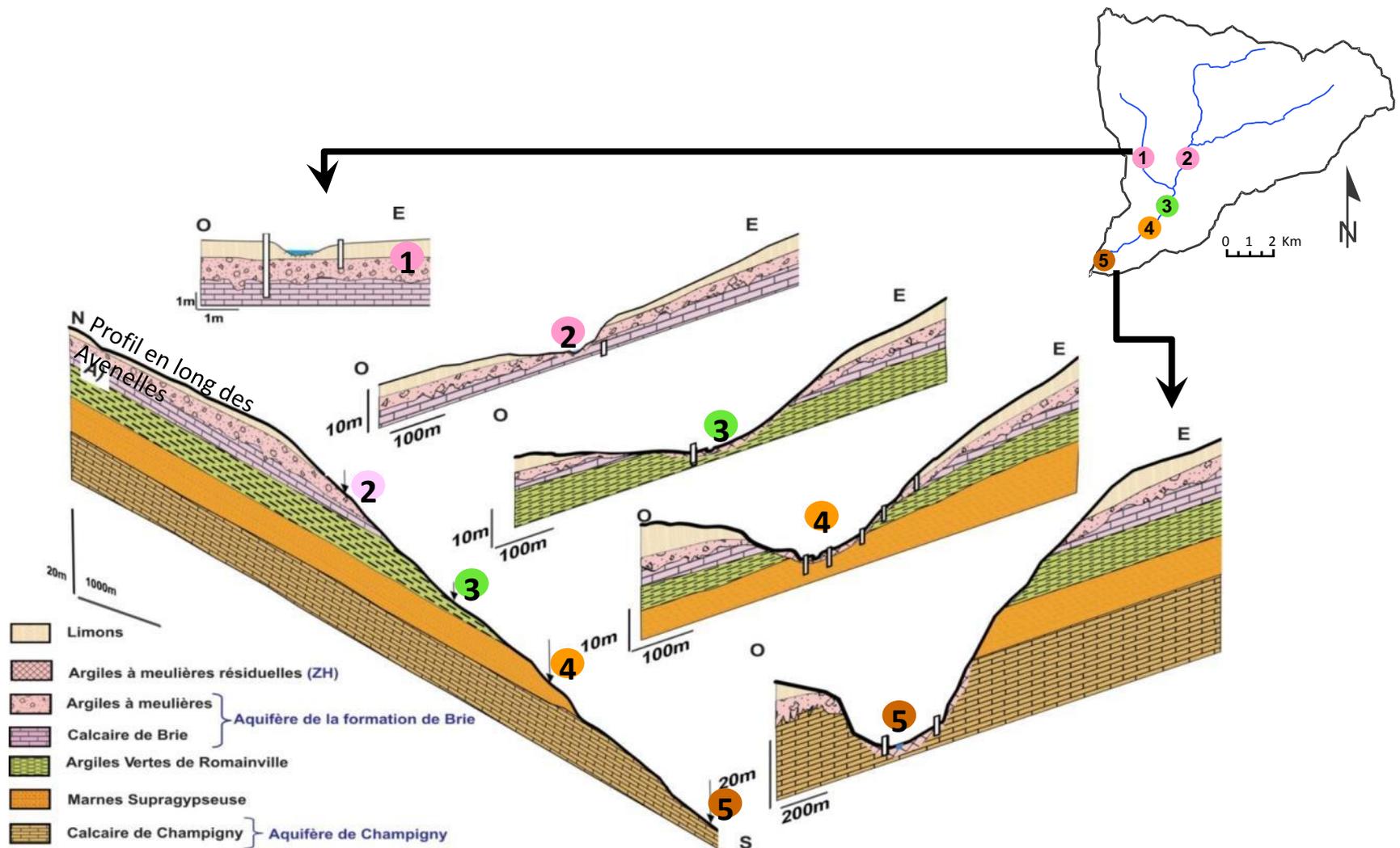


Utilisation de la géophysique

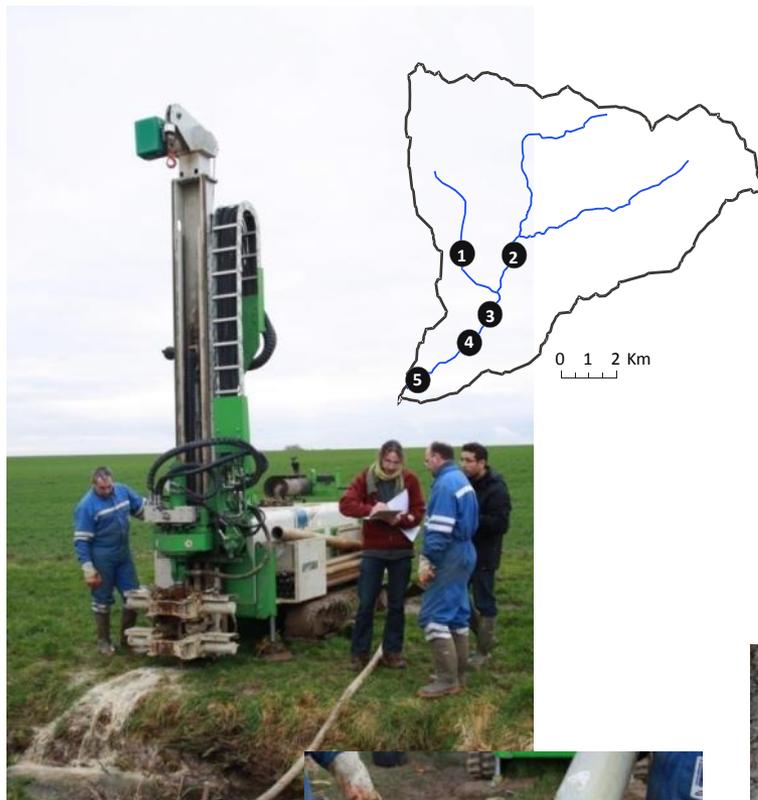


Mouhri et al. 2013, JH, 504

Distribution des stations MOLONARI



Installation des stations MOLONARI (Monitoring local des échanges nappe-rivière)

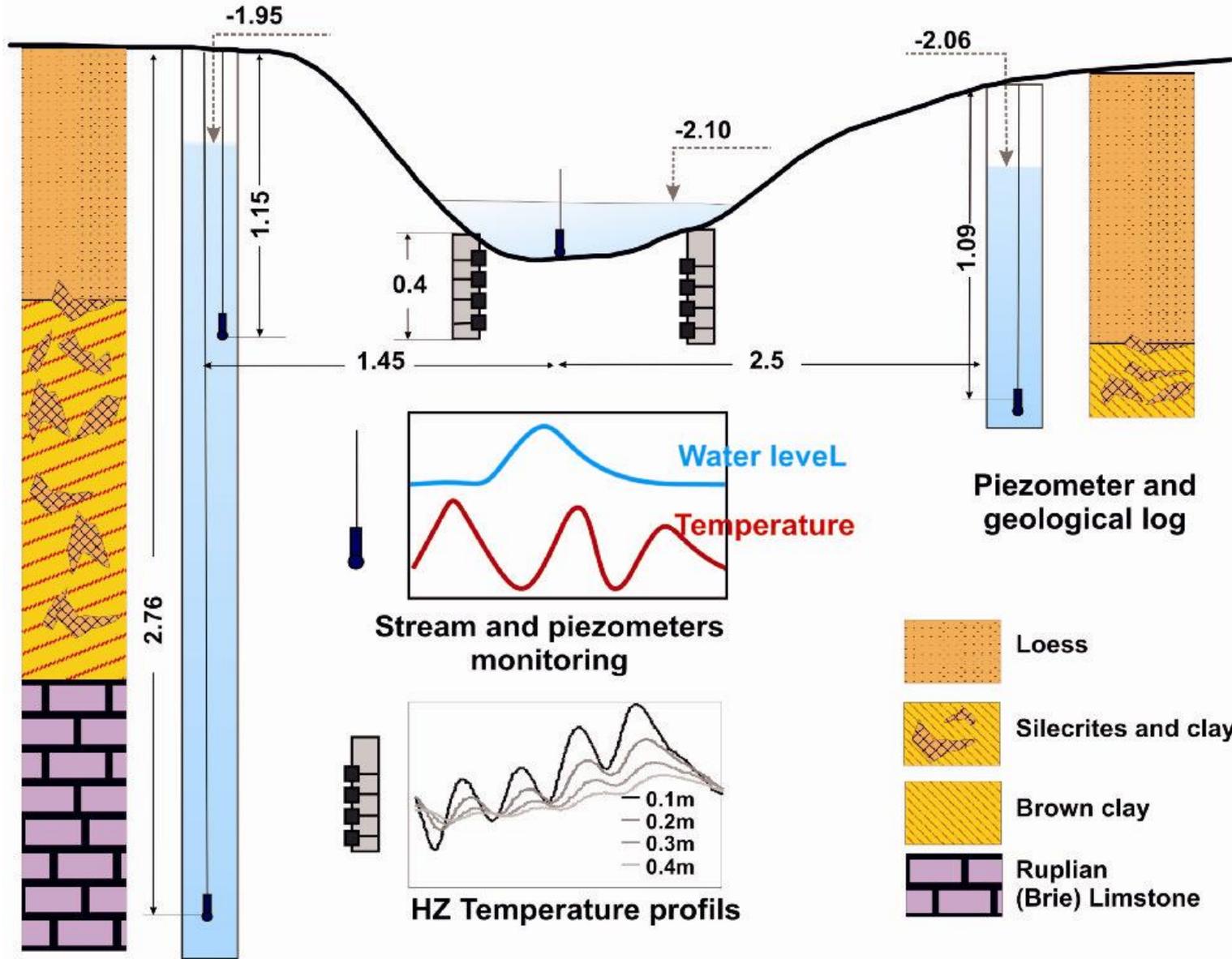


Equipement des stations MOLONARI



Right bank

Left bank



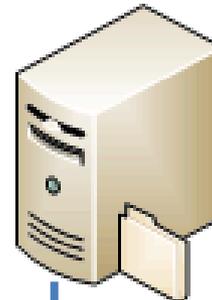
Gestion base de données



Récolte des données



Nettoyage et validation des données avec des mesures manuelles



Serveur SVN



Utilisateur A

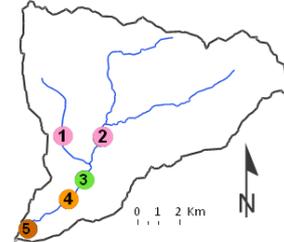


Utilisateur B



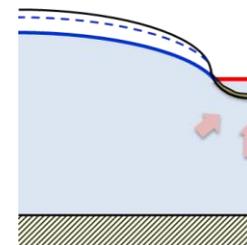
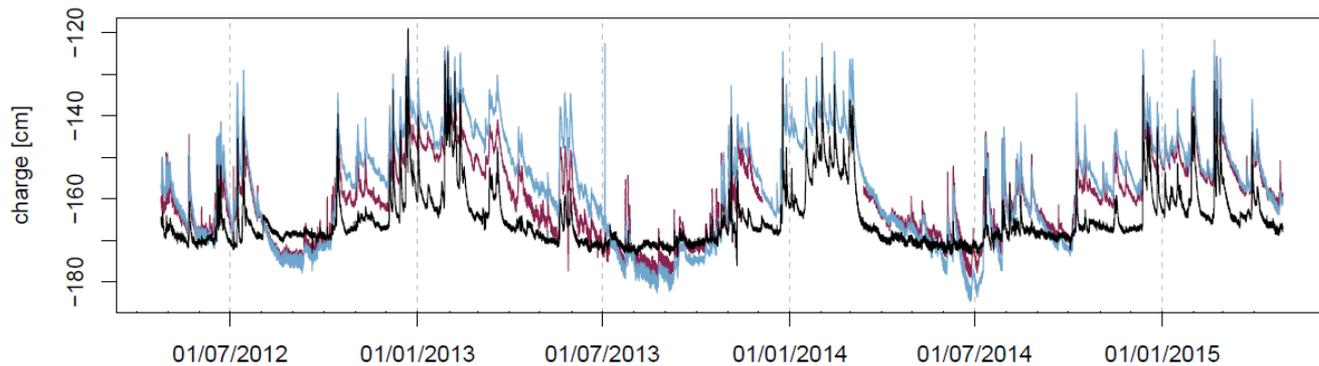
Utilisateur C

Indication du sens de l'échange



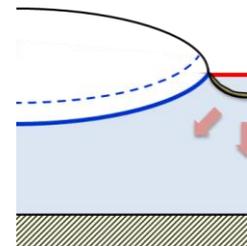
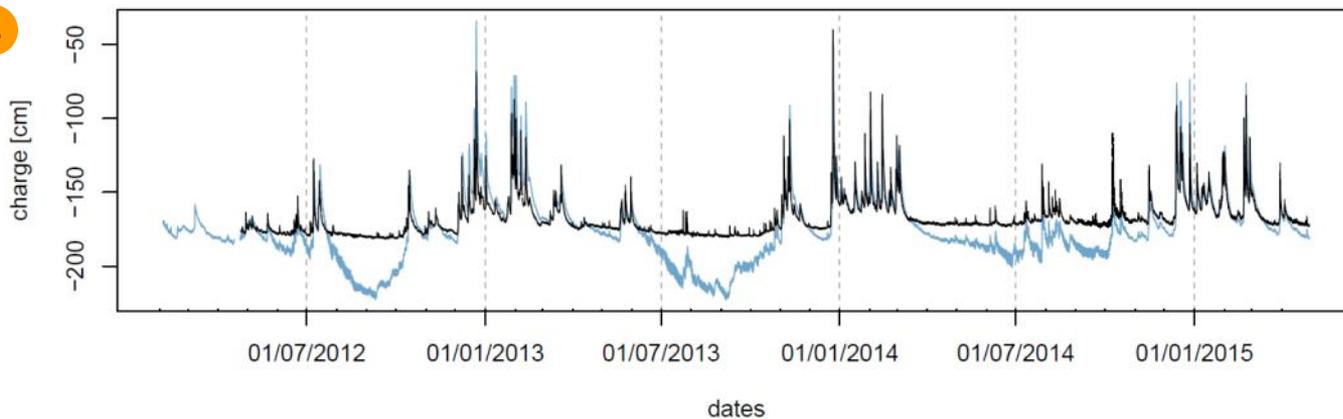
1

AmB



4

IntD



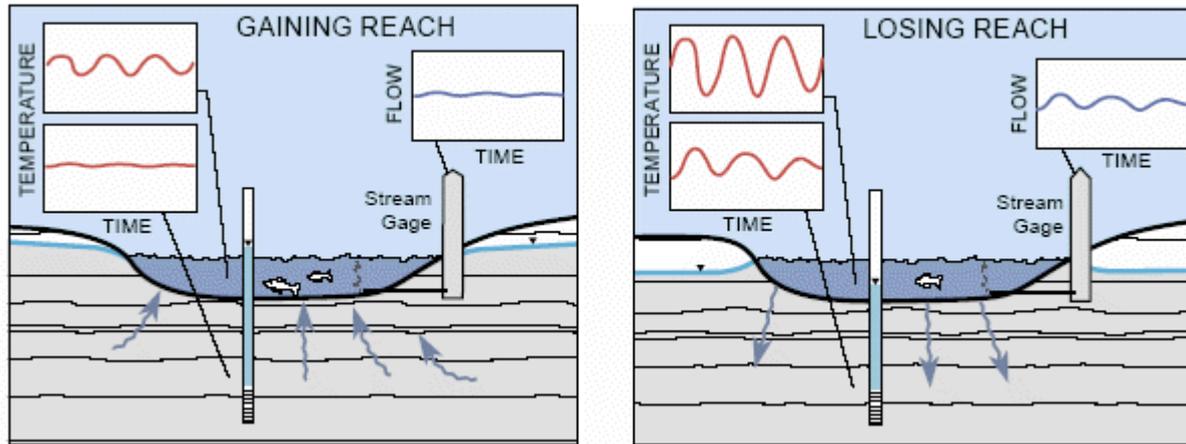
Water level (cm)

Utilisation du traceur température

→ Equation de la chaleur :

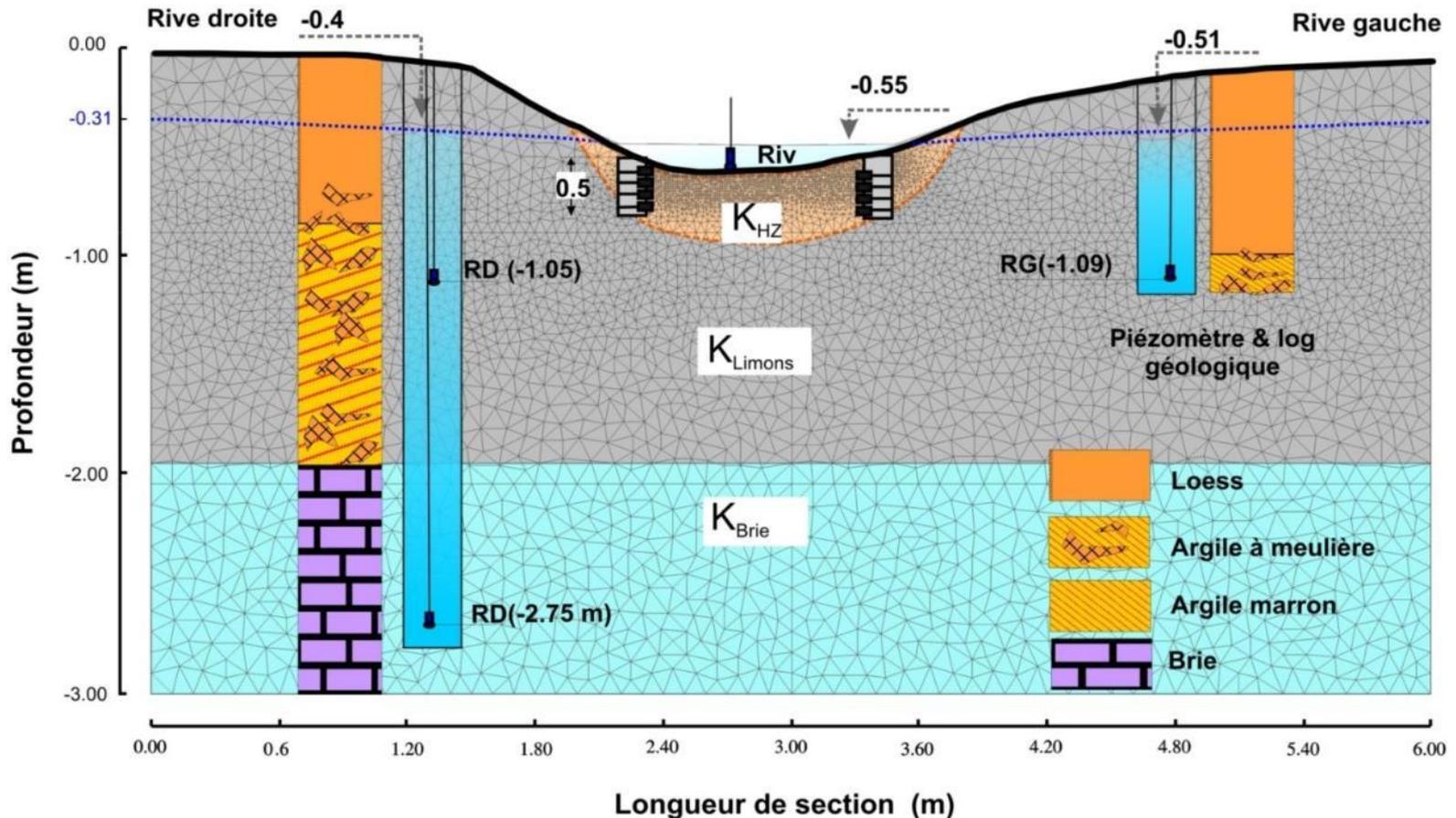
$$\text{div}[\bar{\lambda} \text{grad}(T)] - \rho_w c_w \text{div}(\vec{U} T) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$U = -\frac{k}{\mu} [\text{grad } p + \rho g \text{ grad}(z)]$$

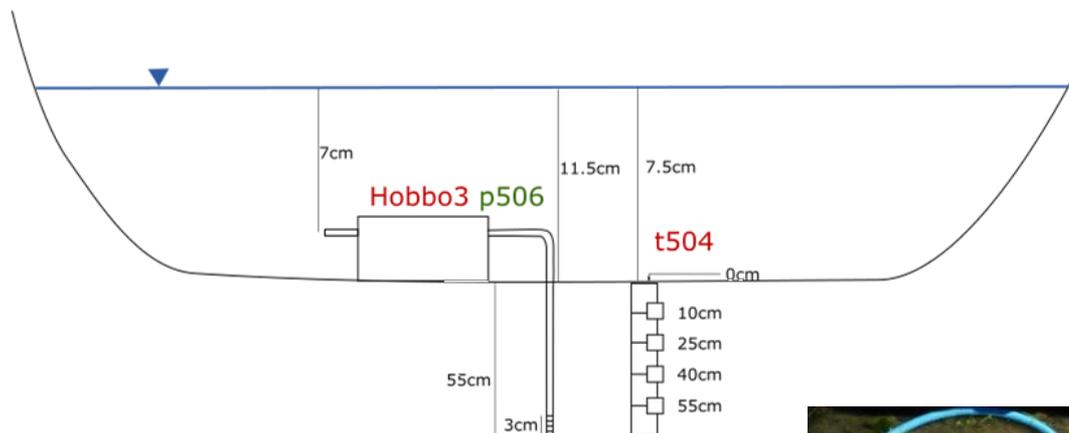
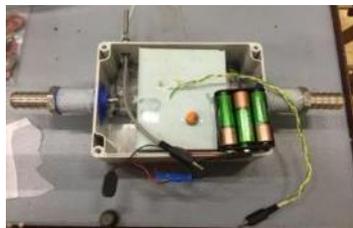


Constantz et al. 2004, USGS report

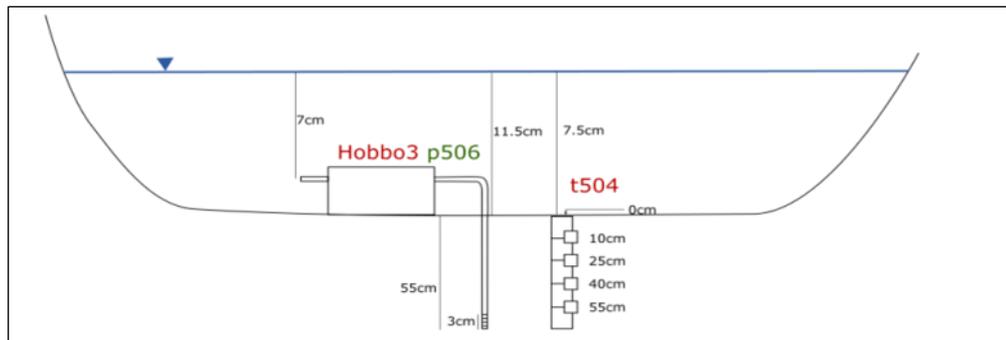
Utilisation du traceur température



Détermination des propriétés de la zone hyporhéique



Détermination des propriétés de la zone hyporhéique

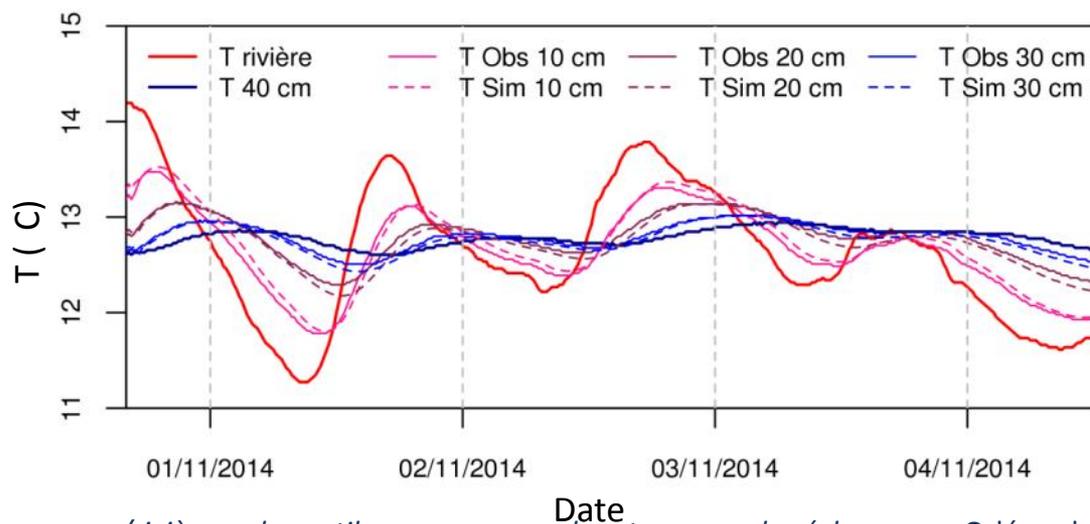


Modèle hydro-thermique
Ginette
et méthode globale
d'optimisation des paramètres

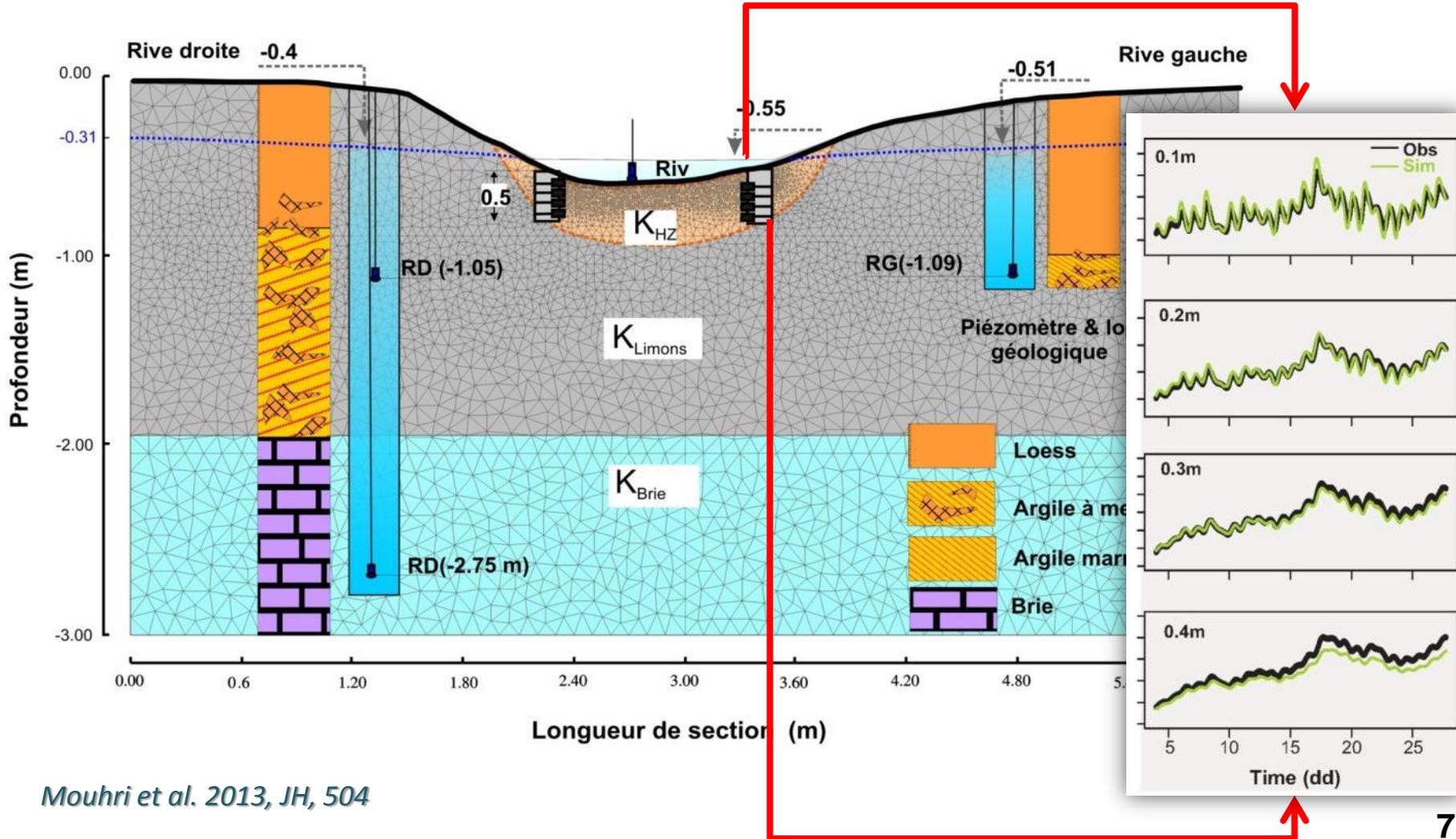
$$\text{div} \left[\bar{\lambda} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \right] - \rho_w C_w \text{div} (\vec{U} T) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\lambda = ((1 - \omega)\sqrt{\lambda_s} + \omega\sqrt{\lambda_w}), \quad C\rho = (1 - \omega)C_s\rho_s + \omega C_w\rho_w$$

$$\text{div} \left[\frac{\rho \bar{k}}{\mu} \overrightarrow{\text{grad}}(P) + \rho g \overrightarrow{\text{grad}}(z) \right] = \omega \frac{\partial P}{\partial t}$$

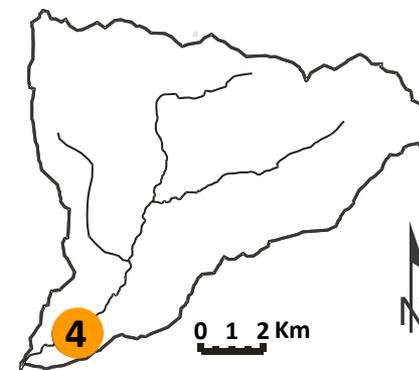
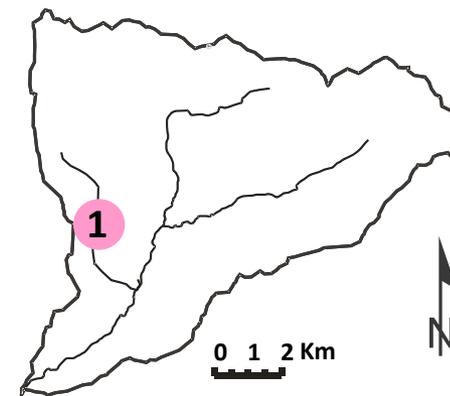
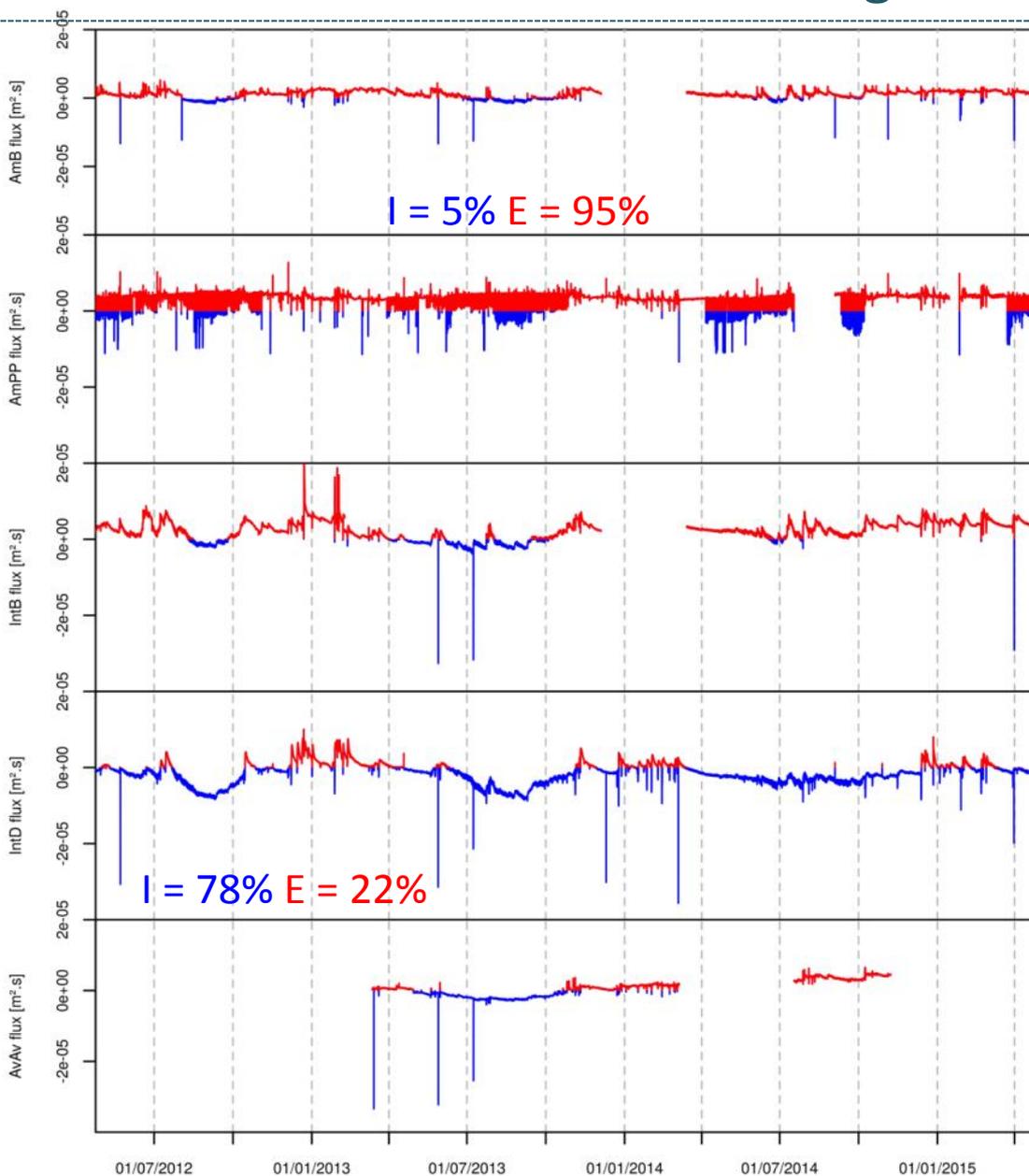


Détermination des propriétés de la section 2 D



Quantification des échanges locaux

1



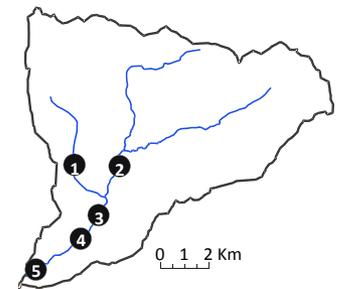
Perspectives

Variation spatio-temporelle des flux d'eau et de température

- Mesures mobiles entre stations : température, différence de pression, conductivité.
- Caractérisation des incertitudes des déterminations des paramètres hydro-thermiques : Inversion Bayésienne
- Simulation des variations de flux d'eau et de température à l'échelle du corridor hydrographique

Modélisation des flux à l'échelle du bassin

- Présentation de Nicolas Flipo



Thank you



*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

6. Modélisation distribuée à base physique des échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bassin versant

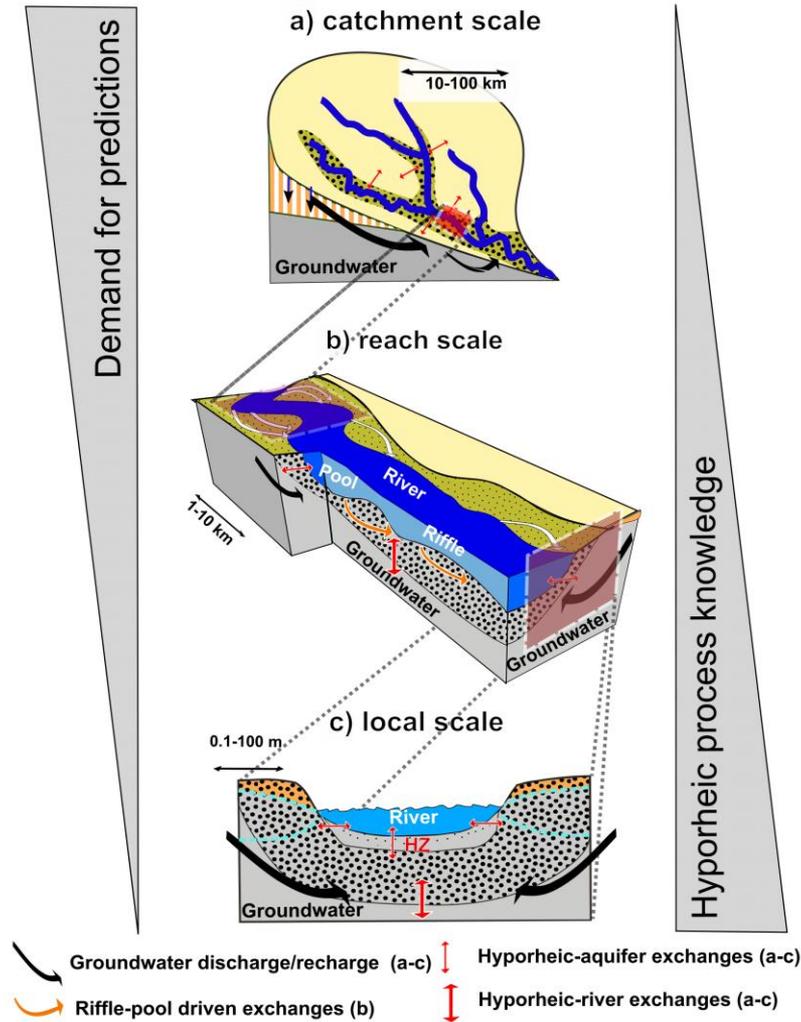
Nicolas Flipo¹

*Contributeurs : Baptiste Labarthe¹, Alexandre Pryet², Amer Mouhri^{1,3},
Agnès Rivière¹, Fulvia Baratelli^{1,3}, Firas Saleh^{1,4}, Yohann Cousquer²,
Emmanuel Cocher¹, Matthias Maillot¹, Pierre Weill¹, Patrick Goblet¹*

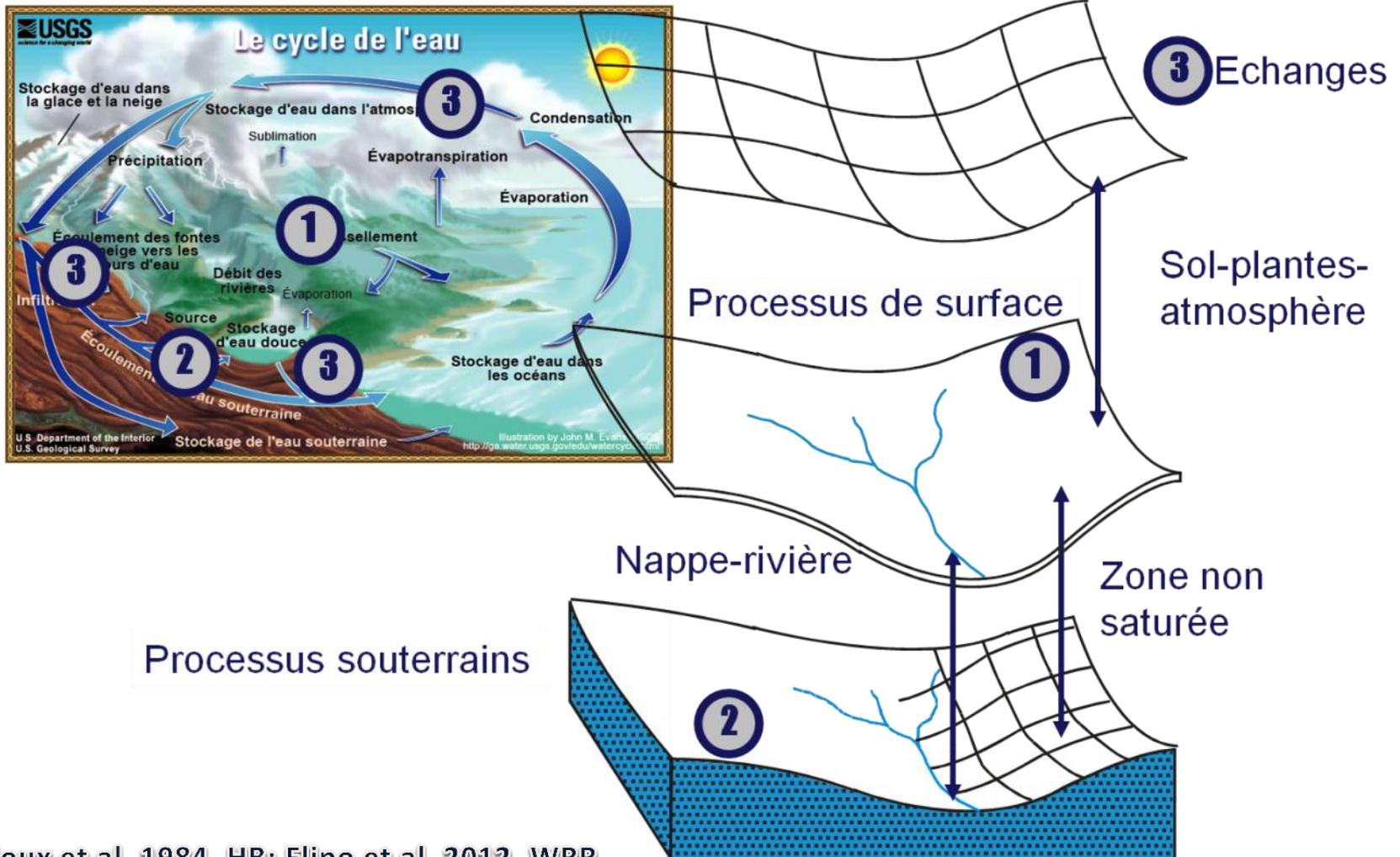


Objectifs

Flipo et al. 2014, HESS

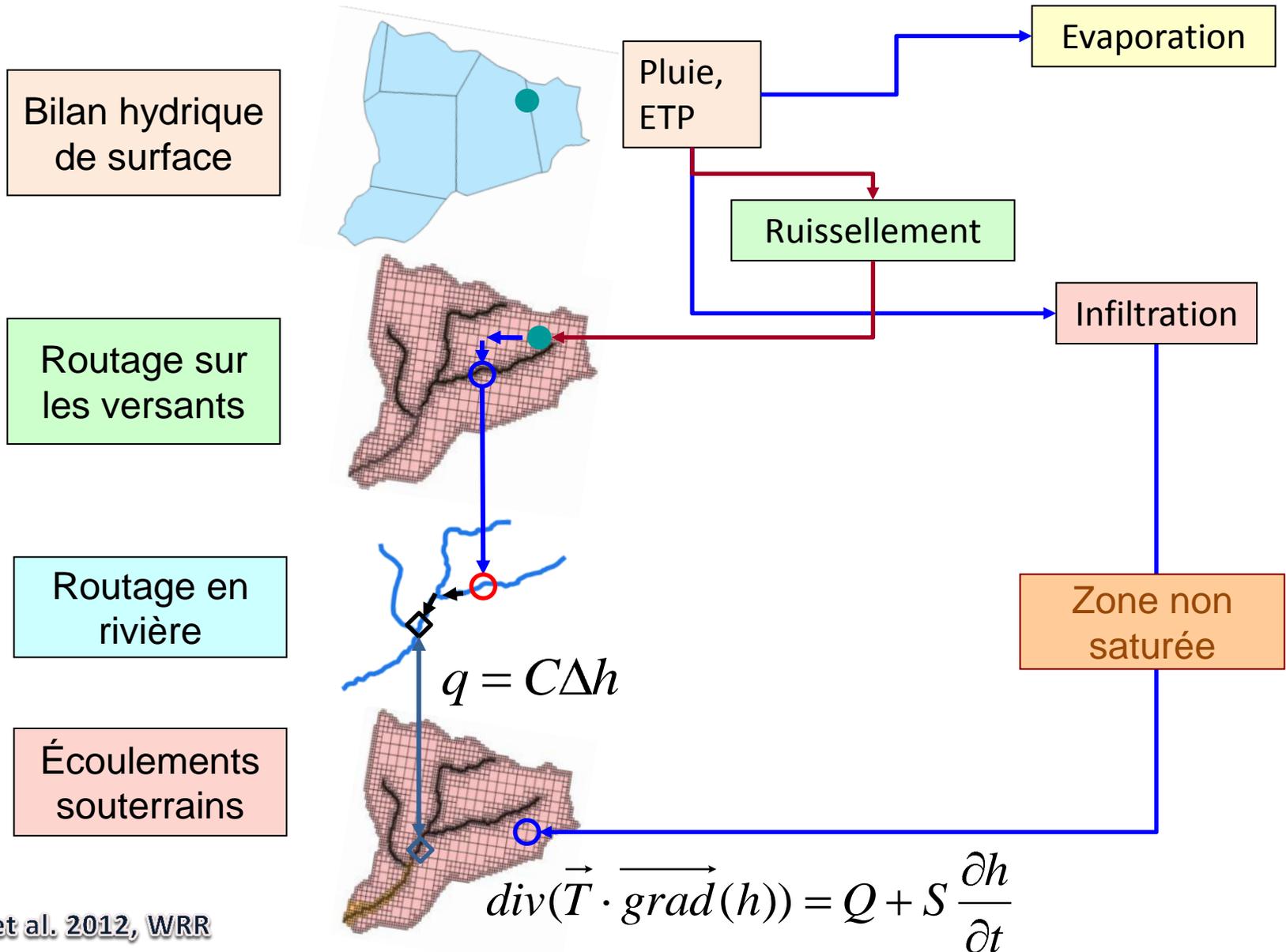


Modélisation Distribuée à base physique d'un hydrosystème



Ledoux et al. 1984, HB; Flipo et al. 2012, WRR

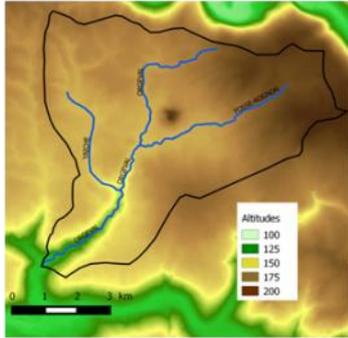
Modélisation spatialisée d'un hydrosystème



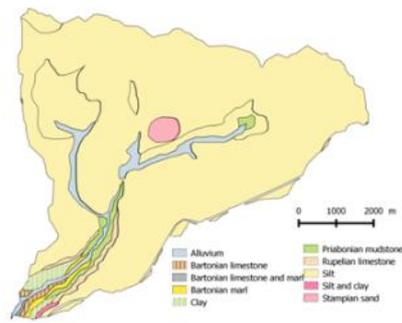
$$div(\vec{T} \cdot \vec{grad}(h)) = Q + S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Données utiles

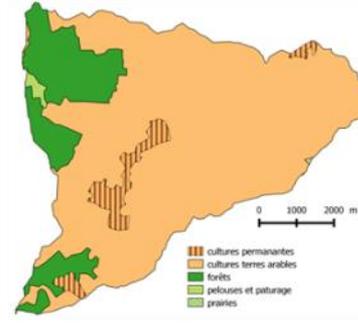
MNT



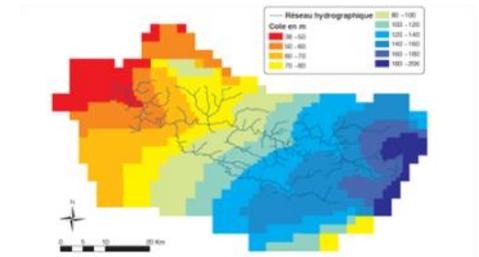
Géologie



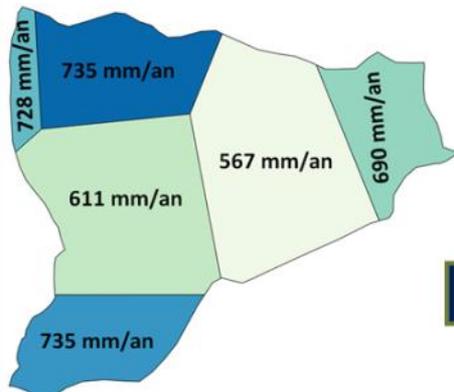
Utilisation du sol



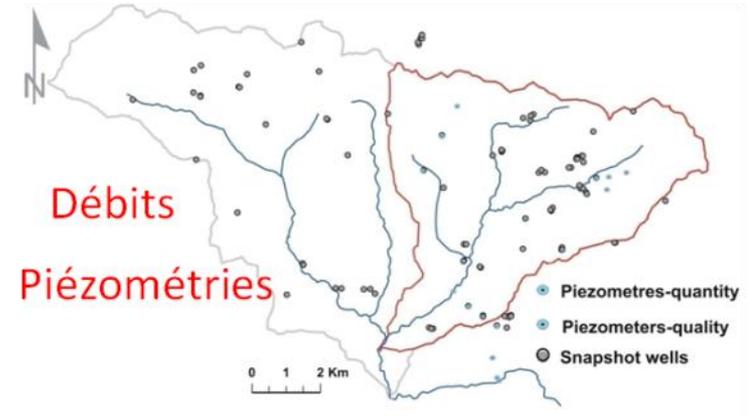
Conditions aux limites



Météo : Pluie/ETP

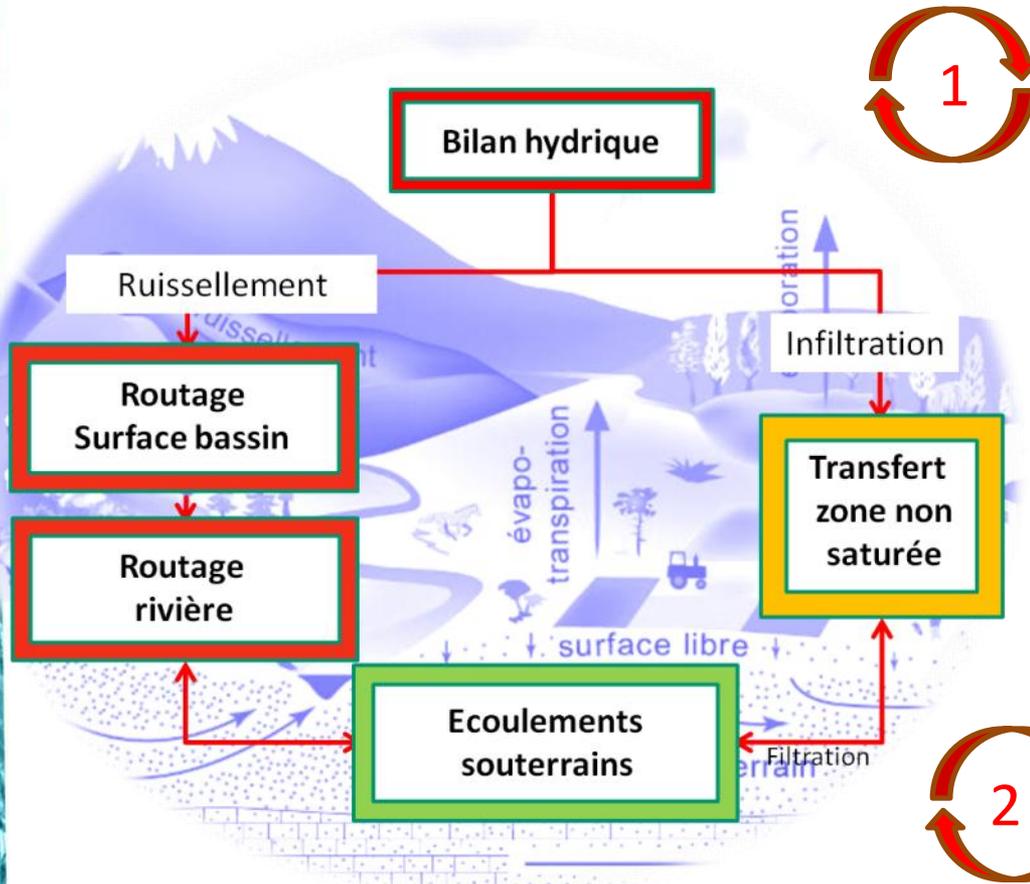


Simulations

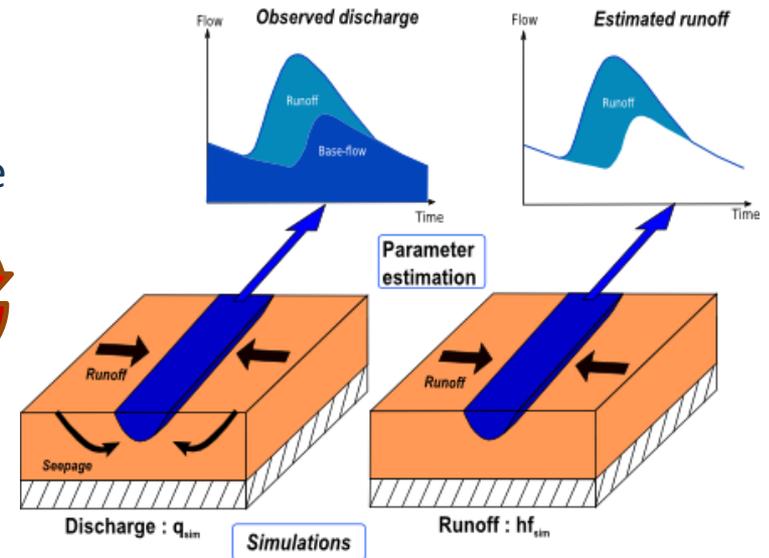


Méthodologie de calibration en deux étapes

Optimisation conjointe sur débit et débit de base



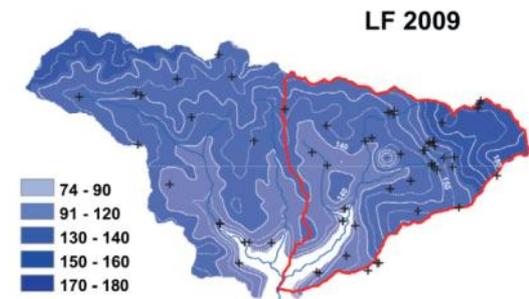
Flipo et al. 2012, WRR



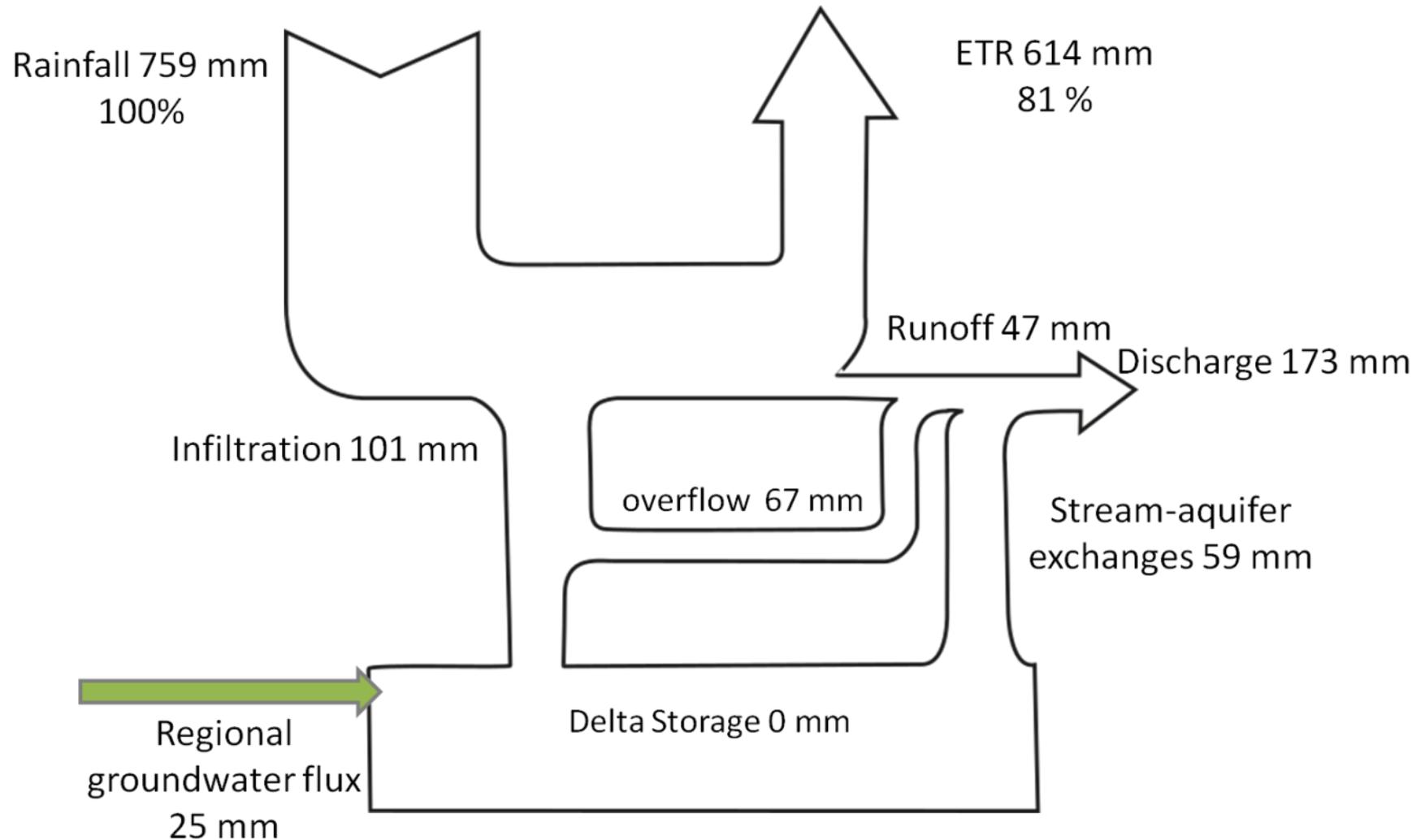
Labarthe et al. In prep, WRR

Inversion en régime permanent du champs de transmissivités (adjoint/estimation par flux successifs)

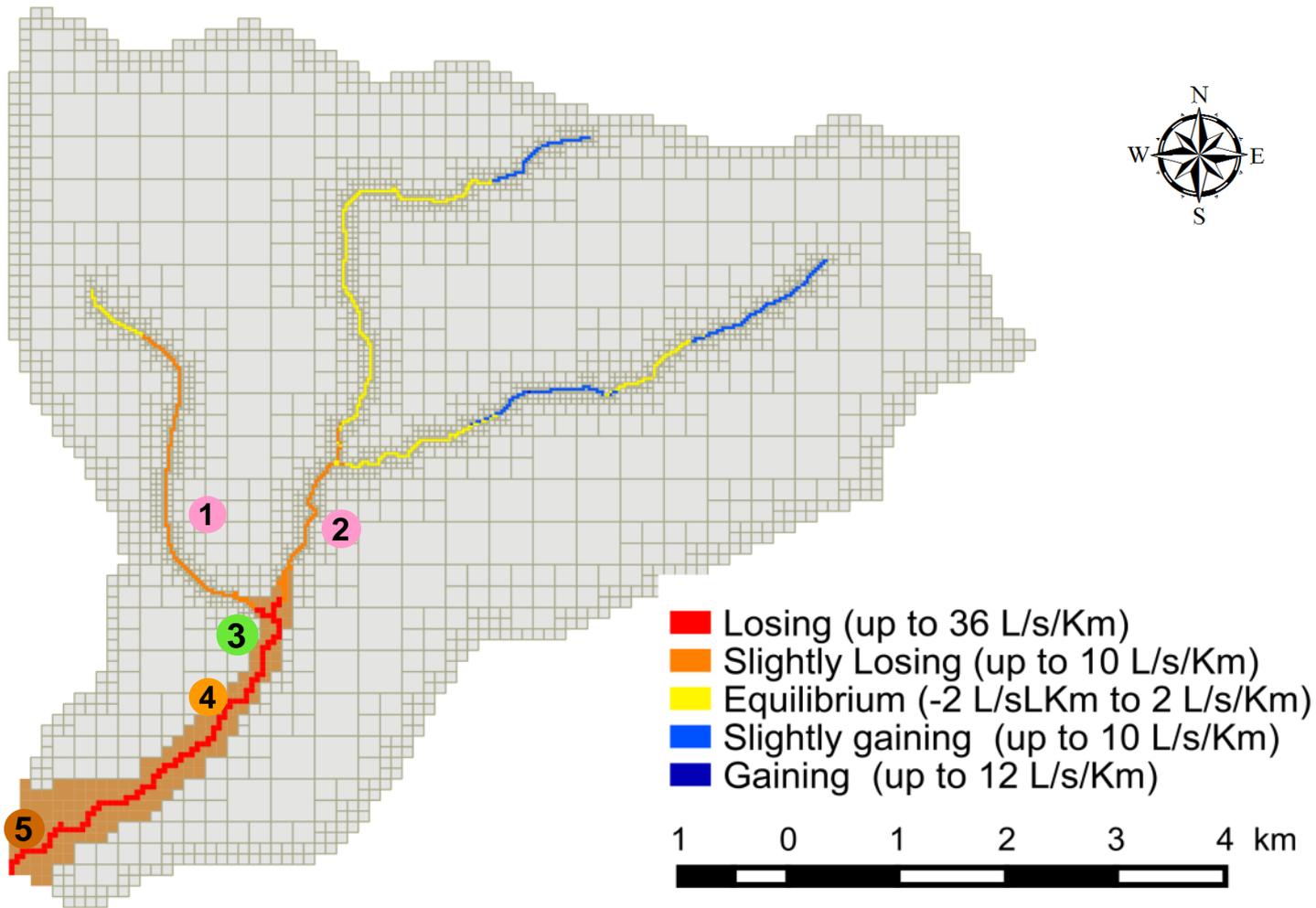
Mouhri et al., 2013; Cocher 2013



Bilan hydrique à l'échelle du bassin (1980-2013)

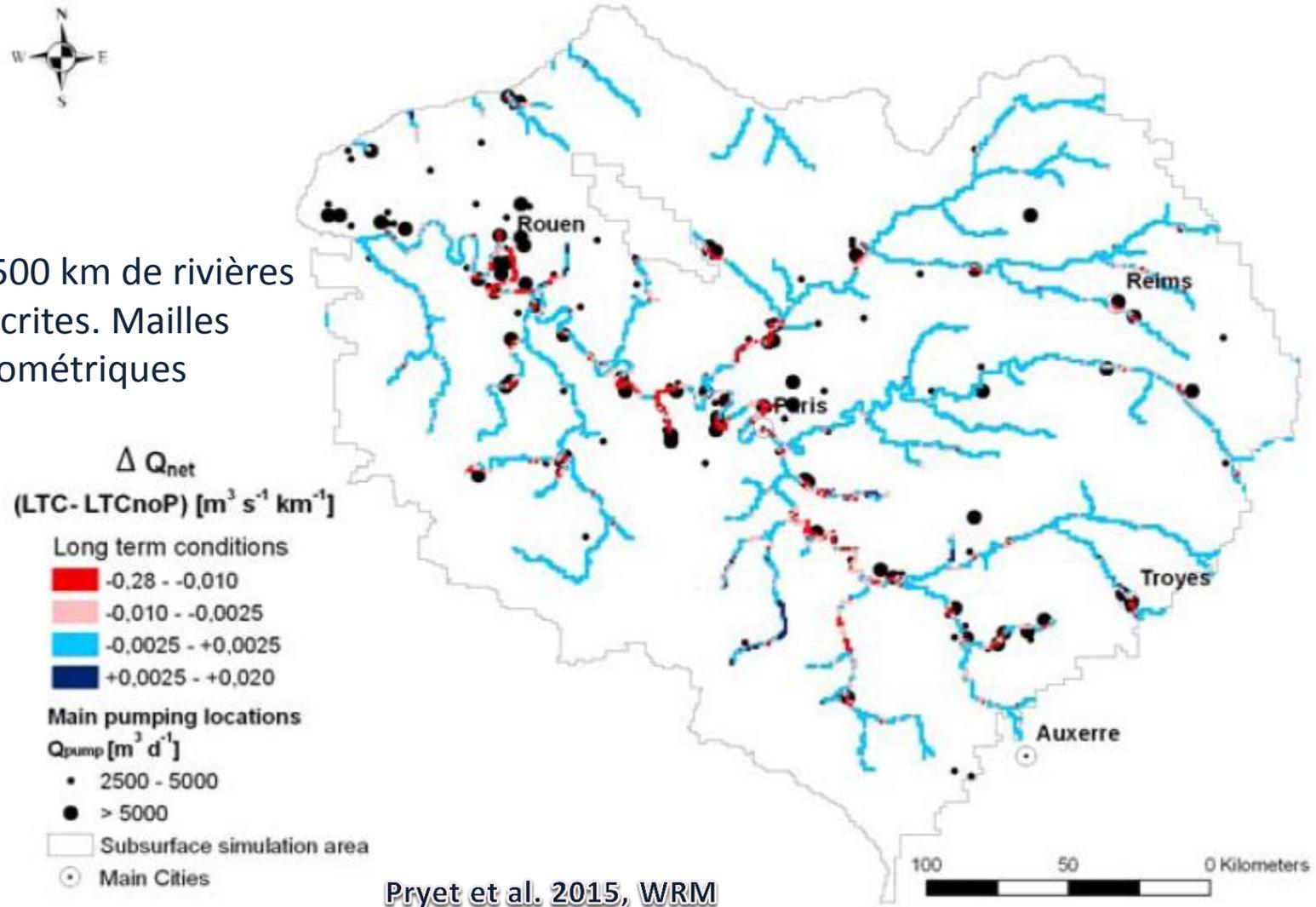


Spatialisation des échanges

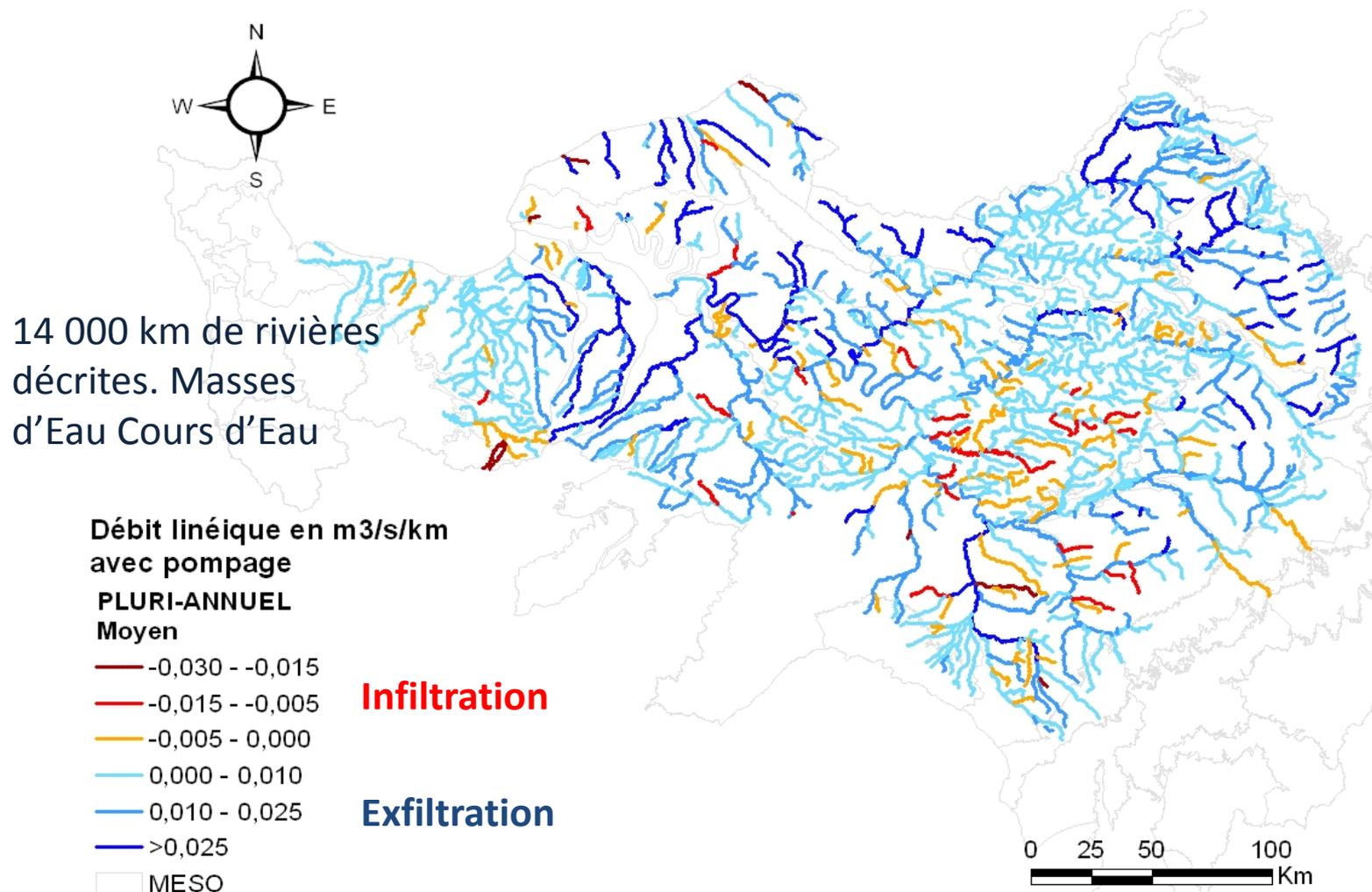


Effet des pompages

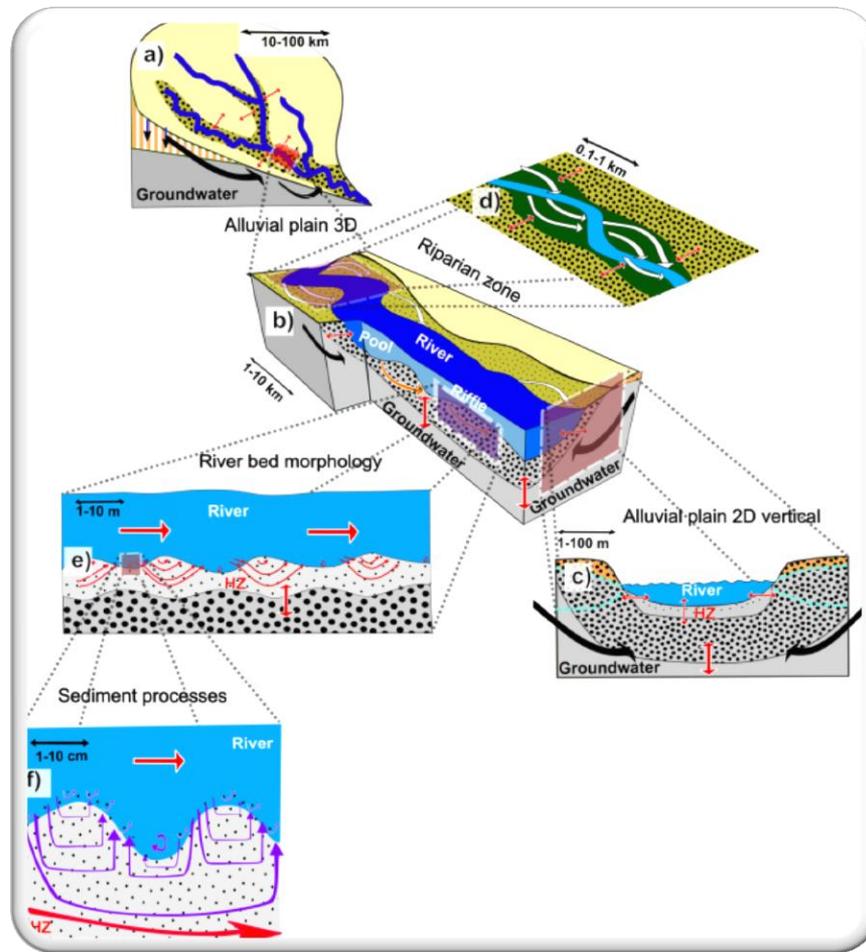
3 500 km de rivières
décrites. Mailles
kilométriques



A l'échelle des Masses d'Eau



Flipo et al., 2013 ; Labarthe et al. 2014, GEG



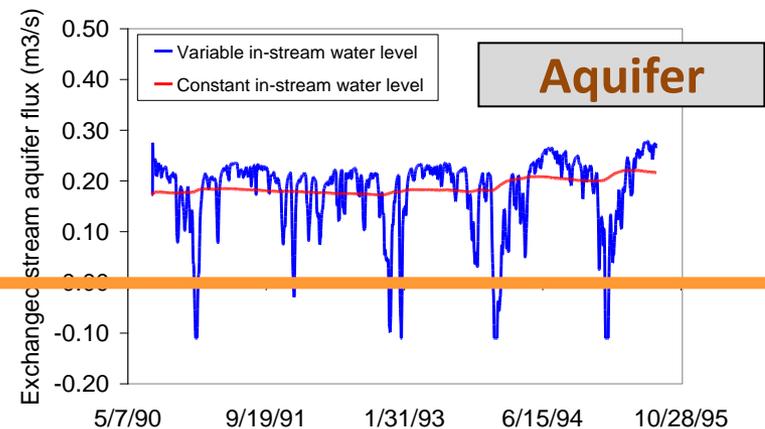
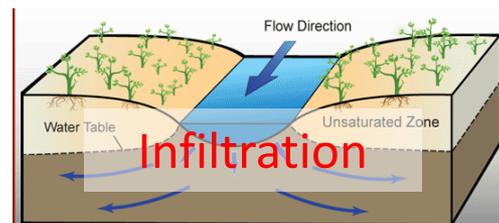
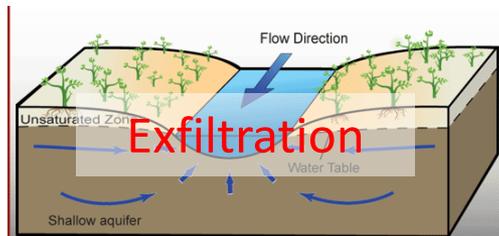
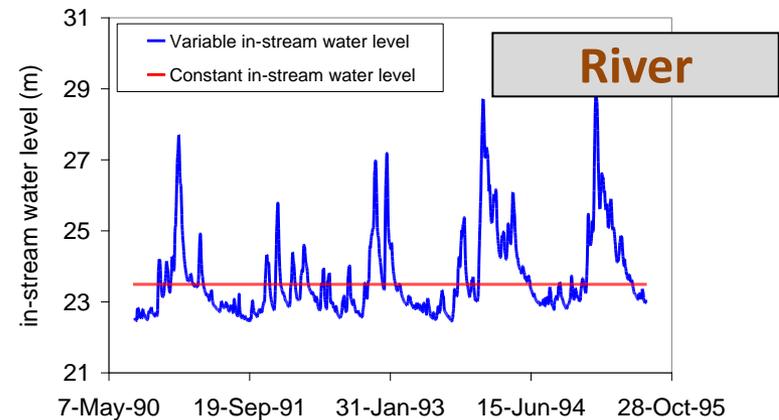
MODÉLISER LES ÉCHANGES : QUELLES PRIORITÉS?

LES PRIORITÉS

1. Dans la conceptualisation emboîtée, simuler les flux régionaux vers le réseau hydrographique → Calibration régionale
2. Prendre en compte la variabilité des niveaux d'eau en rivière
3. Définir le coefficient d'échange nappe-rivière (la conductance)

PRENDRE EN COMPTE LES NIVEAUX VARIABLES

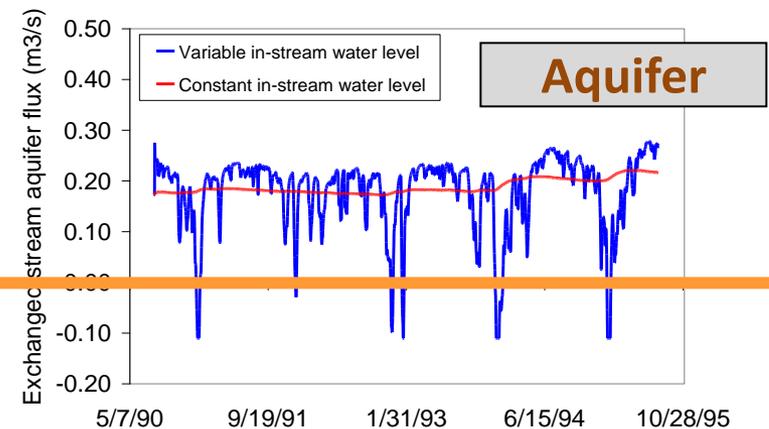
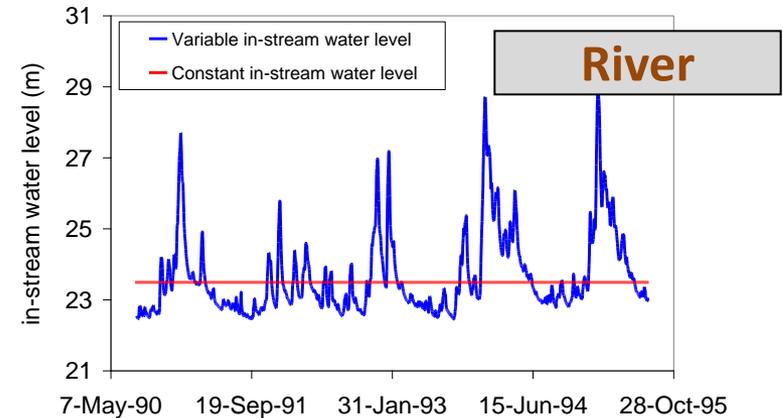
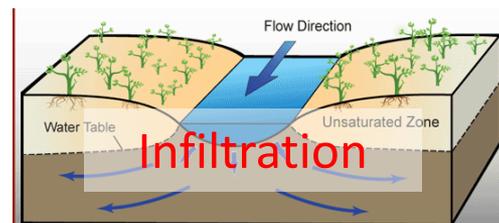
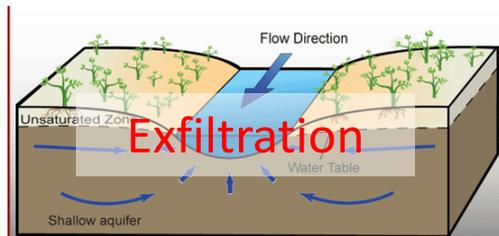
Saleh et al. 2011, JH; Baratelli et Flipo soumis, JH



MODÉLISER LES ÉCHANGES : MODÈLE DE CONDUCTANCE

$$q_{aq \rightarrow riv} = C (H_n - H_r)$$

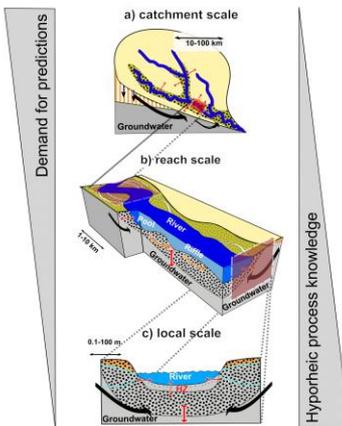
Quelle méthode
d'estimation ?



MODÈLE DE CONDUCTANCE

Régionale ($> 10\ 000\ \text{km}^2$)

Petit bassin versant ($< 1\ 000\ \text{km}^2$)



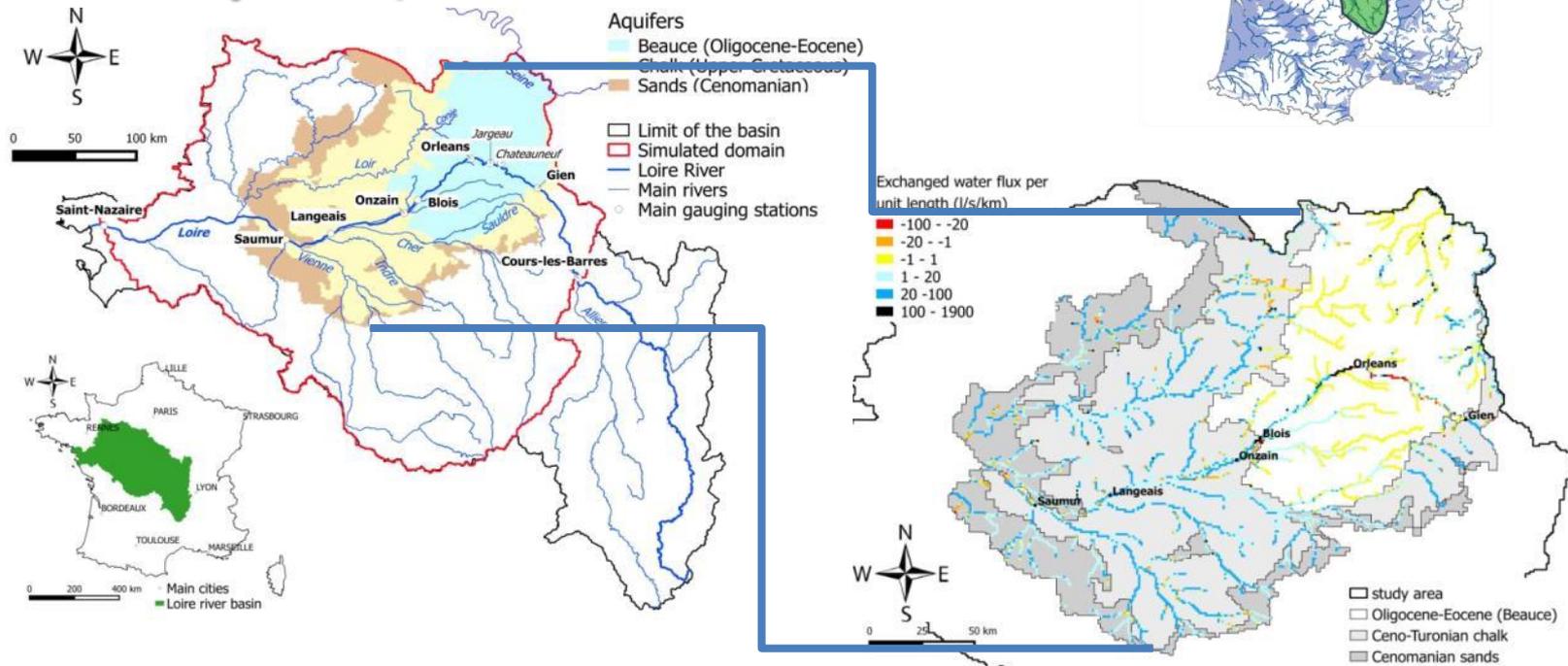
MODÈLE DE CONDUCTANCE

Régionale (> 10 000 km²) → formulation de Rushton (2007)

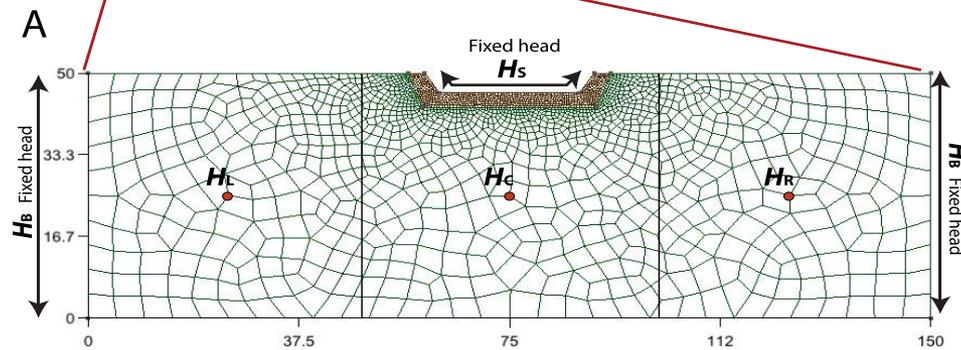
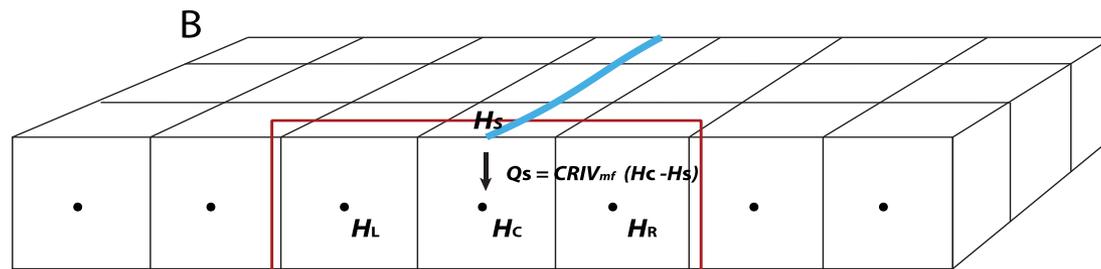
$$q_{aq \rightarrow riv} = f K_h L \left(H_n - H_r \right)$$

Pryet et al. 2015, WRM

Baratelli et Flipo soumis, JH



MODÈLE DE CONDUCTANCE



Cousquer et al. En préparation, GW

Petit bassin versant ($< 1\ 000\ \text{km}^2$) \rightarrow calcul direct à partir de modélisations 2D verticales

MODÈLE DE CONDUCTANCE

Régionale (> 10 000 km²)

$$q_{aq \rightarrow riv} = f K_h L (H_n - H_r)$$

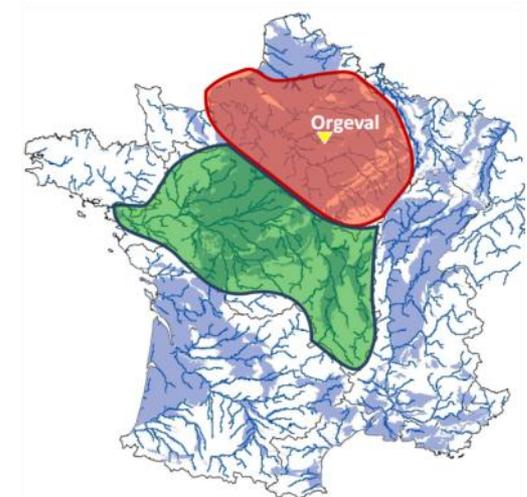
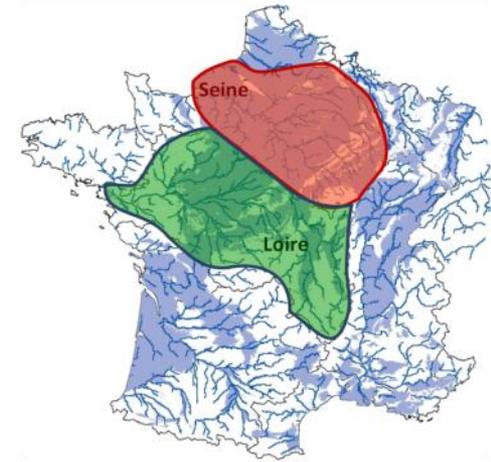
Pryet et al. 2015, WRM

Baratelli et Flipo soumis, JH



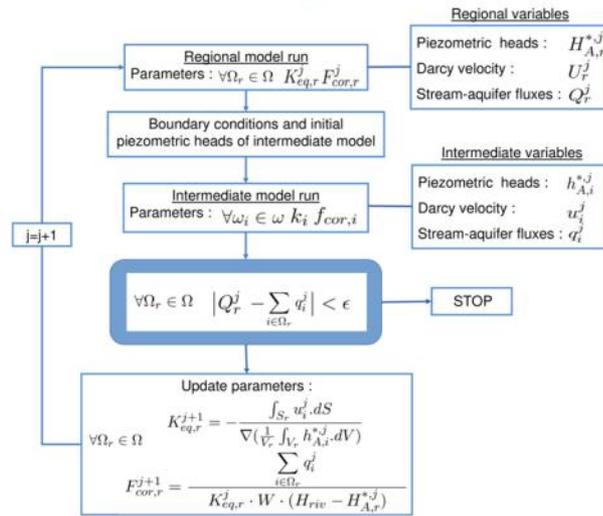
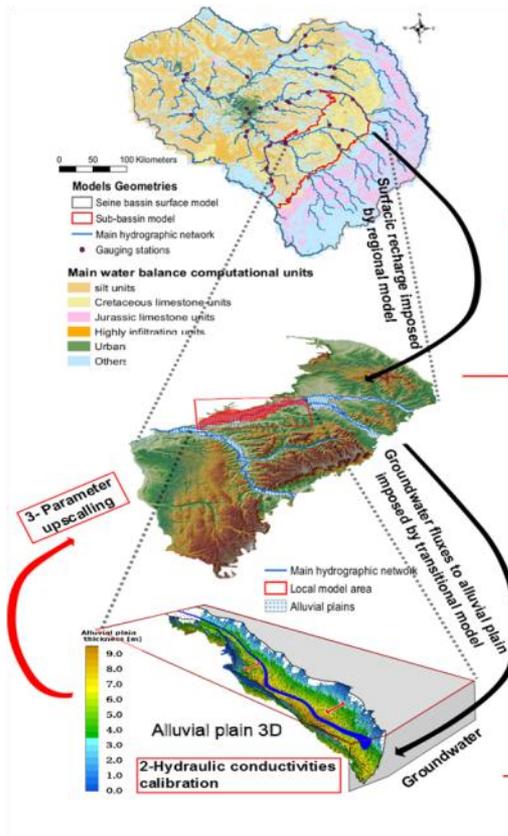
Petit bassin versant (< 1 000 km²)

→ calcul direct à partir de
modélisation 2D verticales



MODÈLE DE CONDUCTANCE

Régionale (> 10 000 km²)

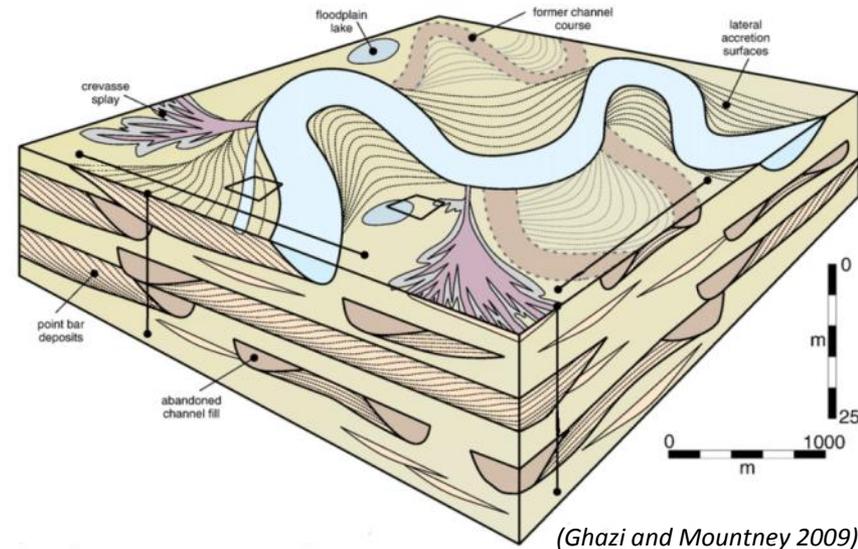


Flipo et al. 2014, HESS

Petit bassin versant (< 1 000 km²)

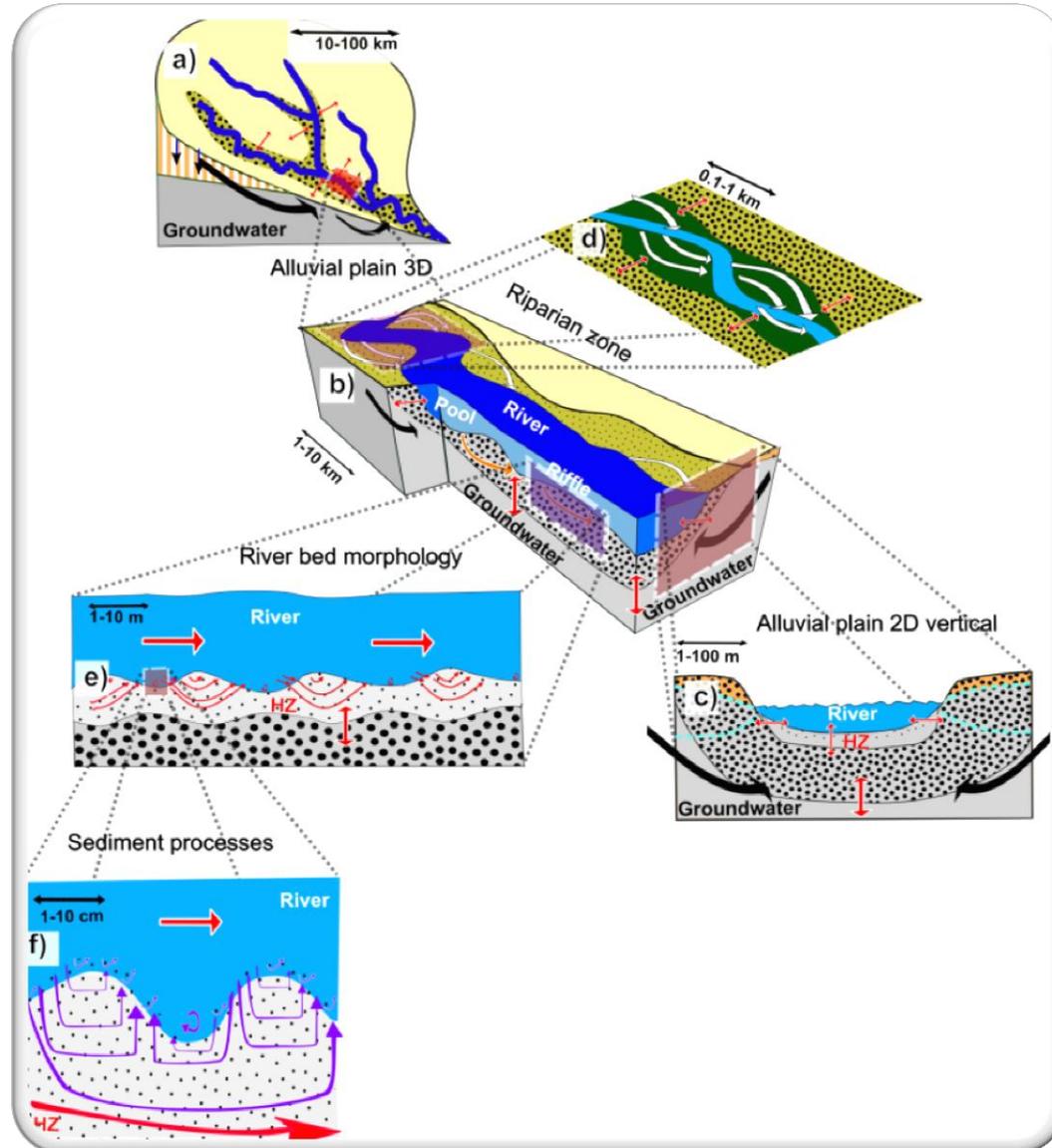
PERSPECTIVES

- Décrire les hétérogénéités structurales



- Prendre en compte la morphologie
- **Simuler la déconnexion**

MERCI



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baratelli, F. and N. Flipo (soumis). Quantification of distributed stream-aquifer exchanges at the regional scale: sensitivity to in-stream water level fluctuations, riverbed elevation and roughness. *Journal of Hydrology*
- Cocher, E. 2013. Détermination des paramètres hydrodynamiques du bassin des Avenelles par inversion de données piézométriques. Master Thesis. MINES ParisTech, Paris.
- Cousquer, Y., A. Pryet, N. Flipo, C. Delbart, and A. Dupuy (In prep). A Local 2D Vertical Model for the Estimation of the River Coefficient in Surface Subsurface Model. *Groundwater*
- Flipo, N., B. Labarthe, F. Saleh, A. Pryet, P. Goblet, P. Viennot, and L. Abasq. 2013. Relations eaux souterraines-réseau hydrographique sur le bassin Seine Normandie : Quantification des flux hydriques. . ARMINES-MINES ParisTech.
- Flipo, N., C. Monteil, M. Poulin, C. de Fouquet, and M. Krimissa. 2012. Hybrid fitting of a hydrosystem model: long term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research* 48:W05509.
- Flipo, N., A. Mouhri, B. Labarthe, S. Biancamaria, A. Rivière, and P. Weill. 2014. Continental hydrosystem modelling : the concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:3121–3149.
- Labarthe, B., A. Pryet, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. 2014. Engineering Geology for society and Territory-Vol 3. *in* G. E. G. Massimo Arrattano Massimo Rinaldi Orazio Giustolisi Jean-Christophe Marechal Giorgio Lollino, editor. *springer*.
- Labarthe, B. , N. Flipo and A. Pryet (In prep). Two-step calibration procedure for continental hydrosystem models. *Water Resources Research*
- Ledoux, E., G. Girard, and J. P. Villeneuve. 1984. Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche* 1-2:101–110.
- Pryet, A., B. Labarthe, F. Saleh, M. Akopian, and N. Flipo. 2015. Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. *Water Resources Management* 29:139–159.
- Rushton, K. 2007. Representation in regional models of saturated river-aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology* 334:262–281.
- Saleh, F., N. Flipo, F. Habets, A. Ducharne, L. Oudin, P. Viennot, and E. Ledoux. 2011. Modeling the impact of in-stream water level fluctuations on stream-aquifer interactions at the regional scale. *Journal of Hydrology* 400:490–500.

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

7. Végétation aquatique

Outils pour la caractérisation des échanges
nappes/rivières

Gudrun BORNETTE

CNRS, UMR 6249 CHRONO-env

CHRONO
ENVIRONNEMENT



Florent ARTHAUD

USMB, UMR 042 CARTEL



Centre Alpin de Recherche sur les Réseaux Trophiques et Ecosystèmes Limniques

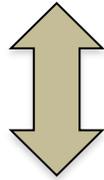


Principe

Eaux souterraines :

- Stables thermiquement et fraîches
- oxygénées
- souvent pauvres en phosphates

Niche des espèces végétales aquatiques



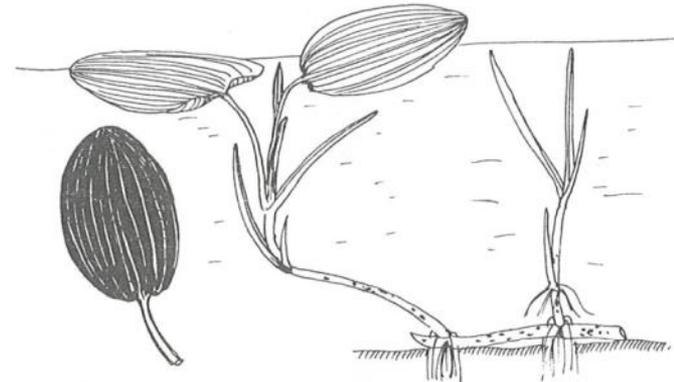
Contrôlée par :

nutriments

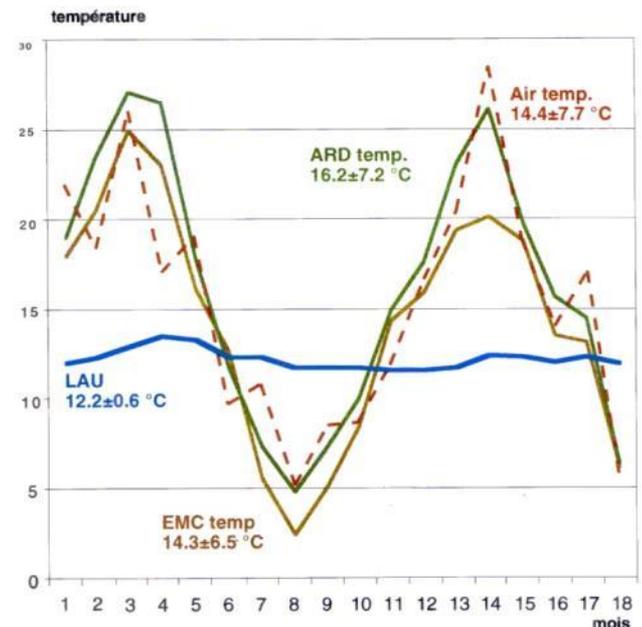
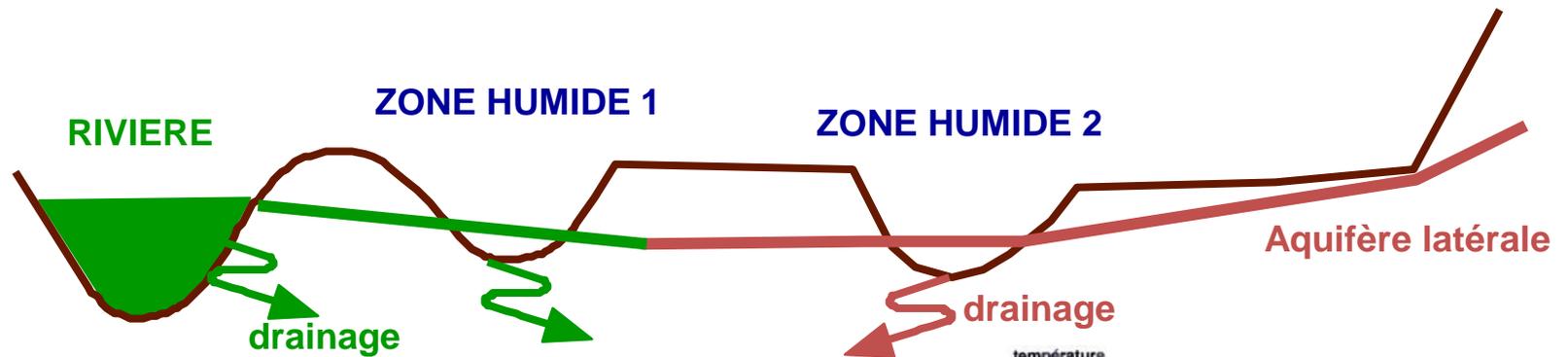
Température
des eaux

Oxydation de la
rhizosphère

La végétation est donc un indicateur du
fonctionnement hydrogéologique des milieux
aquatiques



Hydrogéologie des milieux aquatiques alluviaux



Construction de l'outil

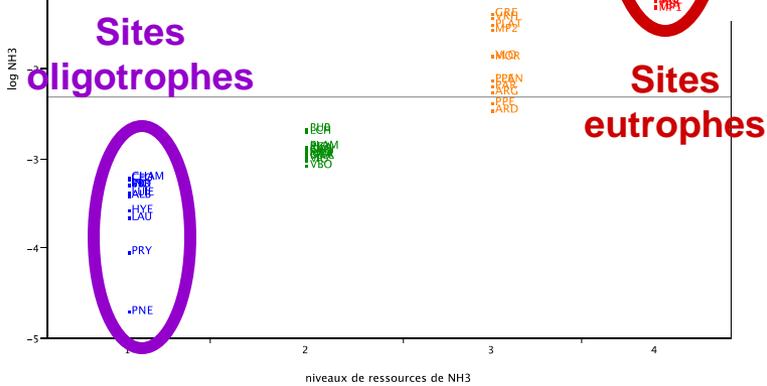
2

Abondance de l'espèce (ici *Phragmites australis*) dans les sites

METHODE: pour chaque facteur (trophie, eau souterraine), et chaque espèce, on a bâti le profil écologique de l'espèce.

1

Classement des sites selon leur teneur en ammoniacque (paramètre trophique)

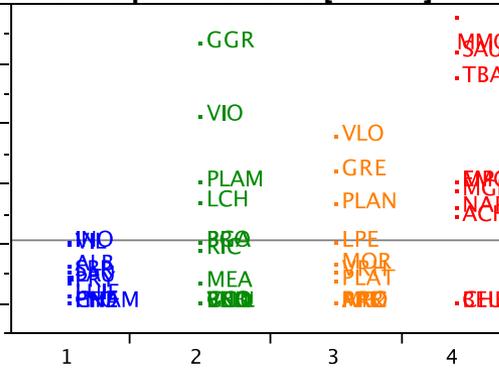


Classement des sites selon la concentration moyenne en ammoniacque

Rivoire & Bornette 2006

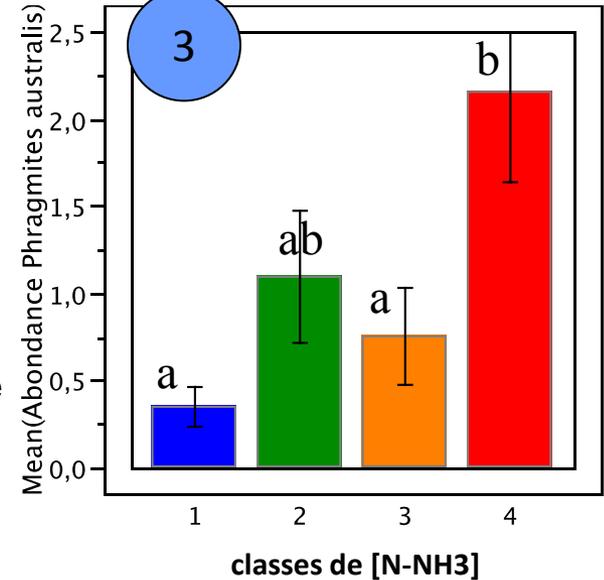
Abondance *Phragmites australis*

Classées par classes de [N-NH4]



Welch ANOVA : $p=0,0114$
Kruskall-Wallis : $p=0,0578$

Profil écologique de l'espèce: abondance moyenne pour chaque classe de [N-NH4] et degré de signification



Conclusion:

L'abondance de *Phragmites australis* est corrélée positivement à la concentration en ammoniacque, l'abondance étant significativement plus élevée dans la classe 4.

Construction de l'outil

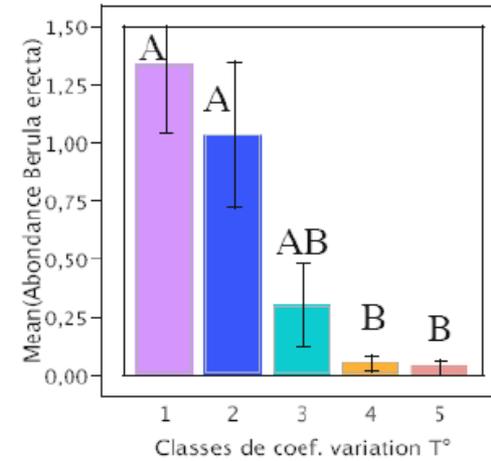
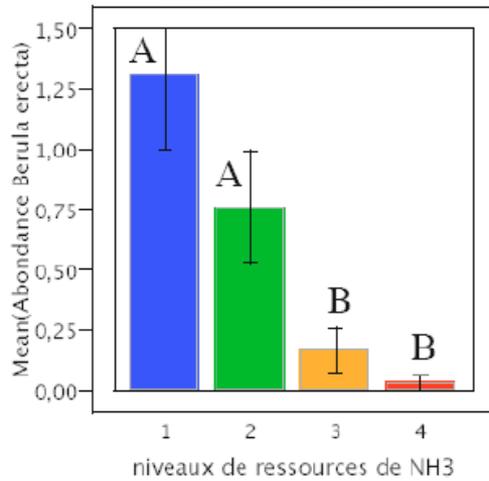


Figure 9 : Abondance moyenne de la *Berula erecta* selon la teneur en NH_3 (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite)

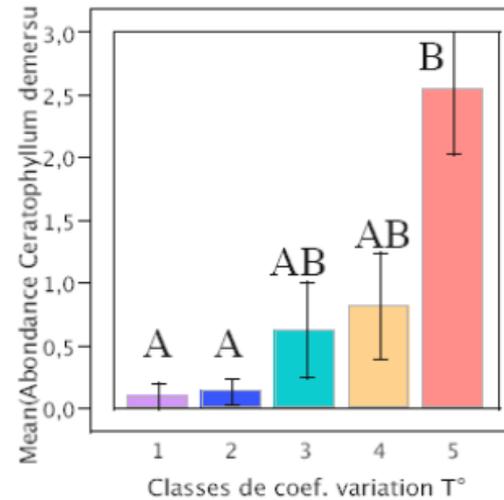
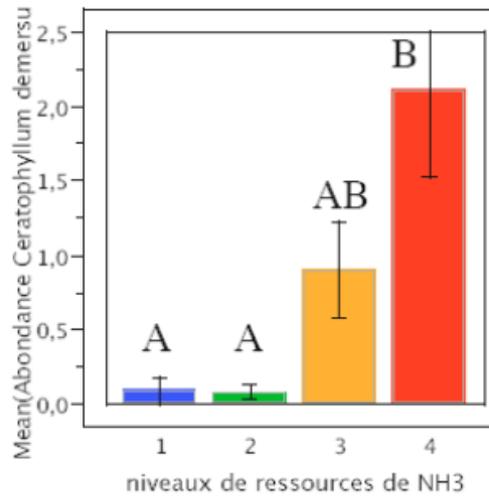


Figure 10 : Abondance moyenne du *Ceratophyllum demersum* selon la teneur en NH_3 (graphique de gauche) et l'amplitude des variations thermiques (graphique de droite).

Présentation rapide de la méthode

Calcul des indices en fonctions de l'abondance des espèces

site 16	
espèces	abondance
<i>Ceratophyllum demersum</i>	1
<i>Elodea nuttallii</i>	3
<i>Lemna minor</i>	2
<i>Myriophyllum spicatum</i>	1
<i>Polygonum hypodiper</i>	1
<i>Potamogeton nodosus</i>	1
<i>Potamogeton pectinatus</i>	1

Niveau de trophie

niveau de trophie				niveau de trophie calculé			
O	M	E	HE	O	M	E	HE
0.5	0.5	2	3	0.5	0.5	2	3

oligotrophe
mésotrophe
eutrophe
hyper-eutrophe

Apport en eau souterraine

espèces	alimentation en eaux souterraines	
	oui	non
<i>Ceratophyllum demersum</i>	0	1
<i>Elodea nuttallii</i>	0	0
<i>Lemna minor</i>	0	1

nul	0
faible	0-4
moyen	5-9
fort	> 9

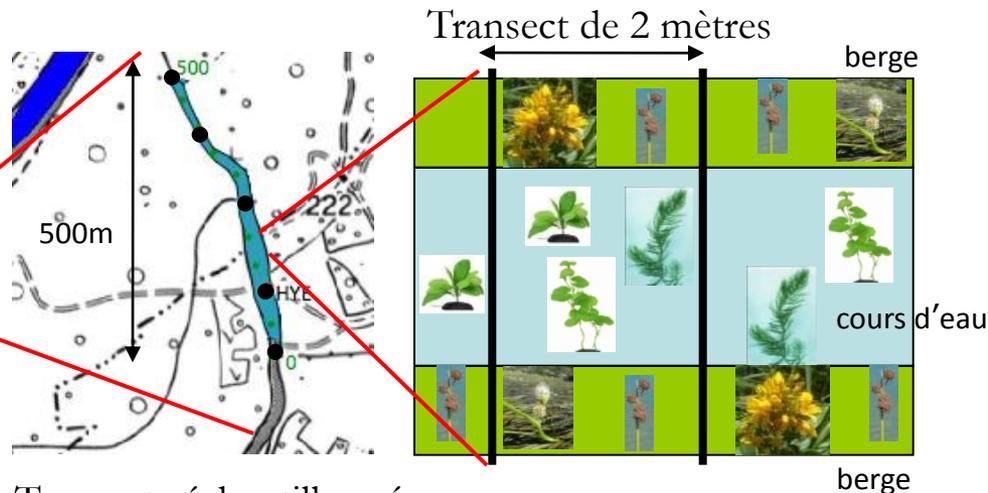
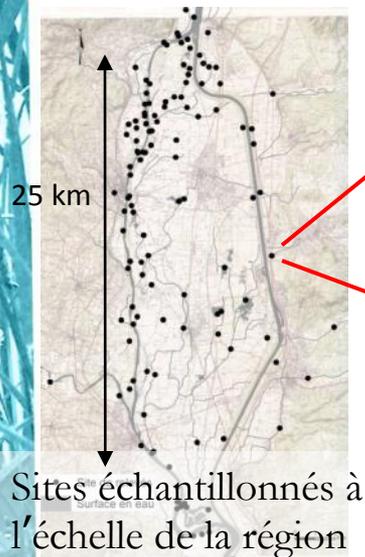
origine de l'eau souterraine : probabilité d'apports de versants

trophie	apport phréatique
hyper-eutrophe = 0	nul = 0
nul	0-1
faible	2
moyen	3
fort	4-6-9

Espèces	Niveau de trophie				Alimentation souterraine		Perturbations par les crues				
	O	M	E	HE	O	N	Nul.	Fbl.	Moy.	Fr.	All.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	0.5	3	2	0	0	0	1	3	2	1	2
<i>Azolla filiculoides</i>	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0
<i>Baldellia ranunculoides</i>	2	0	0	0	1	0	2	2	0	0	0
<i>Berula erecta</i>	3	3	0.5	0.5	2	0	2	3	3	3	2
<i>Bidens tripartita</i>	0	0	2	2	0	0	1	1	1	1	0
<i>Callitriche platycarpa</i>	0.5	2	2	2	1	0	0.5	2	3	2	0.5
<i>Carex acutiformis</i>	1	2	3	1	0	0	3	3	0.5	0.5	0
<i>Carex elata</i>	0	0	0	0	0	0	3	3	2	0.5	0.5
<i>Carex pseudocyperus</i>	0	2	3	3	0	0	3	2	0	0	0

Acquisition et préparation des données

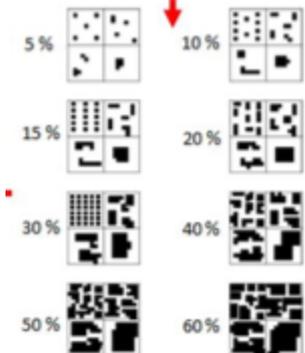
Echantillonnage de la végétation



Transects échantillonnés à l'échelle d'un site



abondance relative	
1	: recouvrement < 5% du transect
2	: entre 5 et 25 %
3	: entre 25 et 50 %
4	: entre 50 et 75 %
5	: > 75 %

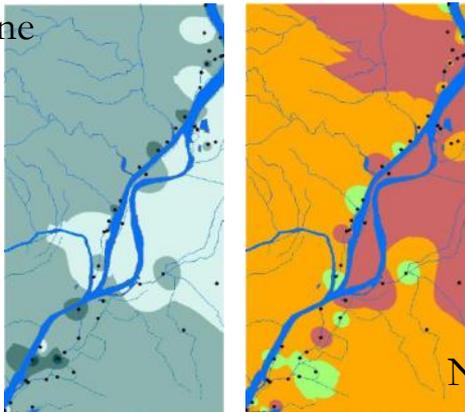


Amoros *et al.*, 2000, Rivoire et Bornette, 2006

Potentiel de caractérisation des échanges

Amont confluence Drôme Rhône :

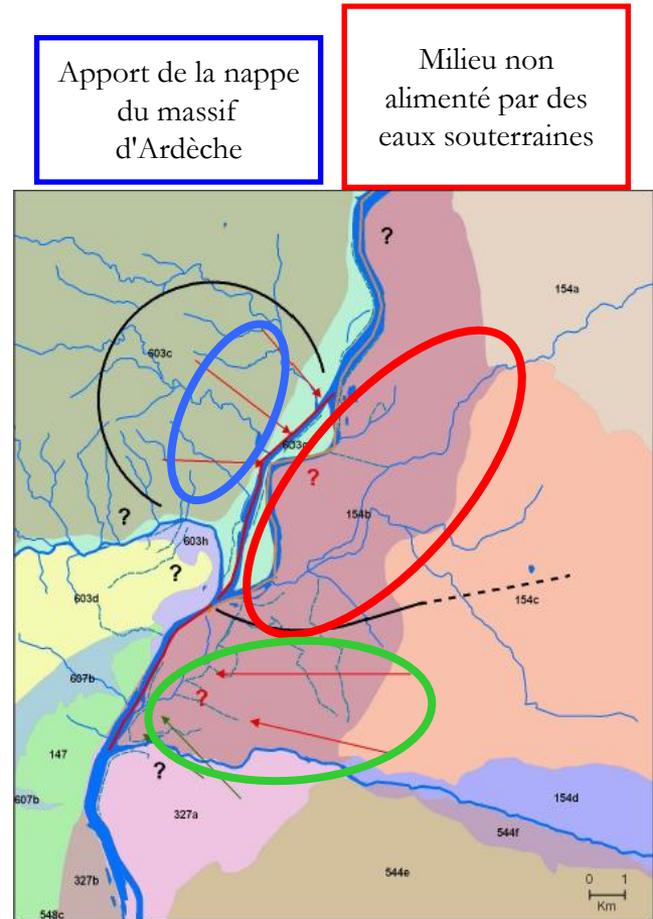
Apport eau
souterraine



Niveau
trophique



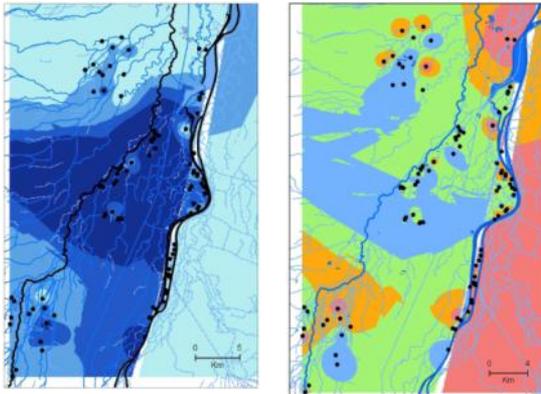
Apport nappe de
versant



Apport de la nappe
(latérale ou alluviale de la Drôme ?)

Potentiel de caractérisation des échanges

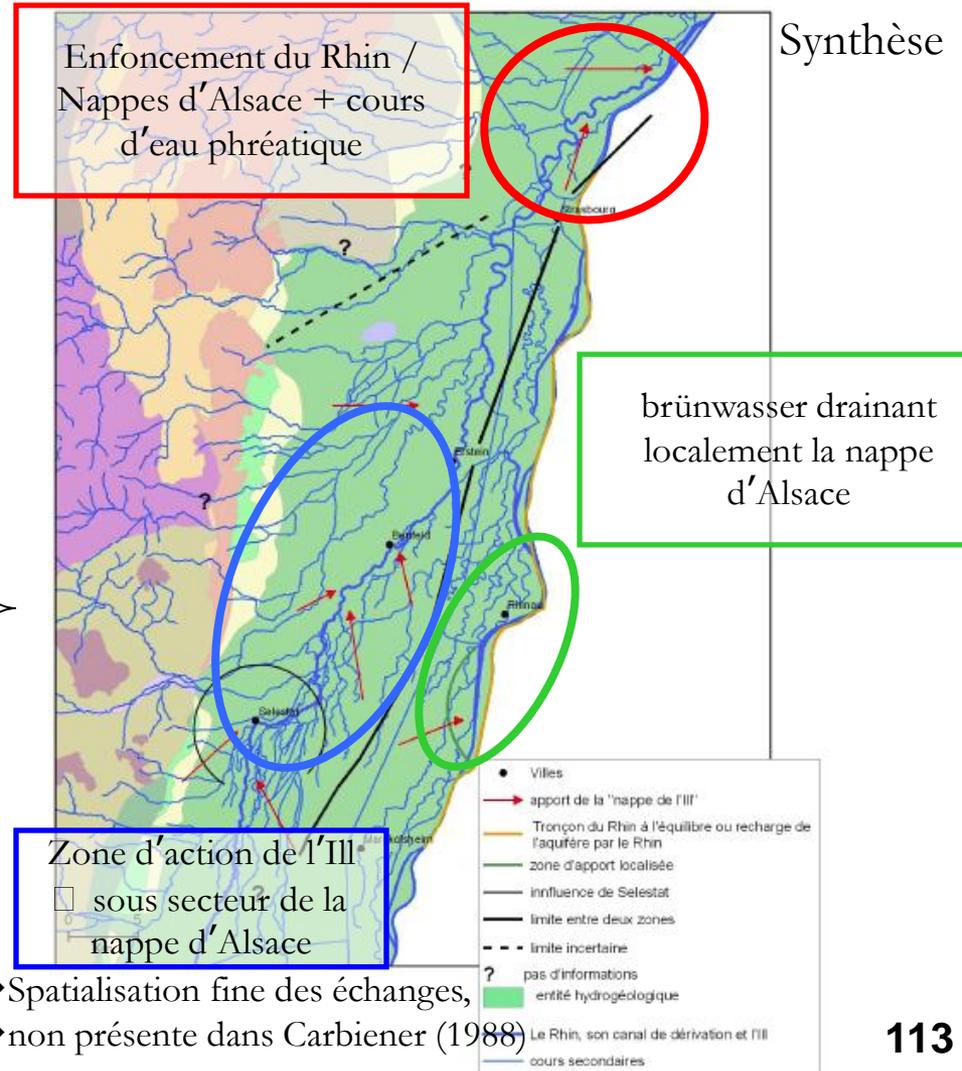
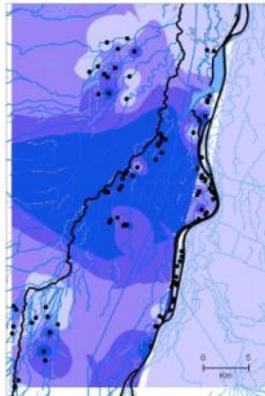
Plaine d'Alsace : étude bibliographique de 52 publications de 1967 à 2006



Apport eau souterraine

Niveau trophique

Apport nappe de versant



Synthèse

Coûts (hommes/jour)

Tâches	Temps (jours)	Coût (homme/jour)
Echantillonnage de la végétation	5km / jour	2 personnes/jour
Analyse des données	10km / jour	1 personne / jour
Cartographie et synthèses	10km / jour	1 personne / jour

Matériel nécessaire

Matériel de mesure
Règle de 2m
Râteau télescopique
Prise de notes
Fiches de relevé végétation
Bloc note
Crayon(s) papier(s) si vite tombés dans l'eau
Orientation et informations
GPS, Topofil ou cartographie permettant de connaître la distance entre les transects
Navigation
Bateau (+ gonfleur) + rames

Logiciels :
Tableur
SIG

Limites et avantages

→ Avantages :

- **Méthode rapide et peu couteuse**
- Intégration annuelle
- diagnostic des territoires relativement étendus (20 km) ;
- bilan à différentes échelles (agrégation spatiale du kilomètre à l'entité hydrogéologique).

→ Limites :

- Caractérisation « unilatérale » et semi-quantitative des flux
- Nécessite la présence de végétation (vitesse du courant, substrat ...)
- Inadaptée lorsque présence de pollution.
- Information affaiblie si pente de la rivière faible, ou capacité hydraulique du site élevée.

→ **Transposition** : Projet NAPROM (Rhin, Sèvre-Niortaise)

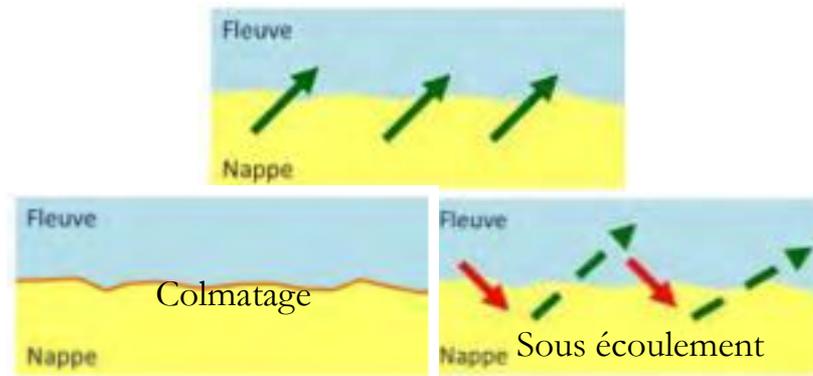
→ **Transfert de connaissance** : guides méthodologiques



Merci pour votre attention

Potentiel de caractérisation des échanges

Identification de origine et abondance des flux des eaux souterraines de la nappe vers les systèmes aquatiques.



- Intégration à l'échelle des masses d'eau, cours d'eau, nappe alluviale, aquifère adjacent
- Intégration annuelle sur un relevé estival

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

8. Utilisation des invertébrés souterrains pour la localisation des zones d'échange nappe - rivière

PISCART Christophe & MARMONIER Pierre

Des organismes qui vivent dans les nappes ?

Des invertébrés vivent dans le monde souterrain : **STYGOBIES**

Organismes adaptés aux conditions du milieu

Perte des organes inutiles : dépigmentés, aveugles...

Ralentissement du cycle de vie

Baisse du niveau métabolique



Des Mollusques
(*Bithiospeum diaphanum*)



Un Amphipode
(*Niphargus foreli*)



Un Coléoptère
(*Siettitia avenionensis*)

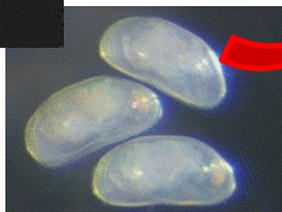


Des Ostracodes
(*Fabaeformiscadona*)

Des stygobies qui remontent dans les sédiments des rivières

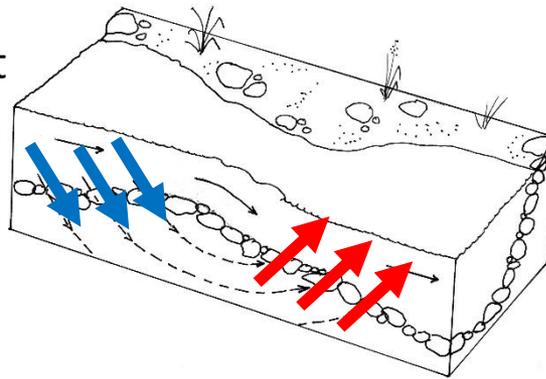
Invertébrés stygobies peuvent aller des eaux souterraines aux rivières

- des témoins des échanges eau souterraine – rivière
- du sens des échanges
- de l'origine de l'eau

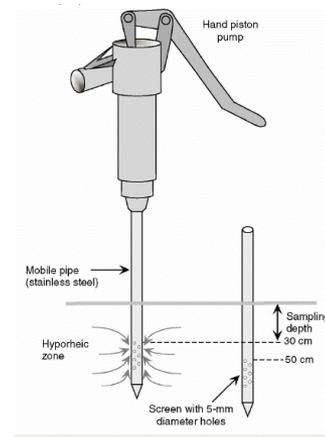


Invertébrés souterrains ou 'stygoxies'

Un cours d'eau est en contact avec sa nappe par les interstices de ses sédiments

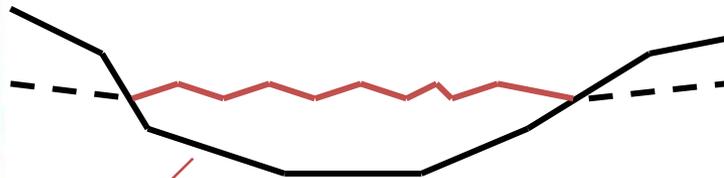


Zone d'infiltration d'eau de surface



Il est possible de pomper da faune des interstices

Zone d'exfiltration d'eau souterraine

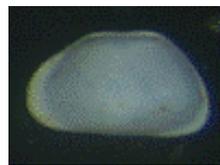


1 à 5% d'espèces souterraines

Gradient de répartition des espèces

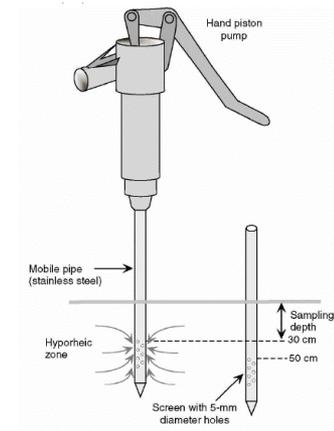
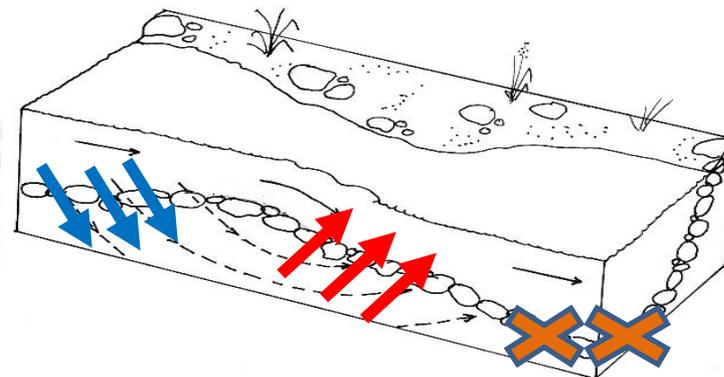


30 à 50% de souterrains



La présence ou l'absence de faune souterraine à 50cm de profondeur traduit les échanges entre la rivière et sa nappe

Caractéristiques physiques et chimiques de l'eau



 Infiltration

 Exfiltration

Perméabilité faible
'colmatage'

Gradient hydraulique
vertical (VHG)
Température

VHG < 0
T similaire

VHG > 0
T tamponnée

Paramètres peu modifiés
par activités biologiques
(Condu., Cl, Ca, Mg, Na...)

Teneurs
similaires

Teneurs
différentes

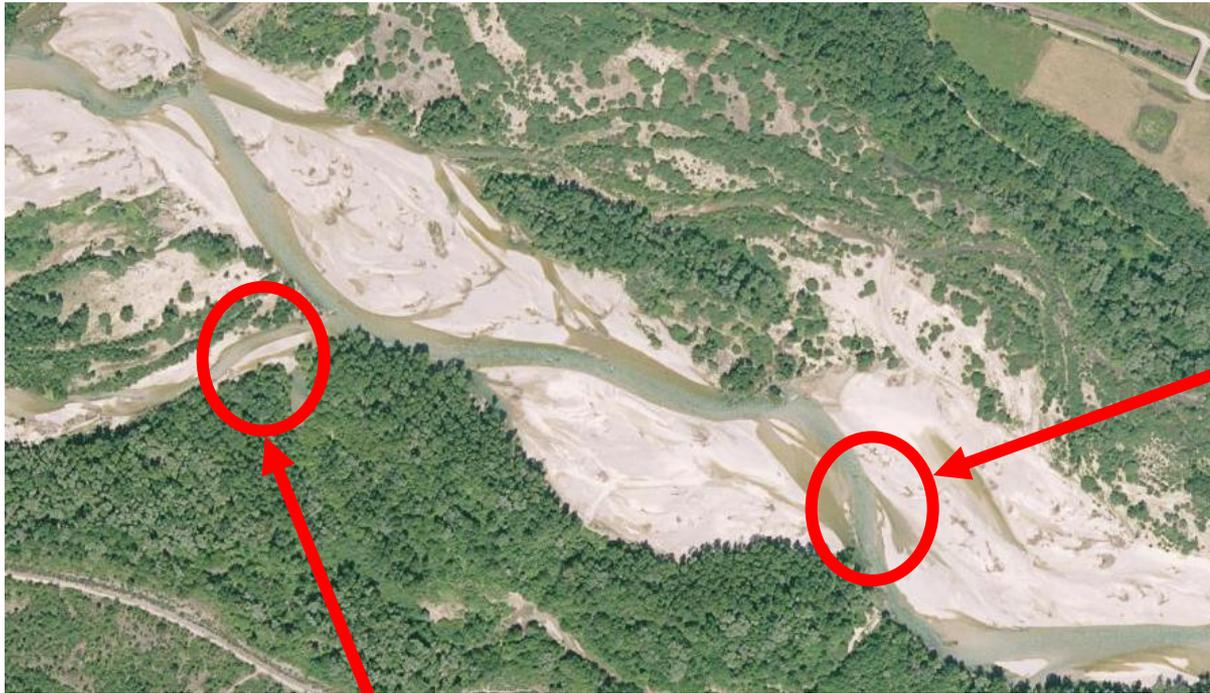
Paramètres modifiés
par activités biologiques
(O₂, NO₃, SO₄...)

Teneurs
similaires

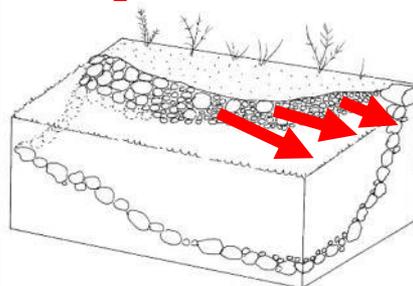
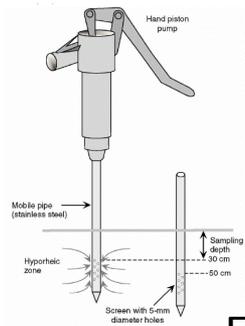
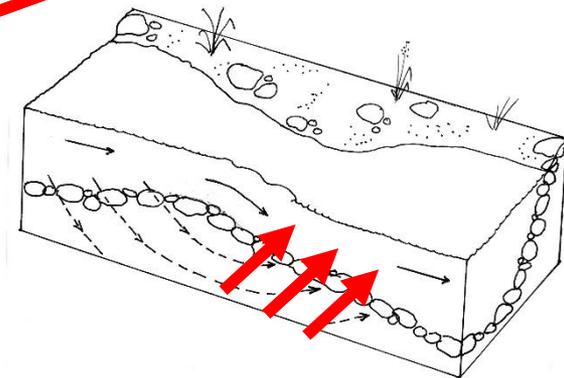
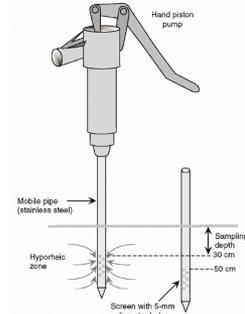
Teneurs
différentes

Effondrement

Où prélever la faune stygobie ?



En aval des seuils



En aval des bancs

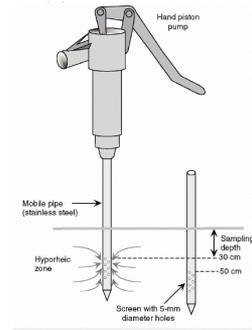
Partout où la déclivité du chenal induit des gradients hydrauliques positifs

Invertébrés souterrains ou 'stygoxies'

Espèces	Abondances
F. wegelini	10
N. rhenorhodanensis	23
N. kochianus	5
XX...	...

**Abondance / 3 fois 10L
(nombre de stygoxies)**

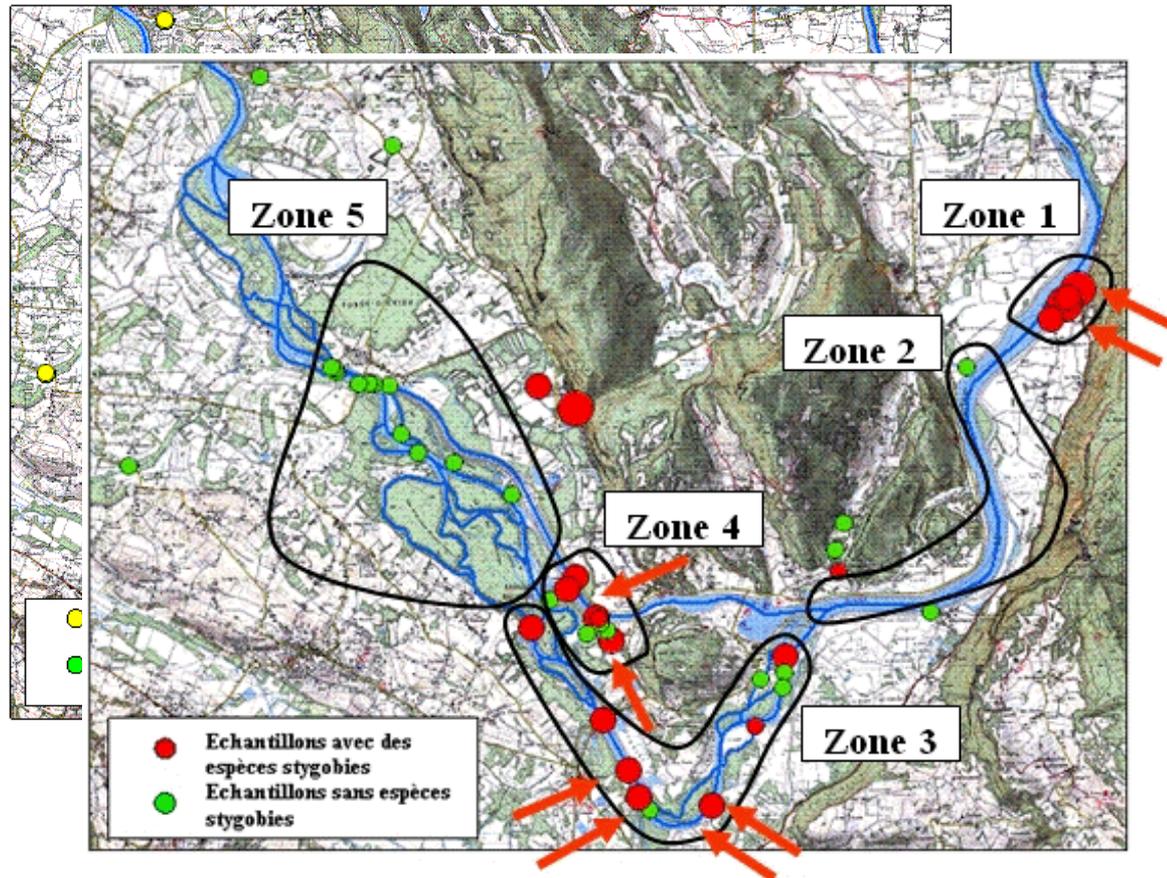
**Indice d'abondance
(nombre x trait biologique)**



Exemple du secteur de Brégnier-Cordon

113 échantillons
de 63 stations

5 zones à hydrologie
contrastée
(indice de richesse)



Indice d'abondance

(nombre d'individus x trait biologique)

Indice d'abondance $I = (n1 \times 1) + (n2 \times 2) + (n3 \times 5) + (n4 \times 10)$

1 : organismes vivant à faible profondeur dans les sédiments dans une grande diversité d'habitats souterrains (ubiquistes) ;

Fabaeformiscandona wegelini



Cavernocypris subterranea

2 : organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéiques du fleuve à faible profondeur (hyporhéiques) ;

3 : organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe et les karsts (stygobies généralistes)

Niphargus virei



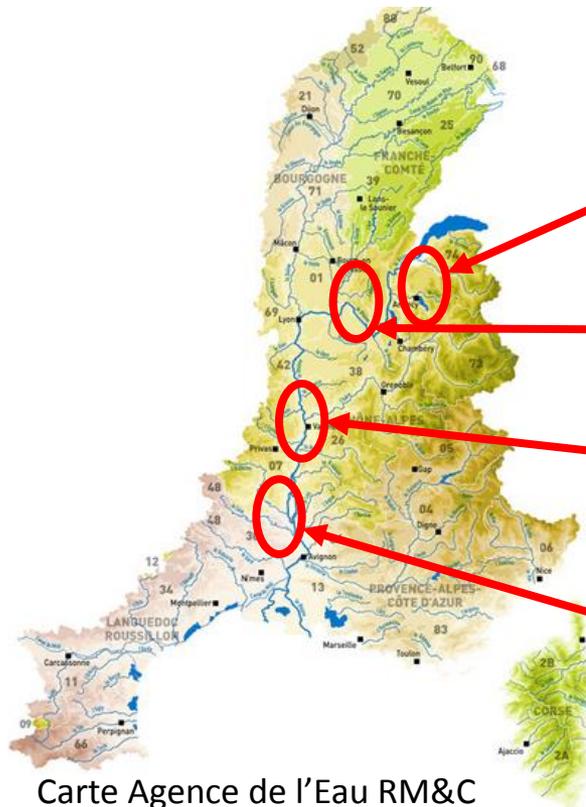
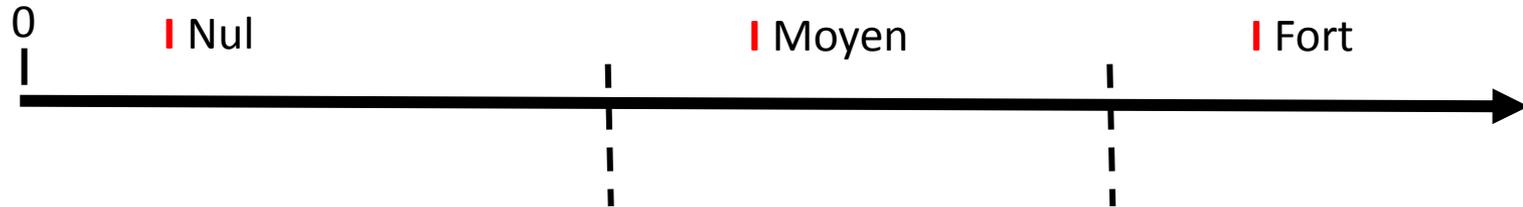
Niphargus rhenorhodanensis

4 : organismes phréatobies présents uniquement à forte profondeur dans la nappe alluviale ou strictement karstiques.

Indice d'abondance $I = (n1 \times 1) + (n2 \times 2) + (n3 \times 5) + (n4 \times 10)$

Phase 1

Calcul de I
l'indice d'échange



Ruisseaux des Bauges
I max = 30

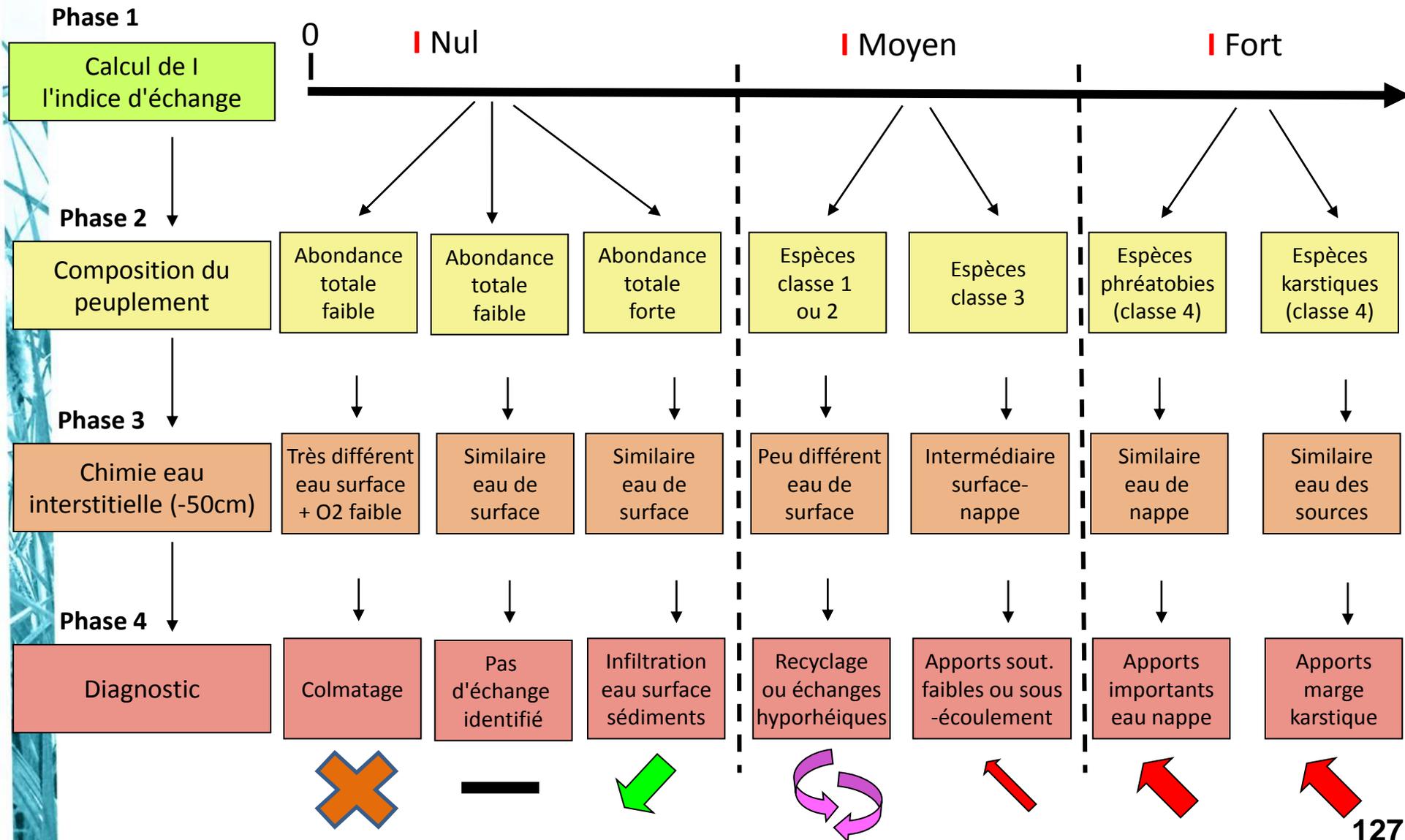
Rhône à Brégnier-Cordon
I max = 120

Rhône à Valence
I max = 100

Drôme réserve des Ramières
Cèze dans les gorges
I max = 560

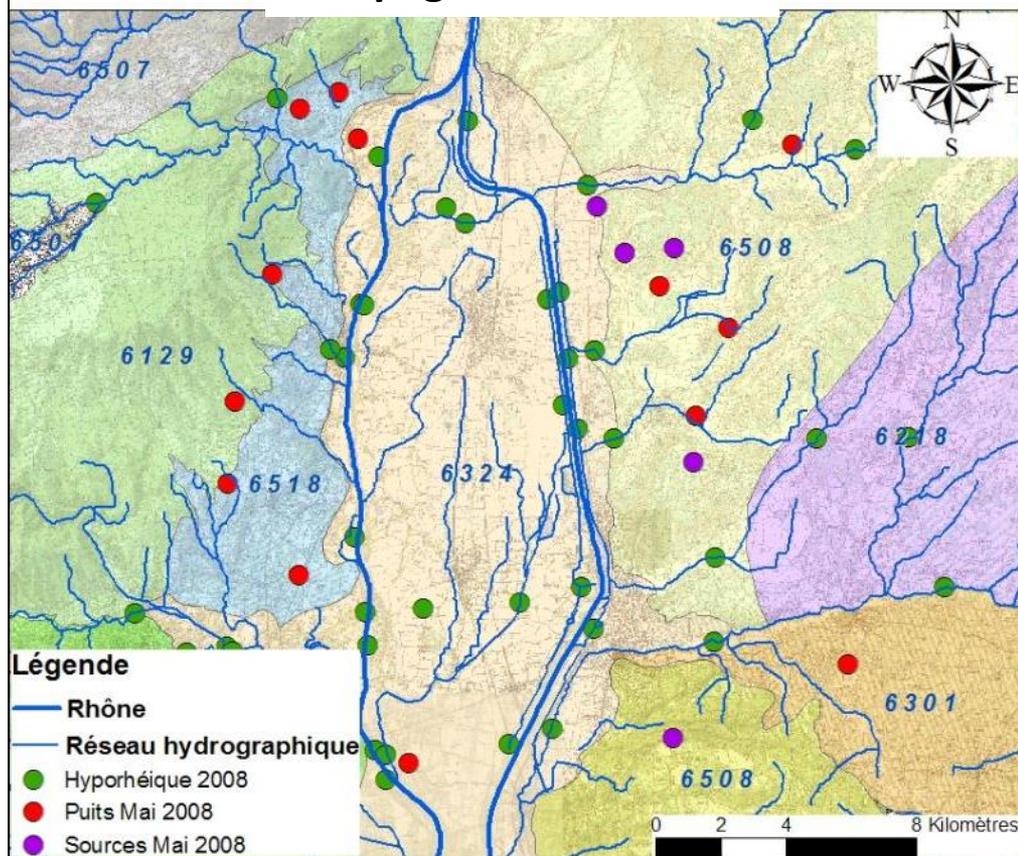
Carte Agence de l'Eau RM&C

Indice d'abondance $I = (n1 \times 1) + (n2 \times 2) + (n3 \times 5) + (n4 \times 10)$



Exemple du Rhône à Donzère-Mondragon

Campagne de Mai 2008



Pompages hyporhéiques

9 stations dans le chenal c.c.

10 stations dans les contre-canaux

4 stations dans des zones humides
entre le canal et le chenal c.c.

Biodiversité régionale

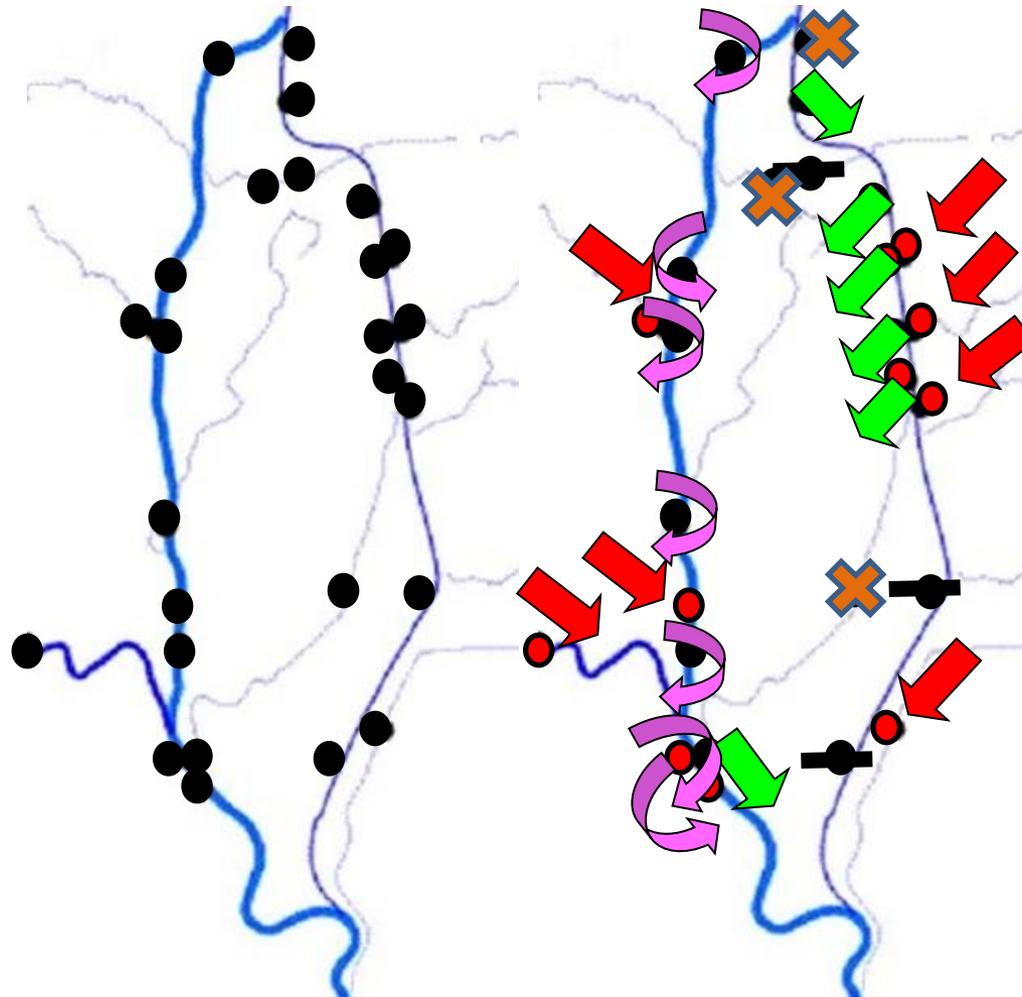
13 pompages sur affluents

14 puits

5 sources

Complétée par une campagne en basses eaux en septembre

Exemple du Rhône à Donzère-Mondragon



Perte d'eau de surface



Echanges à faible distance



Apports souterrains



Pas d'échange identifié
ou colmatage partiel



Bilan pour 27 stations
(chenaux et zones humides)

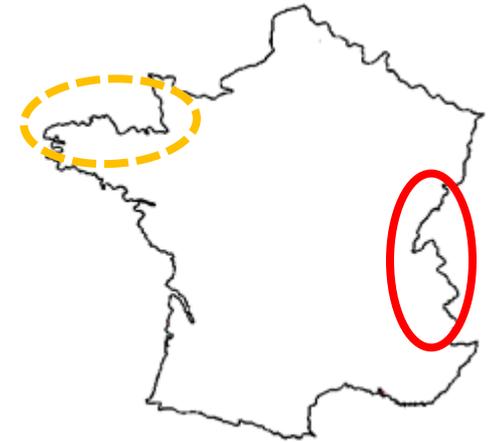
Invertébrés stygobies : quelles limitations ?

Limitation due à des biais biogéographiques

La faune souterraine a été éliminée par les glaciations

Communauté souterraine plus pauvre en zone alpine

moins diversifiée sur le socle cristallin



Limitation du type de cours d'eau

Peu applicable sur de tout petits cours d'eau sableux / agricoles
(habitat sédimentaire devient trop homogène)



Limitation liée au traitement des échantillons

Le temps de tri de la faune souterraine

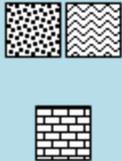
Les difficultés d'identification



Merci pour votre attention

Pour plus de détail sur cette méthode

Atelier de cet après-midi

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Echelle de temps	Niveau d'information nécessaire	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation			Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
					 . .	 . .	 . .	 . .	
Nappes libres Milieux carbonatés Zone hyporhéique	Ponctuelle	<100m	Masses d'eau	Instantanés (t) Saisonnier (Δt)	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Important

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

9. Caractérisation des échanges entre Karst / Rivière : La Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-clap

Focus sur les contrastes thermiques et chimiques
entre ESO et ESU

Jordan Ré-Bahuaud

Sommaire

1. Présentation du projet et du site d'étude

- Contexte du projet
- Objectif, Moyens et Méthodes
- Singularités du site d'étude

2. Contrastes thermiques par imagerie IRT aéroportée

- Principe
- Campagne de juillet 2013
- Essai de quantification des apports
- Conclusions partielles IRT

3. Contrastes chimiques par analyses en ions majeurs

- Principe et Echantillonnage
- Classification K-means et CAH
- Classification ACP (synchrone et temporelle)
- Calcul des proportions de mélange
- Conclusions partielles Chimie

4. Conclusions et perspectives

Contexte du projet (1/2)

- **Projet ZABR co-financé par l'AE-RMC, accord cadre agence de l'eau ZABR**

- **Projet sur 4 ans de 2013 à 2016**

→ Post-doctorant : Jordan Ré-Bahuaud



→ Doctorant : Hervé Chapuis (année 2)

→ Master soutenu : - Michael Savary (Constitution de bases de données + RN)
- Jocelyn Faroux (Analyse et traitement du signal appliqué aux séries chronologiques (hauteurs/débits, conductivités et températures) en vue de quantifier les échanges karst – rivière
- Adrien Coutuis (Analyse et traitement de la base de données pluie-hauteur en vue de simulation des hauteurs par réseaux de neurones) en cours.

Contexte du projet (2/2)

- Equipes de recherche impliquées

→ UMR-5023 LEHNA

→ Université Lyon 1 (Marmonier P.)

→ UMR-5600 EVS

→ Mines Saint-Etienne

→ ENS Lyon (Wawrzyniak V. ; Piegay H.)

→ UMR -1114 EMMAH

→ Université d'Avignon (Mayer A. ; Radakovitch O.)

→ UMR-7300 ESPACE

→ Université de Nice (Jolivet J.)

→ Mines d'Alès (Johannet A. ; Salze D.)

→ Université de Saint-Etienne

- Partenaires institutionnels

→ Agence de l'eau RMC (Cadilhac L.)

→ Syndicat ABCèze



UNIVERSITÉ D'AVIGNON
ET DES PAYS DE VAUCLUSE



Objectif, Moyens et Méthodes

- Objectif du projet

→ Identification, caractérisation et quantification des échanges ESO et ESU en domaine karstique

- Moyens et méthodes

→ Synthèse géologique

→ Traçages artificiels (colorimétrie)

→ Suivi hydrologique des sources et de la rivière (analyse fonctionnelle)

→ Investigations biologiques

→ Géochimie (ions majeurs, éléments traces et isotopes)

→ Imagerie IRT aéroportée

→ Modélisation Pluie/Débit par RN

Singularités du site d'étude (1/2)

Typologie des échanges karst/rivière :

Sens des échanges :

- Du karst vers la rivière → apports souterrains
- De la rivière vers le karst → pertes souterraines

Non linéarité des échanges

- Dépend de l'état de saturation du karst
- Dépend de la hauteur d'eau en rivière

Nature des échanges :

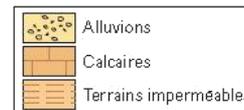
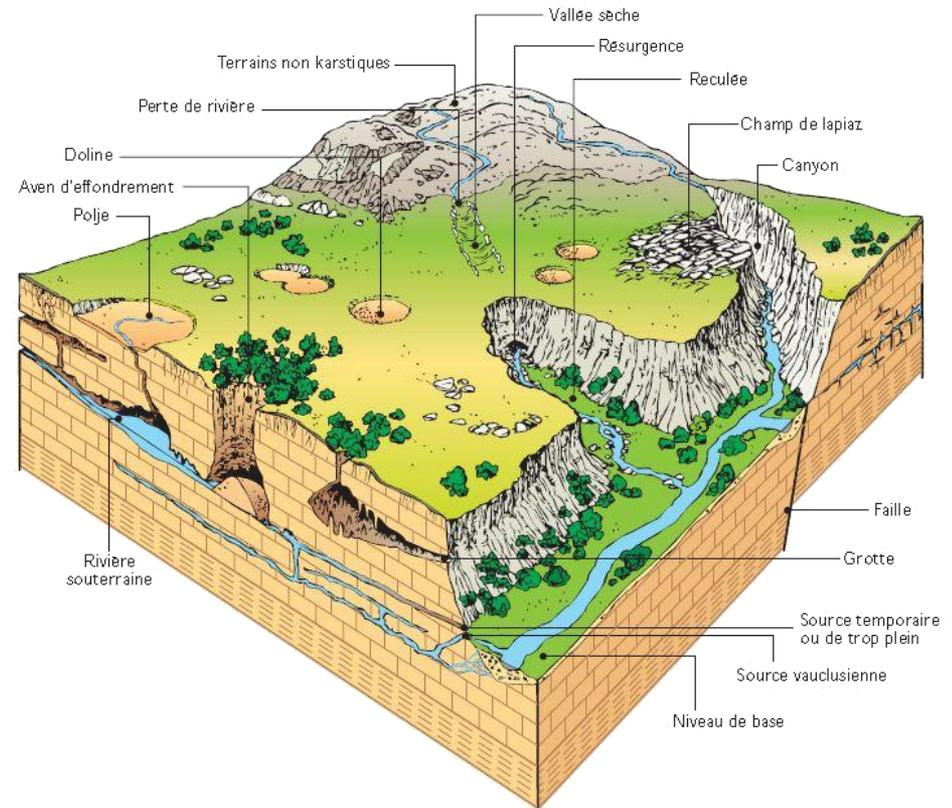
- Ponctuels → très localisés sous forme de sources karstiques
- Diffus → difficilement identifiable car répartis sur de plus grandes zones

Identification des apports souterrains

→ Deux méthodes basées sur les contrastes ESO/ESU :

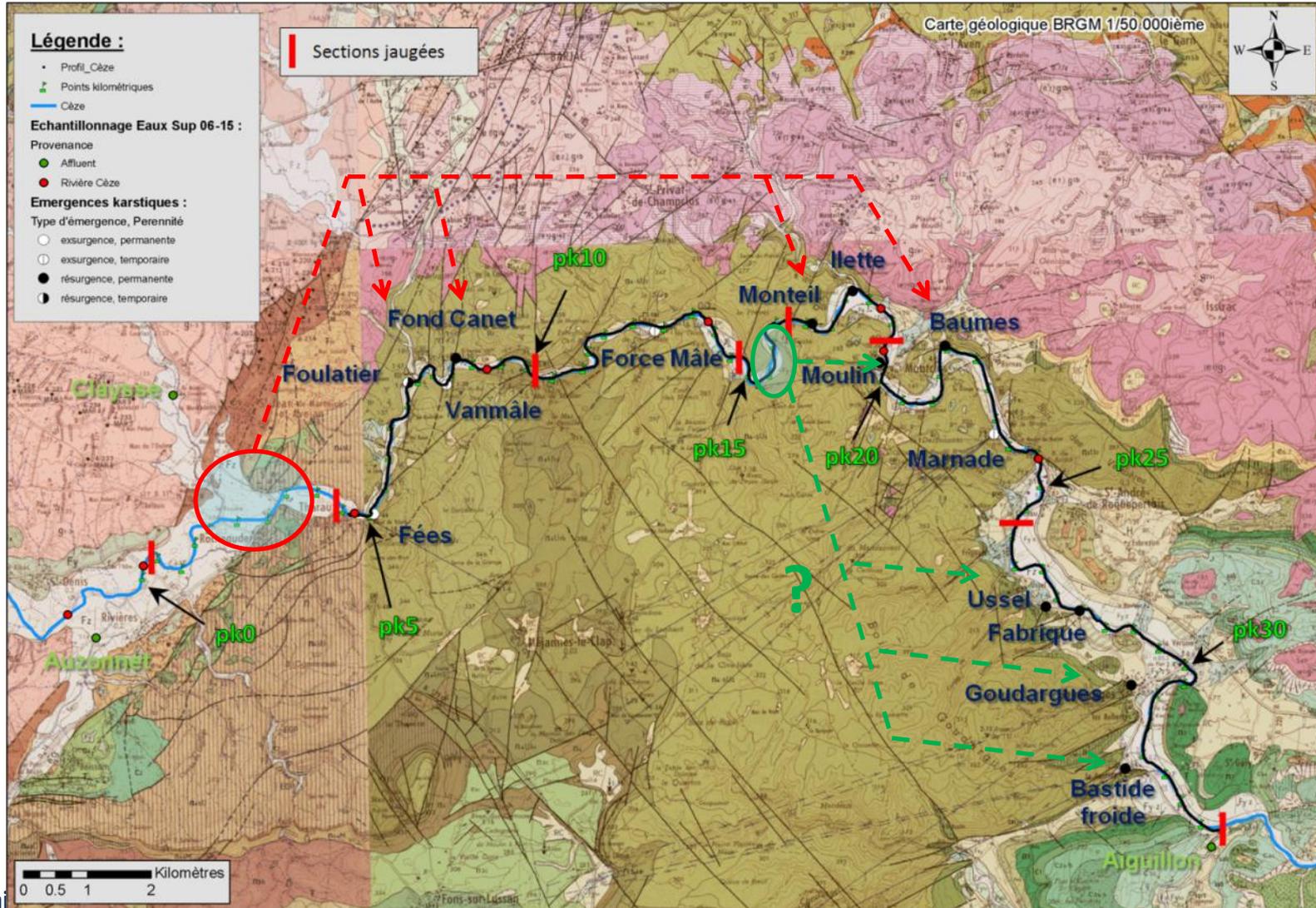
- Chimique
- Thermique

Schéma d'un paysage karstique



Source : Agence de l'eau et Bakalowicz, 1999

Singularités du site d'étude (2/2)



Principe IRT (1/2)

- Imagerie Infrarouge Thermique (IRT) aéroportée (ENS Lyon : V. Wawrzyniak et H. Piegay)
- Principe : Contraste de température entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines (sources karstiques) :
 - Été : eau superficielle chaude (25°C) et eau souterraine paraissant froide (14°C)
 - Hivers : eau superficielle froide (5°C) et eau souterraine paraissant chaude (14°C)
- Contraintes d'acquisition :
 - Maximiser les contrastes de températures
 - Minimiser les contrastes de débits
 - Disposer quelques sondes de température in-situ pour le recalage des images IRT
- Objectifs de caractérisation :
 - Localisation des apports souterrains (ponctuels ou diffus)
 - Profils de T°C amont/aval

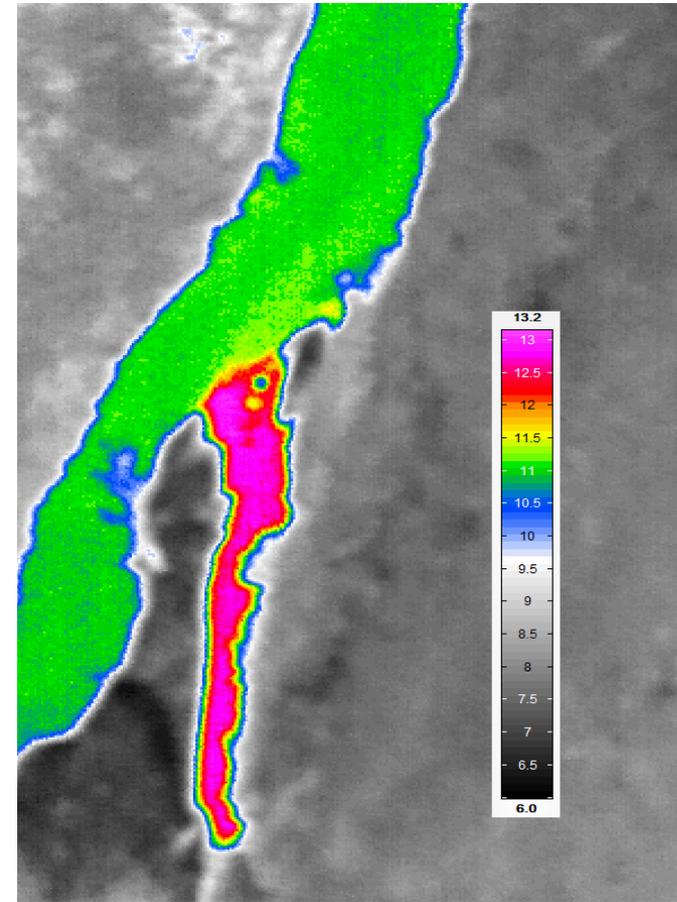


ULM supportant le dispositif d'acquisition des Images IRT

VarioCAM® hr research (Infratec) Caméra thermique pour les clichés thermiques et visibles

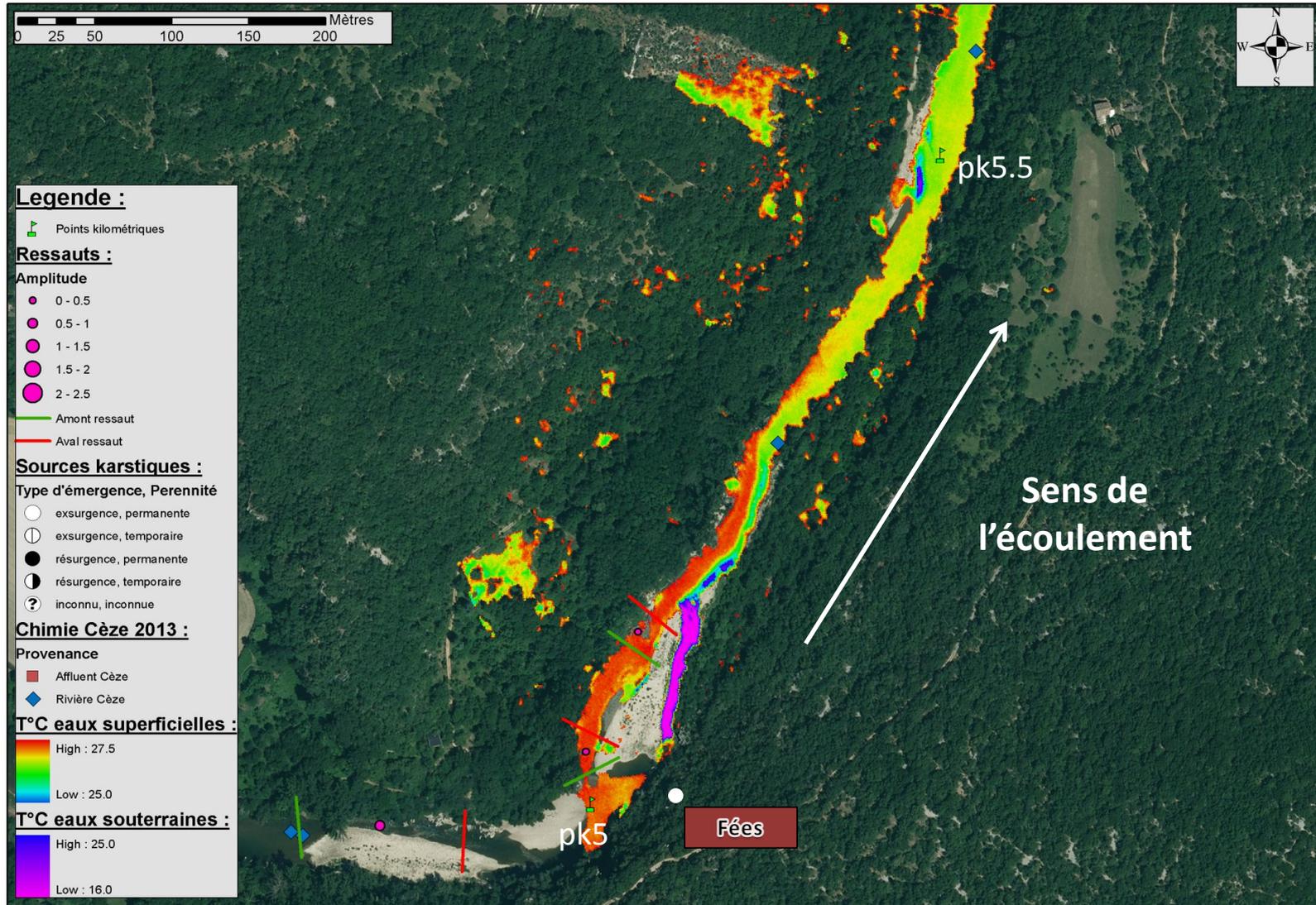
Principe IRT (2/2)

- Acquisition d'un couple de clichés de tronçons de rivière depuis l'ULM :
 - Photo dans le spectre visible (RVB)
 - Photo dans le spectre Infra Rouge Thermique (IRT)
- Traitement des images IRT sous SIG :
 - Géoréférencement des images visibles puis des images thermiques (+ de 300)
 - Réalisation d'une mosaïque d'images IRT (fonction « raster mosaïque »)
 - Calibration des images IRT grâce aux valeurs de températures collectées in-situ
 - Identification des gammes de températures (« symbology classified color ramp ») attribuées aux eaux superficielles (entre 27 et 25°C) par rapport aux eaux souterraines (<< 25°C)
- Profil de température de la rivière :
 - Transformation de l'axe de la rivière (« shapefile polyline ») en semis de points (« shapefile points ») répartis à distance régulière (COGO tools – Proportion)
 - Pour chaque point de l'axe de la rivière, extraction de la valeur de température issue de la mosaïque IRT (« extract value to point »)
 - Report des valeurs de températures sur des graphiques binaires représentant le profil de température de la rivière

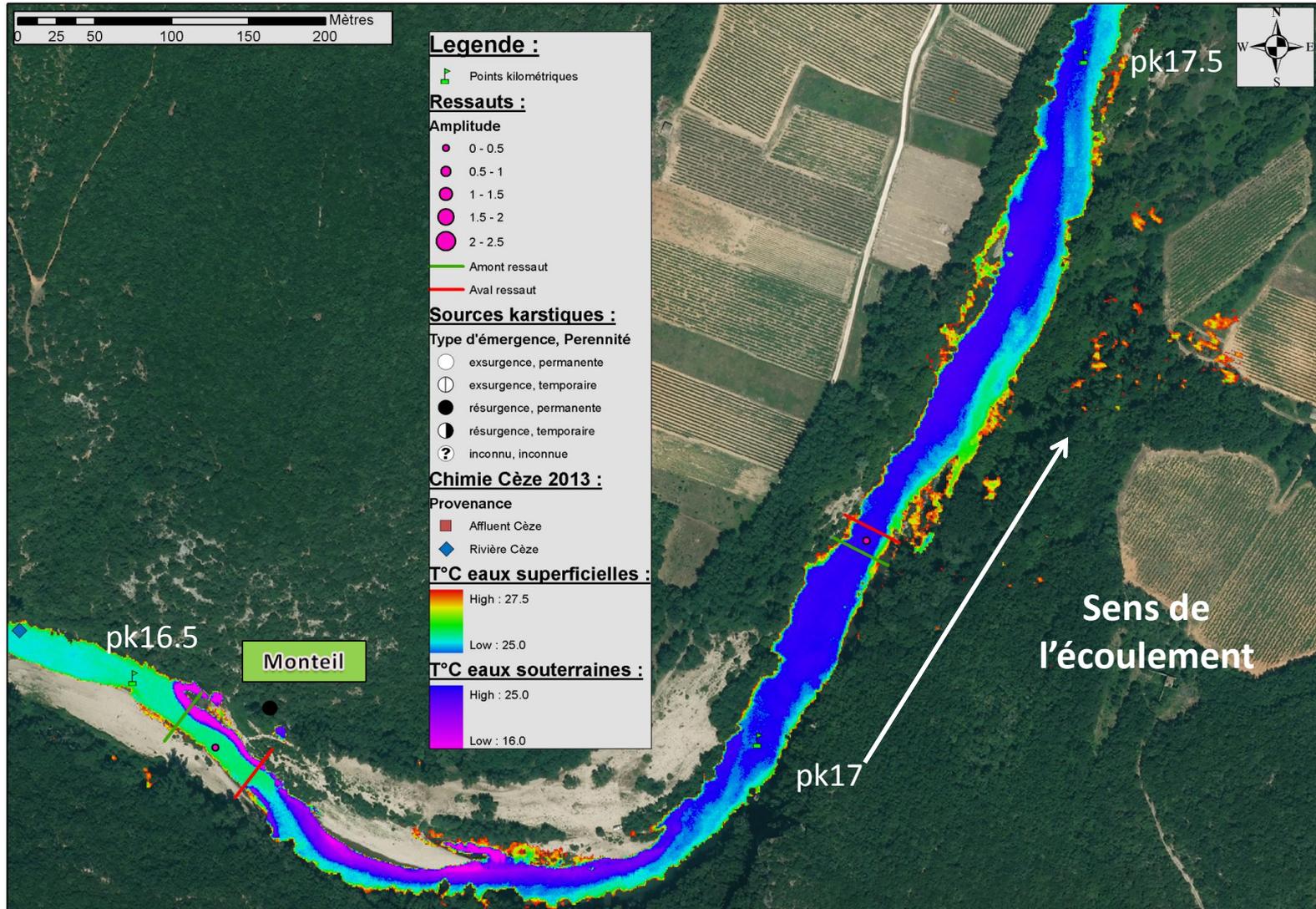


Exemple d'Image IRT du 13-04-13 centrée sur la source karstique des Fées plus chaude par rapport à la Cèze

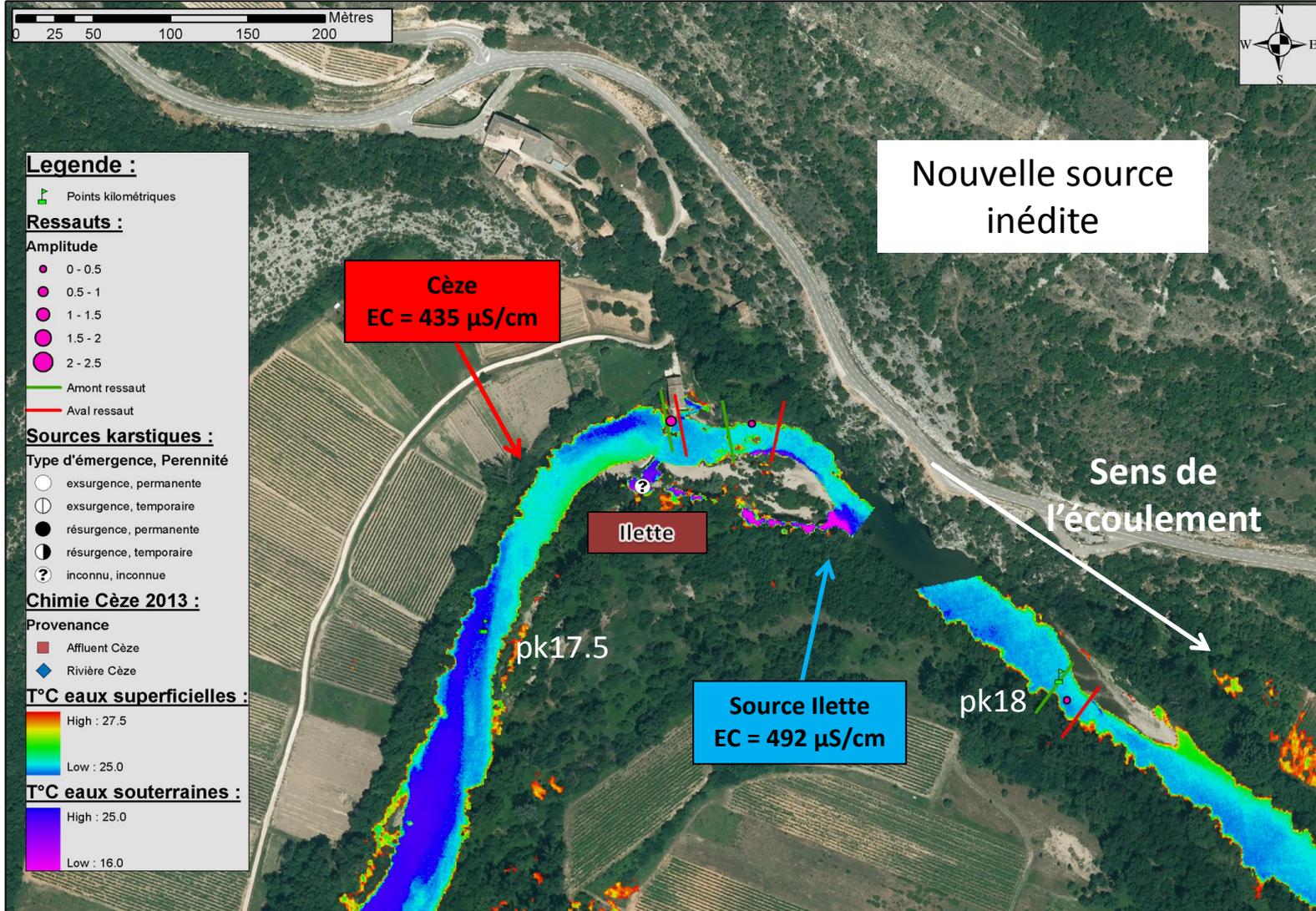
Campagne IRT Juillet 2013 (1/3)



Campagne IRT Juillet 2013 (2/3)



Campagne IRT Juillet 2013 (3/3)

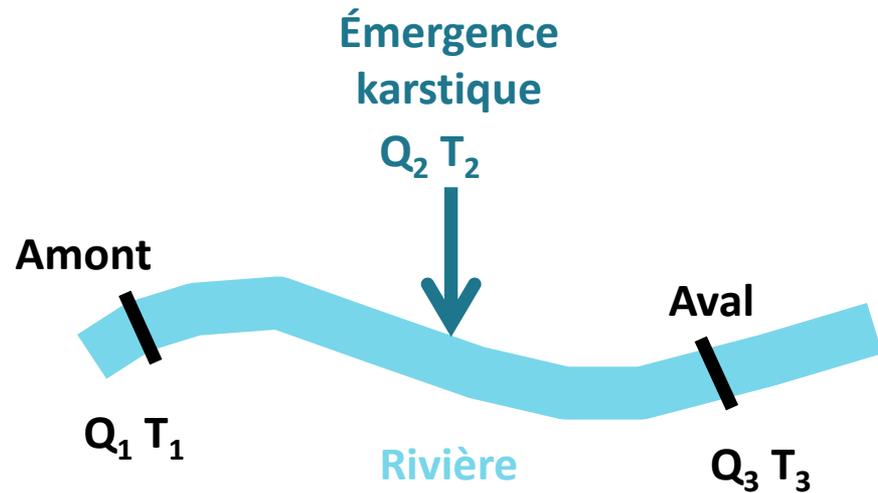


Essai de quantification des apports (1/2)

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 * T_1 + Q_2 * T_2 = Q_3 * T_3 \\ Q_1 + Q_2 = Q_3 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{conservation de la quantité de chaleur (1)} \\ \text{conservation de la masse (2)} \end{array}$$

$$Q_2 = Q_1 * \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_3} \quad (3)$$

→ **Contrainte principale :**
Mélange rapide et complet
des eaux



Exemple de la source des Fées :
Valeurs *mesurées* et *calculées* à la date du 08/07/13

Débits (L ³ /s)			Températures (°C)		
Q ₁	Q ₂	Q ₃	T ₁	T ₂	T ₃
2440	92	2532	27,3	13,6	26,8

Essai de quantification des apports (2/2)

Analyse de sensibilité : Débit de la source des
Fées pour différentes températures en rivière

T_1 (°C) \ T_3 (°C)	27.4	27.3	27.2
26.7	130	112	93
26.8	111	92	74
26.9	92	73	55

Conclusions partielles IRT

⊕ Avantages :

- Bonne méthode prospective pour caractériser les échanges karst vers rivière
- Applicable de manière quasi-synchrone sur une grande étendue spatiale
- Identification des principales aires d'émergence du karst et nouvelles sources inédites

⊖ Inconvénients :

- Difficultés pour estimer le débit des sources
- Nombreuses contraintes à prendre en compte pour l'acquisition IRT
- Difficile d'assurer des mesures saisonnières
- Ne permet pas de caractériser les échanges rivière vers karst

➔ Perspectives d'amélioration :

- Campagne étiage 2014 sur l'intégralité des sources (réalisée mais non traitée)
- Comparaison avec des mesures de débits en rivière et dans les sources

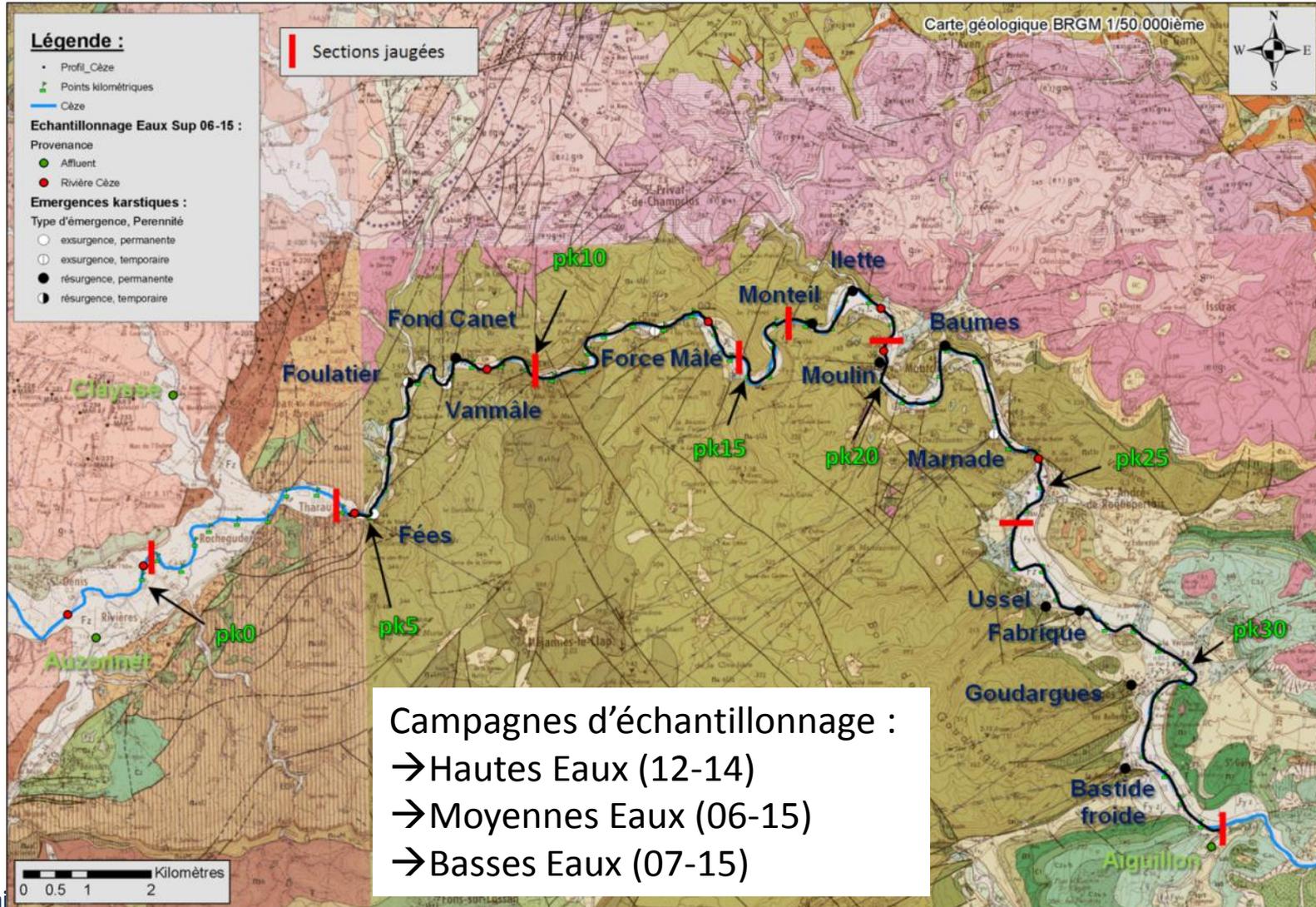
Principe et Echantillonnage (1/2)

- Analyse en ions majeurs et éléments traces cationiques de la Cèze d'amont en aval et des sources karstiques
- Principe : Contrastes chimiques entre rivières et sources et contrastes entre sources
- Moyens analytiques :
 - ICP (cations majeurs et cations traces)
 - Chromatographie ionique (cations et anions majeurs)
 - Mesure in-situ HCO_3^- , pH, EC, ORP et $T^\circ\text{C}$
- Objectifs de caractérisation :
 - Origine des eaux
 - Mélanges entre différentes eaux
 - Evolution temporelle



Echantillonnage des eaux (ICP et Chromato)

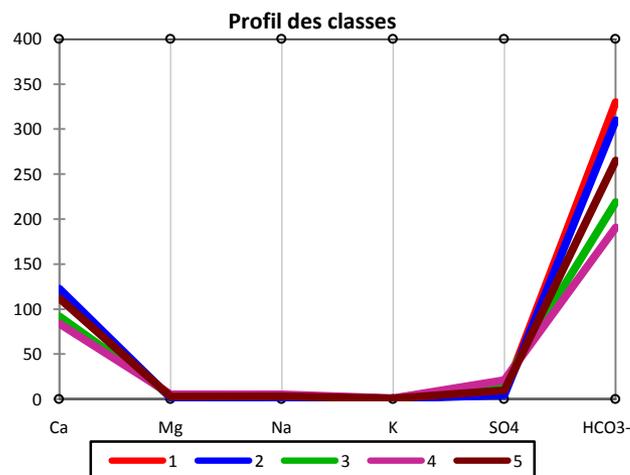
Principe et Echantillonnage (2/2)



Classification K-means et CAH

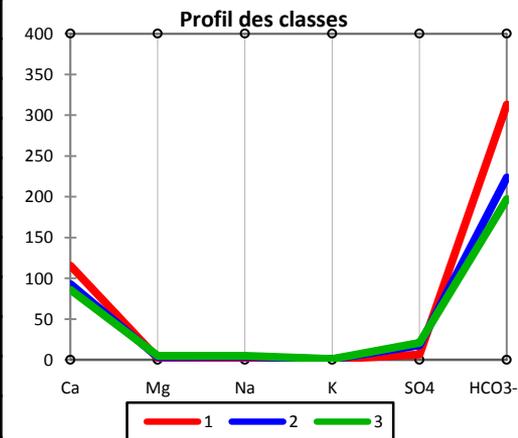
K-means

Observation	Classe	Distance au barycentre
Fées (12-14)	1	6.554
Vanmâle (12-14)	2	0.000
Monteil (12-14)	3	10.158
Moulin (12-14)	4	7.741
Baumes (12-14)	3	10.713
Marnade (12-14)	1	1.113
Ussel (12-14)	5	0.000
Fabrique (12-14)	3	9.427
Goudargues (12-14)	4	7.741
Bastide Froide (12-14)	1	5.639

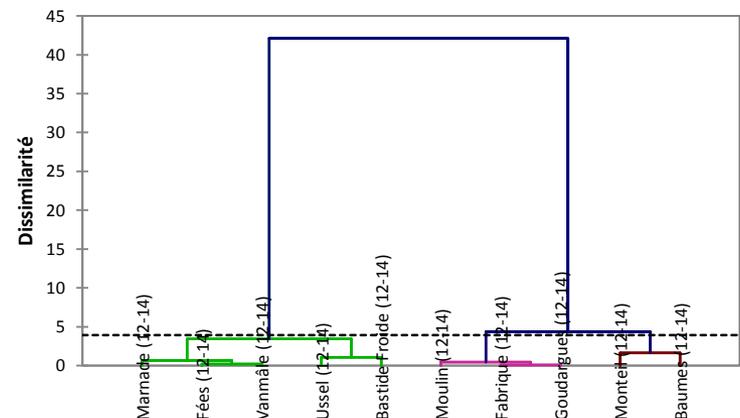


CAH

Observation	Classe
Fées (12-14)	1
Vanmâle (12-14)	1
Monteil (12-14)	2
Moulin (12-14)	3
Baumes (12-14)	2
Marnade (12-14)	1
Ussel (12-14)	1
Fabrique (12-14)	3
Goudargues (12-14)	3
Bastide Froide (12-14)	1



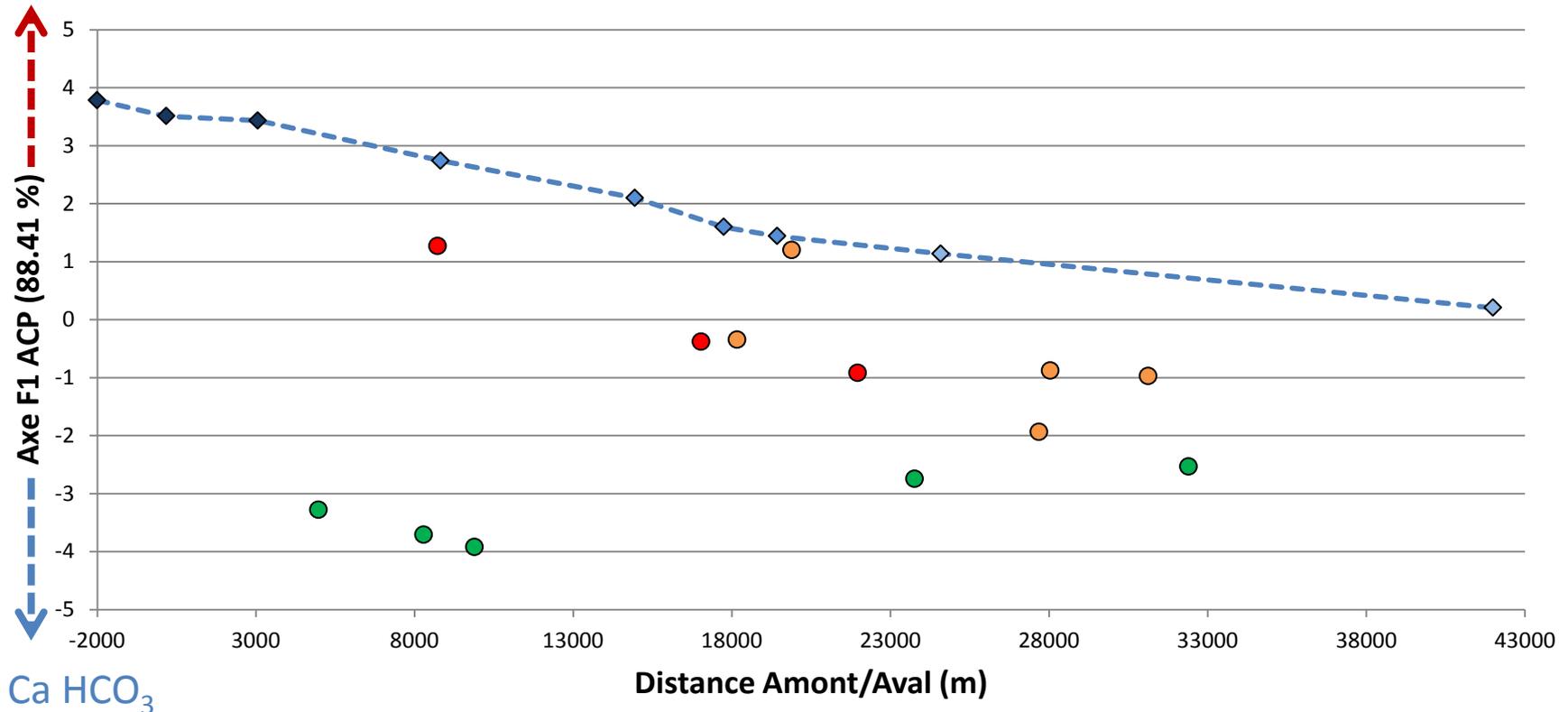
Dendrogramme



Classification ACP « synchrone »

 SO_4 Na K Mg

ACP "synchrone" Ions Majeurs (Juin 2015)

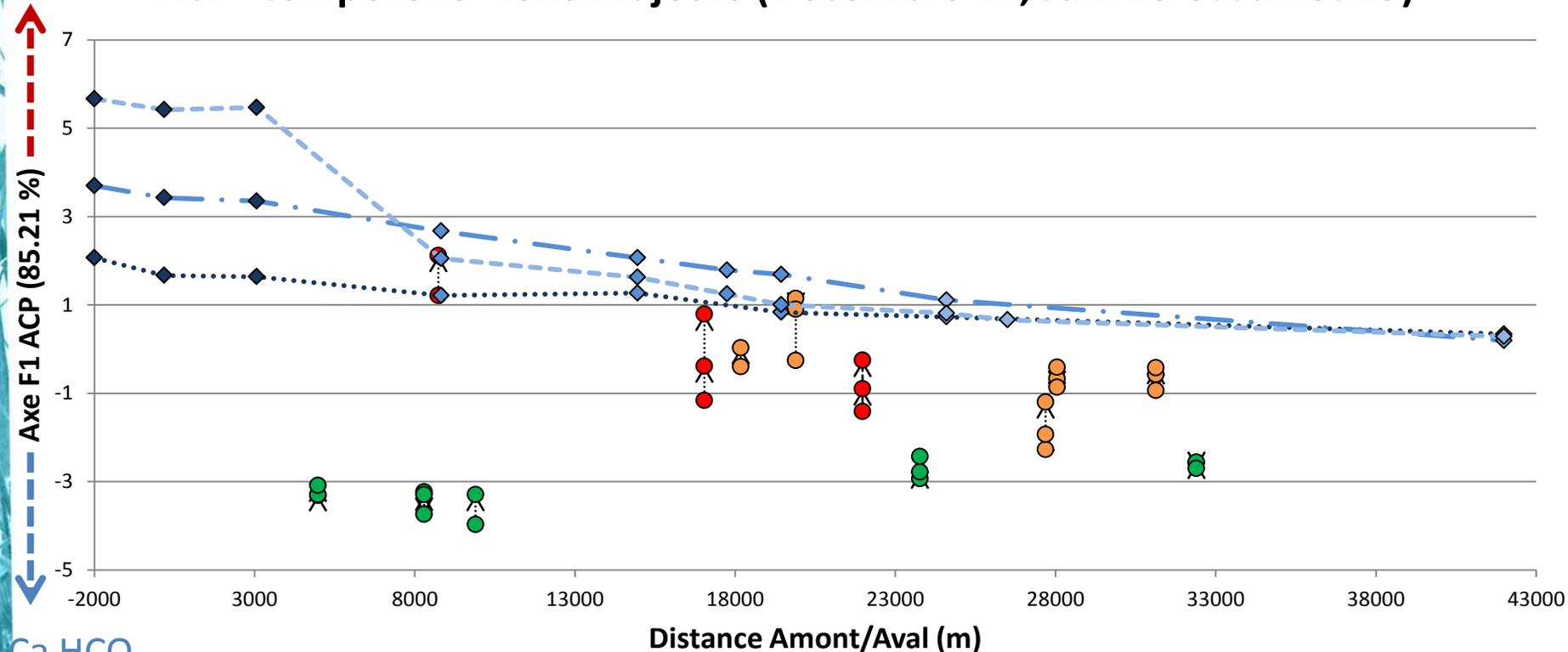


- Fées (RD) ● Vanmâle (RD) ● Font Canet (RG) ● Travers (RG) ● Monteil (RG) ● Illette (RD)
- Moulin (RD) ● Baumes (RG) ● Marnade (RD) ● Ussel (RD) ● Fabrique (RD) ● Goudargues (RD)
- Bastide Froide (RD) ◆ Rivière Amont ◆ Rivière Moyenne ◆ Rivière Aval

Classification ACP « temporelle »

SO_4 Na K Mg

ACP "temporelle" Ions Majeurs (Décembre 14, Juin 15 et Juillet 15)

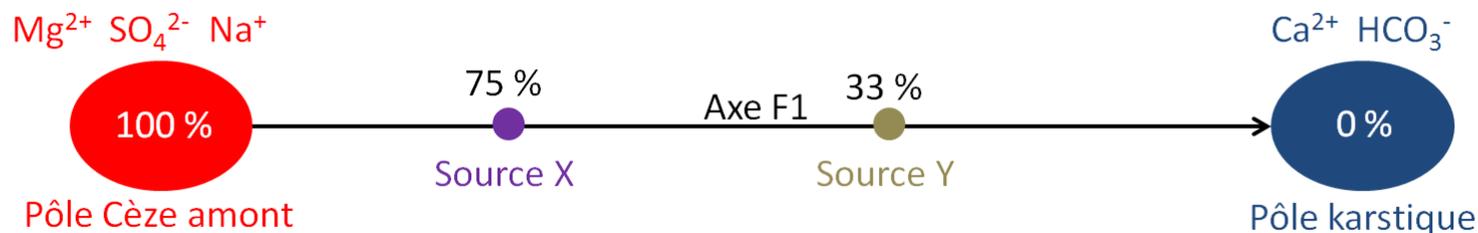


Ca HCO_3

-●→ Fées (RD) ●→ Vanmâle (RD) ●→ Font Canet (RG) ●→ Travers (RG) ●→ Monteil (RG)
-●→ Ilette (RD) ●→ Moulin (RD) ---●→ Baumes (RG) ●→ Marnade (RD) ●→ Ussel (RD)
-●→ Fabrique (RD) ●→ Goudargues (RD) ●→ Bastide Froide (RD) ◆ Rivière Amont ◆ Rivière Moyenne
- ◆ Rivière Aval Rivière (12-14) — Rivière (06-15) - - - Rivière (07-15)

Calcul des proportions de mélange

Principe du calcul basés sur l'ACP :



Pourcentage de contribution du karst :

Définition des pôles
de mélange :

Pôles de mélanges	Axe F1 ACP		
	déc-14	juin-15	juil-15
Rivière Amont	3.03	3.58	4.78
Rivière Moyenne	2.50	2.42	1.36
Karstique	-3.42	-3.07	-3.23

Groupes	Libellé	Axe F1 ACP			% Contribution karst (calcul ACP)			% Contribution karst (mesure)		
		déc-14	juin-15	juil-15	déc-14	juin-15	juil-15	déc-14	juin-15	juil-15
Sources	Fées (RD)	-3.87	-3.28	-3.39	100%	100%	100%	—	—	—
	Vanmâle (RD)	-3.81	-3.71	-3.62	100%	100%	100%	—	—	—
	Font Canet (RG)	—	1.27	1.62	—	35%	39%	—	—	—
	Travers (RG)	—	-3.92	-3.56	—	100%	100%	—	—	—
	Monteil (RG)	-0.90	-0.38	0.37	61%	60%	55%	—	—	—
	Ilette (RD)	—	-0.35	-0.34	—	50%	37%	—	—	—
	Moulin (RD)	0.31	1.20	0.50	37%	22%	19%	—	—	—
	Baumes (RG)	-1.43	-0.92	-0.52	69%	68%	66%	—	—	—
	Marnade (RD)	-3.31	-2.75	-2.78	98%	95%	94%	—	—	—
	Ussel (RD)	-2.48	-1.94	-1.45	84%	79%	61%	—	—	—
	Fabrique (RD)	-0.19	-0.88	-0.63	45%	60%	43%	—	—	—
	Goudargues (RD)	-0.14	-0.97	-0.66	45%	62%	44%	—	—	—
	Bastide Froide (RD)	-2.70	-2.53	-3.13	88%	90%	98%	—	—	—
Rivière	Rivière Amont	3.30	3.78	4.88	0%	0%	0%	—	—	—
	Rivière Aval	1.18	0.21	0.00	29%	51%	60%	—	48%	60%

Conclusions partielles Chimie

⊕ Avantages :

- Identification de typologies chimiques des eaux des sources
- Permet (dans une certaine mesure) d'identifier les échanges réciproques entre karst – rivière
- Evolution chimique temporelle des eaux des sources et de la rivière
- Proportions de mélange pour les sources dont les pôles ont été identifiés

⊖ Inconvénients :

→ Difficultés pour discriminer l'origine géologique des sulfates

→ Perspectives d'amélioration (en cours d'analyse) :

- Comparaison des données chimiques en ions majeurs avec les données isotopiques (Soufre des Sulfates, Carbone des carbonates, Strontium, Oxygène et Hydrogène de la molécule d'eau)
- ACP incluant des éléments traces, des données hydrologiques (coef. de tarissement, débits, distance amont/aval, altitude de l'émergence, etc.) et des propriétés des eaux (pH, T C, EC, ORP, etc.)

Conclusions et perspectives

→ Limites et perspectives par approches (thermie et géochimie) :

Approches	Limites	Perspectives
Thermie	<ul style="list-style-type: none">- Pas d'identification des échanges rivière vers karst- Difficultés pour quantifier les apports karstiques- Difficultés pour assurer un suivi saisonnier (contraintes d'acquisition)	<ul style="list-style-type: none">- Campagne sur l'ensemble du terrain d'étude comparée avec mesures de débits (en cours de traitement)- Comparaison avec le profil d'activité Radon pour quantifier les apports karstiques (en cours de traitement)
Géochimie	<ul style="list-style-type: none">- Difficultés pour discriminer l'origine géologique des Sulfates	<ul style="list-style-type: none">- Isotopes du Soufre pour discriminer l'origine des Sulfates (en cours d'analyse)- Isotopes de l'Oxygène de l'Hydrogène, du Carbone inorganique et du Strontium (en cours d'analyse)



Nécessité de comparer les résultats avec d'autres méthodes
(Jaugeages différentiels, traçages, profil radon et biologie)

Cèze en direction des gorges et grotte des Fées (à droite)



Gorges de la Cèze



Profil longitudinal Cèze



Profil longitudinal altimétrique et multiparamètres (T, EC, pH, redox, etc.) de la Cèze

Traçage des pertes de la Cèze



Injection fluorescéine



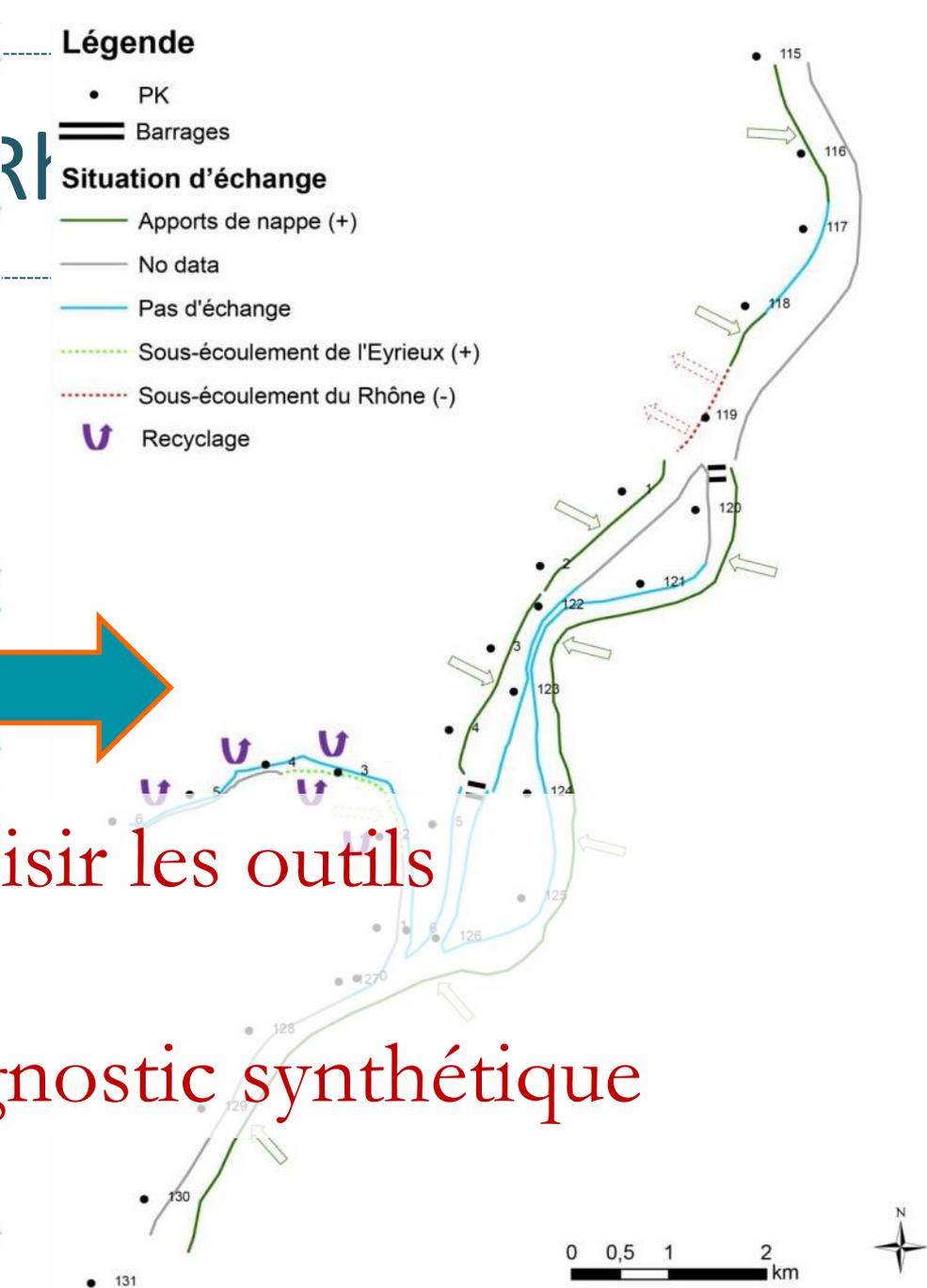
Rivière au niveau des pertes (en cours d'infiltration)

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

10. Synthétiser les différents diagnostics : proposition de méthodologie

Exemple de démarche

Frédéric PARAN
EMSE, UMR 5600 EVS



1. Bien choisir les outils

2. Etablir un diagnostic synthétique

Bien choisir les outils (1/4)

Éléments fondamentaux caractéristiques des différentes méthodes						
Outils	Contexte hydrogéol.	Principes	Informations nécessaires	Echelle spatiale (description des données)	Echelle spatiale (représentativité des échanges)	Temporalité
Analyse géomatique	Nappe libre connectée à la rivière (milieu poral)	- Calcul de gradients piézométriques - Loi de Darcy - TIN	- h nappe (cote) - h rivière (cote) - Carte piézométrique - perméabilités des berges - Section d'écoulement	Ponctuelle (puits ou piézomètre)	0,5 à 1 km	- Variations saisonnières (si données disponibles) - Instantané sous hypothèse de régime permanent
Invertébrés souterrains	Nappe libre - Milieu carbonaté dont karst	Composition des communautés d'invertébrés interstitiels	- Exigences écologiques des espèces (stygobies) - Contexte biogéographique	Ponctuelle (3 réplicats 1m sur moins de 100m)	<100 m	- Variations saisonnières - Peu sensible aux fluctuations journalières
Macrophytes	Nappe libre	Composition des communautés de macrophytes	- Exigences écologiques des espèces (trophie, perturbations, apports de matière) - Contexte biogéographique	Transect (2 m de large tous les 50 m)	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	Intégration annuelle sur un relevé estival
Chimie eau sup.	Nappe libre	Analyse multivariée des paramètres physico-chimiques des annexes fluviales	- valeurs pour la rivière/fleuve au minimum - valeurs pour la nappe	Ponctuelle	0,1 à 2 km (dépend de la densité d'échantillonnage)	- Saisonnier (nécessite plusieurs dates d'échantillonnage)
Modélisation distribuée à base physique	- Nappe libre - Aquifère multicouche	- Modèle hydrogéologique-IDPR - Code de calcul MARTHE - Equation de diffusivité - volumes finis	- Géométrie du milieu, optionnel : épaisseur d'alluvions - Paramètres hydrodynamiques : perméabilité (k), Transmissivité, coefficient d'échange nappes/rivières, paramètre de Manning (frottement en rivière) - Conditions limites : précipitations, ETP	Maille 100x100 m	Maille 100x100 m	- Régime transitoire Pas de temps pluriannuel, mensuel et journalier
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie	- Conditions initiales et données de calibration et validation : h rivière et nappe (cote), Q rivière (débit)	Maille 200x200 m	Maille 200x200 m	
		- Modèle couplé hydrologique / hydrogéologique - Code CaWaQS ou Eau-Dyssée - Equation de diffusivité - Différence finie		Maille 31,25x31,25 m	Maille 31,25x31,25 m	

Contexte hydrogéologique
Caractéristiques des outils

Bien choisir les outils (2/4)

Code couleur Typologie des échanges

	Nappe vers la rivière (latéral et /ou par le fond)
	Rivière vers la nappe (latéral et/ou par le fond)
	Absence d'échange observable (diagnostiqué, détecté)
	Colmatage (physique et/ou biologique)
	Sous-écoulement (méandre/digue)
	Quantification mélange
	Recyclage

Configurations d'échange

Outils	Configurations d'échanges											
	Nappe → rivière		Rivière → nappe		Absence d'échange	Colmatage		Indicateurs du cheminement de l'eau				Cas particuliers
	Latéral	Fond	Latéral	Fond		Phys.	Bio.	Sous-écoulement		Recycl.	Mélange	Nappe déconnectée ou surélevée
							Méandre	Digue				
Analyse géomatique	O	N	O	N	O	N	N	N	N	N	N	N
Invertébrés souterrains	O ^a		O ^a		N	O	O	O	O	O	N	O ^f
Macrophytes	O ^a		N	N	O	O ^b	N	O	O	N	N	?
Chimie eau sup.	O ^a		N	N	N	N	N	O	O	N	N	N
Géochimie	O ^a		O ^a		O	O	N	O	O	N	O	O
Modélisation distribuée à base physique	O ^a		O ^a		O	N	N	O ^c	N	N	N	O
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	O	O	O	O	O	N	N	O	N	N	N	O
Dispositif MOLONARI	O	O	O	O	O	O	N	N	O	O ^d	O ^e	O
IRT	O	O	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

Bien choisir les outils (3/4)

Outils	Types	Echanges			Représentation	Zone hyporhéique
		Sens	Quantification	Rive		
Analyse géomatique	- Latéraux, à travers les berges à l'échelle de tronçon - Interface nappe/cours d'eau (section plan)	O	O m ³ /jour	O	Linéaire de berge	N
Invertébrés souterrains	- Par le fond ou par les berges - Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	O	N	O	Ponctuelle	O
Macrophytes	- Intégré à l'échelle des masses d'eau (cours d'eau, nappe alluviale, aquifère adjacent) - Toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	N Uniquement nappe vers rivière	O Semi-quantitatif (4 classes)	O Si on l'intègre dans le suivie en séparant chaque rive N Si on fait le relevé standard sans a priori	- Relevés ponctuels (à l'échelle de la zone humide) - Interpolation surfacique	N
Modélisation distribuée à base physique	Surface mouillée (fond et berges)	O	O	N	Surfacique	N
Chimie eau sup.	Intégré à l'échelle des masses d'eau	N Uniquement nappe vers rivière	N	O Difficile (demande un échantillonnage complexe dans le temps et l'espace)	- Relevés ponctuels (à l'échelle de la zone humide) - Interpolation surfacique	N
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	Distingue échanges par le fond et par les berges	O	O	O	Ponctuelle	O
Dispositif MOLONARI	Surface mouillée (fond et berges)	O	O Si couplé avec modèle	N	Ponctuelle	O
IRT	- Par le fond ou par les berges - Localement, toute la surface d'échange entre la nappe et le cours d'eau	N Uniquement nappe vers rivière	N	O	- Continu (Raster)	O

Types d'échanges pris en compte

Bien choisir les outils (4/4)

Points forts et points faibles

Métriques	Points forts	Points faibles
Analyse géomatique	Rapide, simple, peu de données, extension spatiale, agrégation spatiale	Milieux alluviaux libres uniquement, existence et précision des données de départ
Invertébrés souterrains	Echantillonnage rapide, peu coûteux, sites complexes, origine de l'eau (discrimination de différents aquifères)	Pas de quantification, échelle locale, variabilité biogéographique (limite dernière glaciation), compétence en systématique, traitement en laboratoire long
Macrophytes	Rapide, peu coûteux, intégration des échanges sur une période annuelle	Présence de végétation, semi-quantitatif, homogénéité de la qualité des eaux
Chimie eau sup.	Peu coûteux	Nécessité d'échantillonner plusieurs fois, données pas toujours fiable (pics liés à productivité primaire, sondes mal calibré, échantillons mal conservés)
Modélisation distribuée à base physique	Quantification, Multicouche, spatialisation à différentes échelles, Concepts physiques, différents pas de temps et résolution spatiale	Temps de calcul, pas de discrimination des berges, Propriétés du lit mal connues, niveau de nappe symétrique sur chaque rive, gourmand en données, calibration et validation
Modélisation distribuée à base physique et hydro-thermique	Prise en compte de la thermie, interprétation de mesures de température ; distinction berge fond ; Quantification à haute résolution temporelle et spatiale ; élément clef qui permet le changement d'échelle ; prise en compte de la géométrie du fond de la rivière (hyporhéique + nappe)	Ponctuel, difficile à mettre en œuvre pour un tronçon, gros efforts d'acquisition de données, méthode lourde
Dispositif MOLONARI	Mesure directe du sens d'échange à haute fréquence et sur le temps long. Permet d'utiliser directement la métrique modèle thermo-hydro couplé	Ponctuel, coûteux, nécessite un grand effort d'instrumentation, ainsi qu'une bonne connaissance de l'hydrogéologie et de la pédologie-géologie pour le suivi de l'installation.
IRT	Acquisition rapide Extension spatiale	Apports de nappes uniquement Incertitudes liées à la calibration de la caméra

Etablir un diagnostic synthétique (1/4)

Principales étapes proposées

- Synthèse des résultats obtenus avec chacun des outils ;
- Sectorisation spatiale des résultats à l'échelle du PK ou du $\frac{1}{2}$ PK pour chaque outil, pour chaque tronçon de rivière étudié à l'aide de la typologie des échanges nappe/rivière ;
- Superposition spatiale des diagnostics par outil sur les tronçons étudiés ;
- Détermination des incertitudes liées au sens de l'échange diagnostiqué et à sa quantification pour chaque tronçon de rivière ;
- Diagnostic synthétique multi-métrique des échanges par tronçon de rivière ;
- Représentation cartographique du diagnostic synthétique.

Etablir un diagnostic synthétique (2/4)

Tableau de comparaison des métriques

→ **Partie gauche** - diagnostic des échanges par outils sectorisé à l'échelle du PK (intitulé, date, état hydrologique de la nappe et du cours d'eau)

Code couleur : typologie des configurations d'échange nappe/rivière

Convention : les flux de la rivière vers la nappe sont indiqués avec des valeurs négatives et ceux de la nappe vers la rivière avec des valeurs positives

→ **Partie droite** : incertitude pesant sur le diagnostic pour chaque outil et chaque secteur homogène en termes d'échange

Notation trinaire : bonne évaluation, incertitudes, douteux

→ **Partie centrale** : diagnostic synthétique croisé.

Dans le cadre des projets Nappe-Rhône et NAPROM ce diagnostic a été réalisé à « dire d'experts », c'est-à-dire après discussion

Etablir un diagnostic synthétique (3/4)

Exemple d'incertitudes

Outils	Qualité du diagnostic		
	Bonne évaluation	Incertitudes	Douteux
Analyse géomatique	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreuses mesures de niveaux de nappes - Carte piézométrique interpolée à l'aide d'outils géostatistiques - Mesures de la ligne d'eau de la rivière synchrone de la piézométrie - Profil bathymétrique 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de mesures de niveaux de nappe - Carte piézométrique interpolée manuellement 	<ul style="list-style-type: none"> - Trop de peu de mesures de niveaux de nappe - Piézométrie non datée et non nivelée
Invertébrés souterrains	<ul style="list-style-type: none"> - Faune diversifiée - Absence de colmatage 	<ul style="list-style-type: none"> - Faune peu diversifiée - Espèces ubiquistes - Présence de genres à écologie mal connue 	<ul style="list-style-type: none"> - Absence régionale de faune stygobie - Instabilité hydrologique récente (après une crue)
Macrophytes	<ul style="list-style-type: none"> - Forte densité de site (1 tous les 500m) 	<ul style="list-style-type: none"> - Proportion importante d'espèces ubiquistes 	<ul style="list-style-type: none"> - Hyper-eutrophisation - Recouvrement végétal très faible - Instabilité hydrologique récente (après une crue)
Chimie eau sup.	<ul style="list-style-type: none"> - Fort contraste entre nappe et surface - Mesure de qualité de nappe en parallèle 	<ul style="list-style-type: none"> - Contexte anthropique (agriculture) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesures ponctuelles - Contexte anthropique (forte pollution)
Modélisation distribuée à base physique	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau fortement dense d'observations pour la calibration et l'évaluation (piézomètres, hauteurs d'eau en rivière, débits) - Bonne connaissance des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère : porosité, perméabilité, transmissivité - Bonne connaissance des paramètres géomorphologiques de la rivière : largeur, altitude du fond de la rivière et/ou du niveau d'eau en rivière - Connaissance précises de la topographie du domaine simulé - Connaissances des conditions aux limites (débits d'entrée/sortie) et initiales - Connaissance des aménagements anthropiques (barrages, seuils, irrigations, canaux, etc.) - Hypothèses de modélisation adaptées à l'échelle spatio-temporelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau moyennement dense d'observations - Connaissance imparfaite du domaine simulé (paramètres hydrodynamiques, géomorphologiques, topographiques), des conditions aux limites et initiales. - Aménagement humain difficilement représentable (canal, seuil, irrigation, etc.) - Absence d'un processus hydrologique susceptible de modifier les échanges nappe/rievière (inondations, remontées de nappe...) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau faiblement dense d'observations - Fort biais par rapport aux observations - Méconnaissance totale du domaine simulé (paramètres, hydrodynamiques, géomorphologiques, topographiques, etc.) - Hypothèse de modélisation mal adaptée au domaine et aux objectifs (maillage trop grossier, pas de temps trop faible, etc.) - Choix d'un type de modèle pas adapté au problème (ex. : modèle 3D à base totalement physique lourd en temps de calcul et en calibration pour un problème régional de plus d'un millier de km²)

Etablir un diagnostic synthétique (4/4)

Exemple de tableau de croisement des métriques

Beauchastel - Retenue et Canal de dérivation - Rive droite							
PK	Hydraulique			Isotopes	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie
	10/1985	09/2003	06/2007				
	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)	Q (m ³ /j)				
	BE	BE	ME				
			07/2012	P_apport 06/2012	Interstitielle 07/2012		
			ME	ME	ME		
115		2 564	1 595				
115,5					Faible		
116							
116,5							
117							
117,5			-150		Nul		
118							
118,5					Faible		
119							
119,5				Sous-écoulement du Rhône [1]	Nul		
0,5		1 377	1 115				
1					Nul		
1,5							
2				Arrivées de versant faibles	Faible à moyen		
2,5							
3							
3,5					Faible		
4					Moyenne		
4,5					Faible		
5		1 231	-59		Nul		
5,5			28				
6		-12	0				

Pénalité (Sens de l'échange)			
Hydraulique	Invertébrés	Macrophytes	Physico-chimie interstitielle
		0	
0			
	-1		
	0	0	
	-2		
-2	0		-5

[1] Sous-écoulement du Rhône à travers les digues vers le contre-canal

Hydraulique [-2 : peu de mesures piézométriques]

Invertébrés [-1 : espèces ubiquistes et peu d'espèces]
[-2 : présence du genre *Salentinella*]

Physico-chimie [-5 : mesures ponctuelles /une seule campagne]

Conclusion provisoire

Quelques conseils pour trancher... en attendant mieux

- ne garder que les diagnostics de meilleur qualité et éliminer ceux qui sont trop incertains ;
- en cas de doute, il est possible de trancher à l'aide du diagnostic de meilleure qualité. Il est aussi possible de compléter le diagnostic à l'aide d'un nouvel outil ;
- un diagnostic devient très pertinent s'il est construit sur la base du diagnostic convergent de plusieurs outils ;
- en cas de fortes divergences de diagnostic ou de fortes incertitudes, il faudra sans doute réaliser des études complémentaires à l'aide de nouveaux outils

Merci pour votre attention

Pour un premier aperçu de la méthodologie :

http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VF.pdf



ZABR
Zone Atelier Bassin du Rhône

IS.Rivers GRAIE OTHU Portail GRAIE

- Présentation
- Actualités
- Organisation
- Recherches ZABR
- Gestion des données
- Publications
- Ouvrages
- Partenaires
- Espace réservé
- I.S.Rivers 2015
- Contact

Guides méthodologiques

> Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire

Nous avons le plaisir de vous annoncer la sortie du guide méthodologique **pour caractériser les échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire**.

Ce guide permet de répondre à la question suivante : **quels sont les outils les plus adaptés sur les milieux alluviaux pour caractériser les échanges nappes rivières ?**

Il s'adresse **aux acteurs de l'eau**, en particulier aux gestionnaires, qui ont besoin d'appréhender les échanges nappes/rivières pour leurs objectifs d'amélioration de la gestion des milieux aquatiques que ce soit d'un point de vue quantitatif ou qualitatif. Il s'adresse également à leurs partenaires institutionnels et techniques. La méthodologie développée intéressera également les scientifiques travaillant sur ce type de milieu.

Sa réalisation est le fruit d'un important travail de collaboration engagé depuis 2006 entre la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse.

Ce guide est disponible sur le site internet de l'Agence de l'eau RMC et sur le site de la ZABR.

Bonne découverte !

Laurent Roy, Directeur général de l'Agence de l'eau RMC
Pierre Marmonier et Bernard Montuelle, Présidents de la ZABR

Téléchargez le guide (17 Mo) 

Pour toute demande d'exemplaire papier : nathalie.COTECOLISSON@eaurmc.fr
Compléments d'information sur le contenu technique du guide : info@zabr.org



SAUVONS L'EAU

La suite du programme

Cet après-midi à partir de 14h00 RDV à l'auditorium

	A1 : Ateliers en salle Auditorium / Salles annexes	B : Ateliers de terrain Parc Floral : Sources du Loiret	
14h00	Atelier 1 : Analyse géomatique <i>Frédéric Paran (EMSE, UMR 5600 EVS)</i>	Départ vers le site du Parc Floral (30 min)	14h00
14h45	Atelier 2 : Modélisation hydrodynamique <i>Olivier Douez (BRGM)</i>	Atelier 4 : Invertébrés souterrains Présentation du contexte hydrogéologique <i>Damien Salquèbre (BRGM)</i> Démonstration <i>Pierre Marmonier (UMR 5023 LENA)</i> <i>Christophe Piscart (UMR 6553 ECOBIO)</i>	14h30 15h00
15h30	A2 : Atelier de terrain Site derrière l'auditorium Atelier 3 : Hydro, géochimie et GPS (30 min) Présentation du contexte hydrogéologique <i>Damien Salquèbre (BRGM)</i> Démonstration <i>Didier Graillet et Jordan Ré-Bahuaud (UMR 5600 EVS)</i>	Atelier 5 : MOLONARI <i>Nicolas Flipo et Agnès Rivière (EMP)</i>	16h00
16h15	Fin de la session A sur le site du BRGM	Fin de la session B au Parc Floral	

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

Atelier 1

Analyse géomatique

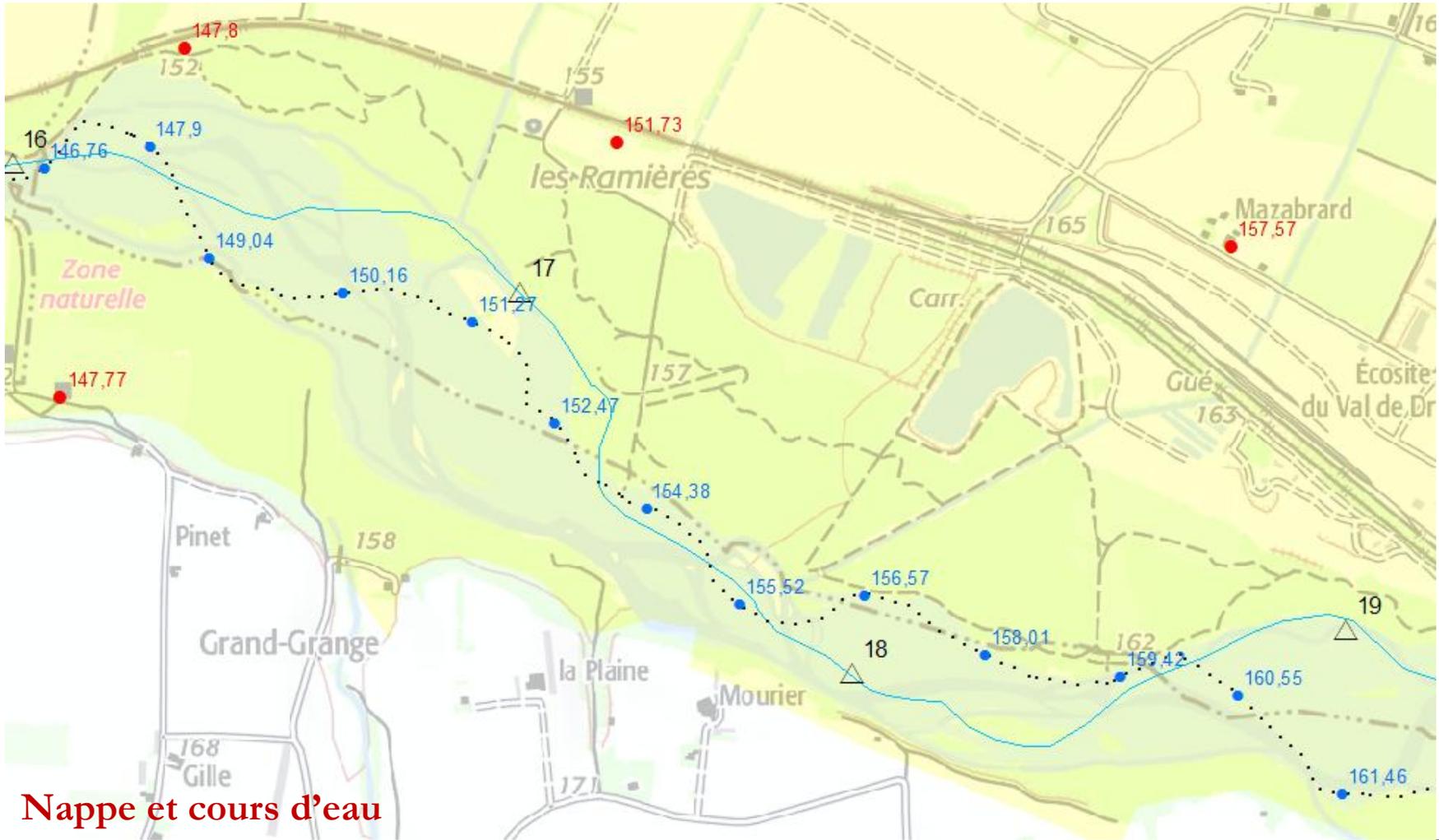
Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Echelle de temps	Niveau d'information nécessaire	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation			Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
					 .	 .	 .	 .	 .
Nappes alluviales libres connectées à la rivière	Ponctuelle	0,5 à 1km	Entité hydrogéologique	Instantanés (t) Saisonnier (Δt)	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen

L'essentiel du protocole

Rappel des principales étapes

- recherche des données existantes, prises de contact et sollicitation des détenteurs d'information
- repérage des puits et piézomètres et contact des propriétaires ou des gestionnaires
- mesures des niveaux de nappes et nivellement/géolocalisation des puits avec un GPS à précision centimétrique
- mesures des niveaux d'eau des cours d'eau (ligne d'eau avec un GPS à précision centimétrique)
- digitalisation ou construction des cartes piézométriques par interpolation et digitalisation des linéaires de berge
- calcul de l'angle d'écoulement du cours d'eau et calcul de l'angle d'écoulement de la nappe et du gradient hydraulique (TIN)
- calcul de l'angle d'échange entre la nappe et le cours d'eau
- calcul du débit d'eau échangé avec la loi de Darcy et de l'incertitude

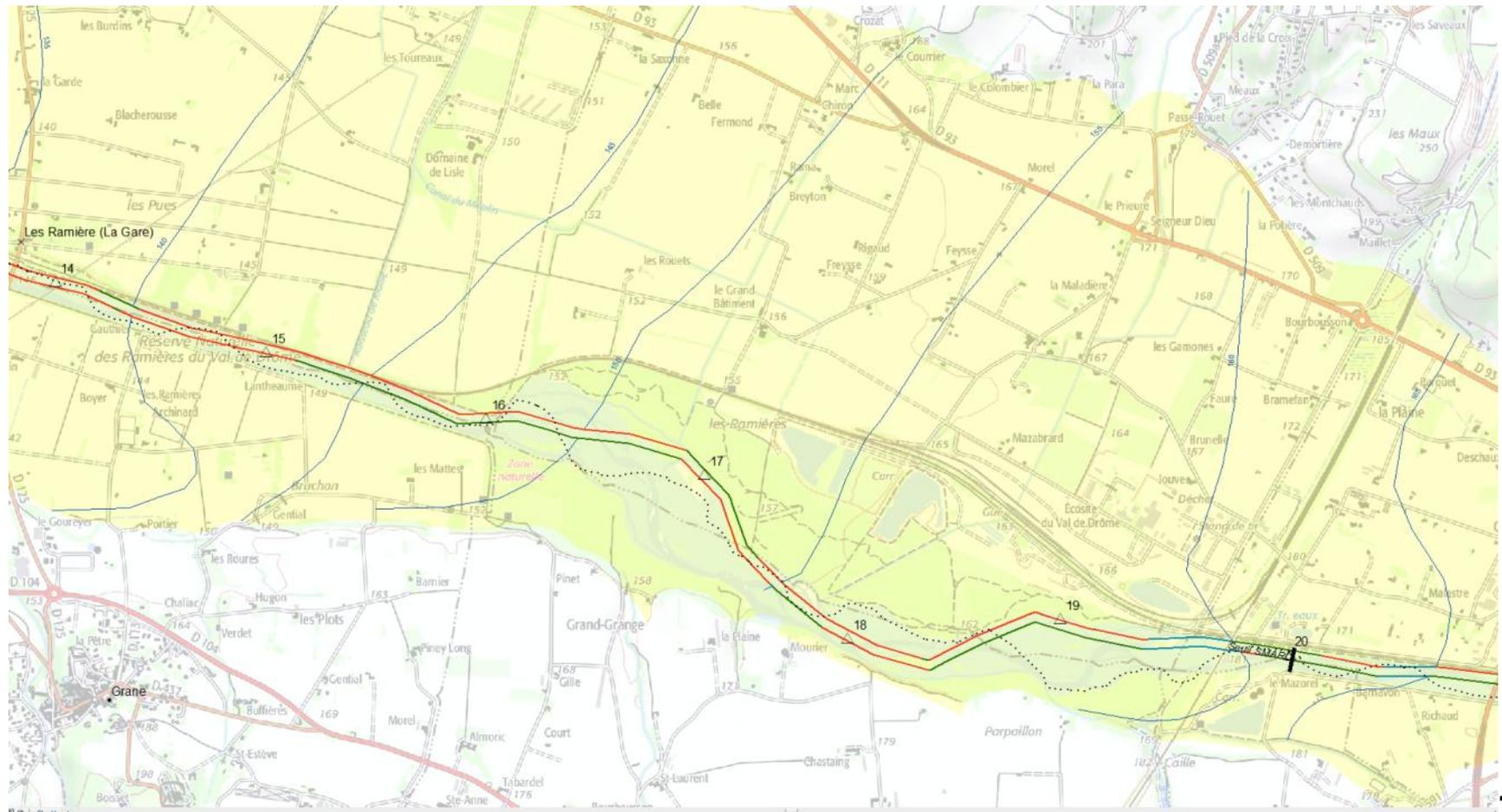
Données : niveaux d'eaux



Nappe et cours d'eau

Données: niveaux de nappe

Carte piézométrique



175

Préparation des données

Données essentielles et données optionnelles

- PK (points)
- Berges (polylignes et points)
- Perméabilités (raster)
- Cartes piézométriques (polylignes)
- Niveaux d'eau de nappe (points)
- Niveaux d'eau du cours d'eau (points)
- largeur du lit
- ...

Intersection des couches (1/2)

Intersect : une fonction essentielle

→ récupération des données d'autres couches sur les points ou les segments des couches berge (points ou polygones)

→ trois grandes fonctions :

- INTERSECT
- FEATURE TO POINT
- SPATIAL JOINT

→ exemples :

- récupération de la valeur des PK
- récupération valeurs de perméabilités
- ...



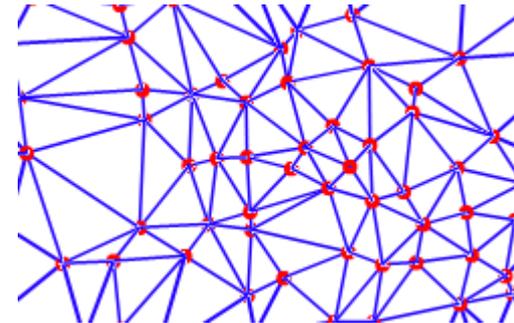
Propriétés des TIN

- **TIN** = réseau de triangles irréguliers
- **TIN** = modelé de surface / morphologie
- pour chaque nœud : altitude Z (elevation)

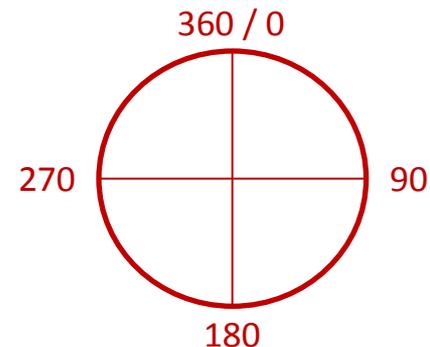
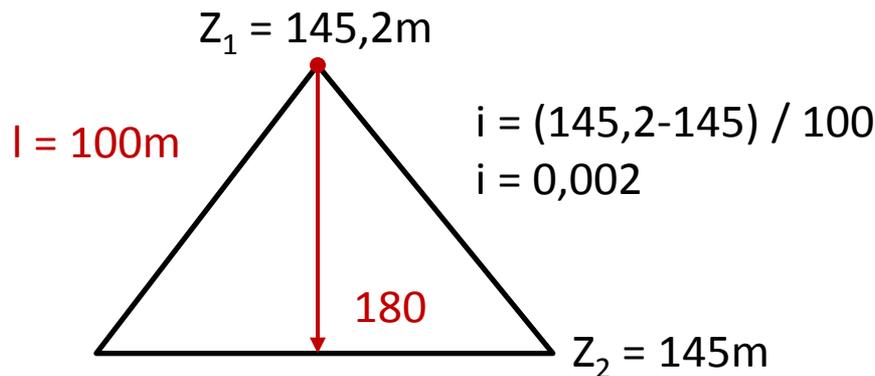
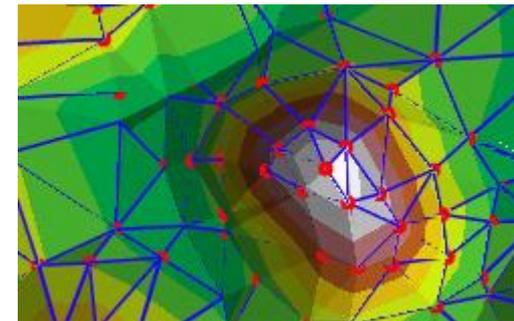


Transformation en triangles vectoriels

- pour triangle :
 - pente (slope) en % en d° [i]
 - angle (aspect) avec le Nord à 0°



<http://help.arcgis.com/>

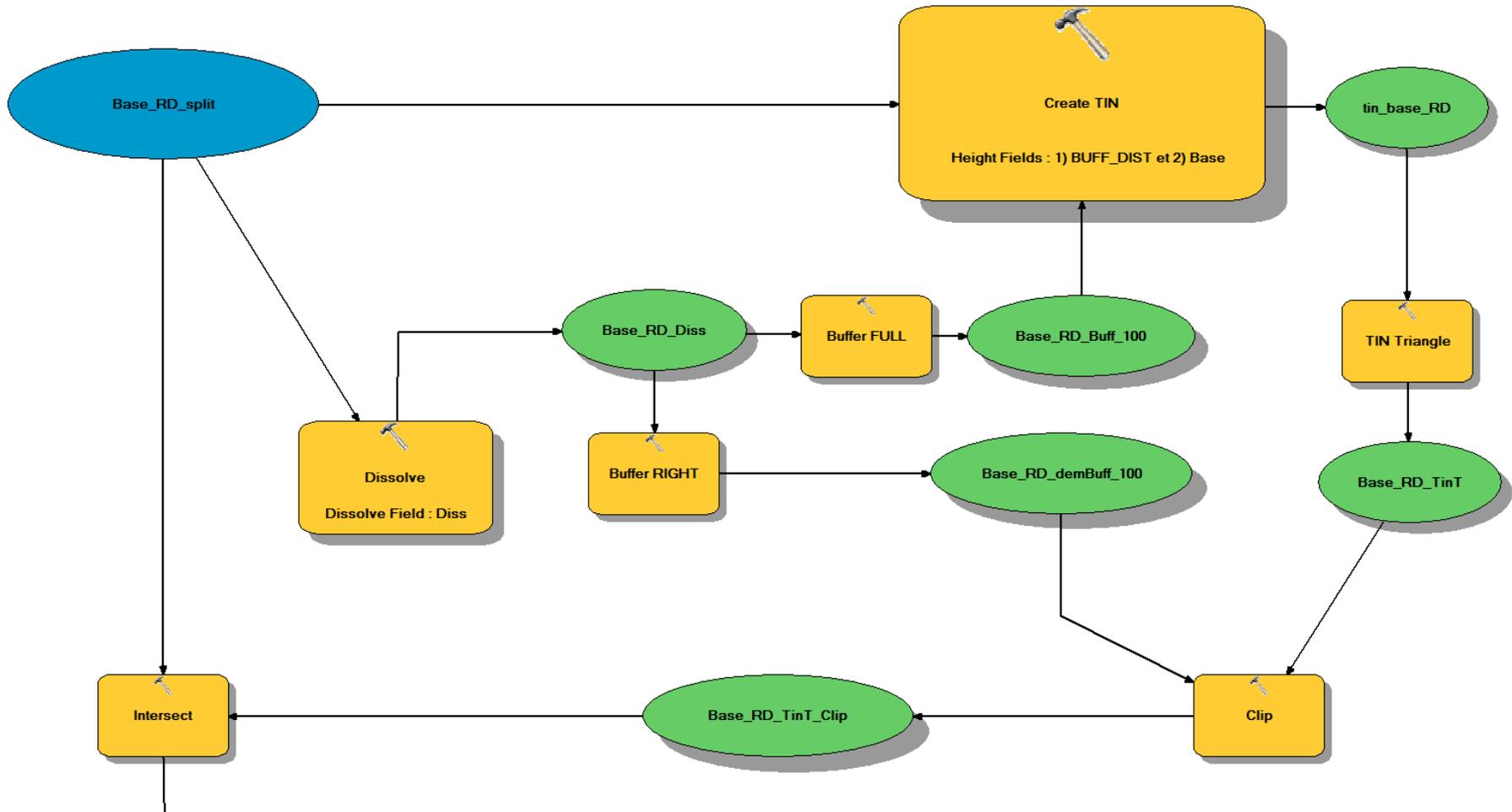


Modèles dynamique (ArcGIS)

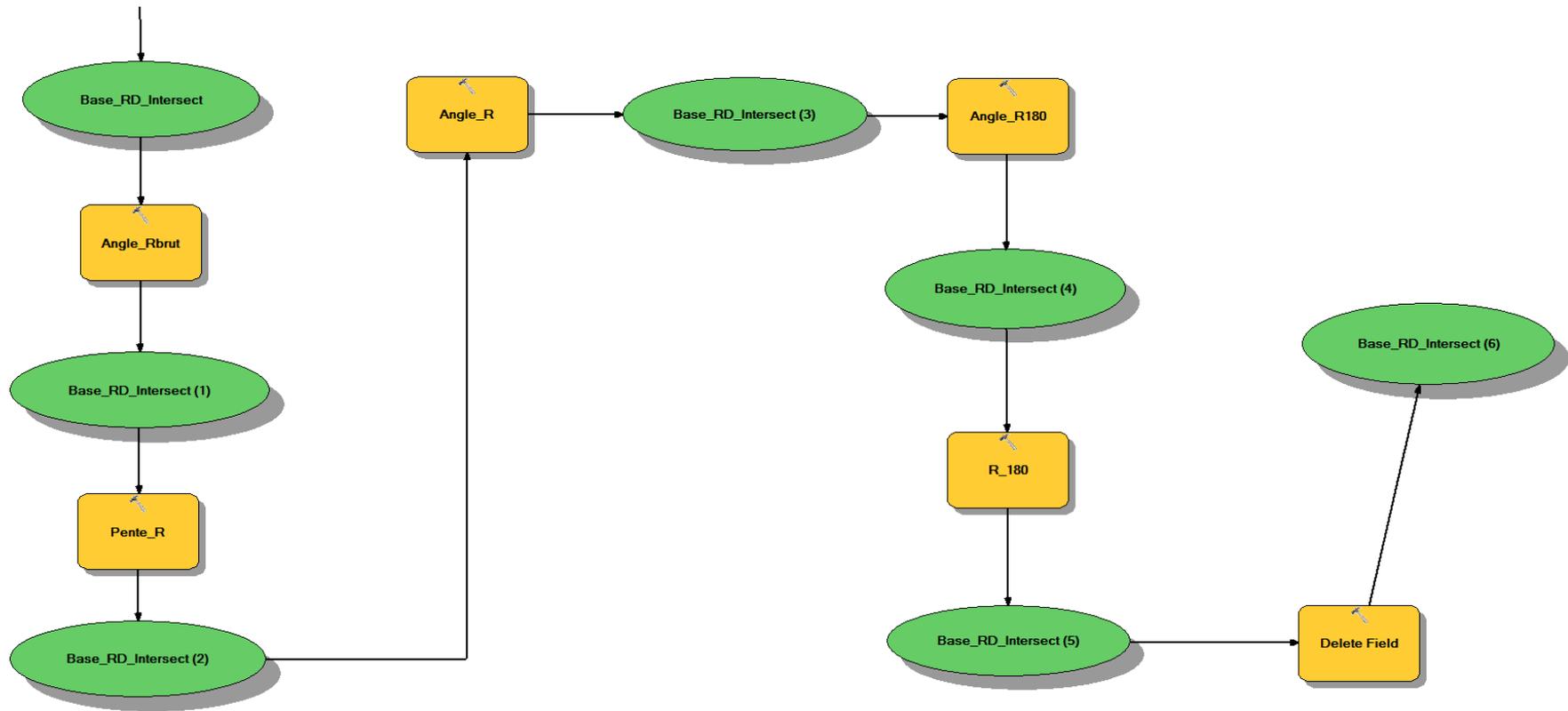
Des modèles pour se simplifier la tâche : ModelBuilder

- Enchaîner les fonctions d'analyses spatiales et les expressions VBA
- préparer des données et extraire des données existantes vers les segments de polygones de berges (ex : perméabilités des alluvions, niveaux de la rivière...)
- calculer l'angle d'écoulement de la rivière en rive droite et gauche
- générer le TIN de nappe
- calculer l'angle d'échange nappe/ rivière et créer les principaux champs nécessaires
- calculer les débits d'échange pour chaque segment de polygone de berge
- agréger des valeurs de débits d'échange de chaque segment à l'échelle voulue

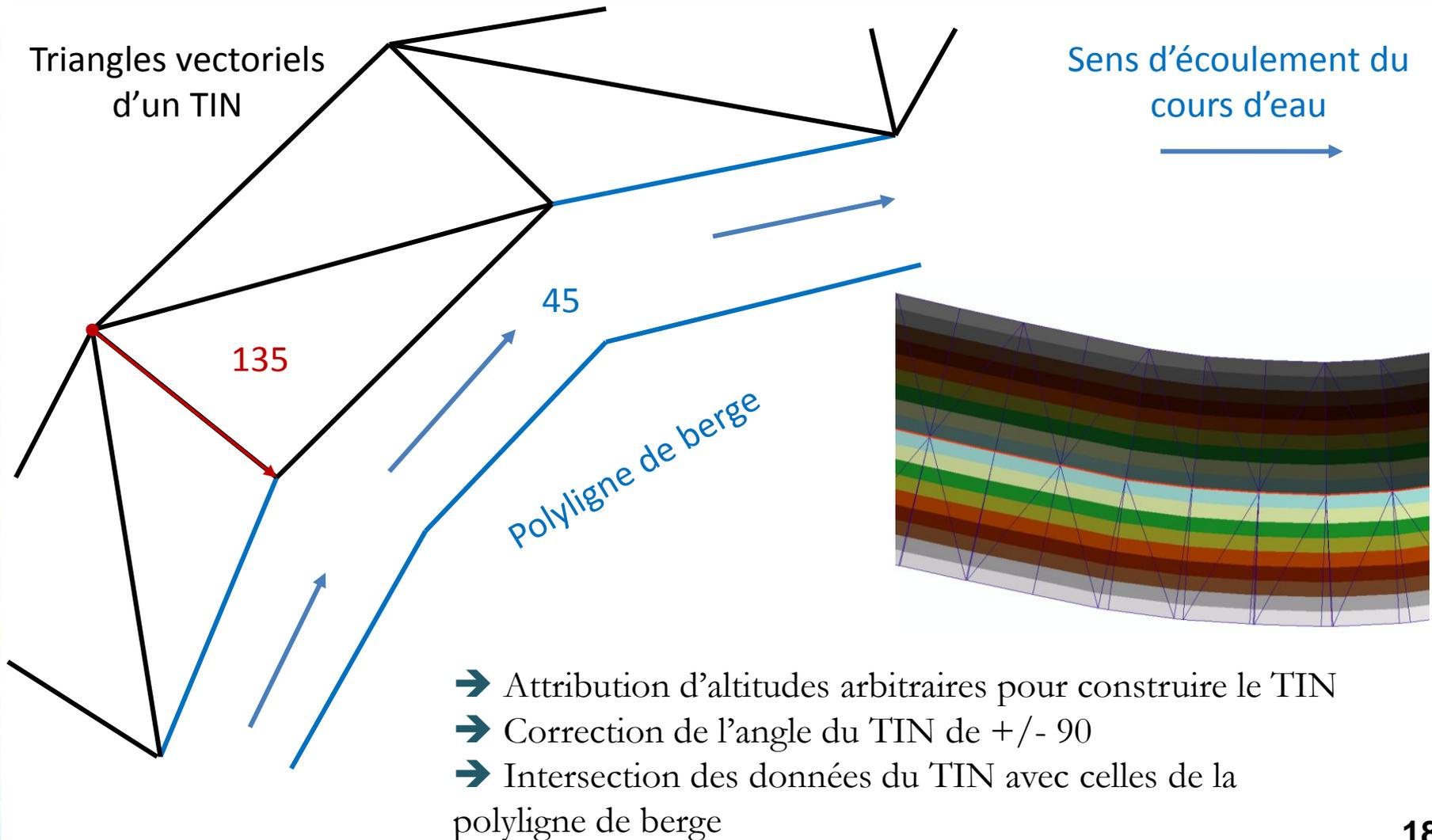
Angle d'écoulement (RD) (1/2)



Angle d'écoulement (RD) (2/2)



Correction de l'angle du TIN



Écoulement rivière théorique à 180°

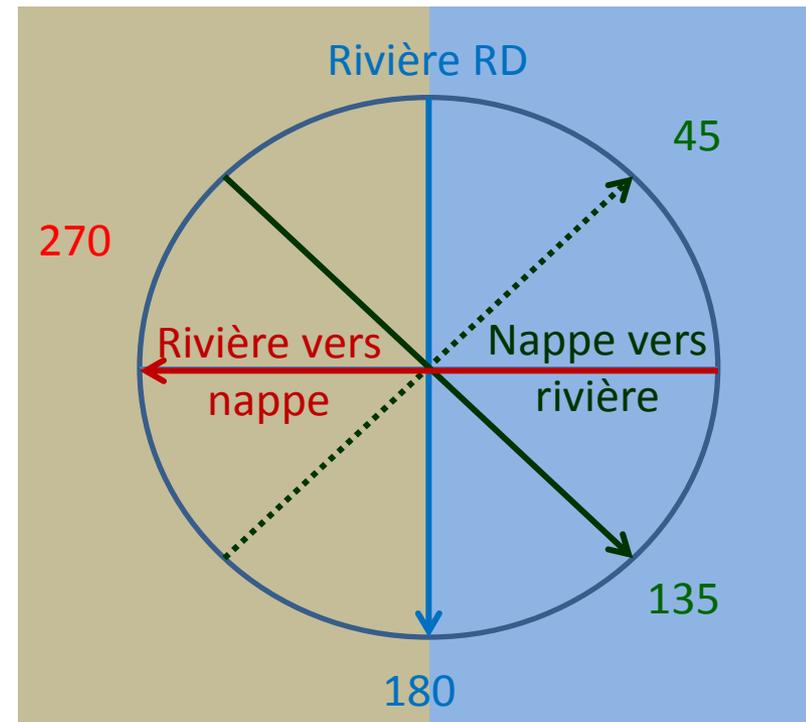
- ajustement de l'angle d'écoulement de la rivière à 180°
- correction de l'angle d'écoulement de la nappe en fonction de cet ajustement
- pour faciliter la prise de décision concernant le sens de l'échange :
 - réduit le nombre de cas possibles
 - facilite la programmation des fonctions conditionnelles

Dim angle

```
If [Angle_E] > 0 then  
angle = 1
```

```
elseif [Angle_E] >= -360 then  
angle = -1
```

```
else  
angle = 0  
end if
```

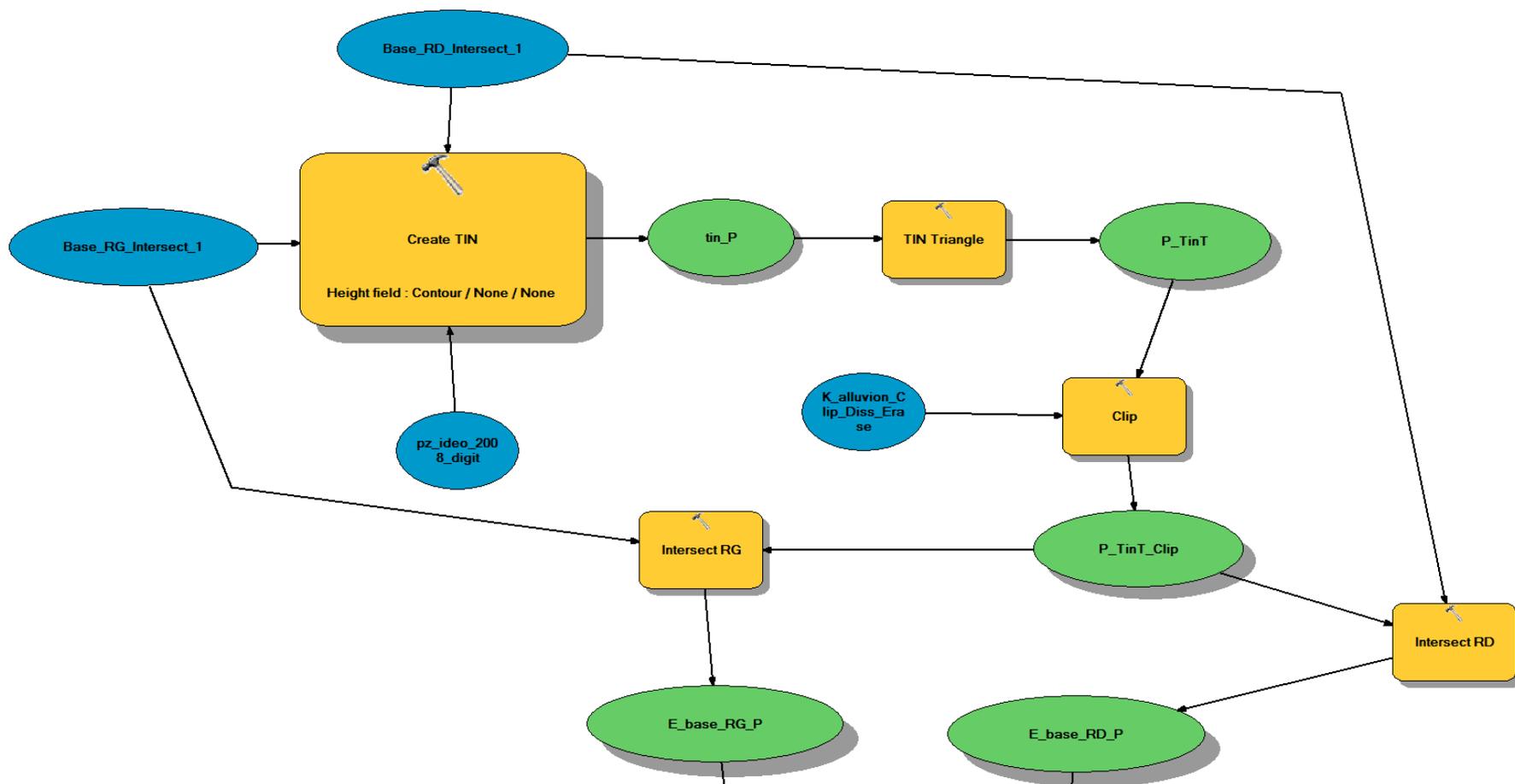


Intersection des couches (2/2)

- récupération des valeurs d'angle d'écoulement du cours d'eau
- récupération des valeurs d'angle d'écoulement de nappe
- récupération des valeurs de pente de la nappe (i)

Permet de faire des calcul sur les valeurs récupérées dans une même table attributaire

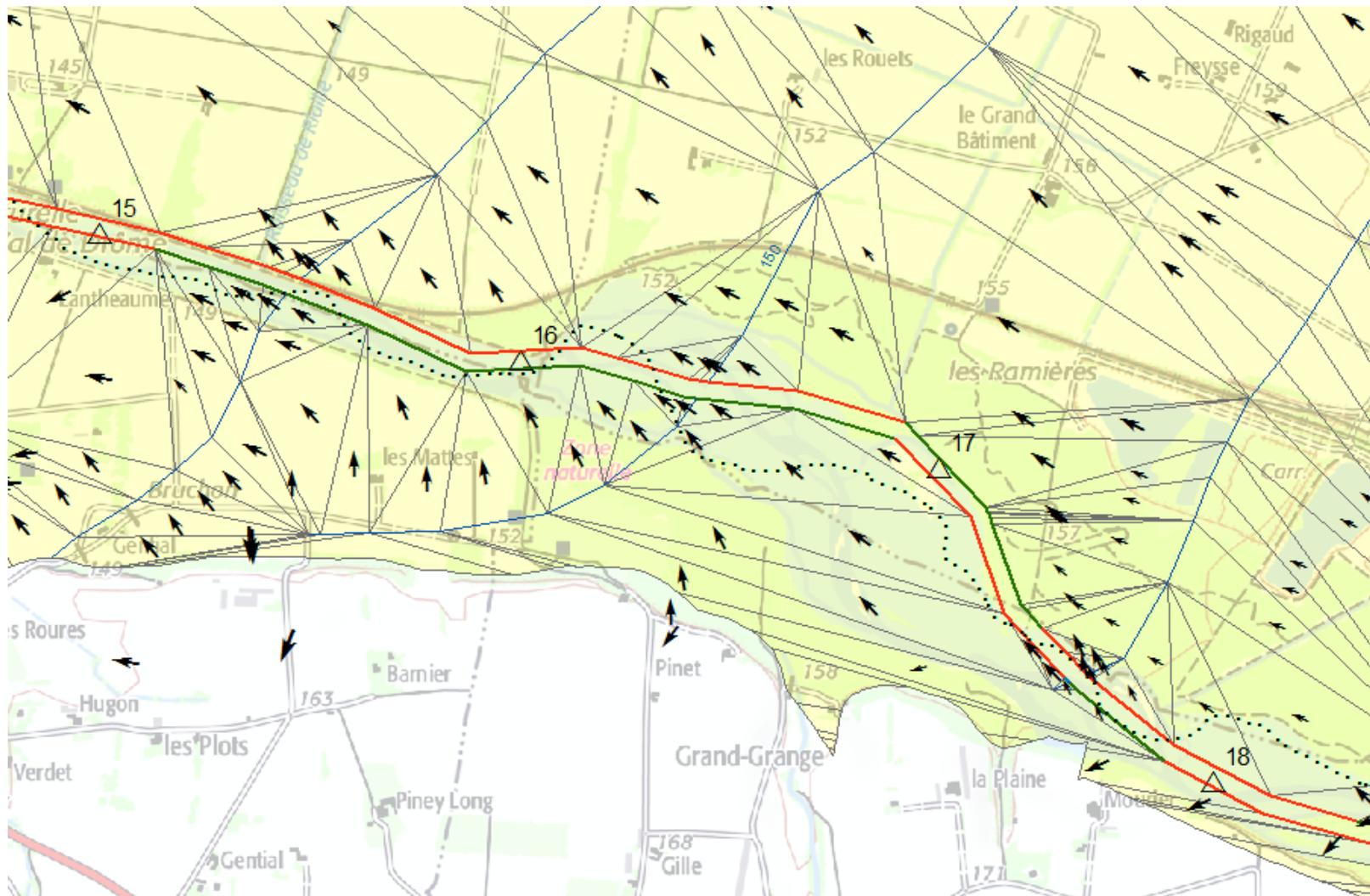
Angle nappe/rivière (1/2)



Angle nappe/rivière (2/2)

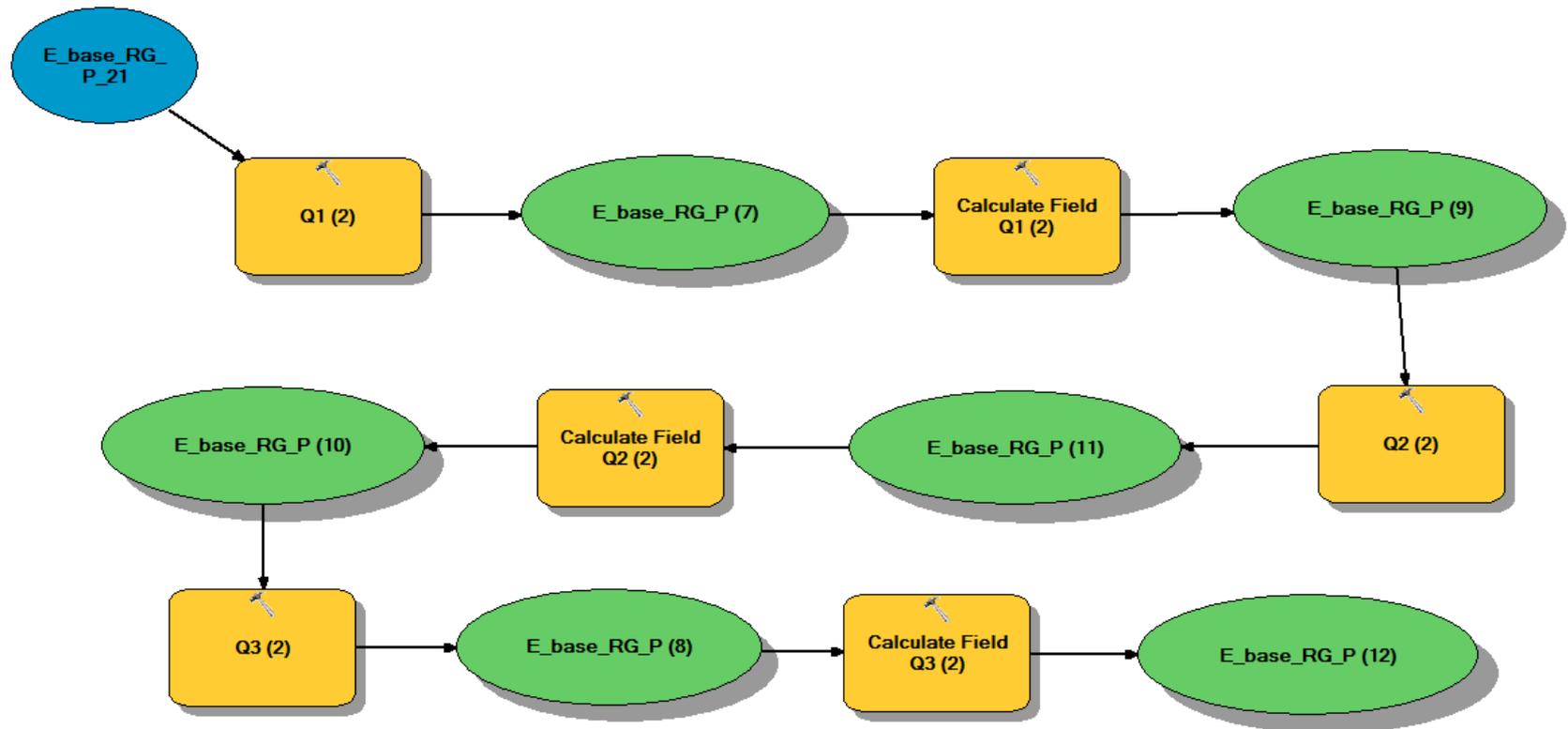


Sens de l'échange nappe/rivière

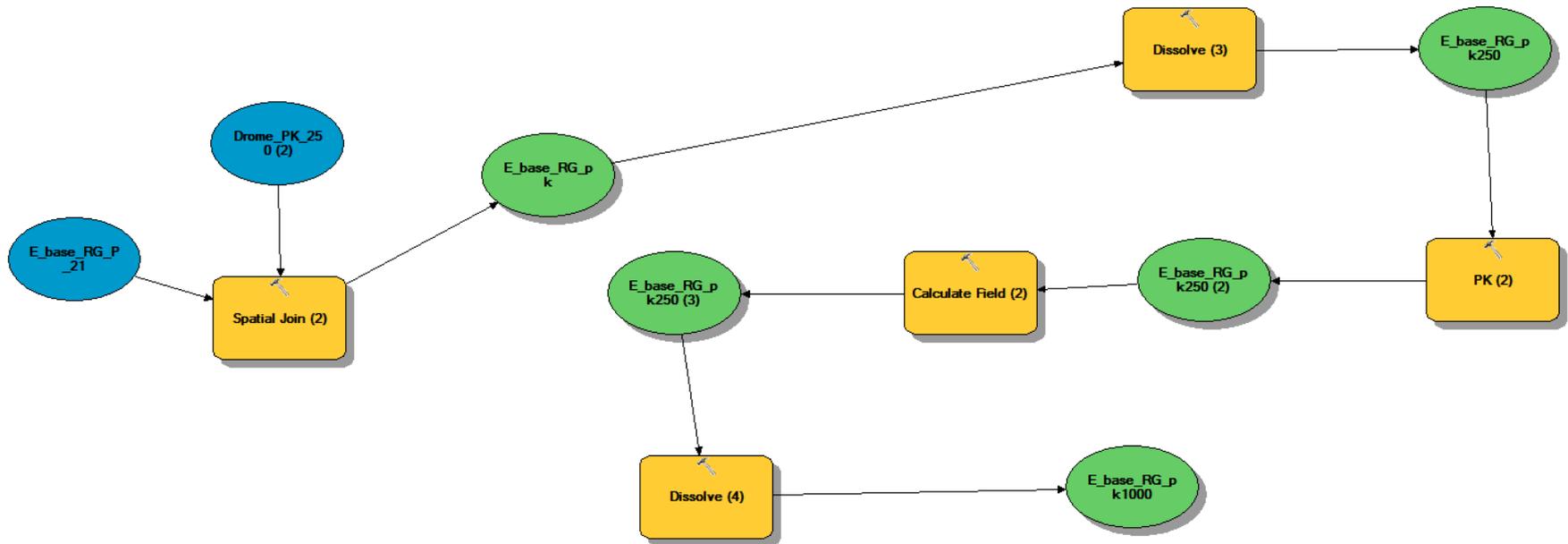


Calcul des débits

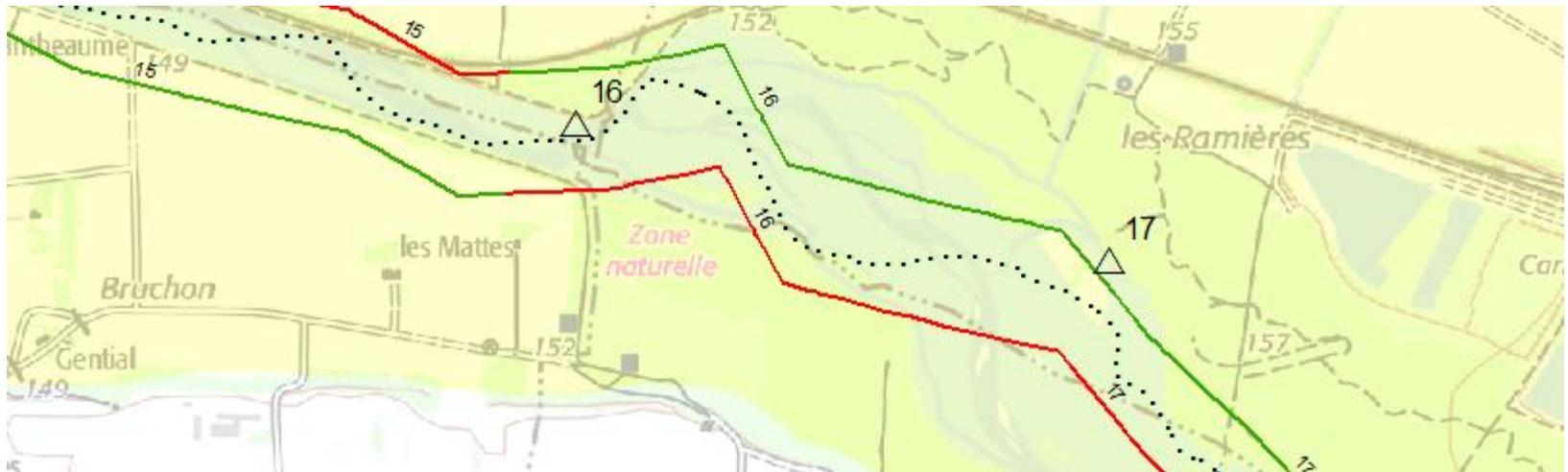
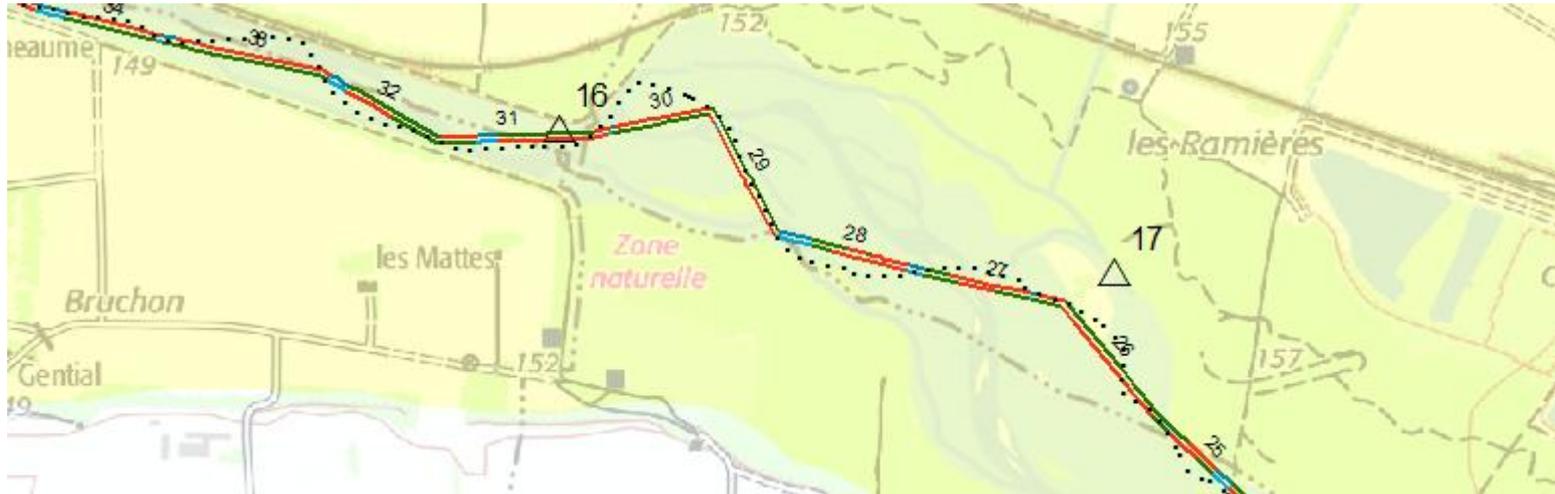
$$Q1 = [Kx] * [i_nappe] * [Sens] * [Shape_Length] * [Sinus] * 86400 * [A]$$



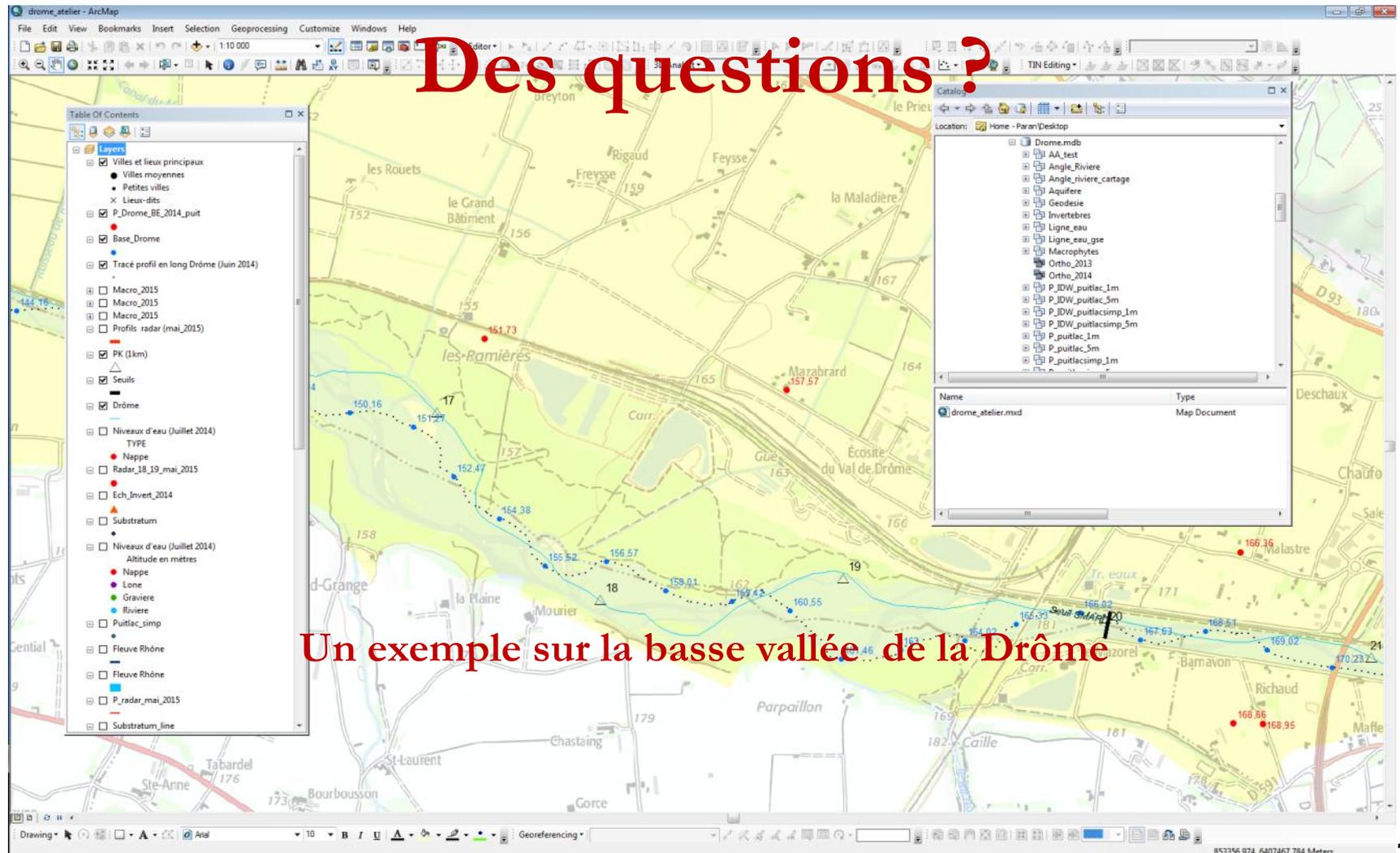
Agrégation au PK ou autres



Exemple d'agrégation



Un exemple sous ARCGIS 10



Des questions?

Un exemple sur la basse vallée de la Drôme

*Interactions nappes/rivières :
des outils pour comprendre et mesurer les échanges*

Atelier 2

Modélisation hydrodynamique

Olivier Douez

Marion Chatelier

BRGM Poitou-Charentes

Introduction

Le principe de la modélisation consiste à reproduire numériquement et avec les données disponibles une réalité complexe pour ensuite réaliser des simulations diverses (prévisions dans le temps...).

G. de Marsily: " *...J'aime à classer les modèles en trois catégories, selon une typologie très personnelle:*

- 1) *ceux qui s'attachent à reproduire les phénomènes observés, ou observables;*
- 2) *ceux qui s'attachent à étudier les phénomènes non observables;*
- 3) *et ceux qui ne servent à rien...*

Il n'y a ici aucun jugement de valeur,

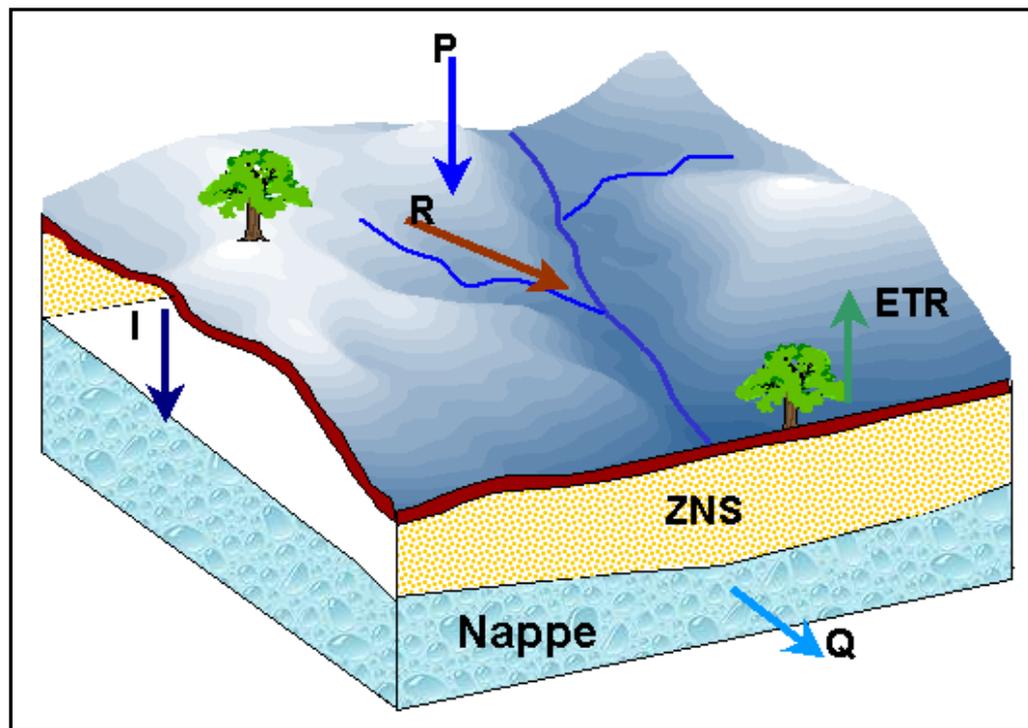
Exemples:

Cas 1: niveaux de nappes, débits de cours d'eau

Cas 2 : prévoir la migration d'éléments chimiques qui pourraient être relâchés par un stockage de déchets qui n'est pas encore construit

Cas 3 : ceux qui peuvent "*faire avancer la science de la modélisation, indépendamment de ses applicationsMais, en sciences de la Terre comme dans toutes les autres disciplines, la manie de la recherche fondamentale n'est-elle pas une nécessité ?*"

Les outils de modélisation



Termes du bilan hydrique (en mm) :

- les précipitations P
(plus, éventuellement, l'irrigation)
- l'évapotranspiration réelle ETR
- le ruissellement R
- l'infiltration en profondeur I
(recharge de la nappe)

**Modèle maillé
ou modèle global
ou modèle "boîte noire"**

**en fonction des objectifs
et des données disponibles**

Les outils de modélisation

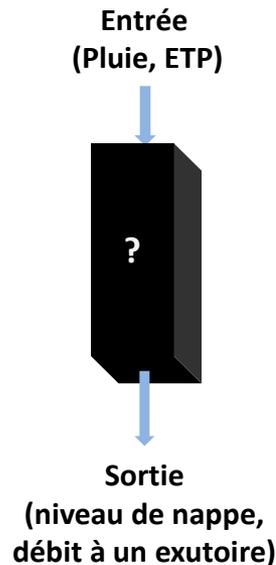
Modèles globaux

(Modèles "pluies-débits" ou "pluies-niveaux »)

« Boîte noire »

Une "sortie" du système est reliée à une ou plusieurs entrées par des fonctions de transferts (ou réponses impulsionnelles).

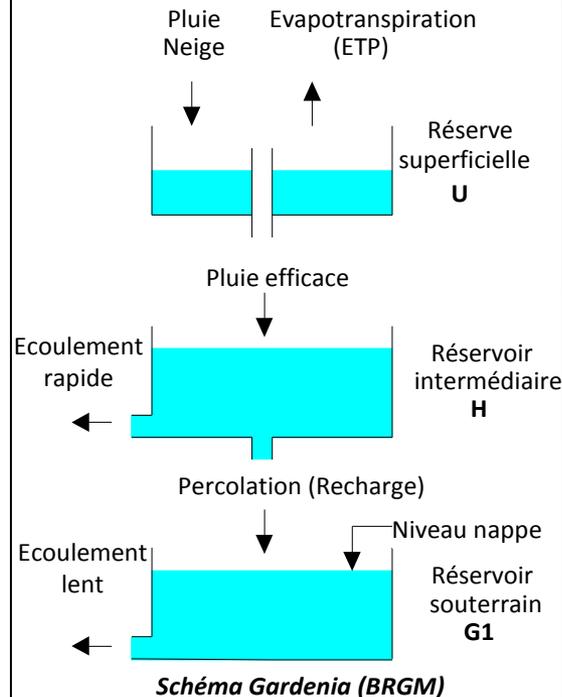
Pas de lois « physiques ».



* Autres modèles de type boîte noire :
Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Type Conceptuel

Pas (ou peu) de découpage de l'espace en plan horizontal tout en ayant un sens physique (des réservoirs et, pour certains, des lois de remplissage et de vidange). Ils ne prennent cependant pas en compte les équations physiques réelles.



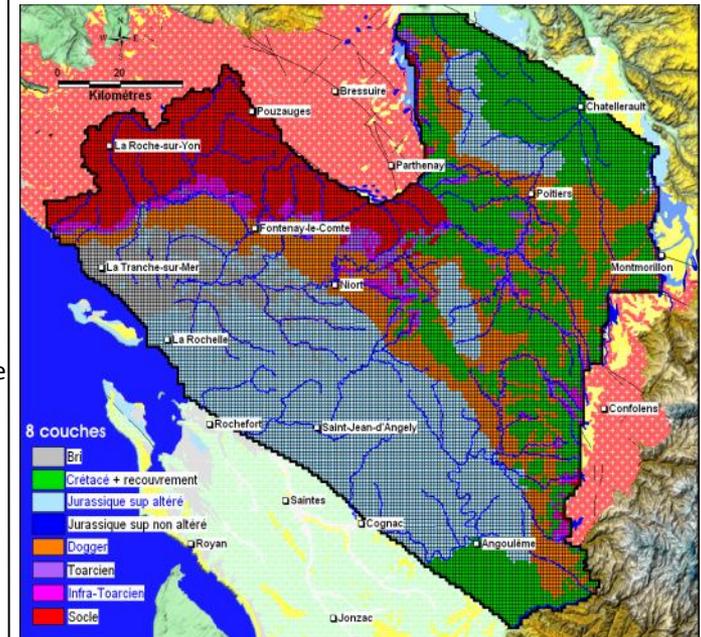
Modèles basés physiquement (mécanistes)

Modèles spatialisés

Résolution de l'équation générale des écoulements souterrains.

Tentent de représenter le système physique dans sa réalité.

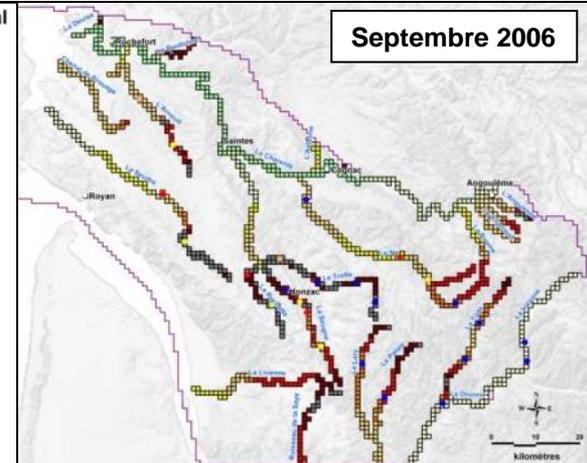
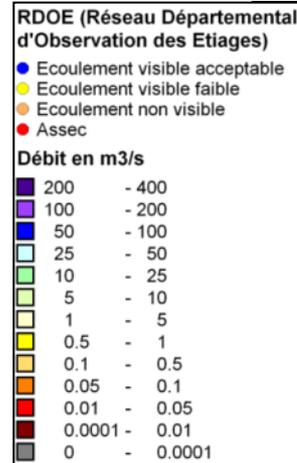
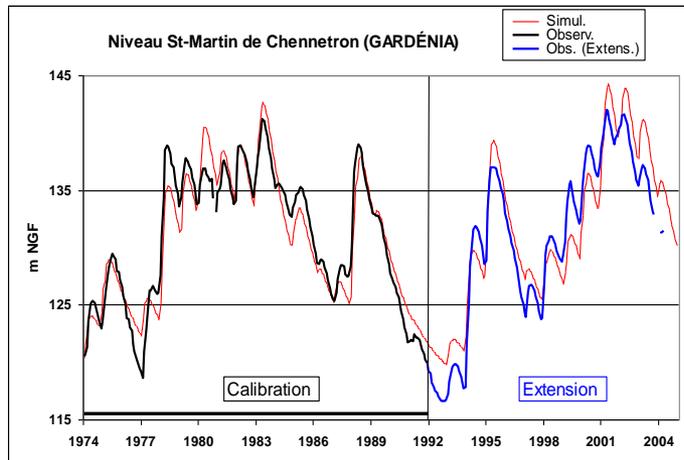
→ modèles spatialisés ou modèles maillés avec prise en compte des échanges nappes/rivières



Le modèle Jurassique de Poitou-Charentes (BRGM)

Les outils de modélisation

	Modèles globaux		Modèles basés physiquement (mécanistes)
	« Boîte noire »	Conceptuel	Modèles spatialisés
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessitent peu de données : séries de données climatiques (pluies, ETP), de niveaux et/ou de débits. - Temps calculs très brefs \Rightarrow possibilité de simuler de très nombreux scénarios climatiques par exemple. 		<ul style="list-style-type: none"> - Les modèles spatialisés (maillés) offrent la plus grande gamme de possibilités - Permettent de prendre en compte la variabilité spatiale. - Permettent de prévoir les effets d'un changement des caractéristiques physiques du système modélisé.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Ne permettent pas de prendre en compte la variabilité spatiale (modèles globaux) ou faiblement (modèles semi-distribués) - Ne sont pas adaptés à la prévision des effets de changements naturels ou anthropiques des caractéristiques physiques des bassins versants 		<ul style="list-style-type: none"> - Nécessitent beaucoup de données. - Mise en œuvre longue (construction, calage) \Rightarrow coûteux - Temps calculs pouvant être longs \Rightarrow des simulations prévisionnelles limitées à quelques scénarios Modèles



Comparaison des débits des cours d'eau modélisés avec les données du RDOE **196**

Modèles spatialisés

- Le principe de la modélisation consiste à résoudre les équations aux dérivées partielles de l'écoulement souterrain, sur un domaine étudié, en recherchant une fonction définie en chaque point de l'espace (x,y z) et à chaque instant t (pour un régime transitoire).
- Pour l'écoulement d'une nappe, il s'agira de déterminer le niveau de la hauteur d'eau (variable inconnue) en tout point de la nappe en fonction du temps (H(x,y,z,t)) et à partir de paramètres hydrodynamiques connus (perméabilités, transmissivité, emmagasinement libre et/ou emmagasinement spécifique),
- Le principe des méthodes numériques spatialisées réside dans la **discrétisation** du domaine d'étude dans l'espace (mailles) et, dans le cas de régimes transitoires, dans le temps.

Pour résoudre ces équations, différentes méthodes numériques peuvent être utilisées :

1) Différences finies

Maillage régulier, à mailles carrées ou rectangulaires. Exemple : MODFLOW

2) Eléments finis

Maillage triangulaire – Exemple : FEFLOW - ou quadrilatères (tétraèdres en 3D)

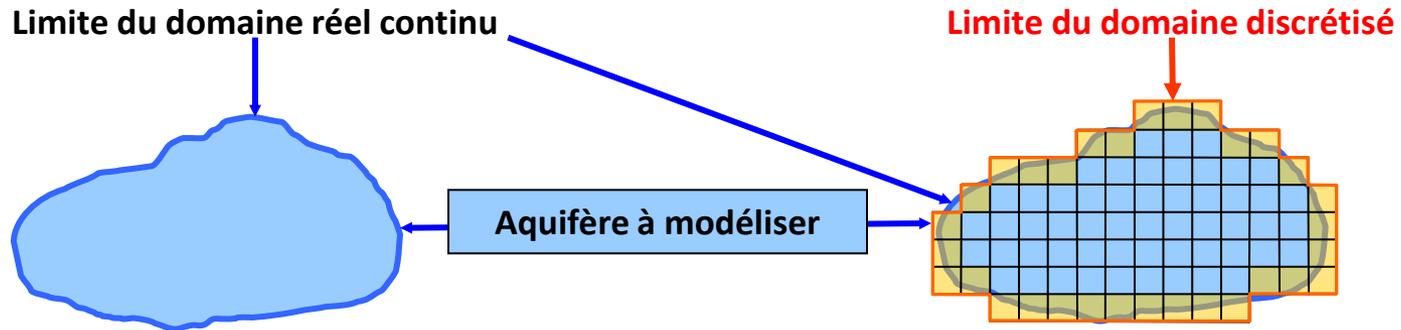
3) Volumes finis

Maillage triangulaire ou polygonal - Exemple : TOUGH2

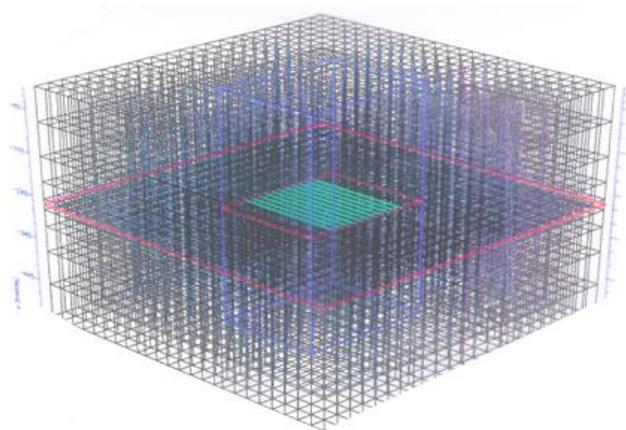
Dans le cas présenté ici utilisation de MARTHE : schéma à volumes finis mais dans les cas simples schéma en différences finies (ici le cas)

Modèles spatialisés

Le principe de la discrétisation spatiale : subdivision de l'espace en sous-domaines

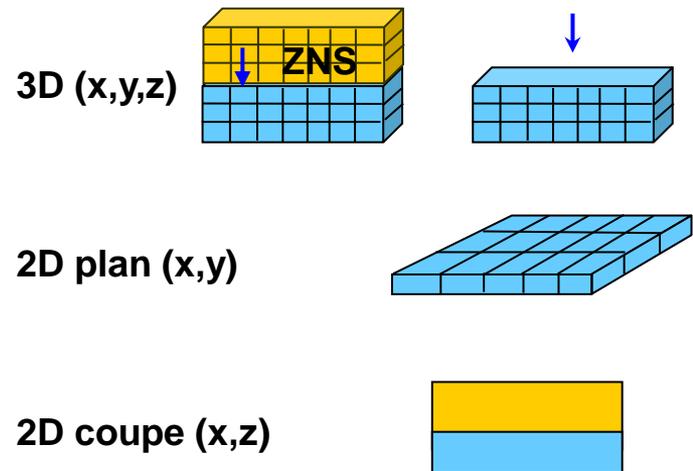


Exemple de maillage 3D : discrétisation dans le plan horizontal et dans le plan vertical



Dimensions

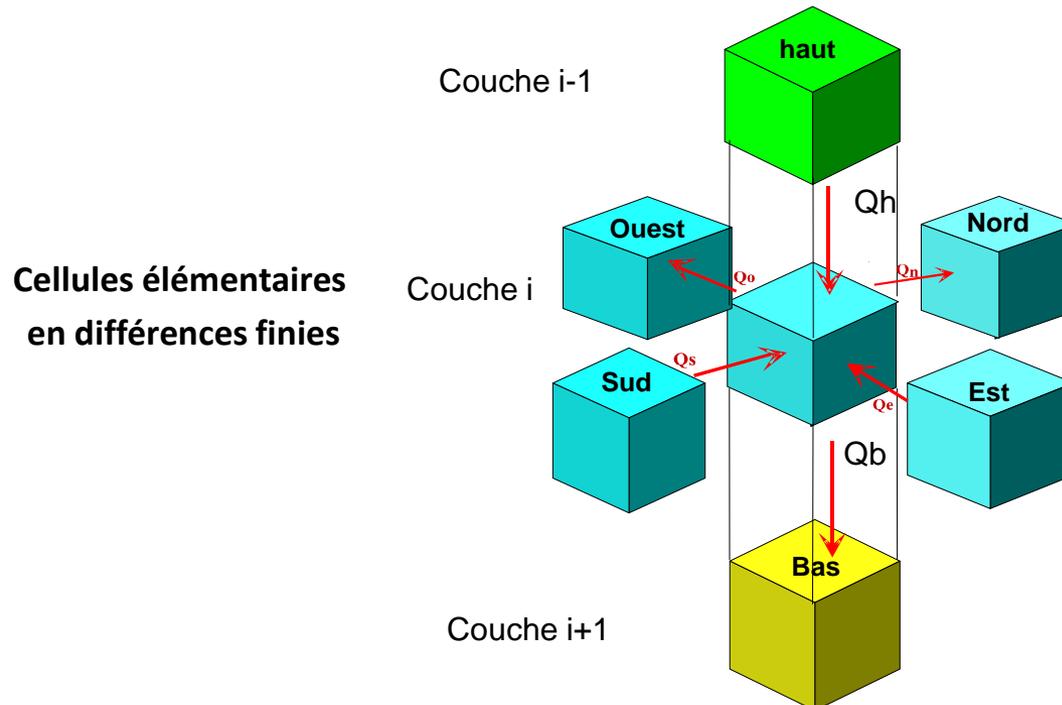
ZNS + Aquifère ou Aquifère seul



Modèles spatialisés

Le principe de la discrétisation spatiale : subdivision de l'espace en sous-domaines

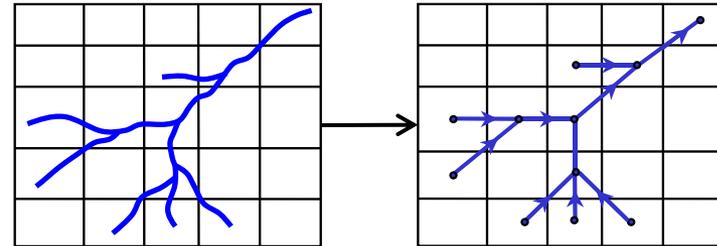
- Chaque maille est caractérisée par des paramètres : perméabilité, coefficient d'emmagasinement...
- A partir des paramètres, un niveau d'eau est calculé dans chaque maille
- Ce calcul se fait en considérant que chaque maille échange de l'eau avec ses 6 voisines et avec « l'extérieur » (pompage, injection, recharge pluviale)



Modèles spatialisés

Modèle hydrodynamique couplant les écoulements souterrains et superficiels

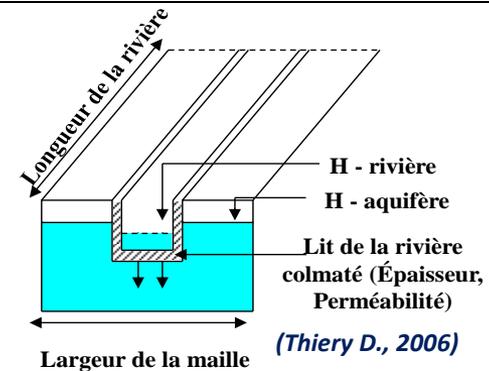
→ Le réseau hydrographique, qui se superpose au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons



Système de réseau de rivière connecté à la grille

→ Un tronçon est décrit par :

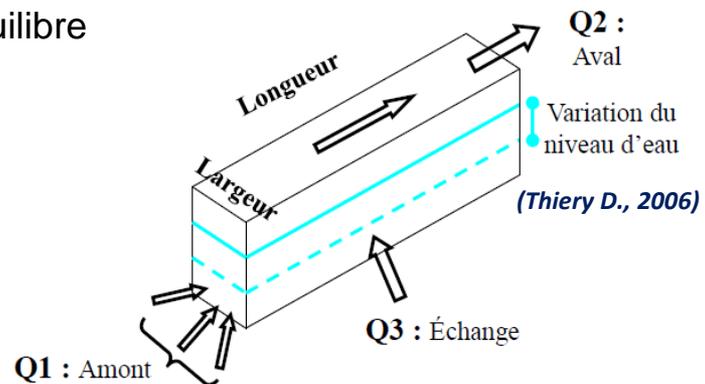
- sa géométrie : longueur, largeur, et altitude du lit,
- ses propriétés physiques : rugosité du lit, pente du lit, épaisseur et perméabilité du lit et des berges,
- ses termes source : pompages ou injections,
- son état : hauteur d'eau dans la rivière.



→ le débit dans un tronçon de rivière résulte de l'équilibre de tous les termes de débits :

$$Q_{AV} = Q_{AM} + Q_{ECH} + Q_{RUIS} + Q_{INJ} - \frac{dSTO}{dt}$$

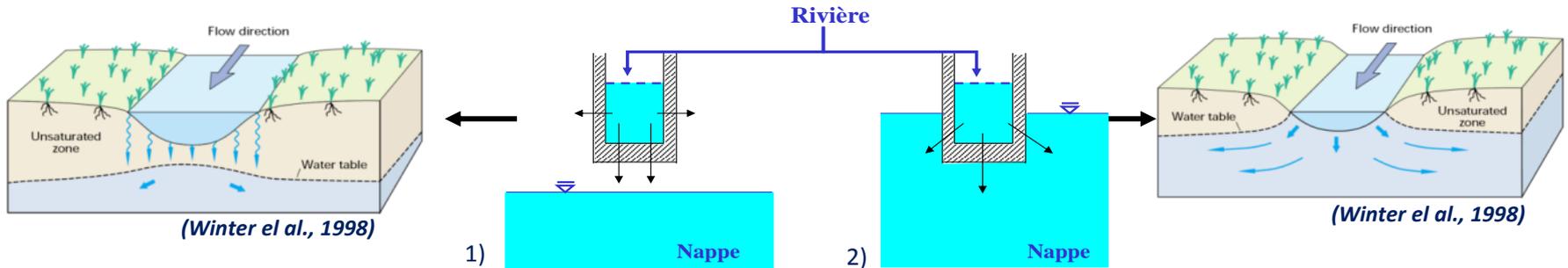
Avec : QAV : aval
 QAM : amont,
 QECH : échanges avec l'aquifère,
 QRUIS : ruissellement,
 QINJ : termes sources
 STO : stockage



Modèles spatialisés

Modèle hydrodynamique couplant les écoulements souterrains et superficiels

→ De la rivière vers la nappe



→ De la nappe vers la rivière

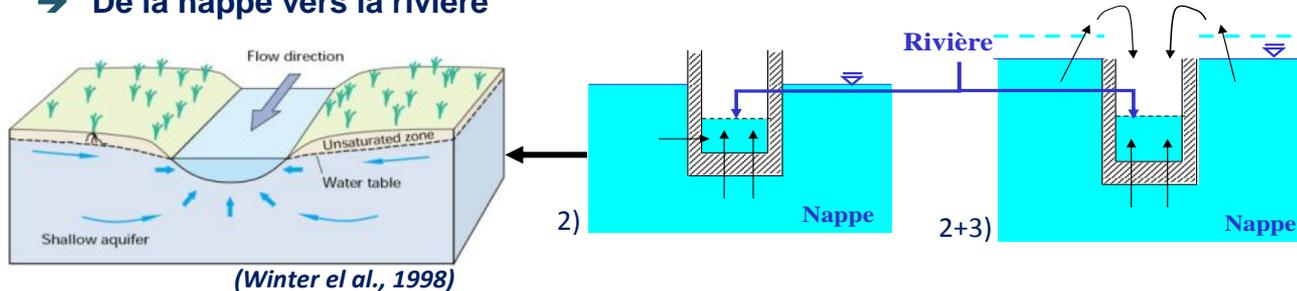


Schéma MARTHE (Thiery D., 2006)

$$1) Q_{Percol} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_f)}{Épais}$$

$$2) Q_{Éch} = SURF_{Éch} \cdot K_R \cdot \frac{(H_R - H_N)}{Épais}$$

$$3) Q_{Débo} = (SURF_{Mail} - L \cdot l) \cdot K_R \cdot \frac{(H_N - H_{Topo})}{Épais}$$

$$\text{Avec } SURF_{Éch} = L \cdot [l + 2 \cdot (H_R - H_f)]$$

Différentes configurations d'échanges Nappe - Rivière

Modèles spatialisés

Les étapes de la modélisation (1/2)

1 – Définition des objectifs du modèle en fonction du besoin (si besoin il y a) et choix du type de modèle (global ou maillé),

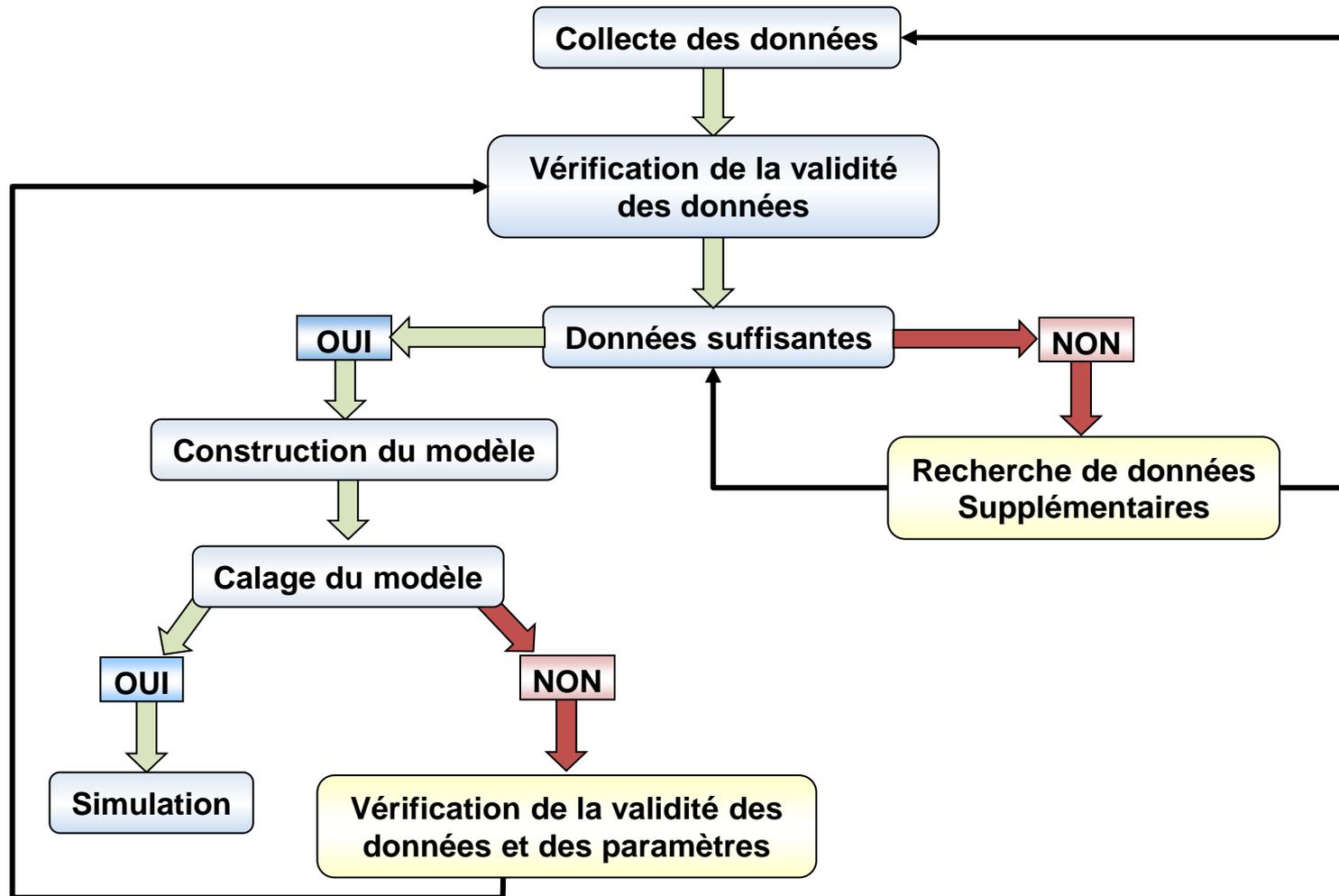


2 – Elaboration d'un modèle conceptuel intégrant les éléments suivants pour permettre de répondre aux questions posées :

- Extension du modèle ?
- Nombre de couches, aquifères à simuler ?
- Taille du maillage ?
- Cours d'eau ?
- Pas de temps (mensuel, décadaire, journalier ,...) ?

Modèles spatialisés

Les étapes de la modélisation (2/2)



Modèles spatialisés

Les données nécessaires

→ Topographie : Cote de la surface topographique (toit de la « première couche »)

- MNT, Cartes topographiques, points cotés...

→ Géologie : Cote NG des toits et des murs des couches à modéliser

- Cartes géologiques, coupes géologiques, logs forages, diagraphies...

→ Hydrogéologie : Caractéristiques hydrodynamiques – Etats piézométriques

- Paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, porosité efficace...), Piézométrie de la nappe en basses eaux et en hautes eaux, Chroniques piézométriques

→ Climatologie : Recharge, ruissellement

- Pluviométrie, évapotranspiration

→ Géochimie : Paramètres physico-chimiques, chimiques et isotopiques

- Eléments majeurs, isotopes, ...

→ Sol : Paramètres du sol (nécessaire au partitionnement recharge/ruissellement)

- Carte des sols, paramètres de réserves utiles,...

→ Prélèvements et rejets

- En nappes et cours d'eau (AEP, industrie, agricole...), rejets (industrie, stations d'épuration...)

→ Hydrologie : Cours d'eau

Modèles spatialisés

Une fois le modèle construit les phases suivantes peuvent être réalisées successivement :

➔ **Le calage, il consiste à rechercher les valeurs des paramètres suivants**

- ✓ Perméabilité
- ✓ Emmagasinement libre et captif
- ✓ Paramètres de recharge (capacité de stockage du sol, partition)
- ✓ infiltration/ruissellement, temps de demi percolation)
- ✓ Rôle hydrodynamique des failles
- ✓ Géométrie des fonds de vallée

... qui permettent la meilleure adéquation possible entre les valeurs calculées et les données des observations suivantes :

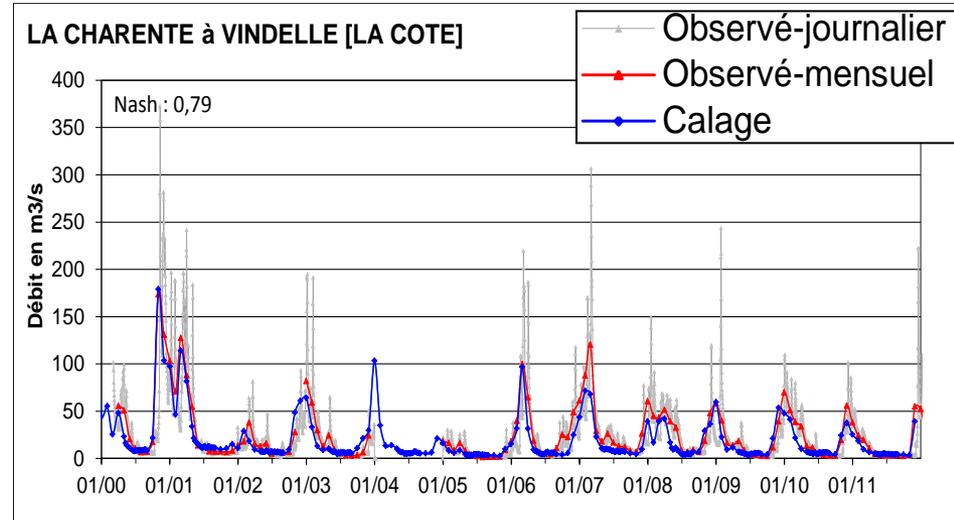
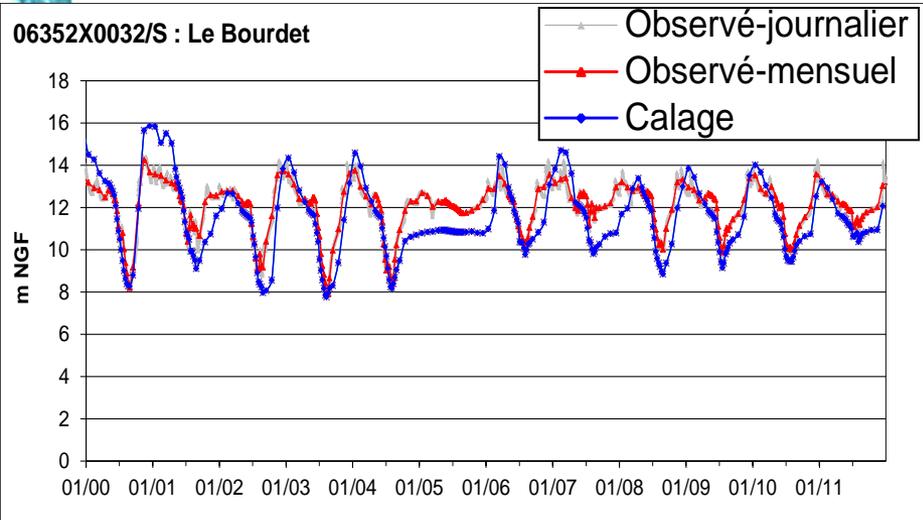
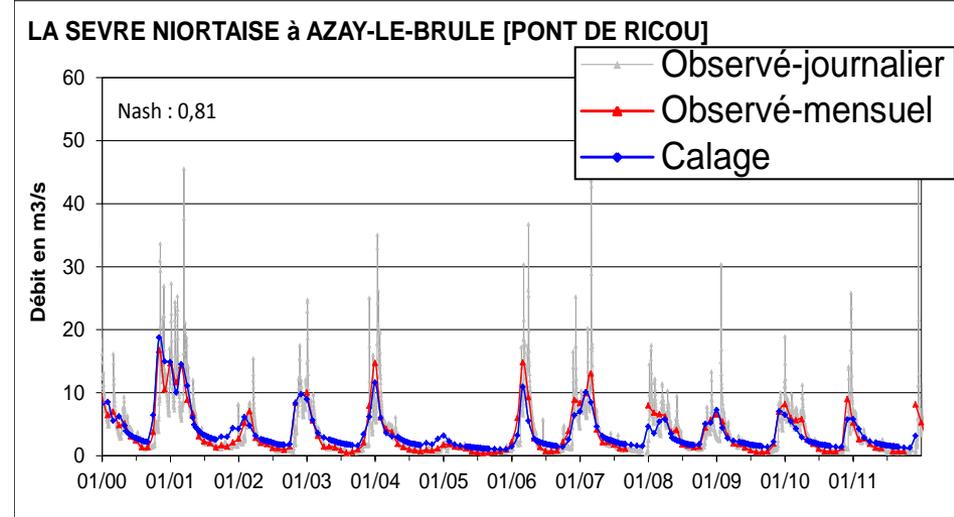
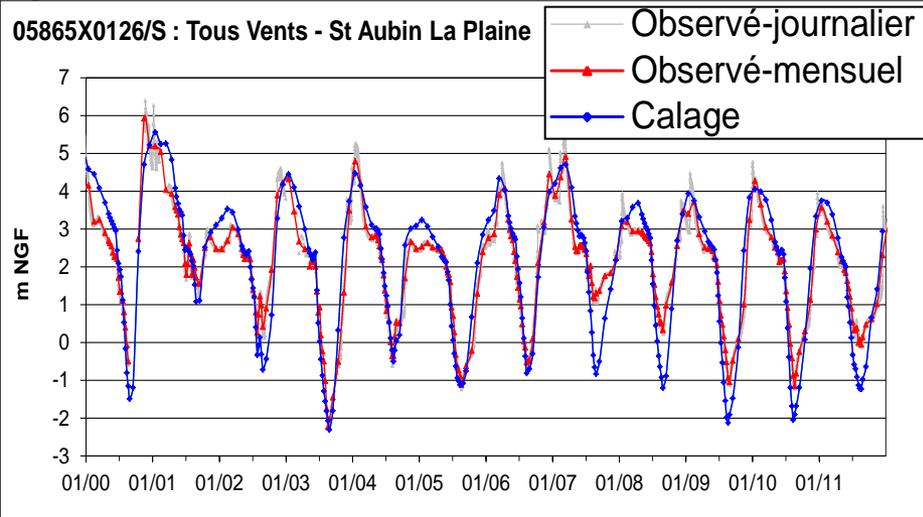
- ✓ Cartes piézométriques
- ✓ Localisation des sources, de zones humides
- ✓ Chroniques piézométriques
- ✓ Chroniques de débits

➔ **Les analyses de sensibilité : elles permettent de tester la sensibilité du modèle à l'un ou l'autre des paramètres**

➔ **Les simulations : intégration de scénarios de prélèvements, de scénarios climatiques etc...**

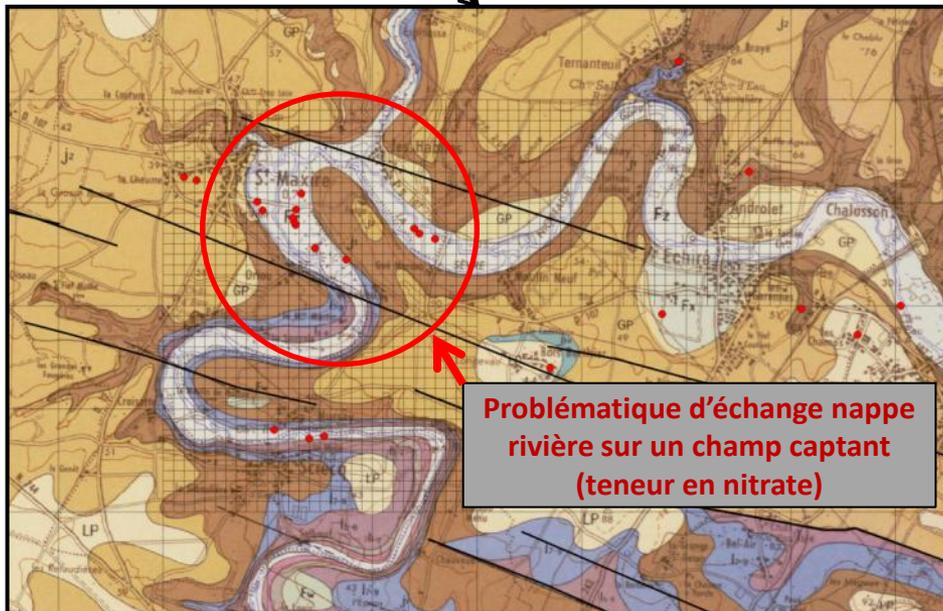
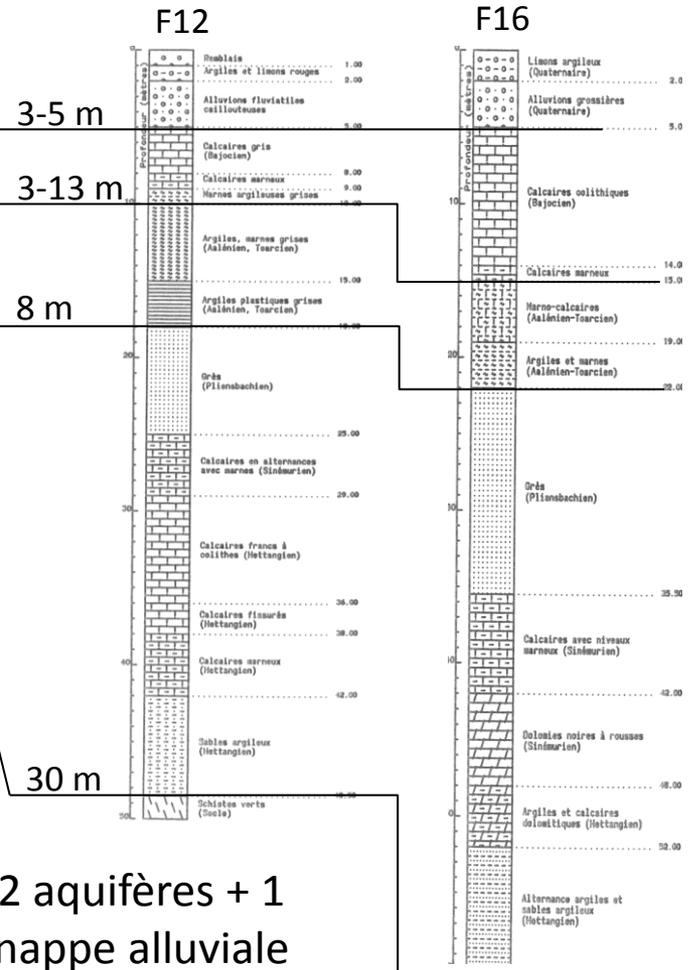
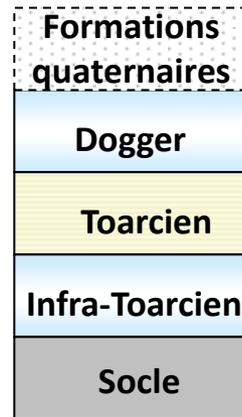
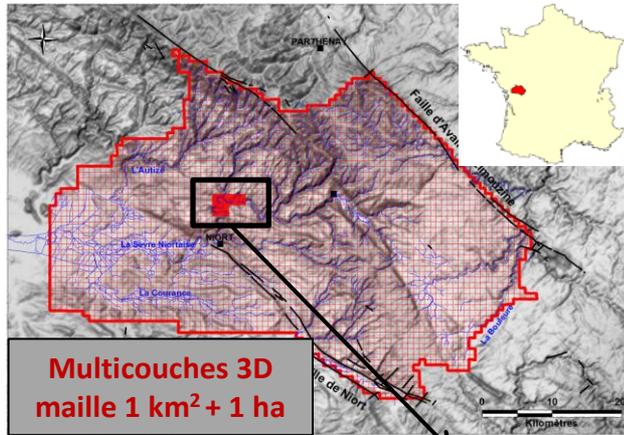
Modèles spatialisés

Des exemples de calage (à gauche sur les niveaux, à droite sur les débits)



Un exemple : le champs captant d'Echiré

La modélisation du champs captant d'Echiré (79)



Un exemple : le champs captant d'Echiré

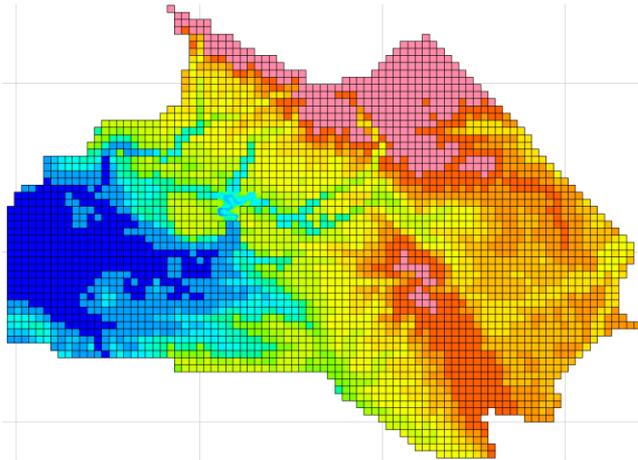
Les données

Type de données	Périodicité	Sources
Géologique		
<i>Contexte régional</i>		Carte géologique
<i>Contexte local</i>		DDT, rapports Bureau d'études, BSS, rapports BRGM
Hydrodynamique		DDT, rapports Bureau d'étude, BSS, rapports BRGM,
Hydro-morphologie		BD Carthage, Géoportail, Mesures de terrain
Débits	Volume annuel/volume étiage pour AE et CAEDS Volumes bimensuels pour le SECO	Agence de l'Eau LB, SECO/Lyonnaise des Eaux CAEDS, Banque Hydro, Bureau d'études
Piézométrie	Ponctuelle (1989, 2010)	DDT, bureau d'études
Chroniques piézométriques	Journalière, Bimensuelle	Réseau piézométrique (ADES) , ORE, SECO
Chroniques qualité	Bimensuelle à annuelle	SECO, ARS, Agence de l'Eau LB, ADES

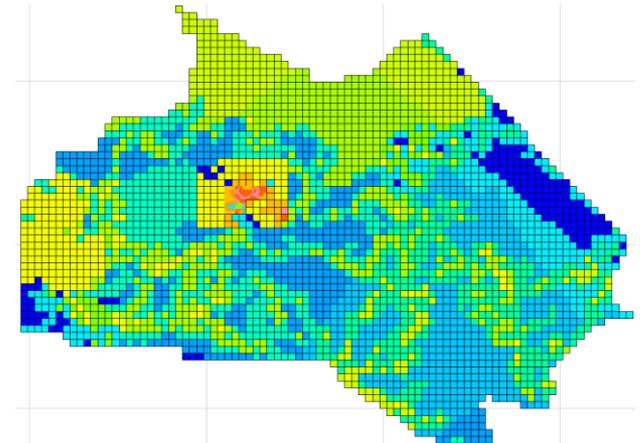
Un exemple : le champs captant d'Echiré

La modélisation du champs captant d'Echiré (79) : des données intégrées

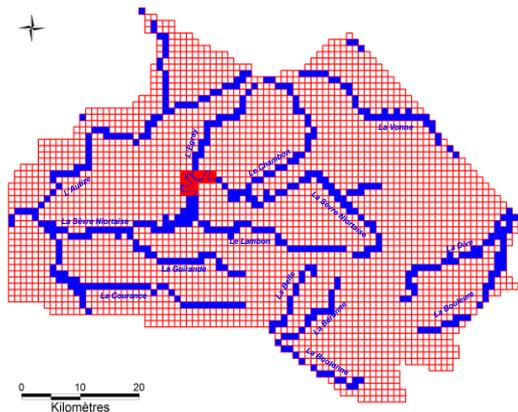
Des couches géologiques (toit et mur) et des paramètres intégrés (perméabilités ...)



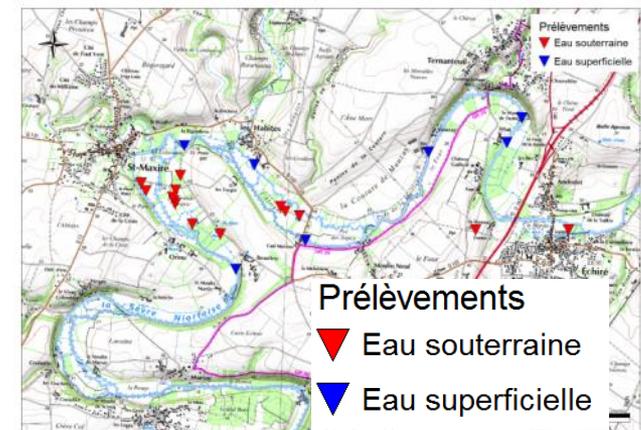
Des zones de recharge et de ruissellement (données pluies/ETP)



Des cours d'eau

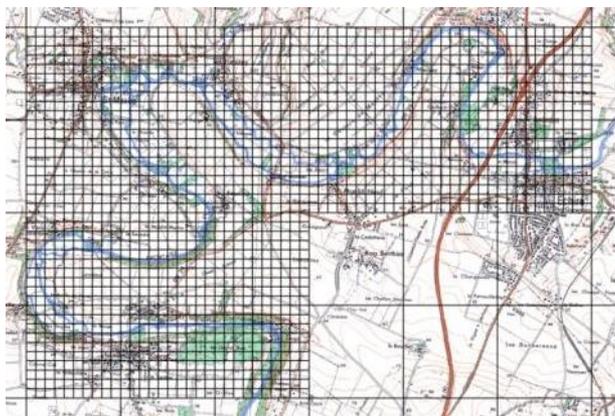


Des prélèvements

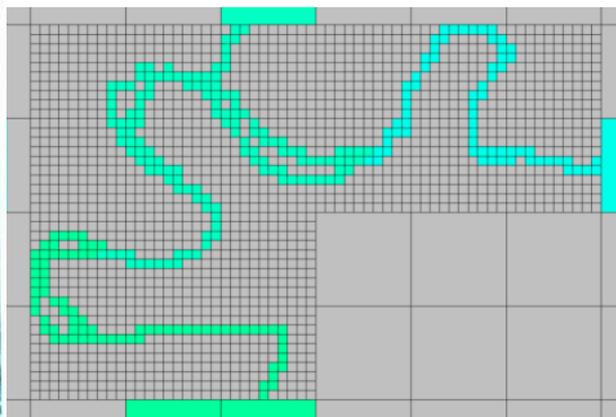


Un exemple : le champs captant d'Echiré

La modélisation du champs captant d'Echiré (79) : des données de cours d'eau



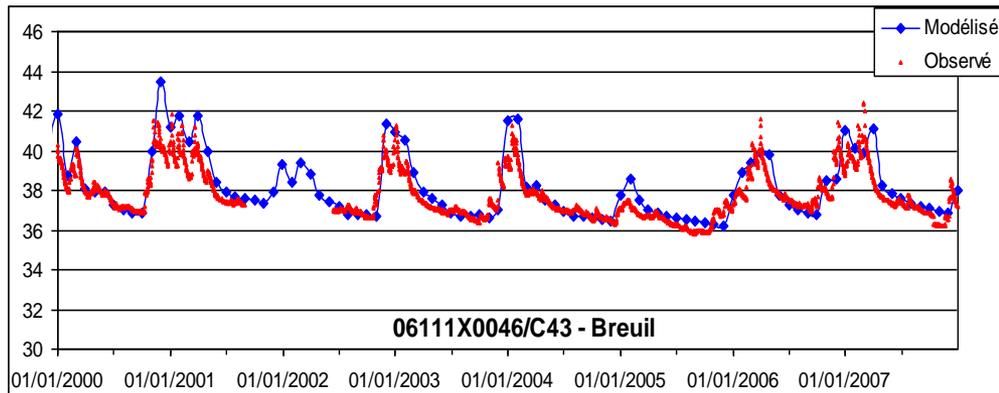
Paramètre	Mesuré/ Connu	Méthode	Source	Valeurs
Longueur de tronçon	X	Traitement SIG	BD CARTHO®	10 à 200 m (mailles 1ha)
Largeur de tronçon	X	Télémètre / imagerie satellite	Mesure in situ 2011 / imagerie satellite	7 à 30 m
Hauteur d'eau	X	Sondage manuel à l'étiage	Mesure in situ 2012	Carte IGN 1:25000, MNT 50m
Cote de la ligne d'eau	X	Sondage manuel à l'étiage	Calculée à partir des mesures in situ 2012	
Cote de fond de rivière	X	Sondage manuel à l'étiage	Calculée à partir des mesures in situ 2012	
Pente de la rivière	X	Traitement SIG	Carte IGN 1:25000, MNT 50m	Pentes faibles 1-2%
Epaisseur des dépôts de fond de rivière	-	-	-	
Perméabilité des dépôts de fond de rivière	-	-	-	



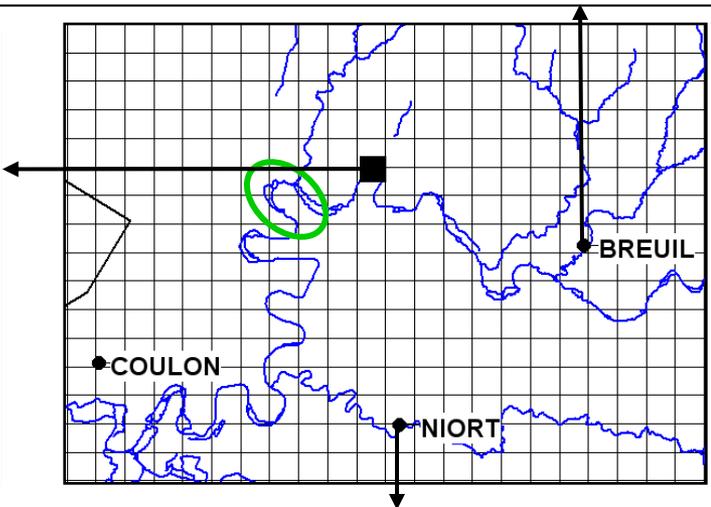
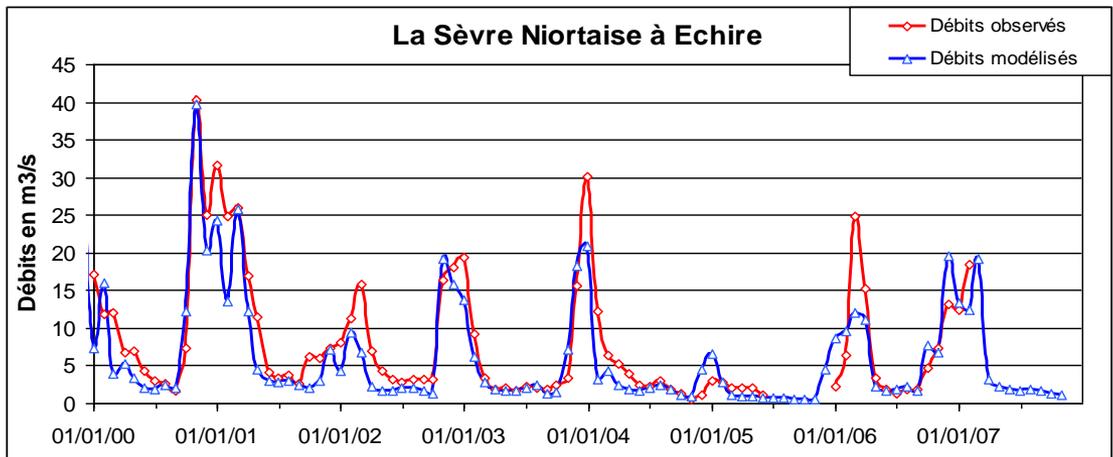
Un exemple : le champs captant d'Echiré

Calage : aspect global

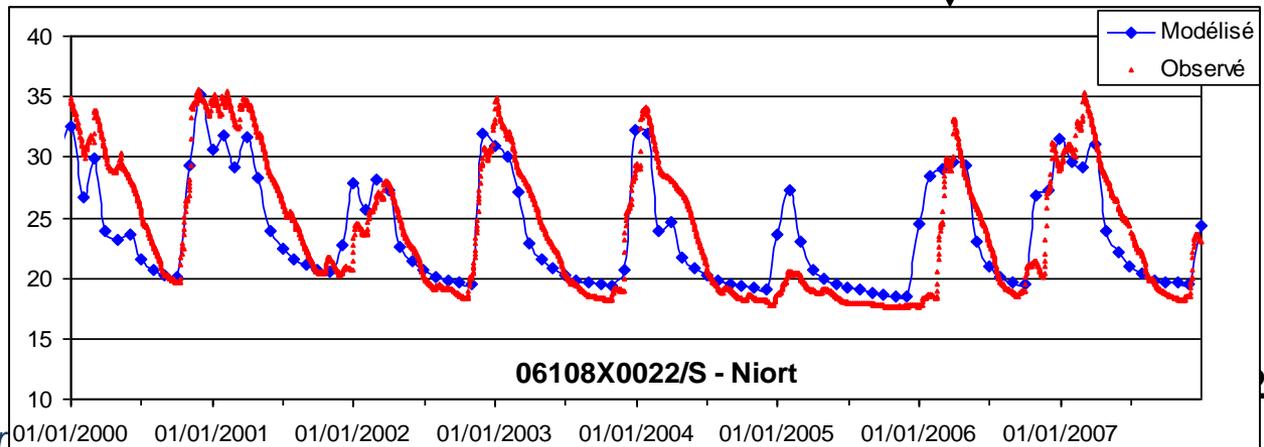
Niveaux



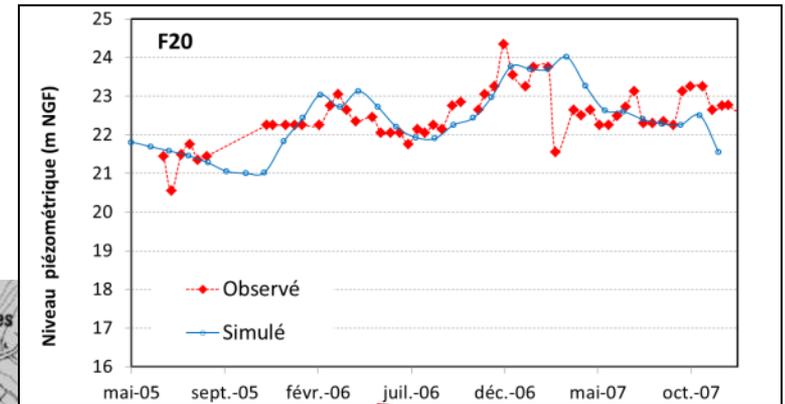
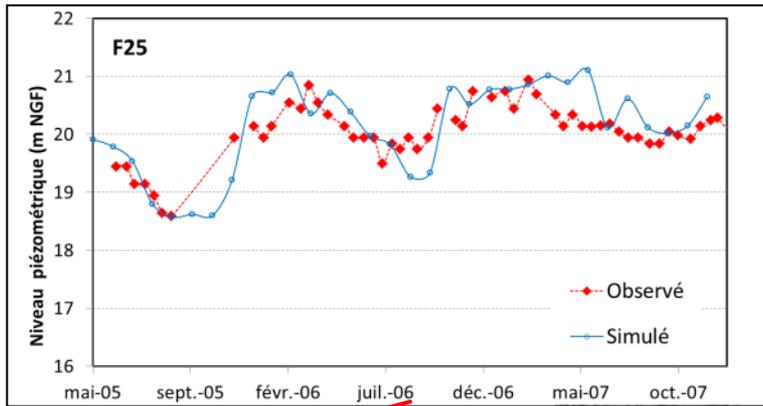
Débits



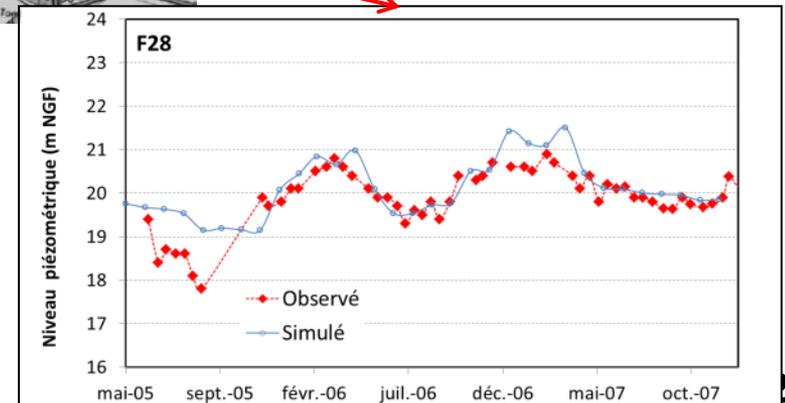
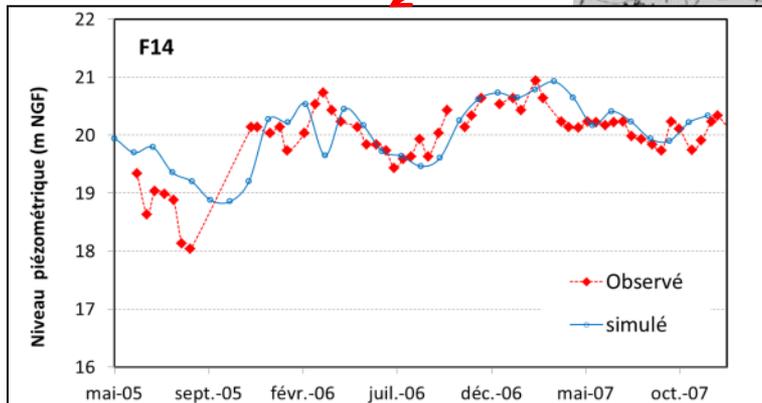
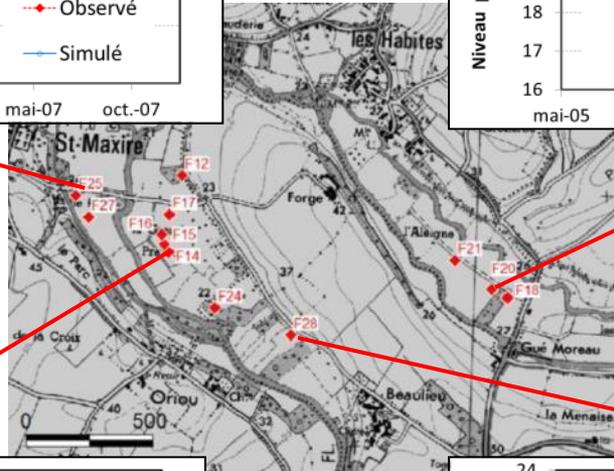
Niveaux



Un exemple : le champs captant d'Echiré

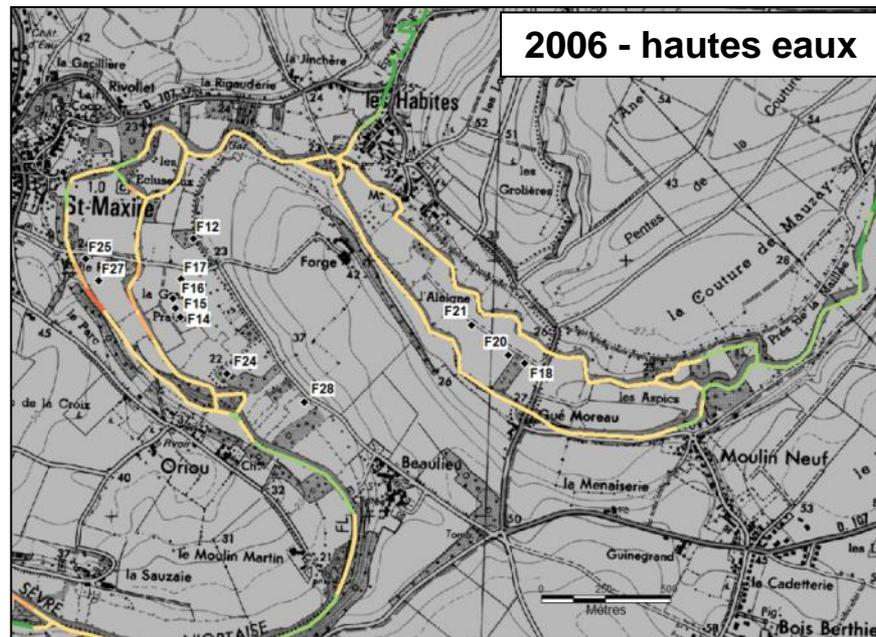


Calage : aspect local

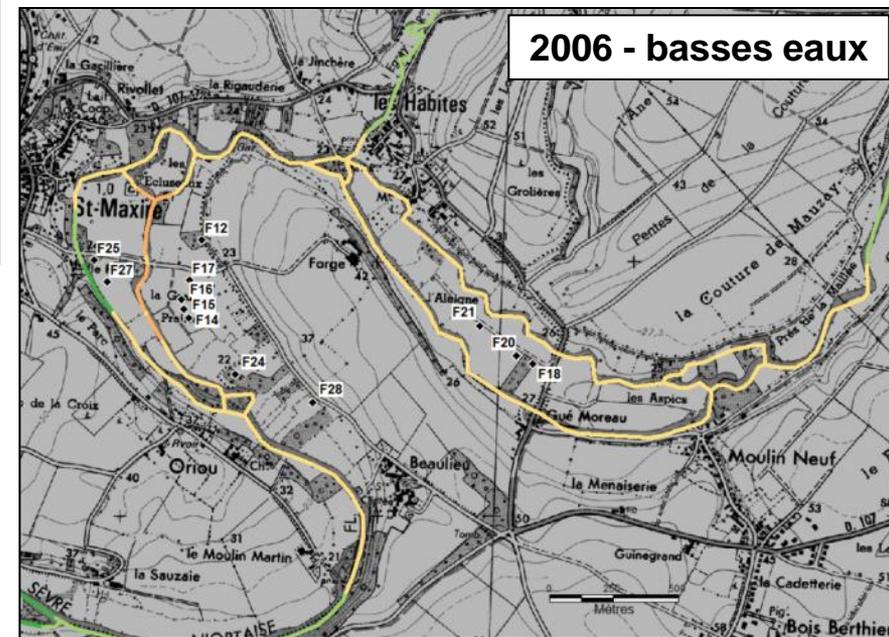
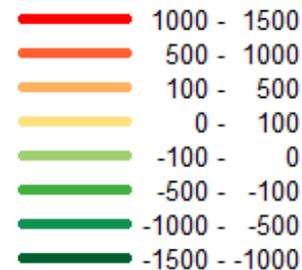


Un exemple : le champs captant d'Echiré

Des résultats : débits échangés par tronçon

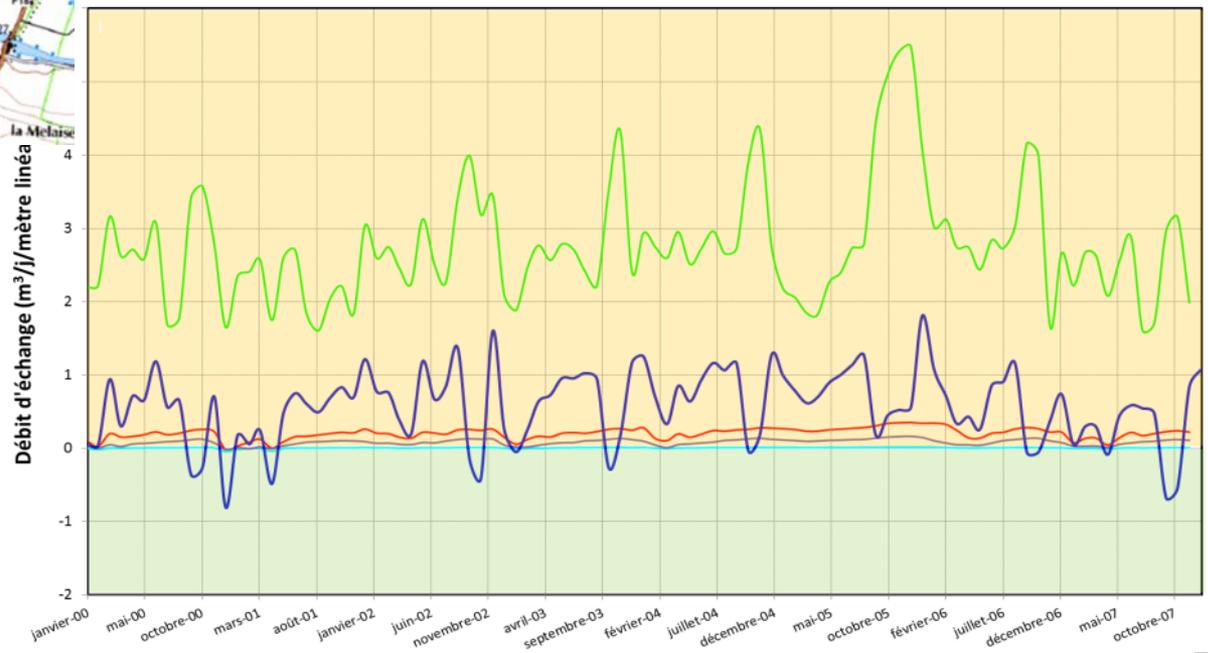
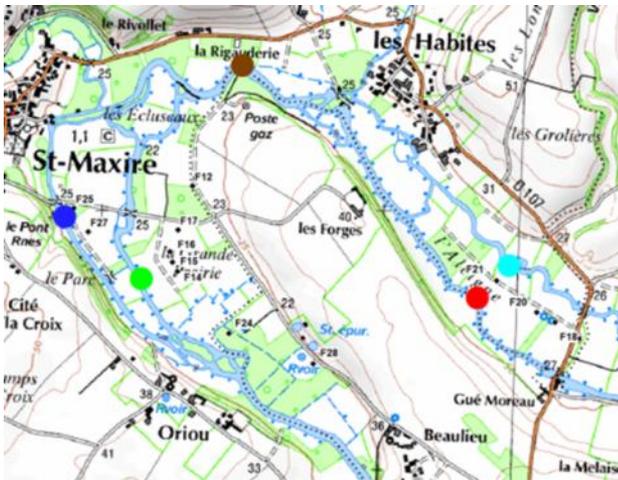


Débit d'échange nappe-rivière (m³/j)
(>0 si Riv. vers Nap. / <0 si Nap. vers Riv.)



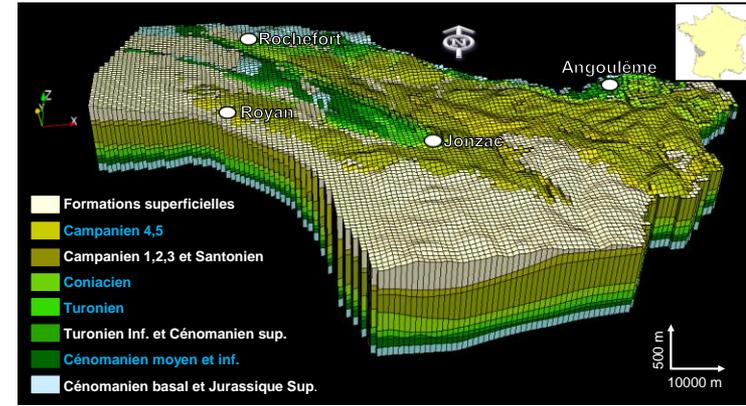
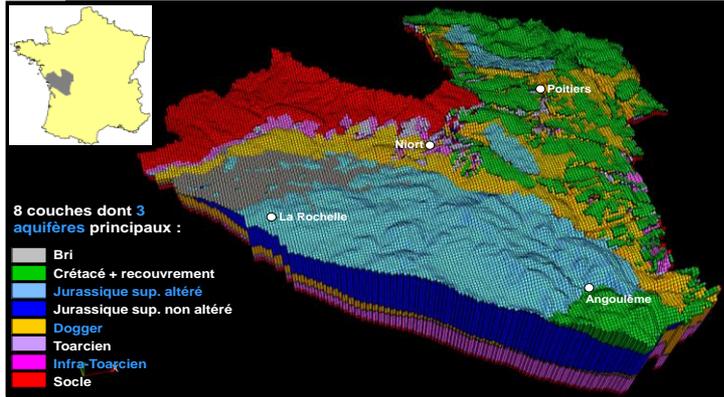
Un exemple : le champs captant d'Echiré

Des résultats : variabilité temporelle des flux d'échanges simulés en différents points



Quelques modèles et résultats

Ex. : modèles Jurassique et Crétacé du Poitou-Charentes



Caractéristiques principales

- Superficie au sol : **19 280** km²
- **8** couches géologiques
- ~ **1 000** mètres de profondeur au maximum
- ~**90 000** mailles actives
- Maillage de **1000** m de côté
- Calage sur la période **2000** à **2007** au pas de temps mensuel

Couplage nappes/rivières

- ~ **3 050** kilomètres de linéaire de cours d'eau pris en compte
- Lâchers de **7** barrages pris en compte

Prélèvements :

- Environ **4200** forages (agricoles-AEP-Industriels) → **208** Mm³/an
- Prélèvements dans les cours d'eau → **50** Mm³/an

Caractéristiques principales

- Superficie au sol : **7 900** km²
- **8** couches géologiques
- ~ **1 000** mètres de profondeur au maximum
- ~ **45 000** mailles actives
- Maillage de **1000** m de côté
- Calage sur la période **2000** à **2008** au pas de temps mensuel

Couplage nappes/rivières

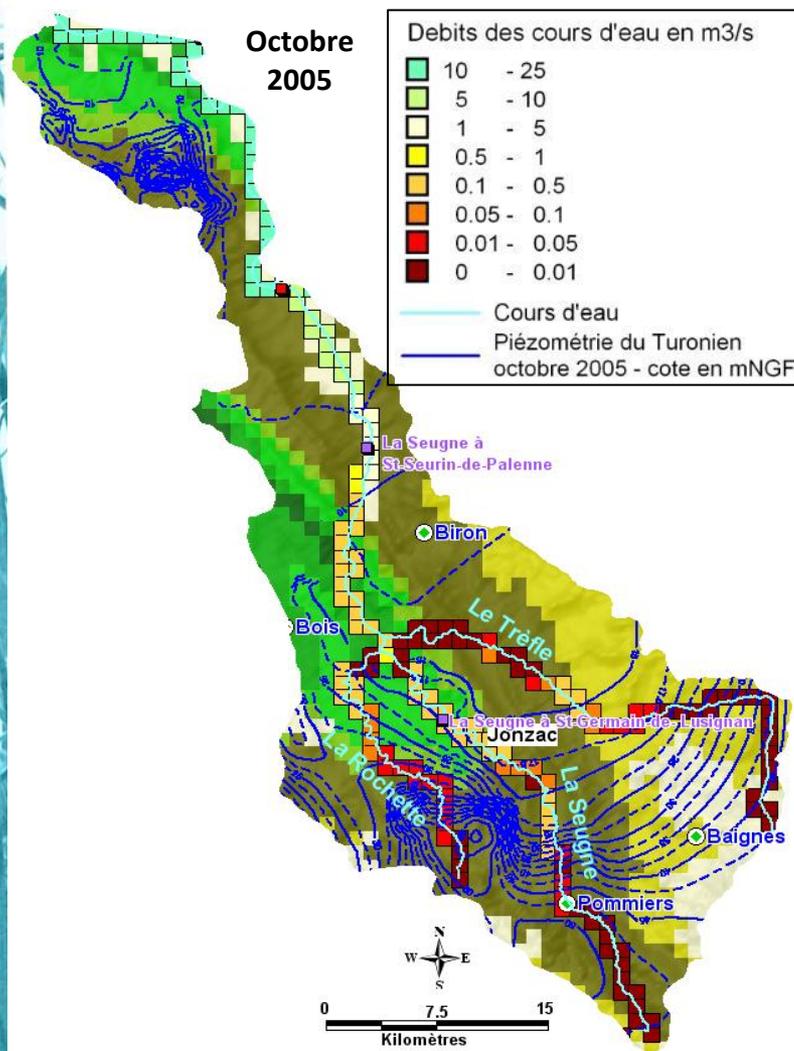
- ~ **900** kilomètres de linéaire de cours d'eau pris en compte

Prélèvements :

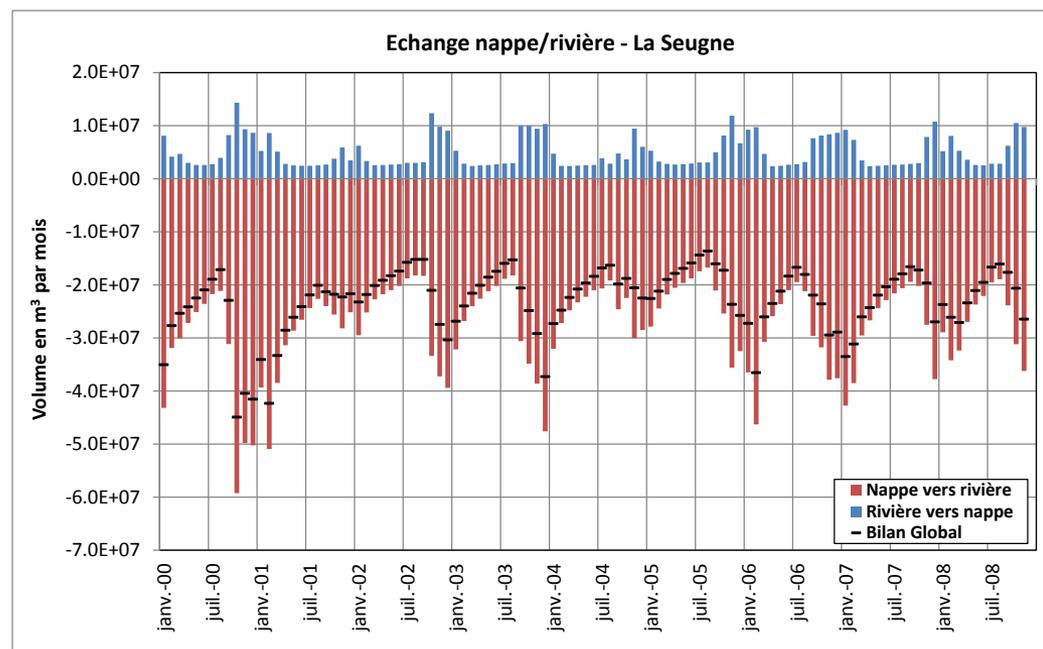
- Environ **2000** forages (agricoles-AEP-Industriels) → **76** Mm³/an
- Prélèvements dans les cours d'eau → **56** Mm³/an

Quelques modèles et résultats

Modèle Crétacé : exemple bassin de la Seugne



Bilan global sur le bassin versant



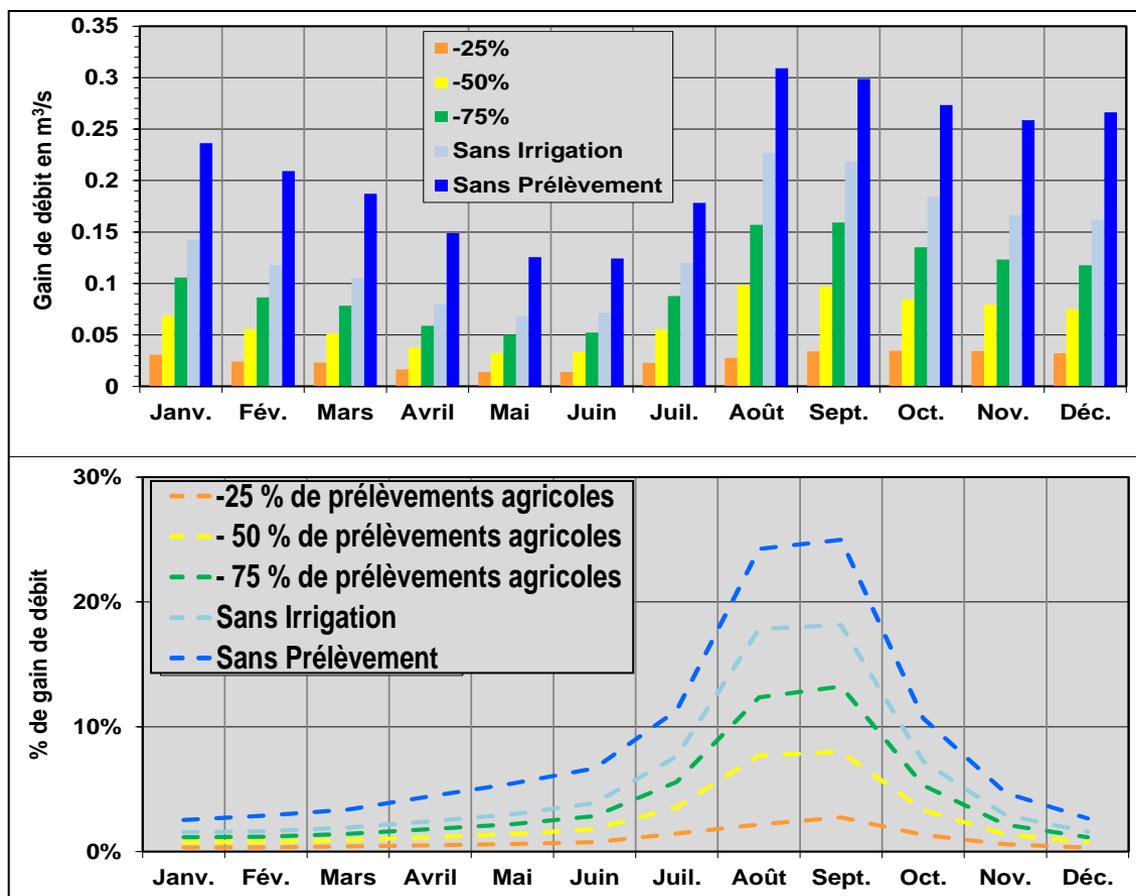
Quelques modèles et résultats

Modèle Crétacé : exemple bassin de la Seugne – tests de baisse de prélèvements

→ Diminutions des prélèvements agricoles de 25 %, 50 %, 75 %, sans prélèvement agricoles et sans prélèvements

La Seugne à St-Seurin-de-Palenne

Gain de débit en fonction de la baisse des prélèvements
- moyenne mensuelle interannuelle sur 2000-2008

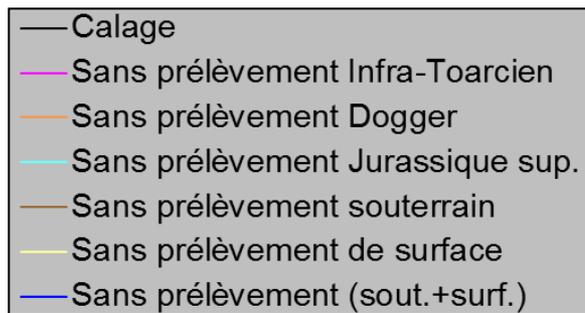
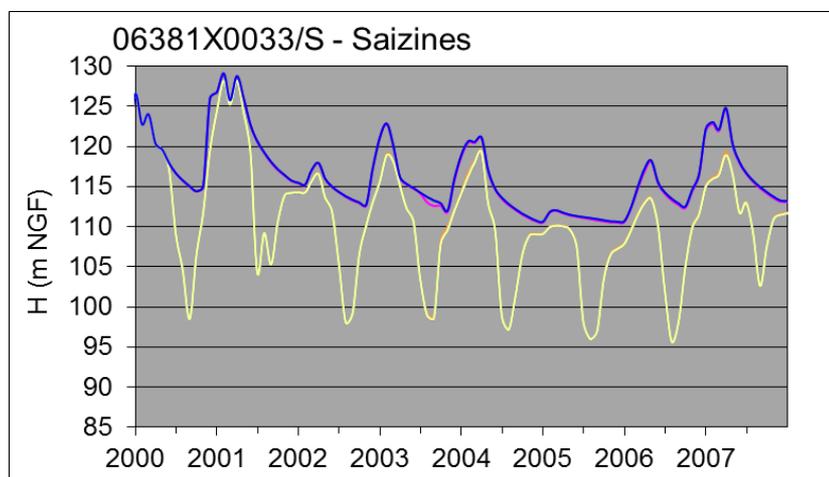


Quelques modèles et résultats

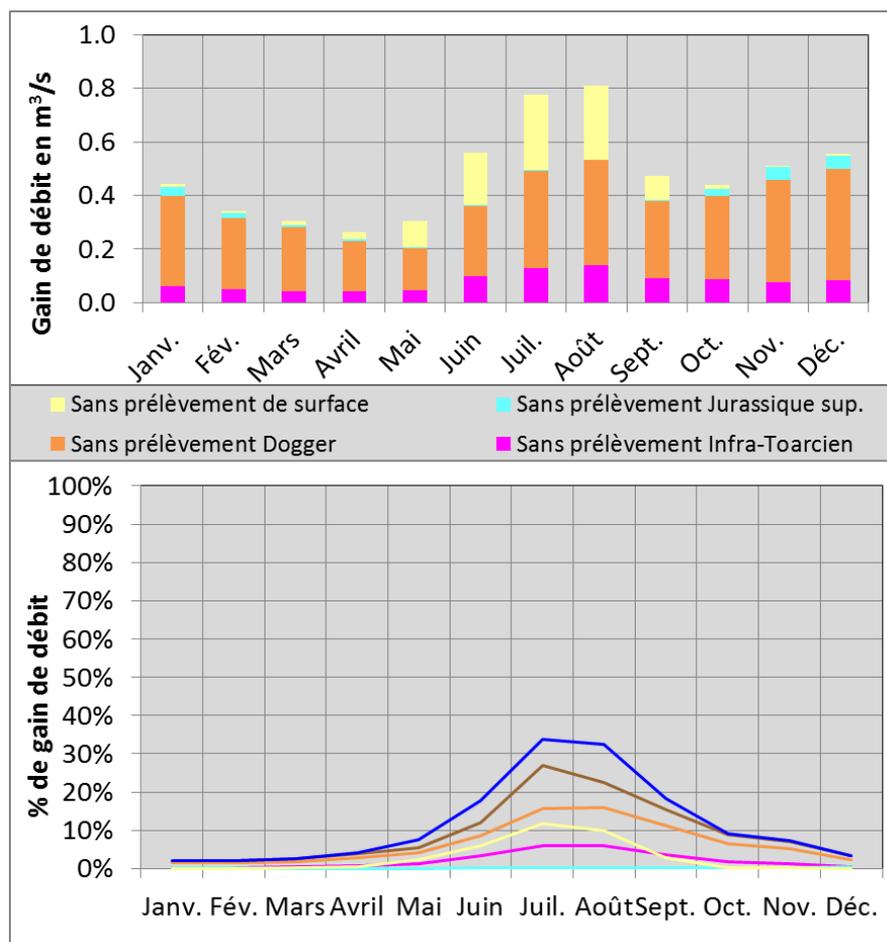
Modèle Jurassique : exemple bassin du Clain – tests de baisse de prélèvements

➔ Arrêts des prélèvements agricoles en fonction des nappes

Piézomètres de Saizines

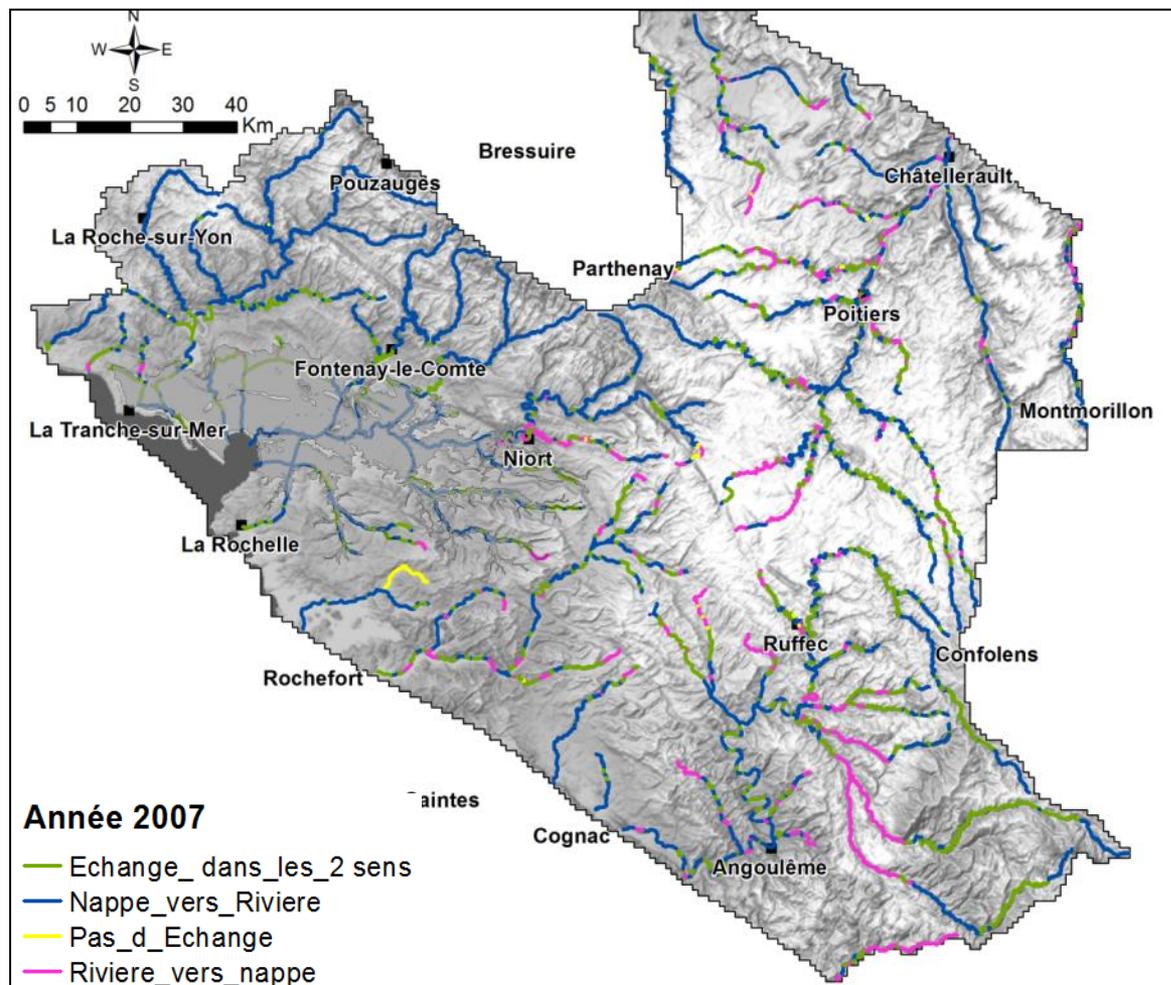


Le Clain à Poitiers



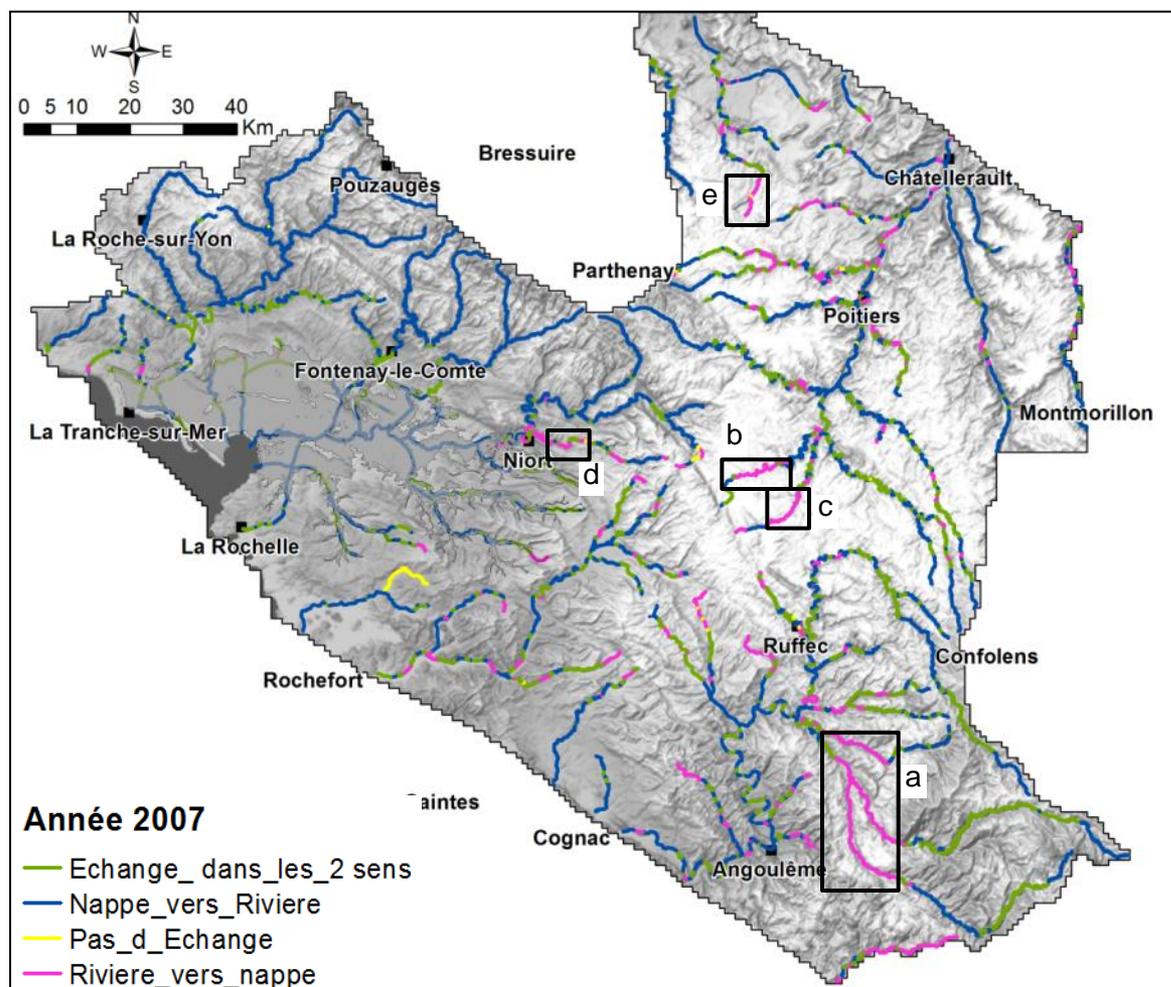
Quelques modèles et résultats

Modèle du Jurassique : sens des échanges globaux par tronçon (ou masses d'eau) pour l'année 2007



Quelques modèles et résultats

Modèle du Jurassique : sens des échanges globaux par tronçon (ou masses d'eau) pour l'année 2007



→ Restitution des zones de pertes connues sur :

- a) Bandiat, Tardoire et la Bonniere
- b) Bouleure
- c) Dive du sud
- d) Lambon
- e) Dive du Nord

Conclusion

Les modèles une Nécessité?

"...Les modèles sont donc une nécessité.. Mais devrait-on dire plutôt un mal nécessaire. Du point de vue du citoyen ou du non spécialiste, les prédictions sorties d'un modèle paraissent souvent plus crédibles que celles basées sur la seule expérience d'un expert qui se dit compétent. Cette crédibilité supérieure est, pour partie je crois, due à une certaine foi dans le calcul, ...

*Mais cette fois devrait avoir ces limites. **Un modèle, même vérifié et validé, n'est éventuellement crédible que si son utilisateur est parfaitement conscient des hypothèses sous-jacentes, des limites du calcul et de l'incertitude des paramètres.** Ce n'est donc pas au modèle que l'on devrait faire confiance, mais à l'homme derrière le modèle, à son expérience et à sa capacité à représenter par le modèle ce qu'il a perçu de la réalité représentée.*

In fine, ce n'est pas le modèle qui est nécessaire, c'est la compétence du scientifique qui se sert du modèle pour réfléchir et proposer ses conclusions".

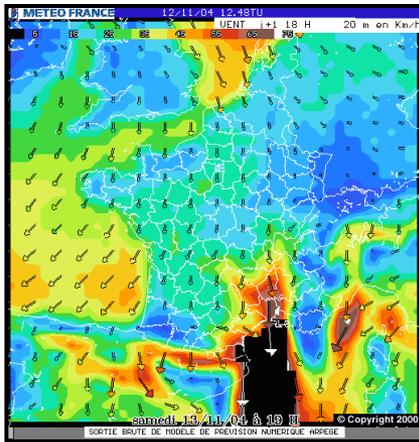
G. de Marsily
Quelques grands enjeux des Sciences de la Terre au XXI^{ème} siècle
Géologues n 124

Qu'est-ce qu'un modèle ?

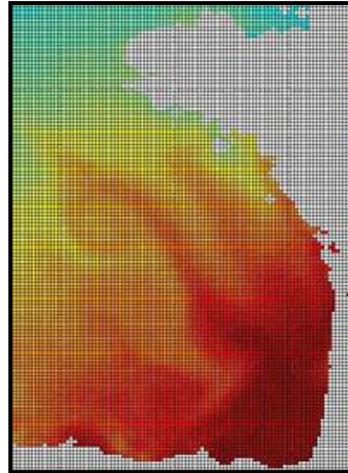
Objectif : reproduire une certaine « réalité » à partir de différentes équations mathématiques dans le but de réaliser des simulations ou des prévisions dans le temps.

Quelques exemples de modèles...

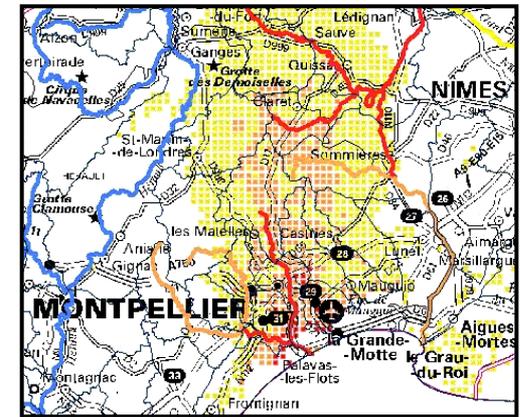
Circulations, atmosphériques
(MétéoFrance,...)



Circulations océaniques
(Ifremer,...)



Prévision des crues (IRSTEA,...)

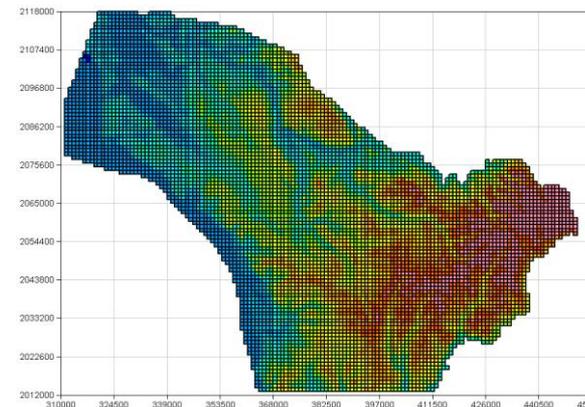


... et les modèles hydrogéologiques qui permettent de simuler les écoulements souterrains.

Logiciel utilisé : Marthe* créé par le BRGM



* Modélisation d'Aquifères par un maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Ecoulements).





A suivre...