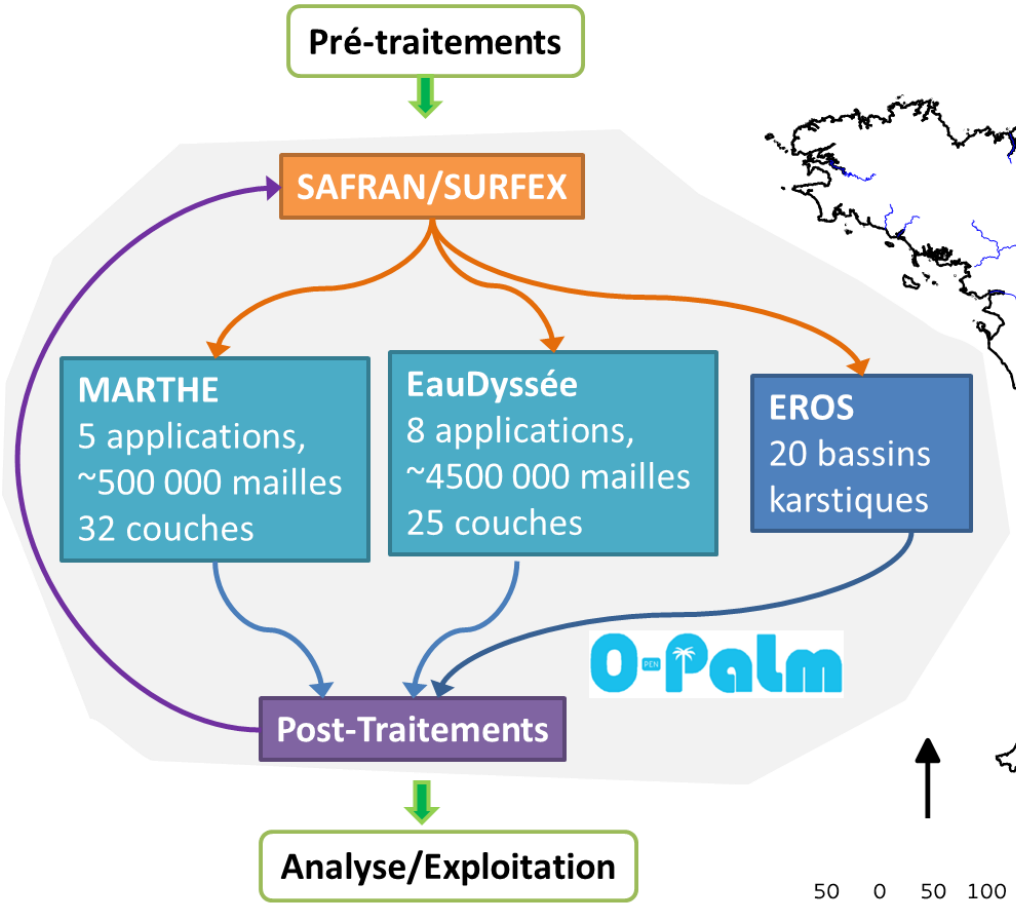
Le projet Aqui-FR:

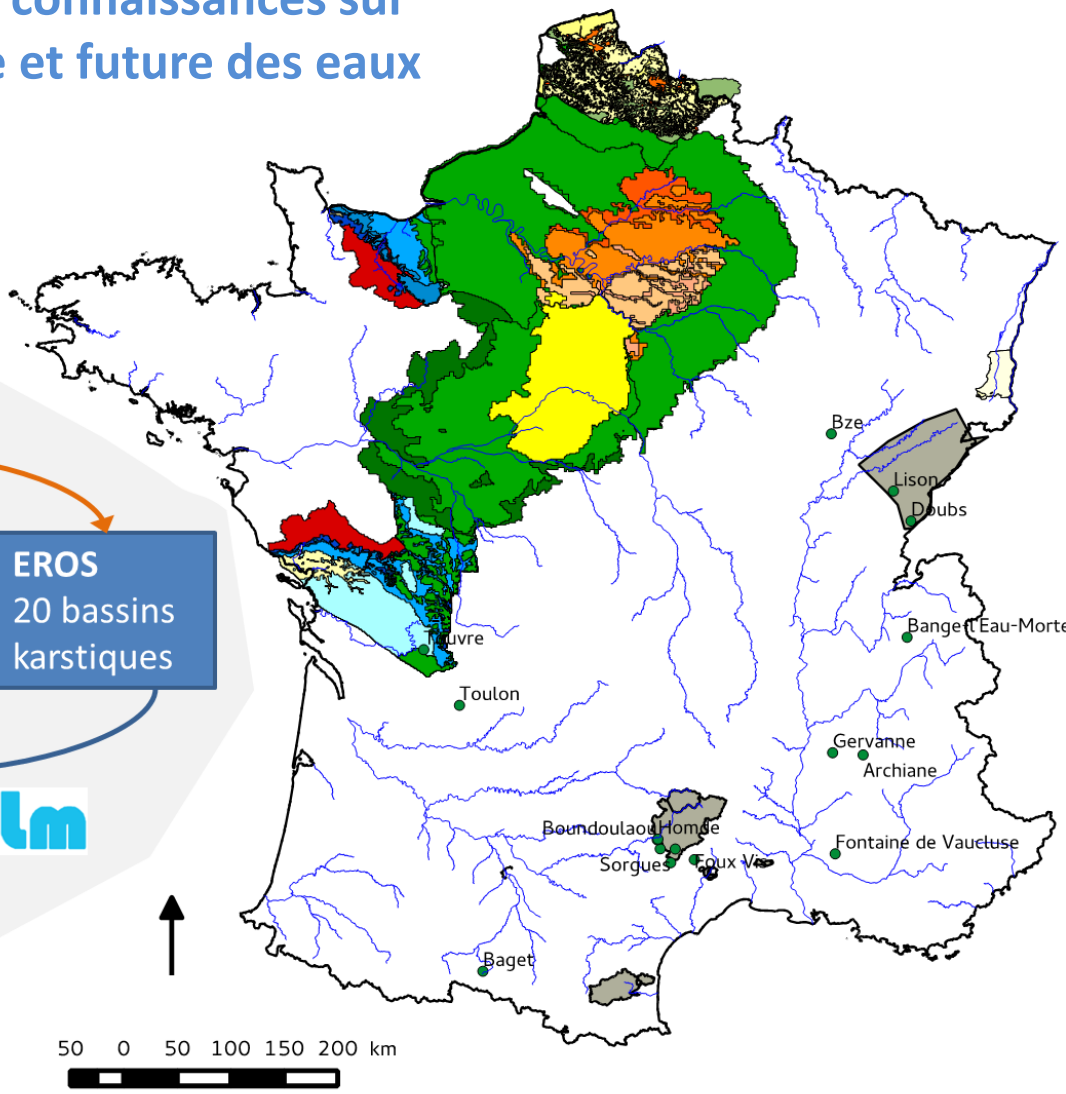
Un outil pour améliorer nos connaissances sur l'évolution passée, présente et future des eaux souterraines en France

F. Habets (Métis), N. Amraoui, Y. Caballero, D. Thiéry, J-P. Vergnes (BRGM), T. Morel (Cerfacs), P. Le Moigne, **N. Roux** (CNRM), Quentin Courtois, J-R. De Dreuzy, L. Longuevergne (Géosciences Rennes), P. Ackerer, F. Maina (Lhygès), F. Besson, P. Etchevers, F. Regimbeau (DCSC), N. Gallois, P. Viennot (Mines-Paristech)

Le projet Aqui-FR:

Un outil pour améliorer nos connaissances sur l'évolution passée, présente et future des eaux souterraines en France



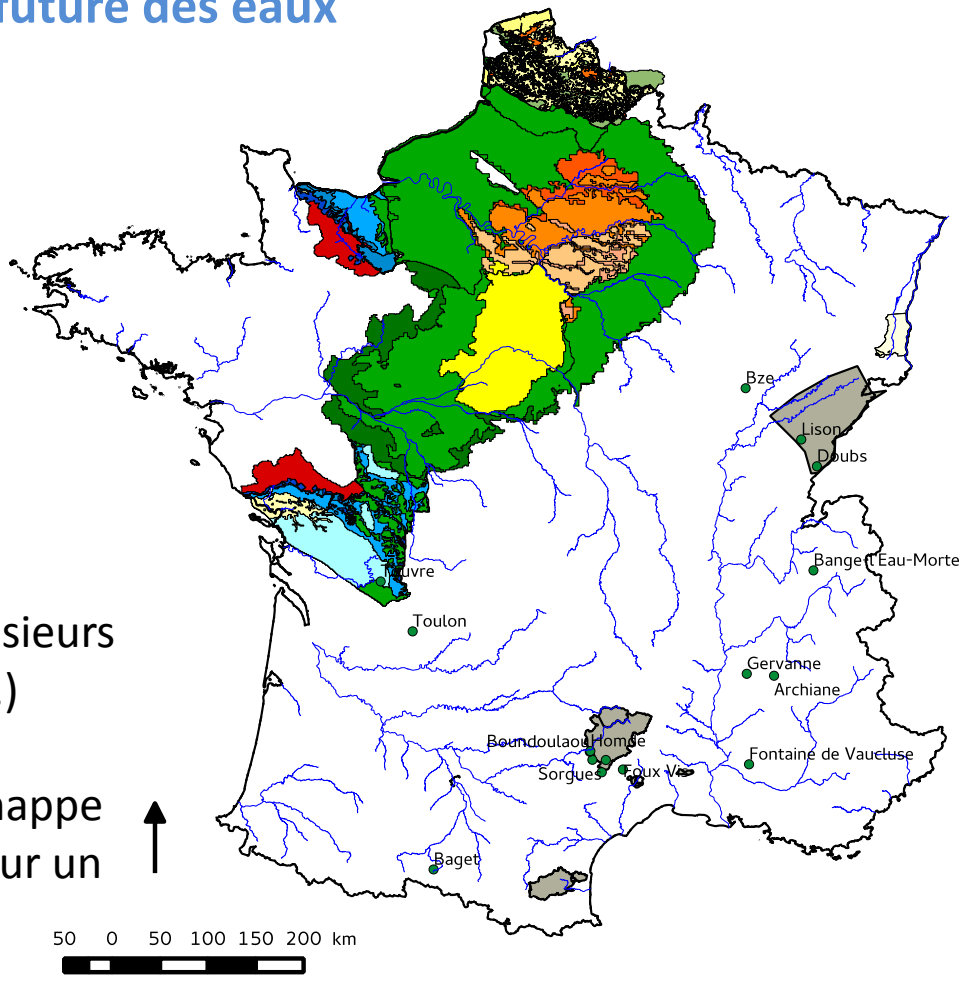


www.metis.upmc.fr/~aqui-fr

Le projet Aqui-FR:

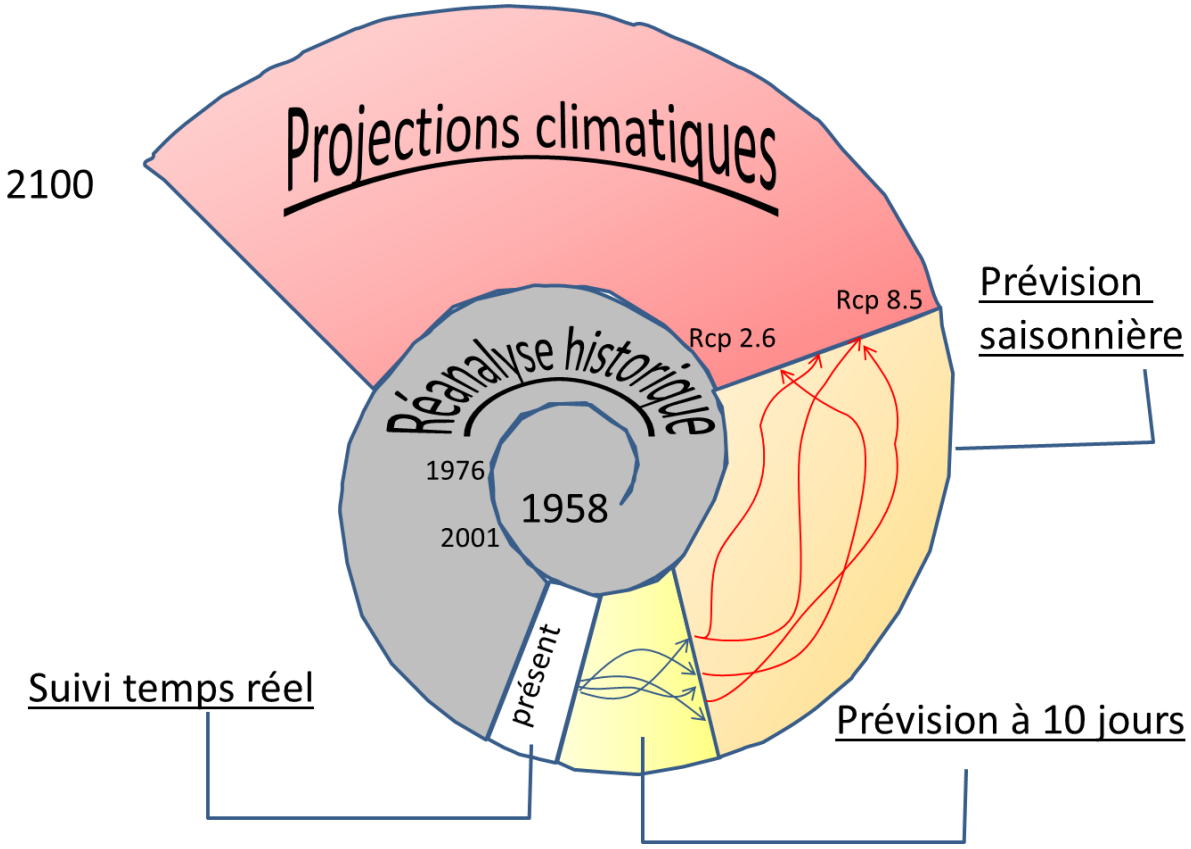
Un outil pour améliorer nos connaissances sur l'évolution passée, présente et future des eaux souterraines en France

- **13** applications distribuées sur des bassins sédimentaires
  - un total de **57** couches aquifères/aquitards/aquicludes,
  - environ **950 000** mailles
  - Quelques aquifères reproduits par plusieurs modèles (Somme, Basse-Normandie…)
- **20** systèmes karstiques
- Plus de **16000** points de prélèvements en nappe (rassemblé sur des mailles différentes), pour un volume de l'ordre de **2.4 Milliard** de m3
- **554** points de contrôle des débits
- **629** points d'observation piézométriques



Le projet Aqui-FR:

Un outil pour améliorer nos connaissances sur l'évolution passée, présente et future des eaux souterraines en France

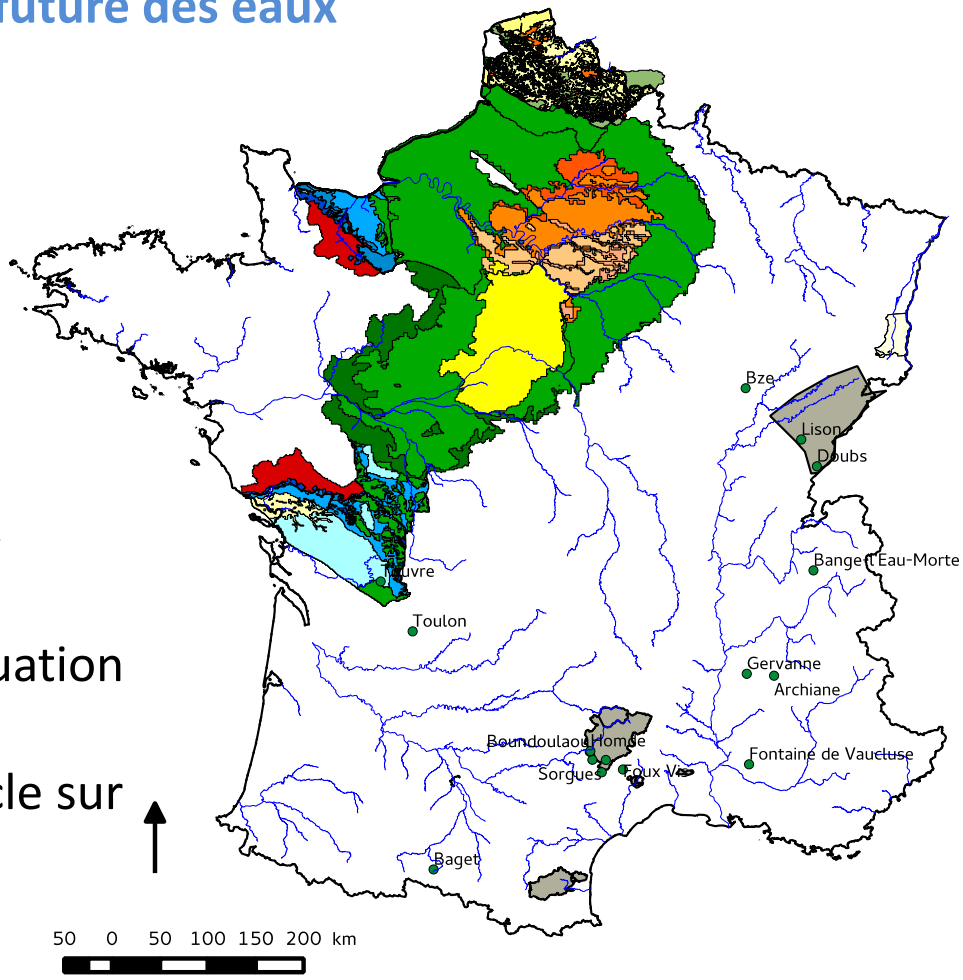


Le projet Aqui-FR:

Un outil pour améliorer nos connaissances sur l'évolution passée, présente et future des eaux souterraines en France

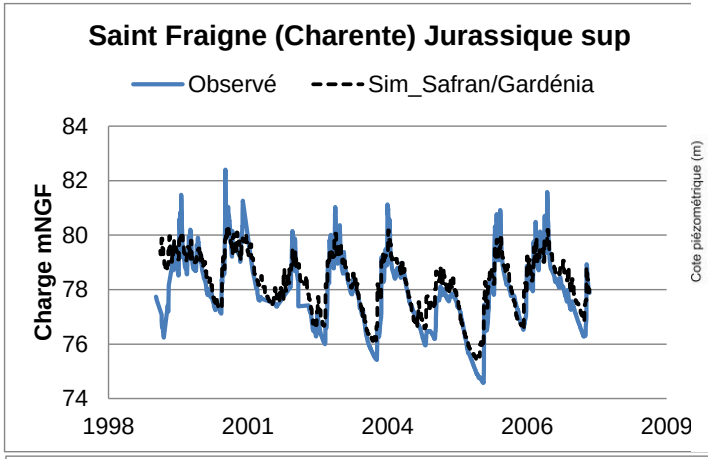
Etudes menées à ce jour

- Recalage des applications hydrogéologiques avec les flux Safran-Surfex
- Réanalyse 1958-2017 en cours d'évaluation
- Projections climatiques RCP 8.5 et réanalyse historique sur le XXème siècle sur la Seine

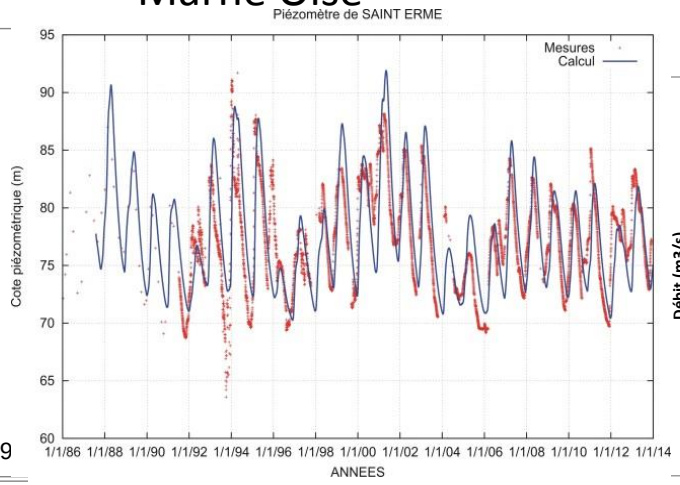


Aqui-FR: Mise en place des applications:
Recalage avec les flux Safran-Surfex

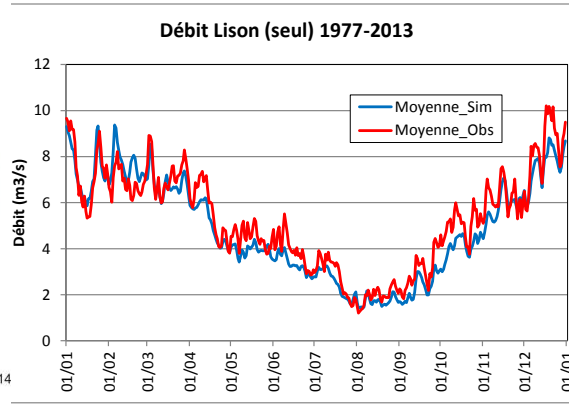
MARTHE
Poitou Charente



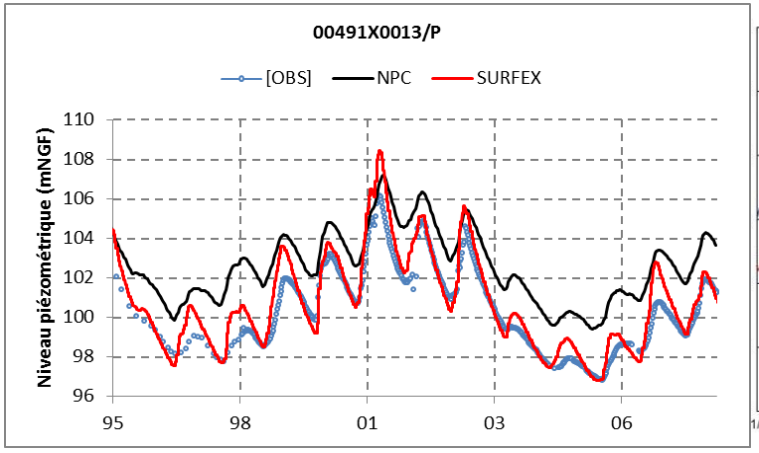
Eau-dyssée
Marne Oise



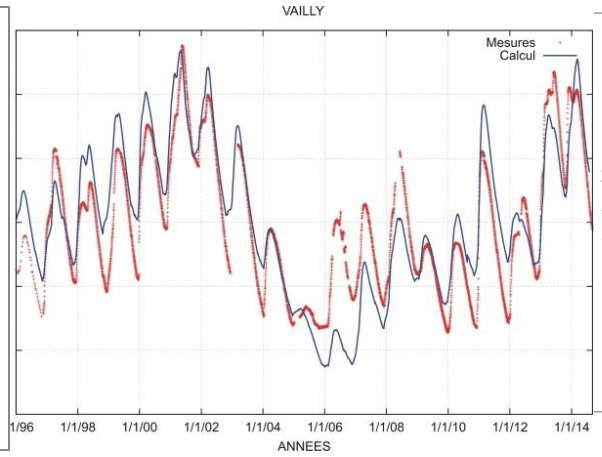
Gardénia
Karst du Lison



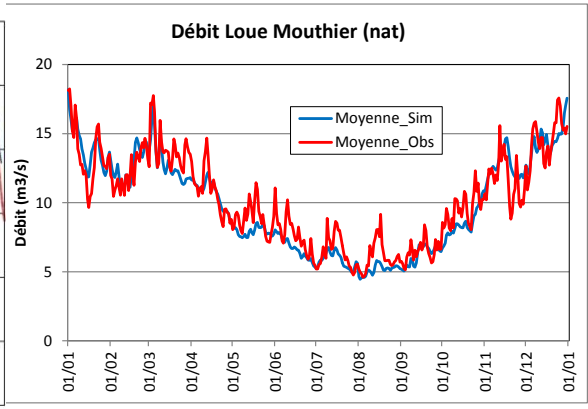
Nord Pas de Calas



Marne Loing



Karst de la Loue

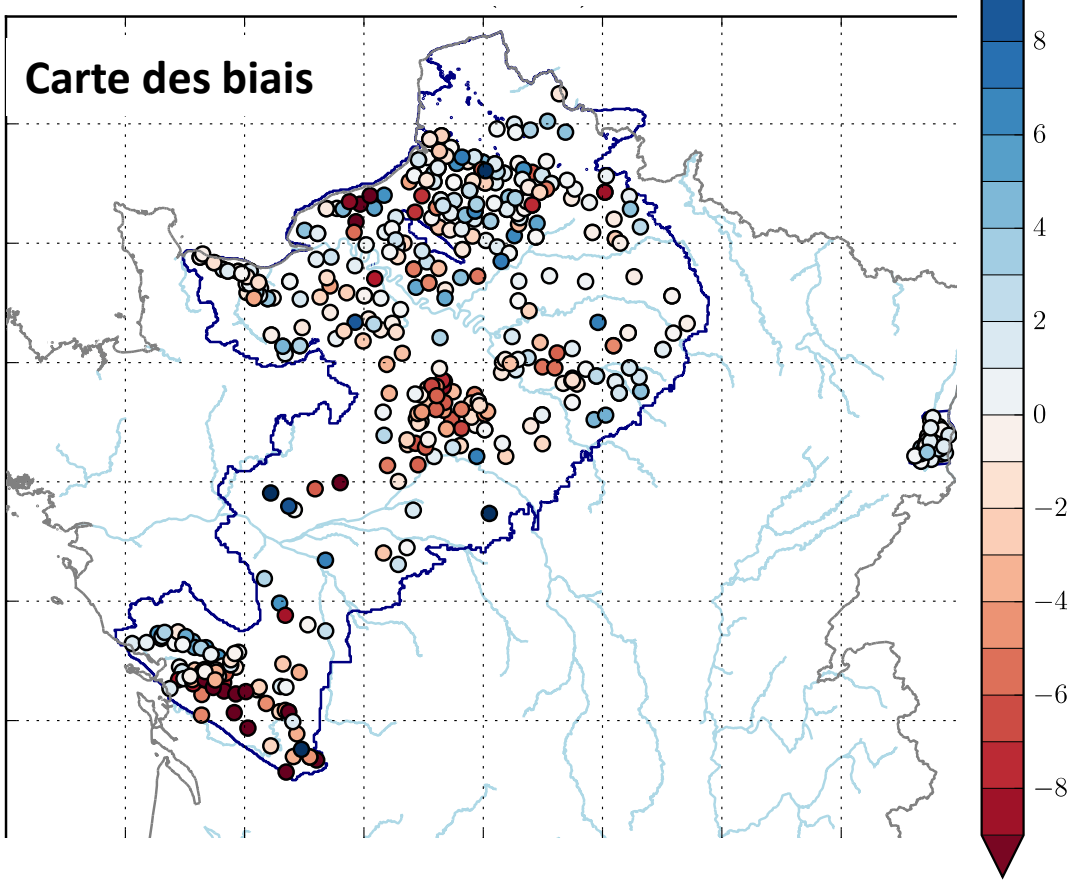


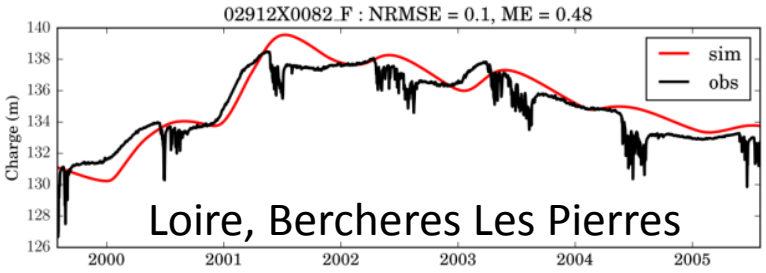
Aqui-FR: Evaluation temps présent

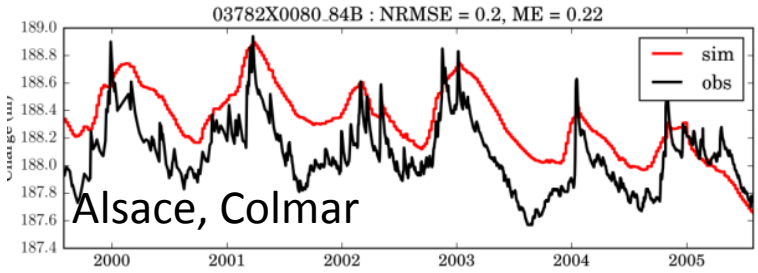
Evaluation 1999-2005,

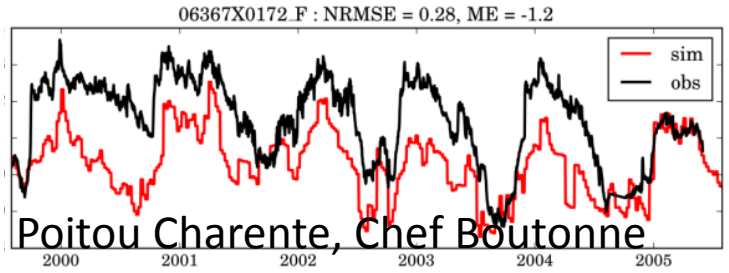
prélèvements et conditions aux limites connus

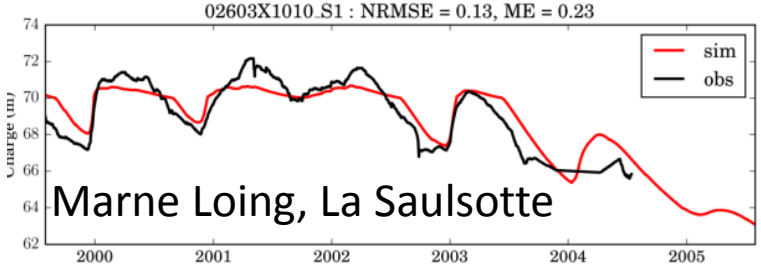
- **piézométrie**









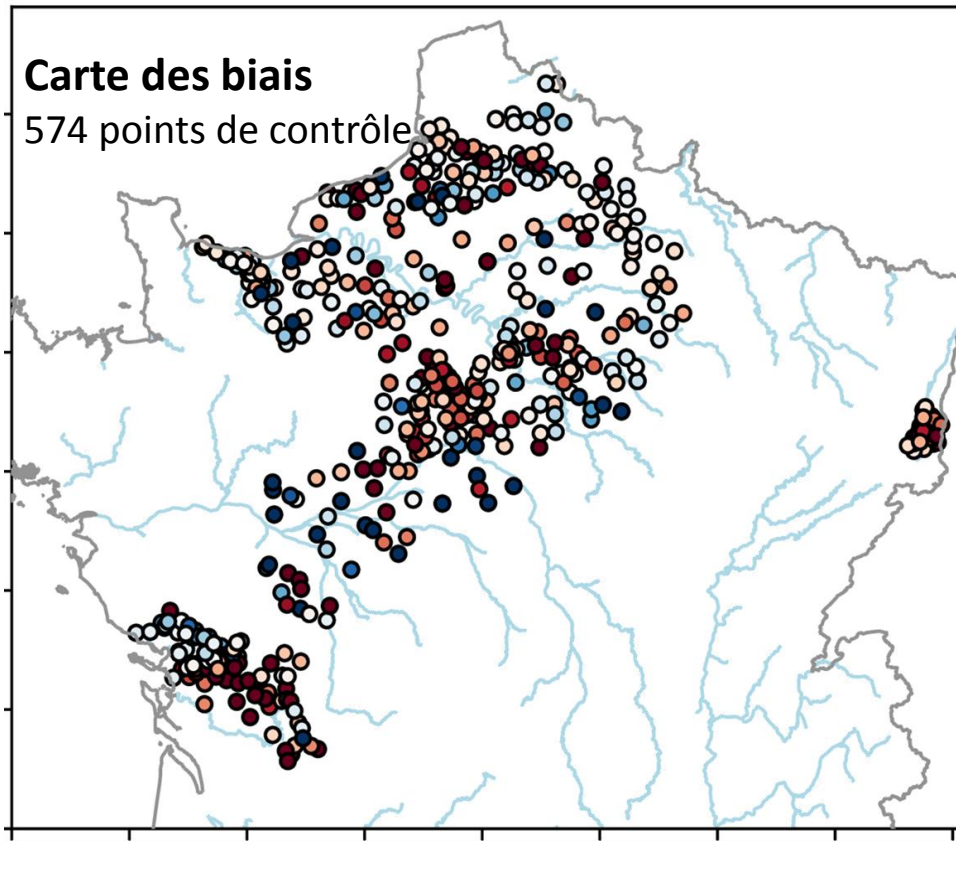


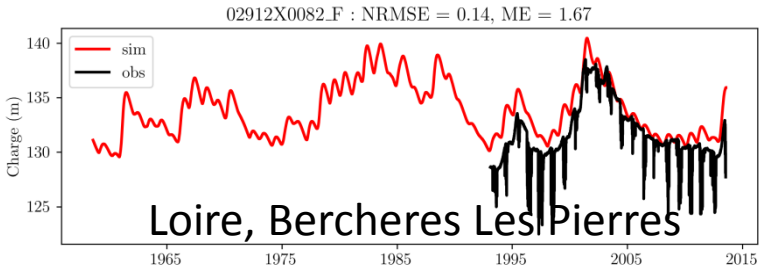
Aqui-FR: Evaluation temps présent

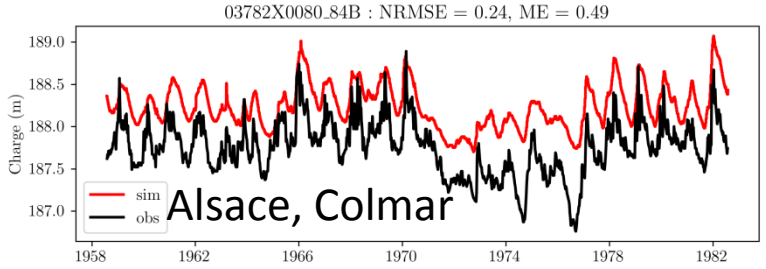
Evaluation 1958-2017,

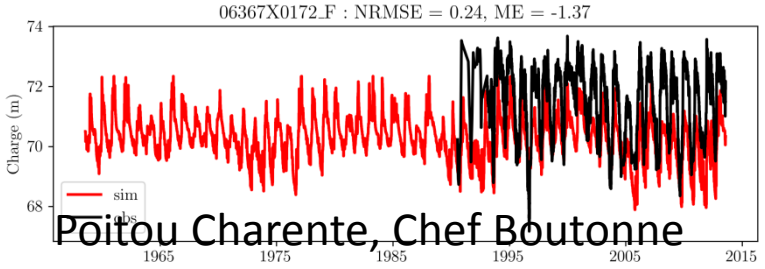
prélèvements et conditions aux limites mal connus

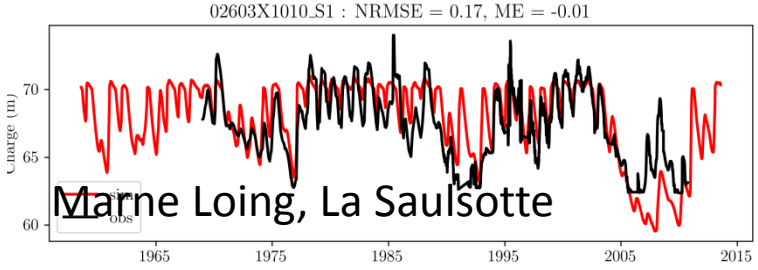
- **piézométrie**









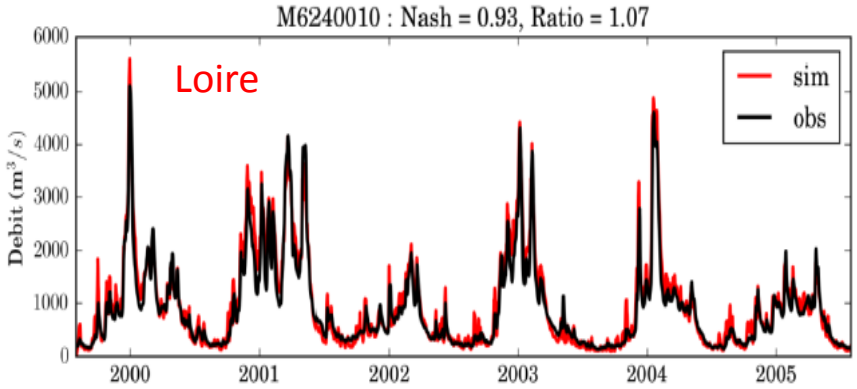


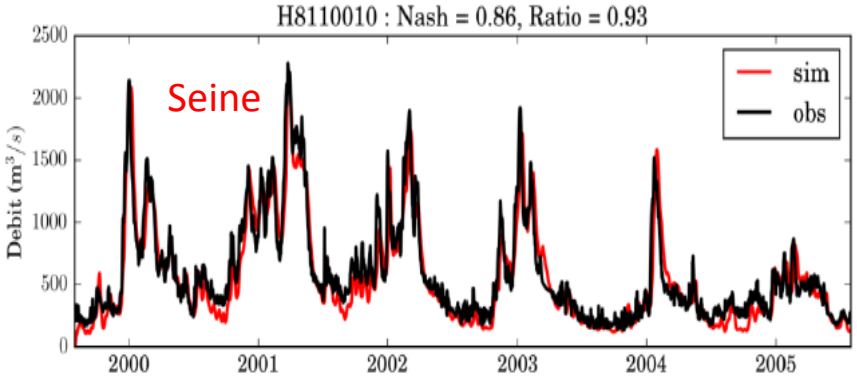
Aqui-FR: Evaluation temps présent

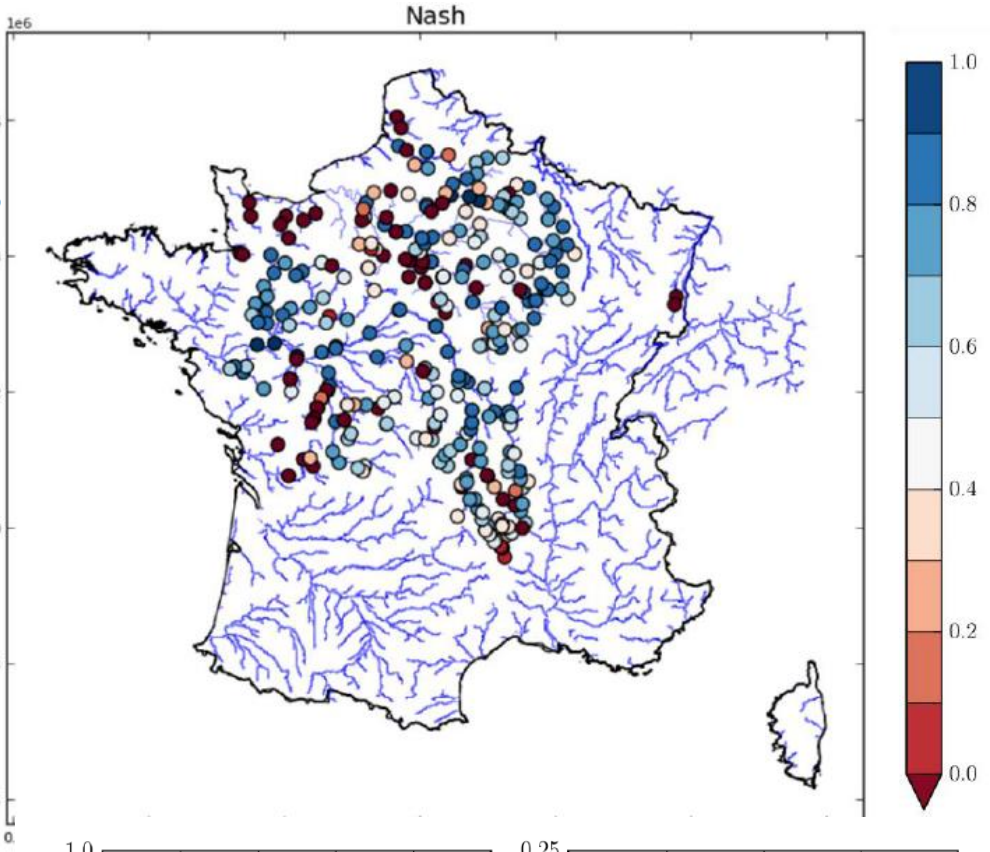
Evaluation 1999-2005,

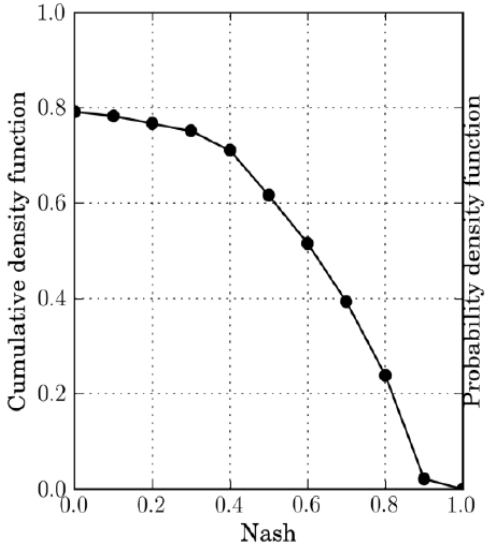
prélèvements et conditions aux limites connus

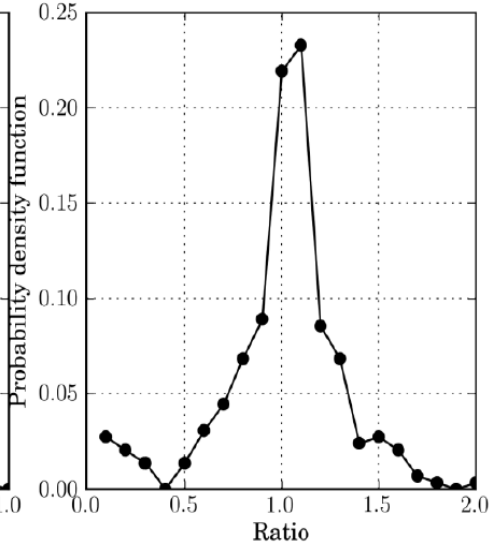
- **débits**









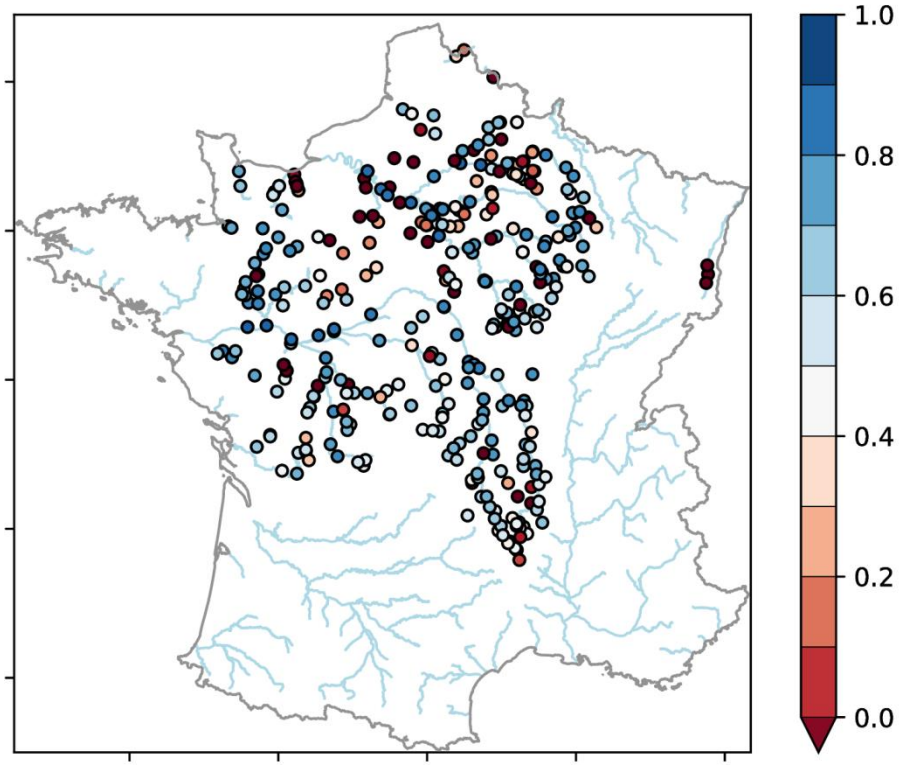


Aqui-FR: Evaluation temps présent

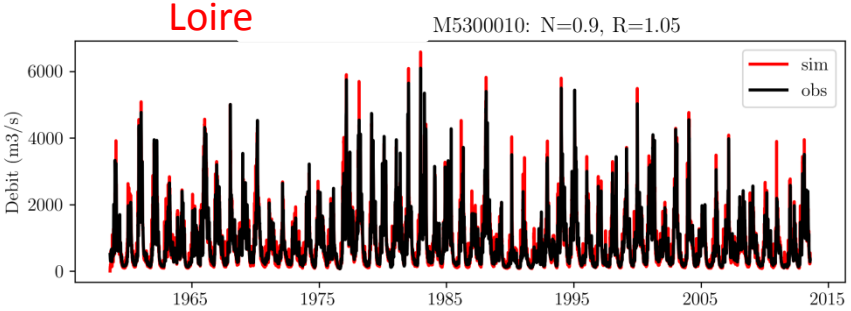
Evaluation 1958-2017,

prélèvements et conditions aux limites mal connus

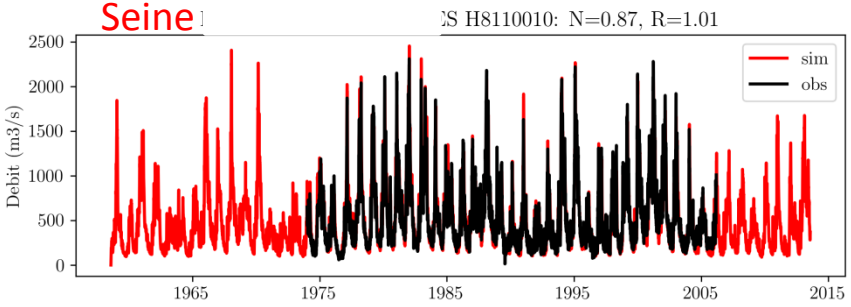
- **débits**

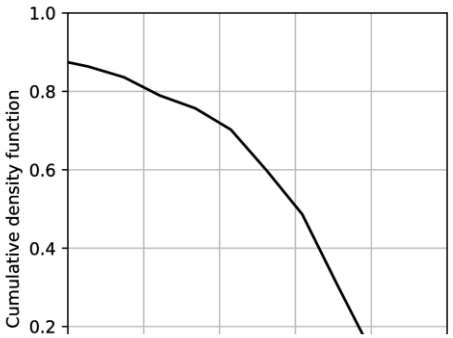


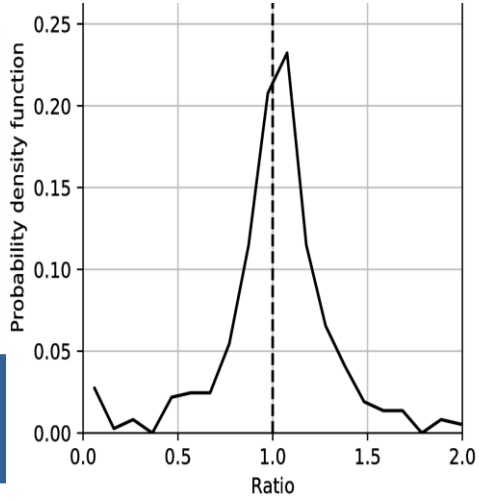
Loire



Seine





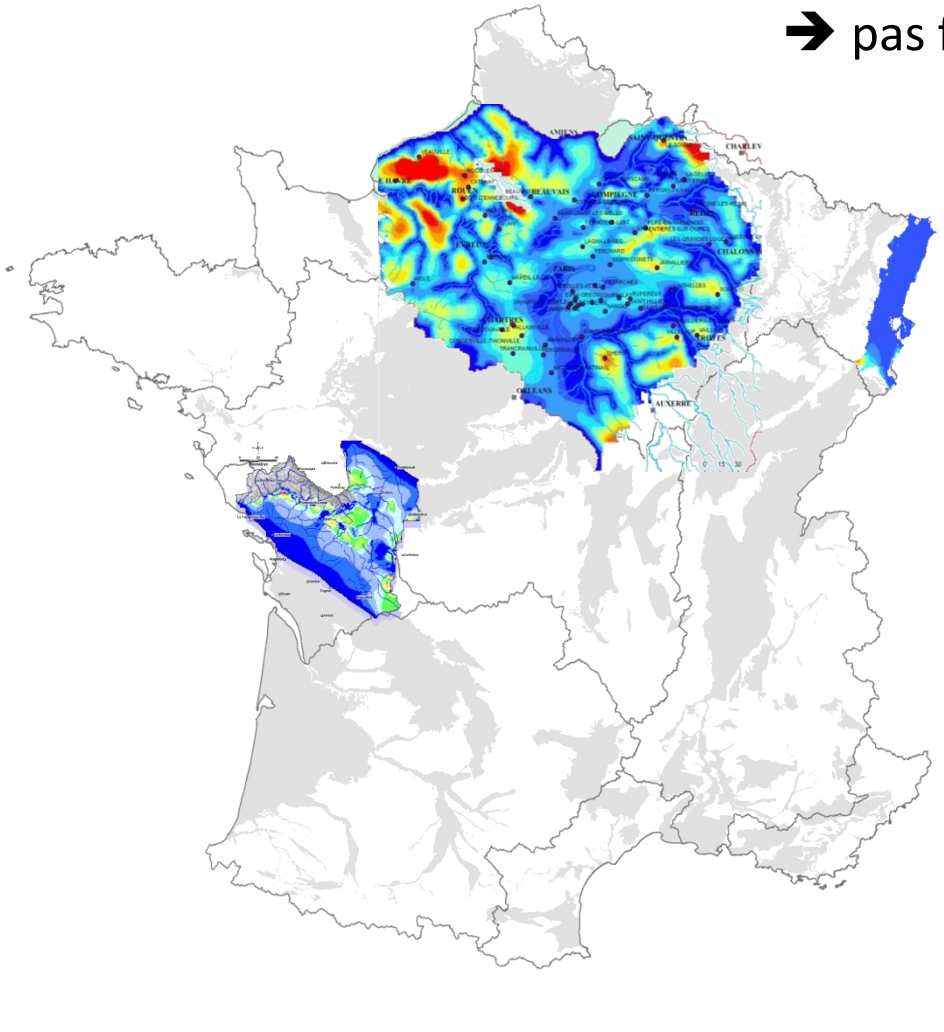


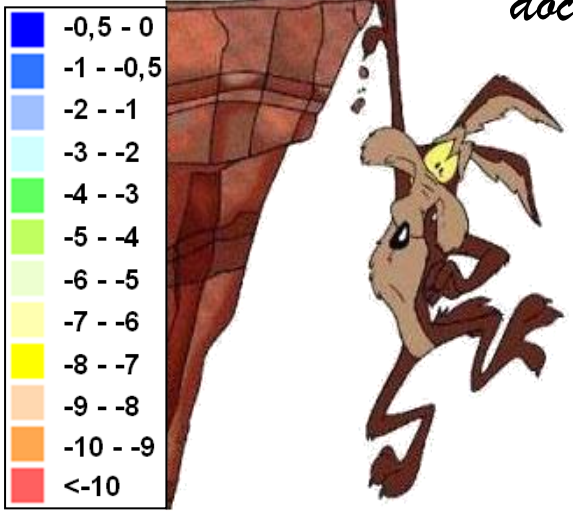
Longue durée nécessaire pour avoir un état des normales
Mais, incertitudes sur l' état initial et les prélèvements…

Représentation cartographique

Niveau piézométrique en m, ou évolution en m

➔ pas facile à interpréter





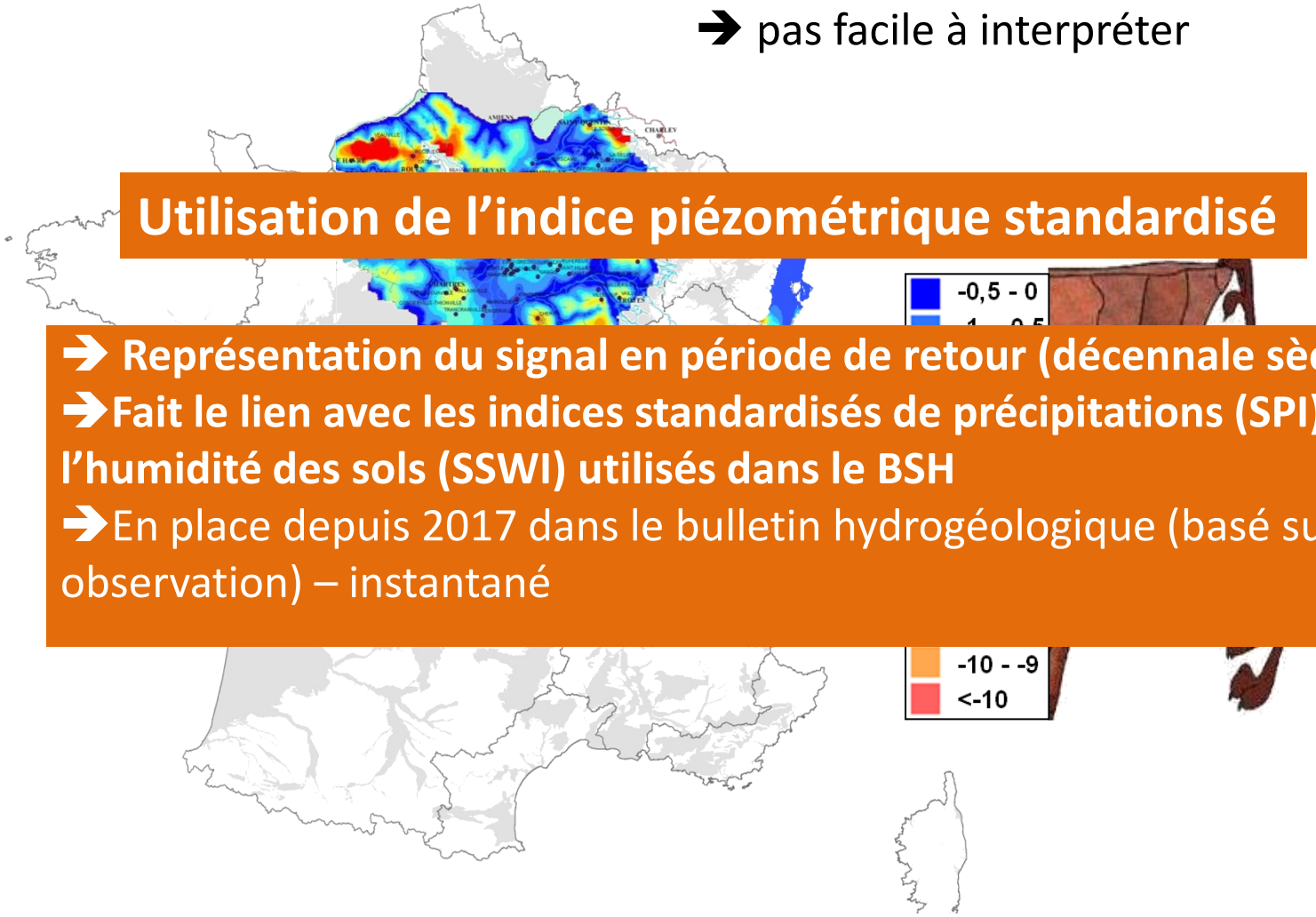
C'est grave docteur ?

➔ Ponctuellement, diminution du niveau de plus de10m

Représentation cartographique

Niveau piézométrique en m, ou évolution en m

➔ pas facile à interpréter



Utilisation de l'indice piézométrique standardisé

C'est grave docteur ?

➔ Représentation du signal en période de retour (décennale sèche, humide…)

➔Fait le lien avec les indices standardisés de précipitations (SPI) et de l'humidité des sols (SSWI) utilisés dans le BSH

➔En place depuis 2017 dans le bulletin hydrogéologique (basé sur les observation) – instantané

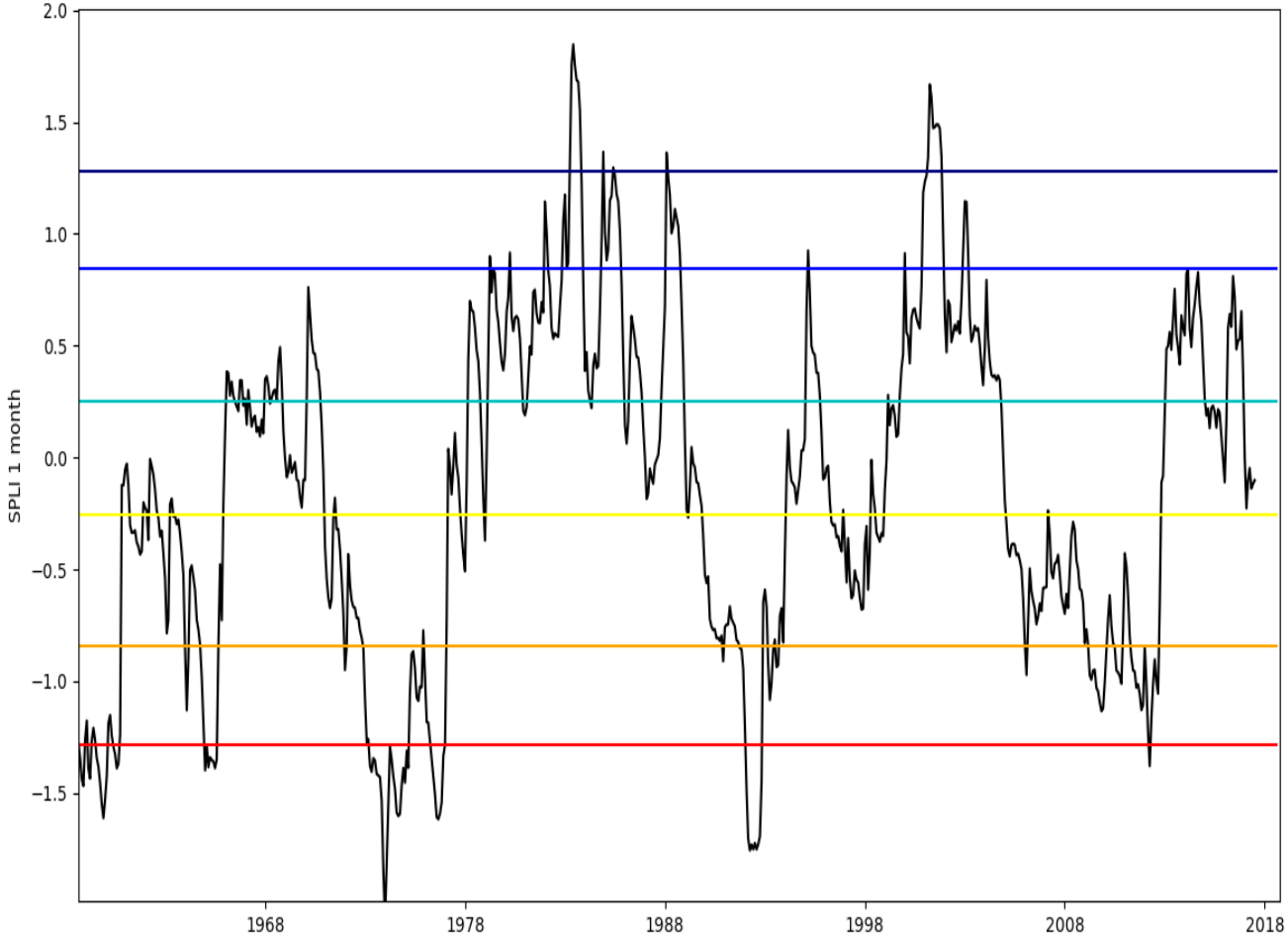
➔ Ponctuellement, diminution du niveau de plus de10m

explore 2070

Premiers résultats longue durée 1958-2017

- IPS moyen sur tout le domaine Aqui-FR
  - Période de référence de 1981 to 2010

Forte variabilité pluriannuelle



> 10 ans humide

> 5 ans humide

> 2.5 ans humide

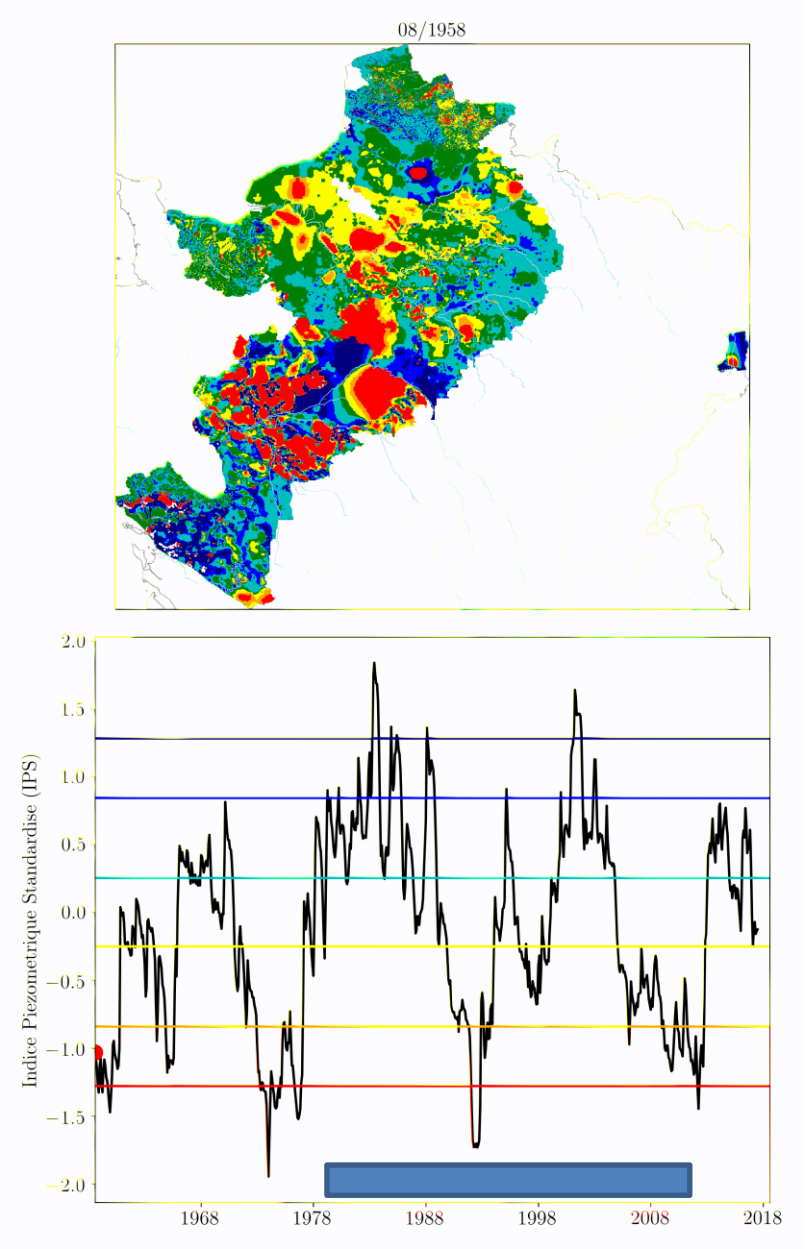
> 2.5 ans sec

> 5 ans sec

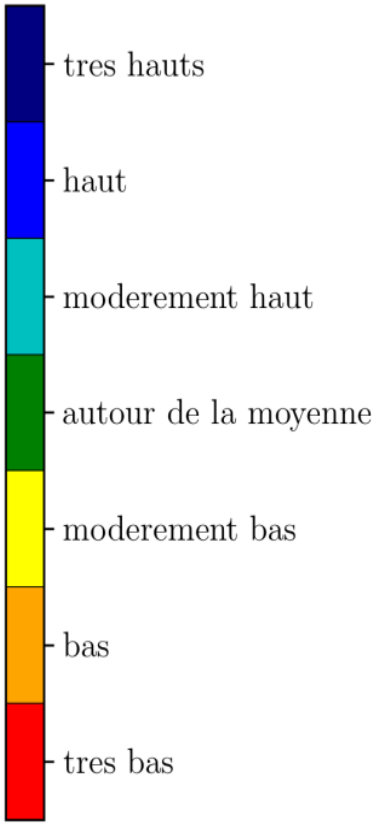
> 10 ans sec

Premiers résultats longue durée 1958-2017

IPS moyen sur tout domaine Aqui-FR
Période de référence 1981 to 2010

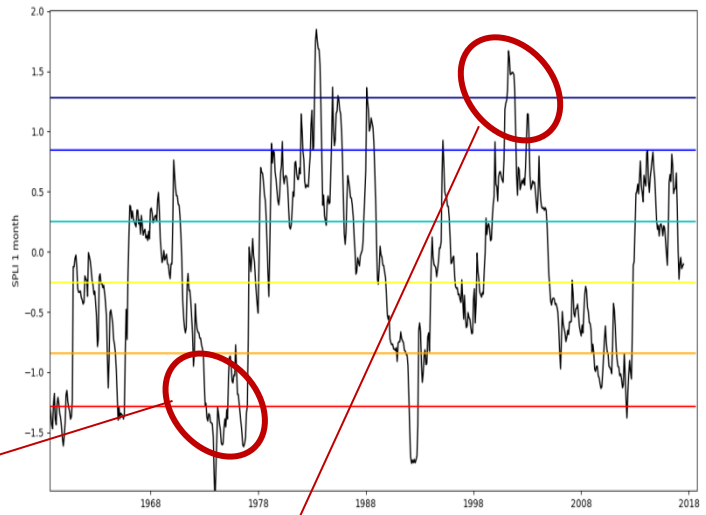


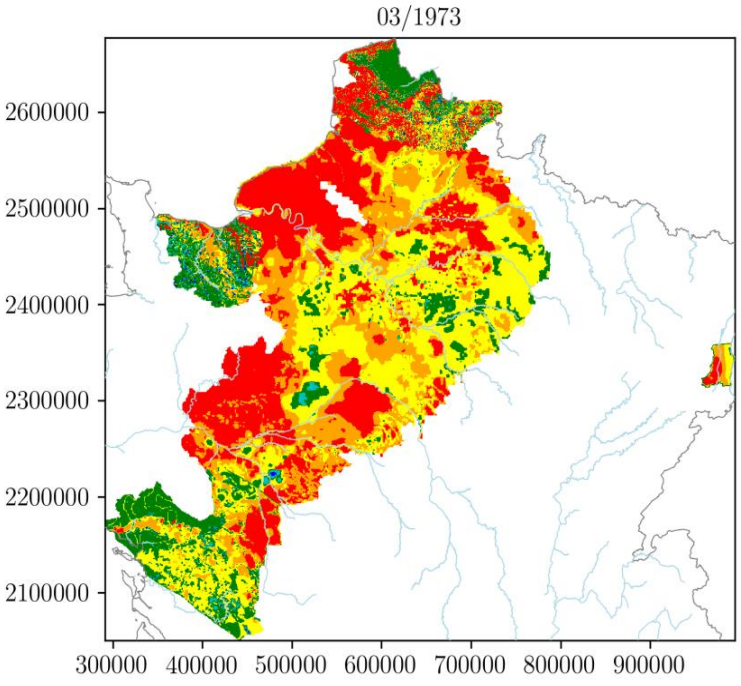
Forte variabilité pluriannuelle

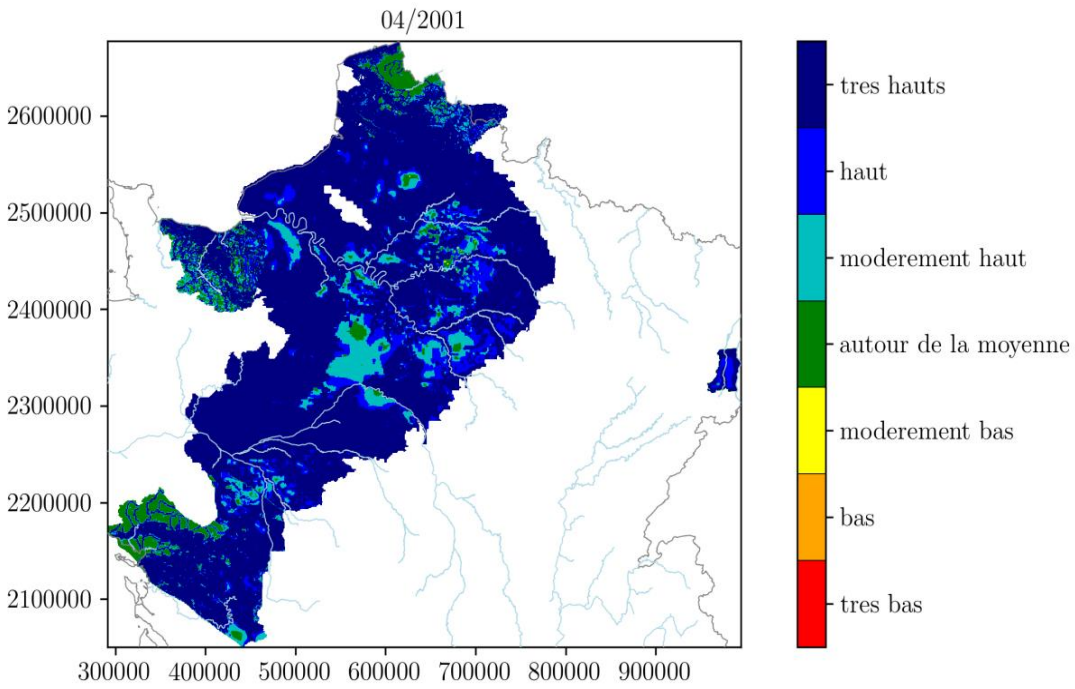


Premiers résultats longue durée

- IPS moyen sur tout le domaine Aqui-FR
  - Situation sur deux extrêmes

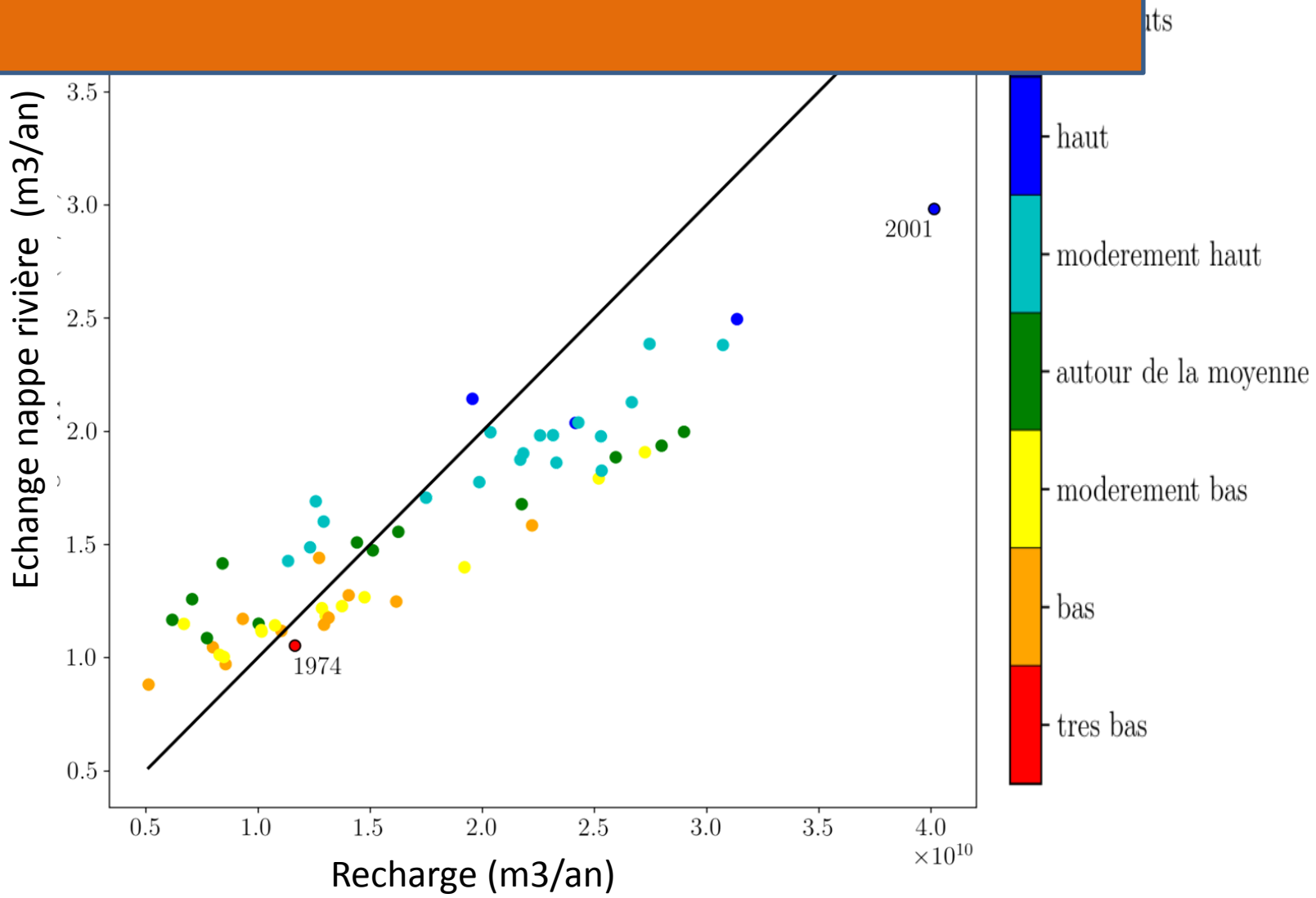






Premiers résultats longue durée 1958-2017

Recharge: de 5 à 40 Milliard de m3/an
Prélèvements en nappe ~2.6 Milliard de m3/an

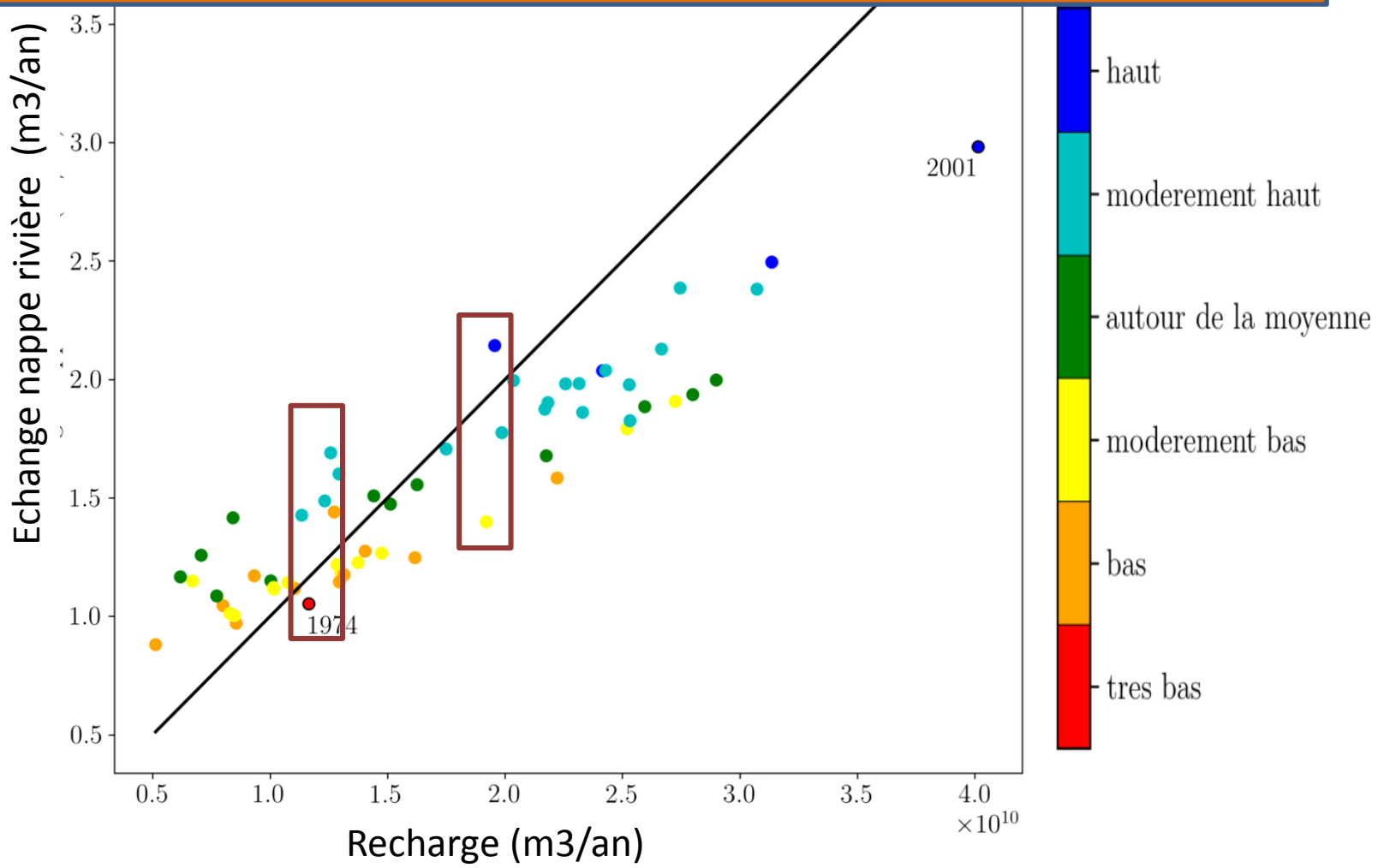


Premiers résultats longue durée 1958-2017

Pour une même valeur de recharge :

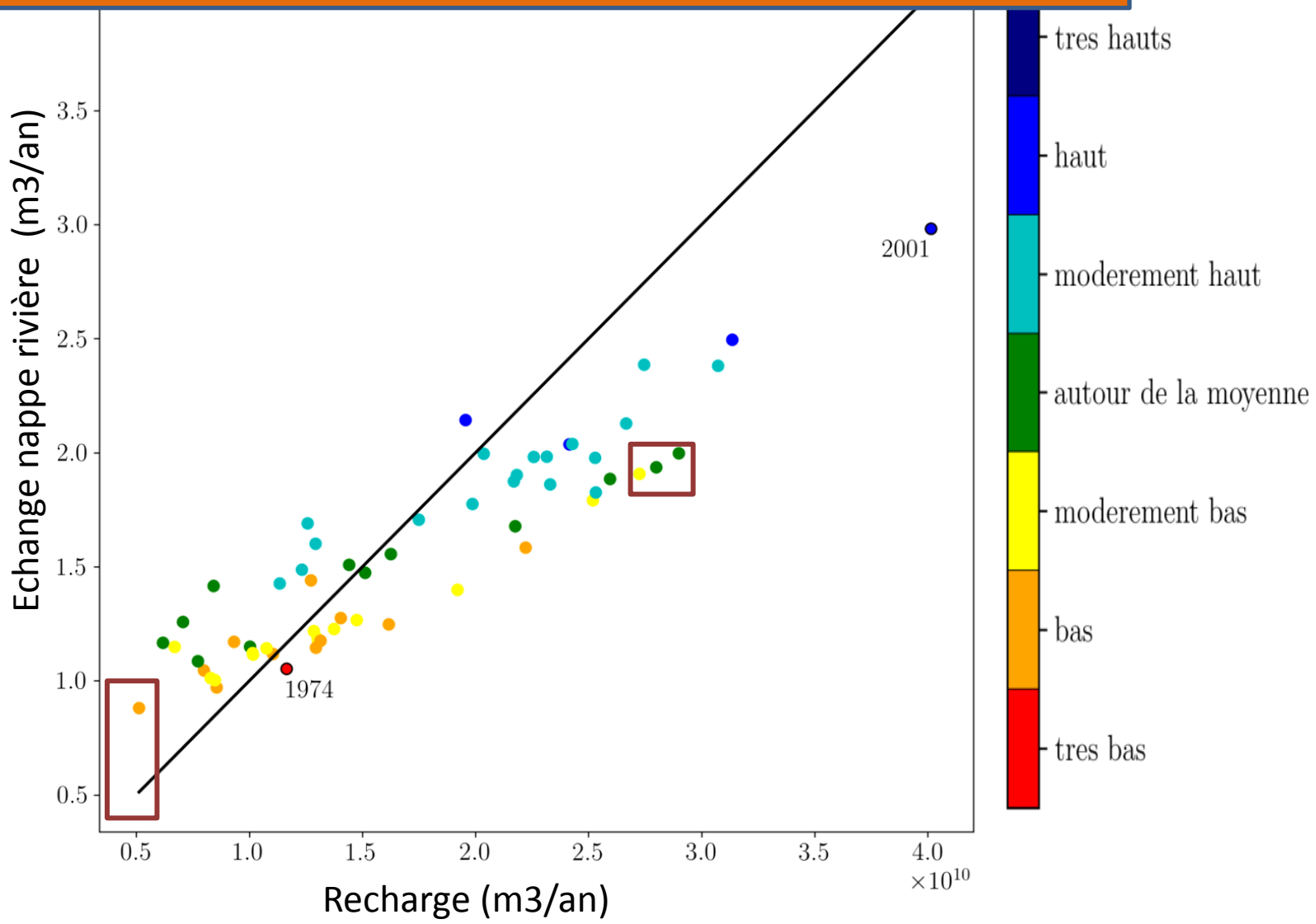
- **les échanges nappes rivières peuvent varier de plus de 60%**
- **L'IPS varie de très sec à humide**

➔ **lié à la dynamique de la nappe**



Premiers résultats longue durée 1958-2017

- **les échanges nappes rivières peuvent représenter de 66% à 180% de la recharge**



Etude de cas:

- Sécheresse 2017
- Inondation 2016

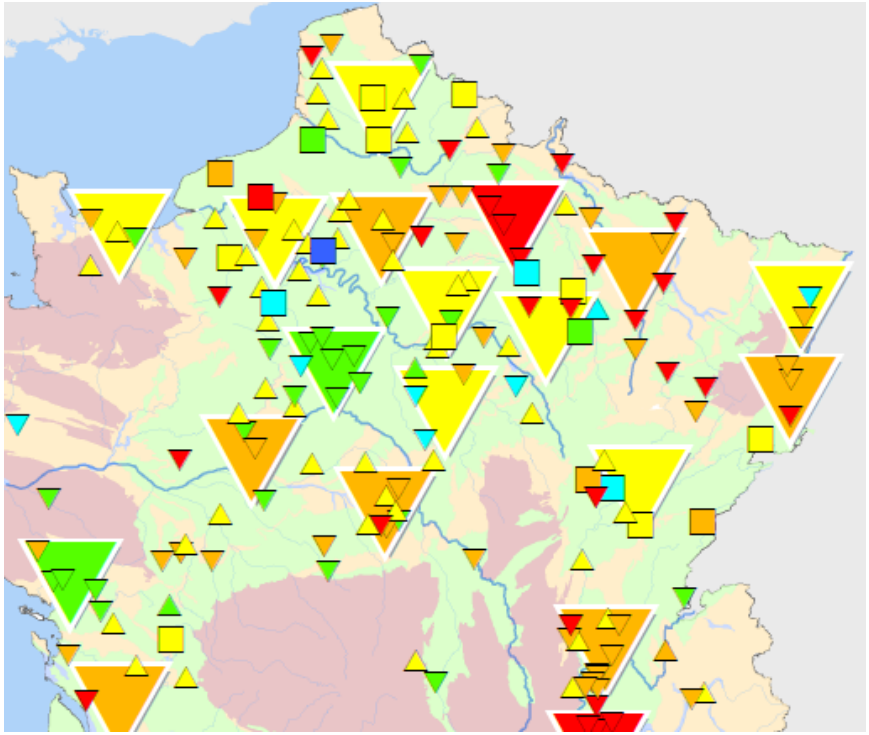
Analyse très succincte à ce stade….

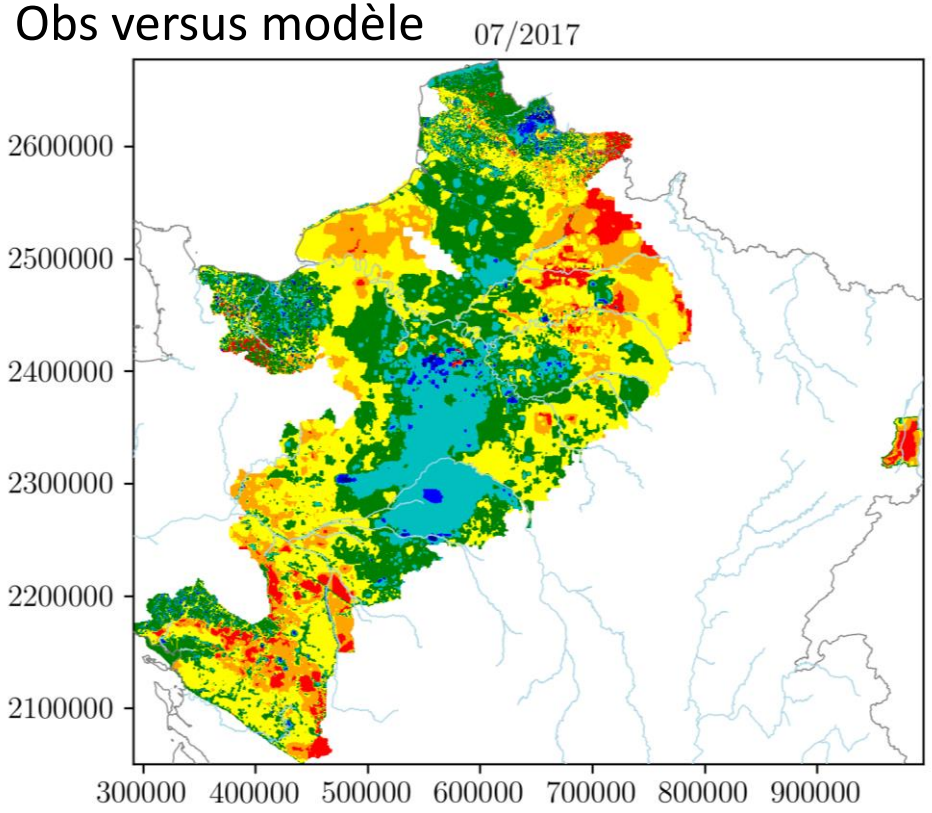
Etude de cas:

Sécheresse 2017 ➔ Uniquement jusqu'en Juillet à ce stade

- **Situation en juillet 2017**

Comparaison Indice piézo standardisé Obs versus modèle



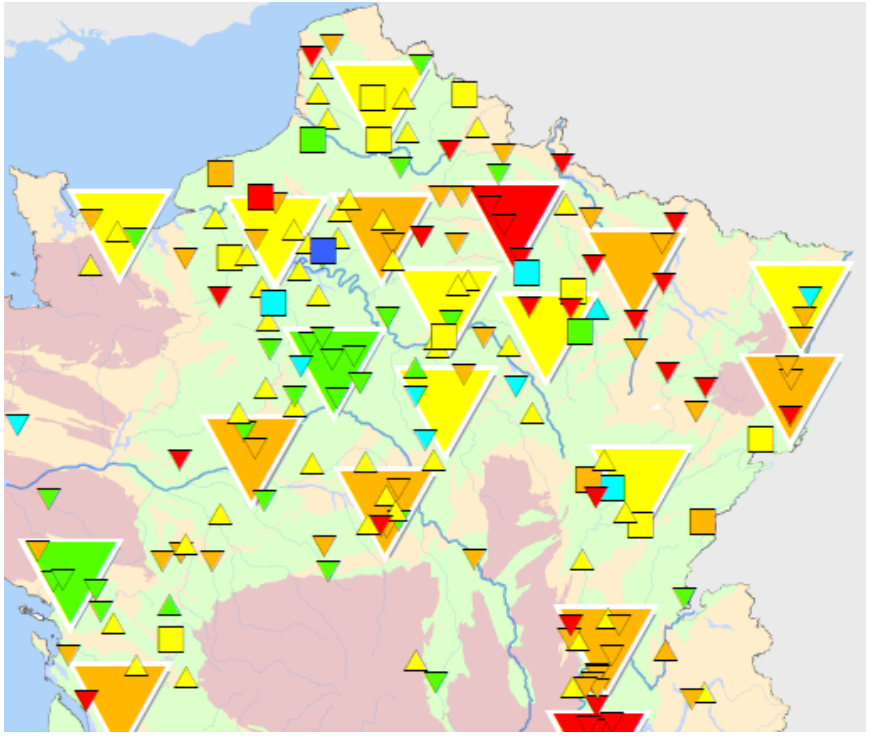


Bon accord général, mais, la situation s 'est dégradée après, principalement dans le Sud

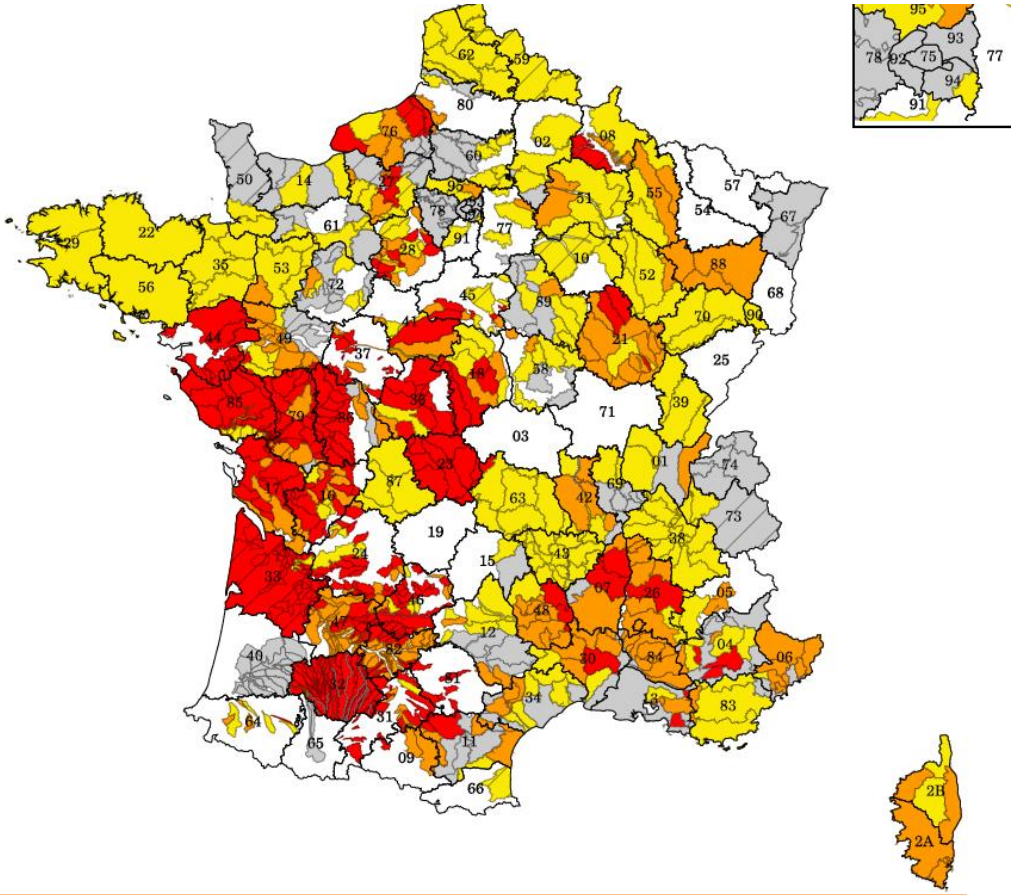
Etude de cas:

Sécheresse 2017 ➔ Uniquement jusqu'en Juillet à ce stade

- **Situation en juillet 2017**



- **Situation en Septembre 2017**



Bon accord général, mais, la situation s 'est dégradée après, principalement dans le Sud

Etude de cas:

Inondation 2016 sur les bassins Seine et Loire ➔ Qqs informations préliminaires

Evolution du cumul de précipitations

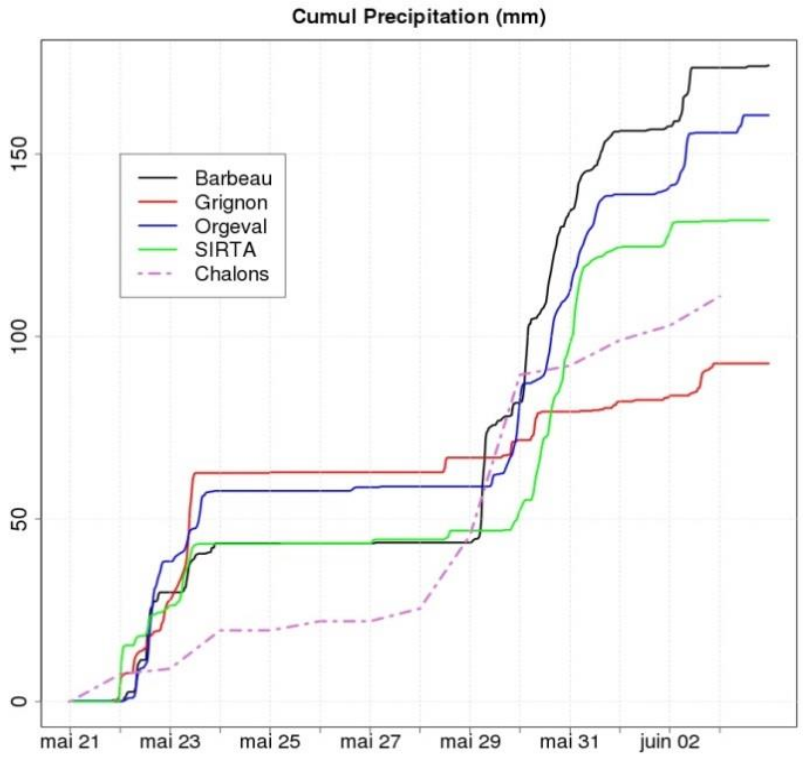
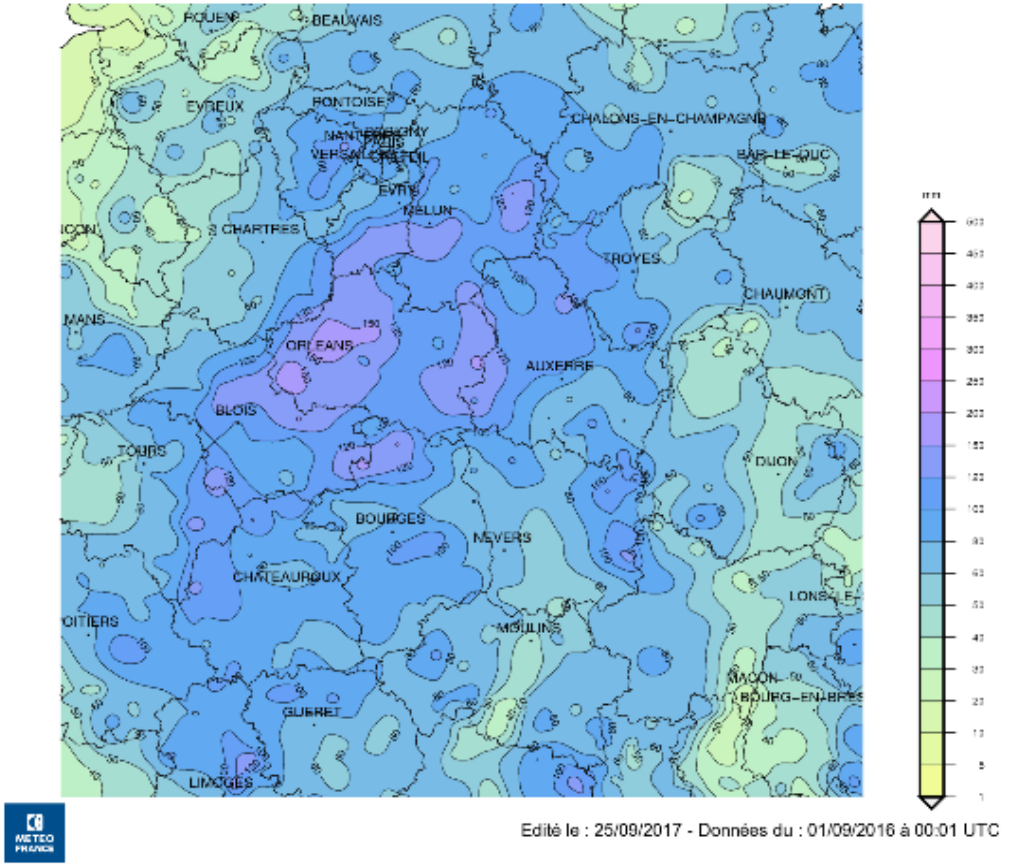


Figure 1 Cumul des précipitations du 21 Mai au 3 Juin sur les 5 sites de mesure

Cumul de précipitations du 28 Mai au 1er Juin

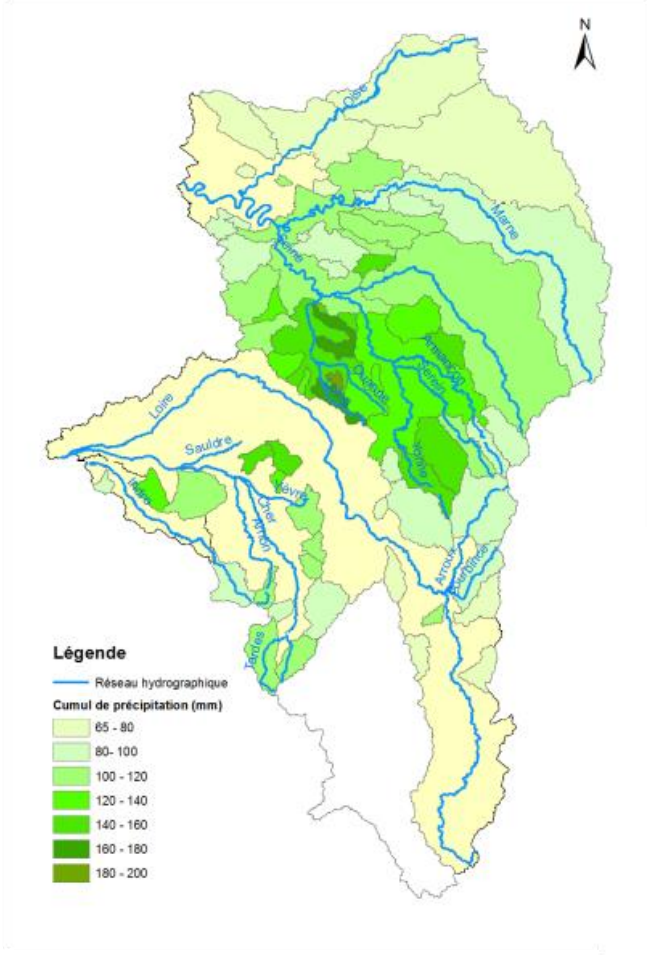


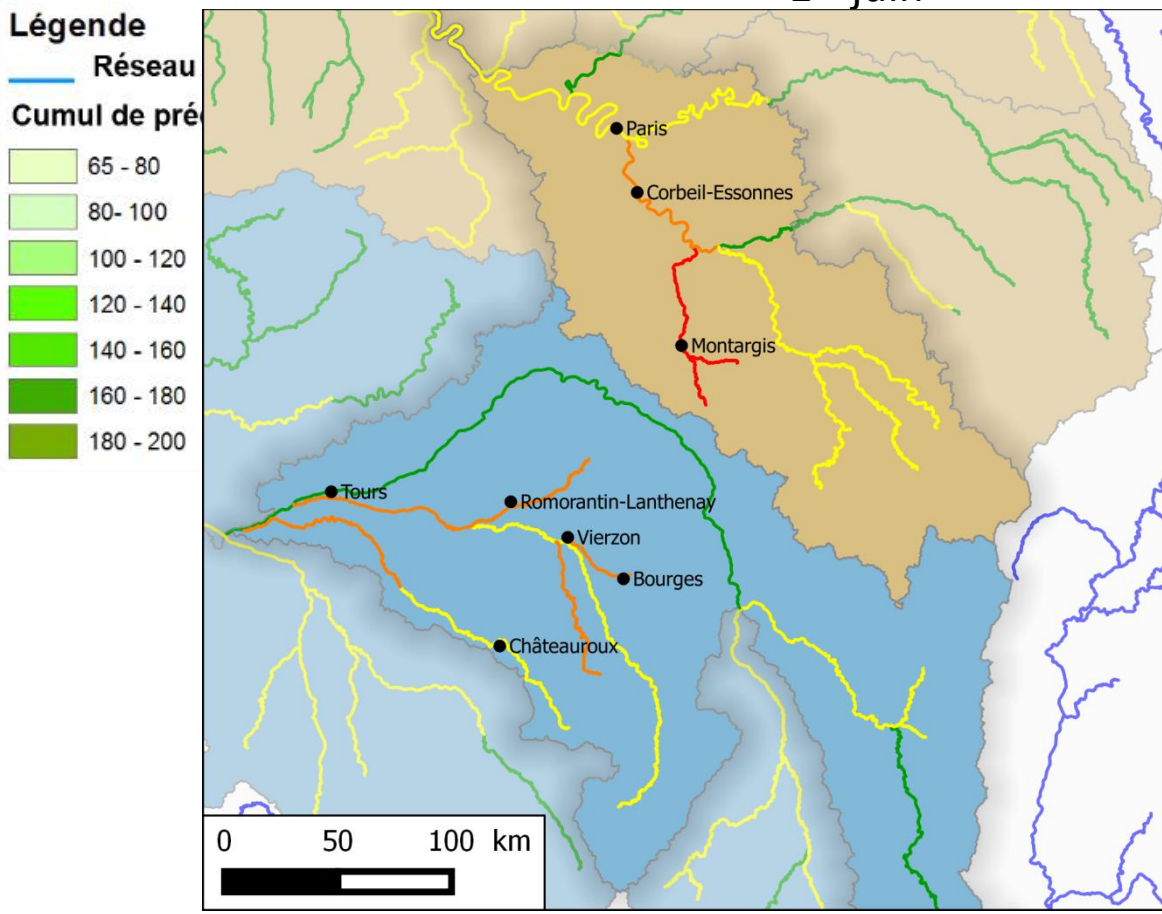
Source: Séminaire SHF

Etude de cas:

Inondation 2016 sur les bassins Seine et Loire ➔ Qqs informations préliminaires

Précipitations du 28 Mai au 10 juin

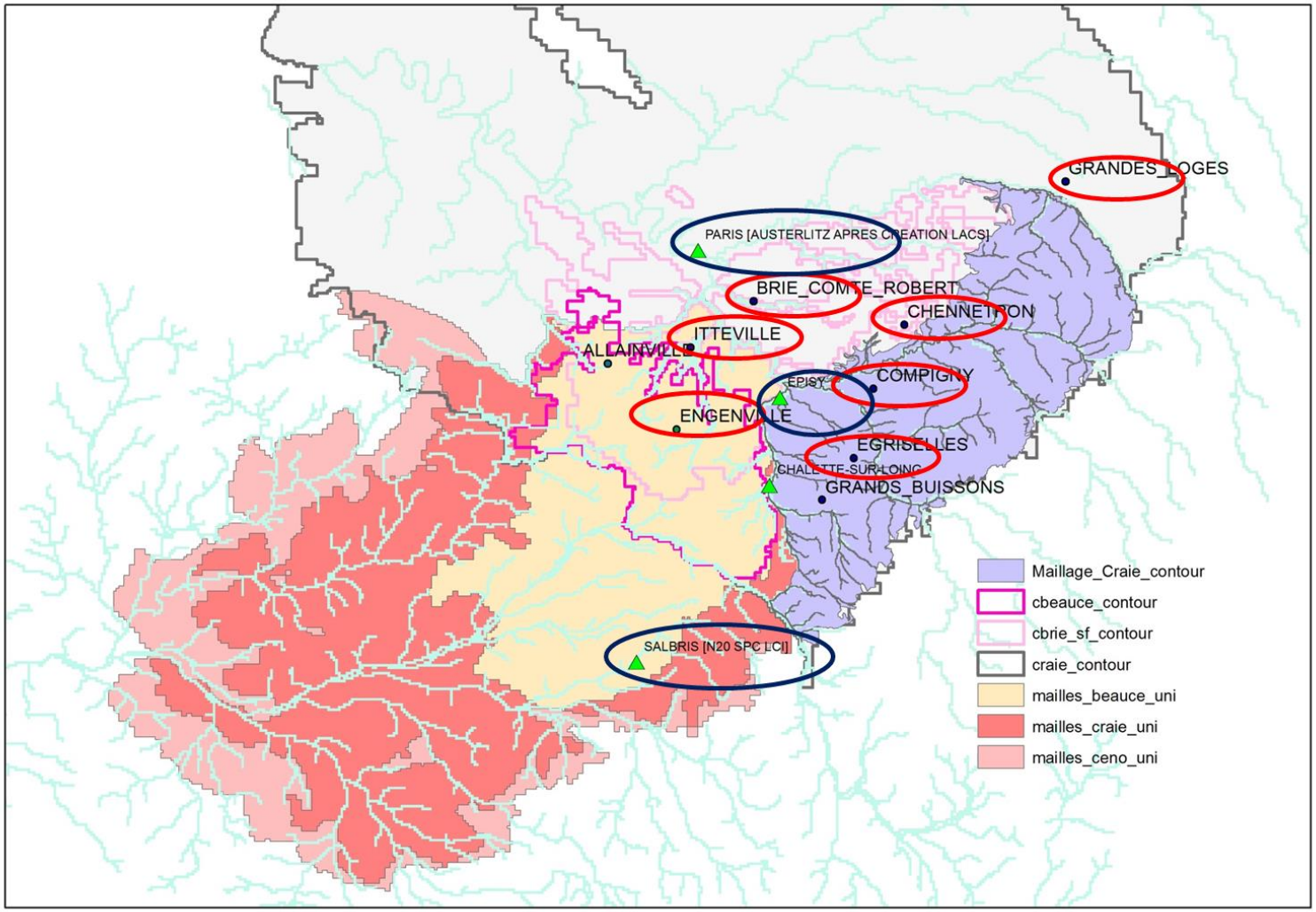




Source: Séminaire SHF

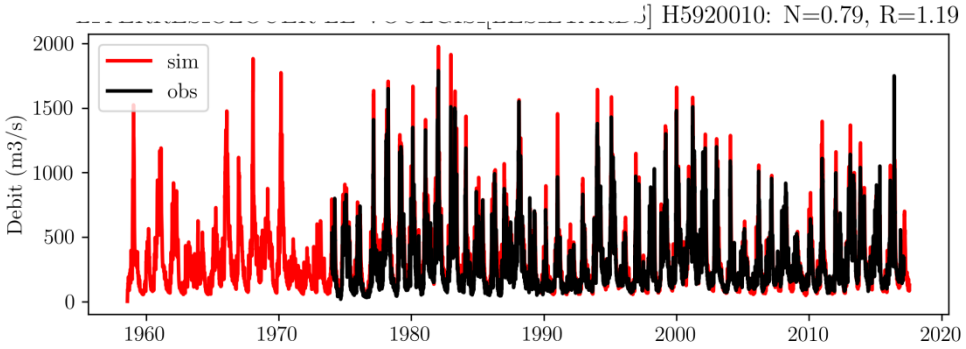
Etude de cas:

Inondation 2016 sur les bassins Seine et Loire ➔ Qqs informations préliminaires



Source: Séminaire SHF

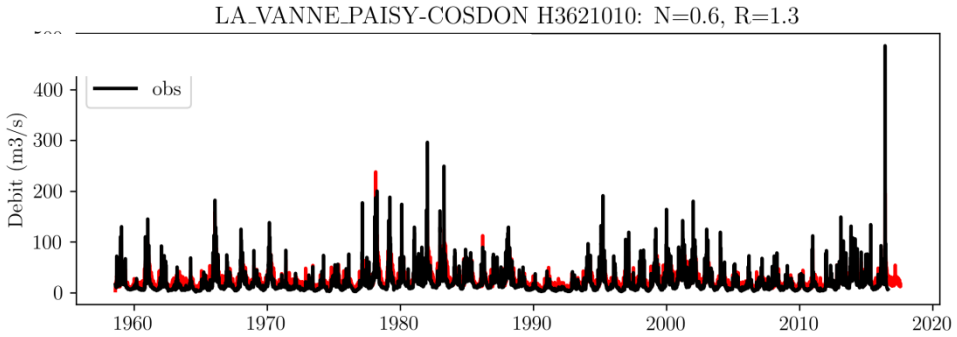
Etude de cas: inondation 2016 Comparaison aux débits obs

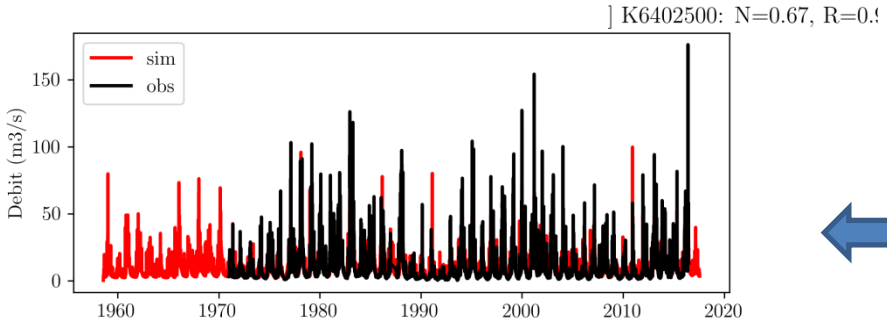


Seine à Paris : Juin 2016
Crue non exceptionnelle
(à part la période)

Loing à Episy ➔ crue exceptionnelle

#LA_SAULDRE_A_SALBRIS

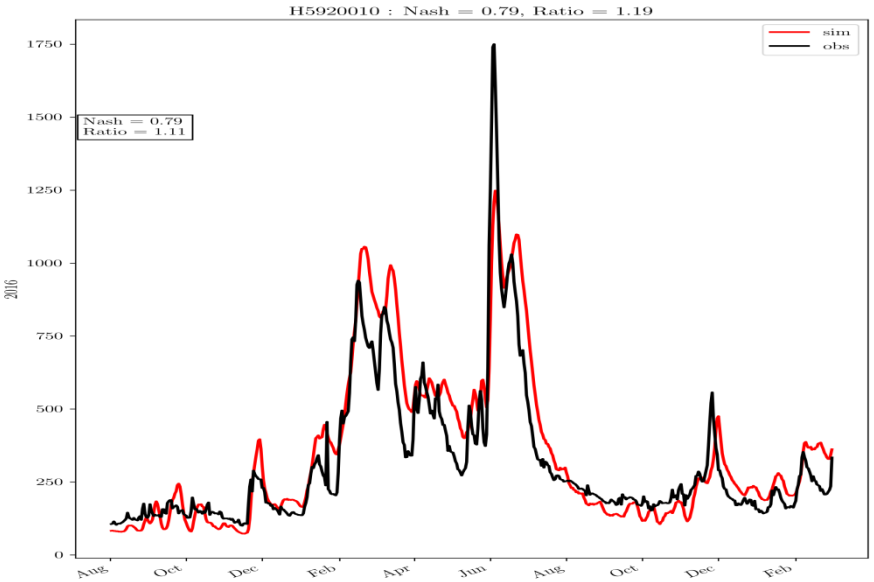




Sauldre à Salbris ➔ forte crue

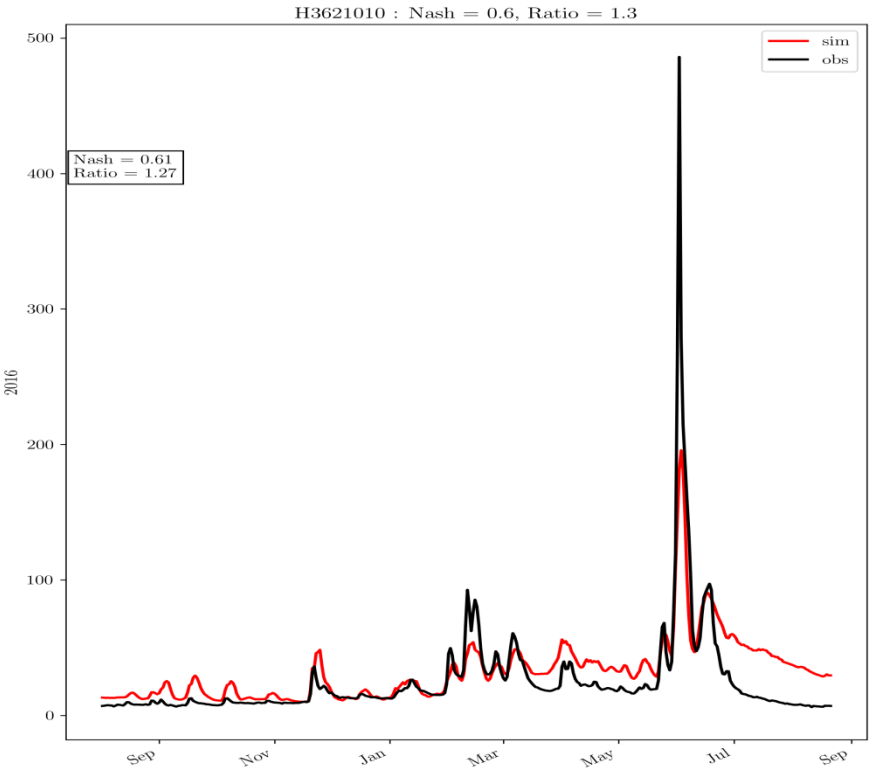
Etude de cas: inondation 2016

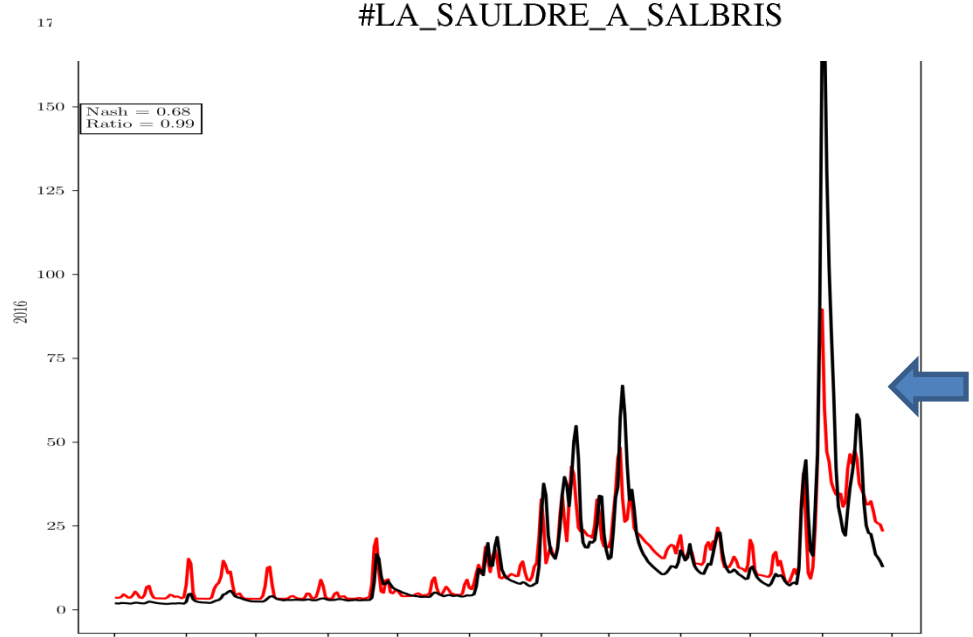
Comparaison aux débits obs



Seine à Paris : Juin 2016
Pointe reconsidérée à 1700 m³/s
⇒ modèle ~ 1200m3/s

Loing à Episy Juin 2016: Pointe reconsidérée à 500 m³/s ⇒ modèle ~ 200m3/s





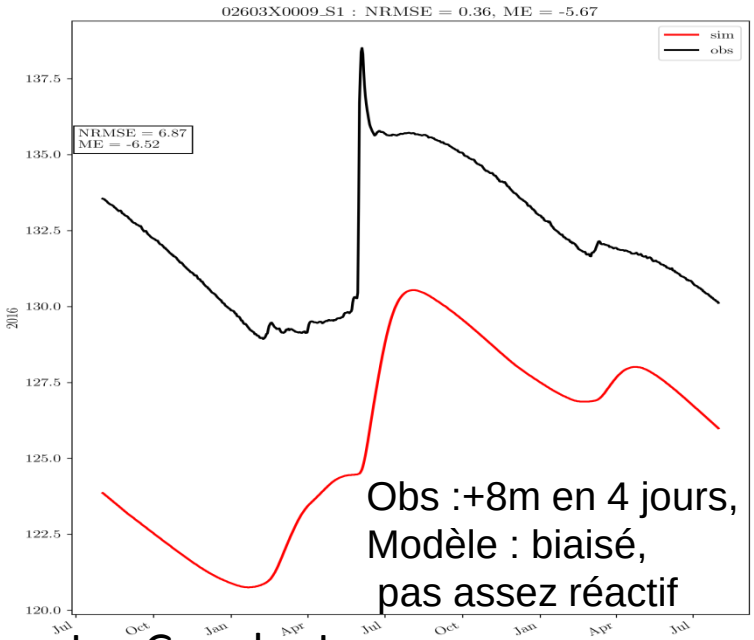
Sauldre à Salbris Juin 2016:
+160 m³/s en 4 jours
⇒ Le modèle sous estime

Etude de cas: inondation 2016

Comparaison aux piézos obs

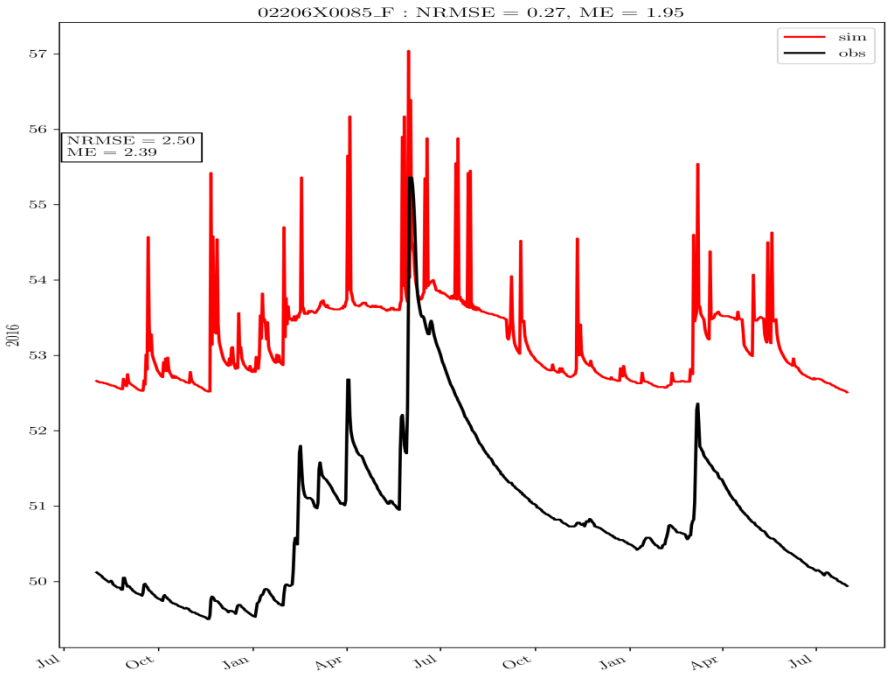
Forte réaction de certains piezos,
même loin du site max

Saint Martin Chennetron



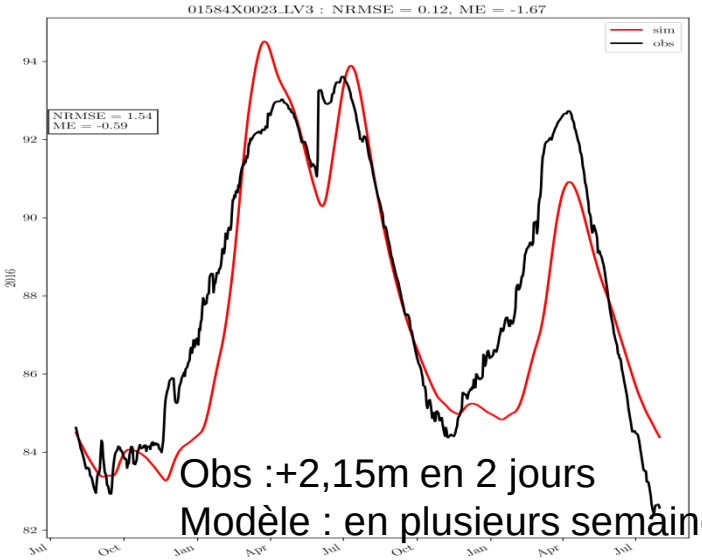
Obs :+8m en 4 jours,
Modèle : biaisé,
pas assez réactif

Brie Comte Robert



Obs :+3,7m en 3 jours
Modèle : dynamique ok, mais, biaisé

Les Grandes Loges

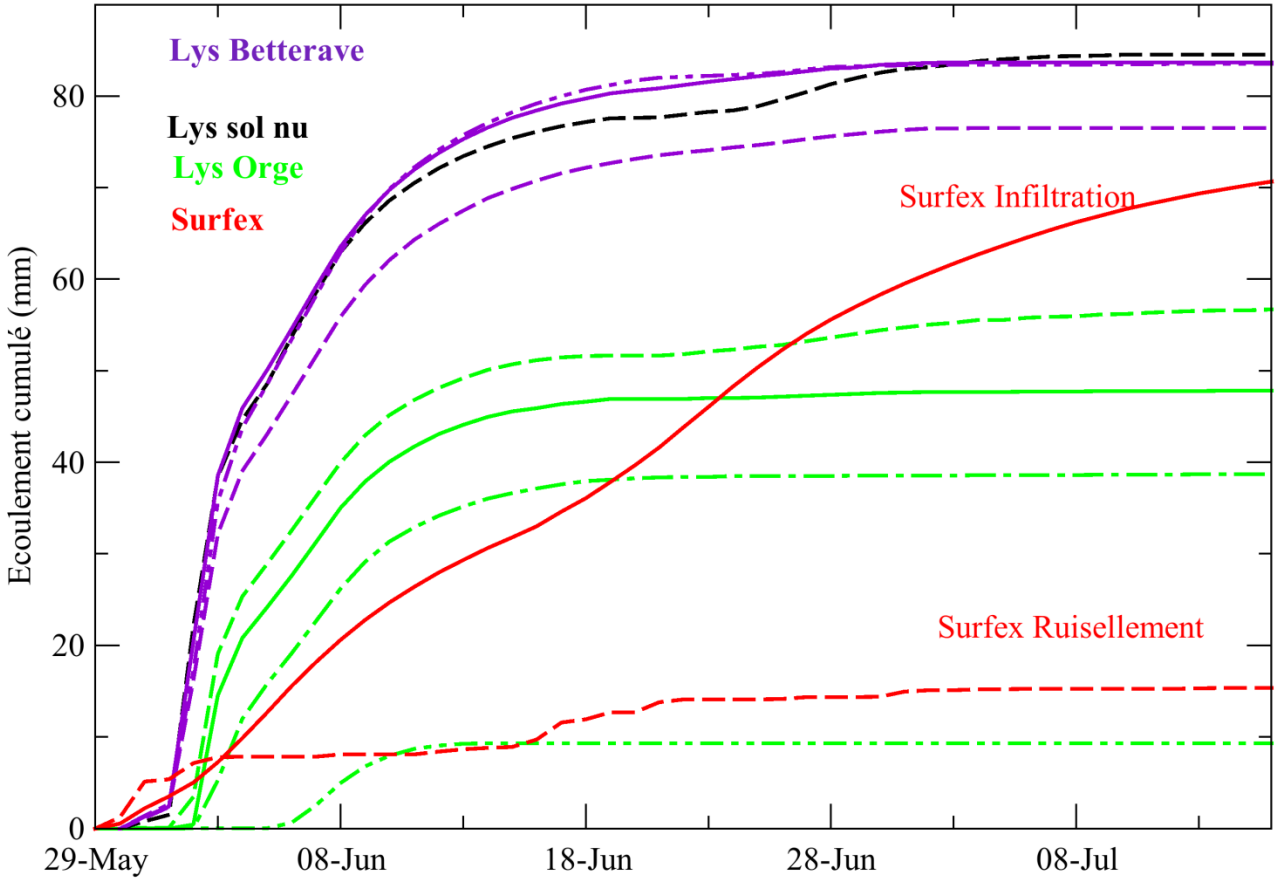


Obs :+2,15m en 2 jours
Modèle : en plusieurs semaine

Etude de cas: inondation 2016

Une des causes des erreurs est le manque de réactivité dans le calcul du bilan hydrique en surface:

Comparaison entre Surfex et Obs sur les lysimètres de l'INRA à Chalons



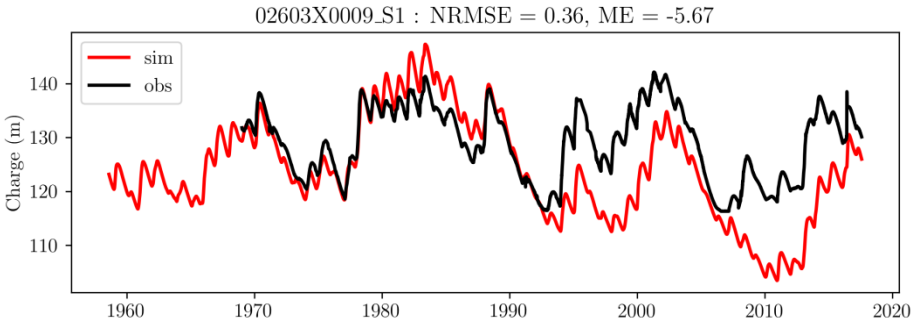
Merci à Nicolas Beaudoin, Inra

Etude de cas: inondation 2016

Comparaison aux piézos obs

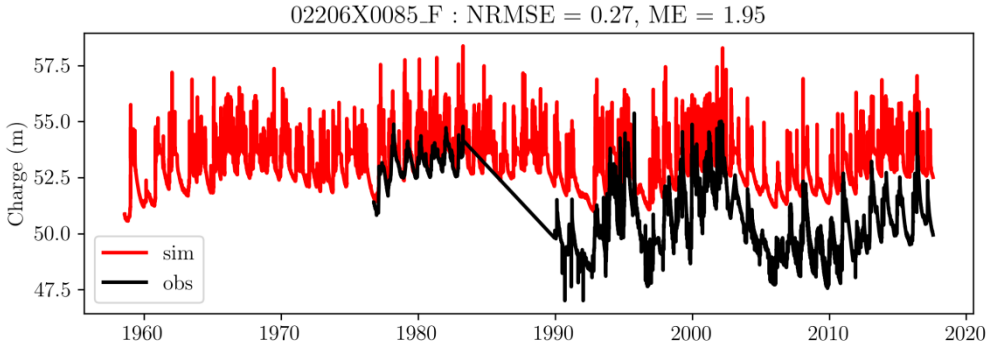
Forte réaction de certains piezos,
même loin du site max

Saint Martin Chennetron



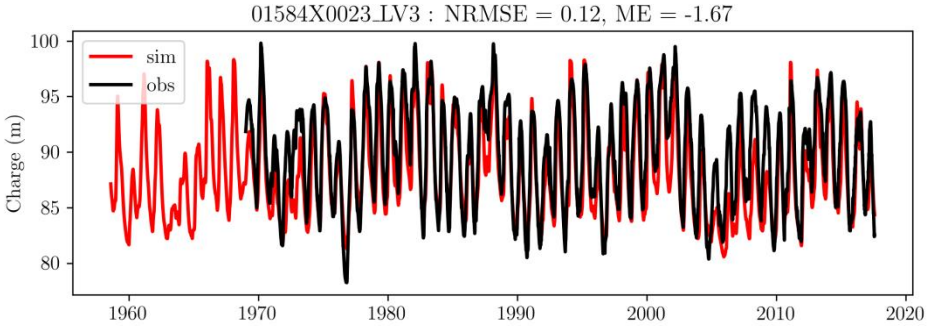
Déconnexion modèle-obs vers 1995….
➔évolution dans le modèle, obs stable

Brie Comte Robert



Déconnexion modèle-obs vers 1990….
➔évolution dans les obs, modèle stable

Les Grandes Loges



Assez comparable

➔ **Intérêt de regarder différentes échelles de temps**

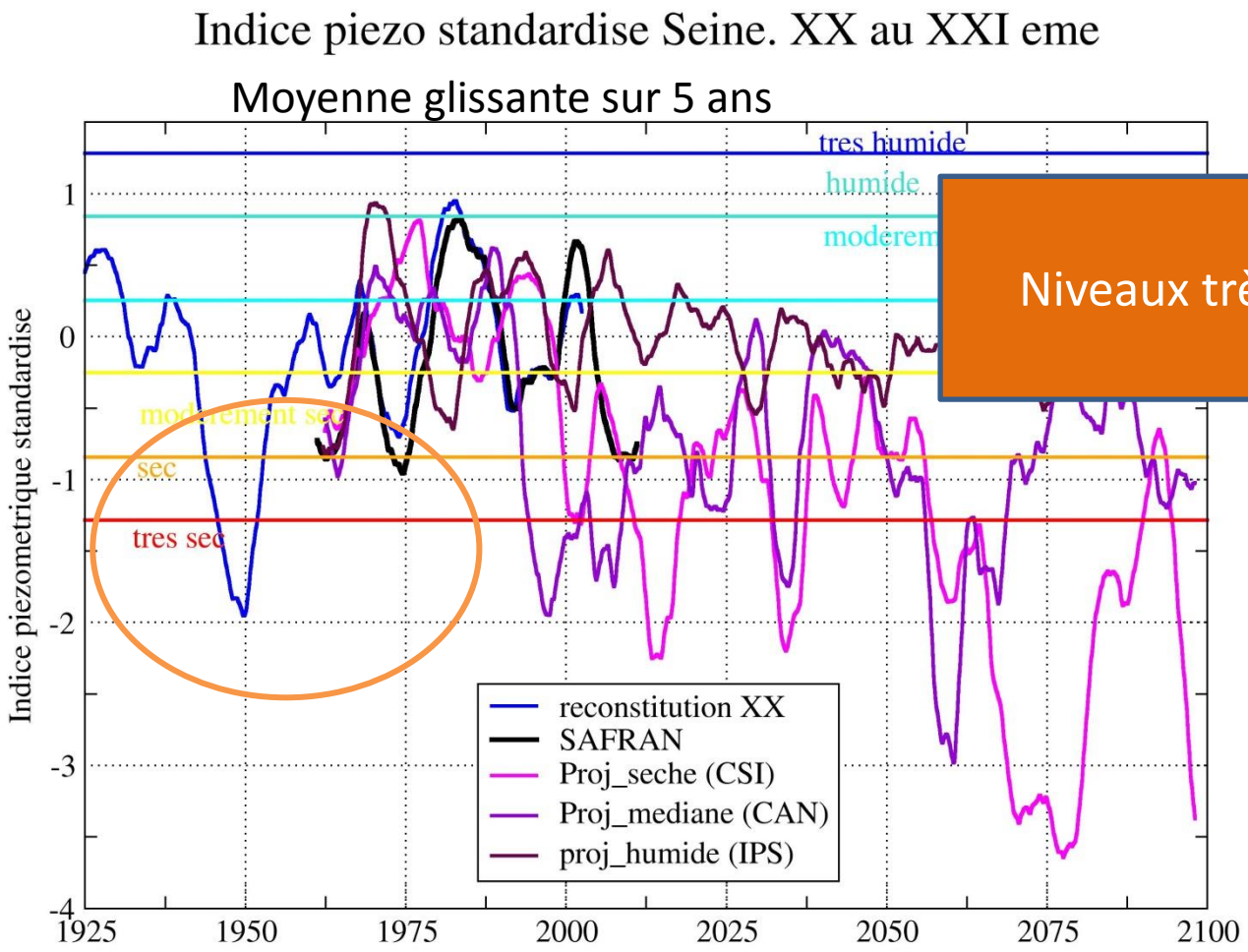
Reconstitution longue durée : du XX au XXI siècle

1er travaux préliminaires (M2 Ryma Aissat et M1 Audrey Gervereau)

Collaboration : Julien Boé, Gildas Dayon, Rémy Bonnet

Reconstitution longue durée : du XX au XXI siècle

1er travaux préliminaires (M2 Ryma Aissat et M1 Audrey Gervereau)

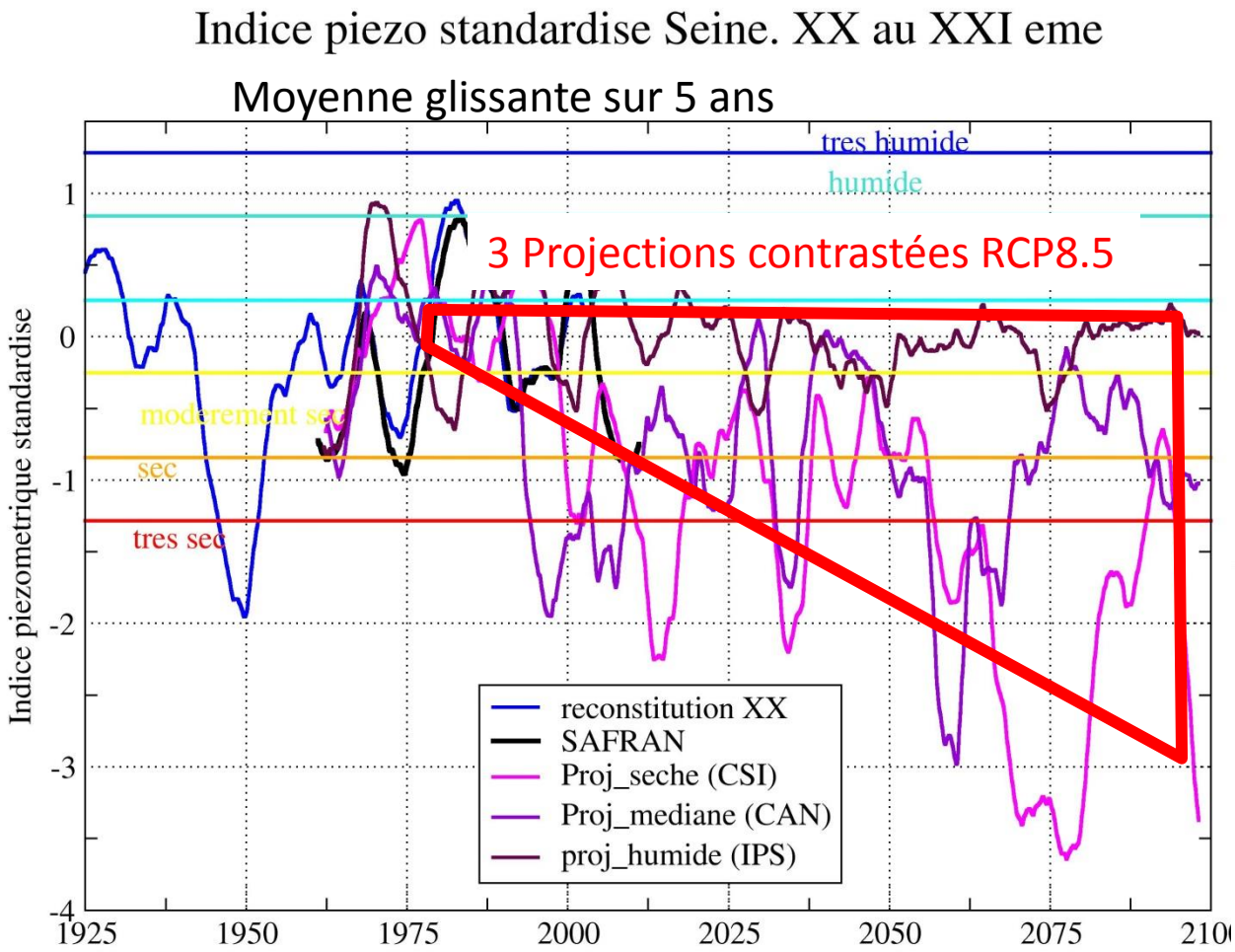


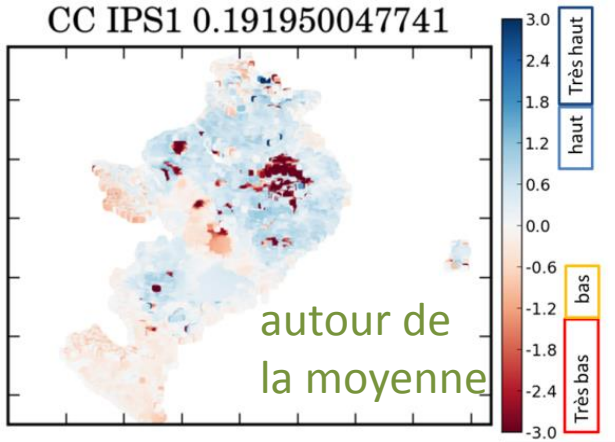
Niveaux très bas vers 1945-1950

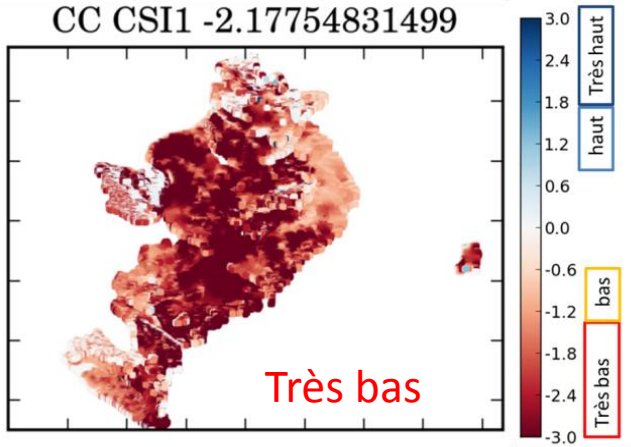
Collaboration : Julien Boé, Gildas Dayon, Rémy Bonnet

Reconstitution longue durée : du XX au XXI siècle

1er travaux préliminaires (M2 Ryma Aissat et M1 Audrey Gervereau)







Collaboration: Julien Boé, Gildas Dayon, Rémy Bonnet

Poursuite des travaux

- Mise en place en temps réel à Météo-France/DCSC
- Prévision saisonnière
  - ➔ assimilation de données (Lhygès)
- Extension à d'autres aquifères
  - ➔ aquifères de socle (Géosciences Rennes)

Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Les nappes aquifères sont caractérisées par :

- Un effet mémoire pouvant dépasser plusieurs mois
- Un effet filtre (toutes les précipitations n'impactent pas les nappes)

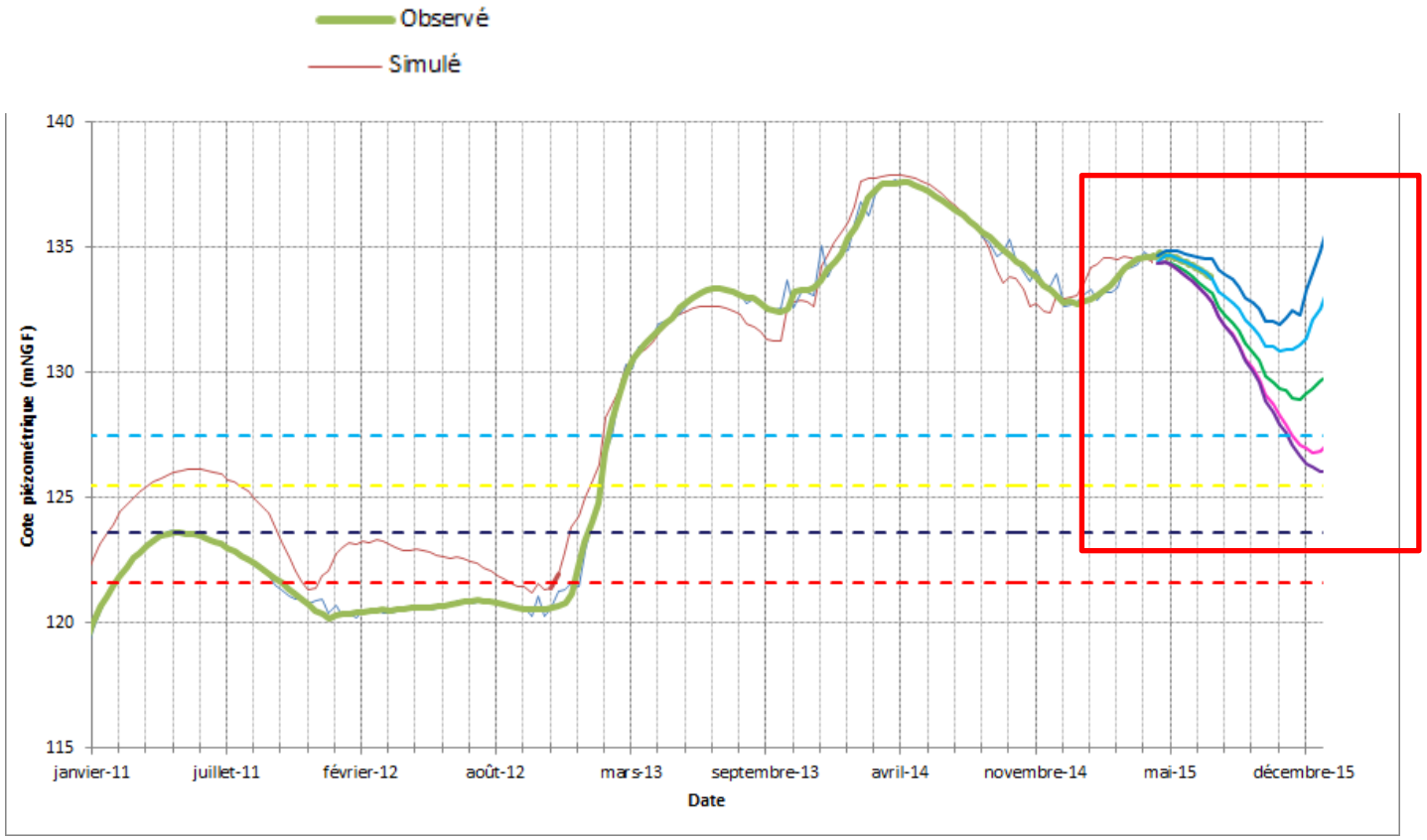
➔ Fort potentiel de la prévision saisonnière

➔ Fort intérêt pour les étiages, mais, aussi pour qualifier le risque de certaines inondations

Aujourd'hui, les prévisions saisonnières sont basées sur le re-jeu d'années passées:

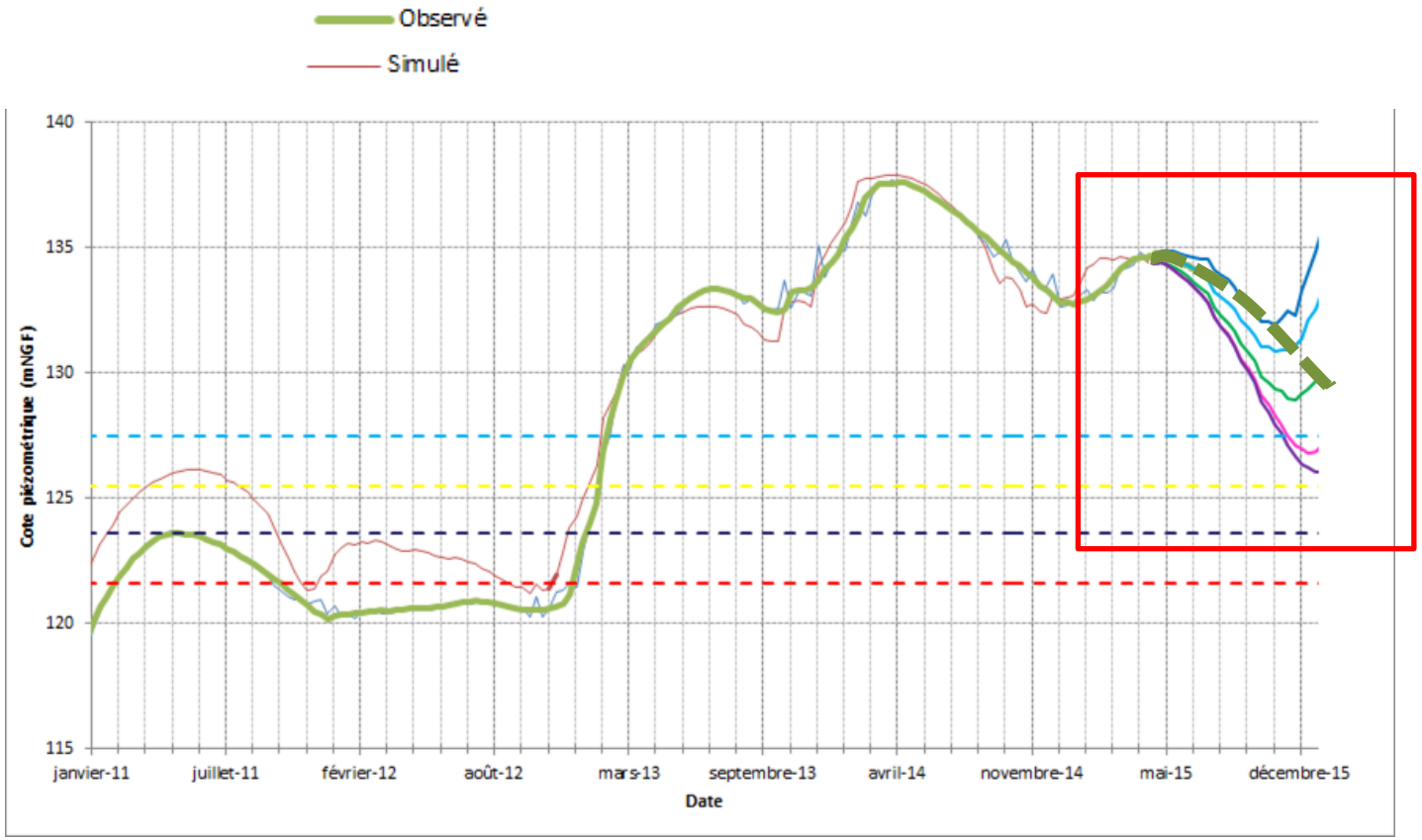
Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Prévisions du BRGM à partir des années historiques
Année sèche
St Martin Chennetron, 77, Aquifère de Brie



Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Prévisions du BRGM à partir des années historiques
Année sèche
St Martin Chennetron, 77, Aquifère de Brie



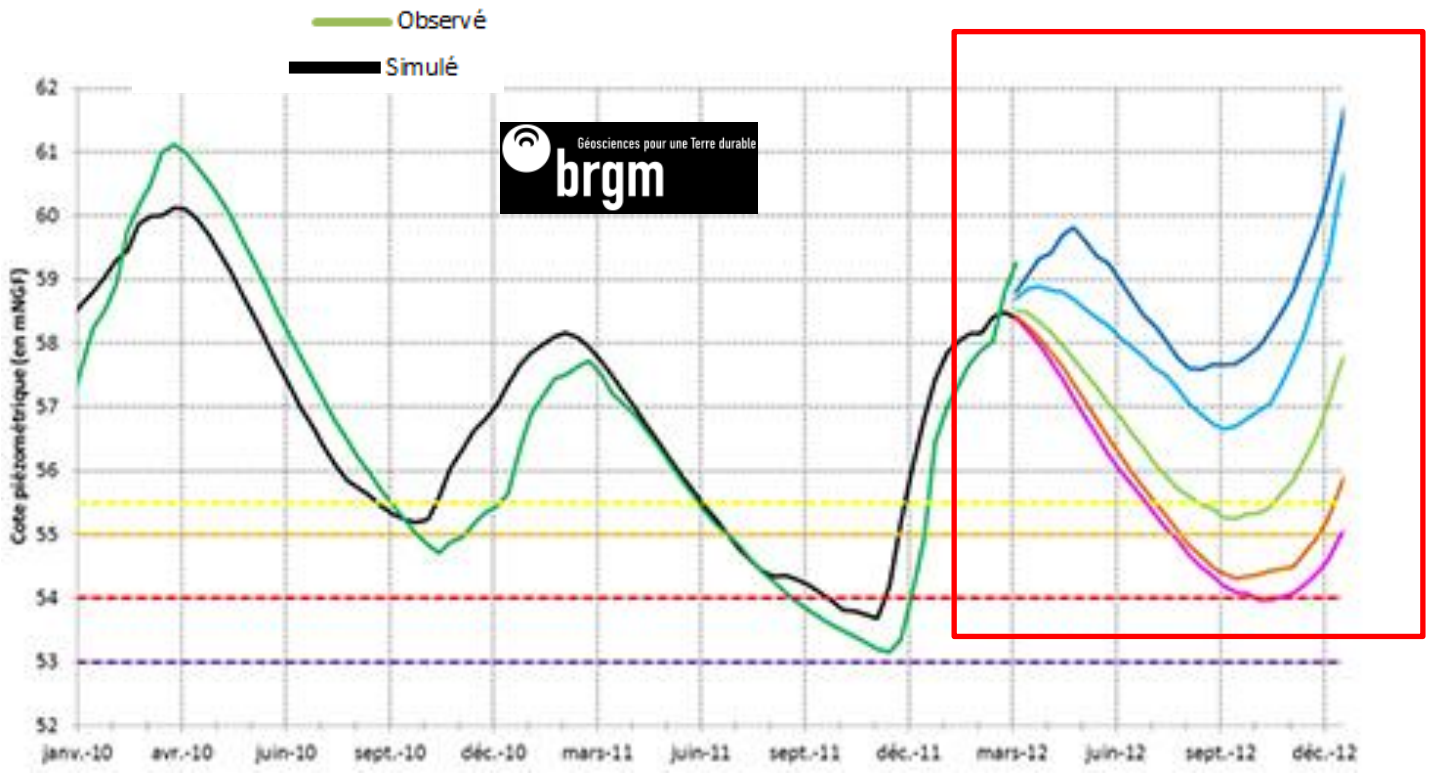
Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Prévisions du BRGM à partir des années historiques

Année humide

Haravesnes, 62, Craie

Prévision à 7 mois du niveau piézométrique à Haravesnes (Picardie) à partir de chroniques de précipitations passées



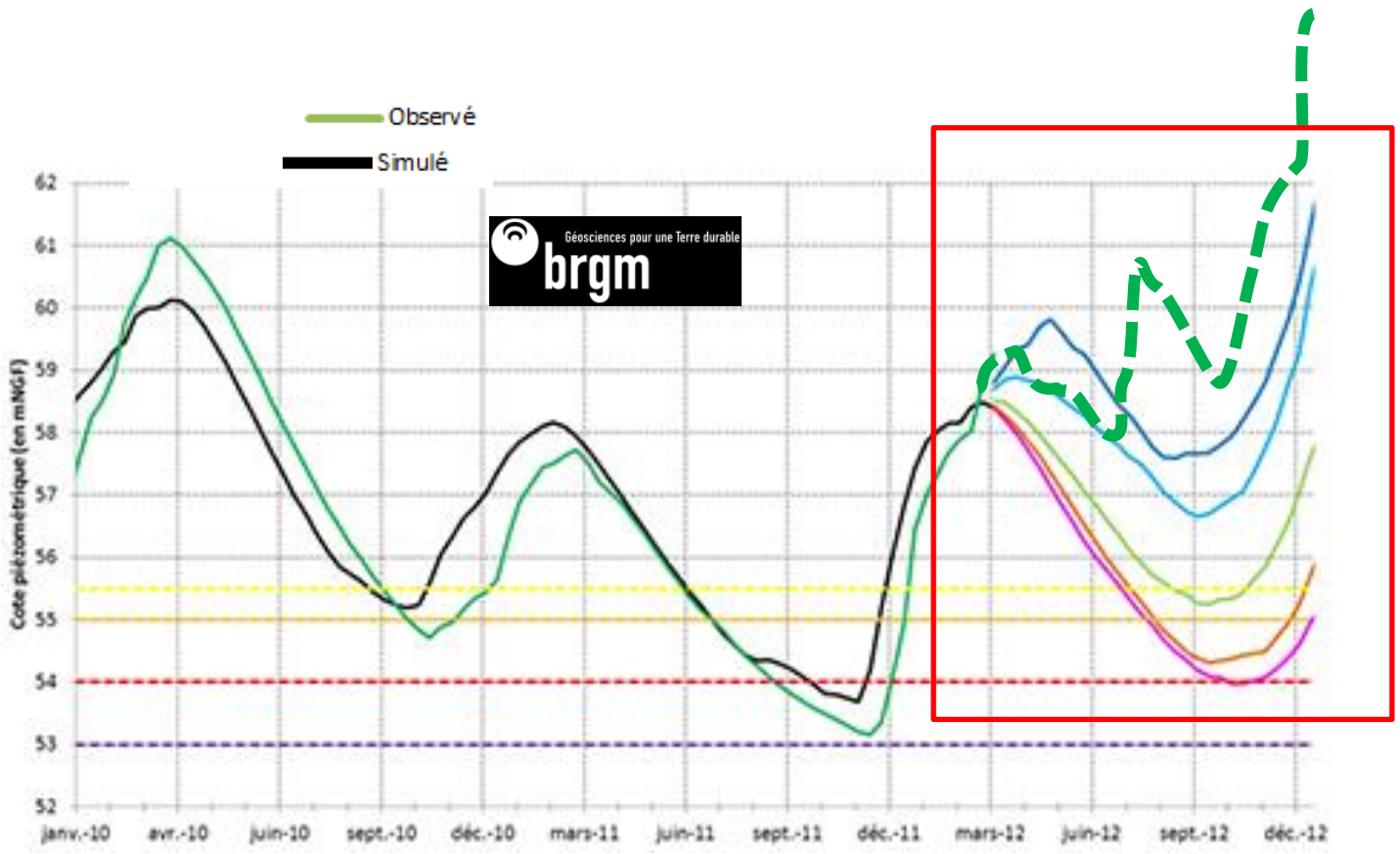
Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Prévisions du BRGM à partir des années historiques

Année humide

Haravesnes, 62, Craie

Prévision à 7 mois du niveau piézométrique à Haravesnes (Picardie) à partir de chroniques de précipitations passées



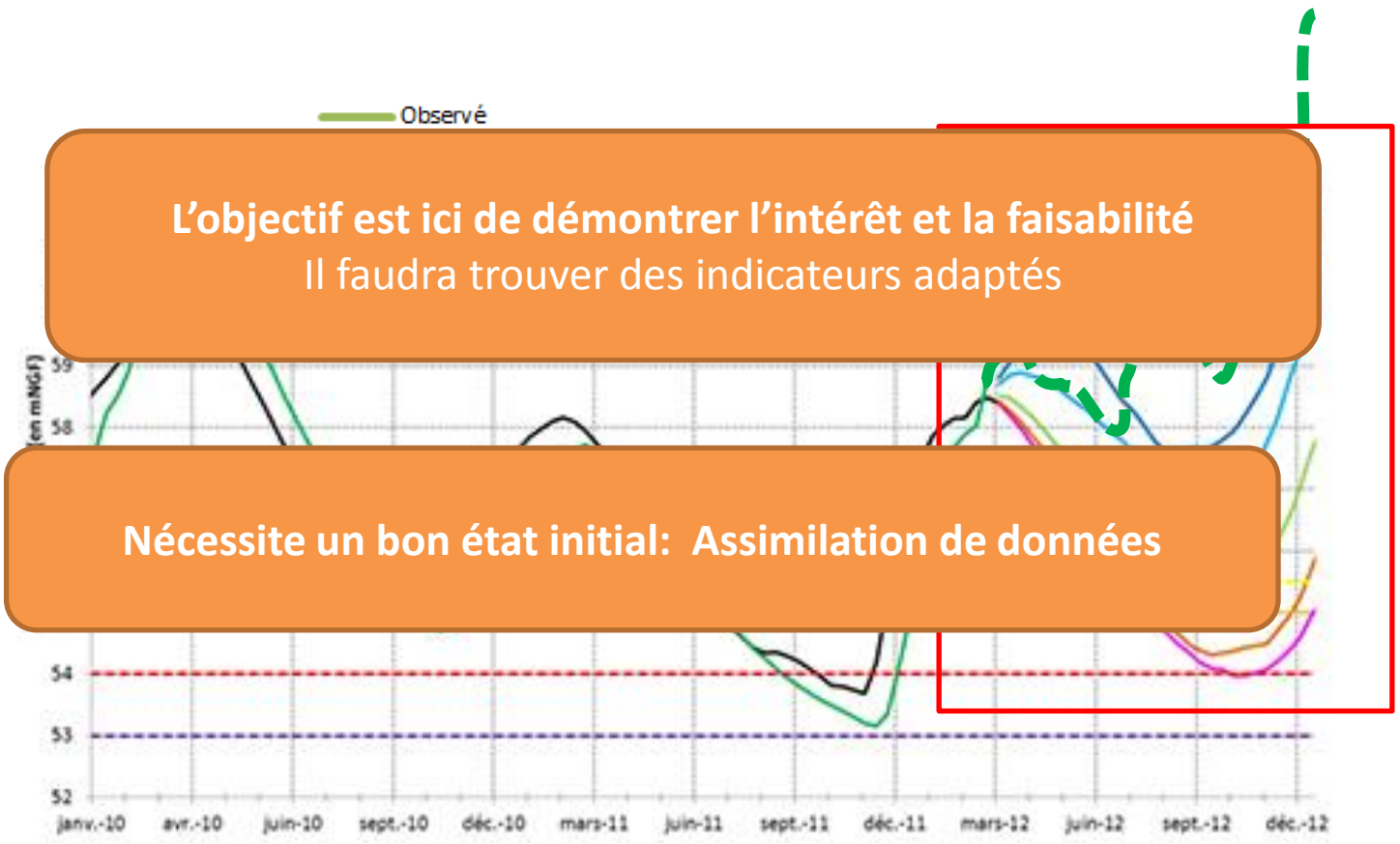
Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Prév
Ann

Quid du potentiel des prévisions saisonnières ?
Utilisation des prévisions ARPEGE-Système 5

Début des pévisions passées (Hindcast) en 2018
➔ Choix des épisodes et échéances à venir

Prévision à de
chroniques de précipitations passées



L'objectif est ici de démontrer l'intérêt et la faisabilité
Il faudra trouver des indicateurs adaptés

Nécessite un bon état initial: Assimilation de données

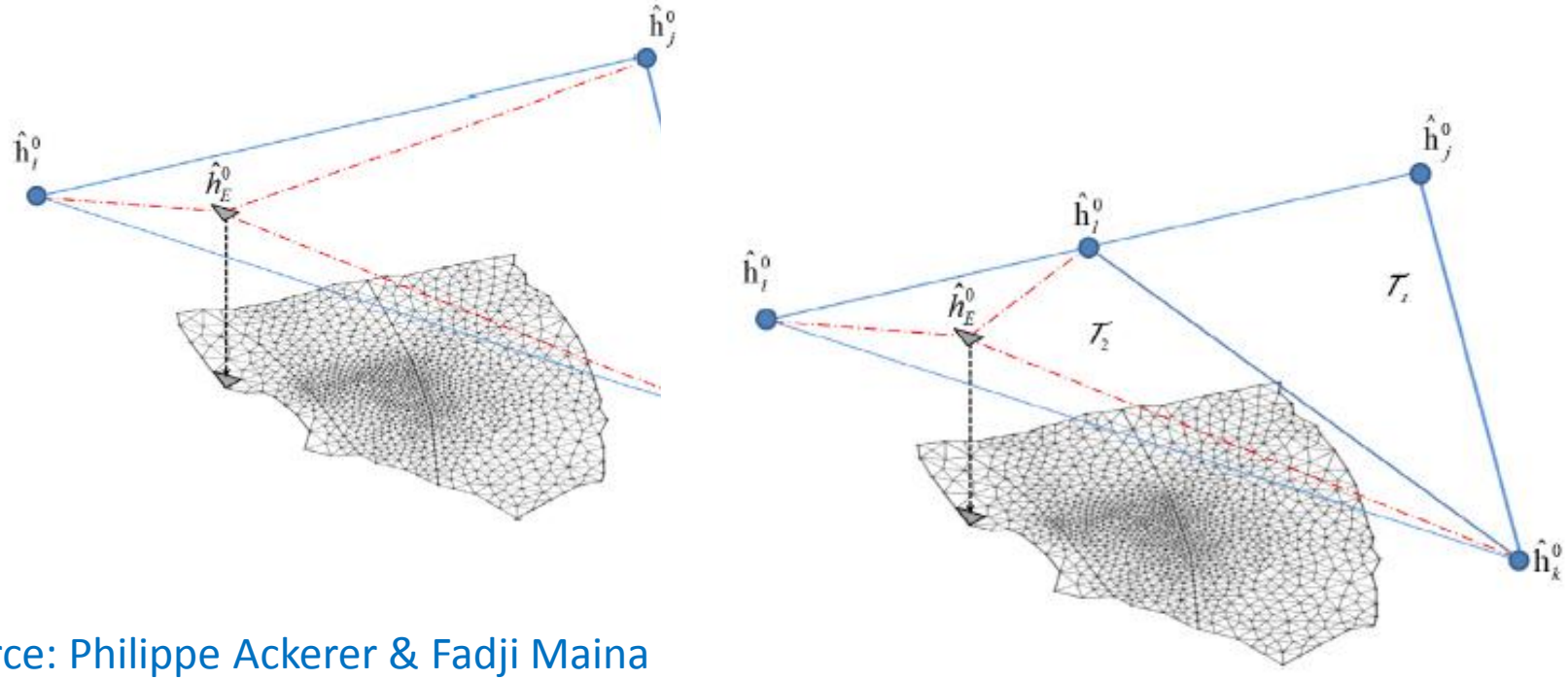
Prévision saisonnière des eaux souterraines:
Et Assimilation de données

Principe: réduire les erreurs aux points d'observations
Méthode numérique développée au LHYGES

un code adjoint + spatialisation adaptative
Fonction objectif pour conditions initiales

$$J(\mathbf{h}_0) = \left(\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}\right)^T \left(\mathbf{h} - \hat{\mathbf{h}}\right) + \mu \left(\mathbf{h}_0 - \hat{\mathbf{h}}_0\right)^T \left(\mathbf{h}_0 - \hat{\mathbf{h}}_0\right)$$

Paramétrisation adaptative et optimisée par raffinement/déraffinement

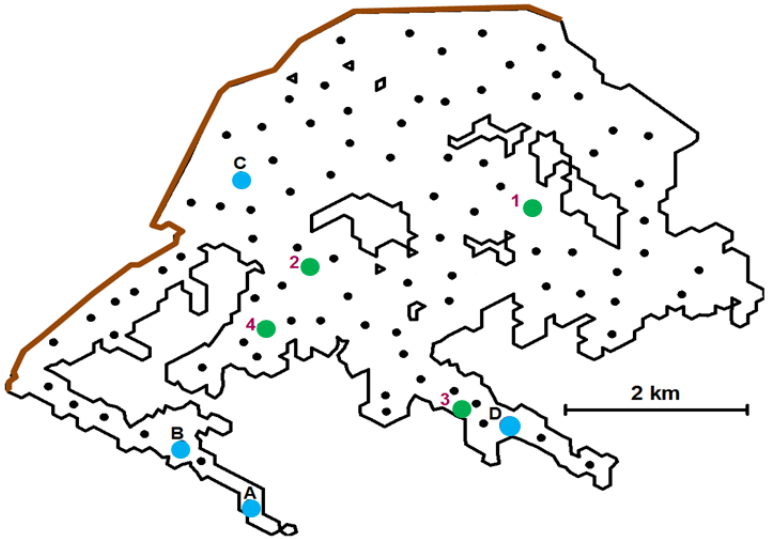


Source: Philippe Ackerer & Fadji Maina

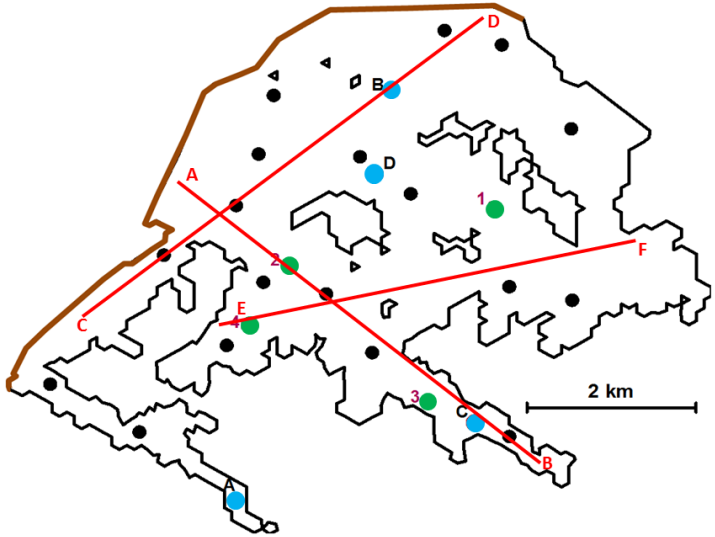
Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Principe: réduire les erreurs aux points d'observations
Méthode: Utilisation d'un code adjoint + spatialisation adaptative

Exemple en conditions 'presque réelles' …



Forte densité d'observations



Faible densité d'observations

Points noirs et bleus : piézomètres ayant servi au calage des conditions initiales.
Points verts : piézomètres non inclus dans le calage mais utilisés pour la validation.
Ligne rouge : analyse de profils de piézométries.

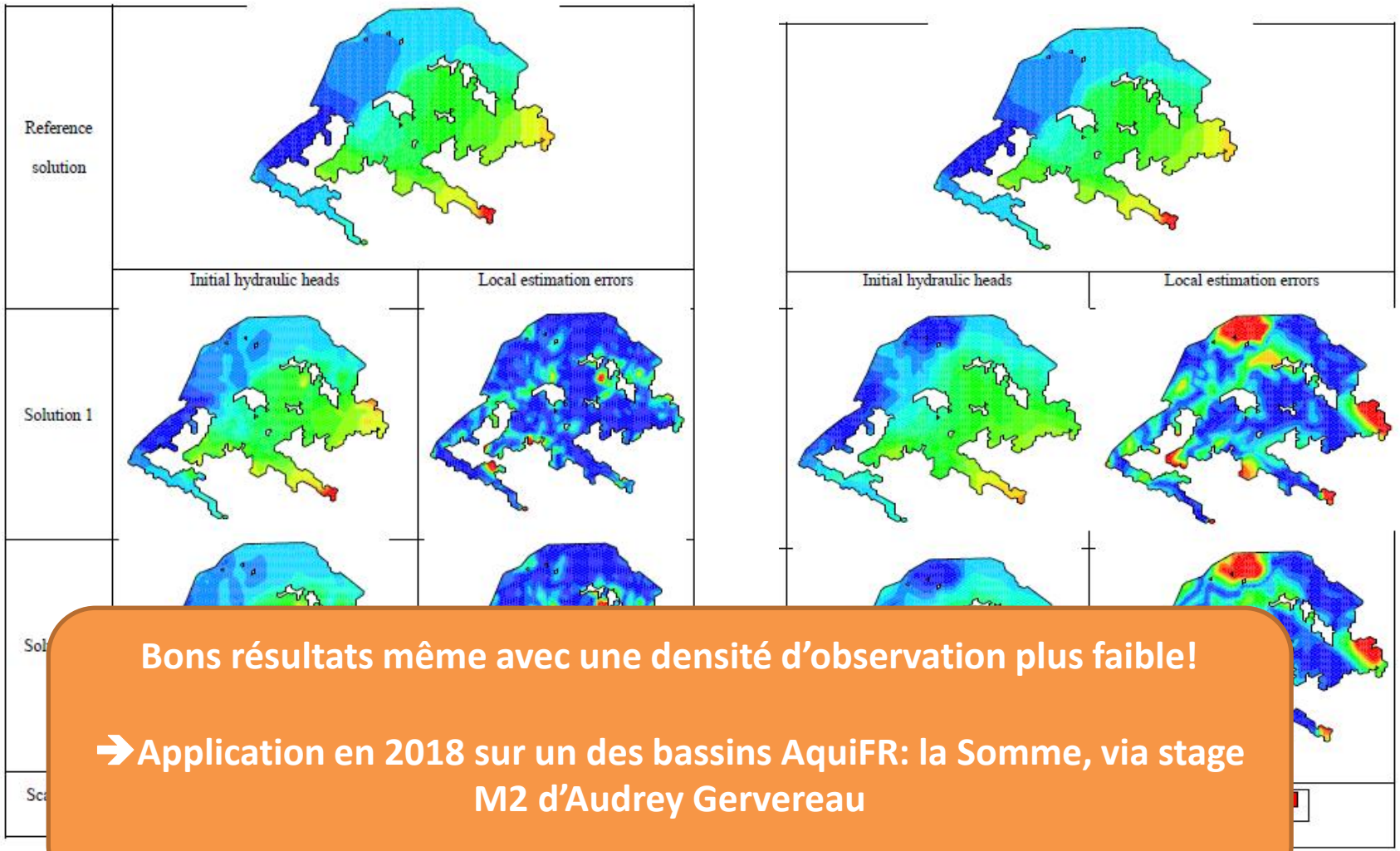
Source: Philippe Ackerer & Fadji Maina

Prévision saisonnière des eaux souterraines:

Principe: réduire les erreurs aux points d'observations

Méthode: Utilisation d'un code adjoint + spatialisation adaptative

Exemple en conditions 'presque réelles' …



Bons résultats même avec une densité d'observation plus faible!

➔Application en 2018 sur un des bassins AquiFR: la Somme, via stage M2 d'Audrey Gervereau

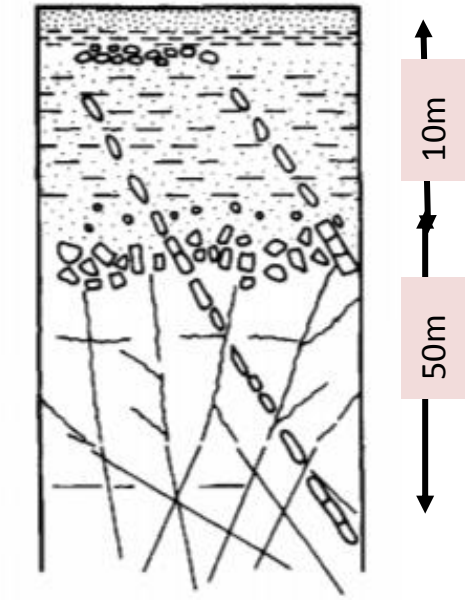
Source: Philippe Ackerer & Fadji Maina

Extension aux aquifères de socle

Aquifères peu profonds(0-60 m)

Zone altérée

Zone fracturée

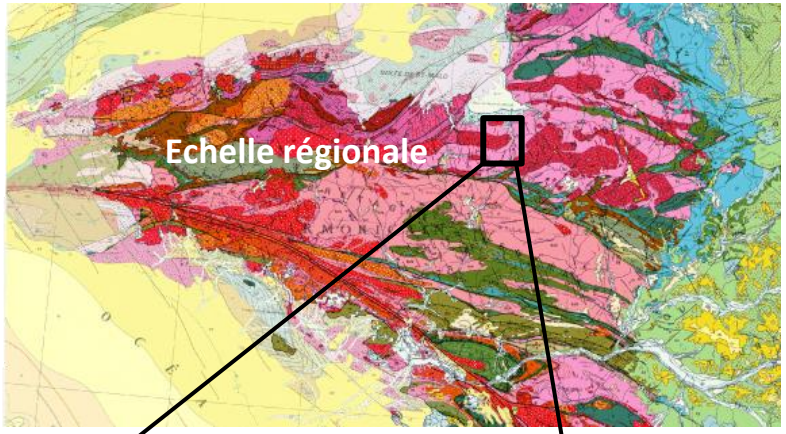


Wright, E. P. (1992), The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa, *Geological Society, London, Special Publications*, *66*, 1-27.

Source: Quentin Courtois & J.R. de Dreuzy

Extension aux aquifères de socle

Stratégie de modélisation

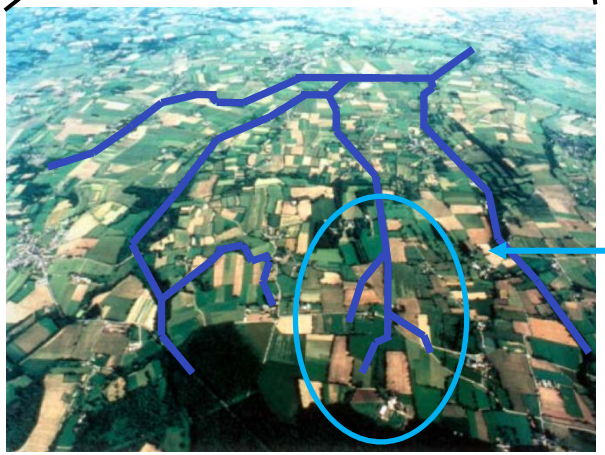


Carte géologique de la Bretagne
(extracted from info-terre)

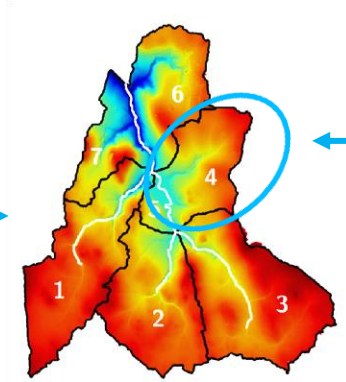
Représentation 1D, basée sur la géomorphologie

Agrégation de modèles de versant (1D)

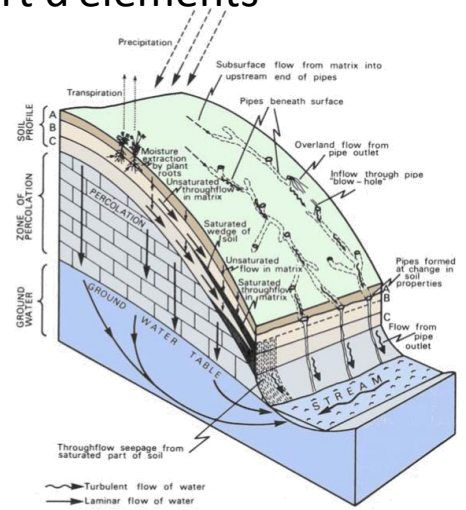
Capacité de simuler le niveau piézométrique, les échanges nappes-rivières, le transport d'éléments



Echelle des bassins versants
20-200 km²



Décomposition en versants



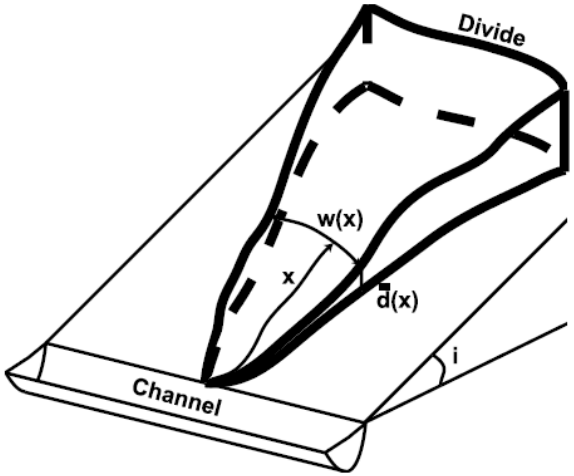
Kirkby, M.J. (1978). Hillslope Hydrology.

Echelle des versants
1-10 km²

Source: Quentin Courtois & J.R. de Dreuzy

Extension aux aquifères de socles

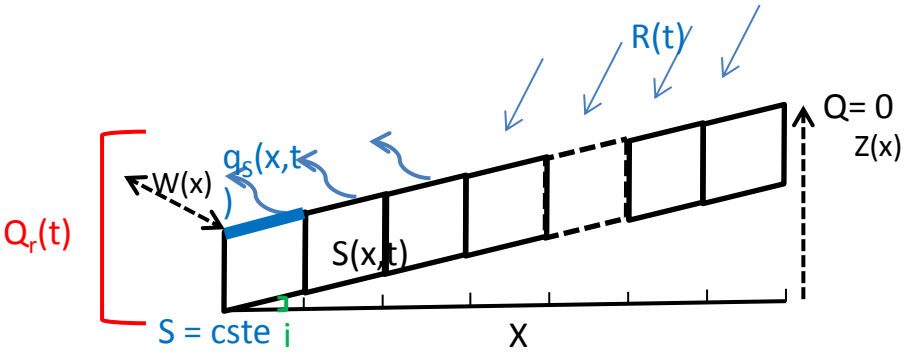
Modèles d'écoulement à l'échelle du versant
Evaluation de l'approche 1D



Ecoulement basé sur la géomorphologie des versants :

- w(x) : la largeur du versant
- θ(x) : la pente du versant

$$\begin{cases} \dfrac{\partial S}{\partial t}(x,t) = -\dfrac{\partial Q}{\partial x}(x,t) + N(t)w(x) \\ Q(x,t) = -\dfrac{kS(x,t)}{f}\left(\cos\theta\,\dfrac{\partial}{\partial x}\left(\dfrac{S}{fw}\right)(x,t) + \sin\theta\right) \\ 0 \;\leq\; S(x,t) \;\leq\; S_c(x) \\ S(x,t) \;<\; S_c(x) \;\textbf{or}\; -\dfrac{\partial Q}{\partial x}(x,t) + N(t)w(x) < 0 \end{cases}$$

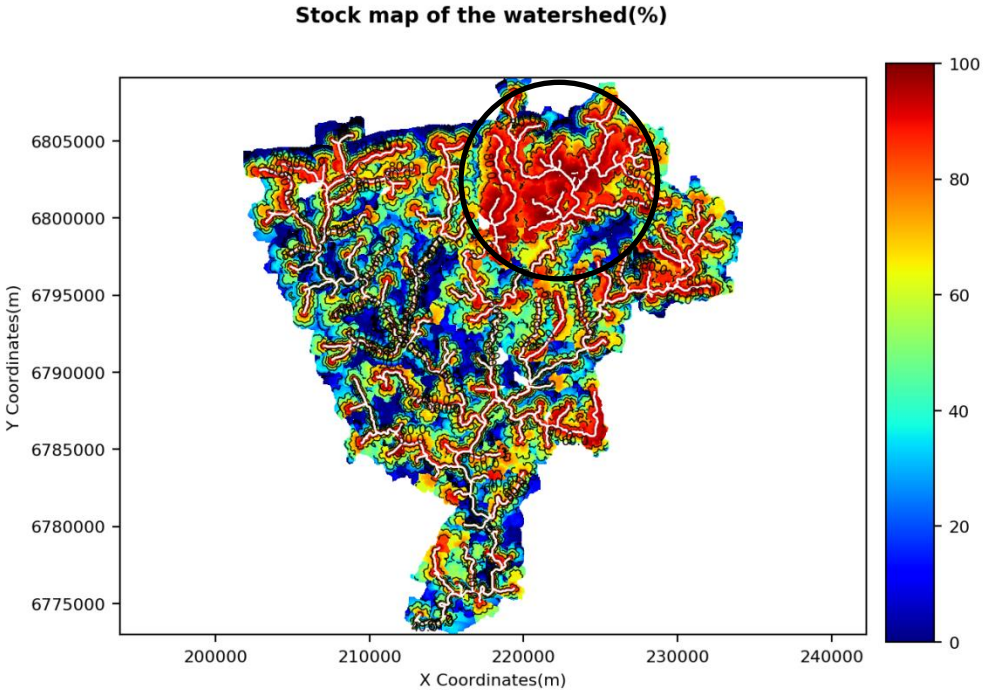


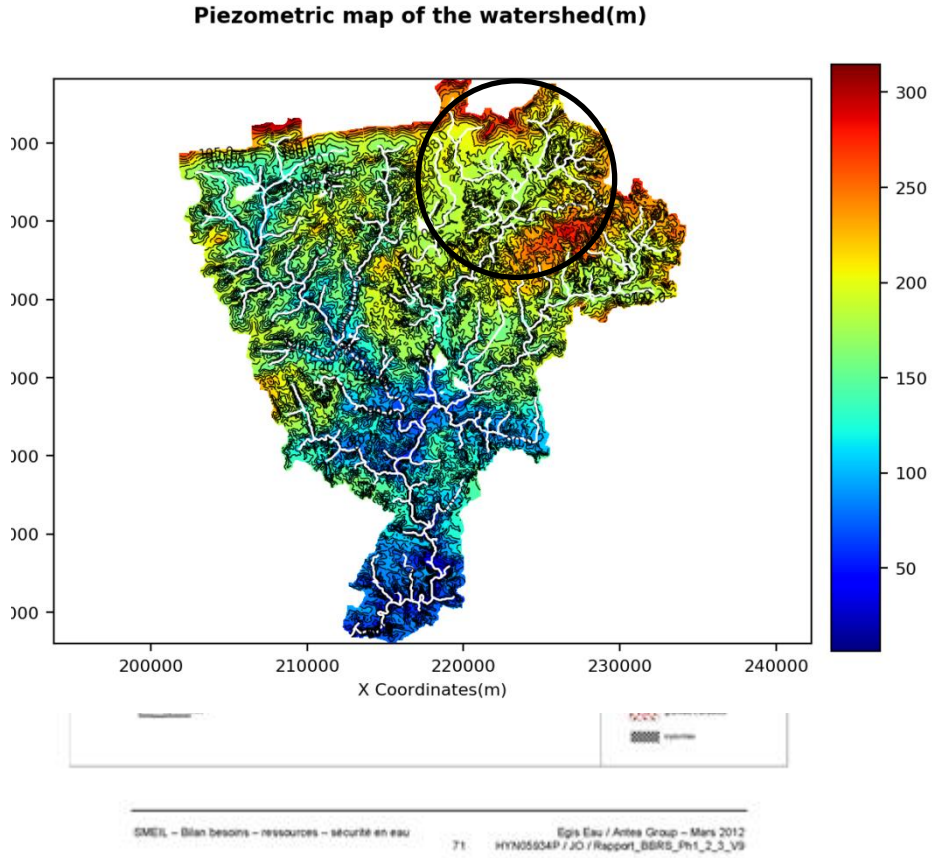
Troch, P. A., et al. (2003). "Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response." Water Resources Research **39**(11).

Source: Quentin Courtois & J.R. de Dreuzy

Extension aux aquifères de socles

Lien entre remplissage des versants et géologie



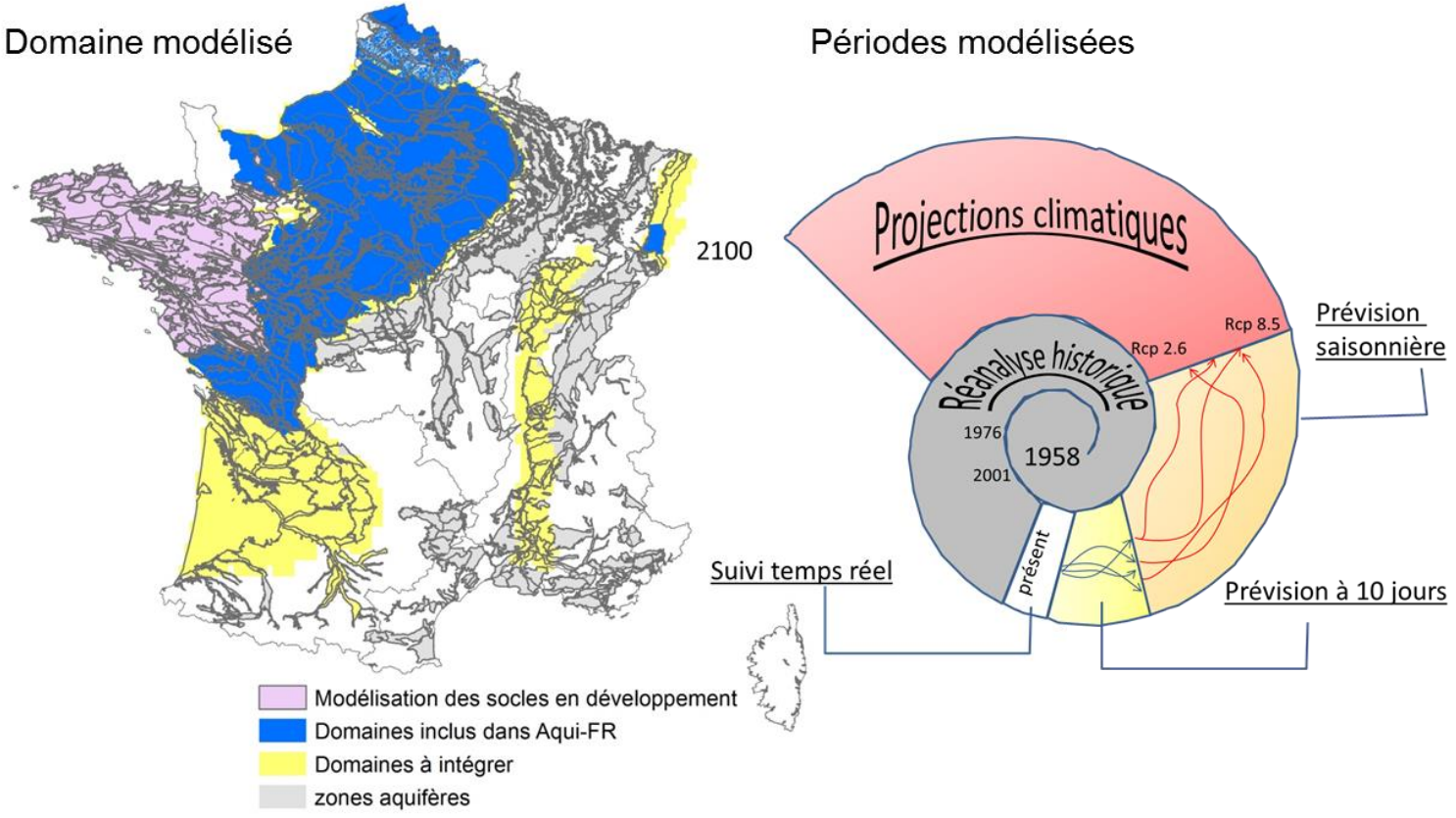


Source: Quentin Courtois & J.R. de Dreuzy

Pour conclure

Objectifs à court terme pour AQUI-FR:

Extensions spatiale et temporelle



brgm · CERFACS · GEOSCIENCES Rennes · LHyGeS · METEO FRANCE · metis UMR 7619 · MINES ParisTech · AGENCE FRANÇAISE POUR LA BIODIVERSITÉ

Pour conclure

AQUI-FR:

- un projet avec de fortes visées opérationnelles qui doit faire ses preuves et convaincre les gestionnaires et opérateurs
- mais, de nombreuses ouvertures sur des questions de recherche
- Favorise la collaboration entre différentes équipes de modélisateur en hydrogéologie