HAL open science

Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique. Enjeux, méthodes et applications

Guillaume Thirel

To cite this version:

Guillaume Thirel. Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique. Enjeux, méthodes et applications. Séminaire ECOBIOP, Oct 2021, Saint-Pée-sur-Nivelle, France. hal-03373670

HAL Id: hal-03373670

https://hal.inrae.fr/hal-03373670

Submitted on 11 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique. Enjeux, méthodes et applications

Guillaume Thirel (HYCAR)

07/10/2021

Plan de la présentation

- Activités de recherche de l'UR HYCAR et de l'équipe HYDRO
- Mon parcours
- La modélisation hydrologique
- L'étude de l'impact du changement climatique
- Quels futurs pour l'eau en France ?
- Mes travaux de recherche
  - Une étude d'impact du changement climatique récemment achevée
  - Inclusion des usages dans la modélisation hydrologique
  - Thèse Seinarios

Activités de recherche

UR HYCAR et équipe HYDRO

L'unité de recherche HYCAR

Hydrosystèmes Continentaux Anthropisés - Ressources, Risques, Restauration

Collectif centré autour de 3 équipes et un observatoire de recherche

Création en 2018

Site web : https://www6.jouy.inrae.fr/hycar

Equipe Hydroécologie fluviale (HEF)
https://hef.inrae.fr

Equipe Atténuation, remédiation, transferts et modélisation des hydrosystèmes (ARTEMHYS)
https://artemhys.inrae.fr

HYCAR
Ressources Risques Restauration

Equipe Hydrologie des bassins versants (HYDRO)
https://webgr.inrae.fr

Observatoire ORACLE
https://gisoracle.inrae.fr

L'équipe HYDRO à Antony

27 septembre 2021
23 personnes

Chercheurs et ingénieurs titulaires

Vazken Andréassian (ICPEF, HDR)

Olivier Delaigue (IE)

François Bourgin (CR)

Charles Perrin (IAE)

Maria-Helena Ramos (DR, HDR)

Gaëlle Tallec (IR)

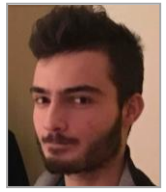
Guillaume Thirel (CR)

Alban de Lavenne (CR) (avec ARTEMHYS)

François Tilmant (IE)

Doctorants

Antoine Pelletier


Paul Astagneau

Thibault Lemaitre-Basset

Myriam Soutif--Bellenger

Alberto Assis dos Reis (UFMG)

Emixi Valdez Medina (U. Laval)

Cyril Thébault

Post-docs et ingénieurs contractuels

Léonard Santos

Anne-Lise Véron

Daniela Peredo

Paul Royer-Gaspard

Jean-Baptiste Boissonnat

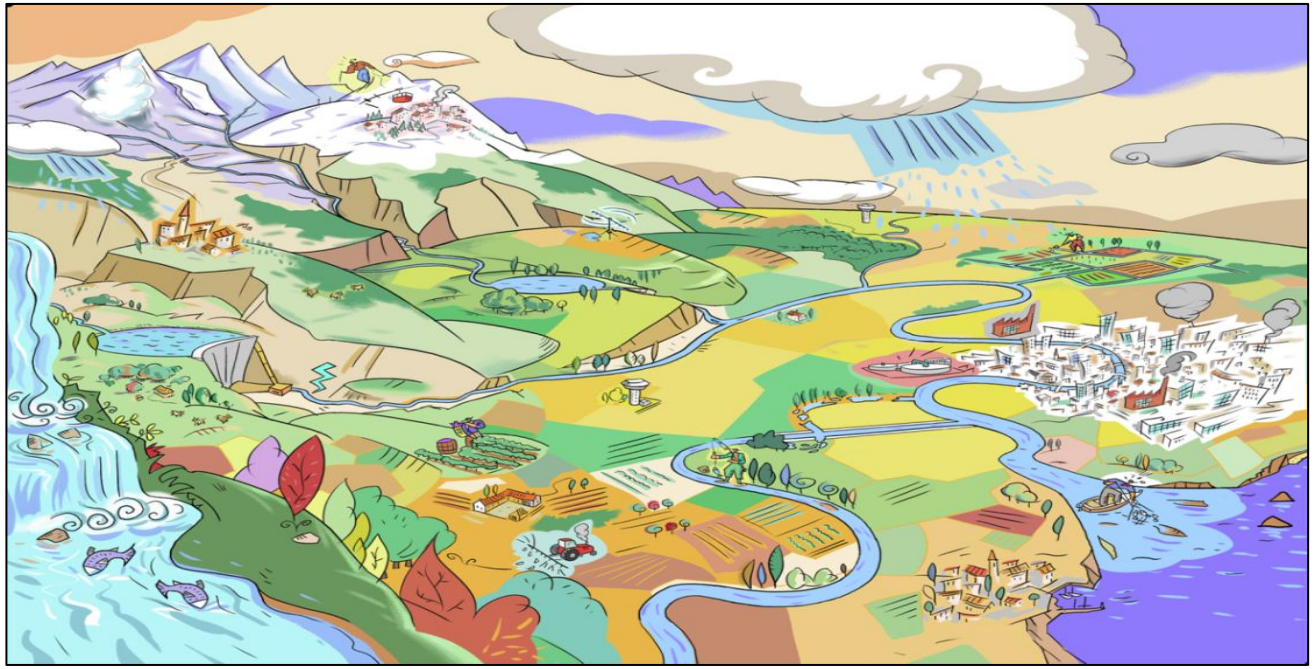
Scientifiques accueillis

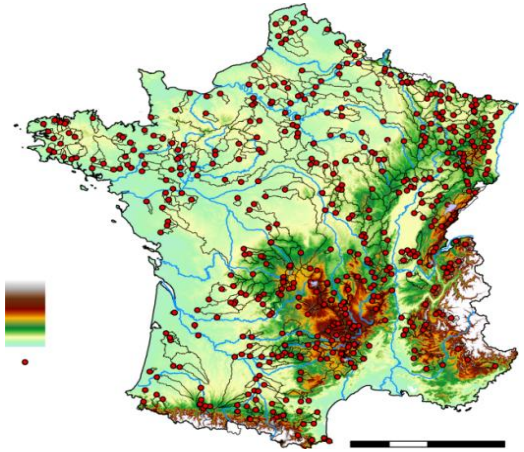
Bruno Lemaire (avec ARTEMHYS)

Pierre Brigode

Systèmes d'étude

- Bassins versants naturels et anthropisés

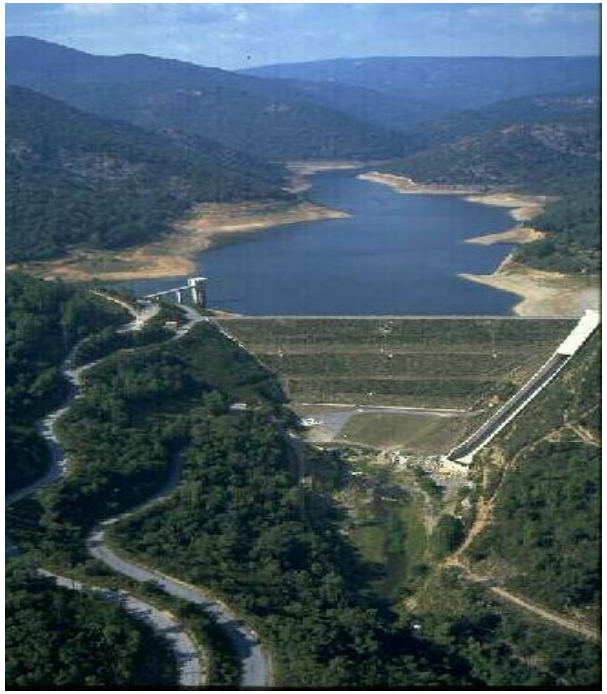




Enjeux de l'hydrologie de surface quantitative

Prévision des crues

Prévision des étiages

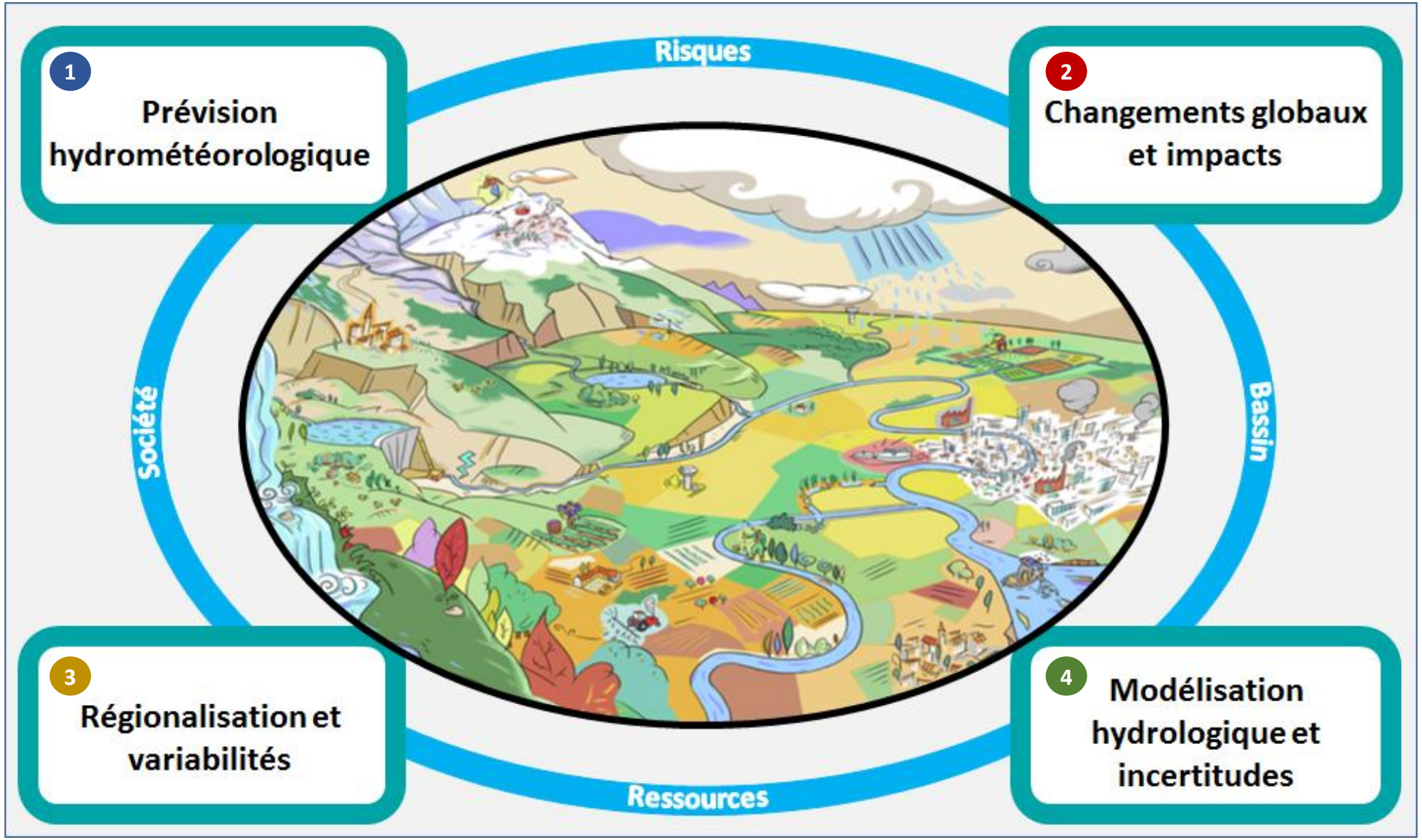


Gestion d'ouvrages

Dimensionnement d'ouvrages

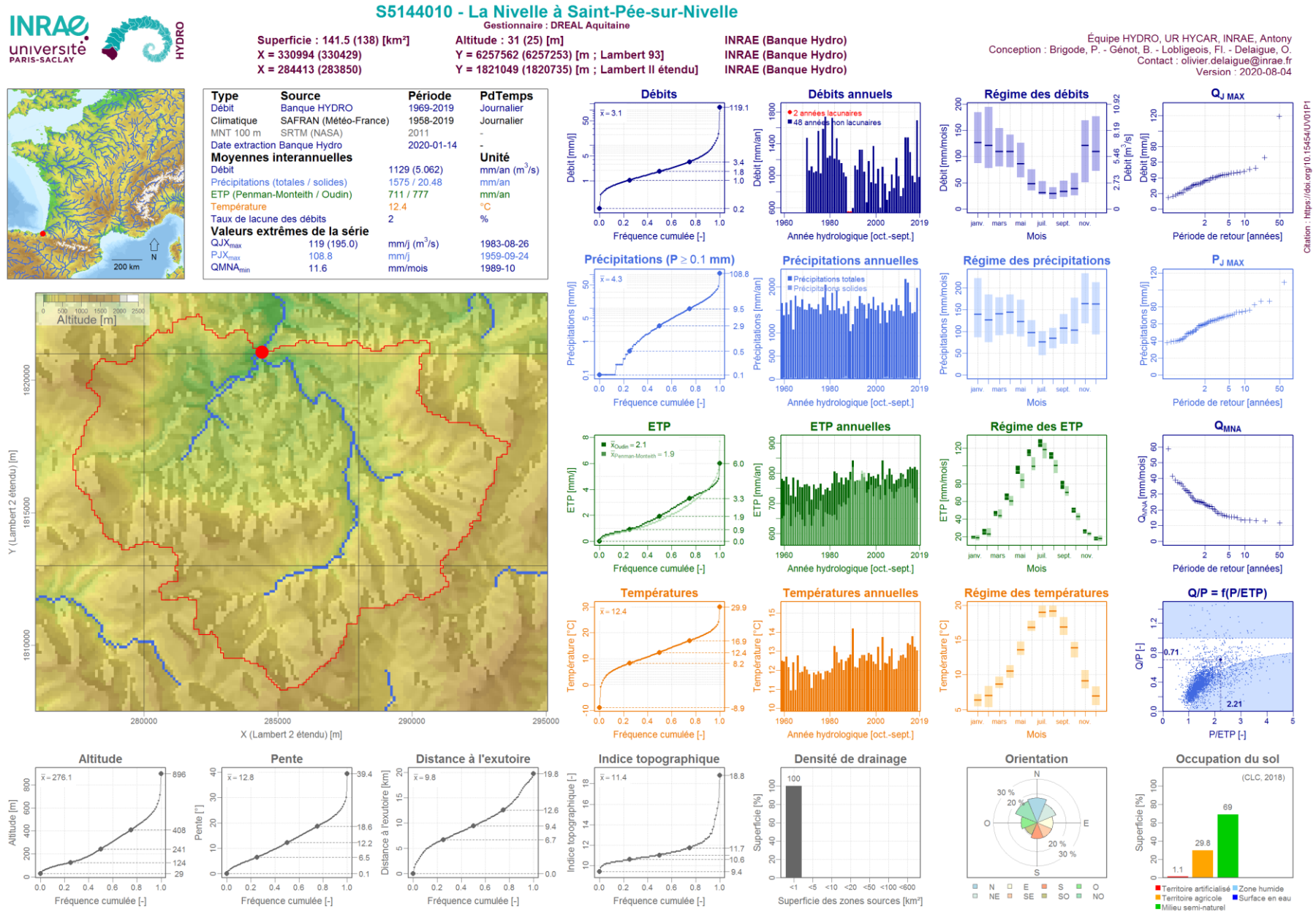
Impact de l'anthropisation

Axes de recherche



Les fiches stations

https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees/



INRAE

Mon parcours

D'hydrométéorologue…

- 2006 : stage de fin d'études au Centre d'Etudes de la Biosphère (CESBIO) à Toulouse

- 2006-2009 : thèse au Centre National de Recherche en Météorologie (CNRM) à Toulouse. Amélioration des prévisions d'ensemble de débits sur la France

- 2009-2012 : postdoctorat au Joint Research Centre (JRC) à Ispra, Italie. Assimilation de données satellite d'enneigement dans un modèle hydrologique pour la prévision

A hydroclimatologue ?

- Depuis 2012 : chargé de recherche à Irstea/INRAE dans l'UR HYCAR, à Antony

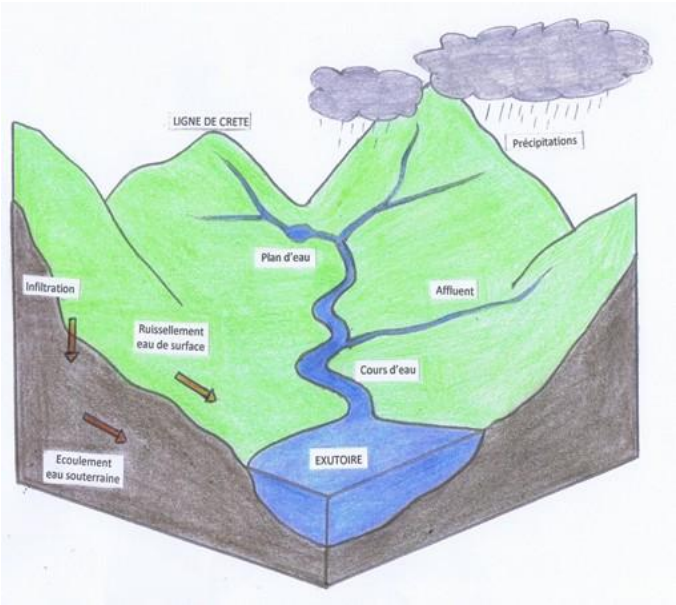
- Thématiques de recherche :
  - Modélisation hydrologique en contexte non-stationnaire
  - Impact du changement climatique
  - Robustesse des modèles hydrologiques
  - Modélisation distribuée

- Depuis le 1er septembre 2021 : accueil scientifique au CNRM, à Toulouse

La modélisation hydrologique

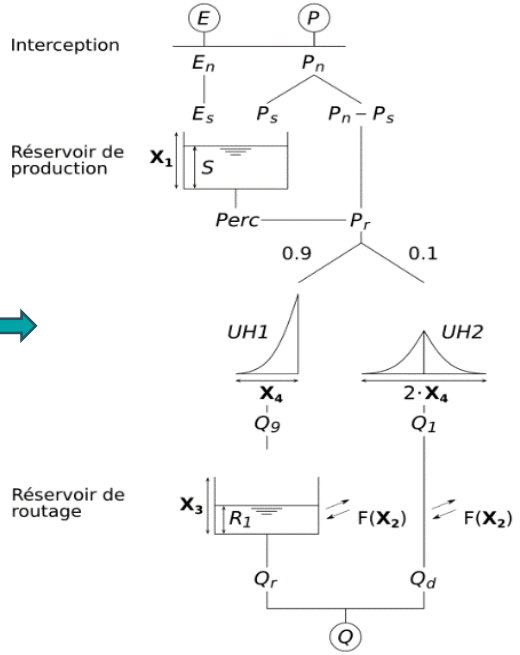
Modélisation hydrologique

Outil permettant la représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant



https://www.bvchevre.fr/images/bassin_versant_schema.jpg

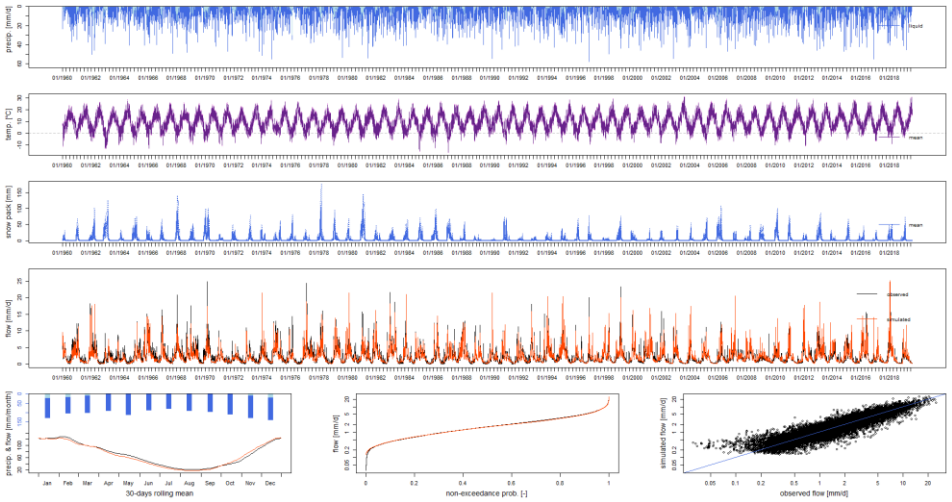
Bassin versant réel



Modèle GR4J

Représentation simplifiée du bassin versant

Exemple de résultats de modélisation pour la station H2021010 – L'Yonne à Chaumard



Modélisation du bassin versant

Reconstitution des conditions hydro-climatiques réelles du bassin

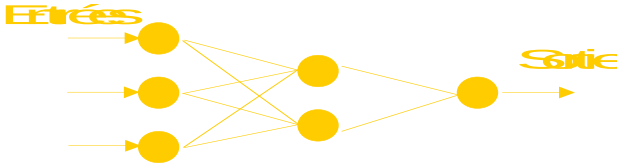
Slide conçu par Laura Nunez Torres

Trois grandes catégories de modèles hydrologiques

Modèles ‘boîte noire’

Modèle auto-regressif ARMAX

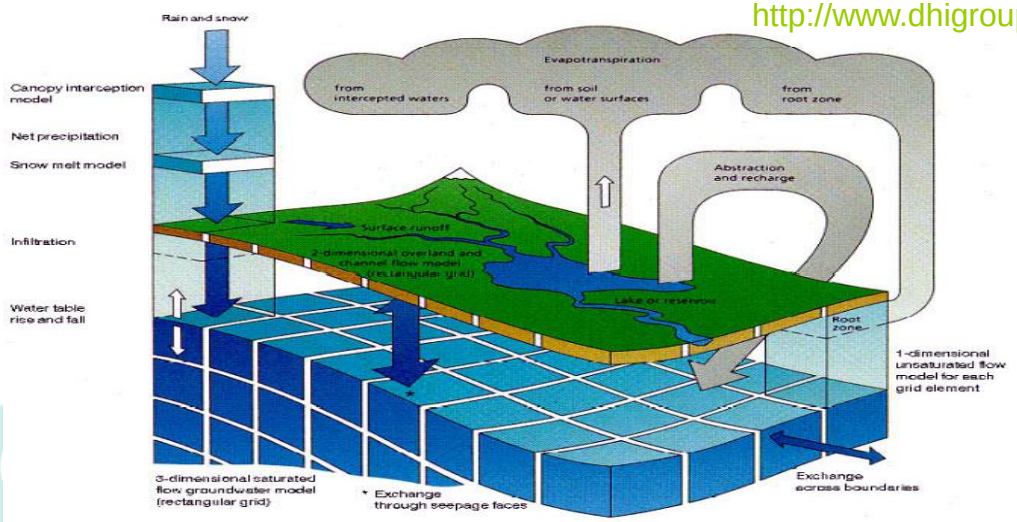
Réseaux de neurones



Modèles ‘physiques’

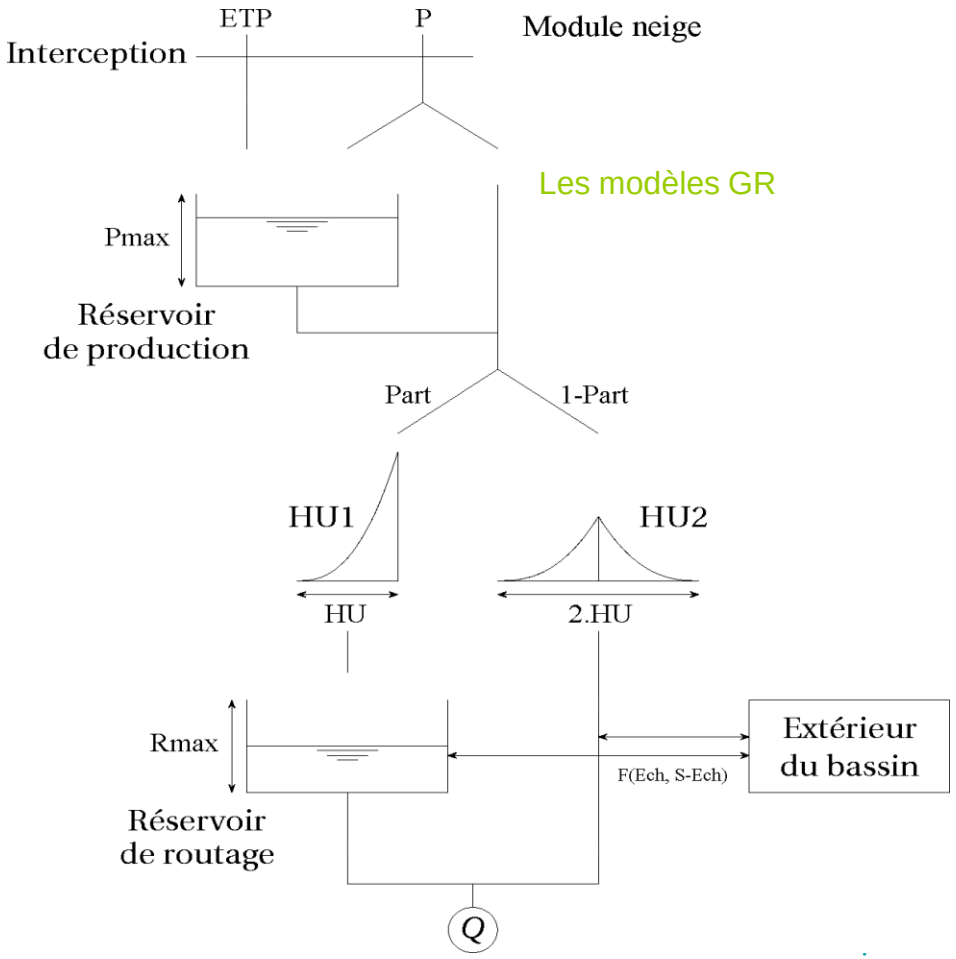
Modèle MIKE_SHE

http://www.dhigroup.com/

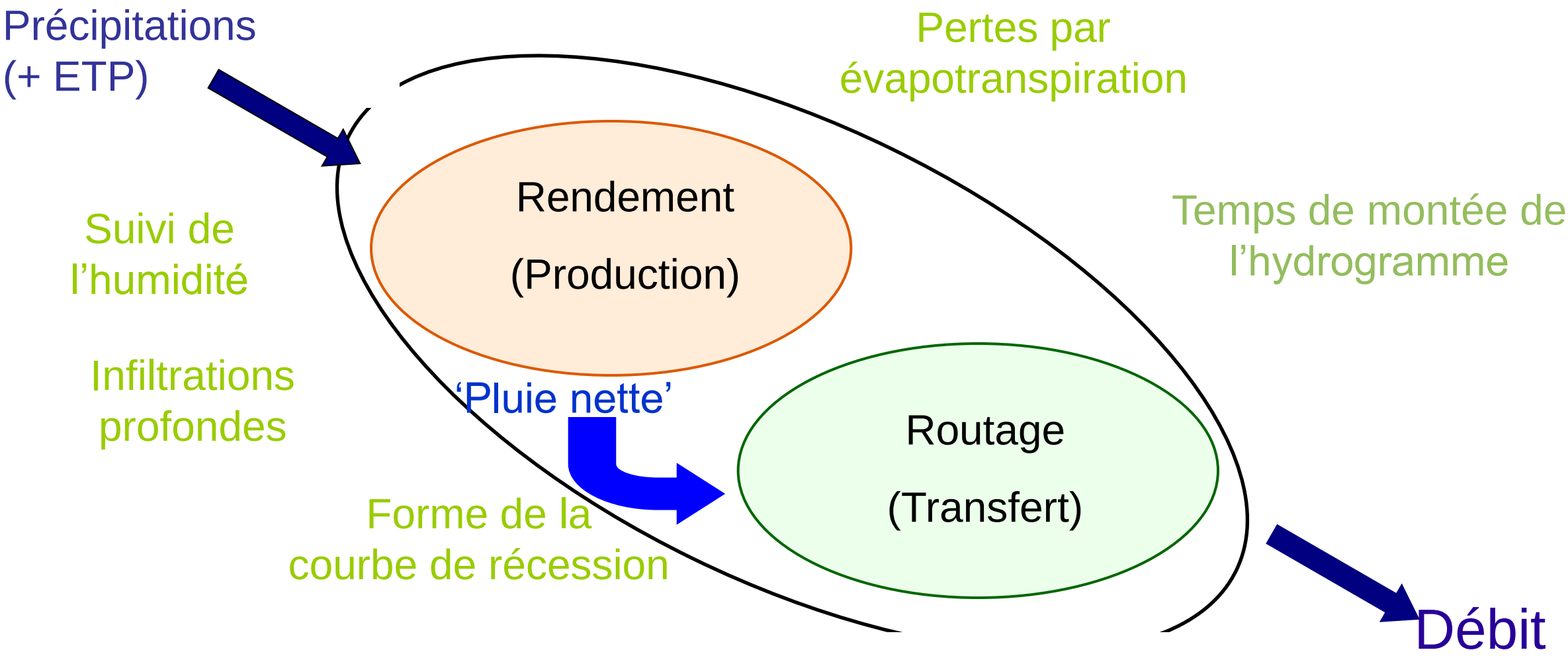


Modèles conceptuels (« à réservoir ») et empiriques

Les modèles GR



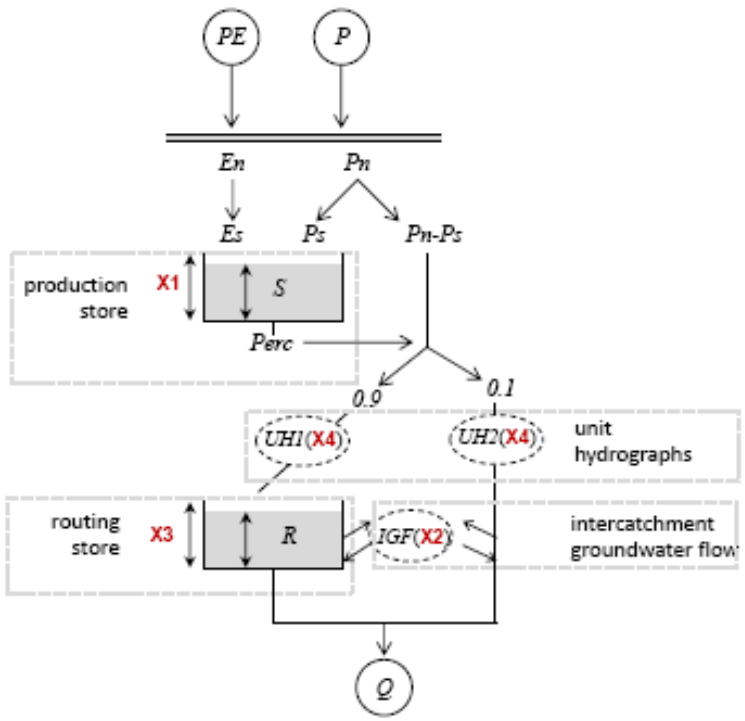
Structure générale d'un modèle pluie-débit à l'échelle du bassin versant



+ paramètres à optimiser: adaptation au cas d'étude; au plus proche des observations

GR4J

Le schéma du modèle GR4J



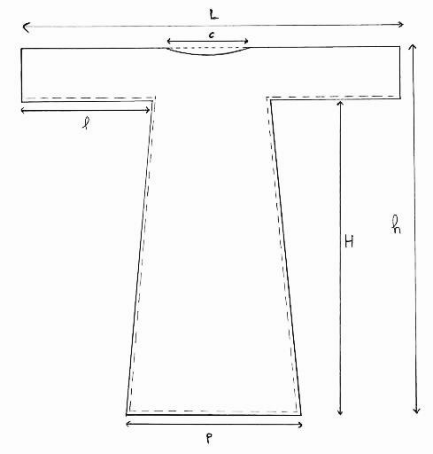
- Appartient à une famille de modèles développés depuis la fin des années 70
- Modèle fonctionnant à l'échelle du bassin versant agrégé (*simplification spatiale*), au pas de temps journalier (*simplification temporelle*), basé sur des réservoirs conceptuels avec 4 paramètres à optimiser (*simplification des processus*)
- GR4J ne prend pas en comptes les macropores créés par les vers de terre… mais fournit néanmoins de très bonnes simulations des débits

Perrin, C., Michel, C. and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279 : 275-289

Le calage des модèles hydrologiques

L'estimation des paramètres, une histoire de couture ?!

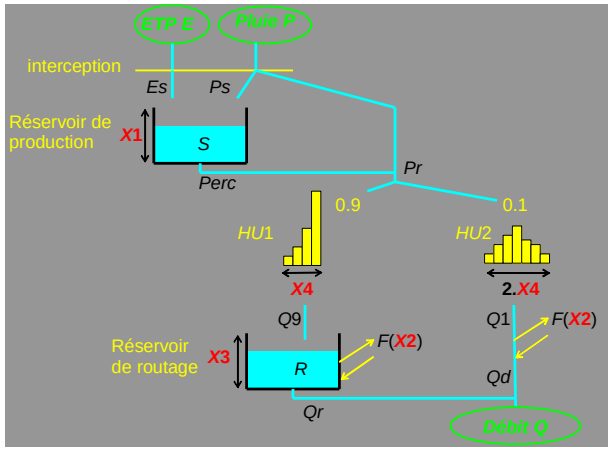
$\{c, l, L, h, H, p\}_1$



$\{c, l, L, h, H, p\}_2$

- Le choix de la mesure est basée sur les mensurations des personnes

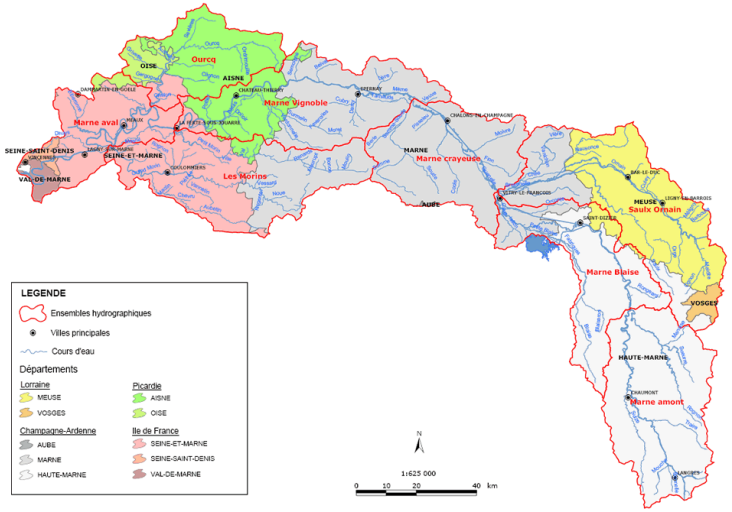
L'estimation des paramètres, une histoire de couture ?!



$\{X1, X2, X3, X4\}_1$

$\{X1, X2, X3, X4\}_2$

Bassin de la Marne
12782 km²

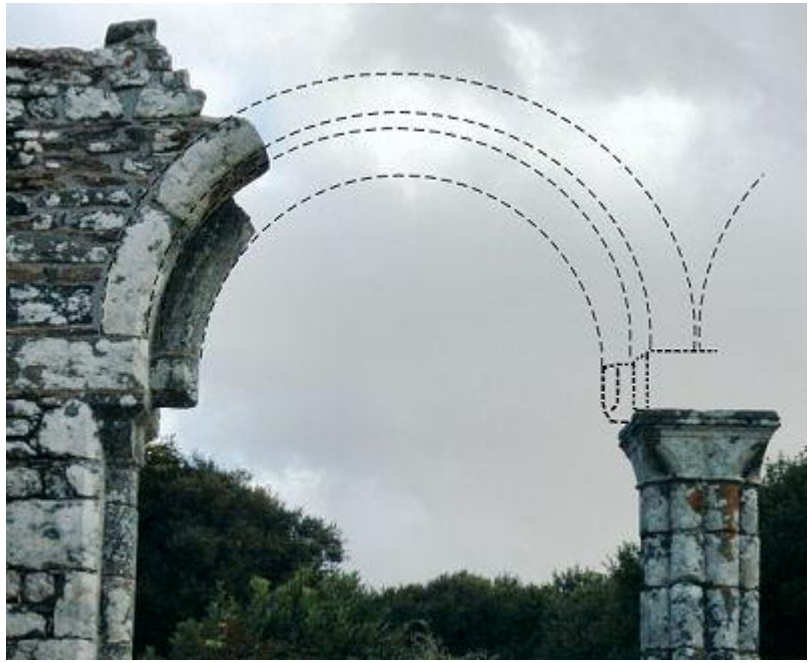


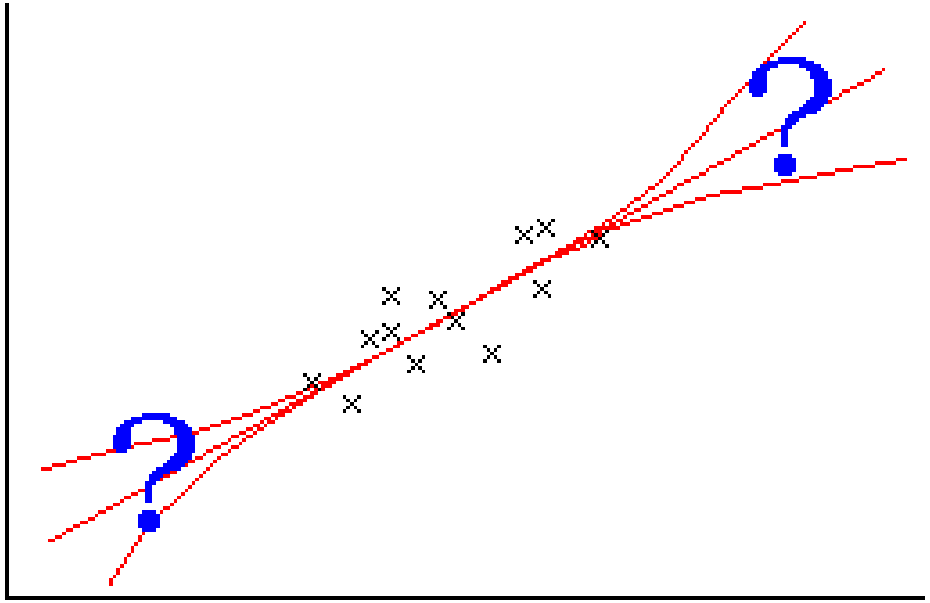
Bassin de la Sarthe
2882 km²

➢ Quelles valeurs de paramètres ?

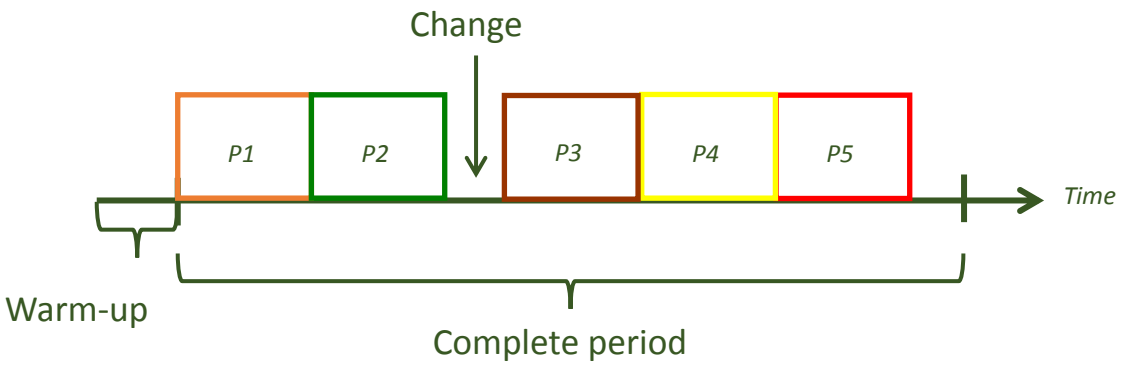
L'extrapolation, une faiblesse connue…

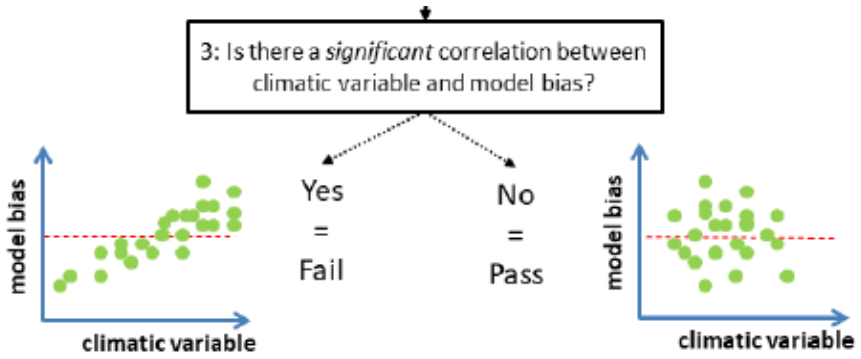
… mais domaine d'application classique du modèle hydrologique





Mesure de la robustesse des modèles hydrologiques

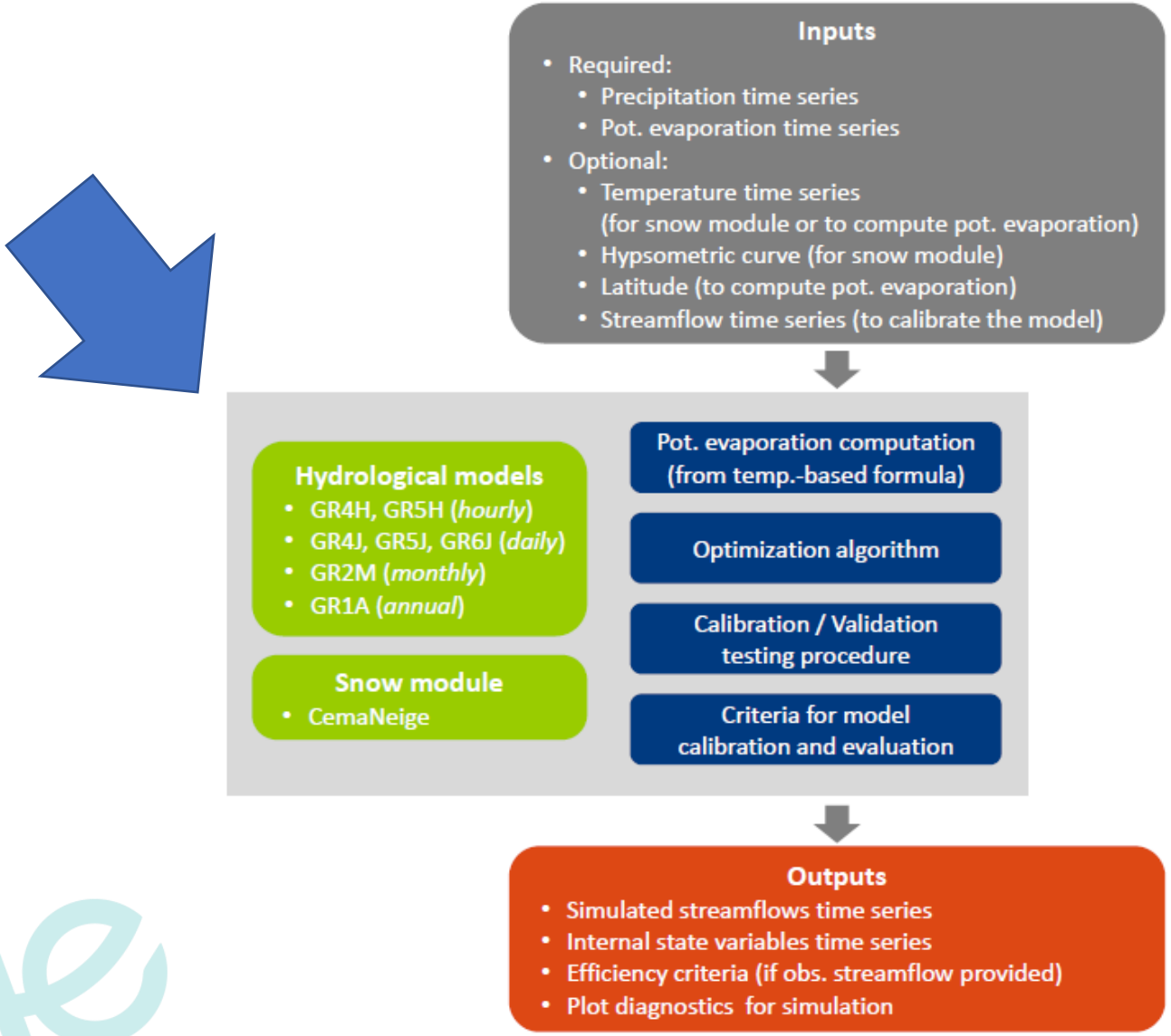




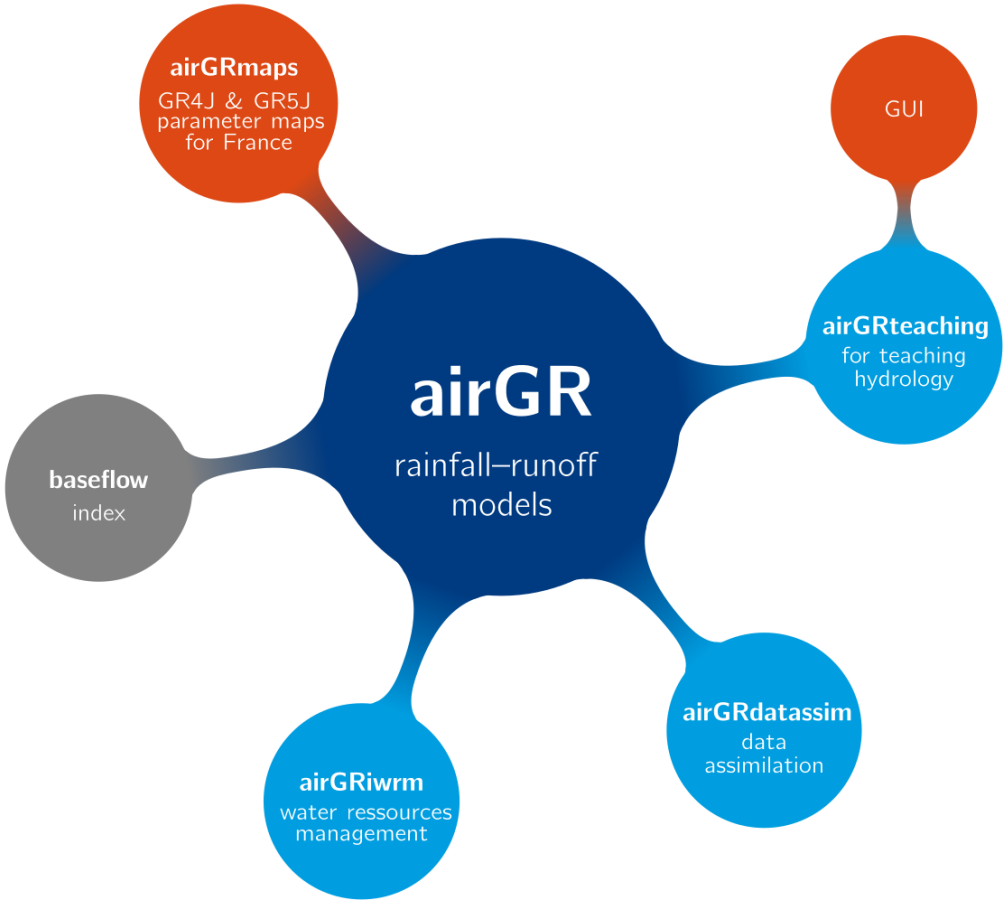
i) Stratégies de calage-contrôle (un modèle doit perdre peu de performance en étant contrôlé sur une période indépendante pour être transférable)

ii) Analyses a posteriori de l'évolution des erreurs (il ne doit pas y avoir de dépendance au climat)

Les modèles GR dans un package R, airGR

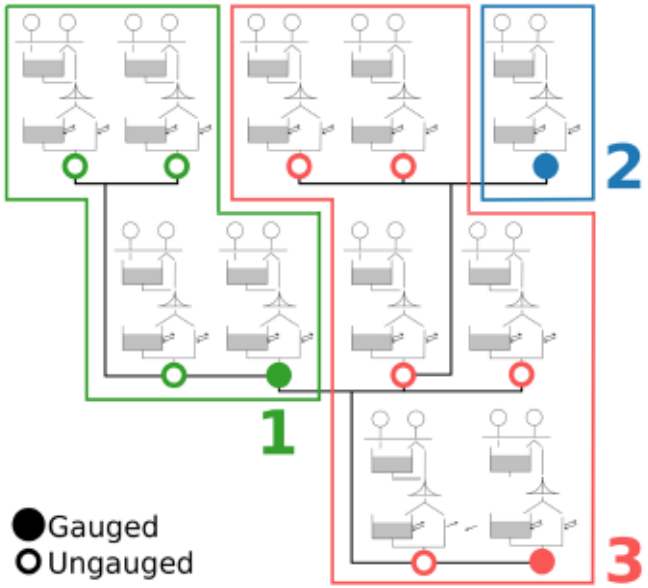


airGR R packages constellation

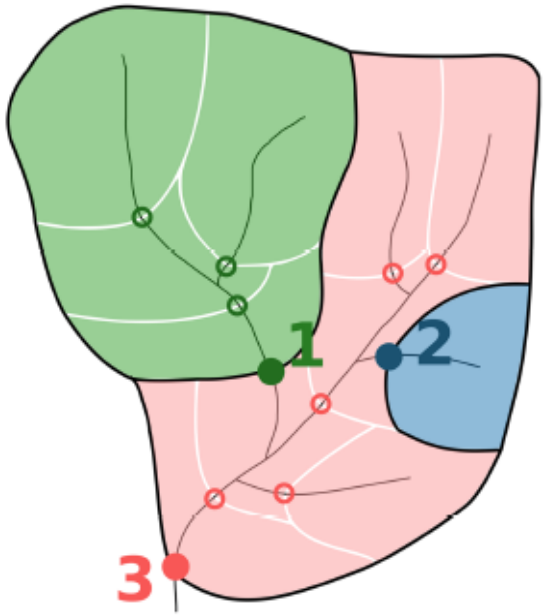


Une modélisation désormais semi-distribuée

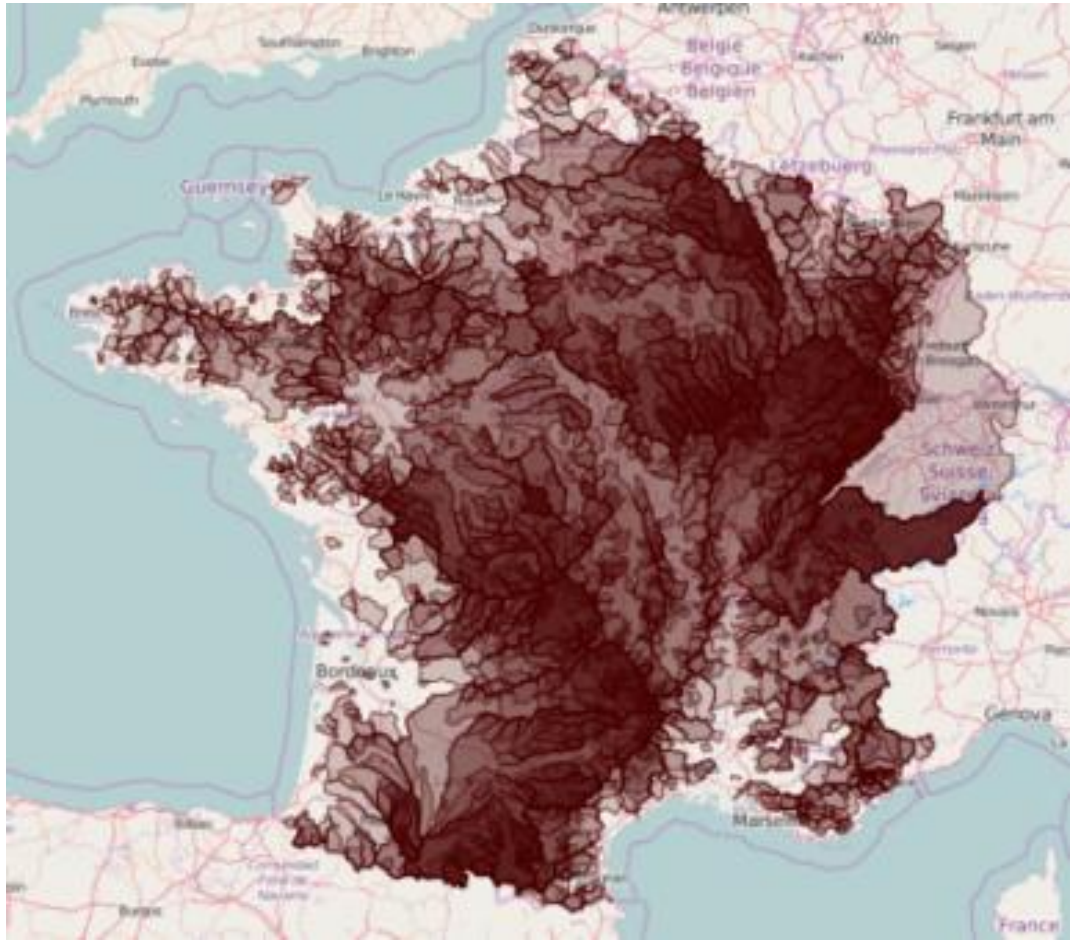
Pour une prise en compte plus fine des hétérogénéités spatiales



GRSD (example)



Example catchment



INRAE

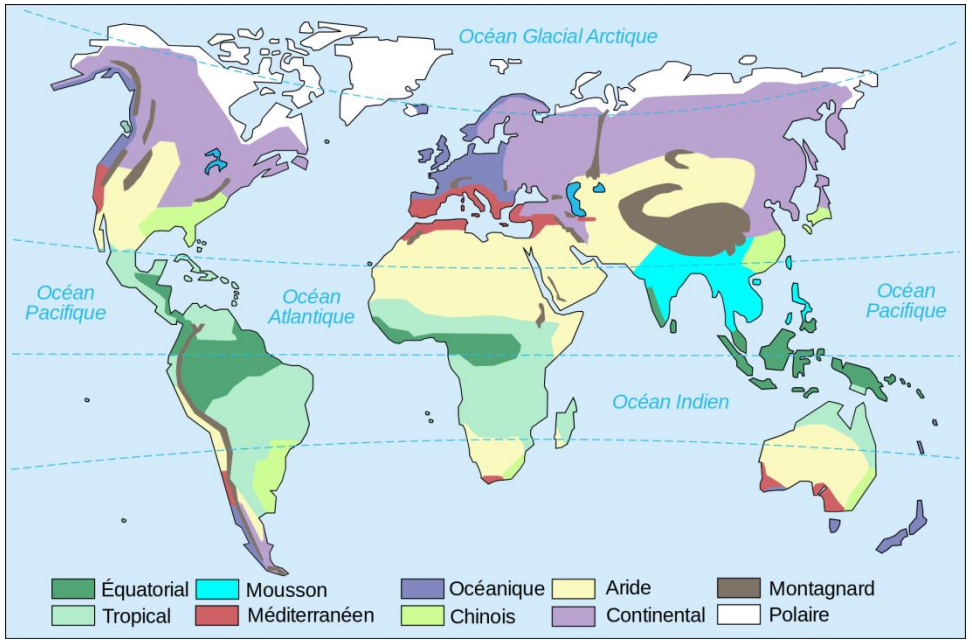
L’étude de l’impact du changement climatique

Le changement climatique, c’est quoi ?

- Wikipedia : « modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du **climat** global de la Terre ou de ses divers climats régionaux »
- GIEC : « statistically significant variation in either the mean state of the **climate** or in its variability, persisting for an extended period »

Le climat, c'est quoi ?

Wikipedia : « Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période donnée. L'étude du climat est la climatologie. Elle se distingue de la météorologie qui désigne l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelles. »



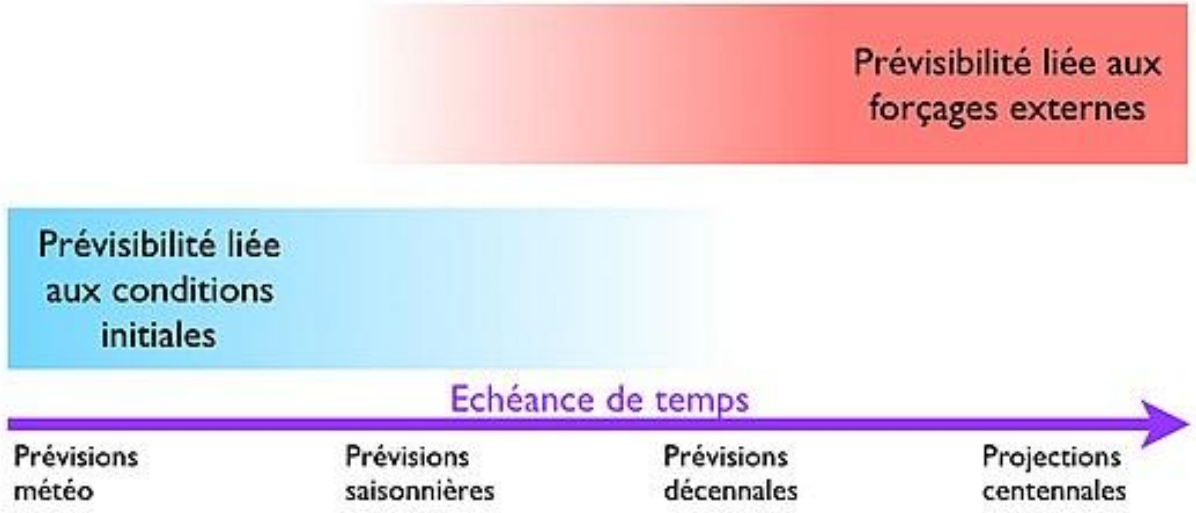
Carte simplifiée des climats

Différence entre météo et climat

- Météo : demain il va faire beau sur Saint-Pée-sur-Nivelle. Je suis bien content, parce que j'ai prévu de rester pour le weekend ☺
- Climat : en règle générale sur Saint-Pée-sur-Nivelle, en octobre la température moyenne est de 16 °C, et il pleut plus de 100 mm

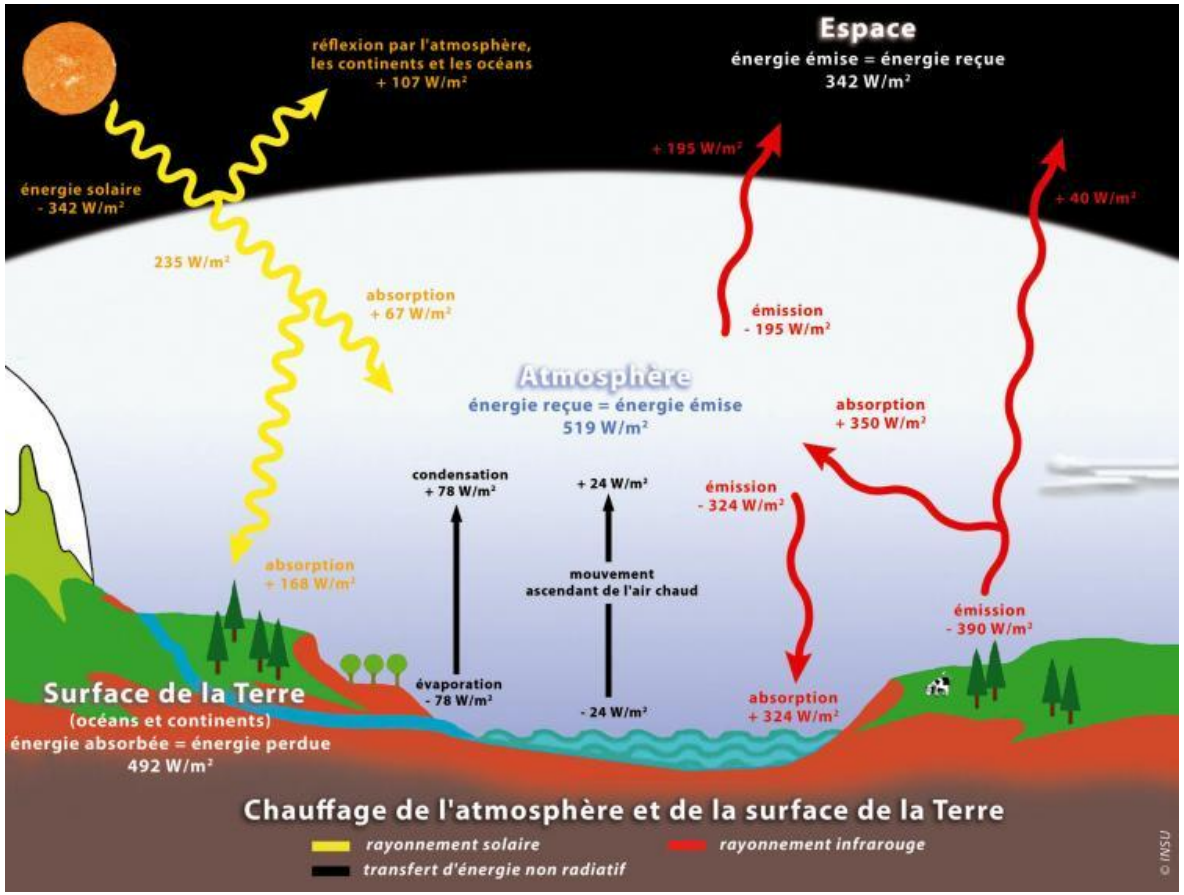
Météorologie et climatologie, quelles échelles de temps ?

- **Prévisions** immédiates / à courte échéance : d'une heure à quelques jours
- **Prévisions** à moyenne échéance : de 10 jours à un mois environ
- **Prévisions** saisonnières : de 1 à 6 mois
- **Projections** climatiques : du début du 20e siècle à la fin du 21e siècle



Effet de serre : un phénomène naturel…

- Soleil = principale source d'énergie de la Terre
- 30 % de l'énergie solaire est réfléchi par l'atmosphère, les continents et les océans, et donc renvoyé vers l'espace
- Le reste, soit 70 %, est absorbé par l'atmosphère, les continents et les océans et contribue ainsi à chauffer la surface de la Terre.



http://www.insu.cnrs.fr/image2888,.html

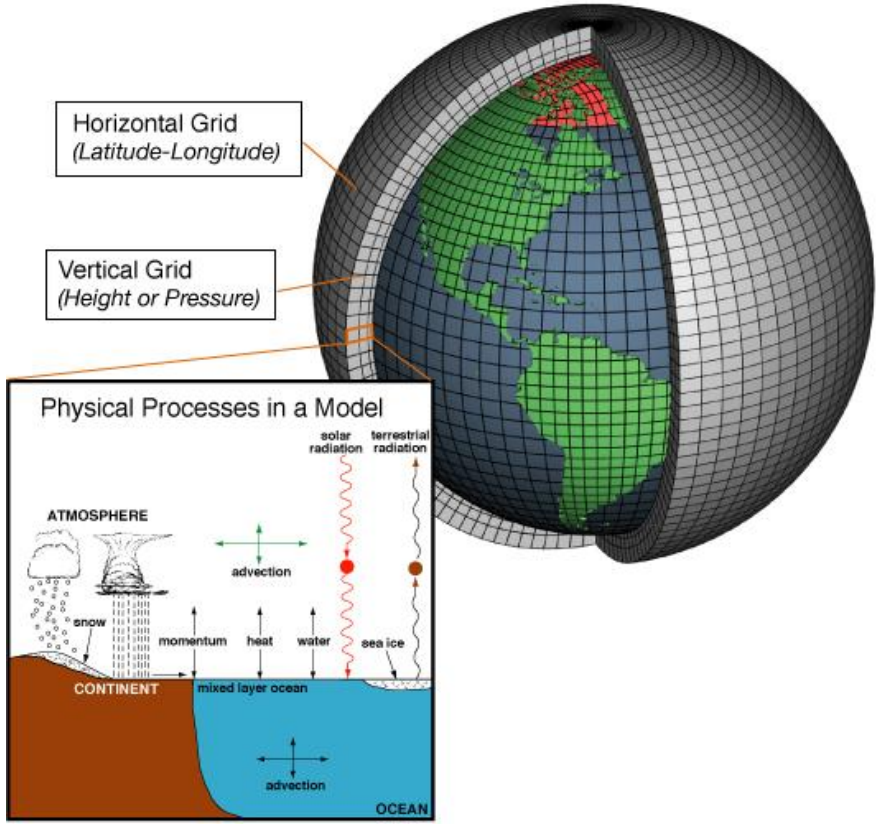
Effet de serre : un phénomène naturel… renforcé par les humains

gaz à effet de serre : vapeur d'eau, dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), oxyde nitreux (N_2O)

effet naturel : grâce à lui *T* moy Terre = 15°C (sinon, -18°C !)

effet renforcé par des émissions d'origine humaine (ex., enrichissement de atmosphère de dioxyde de carbone par combustion des énergies fossiles : industrie, transport, etc.)

Les modèles de circulation générale (GCM)

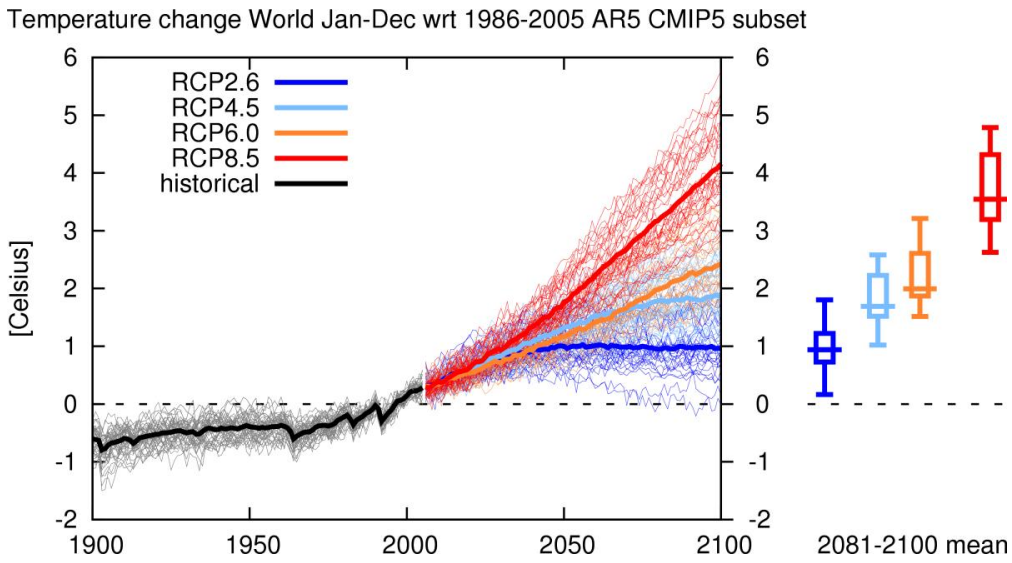


- Simulent la circulation atmosphérique et la circulation océanique
- Basés sur les équations de Navier-Stokes
- Mailles grossières
- Temps de calcul longs

Ces modèles ont besoin de forçages d'émission de gaz à effet de serre

Les scénarios futurs de gaz à effet de serre

- Les scénarios Representative Concentration Pathway (RCP, AR5, CMIP5, 2012)
  - 4 scénarios de forçage radiatif et d'évolution des sols définis a priori
  - Ces 4 scénarios forcent les modèles climatiques
    - RCP2.6 : atténuation
    - RCP8.5 : tendanciel



Sorties des GCM

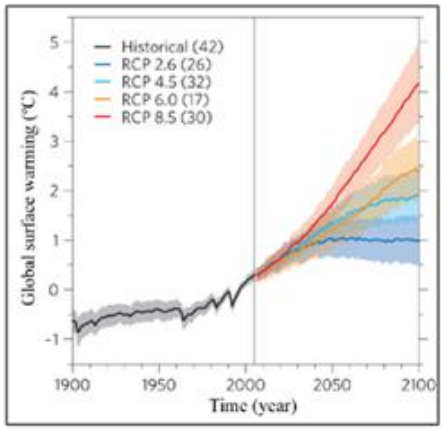
- **Variables d'intérêt** pour nous
  - Précipitation, température de l'air, vitesse du vent, humidité de l'air, rayonnements

- **Résolution spatiale**
  - Grille de 50 à 200 km de côté

- **Résolution temporelle**
  - Journalier

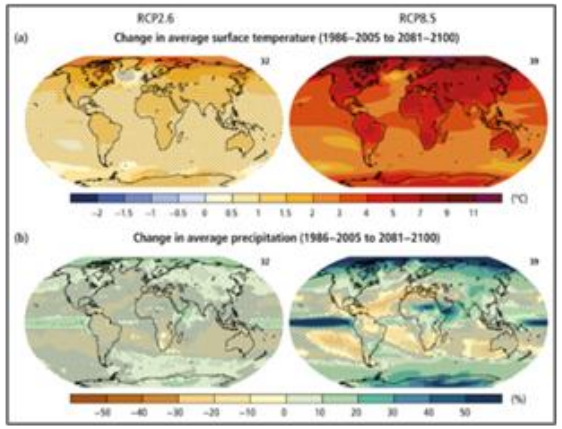
La chaine de modélisation de l'impact du changement climatique

RCPs



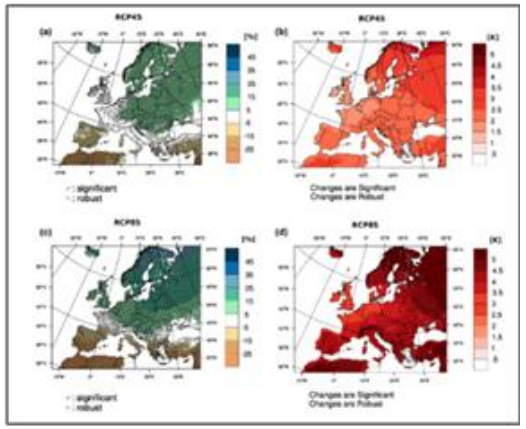
Source : Knutti and Sedlácek (2013)

GCMs



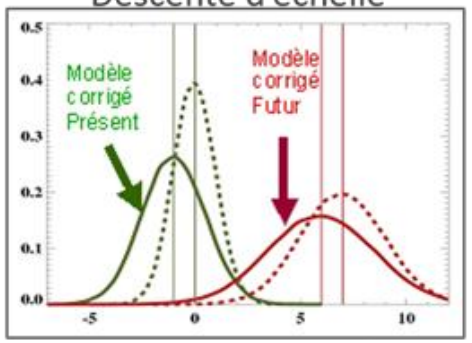
Source : Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects

RCMs



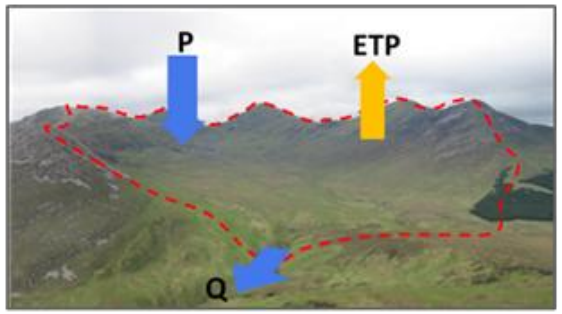
Source : Jacob et al., 2013

Corrections de biais/ Descente d'échelle



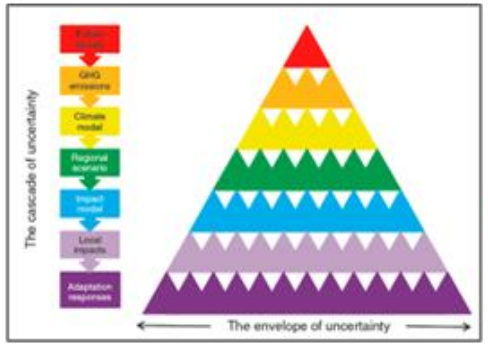
Source : Drias. Exemple méthode quantile-quantile

Modélisation hydrologique



Echelle d'étude : le bassin versant

Cascade d'incertitude



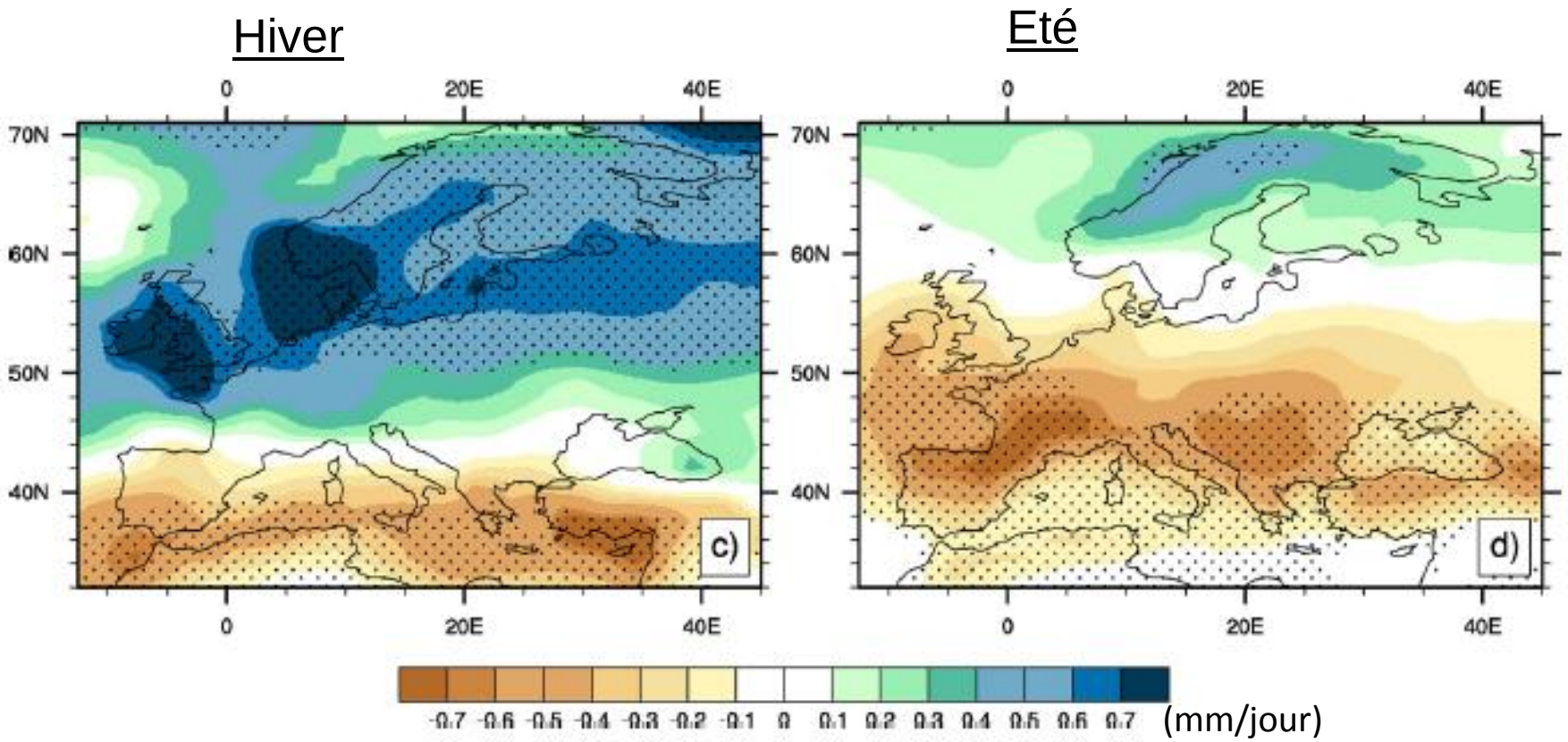
Wilby and Dessai (2010)

INRAE

Quels futurs pour l’eau en France ?

Evolution des précipitations à l'horizon 2100

Terray & Boé, 2013, CRAS



Résultats issus de plus de 25 GCM et plus de 60 projections pour le RCP8.5

Explore 2070

Etude de référence en France

- Explore 2070 : Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?

- Projet MTE (2010-2012)

- Chauveau, M., S. Chazot, C. Perrin, P.-Y. Bourgin, E. Sauquet, J.-P. Vidal, N. Rouchy, E. Martin, J. David, T. Norotte, P. Maugis et X. De Lacaze, 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? (What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070?). *La Houille Blanche*(4): 5-15, doi: 10.1051/lhb/2013027.

- Mise à jour des projections hydrologiques à venir dans le cadre du projet Explore 2, sur la base des données Drias 2020 !

explore2070 – Eau et changement climatique

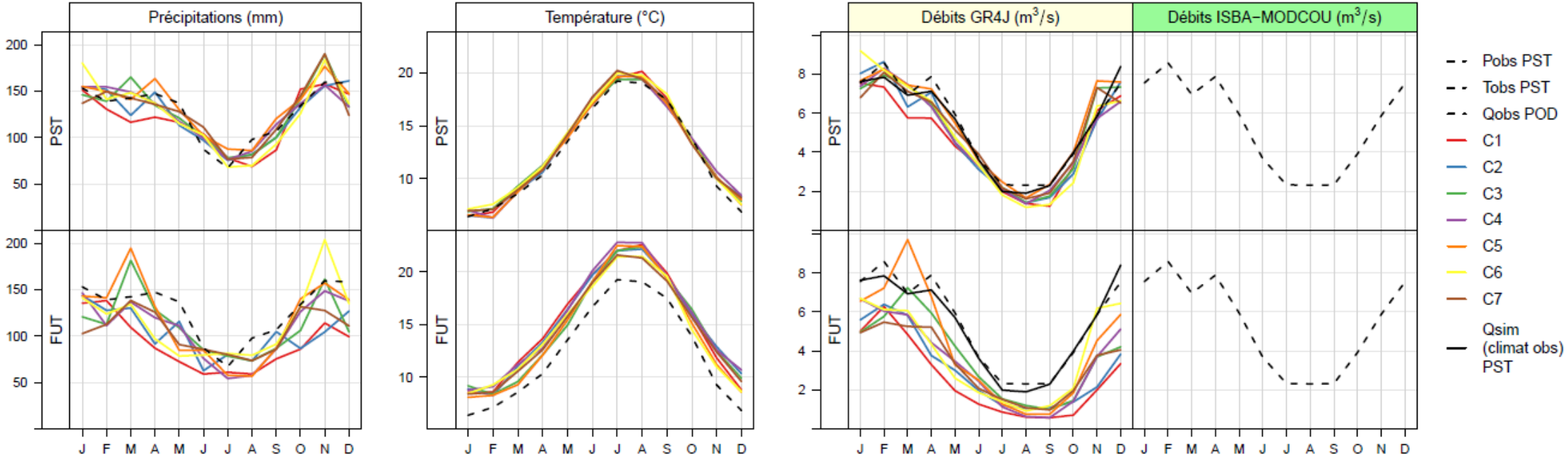
BRL Ingénierie — irstea — METEO FRANCE Toujours un temps d'avance

ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

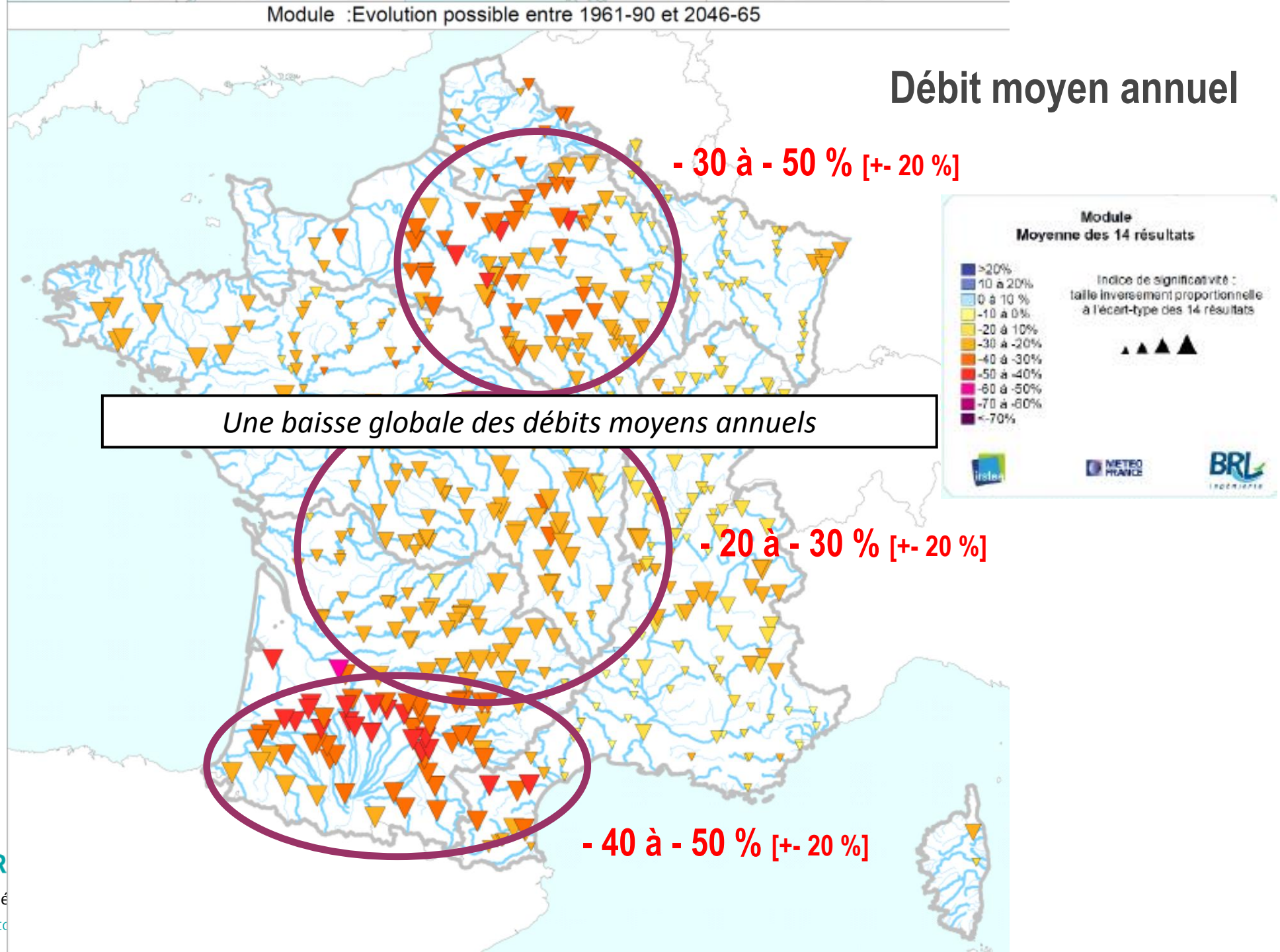
Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

Nom	La Nivelle à Saint-Pée-sur-Ni	
Identifiant Explore2070	1195	
Code Banque Hydro	S5144010	
Surface du bassin versant	142 km^2	
Période d'observation des débits	POD : 1969-1991	
Période de simulation temps présent	PST : 1961-1990	
Période de simulation temps futur	FUT : 2046-2065	
Modèles hydrologiques utilisés	GR4J	ISBA-MODCOU

Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de Δ entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q. Δ minimum, Δ médian et Δ maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

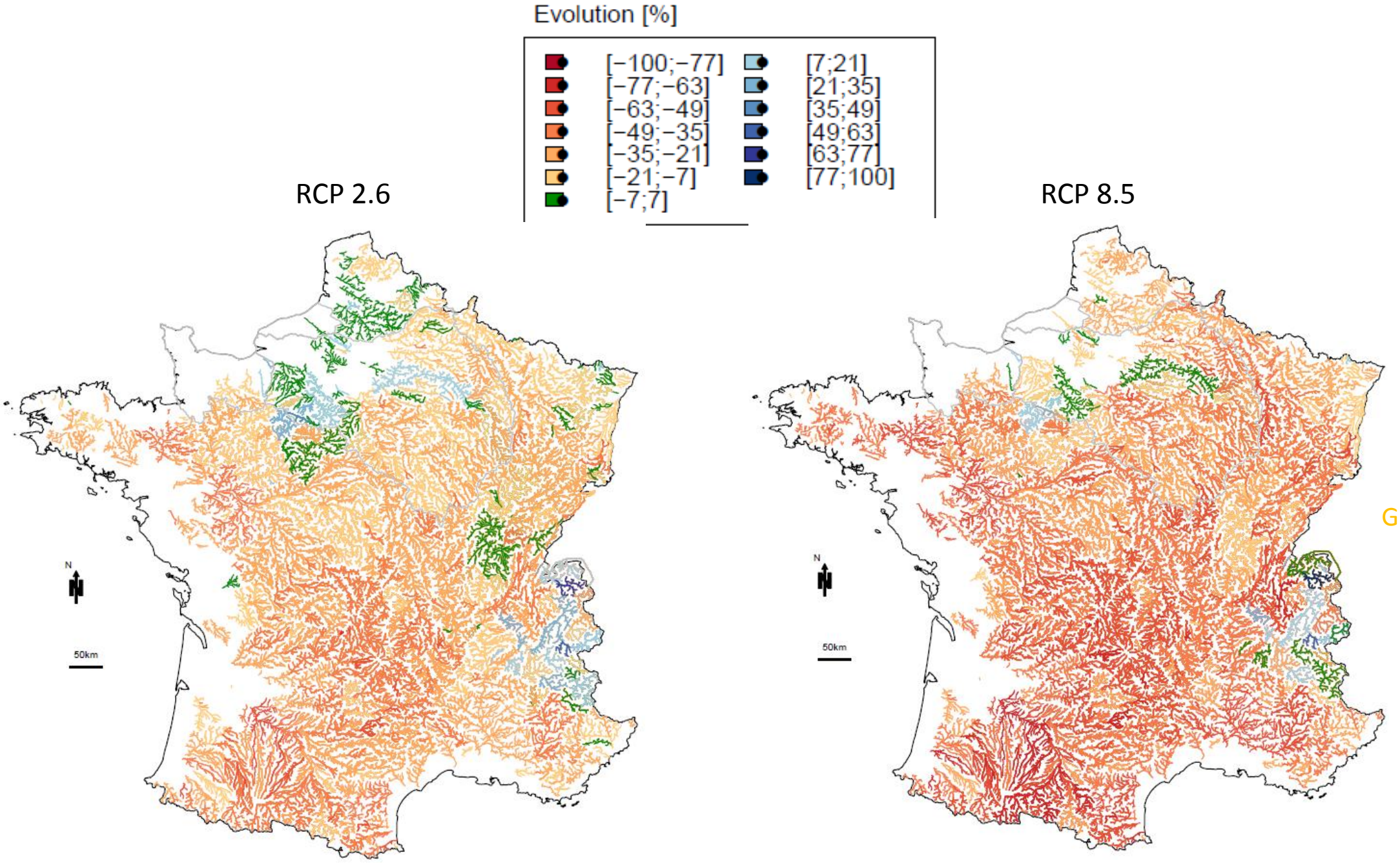


Débit moyen annuel



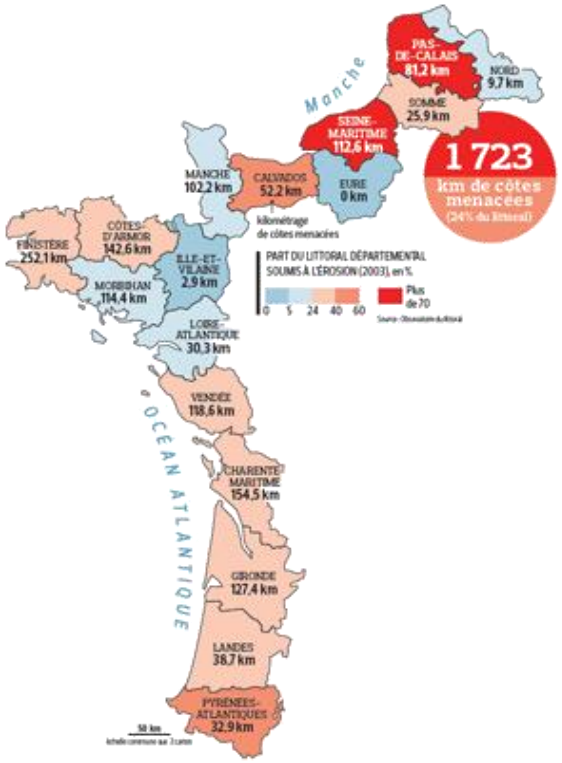
Une baisse globale des débits moyens annuels

Carte de l'évolution du QMNA5 dans le futur (2071-2100 vs 1971-2000)

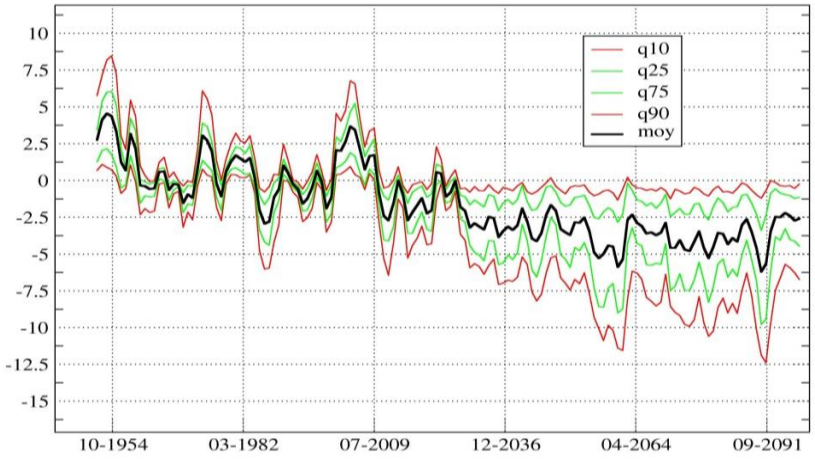


G. Thirel, 2019

Autres impacts



- Augmentation probable d'inondations locales et temporaires dues à des phénomènes ponctuels de précipitations intenses
- Augmentation du niveau de la mer (aggravation de l'érosion, augmentation du risque de submersion, augmentation du risque d'intrusion saline en nappe)
- Difficulté à maintenir une qualité de l'eau satisfaisante
- Baisse du niveau des nappes



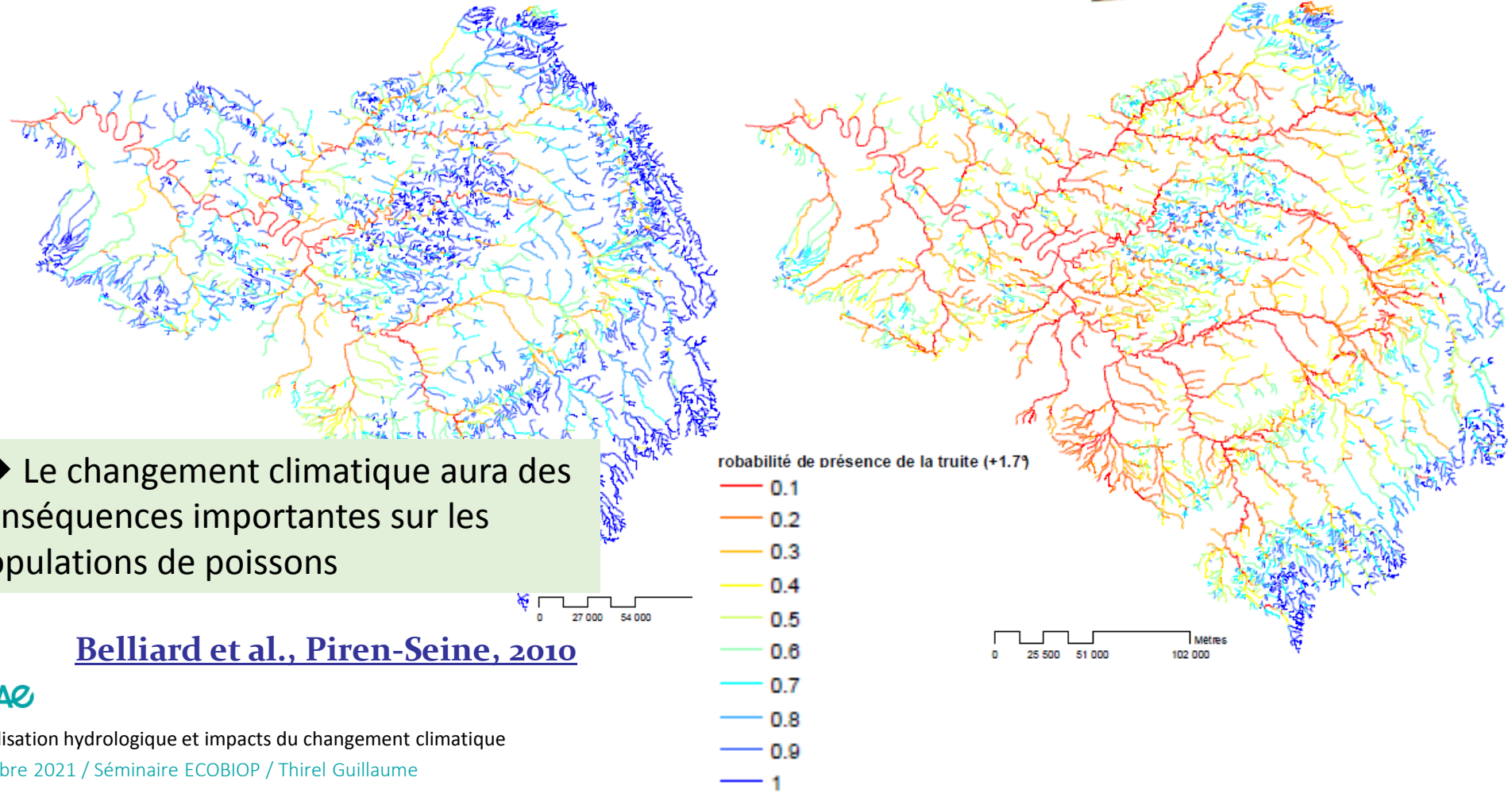
Evolution des populations piscicoles dans le bassin de la Seine

Probabilité de présence de la truite

Conditions thermiques actuelles

Truite

températures estivales + 1,7 °C
températures hivernales + 1,3 °C



➔ Le changement climatique aura des conséquences importantes sur les populations de poissons

Belliard et al., Piren-Seine, 2010

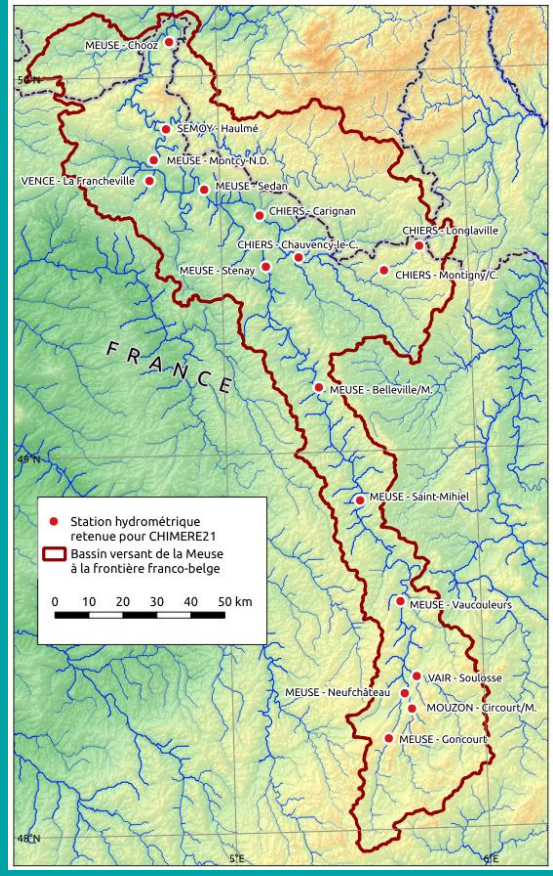
Mes travaux de recherche

INRAE

Une étude d’impact du changement climatique récemment achevée

CHIMERE 21 (CHIers-MEuse évolution des REssources au 21e siècle)

Financement Agence de l’Eau Rhin-Meuse



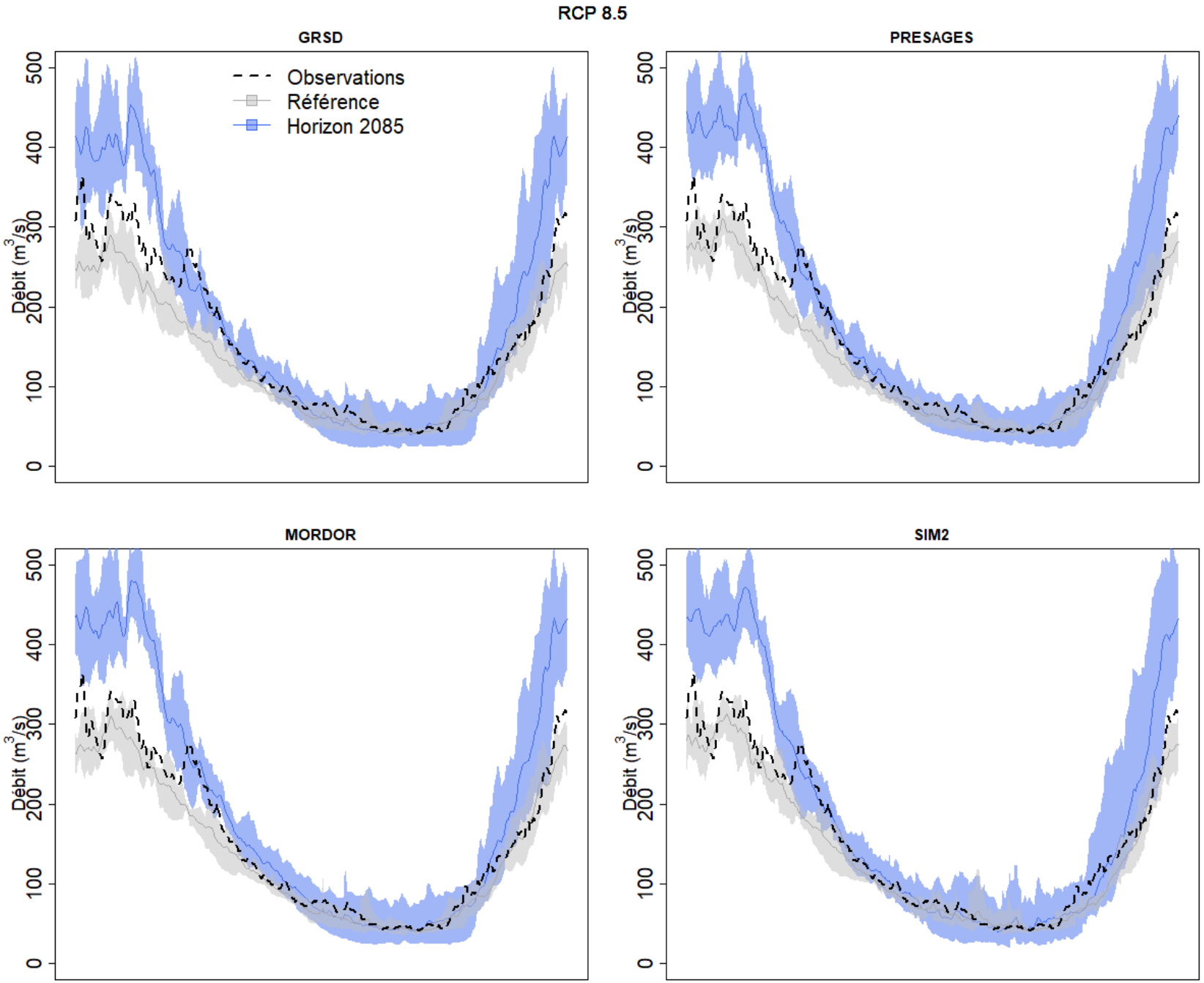
Régimes futurs

RCP 8.5, Horizon 2071-2100

Régimes futurs à Chooz (frontière belge)

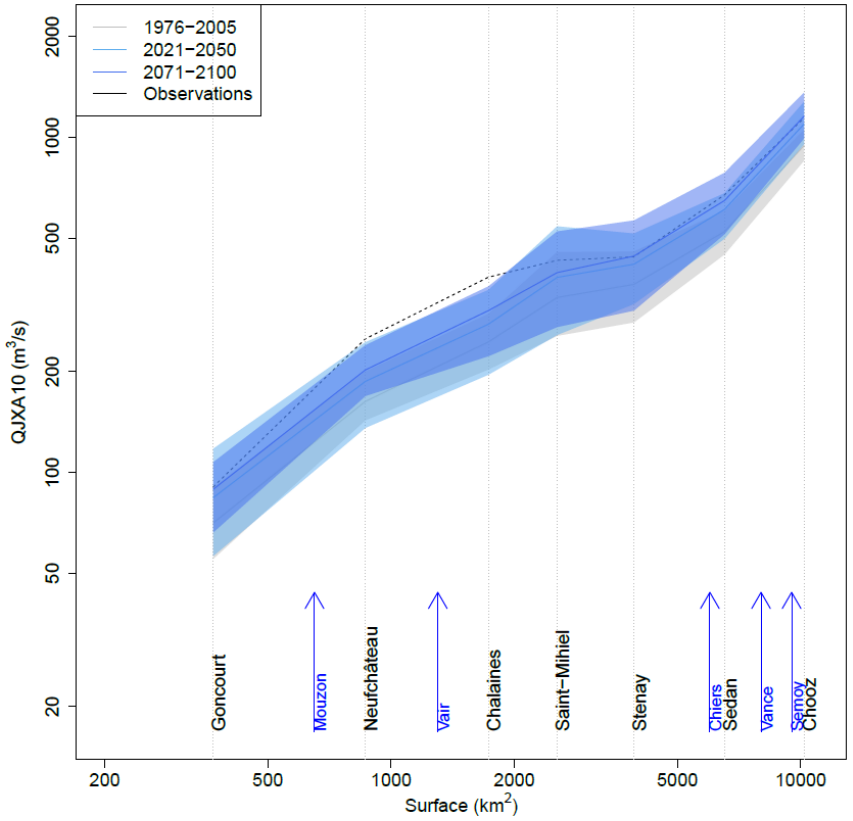
Large augmentation des débits durant la période de forts débits

Large incertitude sur l'évolution des étiages

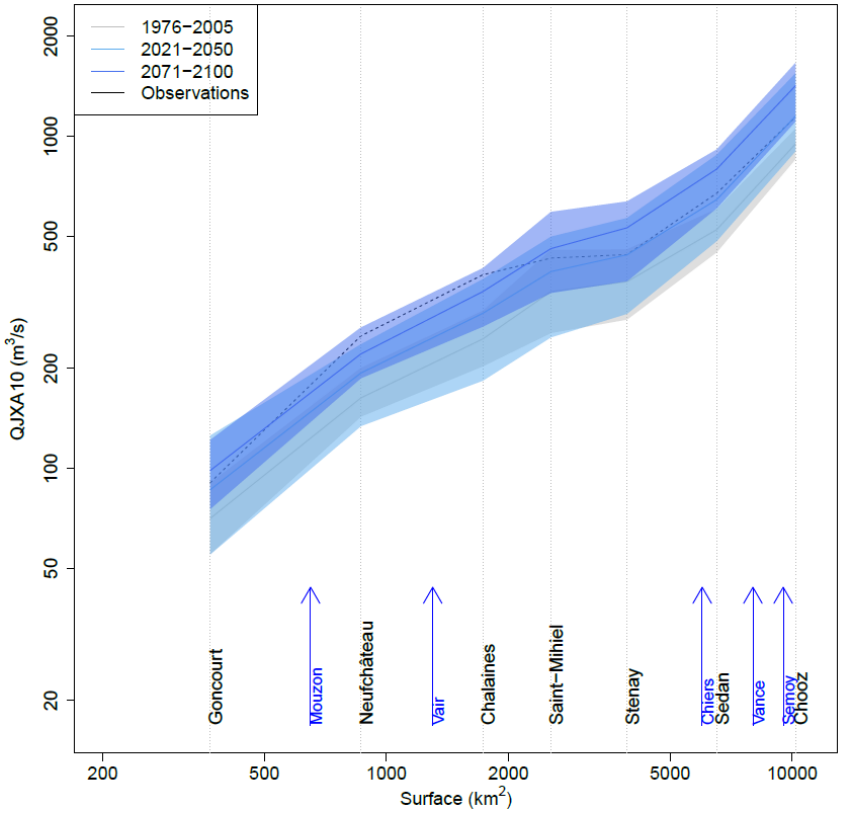


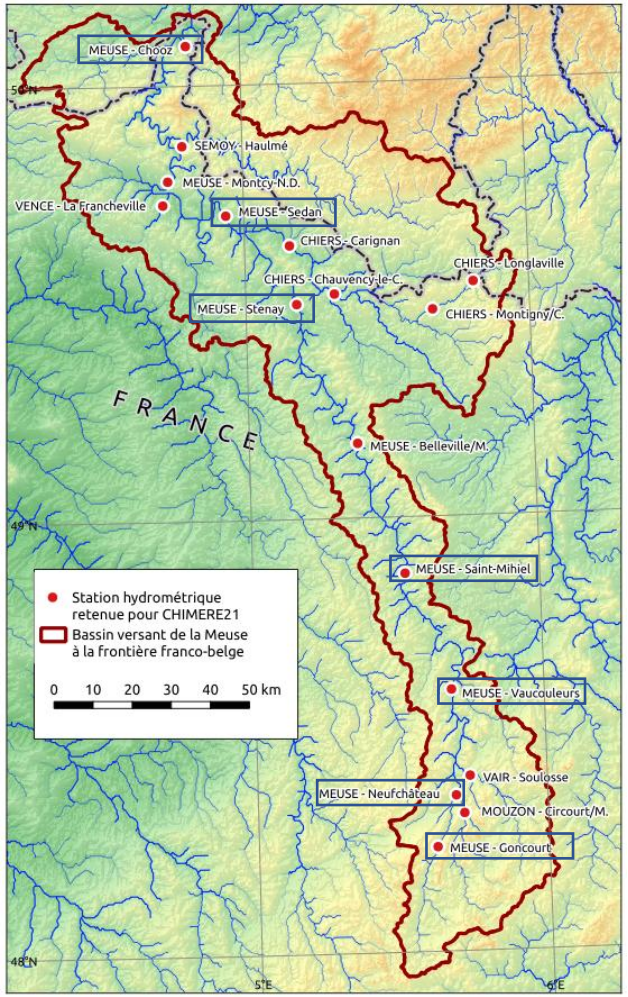
Evolution des forts débits le long de la Meuse

RCP 4.5



RCP 8.5





RCP 4.5: augmentation modérée (seulement pour le futur lointain)

RCP 8.5: augmentation importante, notamment en aval

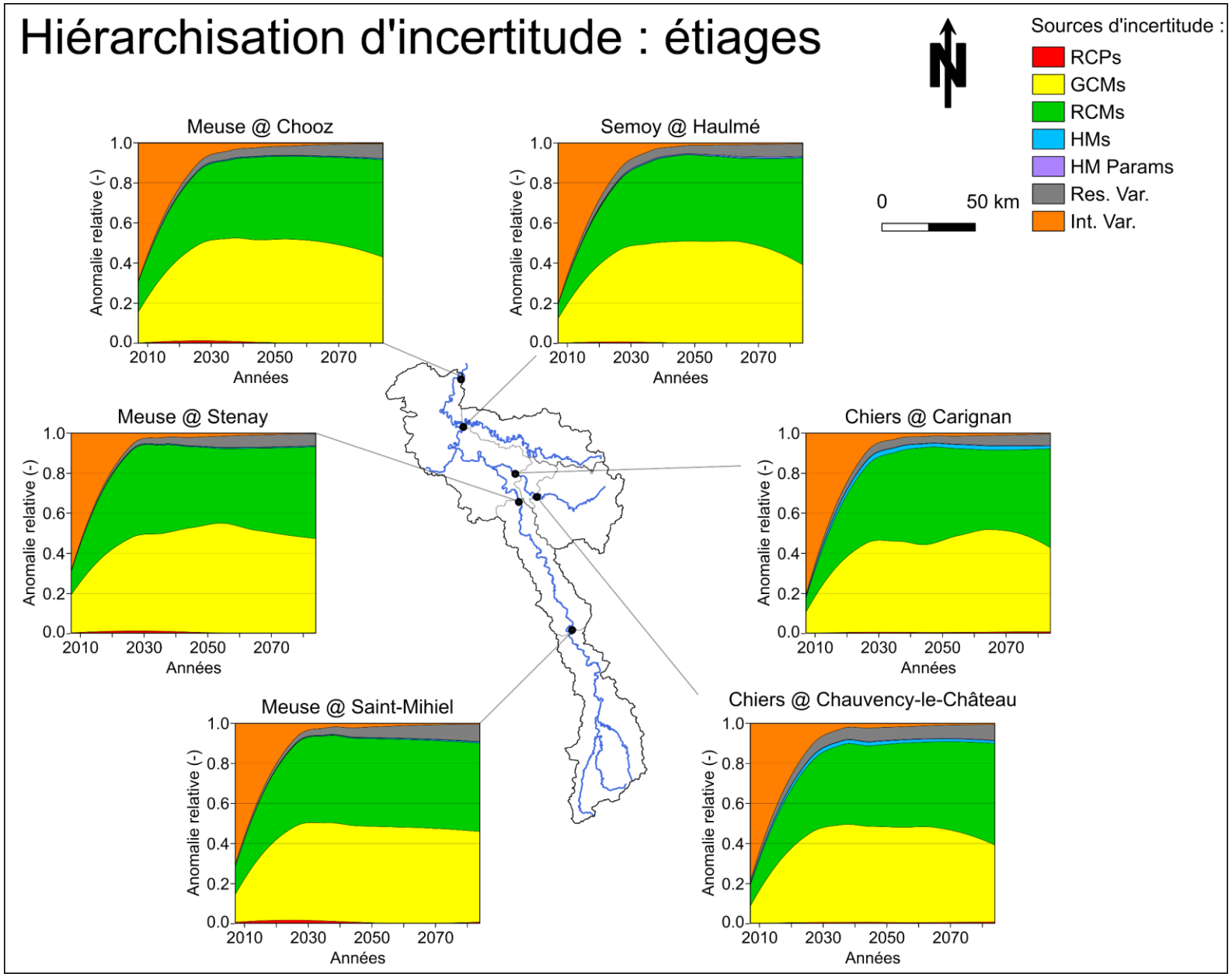
Hiérarchie des incertitudes pour les bas débits

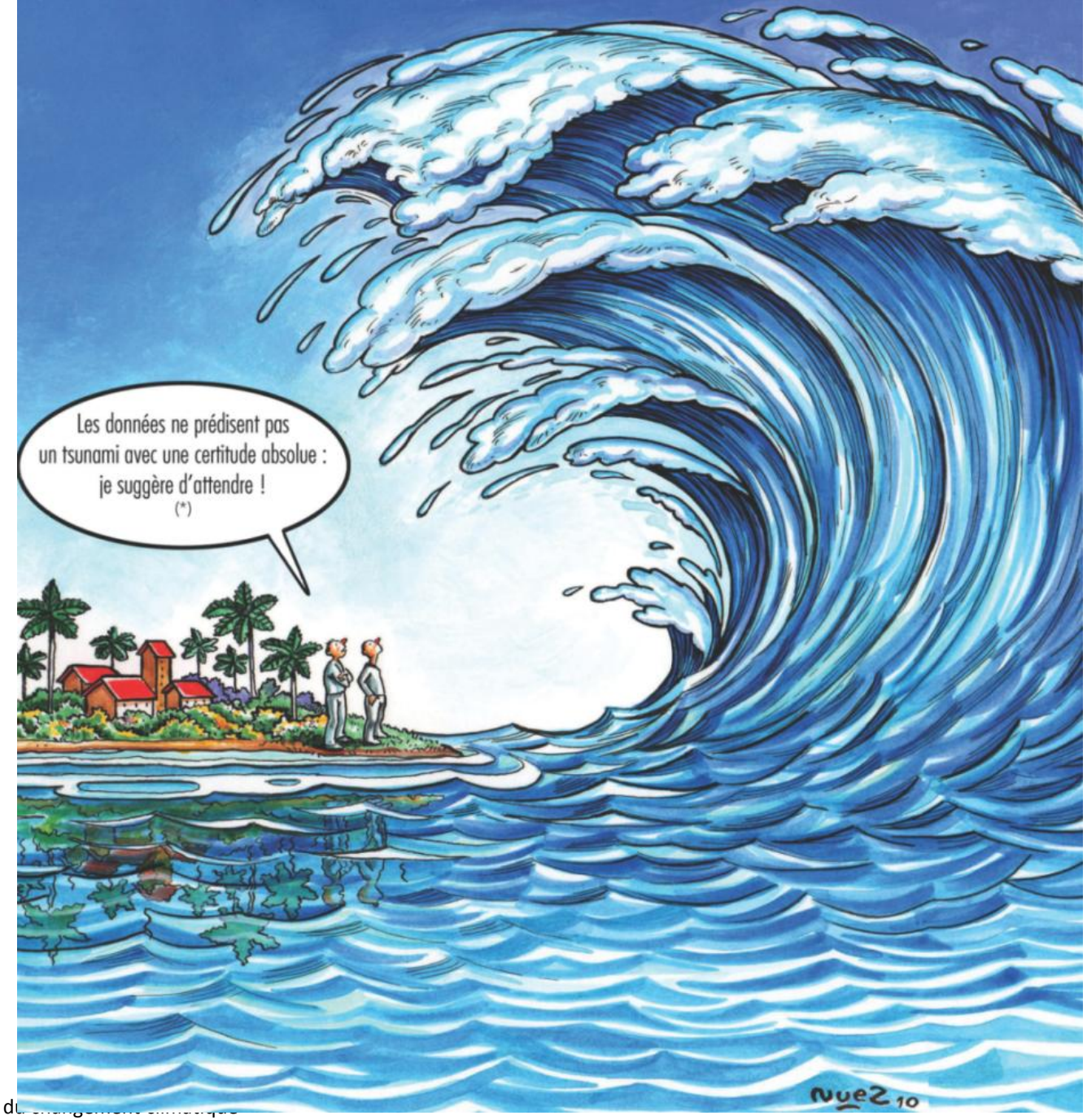
Indicateur = VCN3

La variabilité interne domine pour le futur proche

GCMs et RCMs dominent ensuite

Les autres sources restent limitées

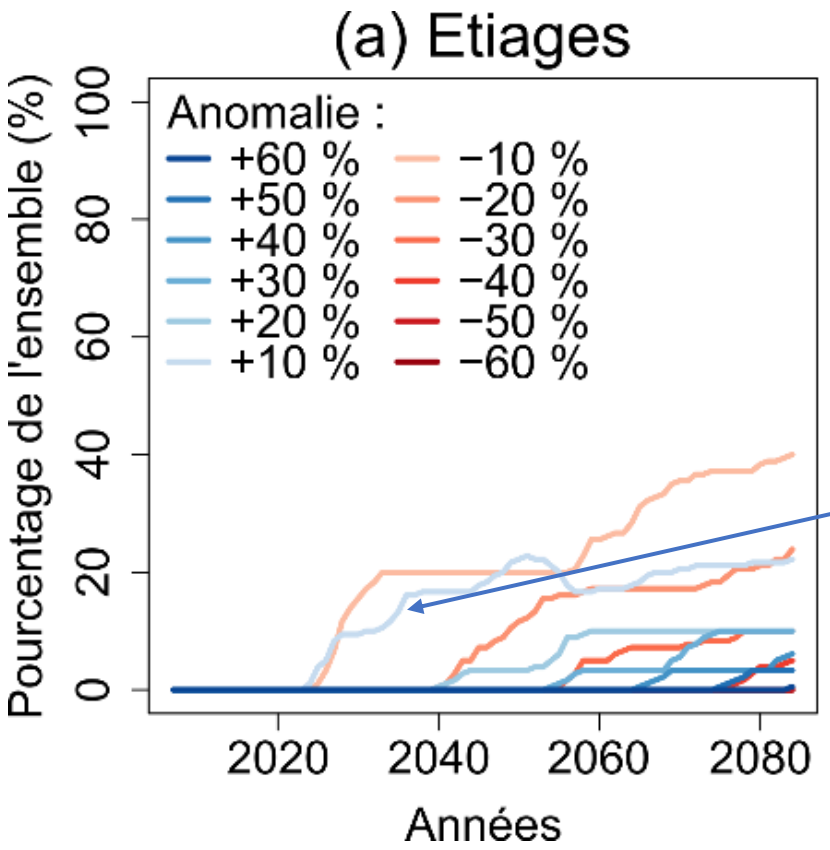




Source : Union of Concerned Scientists

Probabilités des différentes tendances

Les gestionnaires se demandent : « Quelle est la probabilité que l'indicateur change de X % sous changement climatique ? » et « A quelle échéance la tendance va-t-elle émerger ? »



Pourcentage de toutes les simulations indiquant une tendance d'au moins +10% des bas débits (VCN3)

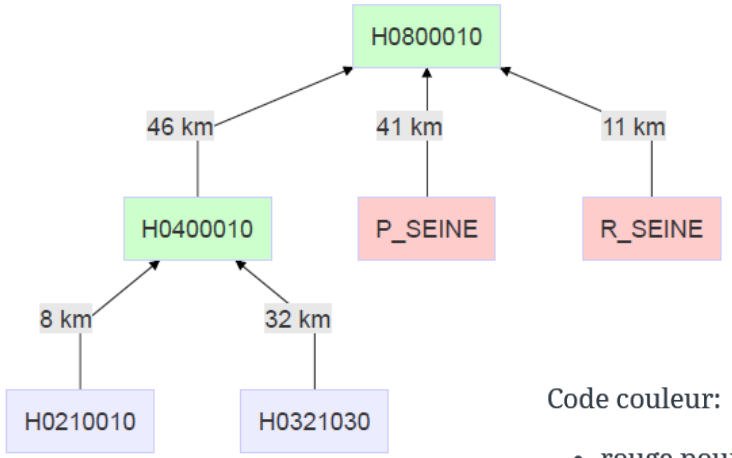
Inclusion des usages dans la modélisation hydrologique

Vers l'étude des stratégies d'adaptation au changement climatique

airGRiwrm

Une extension d'airGR pour la gestion intégrée des ressources

Package implémenté par D. Dorchies, UMR G-EAU, INRAE
http://airgriwrm.g-eau.fr/



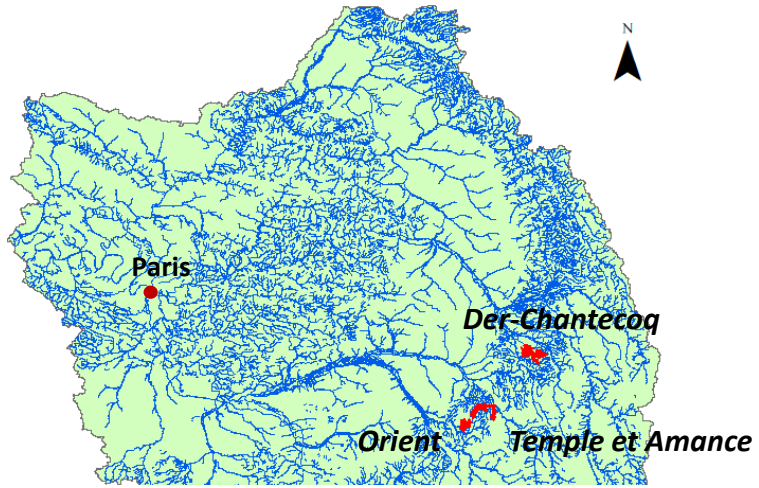
Code couleur:

- rouge pour un noeud d'entrée directe (pas de simulation hydrologique)
- bleu pour un noeud amont (modèle GR)
- vert pour noeud intermédiaire/aval (modèle GR + LAG)

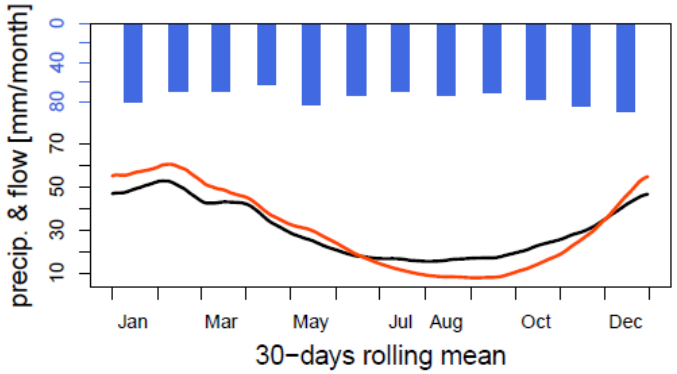
id	down	length	model	area
H0800010	NA	NA	RunModel_GR4J	3499.50
H0400010	H0800010	45.81	RunModel_GR4J	2340.37
H0210010	H0400010	7.86	RunModel_GR4J	1462.66
H0321030	H0400010	32.34	RunModel_GR4J	548.93
P_SEINE	H0800010	41.00	NA	NA
R_SEINE	H0800010	11.00	NA	NA

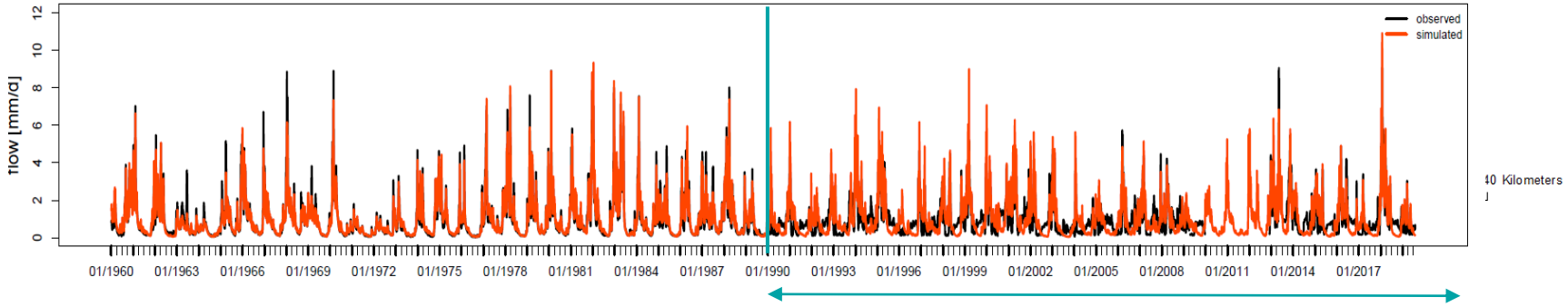
Une première application sur la Seine

Stage de Laura Nunez Torres



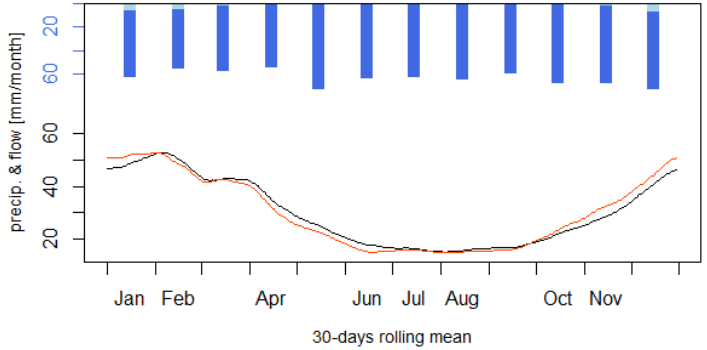
Modélisation sans intégration des lacs-réservoirs

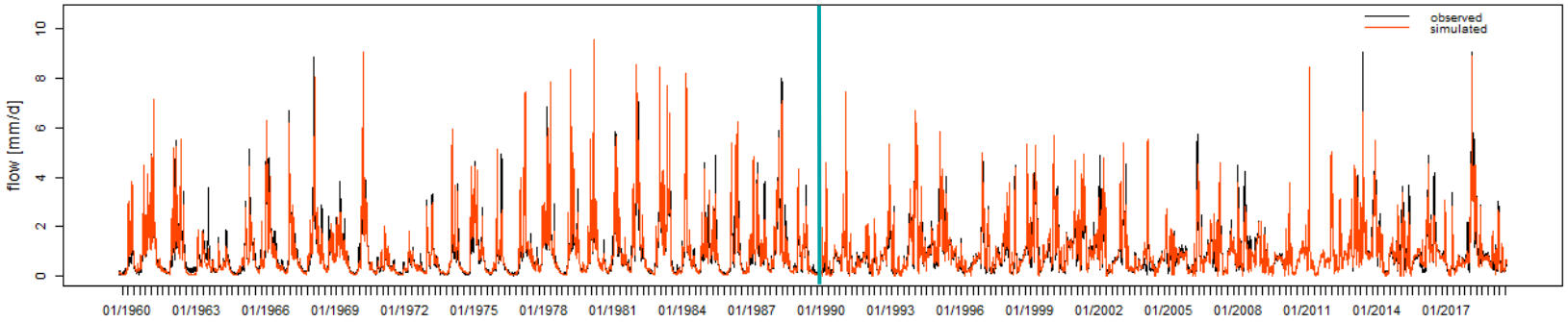




Mise en service des lacs-réservoirs Temple et Amance

Modélisation avec intégration des lacs-réservoirs





Stratégies d'adaptation au changement climatique

Thèses de Thibault Lemaitre-Basset et Myriam Soutif—Bellenger + collab. D. Dorchies

- Objectifs :
  - Implémenter des modèles d'usage de l'eau (irrigation, canaux, alimentation en eau potable, énergie, lacs-réservoirs…)
  - Mettre en place de la modélisation intégrée (i.e. le prélèvement n'est réalisé que si certaines règles sont respectées, et le débit simulé est impacté par le prélèvement)
  - Tester des stratégies d'adaptation au changement climatique

Thèse Seinarios

Scénarios de biodiversité dans le bassin de la Seine face aux changements globaux sous contraintes de connectivités

Thèse Seinarios : Scénarios de biodiversité dans le bassin de la Seine face aux changements globaux sous contraintes de connectivités

Doctorant : Swann Félin

Encadrement : Aliénor JELIAZKOV (HYCAR HEF, INRAE), Guillaume THIREL (HYCAR HYDRO, INRAE), Gaël GRENOUILLET (EDB, Univ. Toulouse)

Financement : Agence de l'Eau Seine-Normandie et MP BIOSEFAIR

Question de recherche :

Quel est le rôle des connectivités et du contexte paysager dans le devenir de la biodiversité aquatique face aux changements globaux et aux modifications hydrologiques associées ?

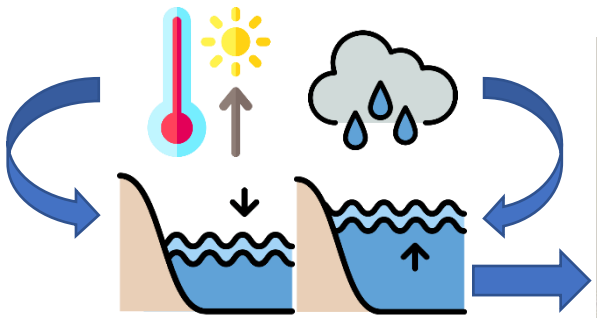
Objectif finalisé :

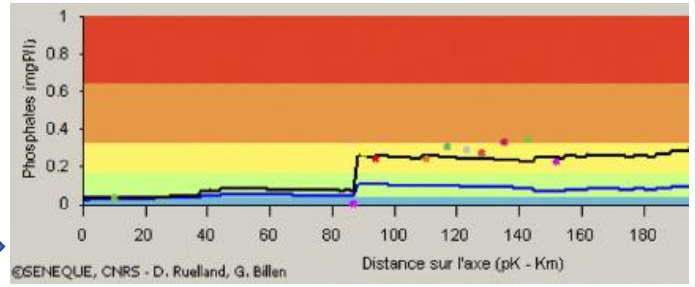
Produire des prospectives de biodiversité et identifier les zones à risques sous scénarios hydroclimatiques, territoriaux et de connectivités

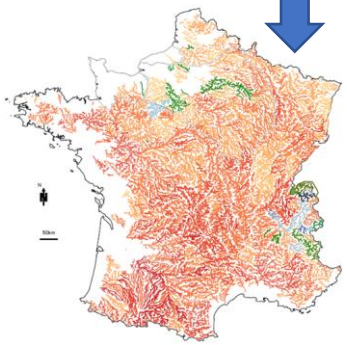
Approche générale

- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin

Ruelland & Billen 2015



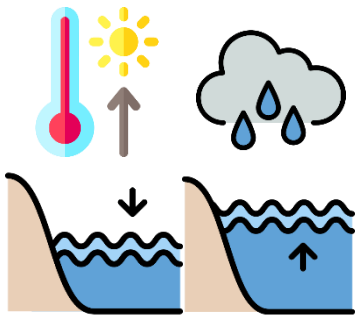




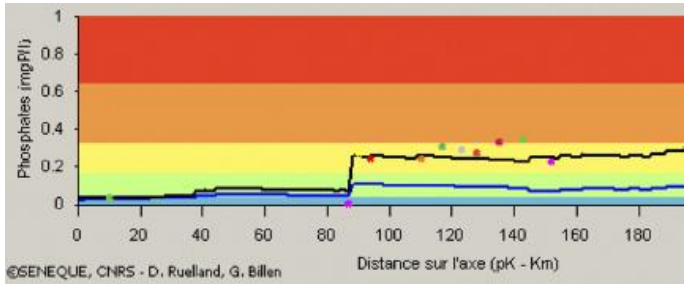
Evolution du débit d'étiage quinquennal (%)

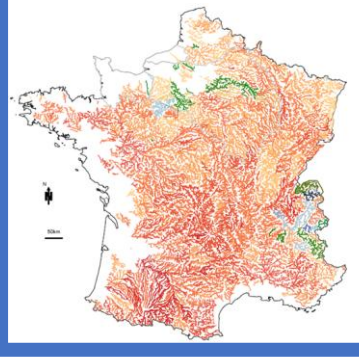
Approche générale

- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements



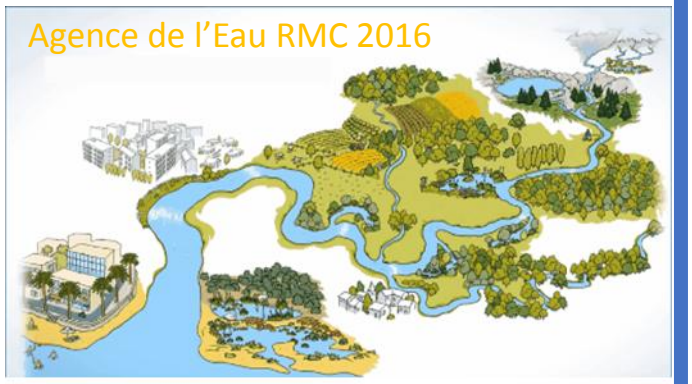
Ruelland & Billen 2015

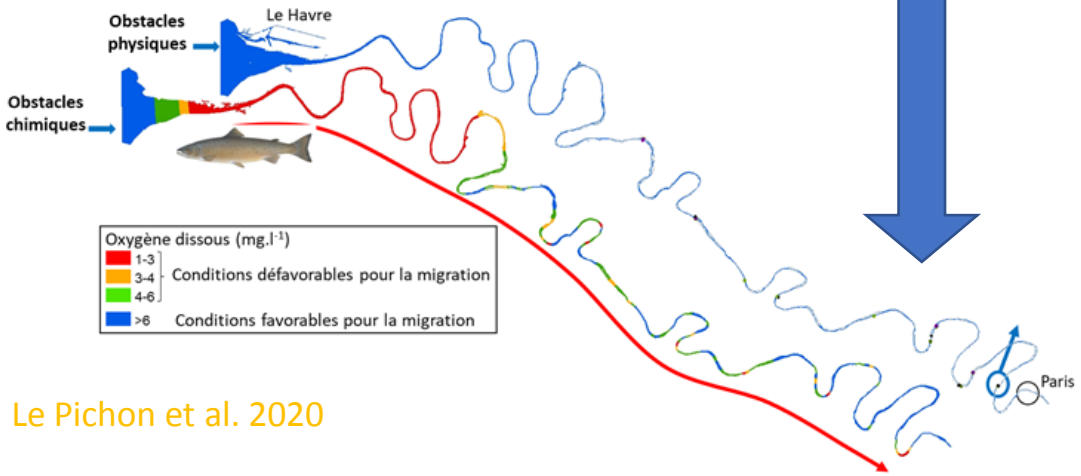




Evolution du débit d'étiage quinquennal (%)

Agence de l'Eau RMC 2016

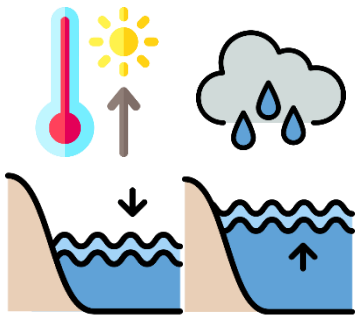




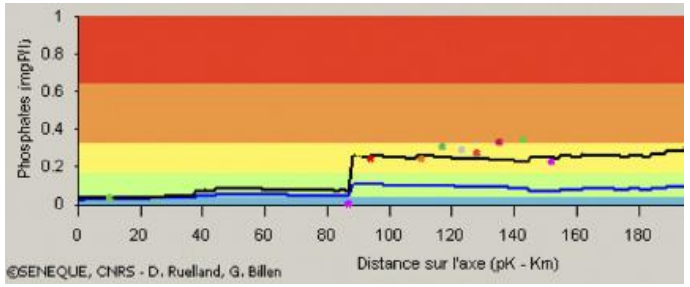
Le Pichon et al. 2020

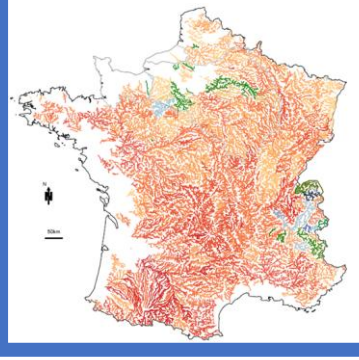
Approche générale

- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements
- Prédire la **distribution actuelle des espèces** en fonction de la favorabilité des habitats **et** de leur accessibilité



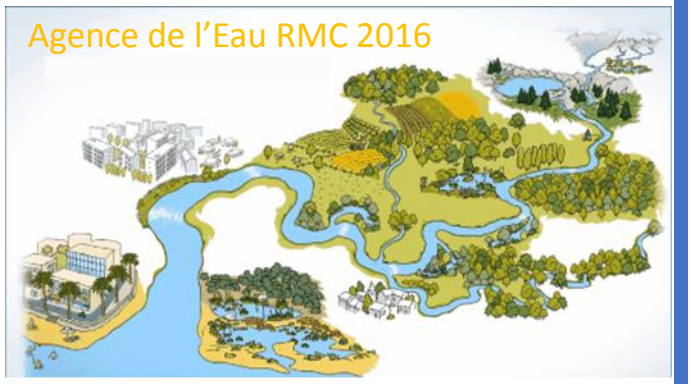
Ruelland & Billen 2015

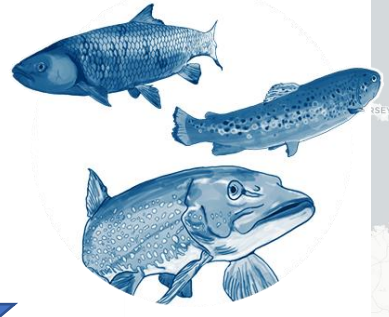


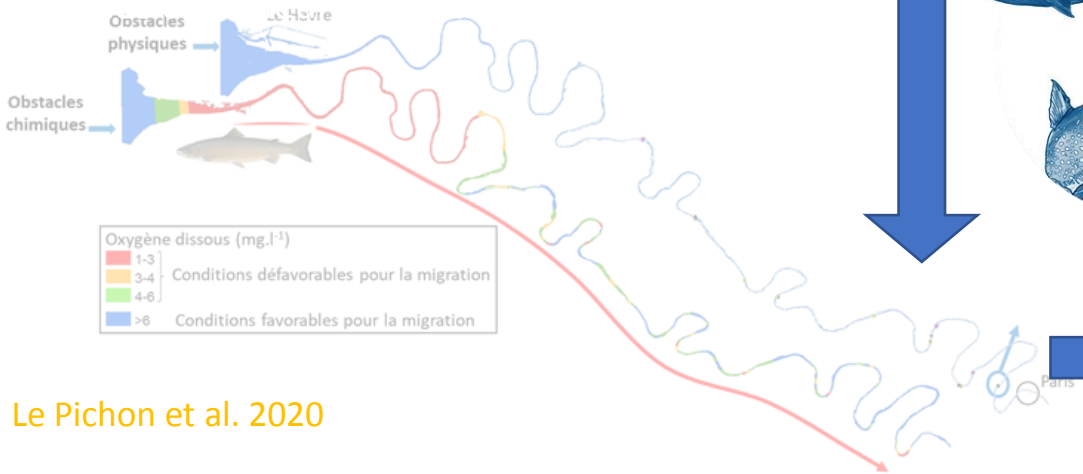


Evolution du débit d'étiage quinquennal (%)

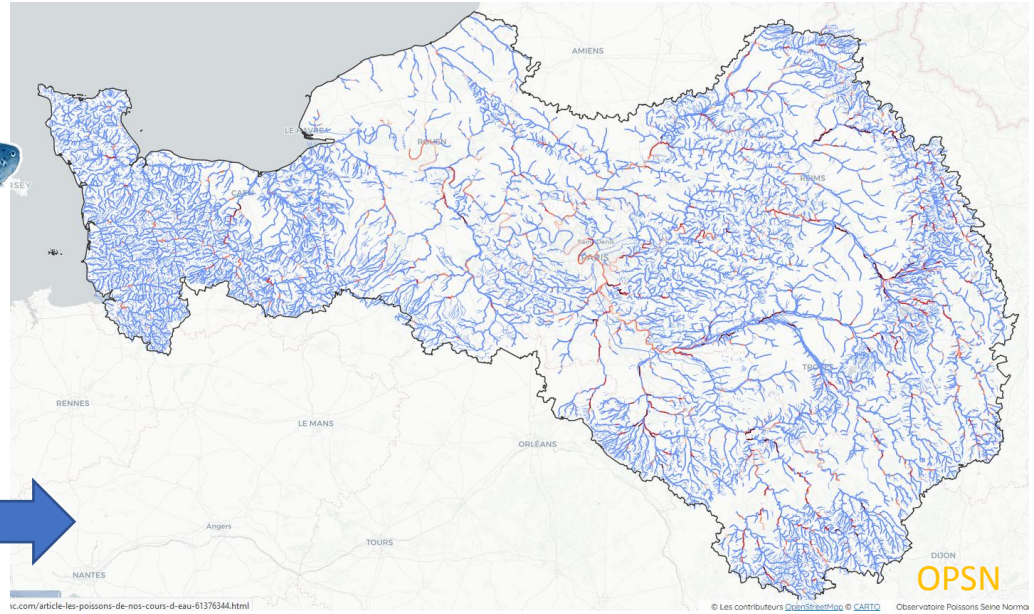
Agence de l'Eau RMC 2016







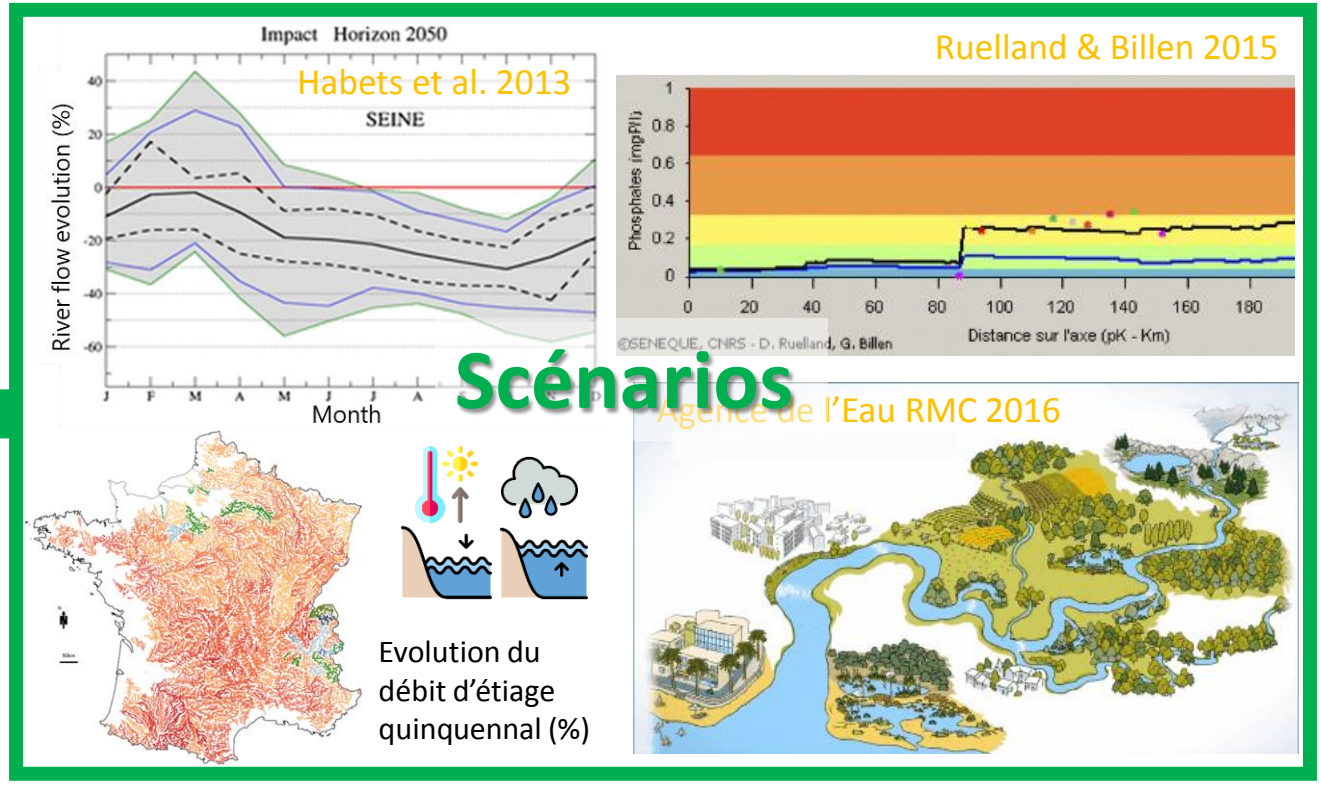
Le Pichon et al. 2020

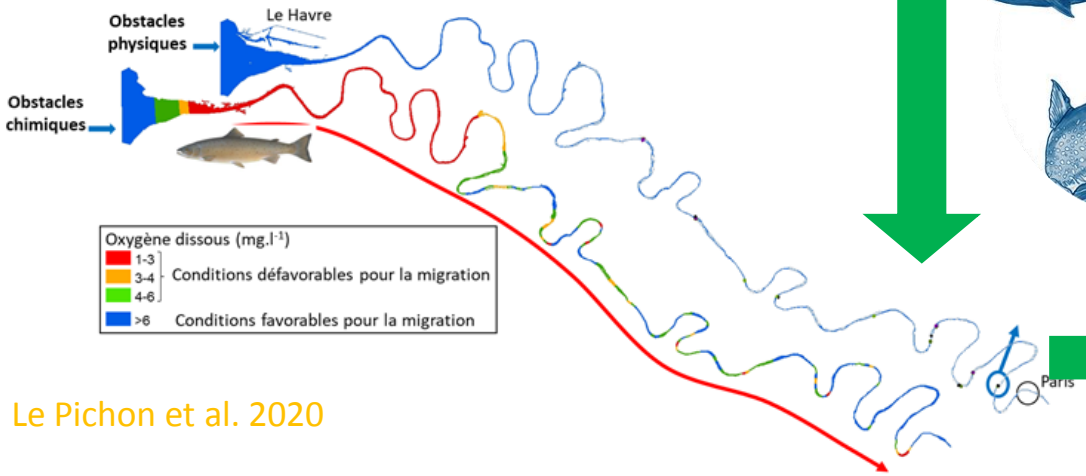


OPSN

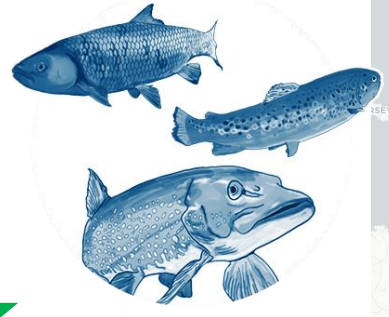
Approche générale

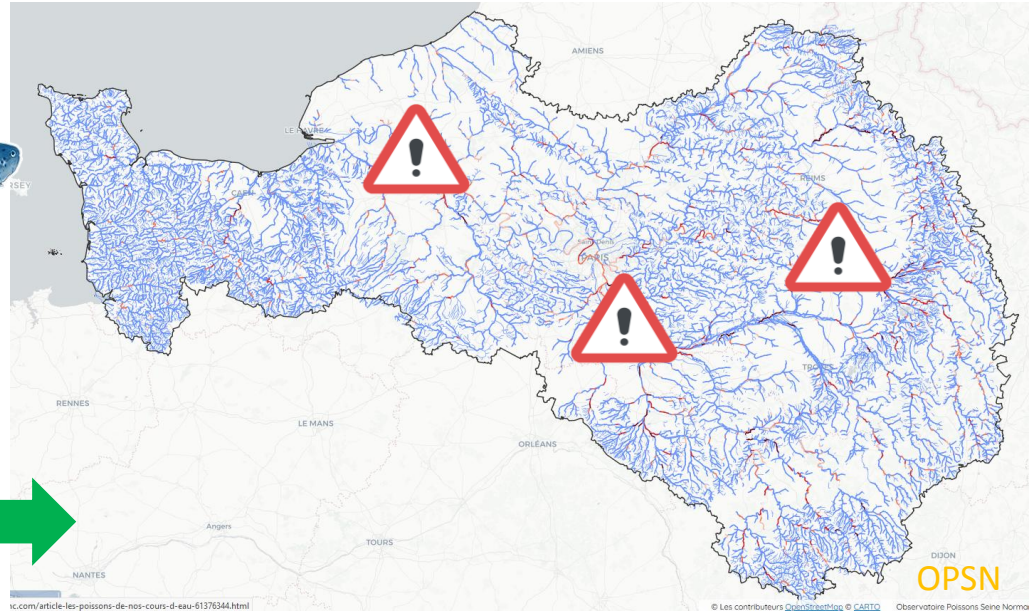
- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements
- Prédire la **distribution actuelle des espèces** en fonction de la favorabilité des habitats **et** de leur accessibilité
- En fonction de **scénarios** de changements, re-prédire les distributions et identifier les **zones à enjeu** à horizons futurs





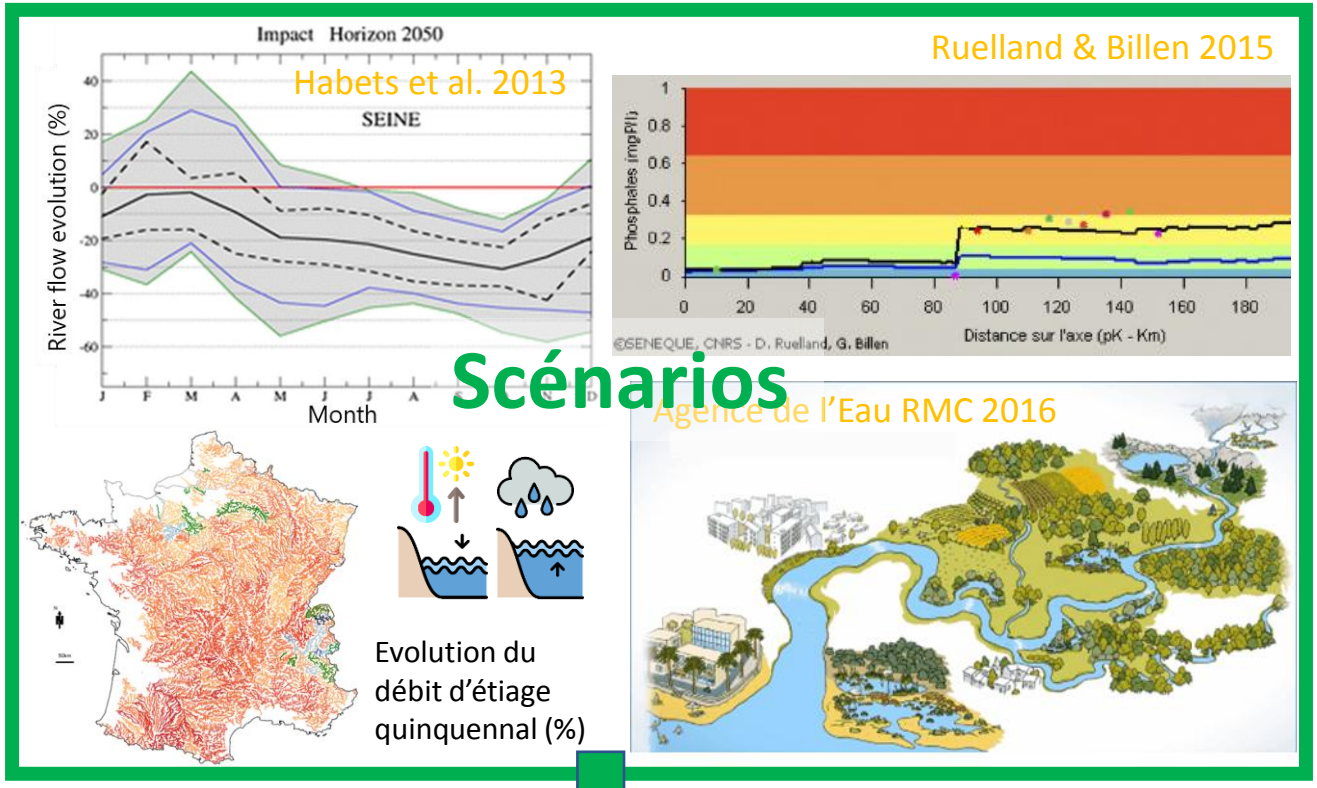
Le Pichon et al. 2020

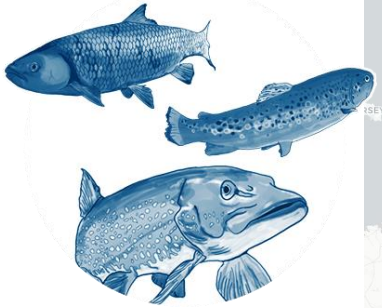


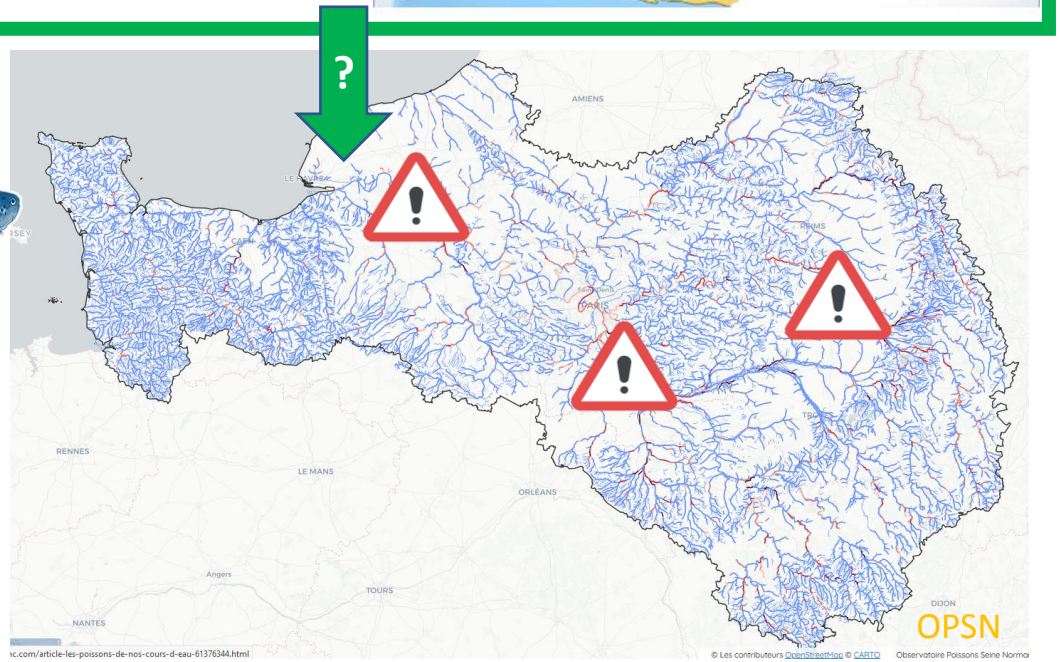


Approche générale

- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements
- Prédire la **distribution actuelle des espèces** en fonction de la favorabilité des habitats **et** de leur accessibilité
- En fonction de **scénarios** de changements, re-prédire les distributions et identifier les **zones à enjeu** à horizons futurs
- Travail transversal : prise en compte des **incertitudes** à plusieurs niveaux







INRAE

Merci !

Les publications de notre équipe : https://webgr.inrae.fr/publications/articles/