



**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.

A large, light teal watermark of the letters 'INRAE' is visible in the background, partially overlapping the main text.

## ➤ 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 Seinaros



INRAE

➤ 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>



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



Myriam  
Soutif



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)

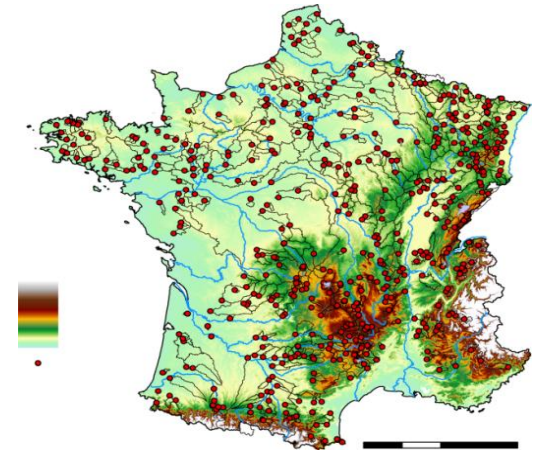
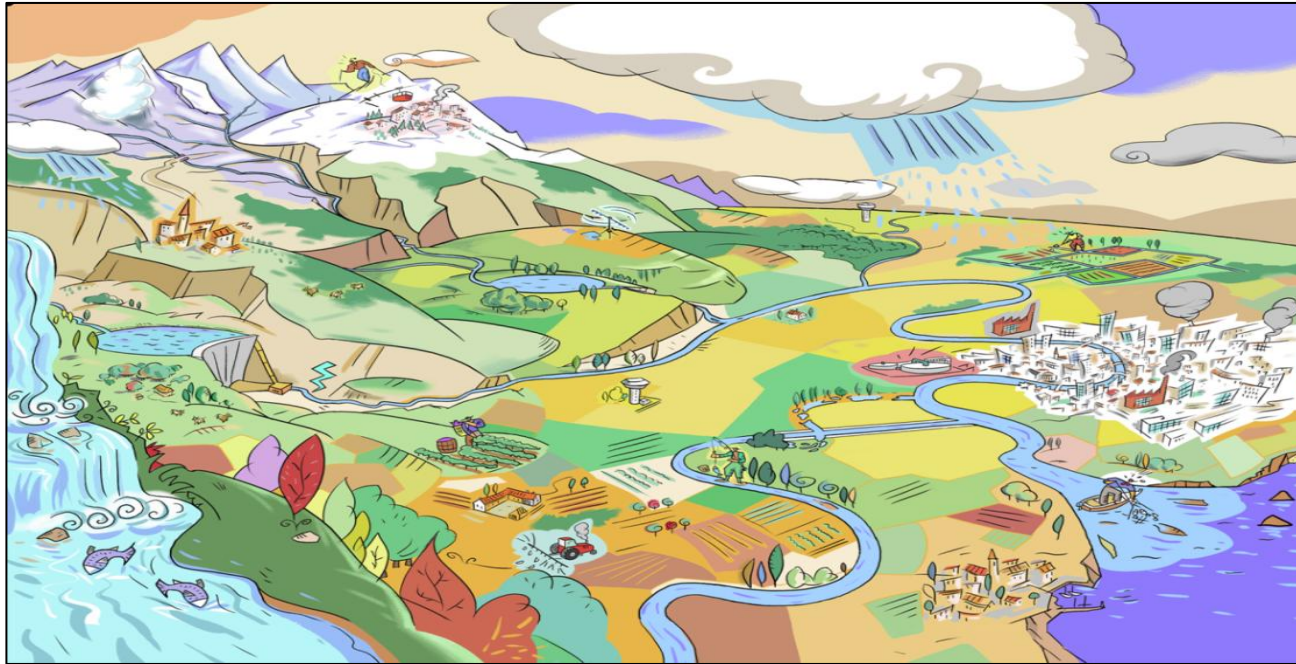


Pierre  
Brigode



## ➤ Systèmes d'étude

### ➤ Bassins versants naturels et anthropisés





## ➤ Enjeux de l'hydrologie de surface quantitative



Prévision des crues



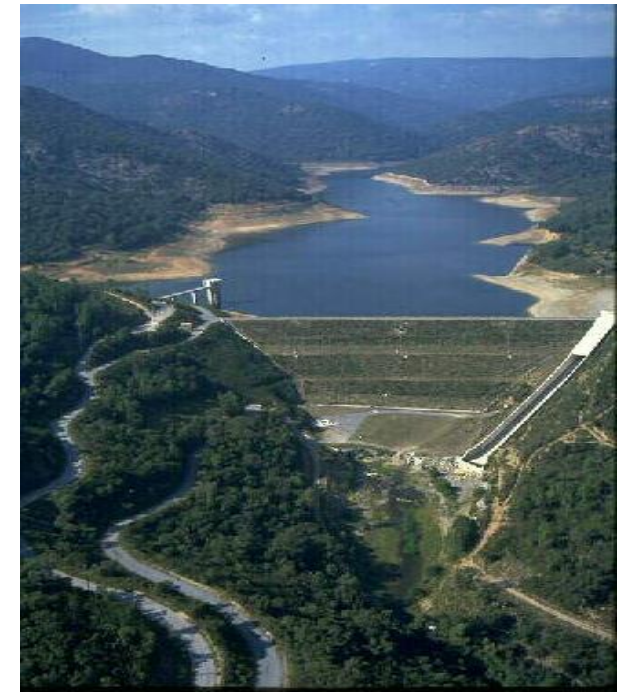
Prévision des étiages



Dimensionnement d'ouvrages



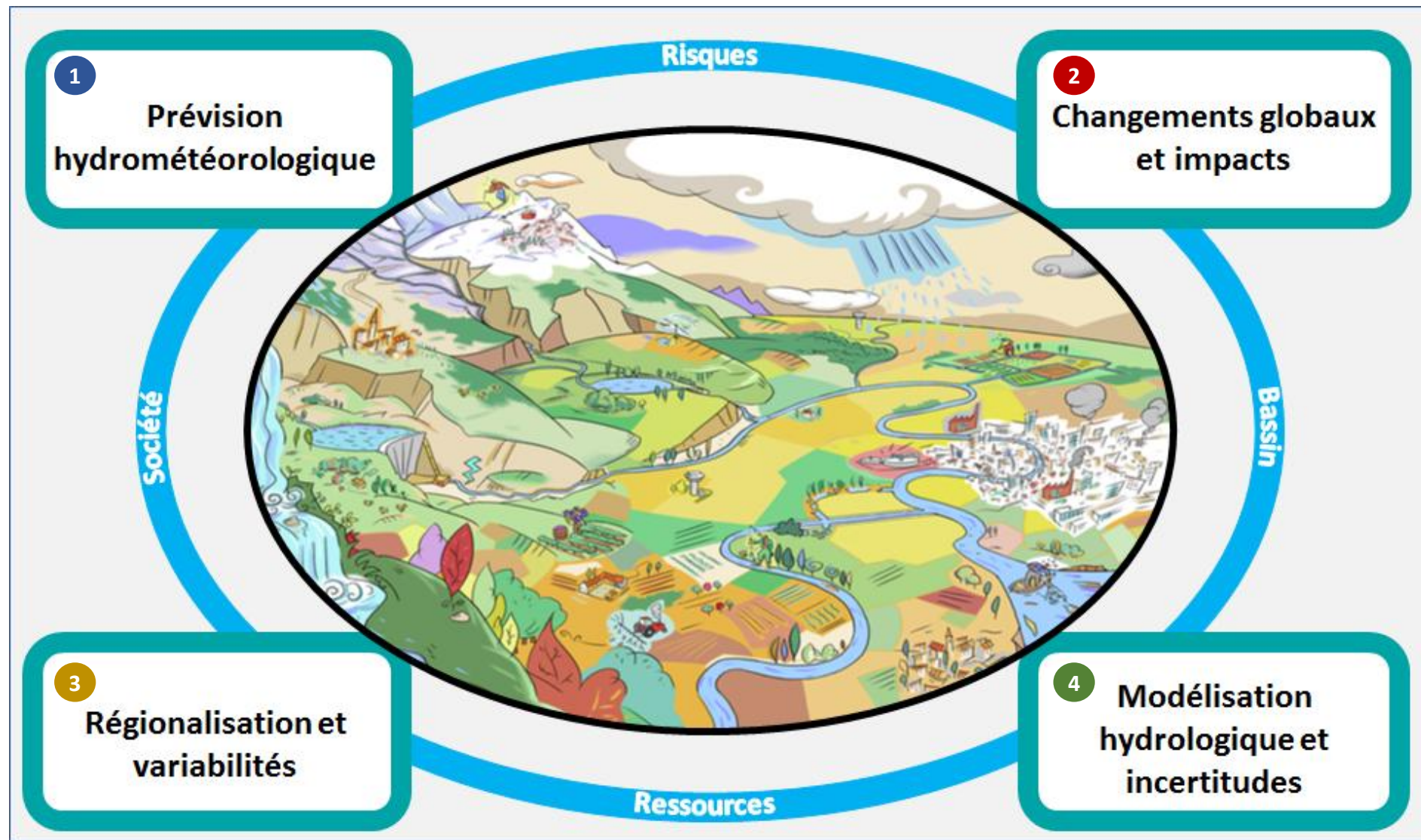
Impact de l'anthropisation



Gestion d'ouvrages



## ➤ Axes de recherche



# ➤ Les fiches stations

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



## S5144010 - La Nivellev à Saint-Pée-sur-Nivellev

Gestionnaire : DREAL Aquitaine

Superficie : 141.5 (138) [km<sup>2</sup>]  
X = 330994 (330429)  
X = 284413 (283850)

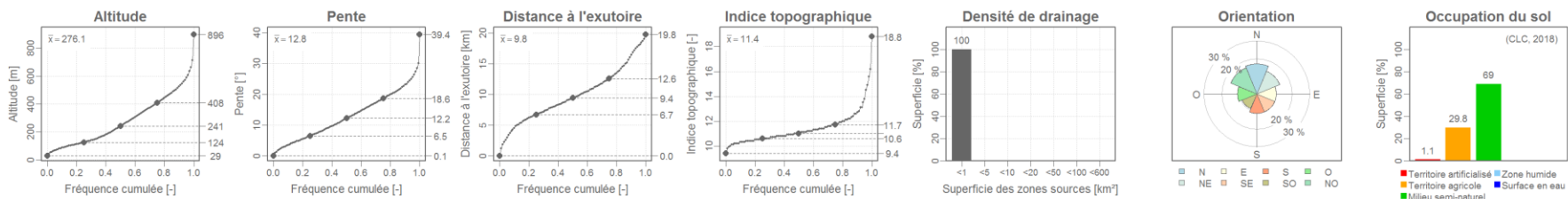
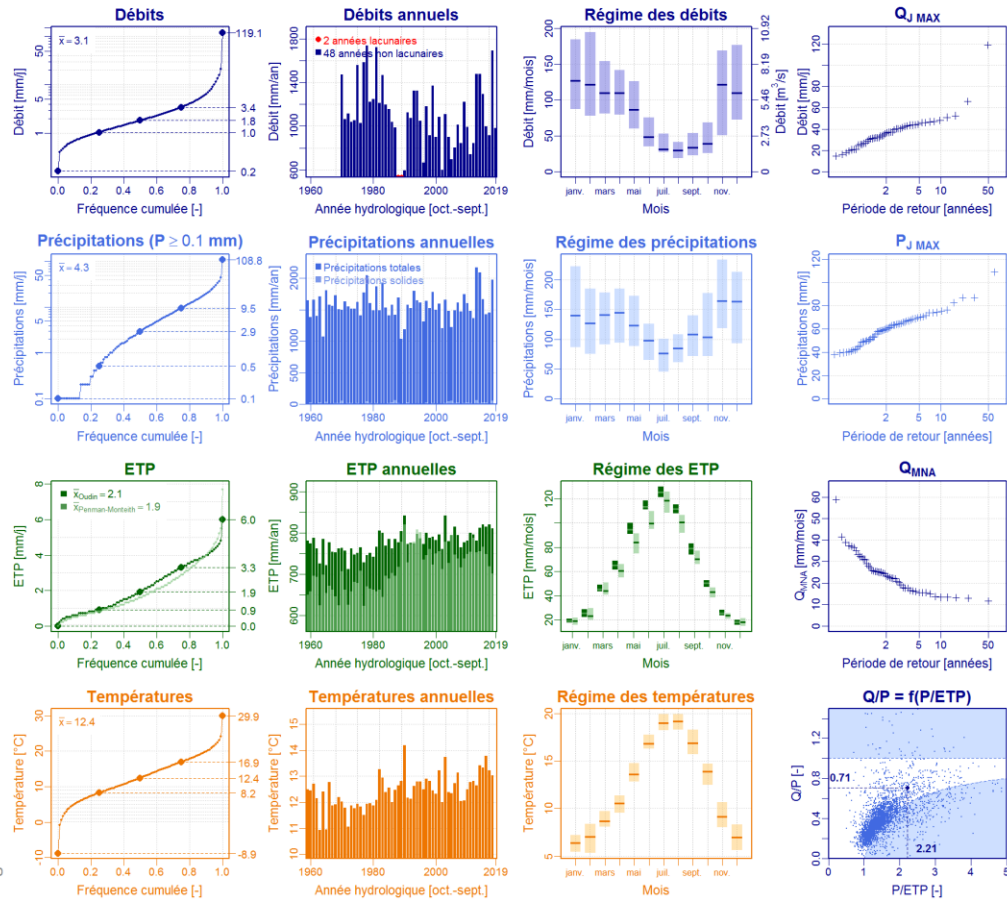
Altitude : 31 (25) [m]  
Y = 6257562 (6257253) [m ; Lambert 93]  
Y = 1821049 (1820735) [m ; Lambert II étendu]

INRAE (Banque Hydro)  
INRAE (Banque Hydro)  
INRAE (Banque Hydro)

Équipe HYDRO, UR HYCAR, INRAE, Antony  
Conception : Brigode, P. - Génot, B. - Lobligeois, F. - Delaigue, O.  
Contact : olivier.delaigue@inrae.fr  
Version : 2020-08-04



Type	Source	Période	PdTemps
Débit	Banque HYDRO	1969-2019	Journalier
Climatique	SAFRAN (Météo-France)	1958-2019	Journalier
MNT 100 m	SRTM (NASA)	2011	-
Date extraction Banque Hydro		2020-01-14	
<b>Moyennes interannuelles</b>			
Débit		1129 (5.062)	mm/an (m <sup>3</sup> /s)
Précipitations (totales / solides)		1575 / 20.48	mm/an
ETP (Penman-Monteith / Oudin)		711 / 777	mm/an
Température		12.4	°C
Taux de lacune des débits		2	%
<b>Valeurs extrêmes de la série</b>			
Q <sub>J</sub> max		119 (195.0)	mm/j (m <sup>3</sup> /s)
P <sub>J</sub> max		108.8	mm/j
Q <sub>MNA</sub> min		11.6	mm/mois
			1983-08-26
			1959-09-24
			1989-10



Citation : <https://doi.org/10.15454/0101P1>



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 1<sup>er</sup> septembre 2021 : accueil scientifique au CNRM, à Toulouse

To better reflect  
its missions,  
Cemagref  
becomes Irstea.



INRAE

Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique

7 octobre 2021 / Séminaire ECOBIOP / Thirel Guillaume

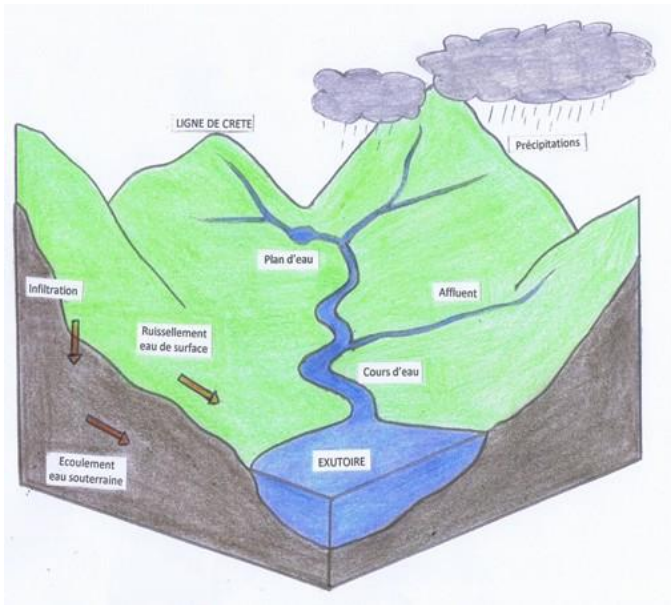
**INRAE**

➤ **La modélisation hydrologique**



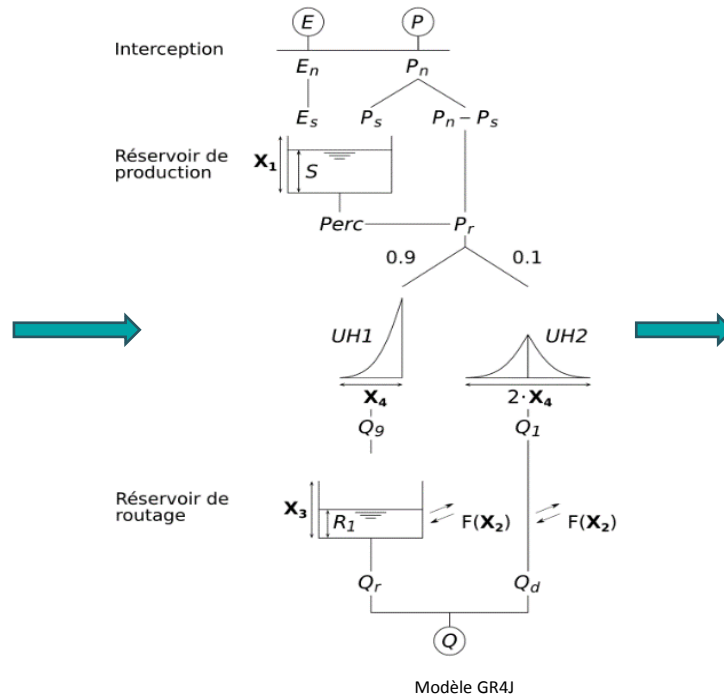
# ➤ Modélisation hydrologique

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



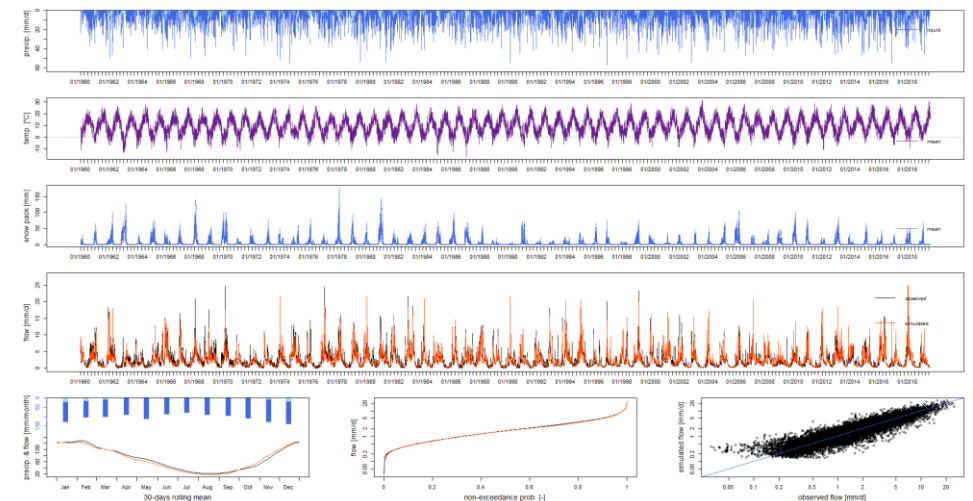
[https://www.bvchevre.fr/images/bassin\\_versant\\_schema.jpg](https://www.bvchevre.fr/images/bassin_versant_schema.jpg)

**Bassin versant réel**



**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

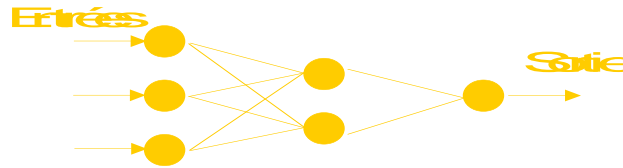
# ➤ Trois grandes catégories de modèles hydrologiques

## Modèles 'boîte noire'

Modèle auto-regressif ARMAX

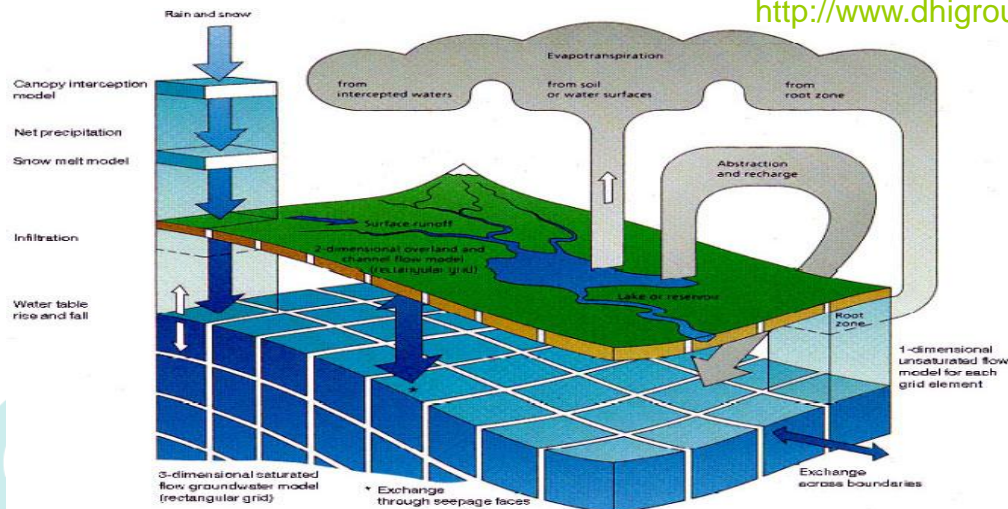


## Réseaux de neurones

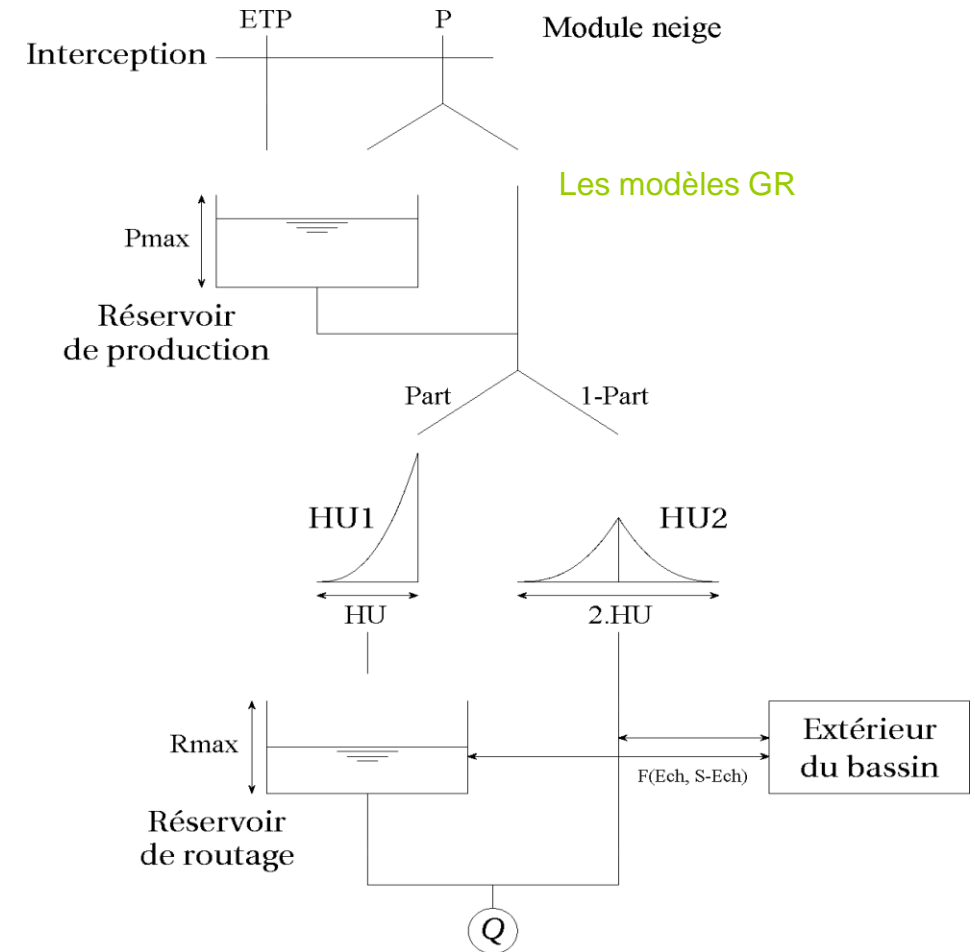


## Modèles 'physiques'

Modèle MIKE\_SHE  
<http://www.dhigroup.com/>

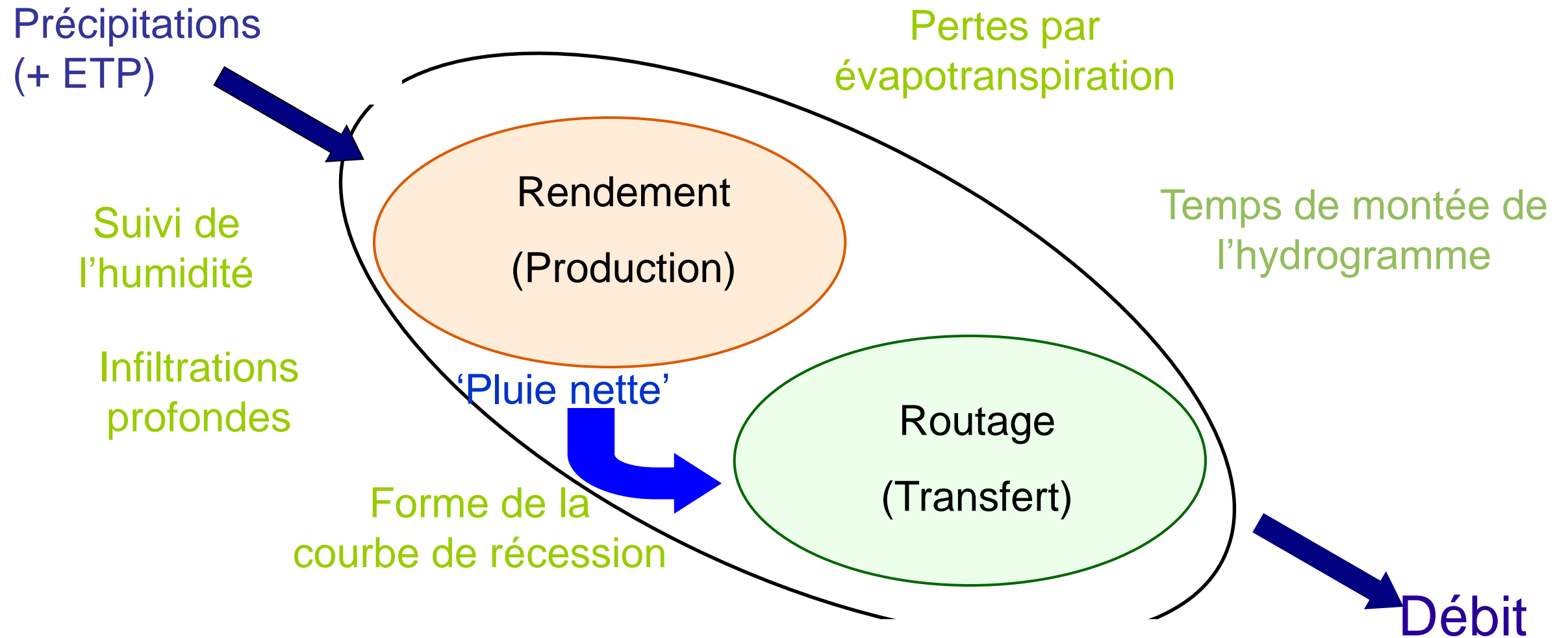


## Modèles conceptuels (« à réservoir ») et empiriques





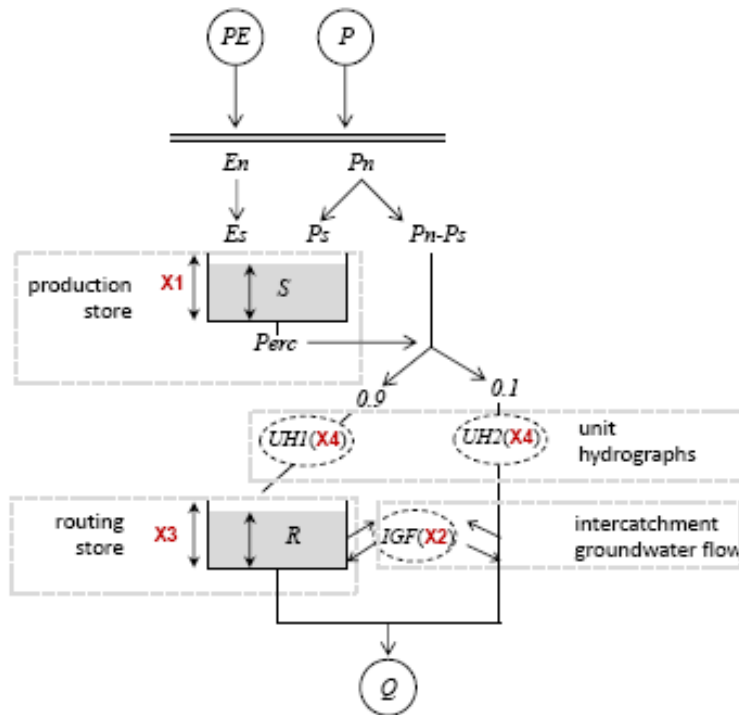
➤ Structure générale d'un modèle pluie-débit à l'échelle du bassin versant



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

## ➤ GR4J

### Le schéma du modèle GR4J



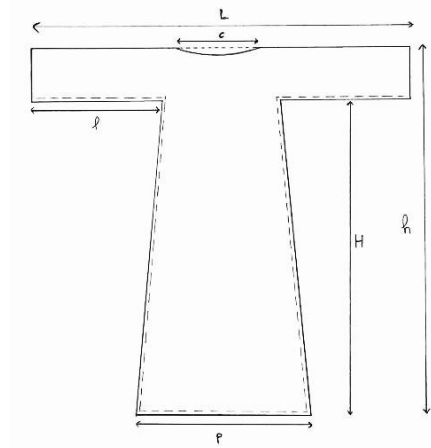
- Appartient à une famille de modèles développés depuis la fin des années 70
- Modèle fonctionnant à l'échelle du bassin versant agrégé (*simplification spatiale*), au pas de temps journalier (*simplification temporelle*), basé sur des réservoirs conceptuels avec 4 paramètres à optimiser (*simplification 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 modèles hydrologiques



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



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



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

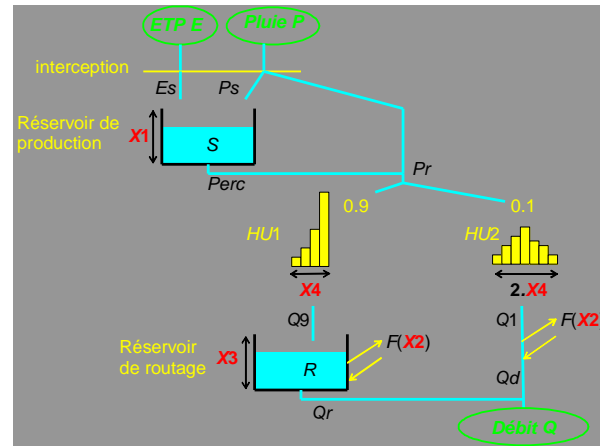


➤ Le choix de la mesure est basé sur les mensurations des personnes



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

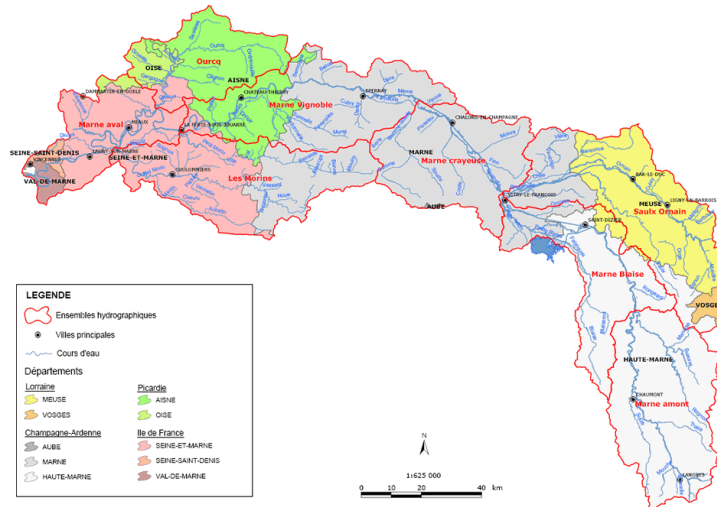
$\{X1, X2, X3, X4\}_1$



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



Bassin de la Marne  
12782 km<sup>2</sup>

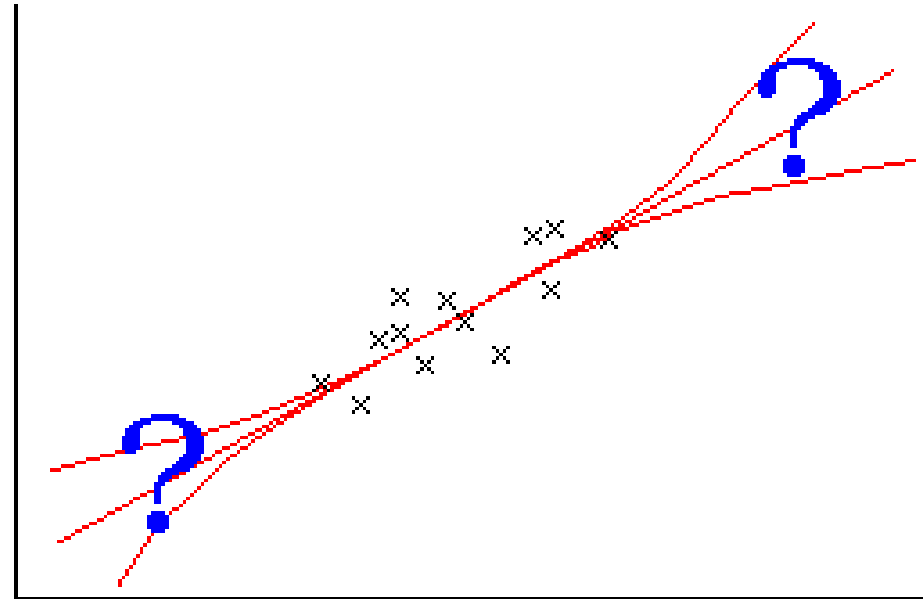
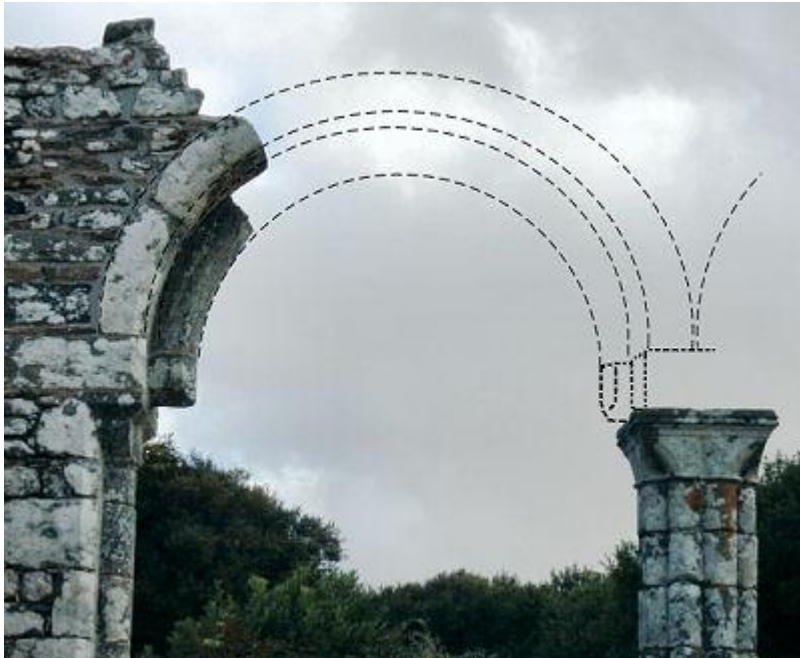


Bassin de la Sarthe  
2882 km<sup>2</sup>

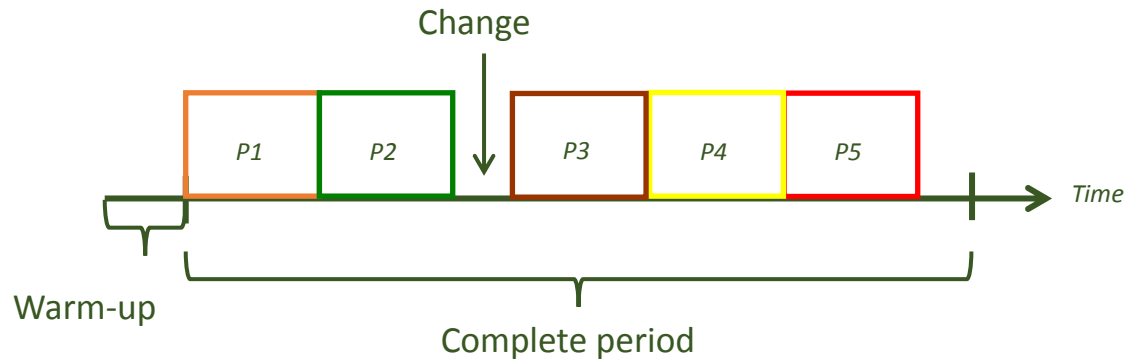
## ➤ Quelles valeurs de paramètres ?

## ➤ L'extrapolation, une faiblesse connue...

... mais domaine d'application classique du modèle hydrologique

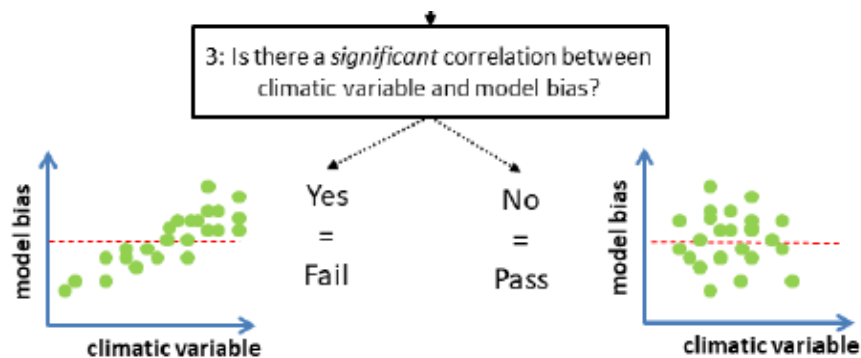


## ➤ Mesure de la robustesse des modèles hydrologiques

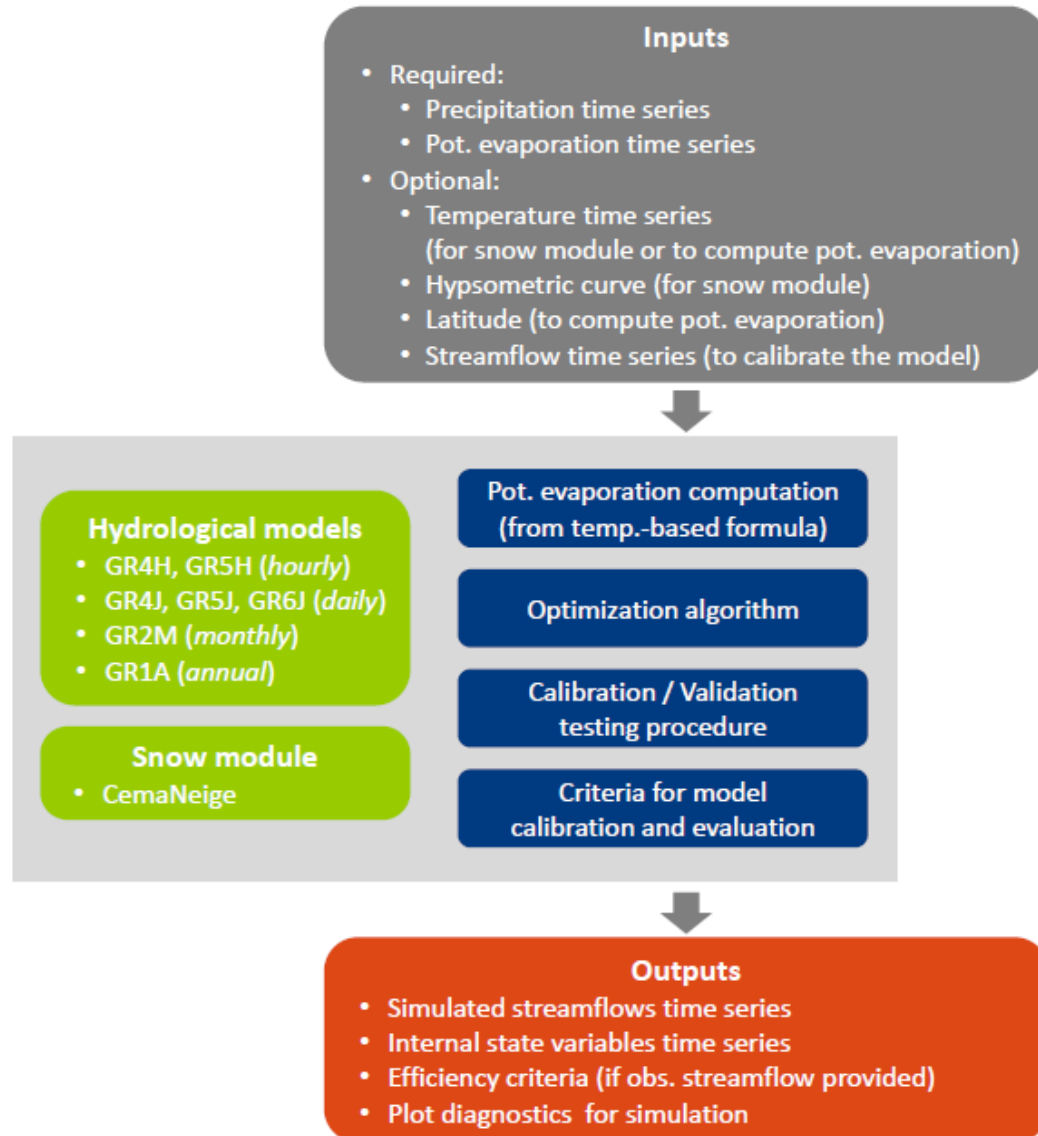


i) Stratégies de calage-contrôle (un modèle doit perdre peu de performance en étant contrôlé sur une période indépendante pour être transférable)

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



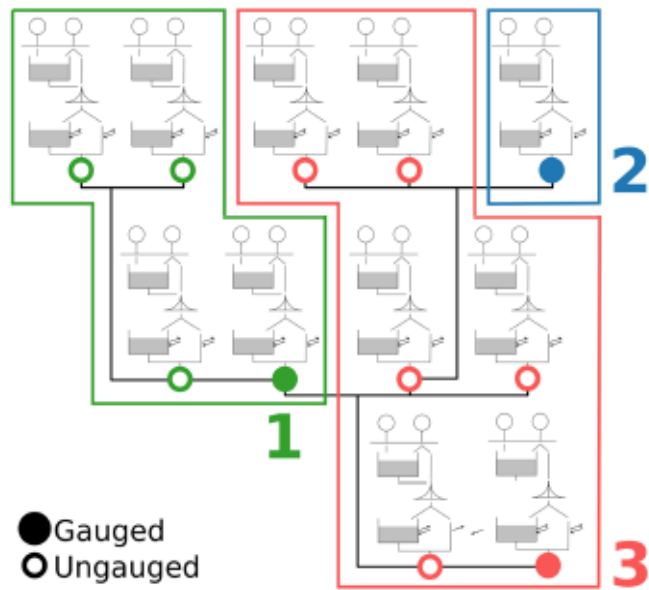
## airGR R packages constellation



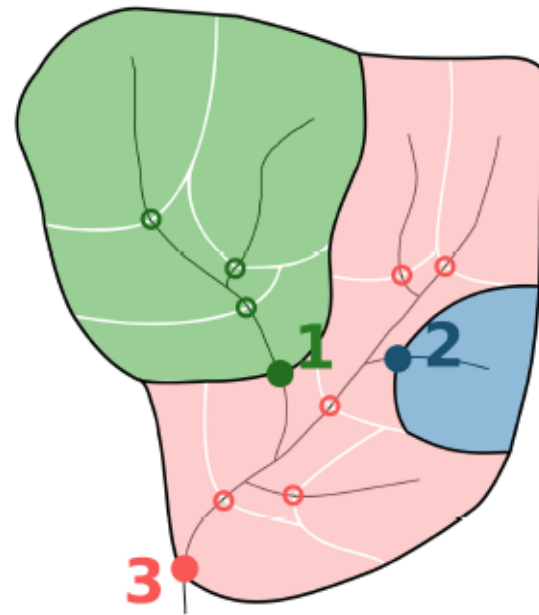


# ➤ Une modélisation désormais semi-distribuée

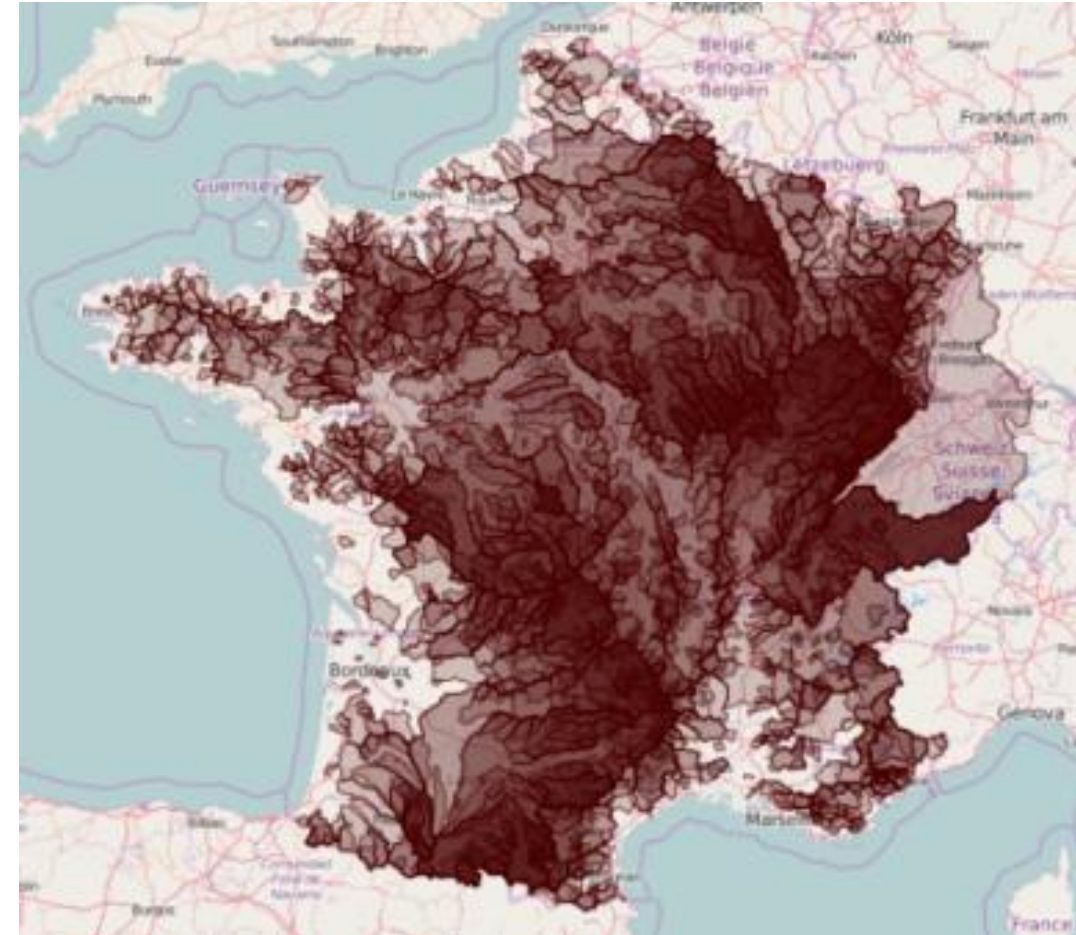
Pour une prise en compte plus fine des hétérogénéités spatiales



GRSD (exemple)



Exemple catchment



**INRAE**

➤ **L'étude de l'impact du changement climatique**



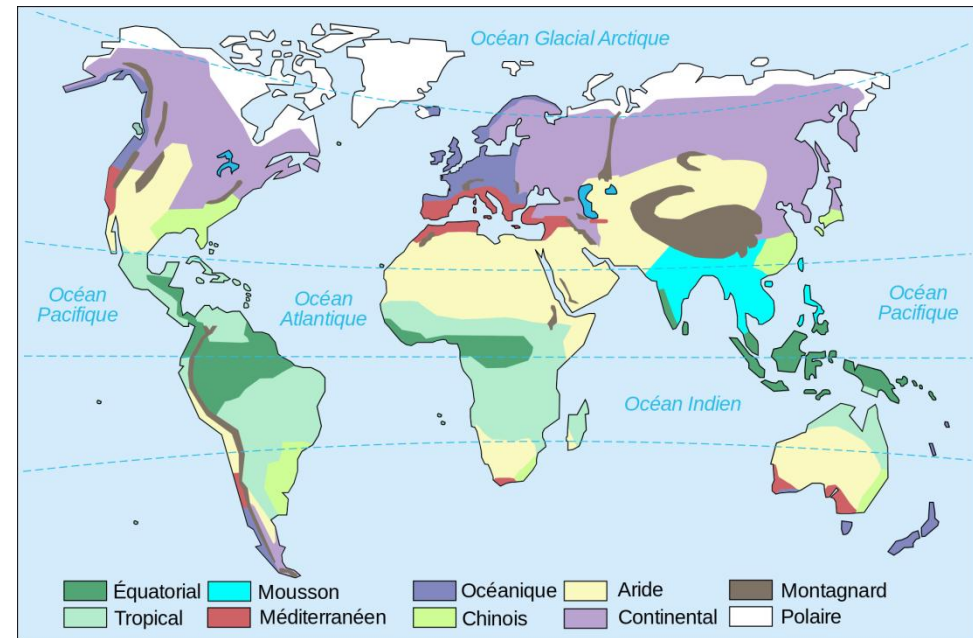
## ➤ Le changement climatique, c'est quoi ?

- 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*

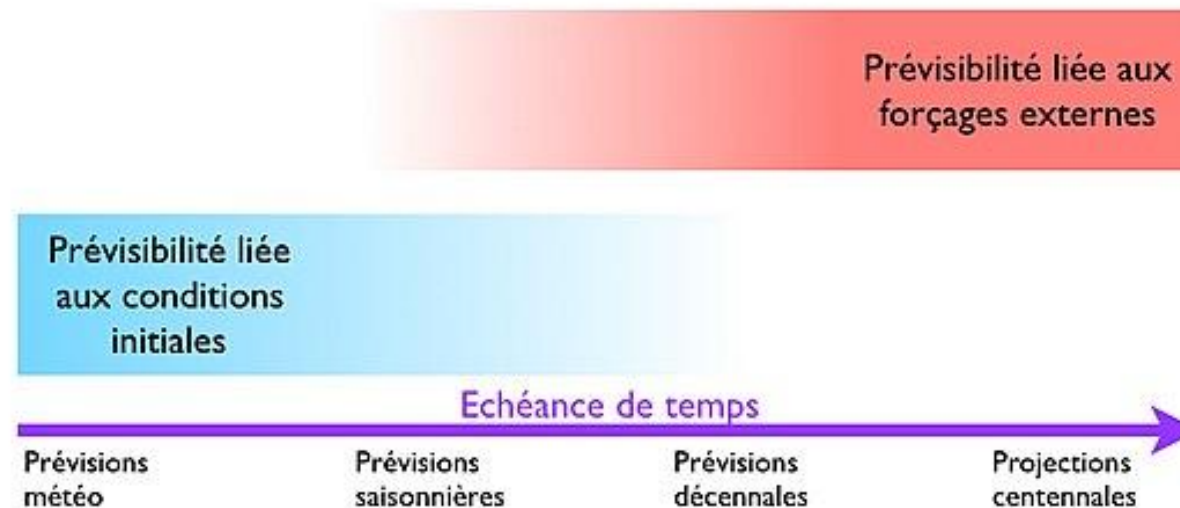


## ➤ Différence entre météo et climat

- 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

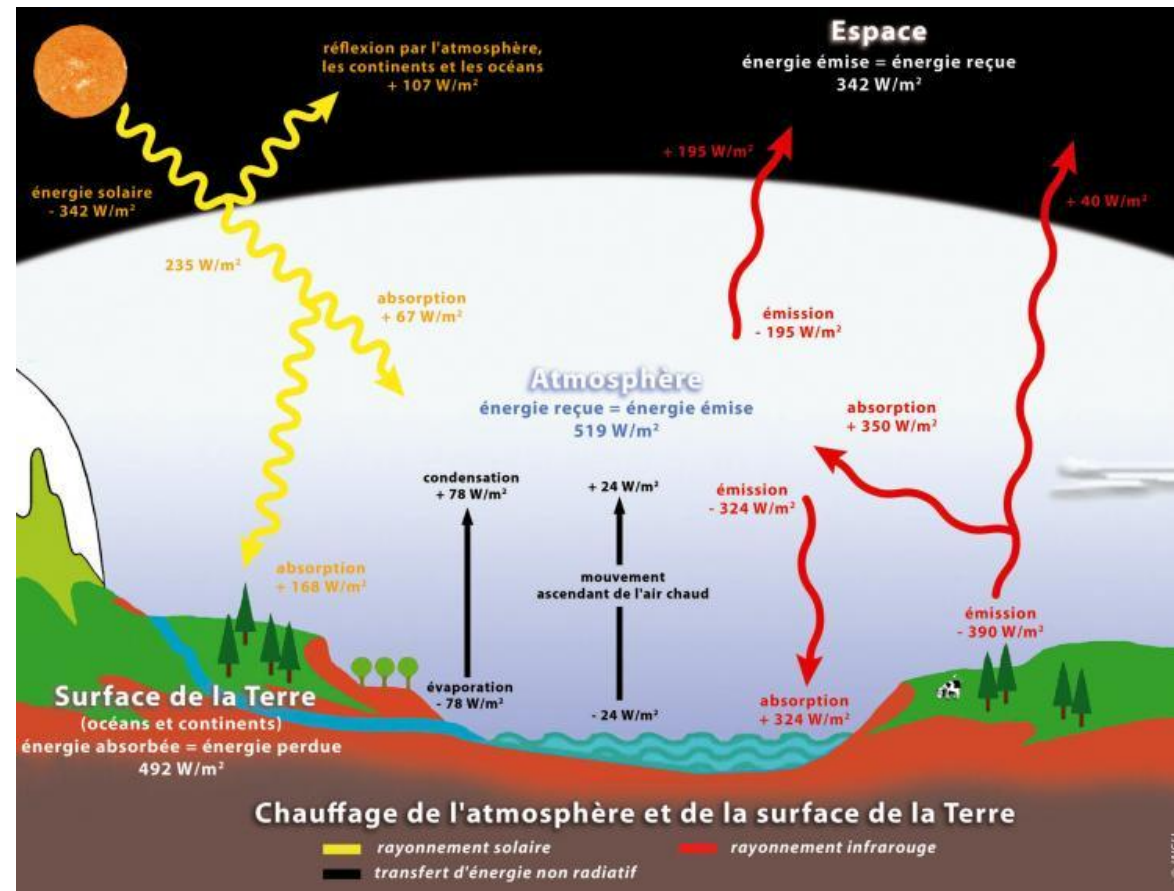
## ➤ Météorologie et climatologie, quelles échelles de temps ?

- **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 20<sup>e</sup> siècle à la fin du 21<sup>e</sup> 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.



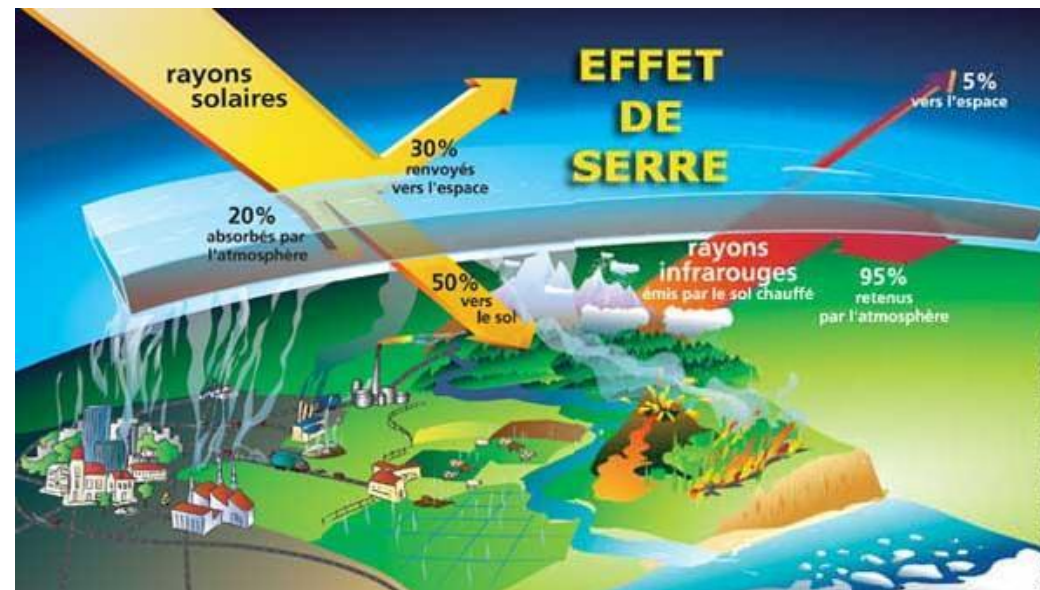
<http://www.insu.cnrs.fr/image2888,.html>

## ➤ Effet de serre : un phénomène naturel... renforcé par les humains

**gaz à effet de serre** : vapeur d'eau, dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ), oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ )

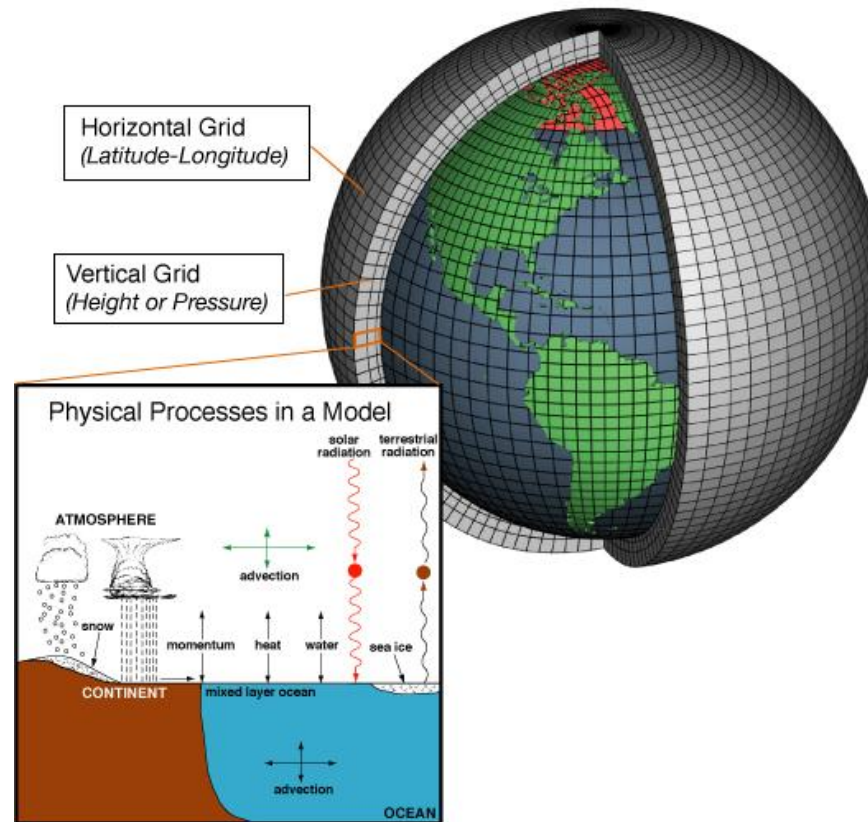
**effet naturel** : grâce à lui  $T$  moy Terre =  $15^\circ\text{C}$  (sinon,  $-18^\circ\text{C}$  !)

**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)

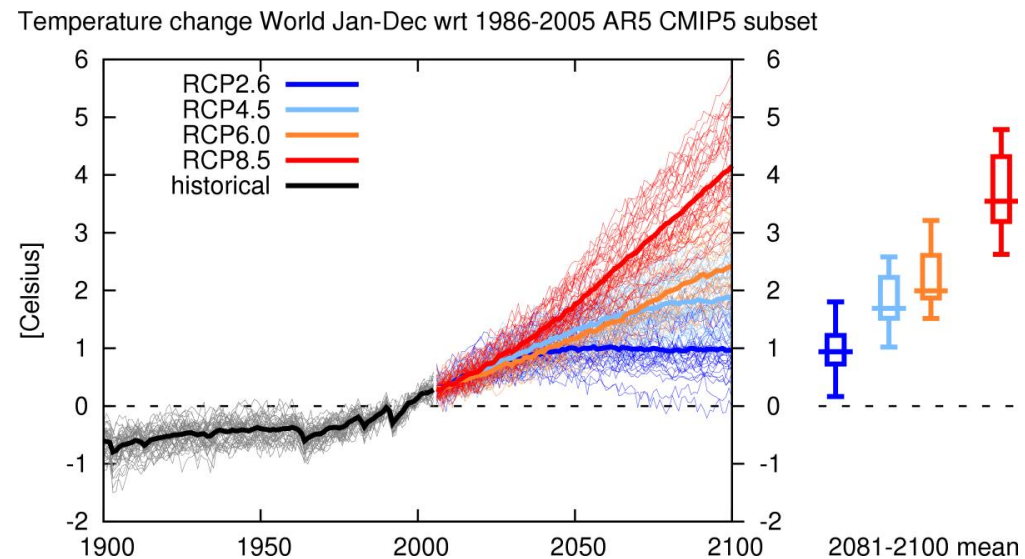


- Simulent la circulation atmosphérique et la circulation océanique
- Basés sur les équations de Navier-Stokes
- Mailles grossières
- Temps de calcul longs

**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

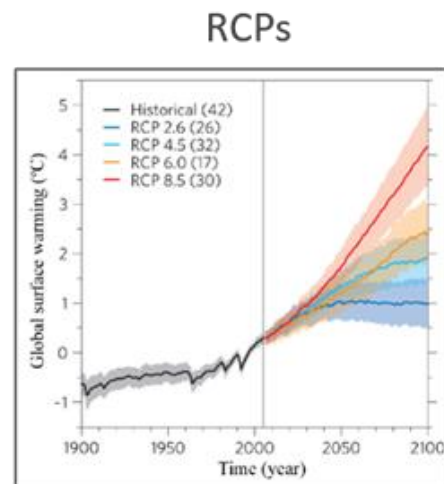


## ➤ Sorties des GCM

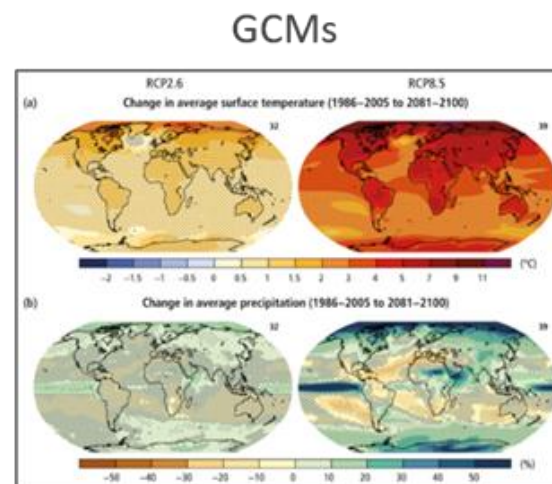
- **Variables d'intérêt pour nous**
  - Précipitation, température de l'air, vitesse du vent, humidité de l'air, rayonnements
- **Résolution spatiale**
  - Grille de 50 à 200 km de côté
- **Résolution temporelle**
  - Journalier



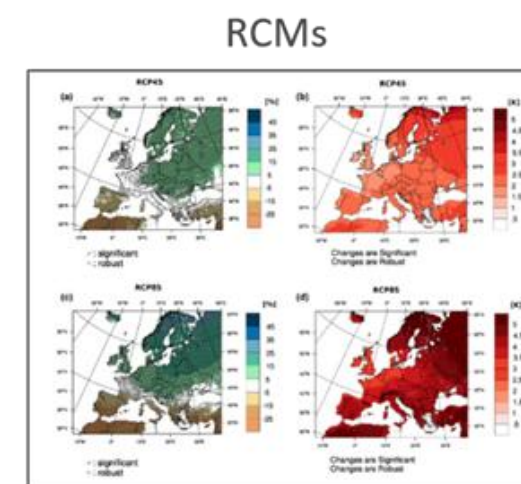
# ➤ La chaîne de modélisation de l'impact du changement climatique



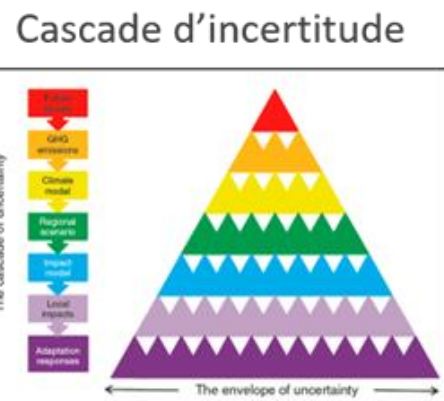
Source : Knutti and Sedláček (2013)



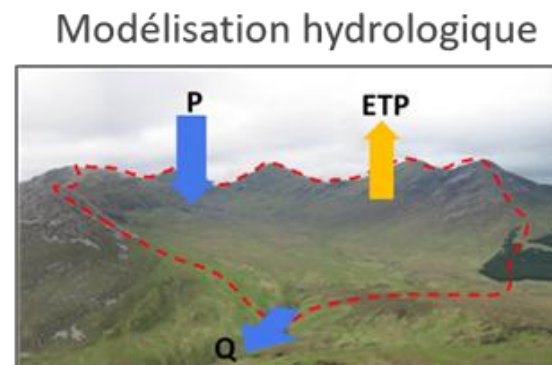
Source : Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects



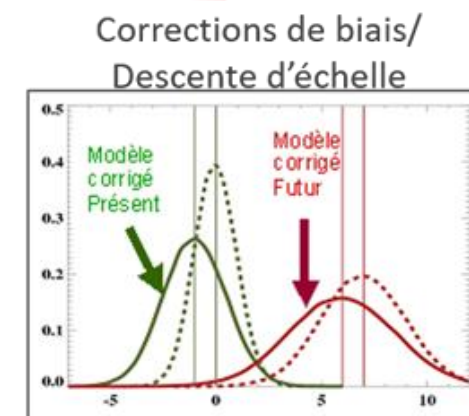
Source : Jacob et al., 2013



Wilby and Dessai (2010)



Echelle d'étude : le bassin versant



Source : Drias. Exemple méthode quantile-quantile



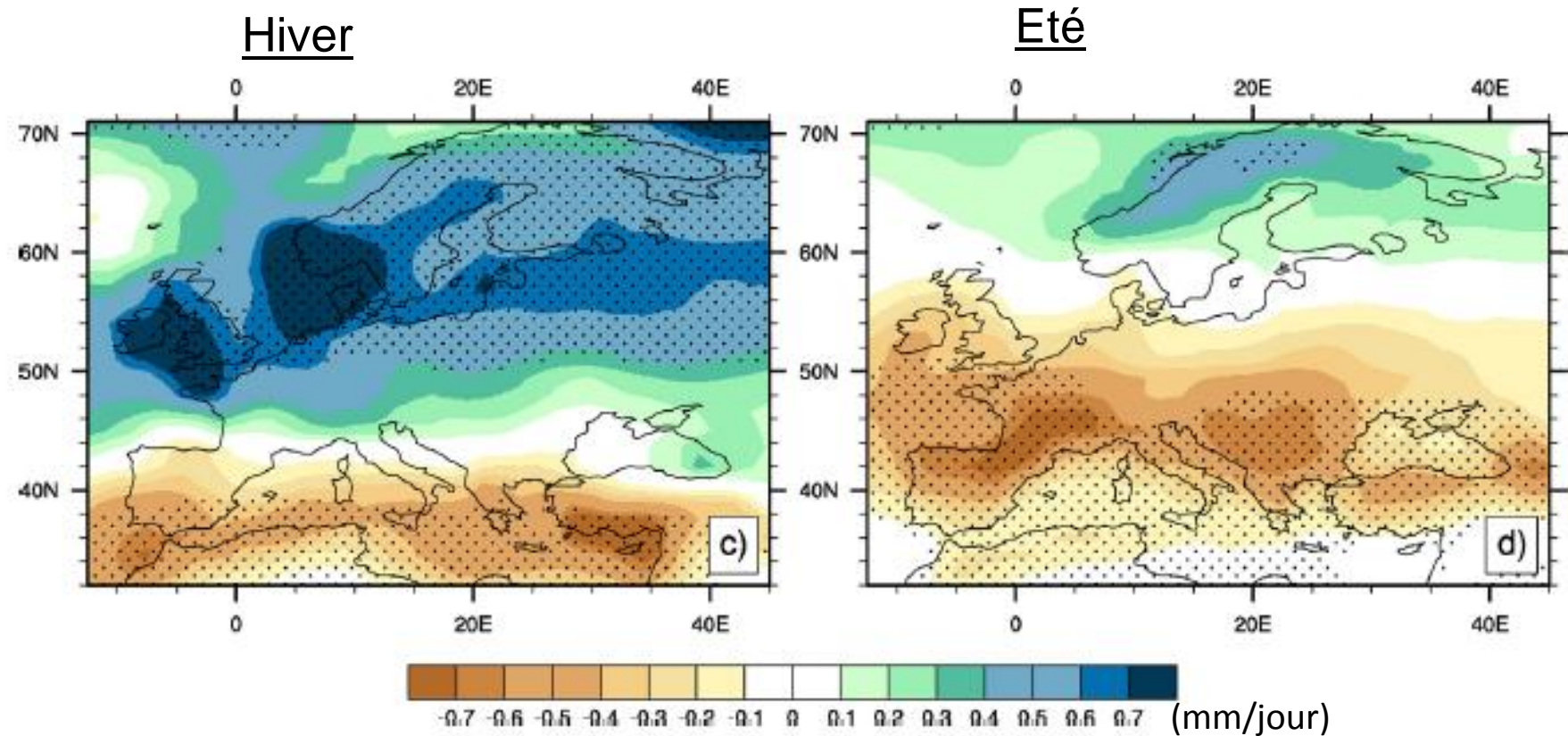


INRAE

➤ 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](https://doi.org/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 !

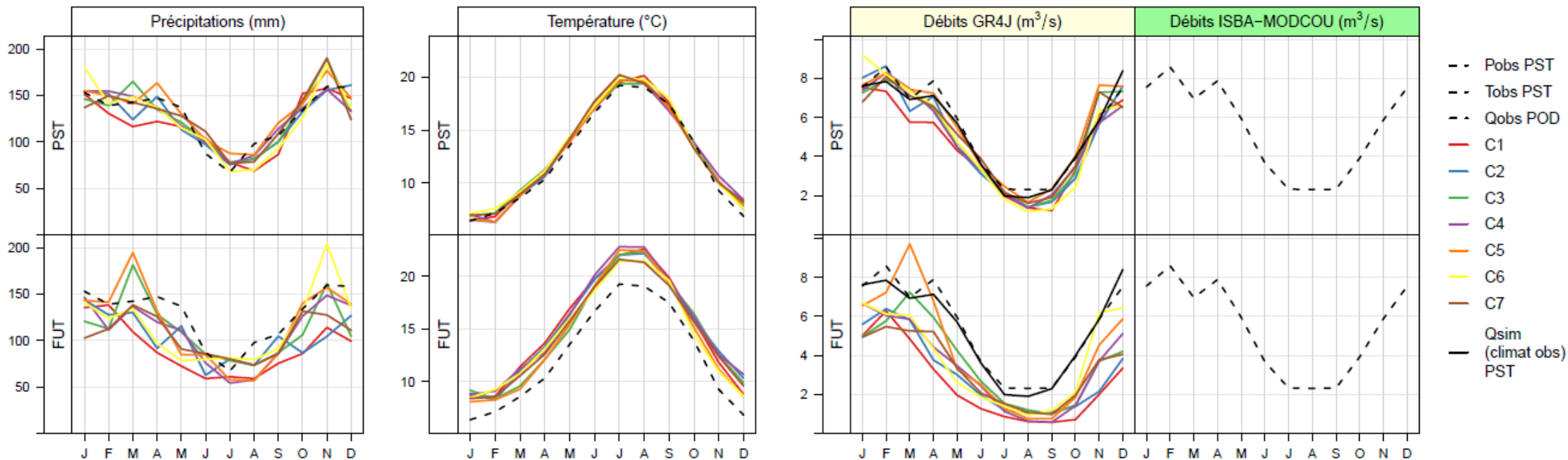


## ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

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.

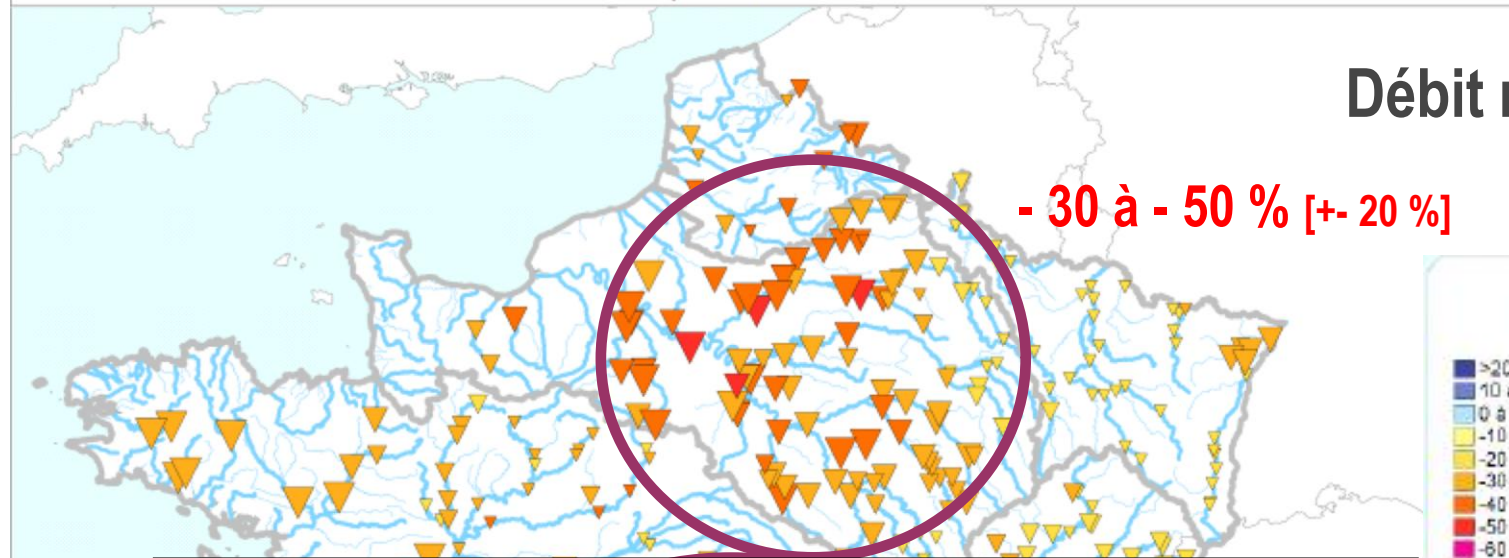
Nom	La Nivelle à Saint-Pée-sur-Ni
Identifiant Explore2070	1195
Code Banque Hydro	S5144010
Surface du bassin versant	142 km <sup>2</sup>
Période d'observation des débits	POD : 1969-1991
Période de simulation temps présent	PST : 1961-1990
Période de simulation temps futur	FUT : 2046-2065
Modèles hydrologiques utilisés	GR4J <span style="background-color: yellow;">ISBA-MODCOU</span>

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  $\Delta$  entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q.  $\Delta$  minimum,  $\Delta$  médian et  $\Delta$  maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

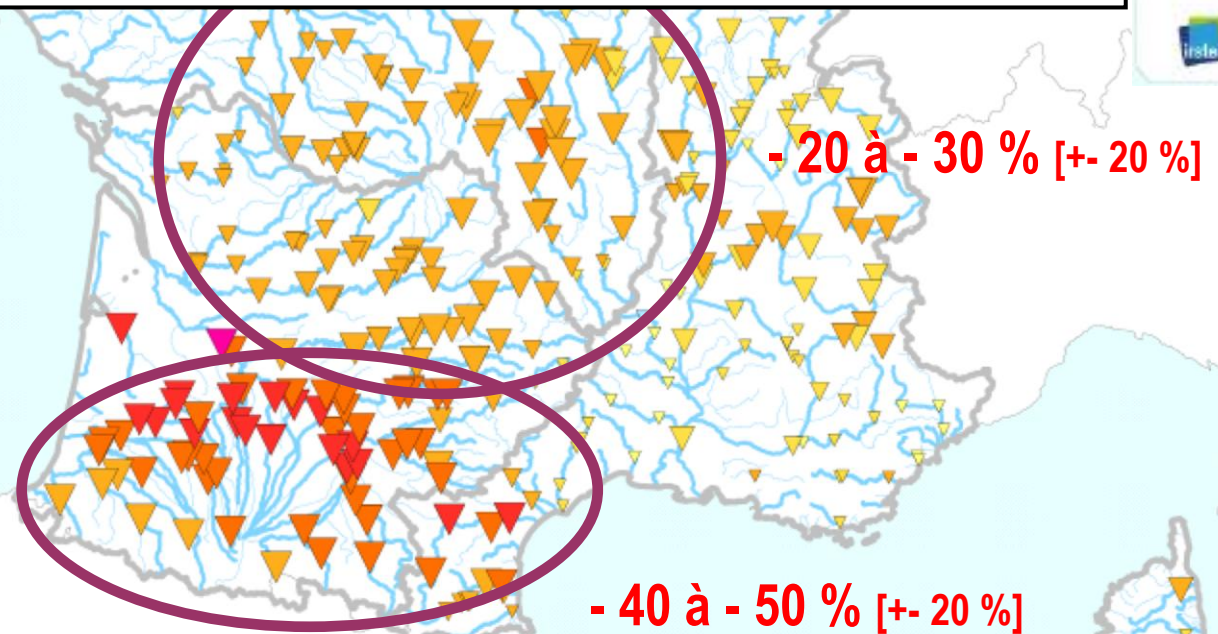




# Débit moyen annuel



*Une baisse globale des débits moyens annuels*



Module  
Moyenne des 14 résultats

Indice de significativité :  
taille inversement proportionnelle  
à l'écart-type des 14 résultats

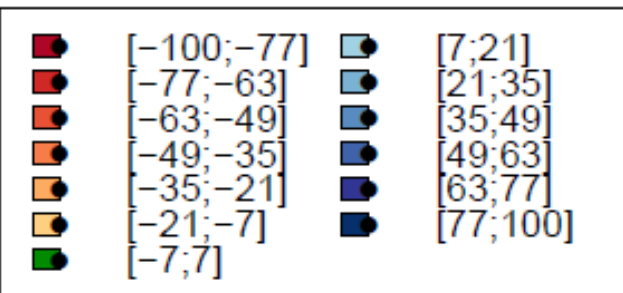
- >20%
- 10 à 20%
- 0 à 10 %
- 10 à 0%
- 20 à 10%
- 30 à -20%
- 40 à -30%
- 50 à -40%
- 60 à -50%
- 70 à -60%
- <-70%

INRAE METEO FRANCE BRL INGENIERIE



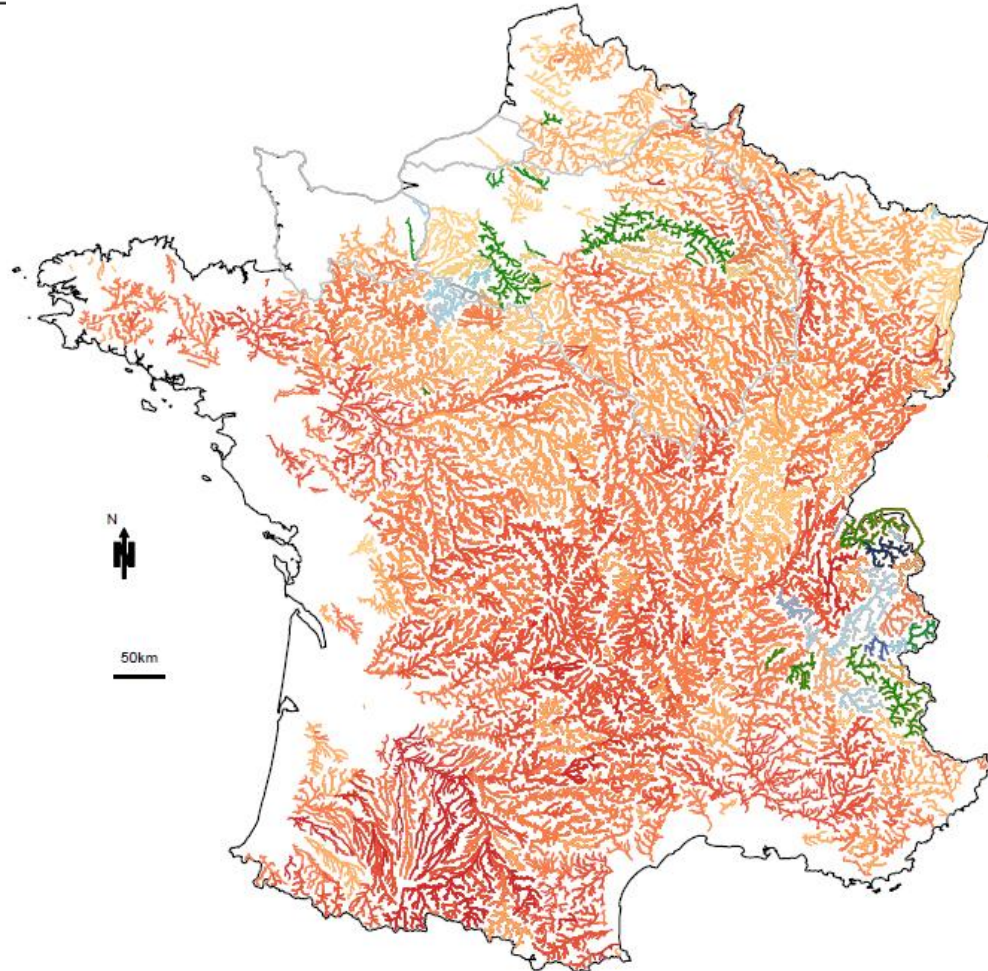
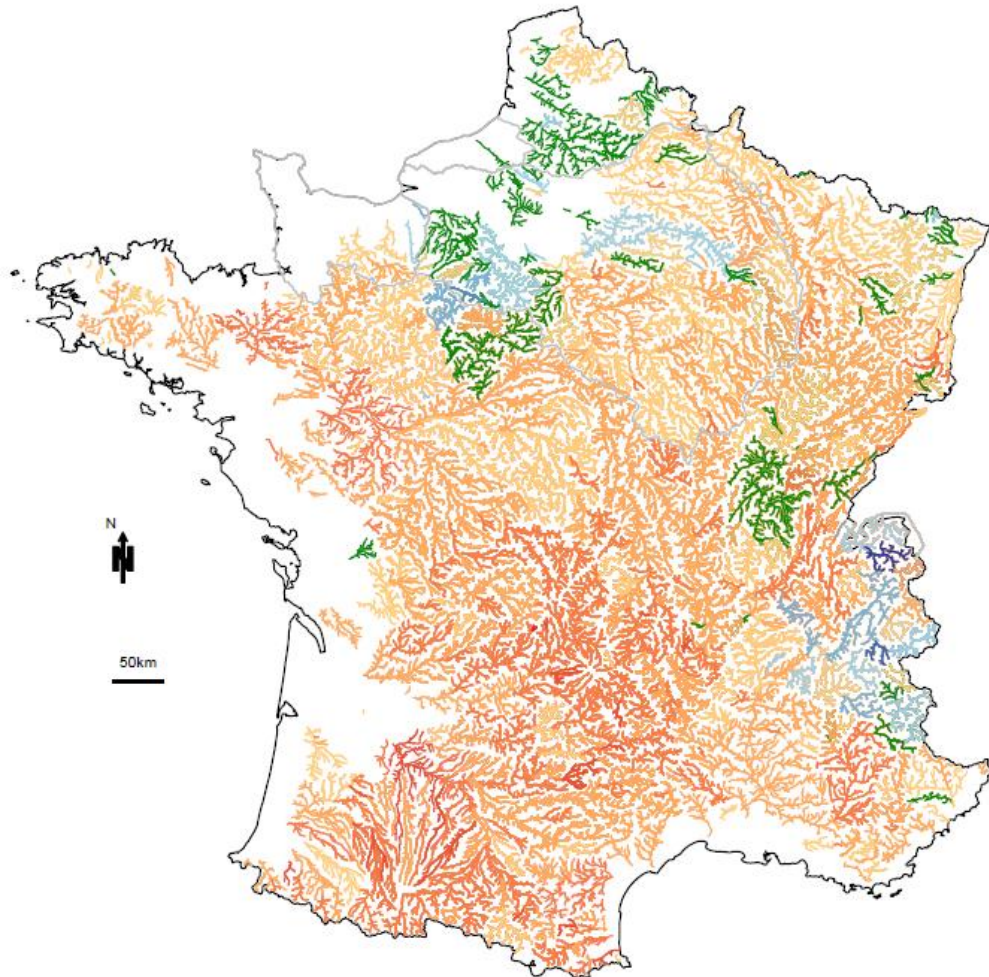
# Carte de l'évolution du QMNA5 dans le futur (2071-2100 vs 1971-2000)

Evolution [%]



RCP 2.6

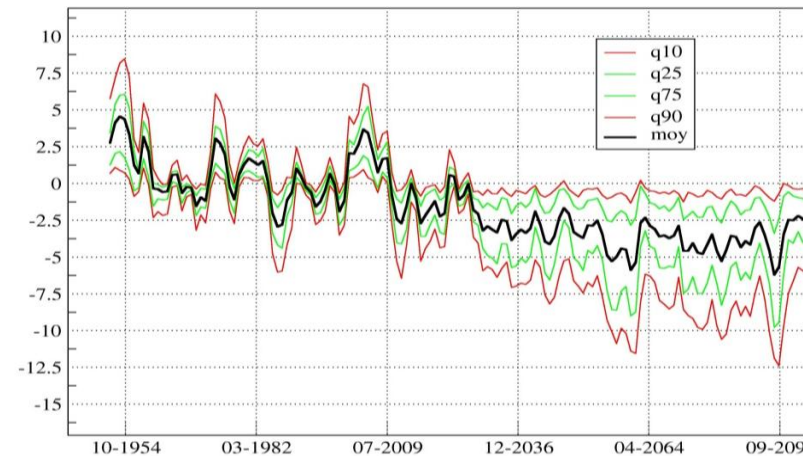
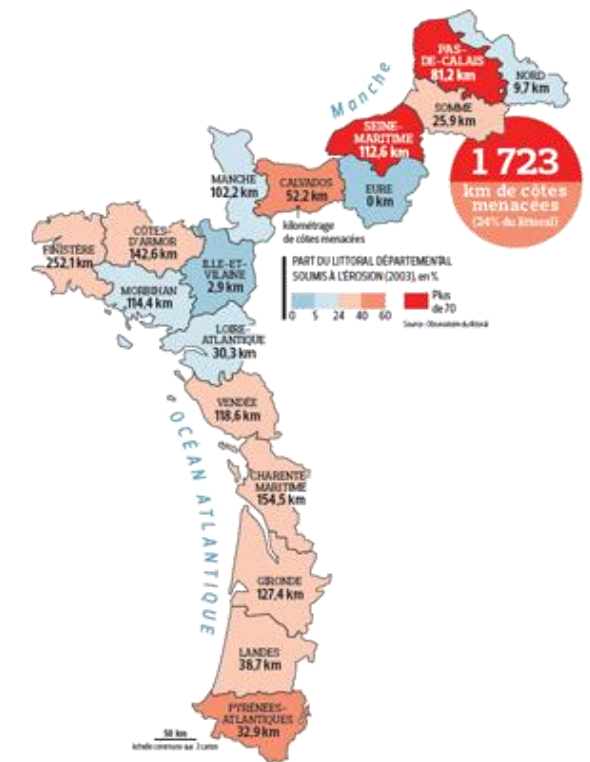
RCP 8.5



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

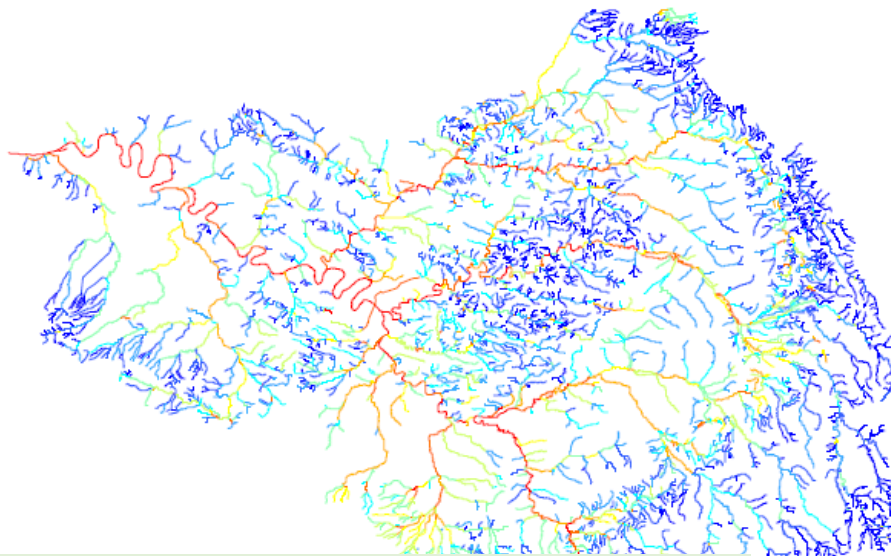
Probabilité de présence de la truite

Conditions thermiques actuelles



*Truite*

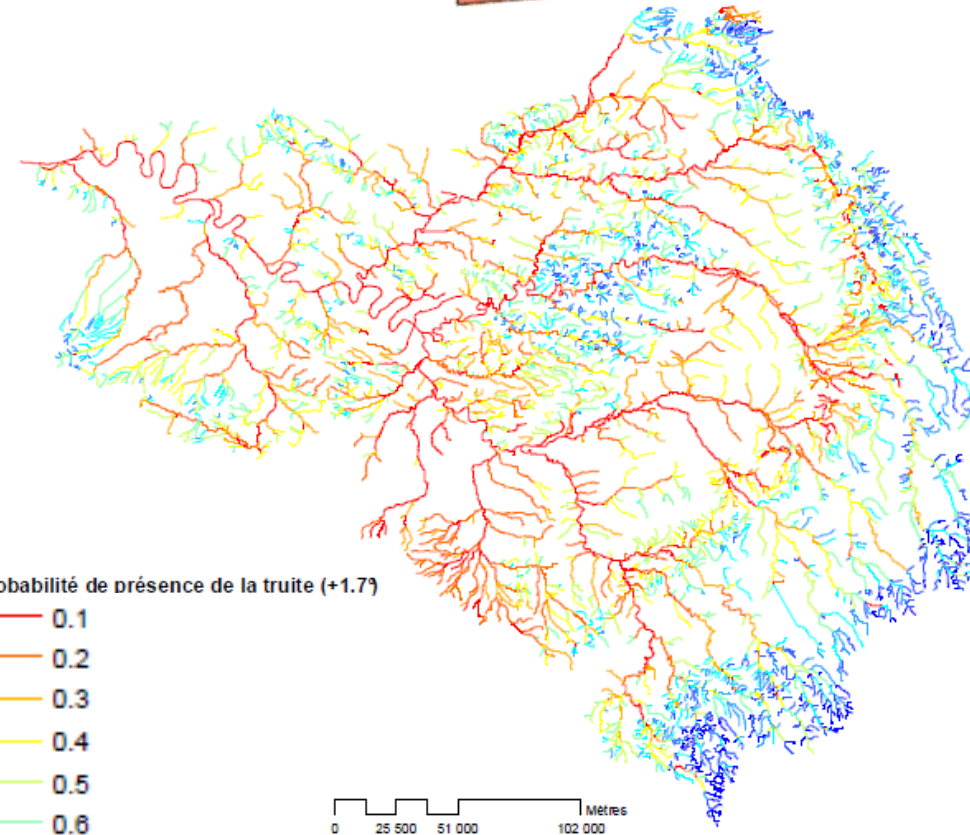
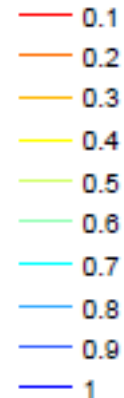
températures estivales + 1,7 °C  
températures hivernales + 1,3 °C



Pr

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

robabilité de présence de la truite (+1.7°)



Belliard et al., Piren-Seine, 2010

INRAE

Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique

7 octobre 2021 / Séminaire ECOBIOP / Thirel Guillaume

INRAE

➤ Mes travaux de recherche

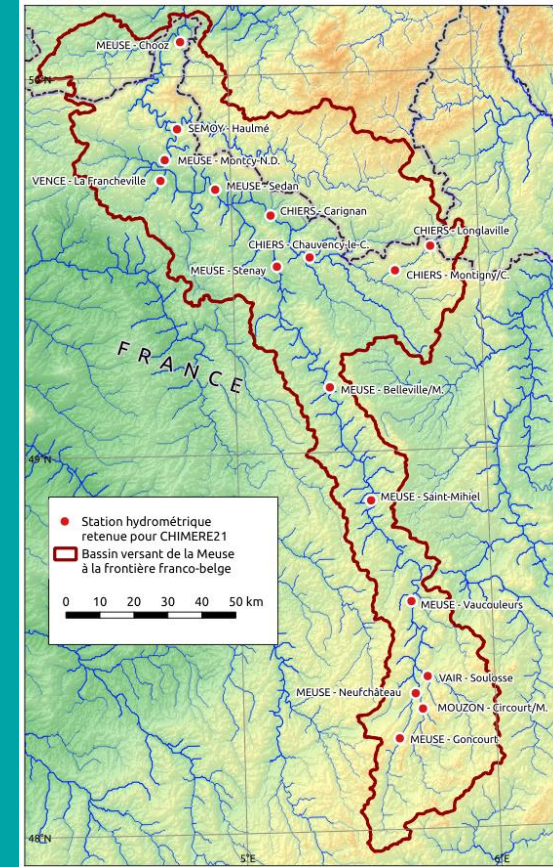


INRAE

➤ Une étude d'impact du changement climatique récemment achevée

CHIMERE 21 (CHiers-MEuse évolution des REssources au 21<sup>e</sup> siècle)

Financement Agence de l'Eau Rhin-Meuse





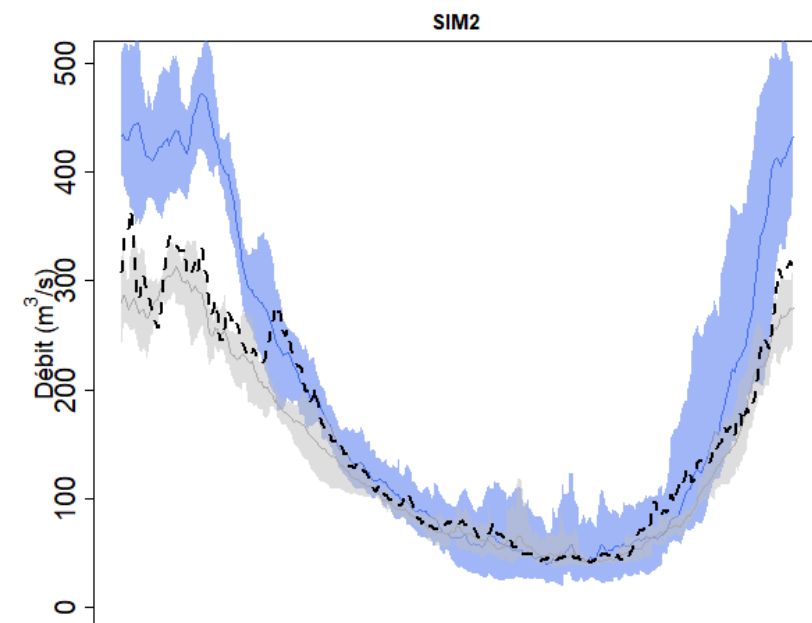
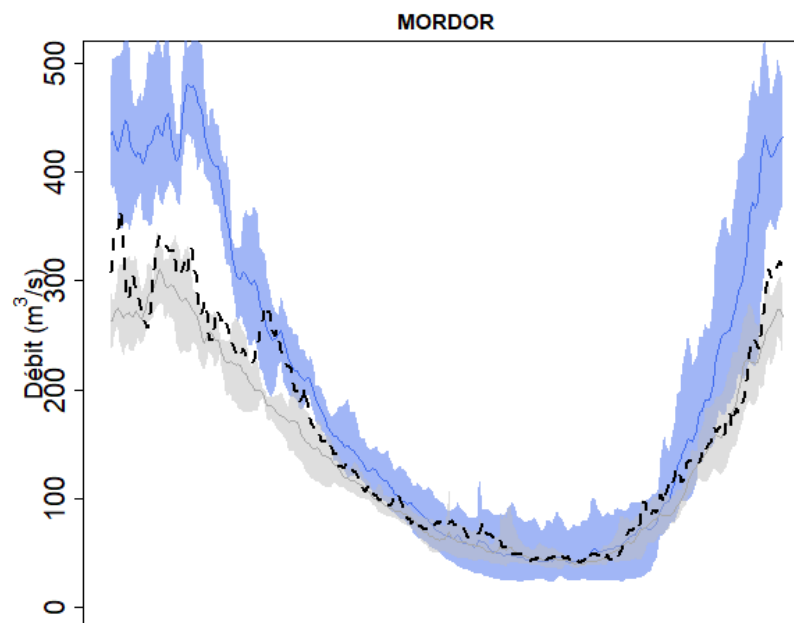
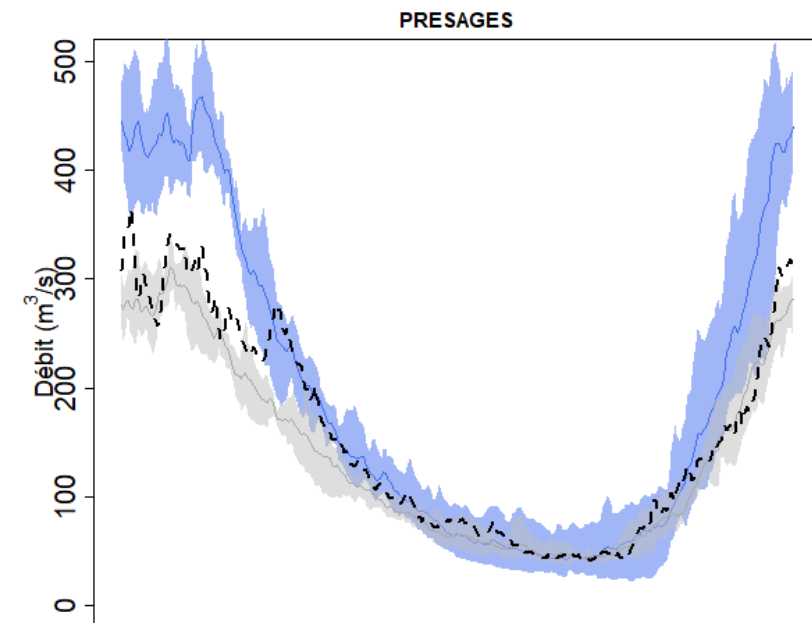
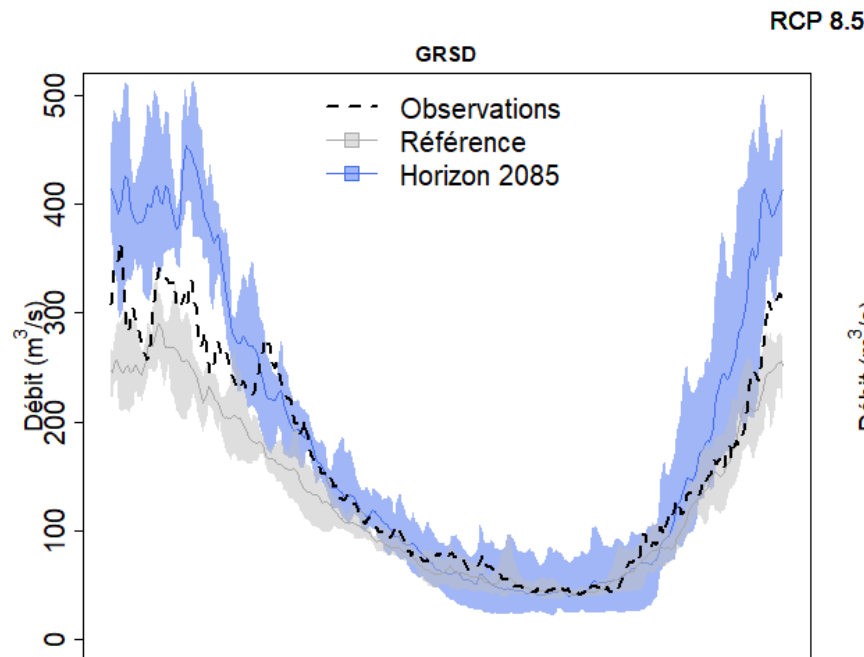
## ➤ Régimes futurs

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

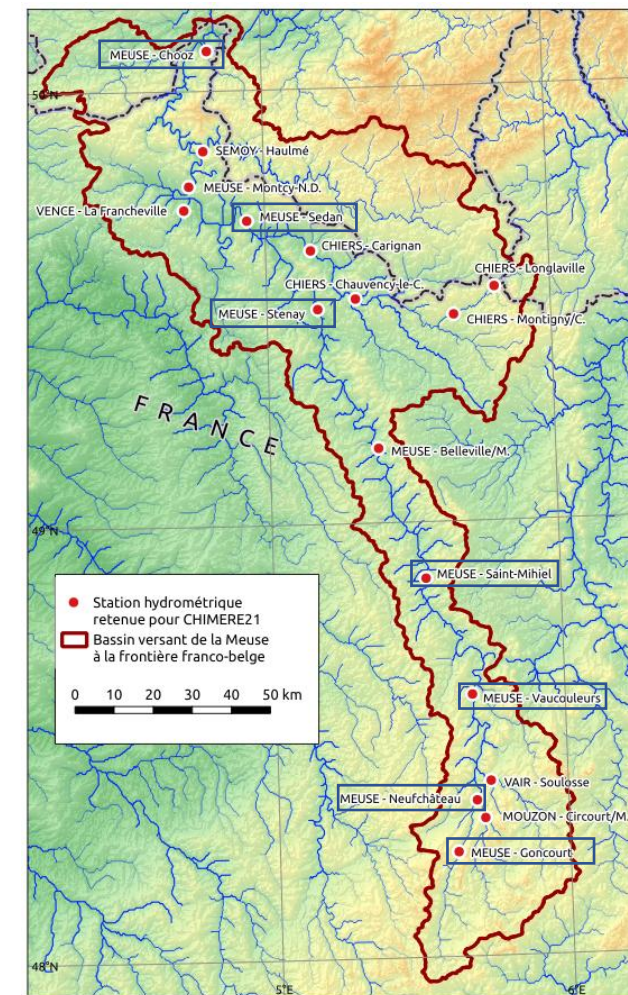
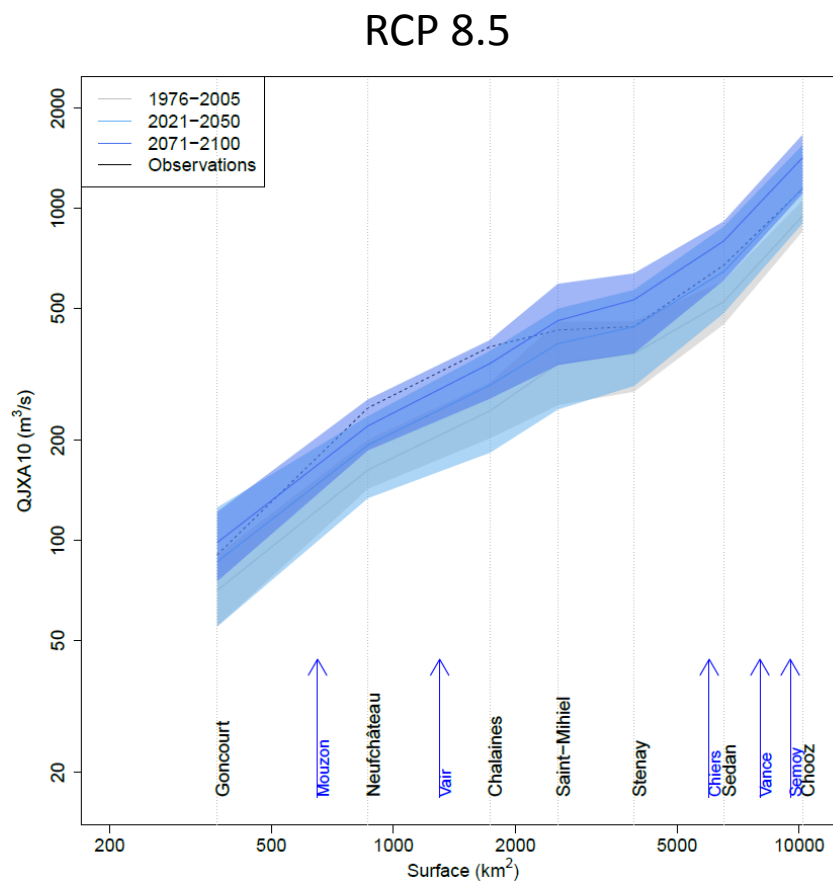
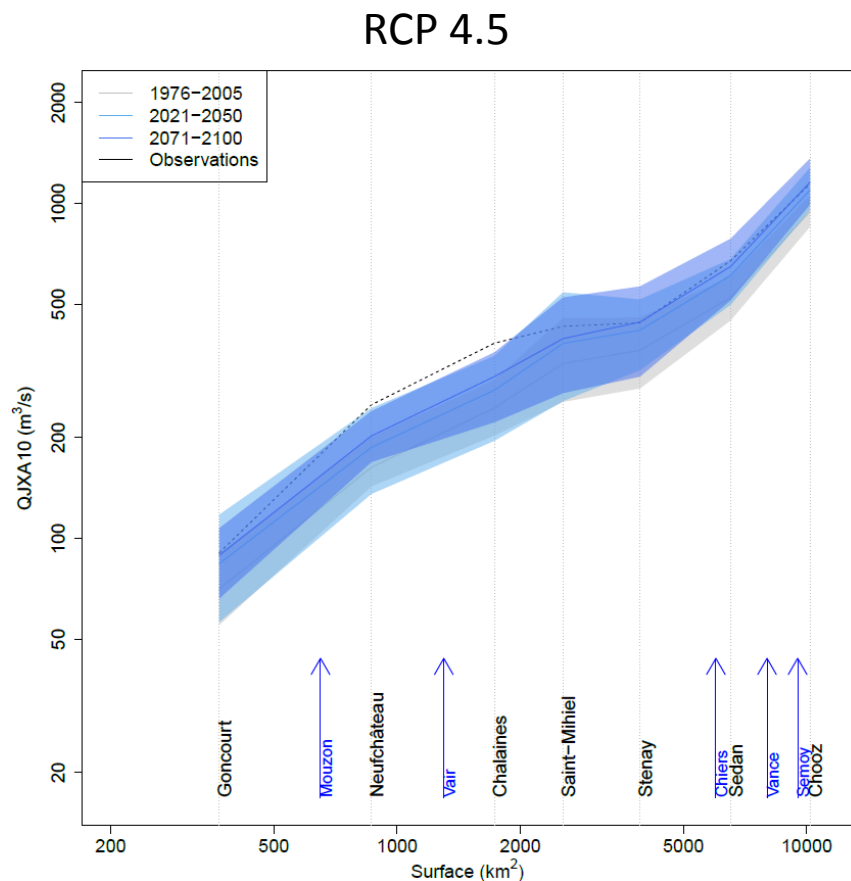


INRAE

Modélisation hydrologique et impacts du changement clim

7 octobre 2021 / Séminaire ECOBIOP / Thirel Guillaume

# ➤ Evolution des forts débits le long de la Meuse



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

RCP 8.5: augmentation importante, notamment en aval

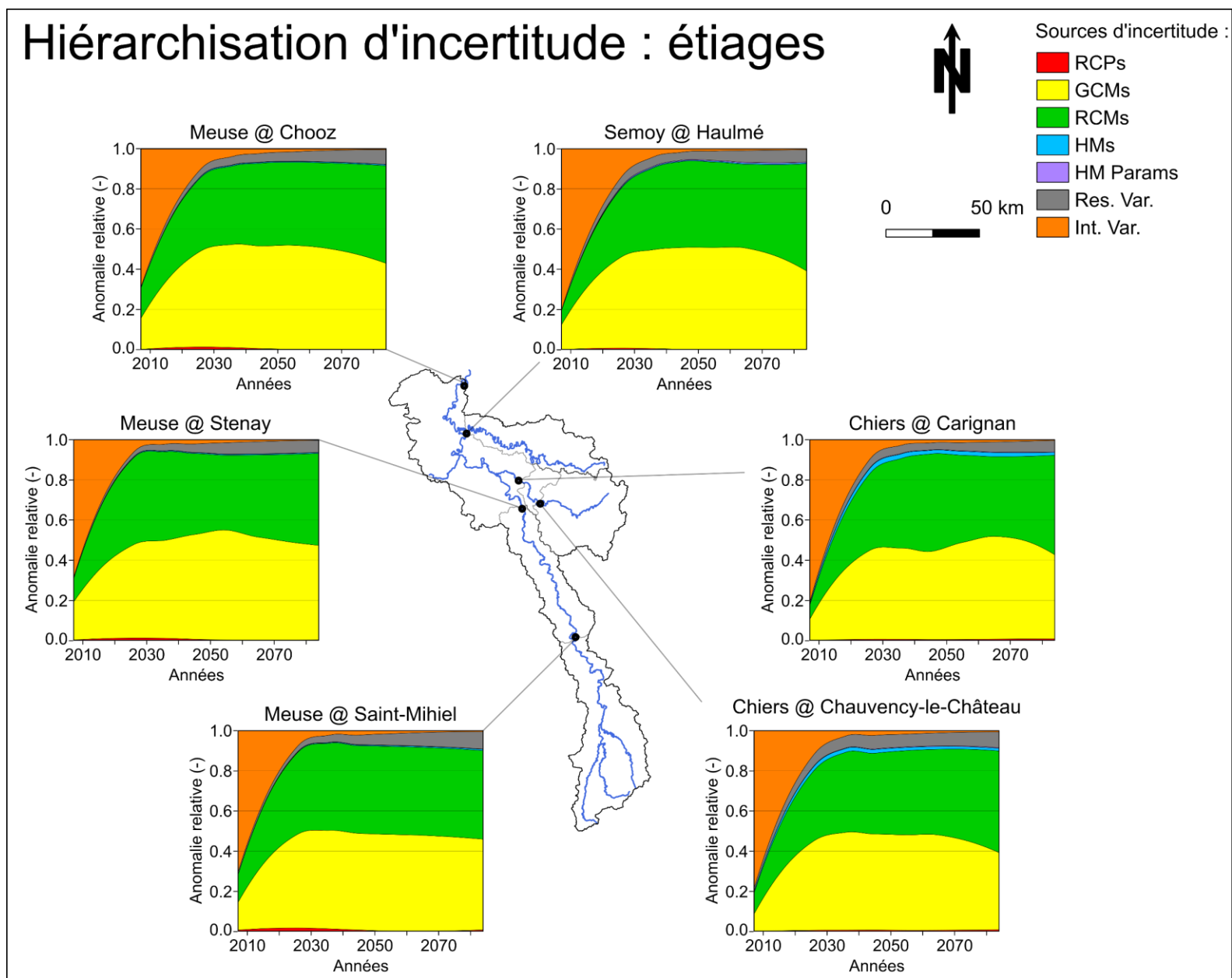
# ➤ Hiérarchie des incertitudes pour les bas débits

Indicateur = VCN3

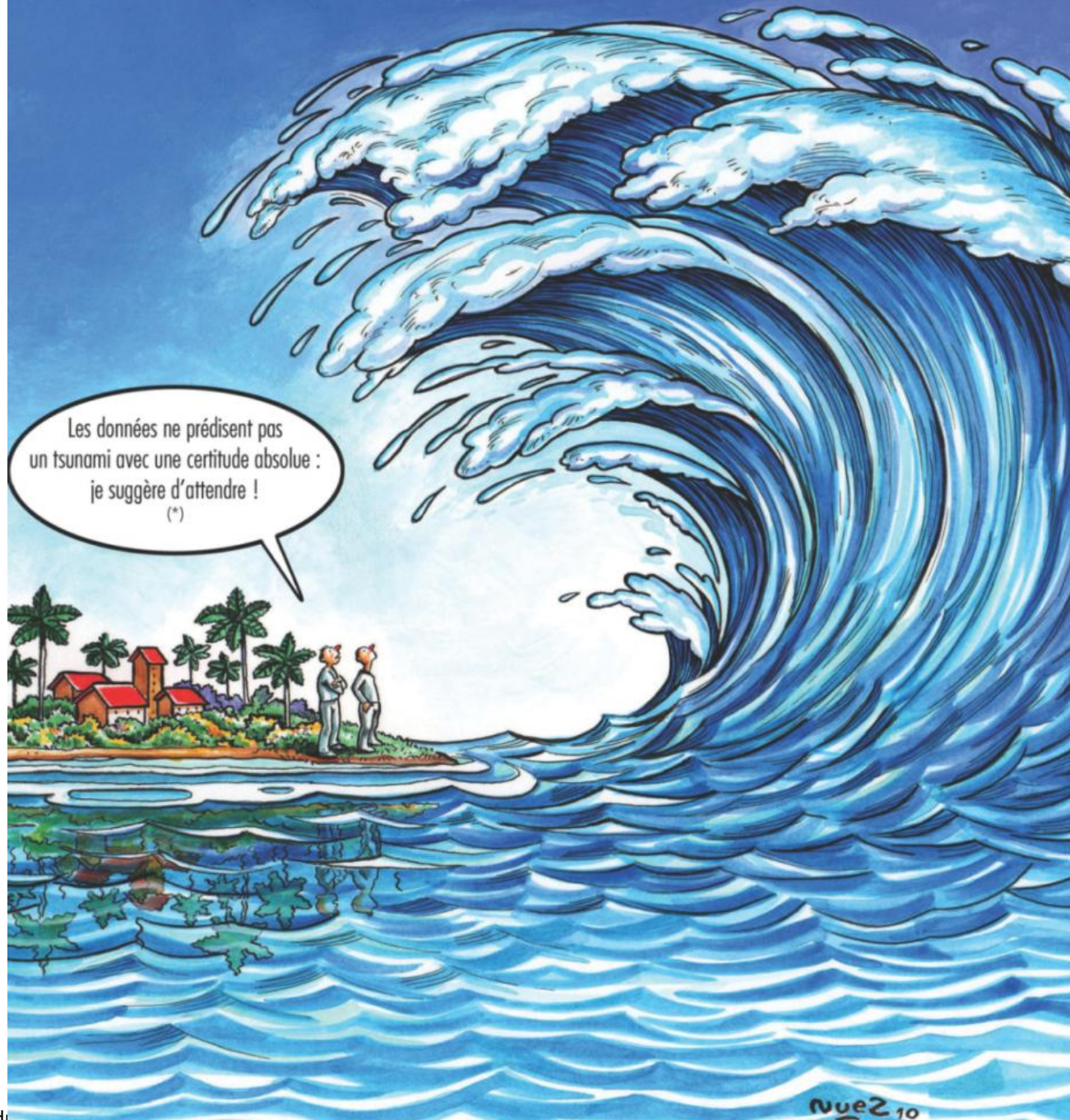
La variabilité interne domine pour le futur proche

GCMs et RCMs dominent ensuite

Les autres sources restent limitées







Source : Union of Concerned Scientists



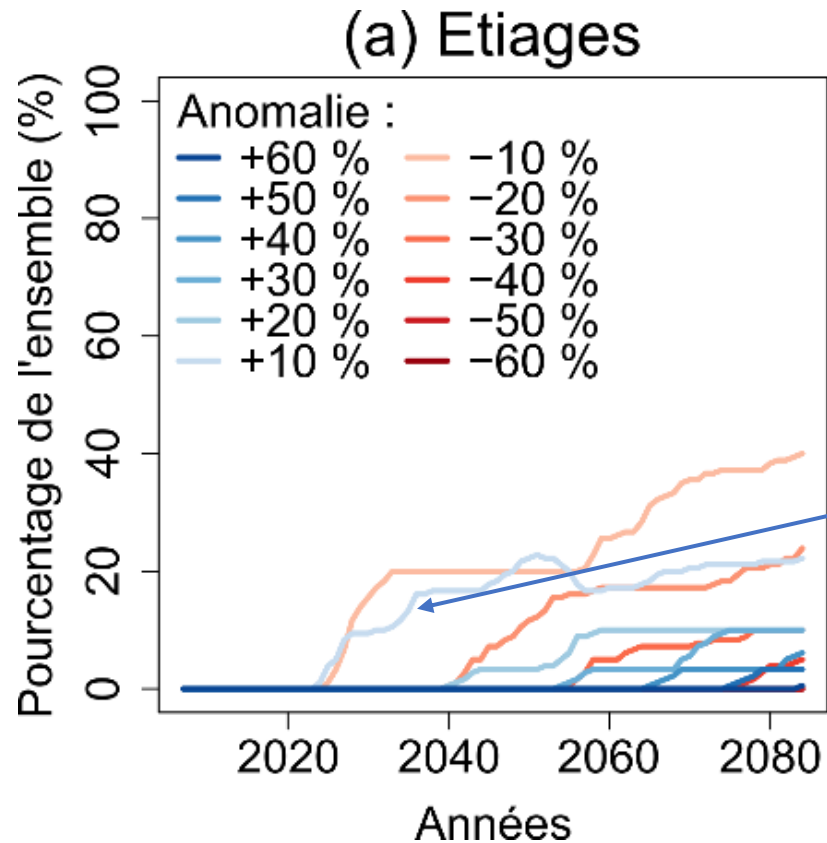
INRAE

Modélisation hydrologique et impacts d...

7 octobre 2021 / Séminaire ECOBIOP / Thirel Guillaume

## ➤ 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)



**INRAE**

**➤ Inclusion des usages dans la modélisation hydrologique**

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

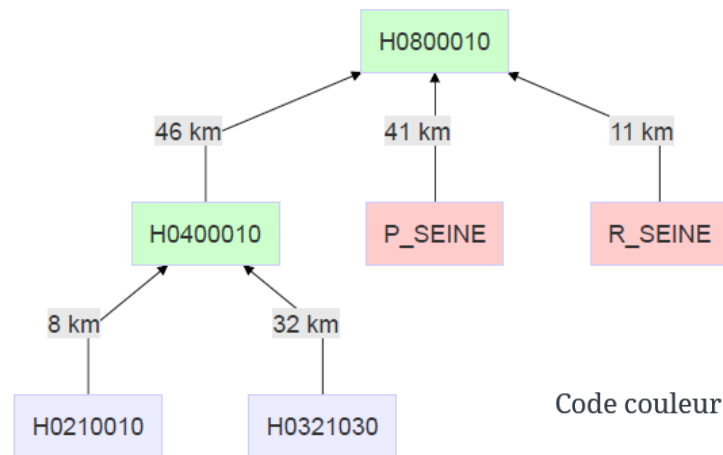
## > airGRiwrM

Une extension d'airGR pour la gestion intégrée des ressources



Package implémenté par D. Dorchies, UMR G-EAU, INRAE

<http://airgriwrM.g-eau.fr/>



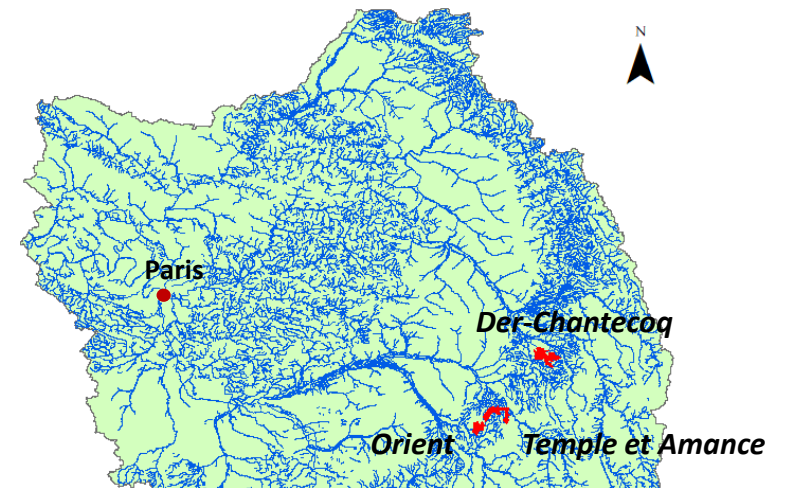
Code couleur:

- 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)

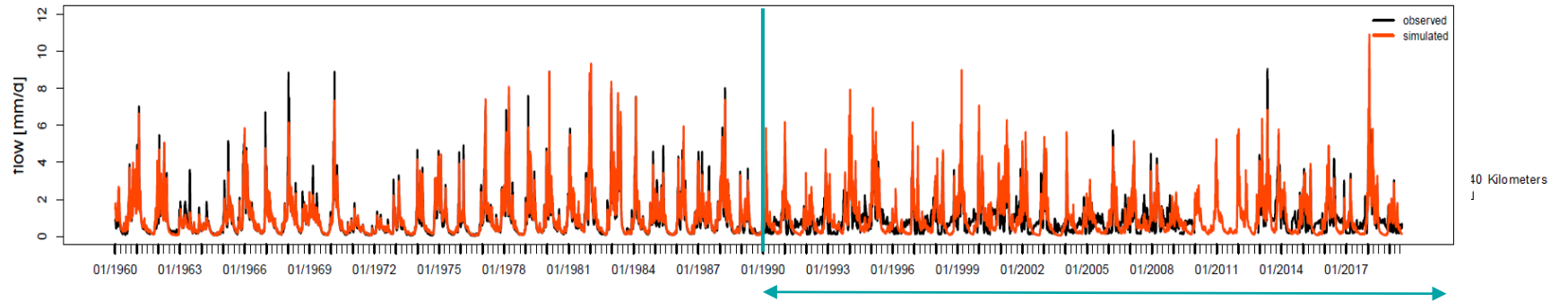
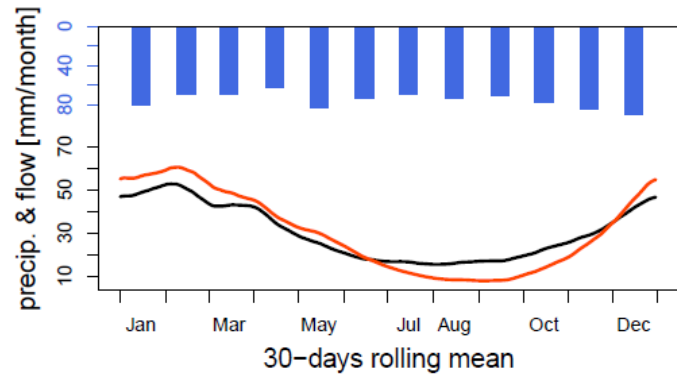
id	down	length	model	area
H0800010	NA	NA	RunModel_GR4J	3499.50
H0400010	H0800010	45.81	RunModel_GR4J	2340.37
H0210010	H0400010	7.86	RunModel_GR4J	1462.66
H0321030	H0400010	32.34	RunModel_GR4J	548.93
P_SEINE	H0800010	41.00	NA	NA
R_SEINE	H0800010	11.00	NA	NA

# ➤ Une première application sur la Seine

Stage de Laura Nunez Torres

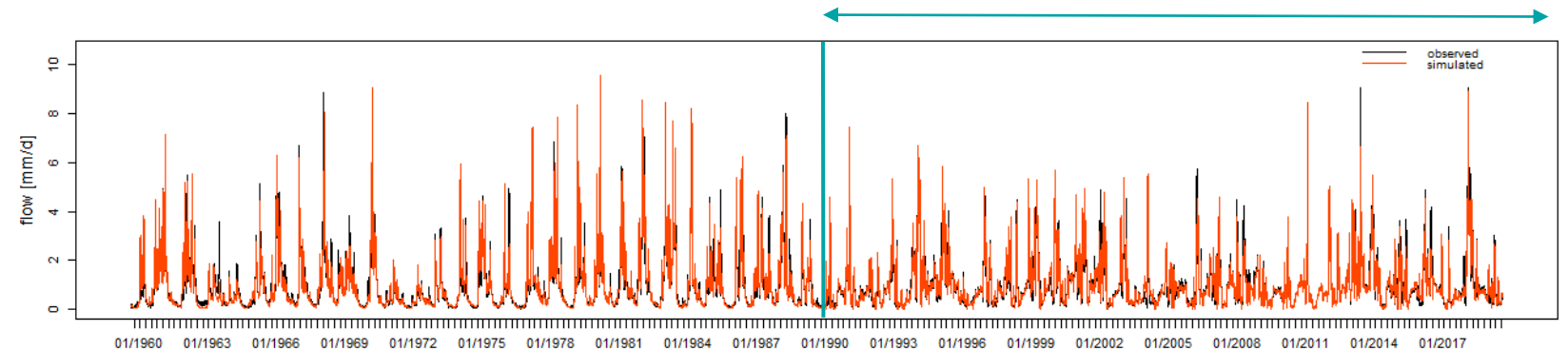
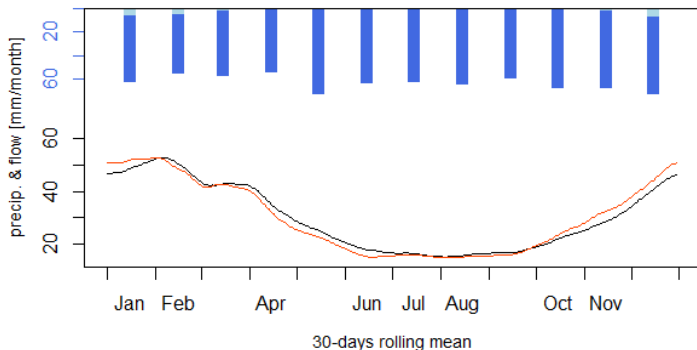


Modélisation sans intégration des lacs-réservoirs



Modélisation avec intégration des lacs-réservoirs

Mise en service des lacs-réservoirs Temple et Amance



## ➤ 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

INRAE

## ➤ 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)

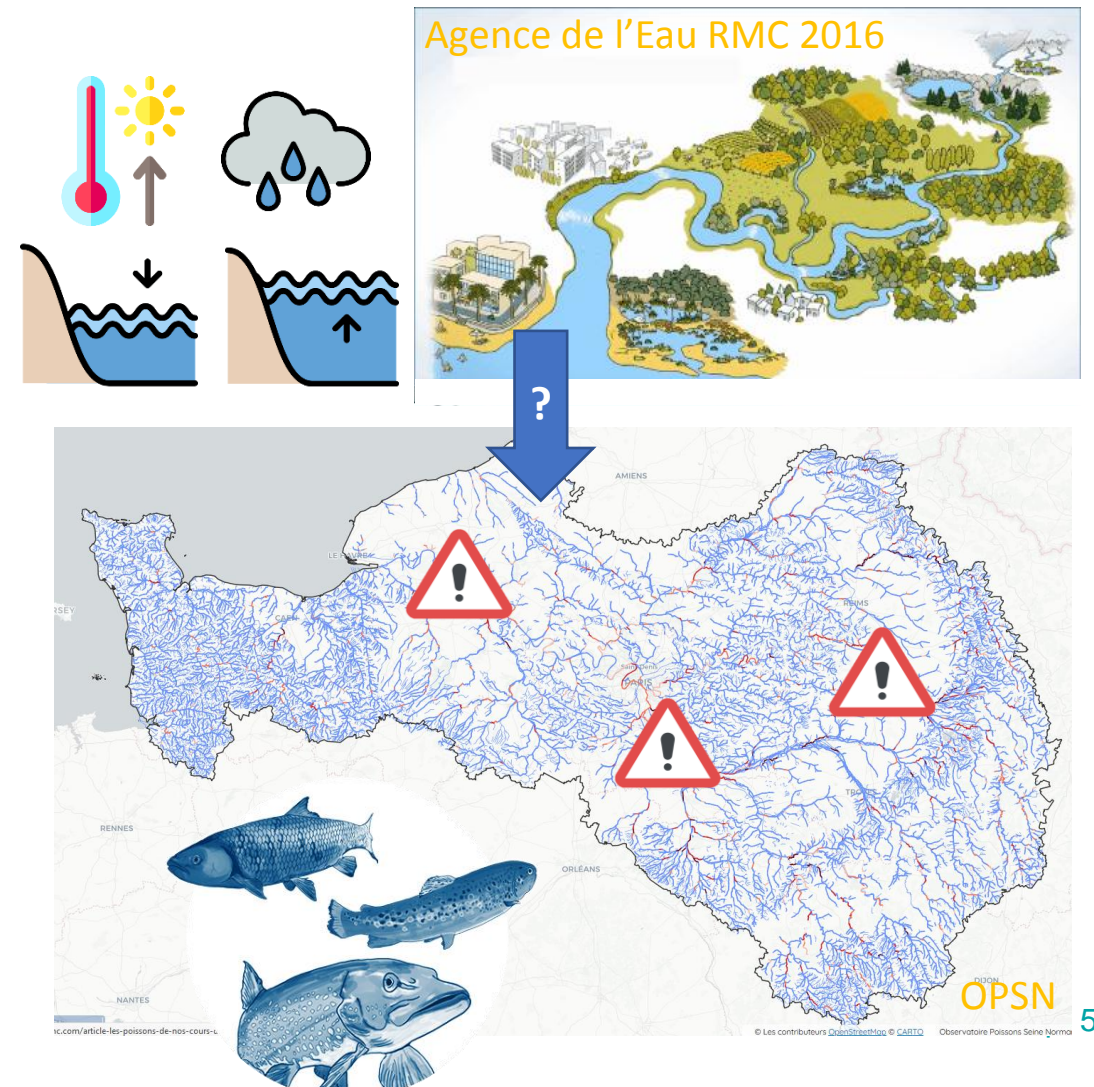
Financement : Agence de l'Eau Seine-Normandie et MP BIOSEFAIR

## 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 perspectives de biodiversité et identifier les zones à risques sous scénarios hydroclimatiques, territoriaux et de connectivités



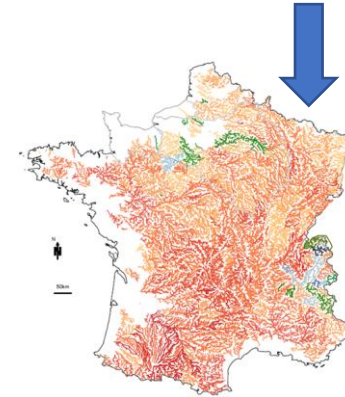
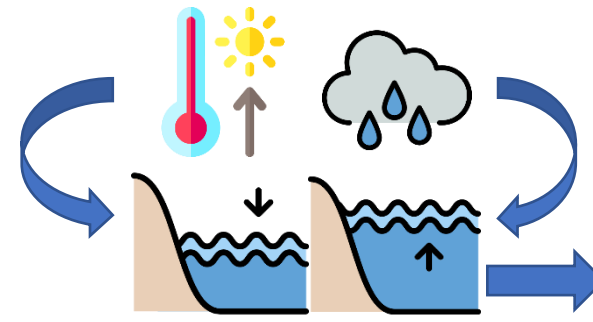
INRAE

Modélisation hydrologique et impacts du changement climatique

7 octobre 2021 / Séminaire ECOBIOP / Thirel Guillaume

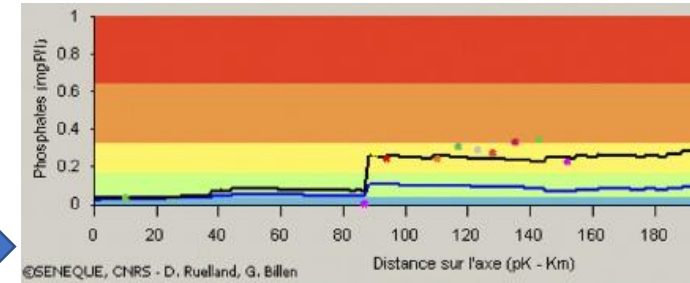
# Approche générale

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



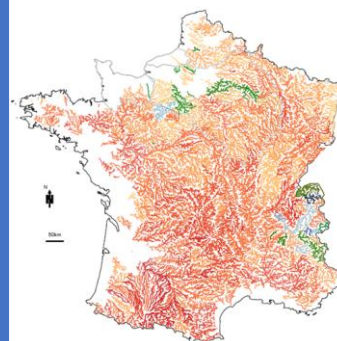
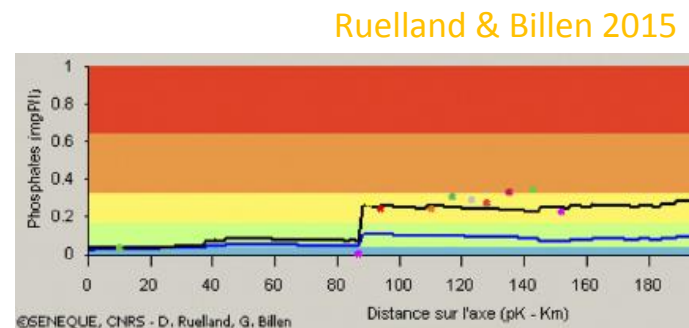
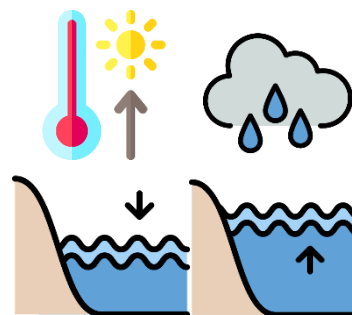
Evolution du débit d'été quinquennal (%)

Ruelland & Billen 2015

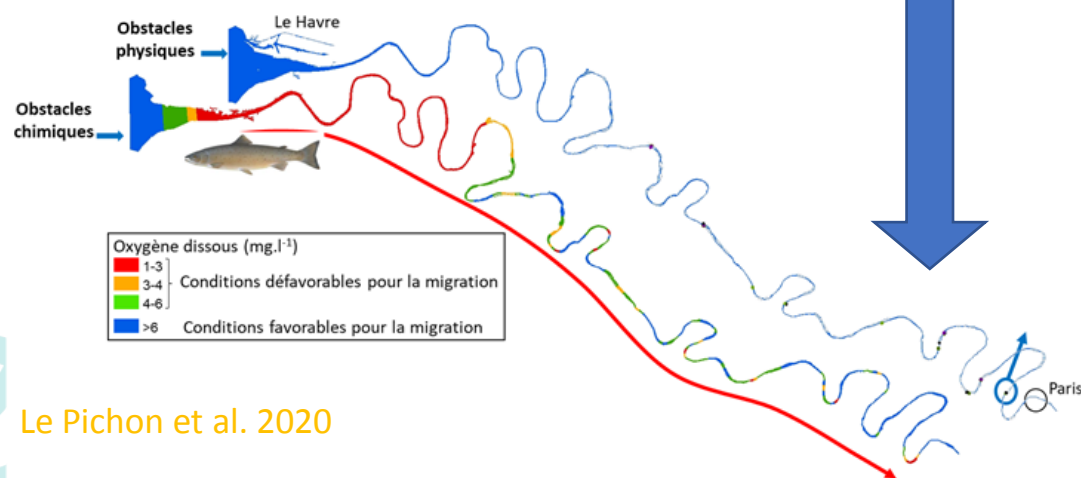
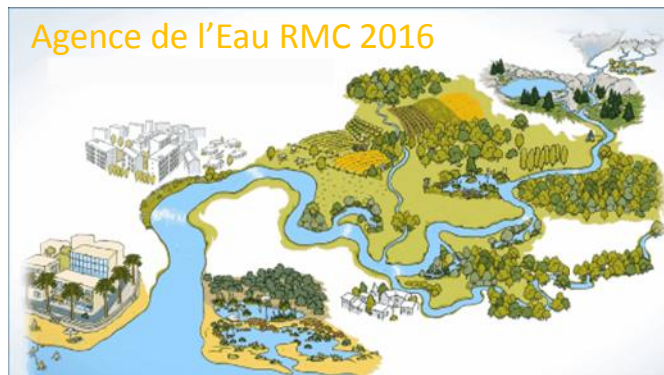


# Approche générale

- 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



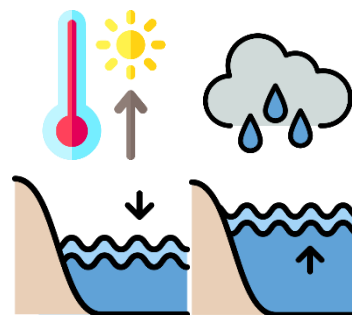
Evolution du débit d'étiage quinquennal (%)



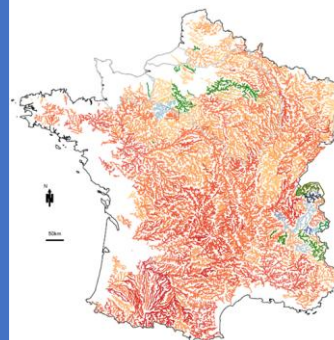
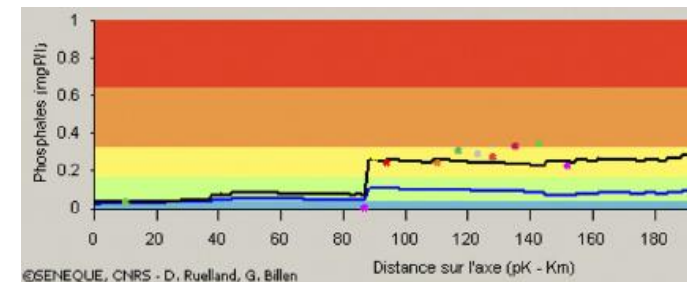


# Approche générale

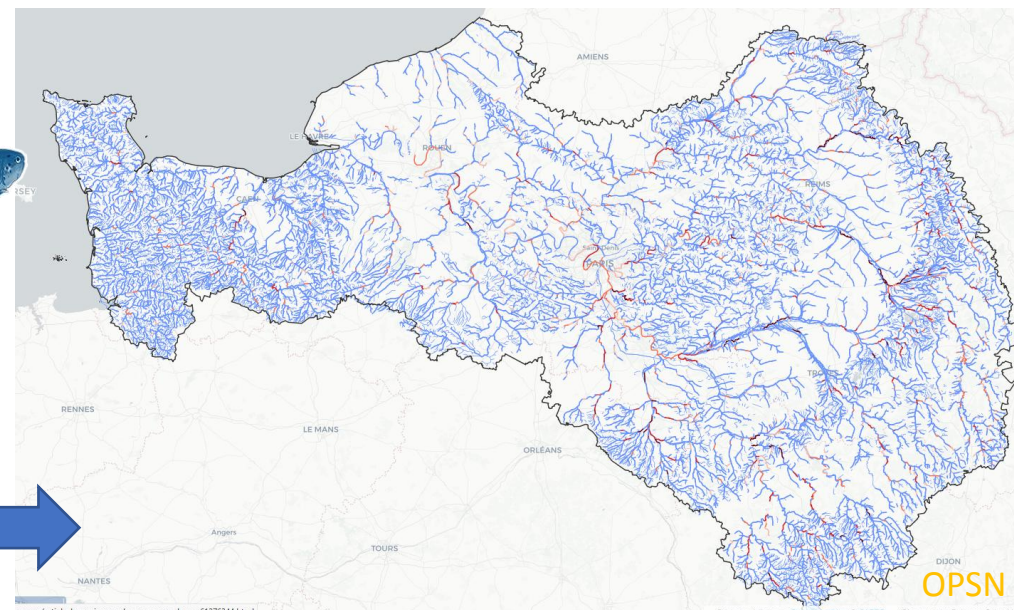
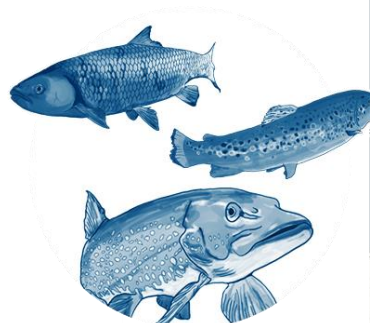
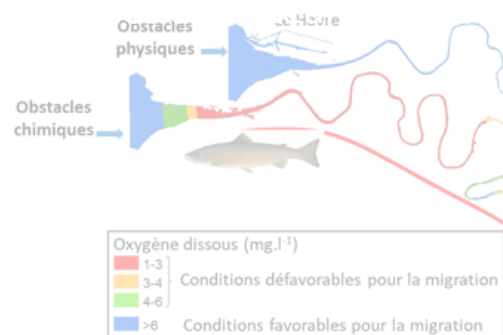
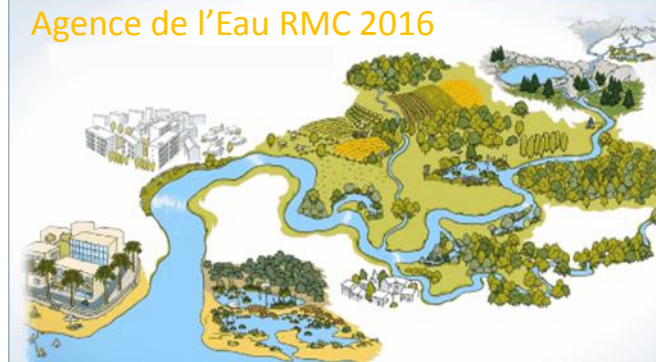
- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements
- Prédire la **distribution actuelle des espèces** en fonction de la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



Ruelland & Billen 2015



Evolution du débit d'été quinquennal (%)



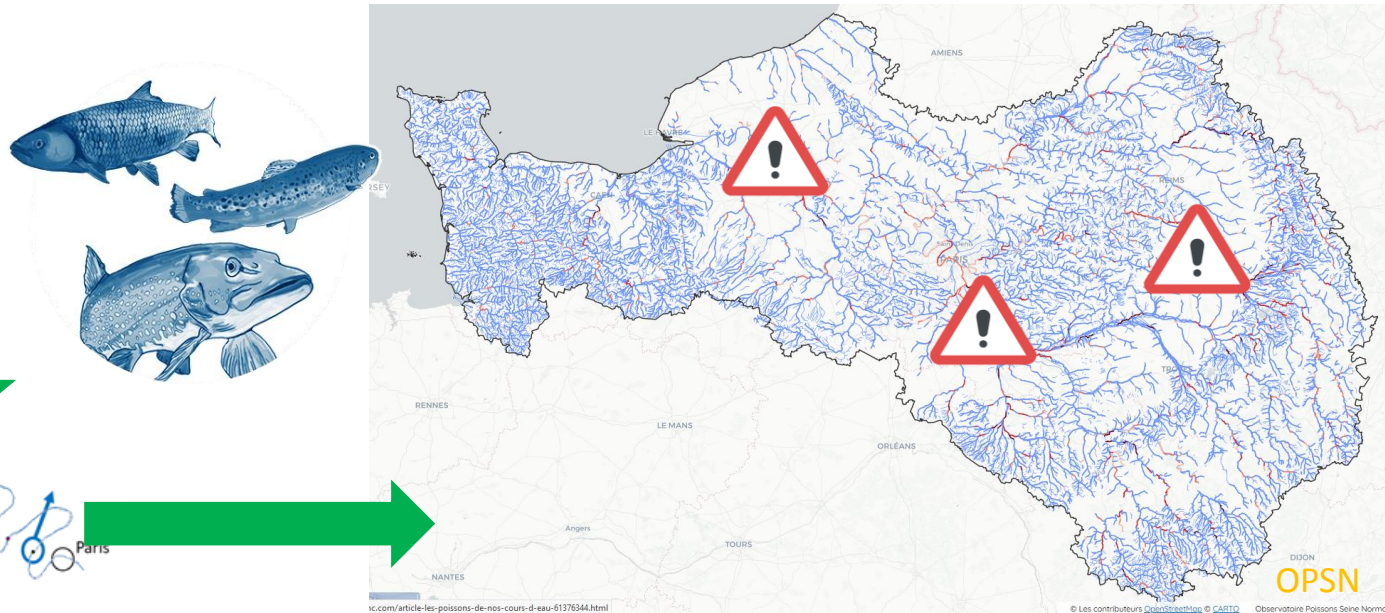
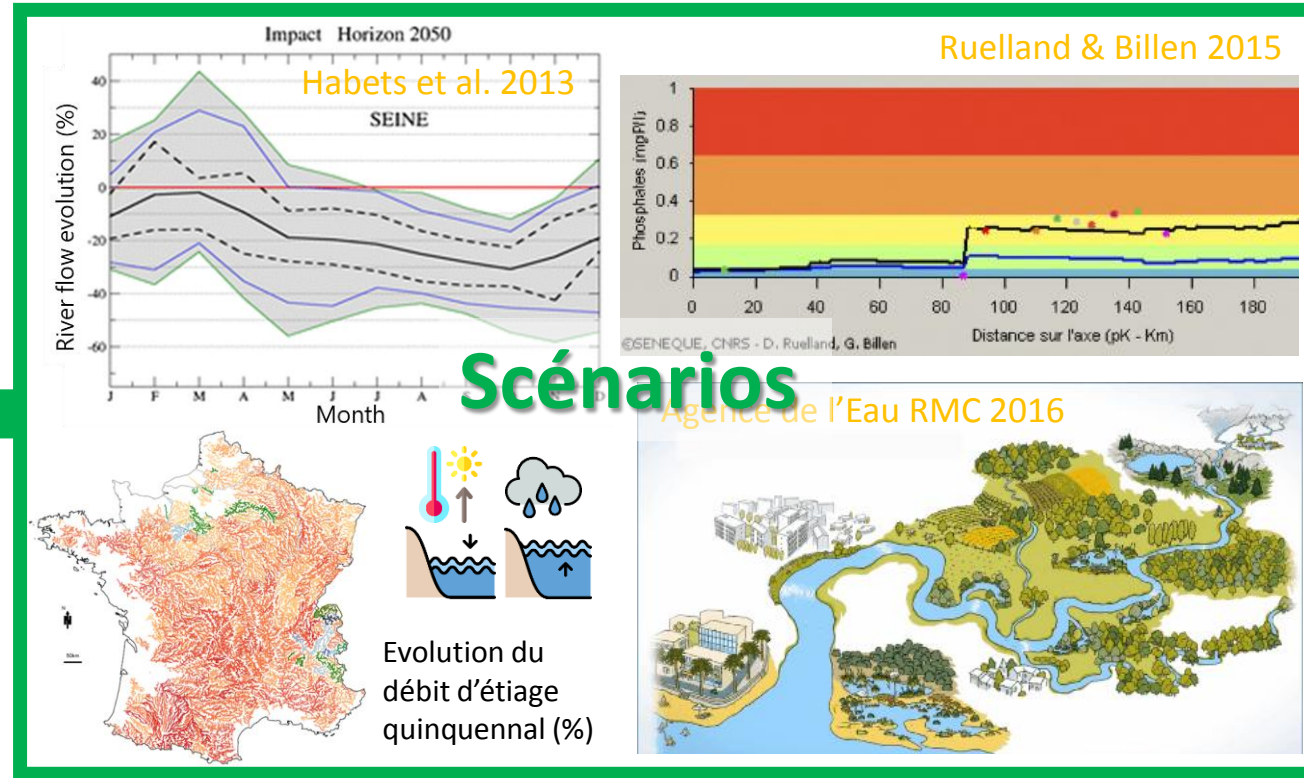
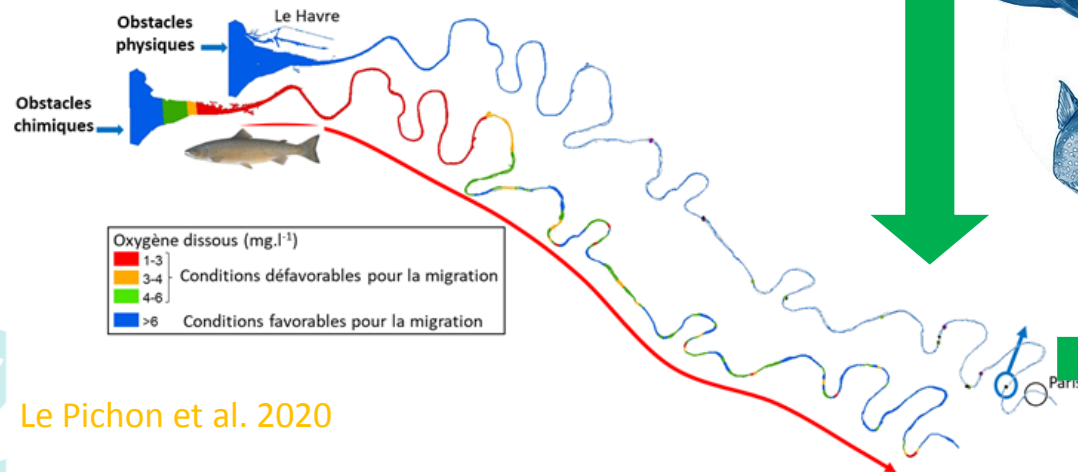
Le Pichon et al. 2020





# Approche générale

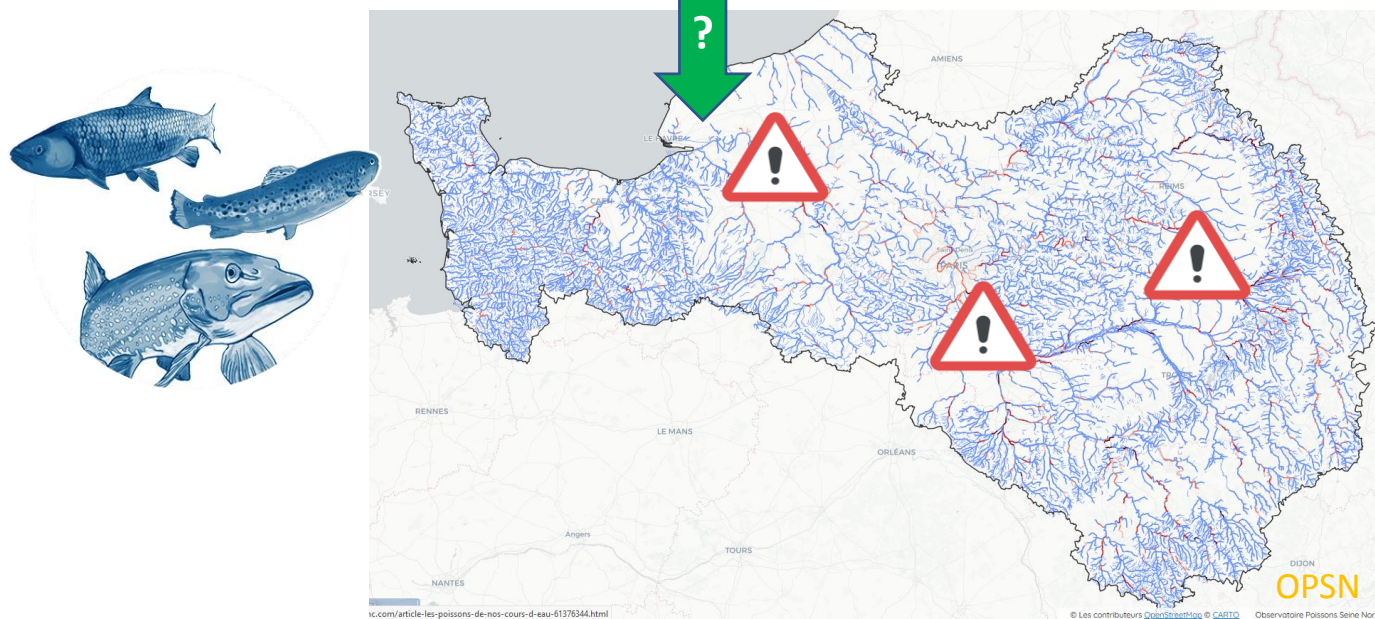
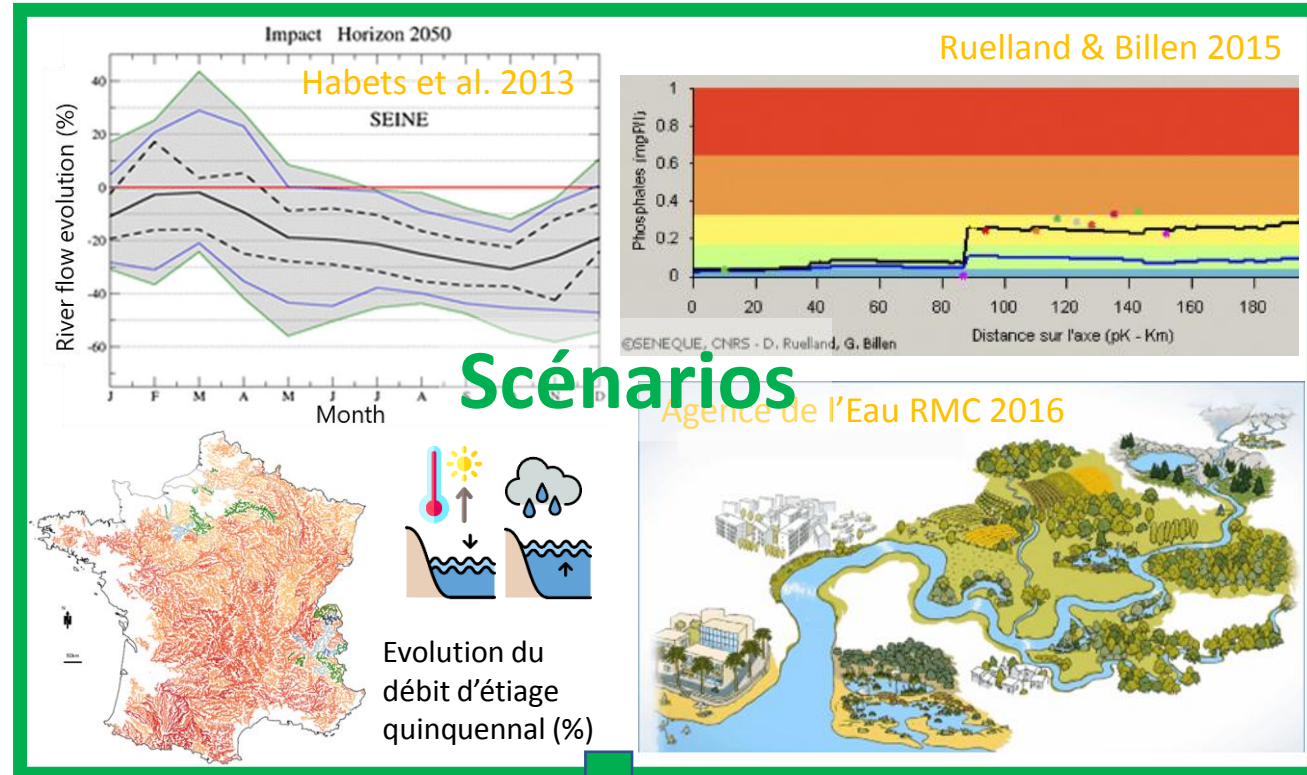
- Modélisation **hydro-climatique** pour décrire l'hydrologie et la physico-chimie du bassin
- Modélisation en **écologie du paysage** pour décrire les habitats et les connectivités écologiques du bassin, en incluant les aménagements
- Prédire la **distribution actuelle des espèces** en fonction de la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





# 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/>