



## ■ La ressource en eau en environnement changeant

Nicolas Flipo

Remerciements : N. Gallois, J. Boé

[Nicolas.flipo@minesparis.psl.eu](mailto:Nicolas.flipo@minesparis.psl.eu)





## **Des inégalités géographiques pour l'accès à l'eau, amplifiées par le changement climatique**

# ■ Le cycle de l'eau en chiffres

Fleuves : 44 000 km<sup>3</sup>.a<sup>-1</sup>

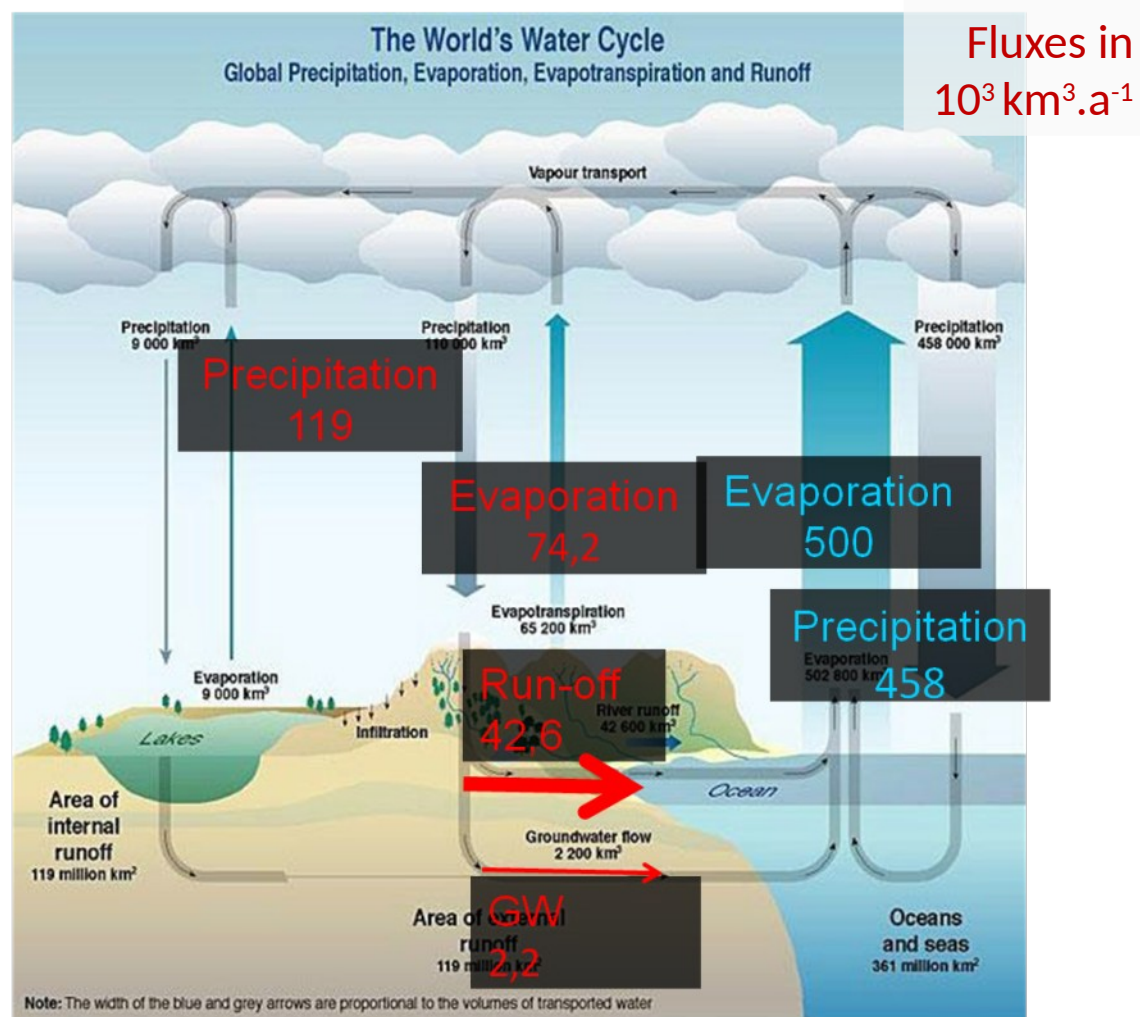
Renouvelables : 12 000 km<sup>3</sup>.a<sup>-1</sup>

Stockage : 7 000 km<sup>3</sup>

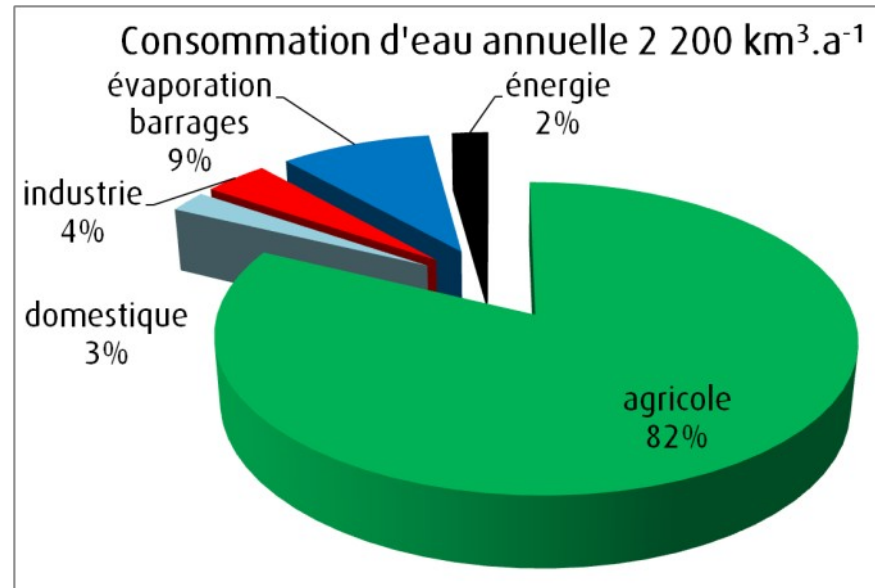
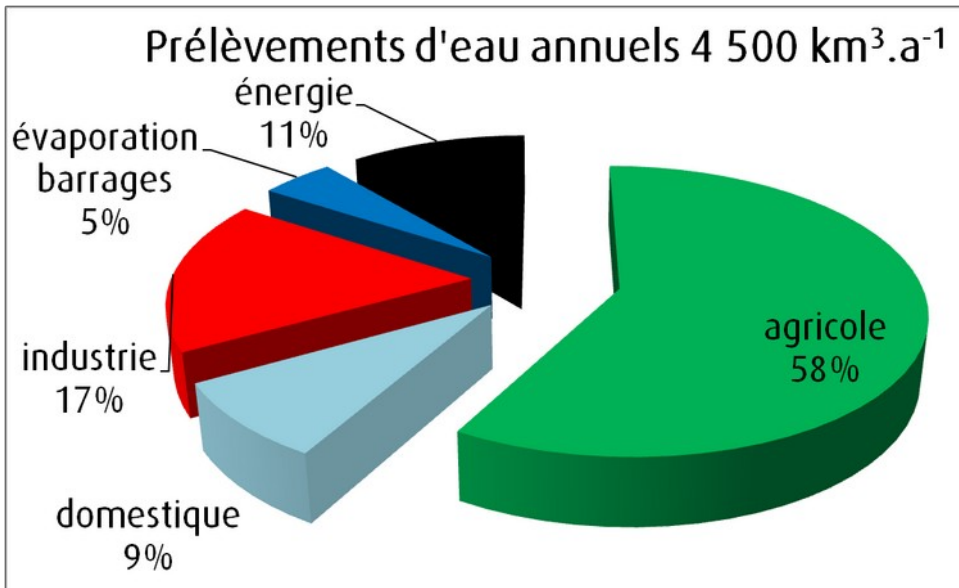
Prélevées : 4 500 km<sup>3</sup>.a<sup>-1</sup>

Consommées : 2 200 km<sup>3</sup>.a<sup>-1</sup>

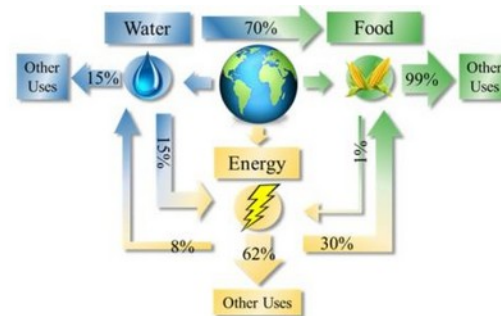
[de Marsily, 2008; Garcia and You, 2016; Oki and Kanae, 2006 ;Rodell et al., 2016; Shiklomanov, 1994; Roche and Zimmer, 2006]



# ■ Les usages de l'eau sont interdépendants et territorialisés



Une interdépendance des cycles de l'eau, de l'énergie et de la nourriture qui nécessite une approche globale pour définir des stratégies d'adaptation



[Garcia et al, 2016 CCE]

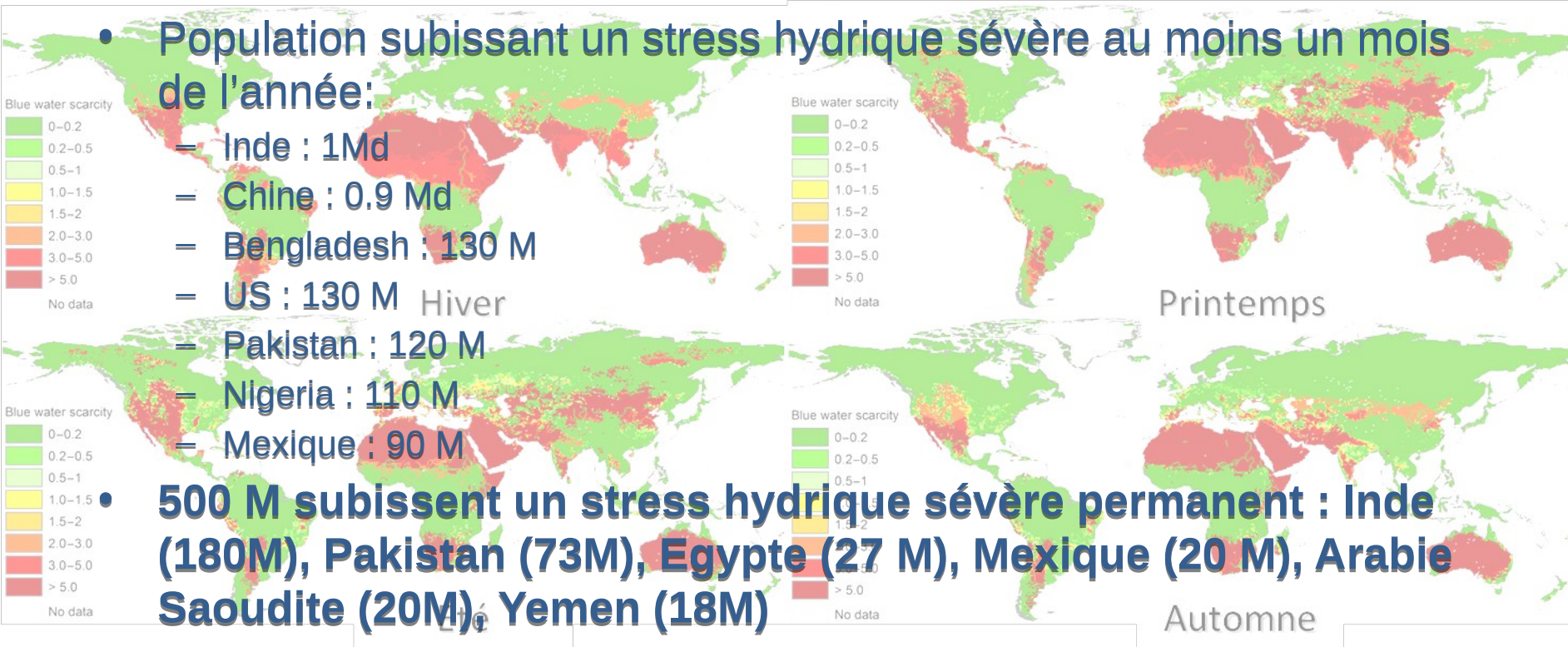
# ■ 4 Md d'individus subissent un stress hydrique **sévère** pendant au moins un mois par an

[Mekonnen and Hoekstra, 2016]

## • Population subissant un stress hydrique sévère au moins un mois de l'année:

- Inde : 1Md
- Chine : 0.9 Md
- Bangladesh : 130 M
- US : 130 M Hiver
- Pakistan : 120 M
- Nigeria : 110 M
- Mexique : 90 M

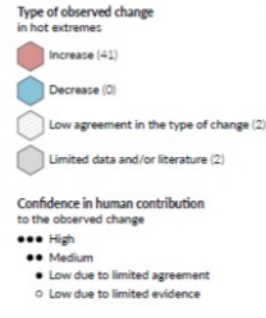
## • 500 M subissent un stress hydrique sévère permanent : Inde (180M), Pakistan (73M), Egypte (27 M), Mexique (20 M), Arabie Saoudite (20M), Yemen (18M)



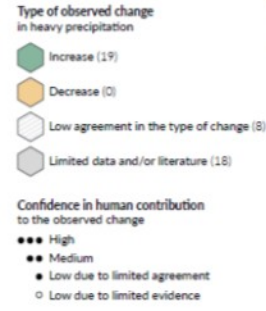
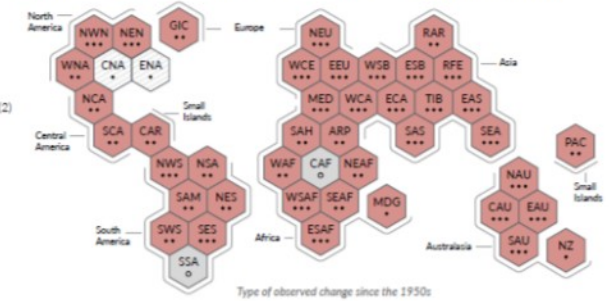
# ■ Synthèse des tendances hydroclimatiques observées

- Augmentation des extrêmes de température ;
- « wet-get-wetter and dry-get-drier »
- Des tendances sur les précipitations extrêmes difficiles à interpréter par grandes zones. **Suspicion d'augmentation des précipitations extrêmes** dans hémisphère nord ;
- Même remarque sur **sécheresses**, avec une tendance à l'augmentation pour Méditerranée et ouest des US.

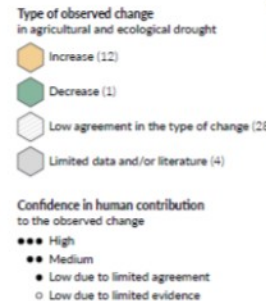
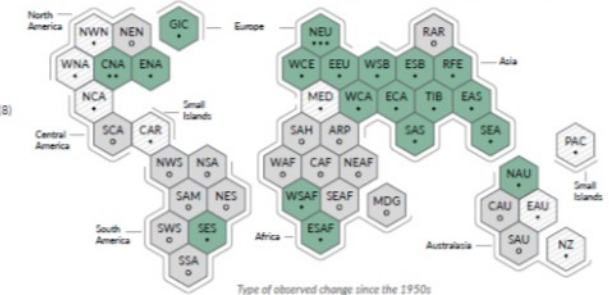
[IPCC, AR6, 2021]



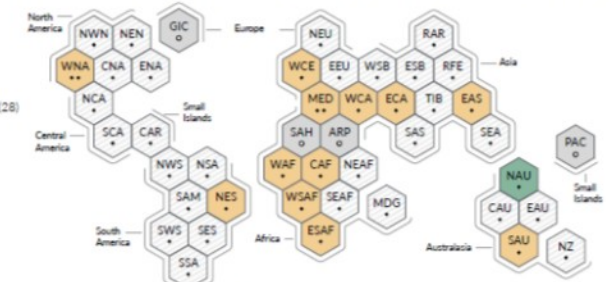
a) Synthesis of assessment of observed change in hot extremes and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



b) Synthesis of assessment of observed change in heavy precipitation and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions



c) Synthesis of assessment of observed change in agricultural and ecological drought and confidence in human contribution to the observed changes in the world's regions

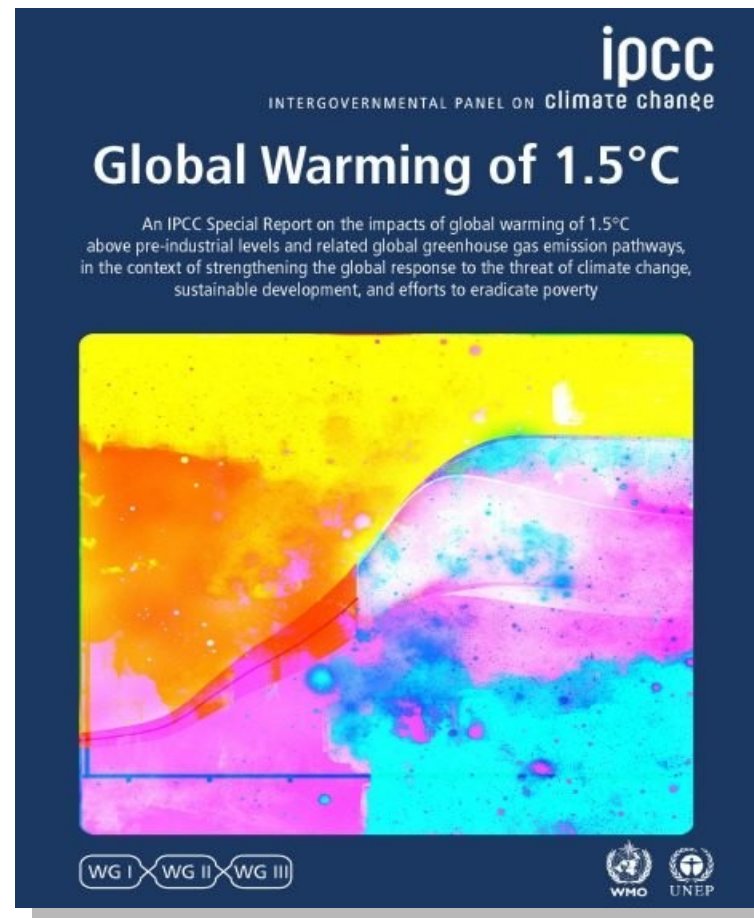


# ■ Augmentation des extrêmes hydrologiques

Climate models project robust differences in regional climate characteristics between present-day and global warming of 1.5°C and between 1.5°C and 2°C. These differences include increases in:

- mean temperature in most land and ocean regions (*high confidence*),
- *hot extremes* in most inhabited regions (*high confidence*),
- *heavy precipitation* in several regions (*medium confidence*),
- the probability of drought and precipitation deficits in some regions (*Mediterranean, southern Africa, north eastern Brazil*).

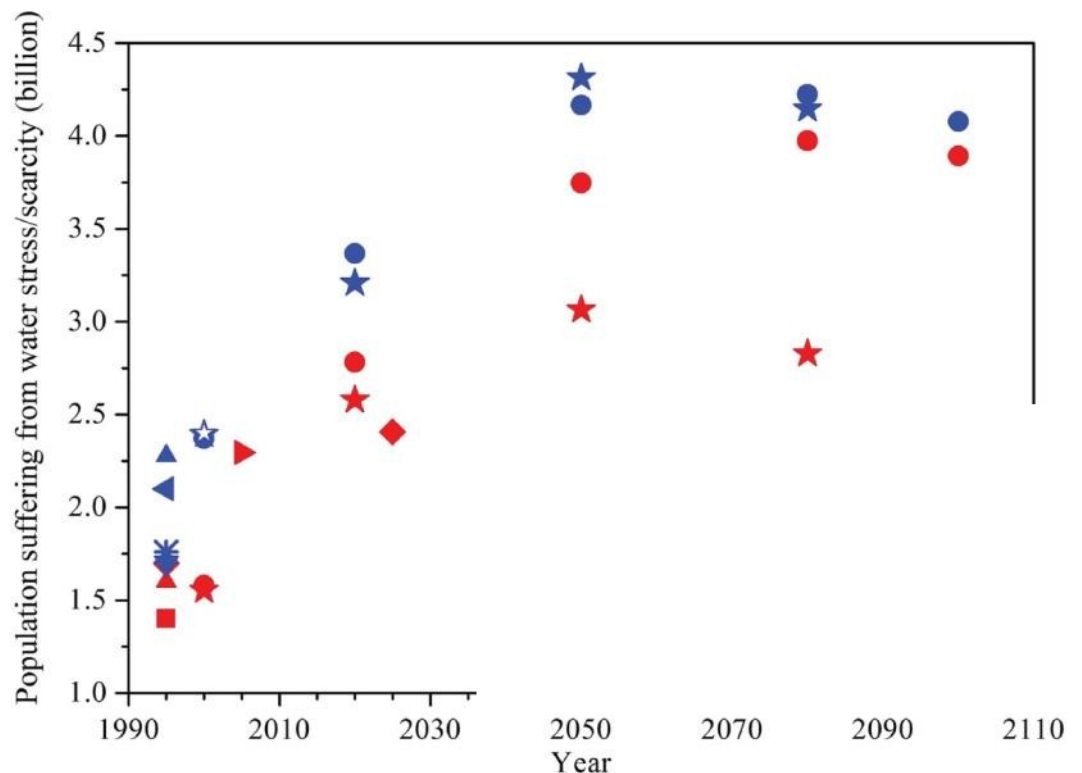
Globally, the frequency of intense precipitation events is projected to increase while the frequency of all precipitation events is projected to decrease, leading to the contradictory-seeming projection of a **simultaneous increase in both droughts and floods**



# ■ Un doublement des individus vivant en moyenne sous stress hydrique à l'horizon fin de siècle

The areas in the middle to low latitudes of the northern hemisphere have a high level of water scarcity. African countries suffer from water scarcity issue due to poverty and a lack of economic capacity to build water infrastructure, which have hindered these countries to access their water resources that are often physically abundant.

[Liu et al, 2017]



**Average annual blue water availability < 1000 m<sup>3</sup>/capita/year:**

- Arnell, 2004
- Arnell et al., 2011
- ★ Gosling and Arnell, 2016
- ▲ Alcamo et al., 2007
- ◆ Revenga et al., 2000
- ▶ Kummur et al., 2010

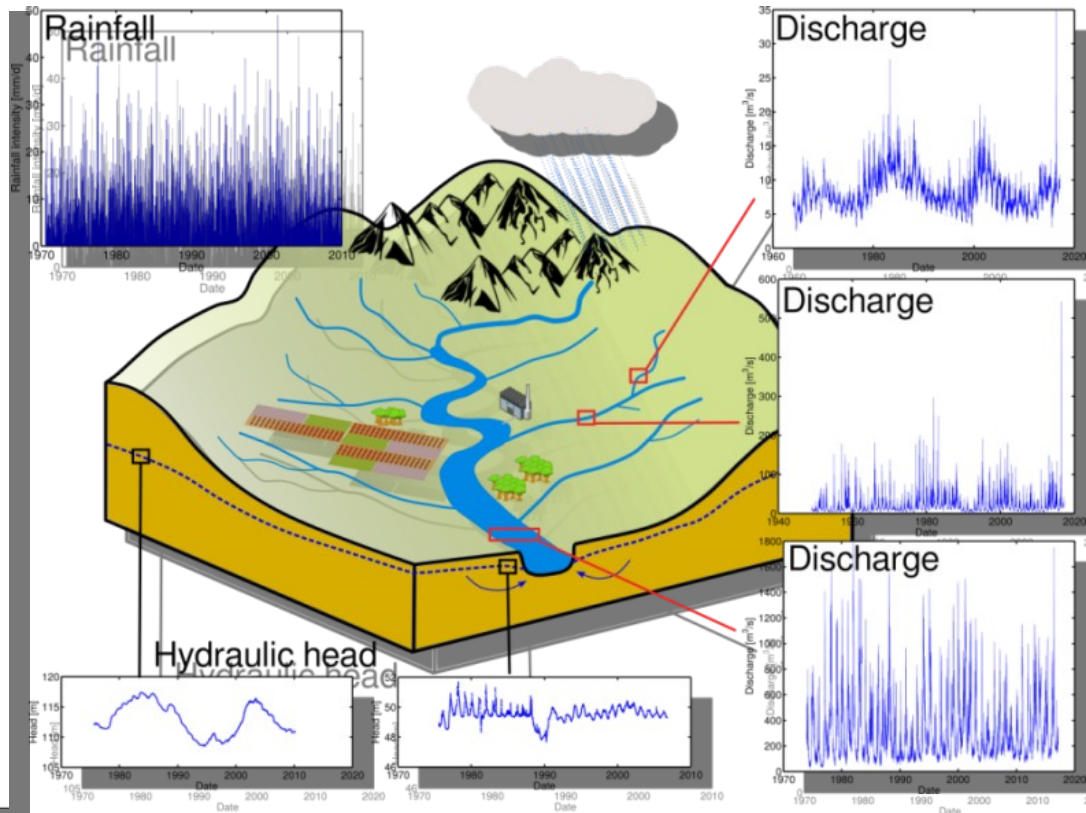
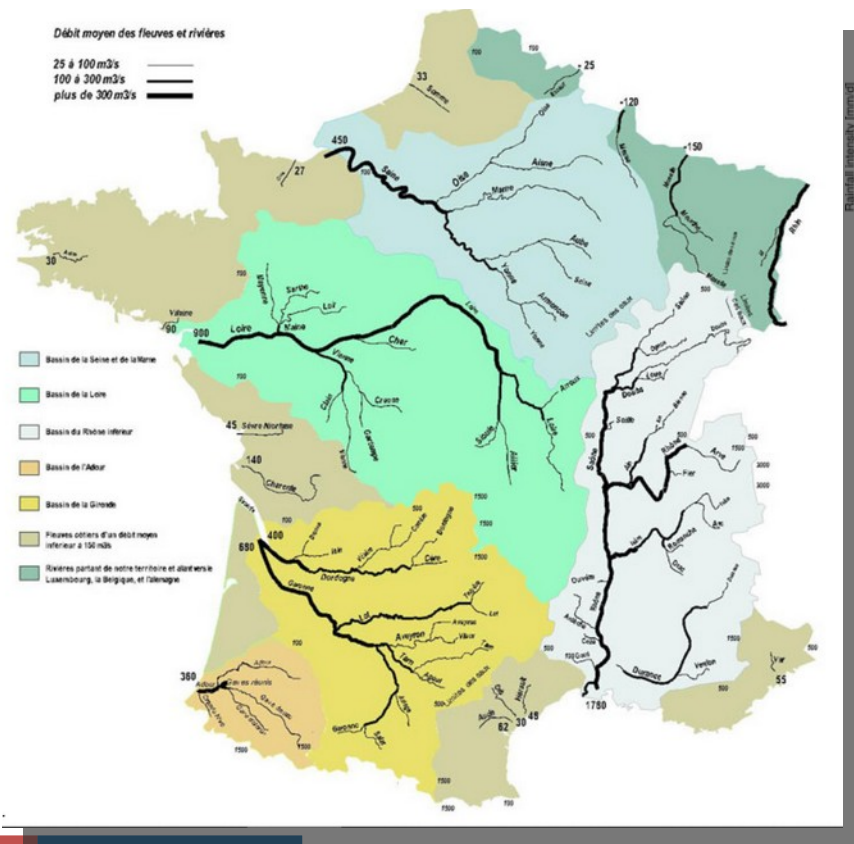
**Water withdrawal > 40% of average annual blue water availability:**

- Arnell et al., 2011
- ★ Gosling and Arnell, 2016
- ▲ Alcamo et al., 2007
- ✳ Vörösmarty et al., 2000
- ▼ Oki et al., 2001
- ◀ Alcamo et al., 2003b
- ☆ Oki and Kanae, 2006



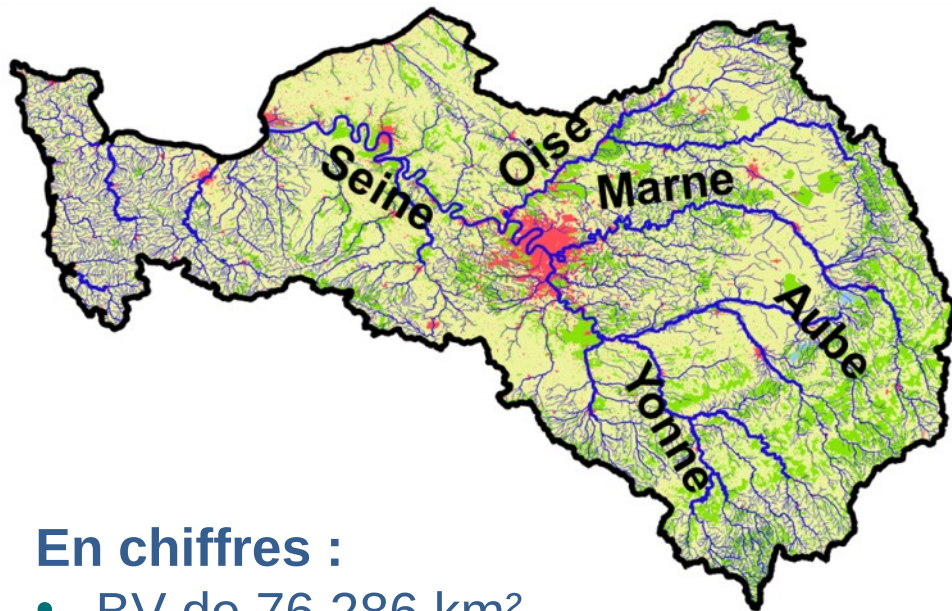
### Débit moyen des fleuves et rivières

- 25 à 100 m<sup>3</sup>/s
- 100 à 300 m<sup>3</sup>/s
- plus de 300 m<sup>3</sup>/s



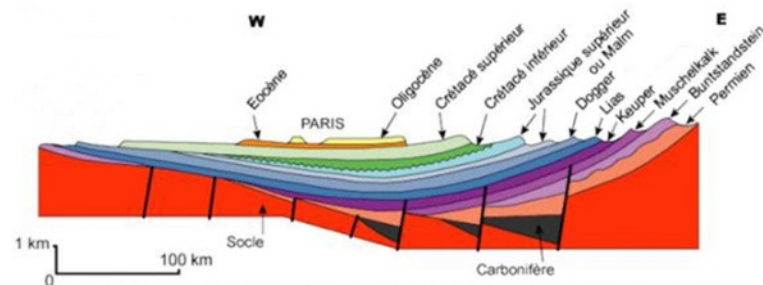
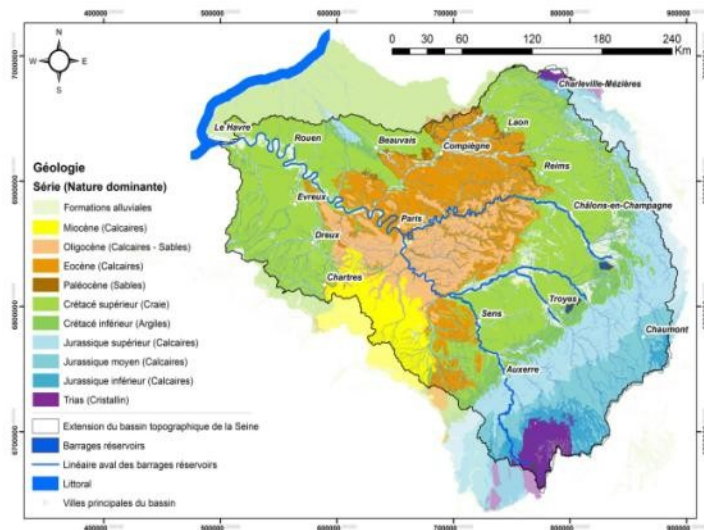
**Evaluer les changements à l'échelle des bassins versants régionaux, exemple du bassin de la Seine**

# Le bassin de la Seine

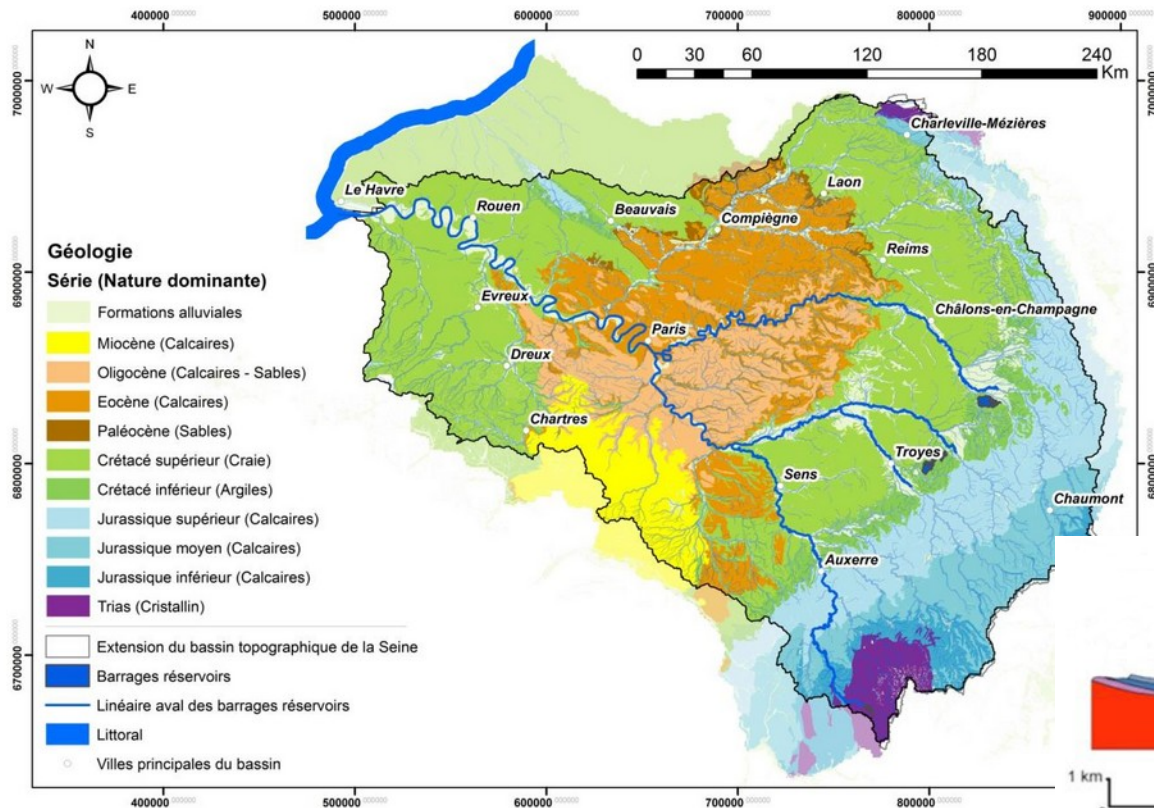


## En chiffres :

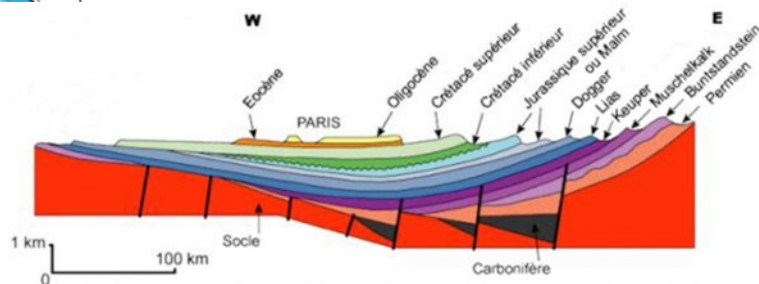
- BV de 76 286 km<sup>2</sup>
- 28 000 km de rivières
- 17 M d'habitants
- Premier réservoir d'eau souterraine d'Europe



# ■ Première réserve d'eau souterraine d'Europe

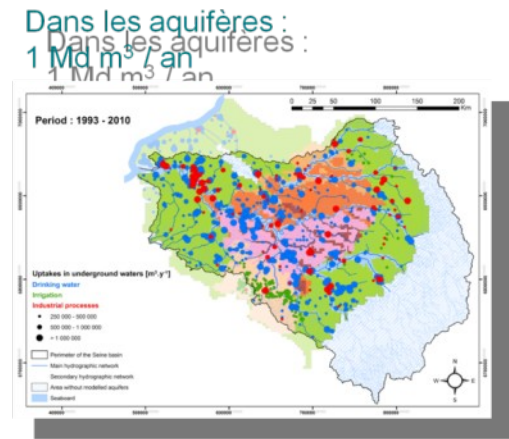
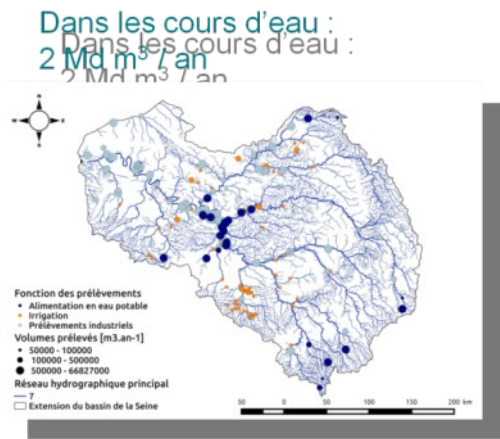


Une pile d'assiettes, couplée à des barrages réservoirs ( $840 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ )

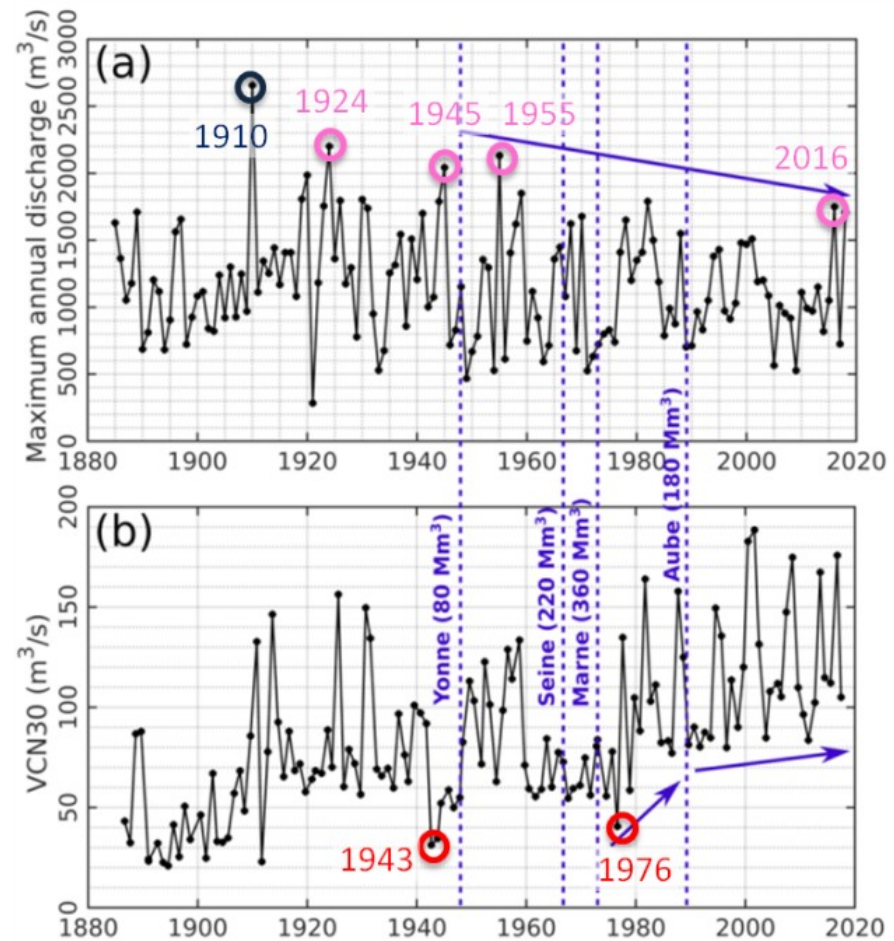


# ■ Un bassin sous pression

Prélèvements



Aménagements

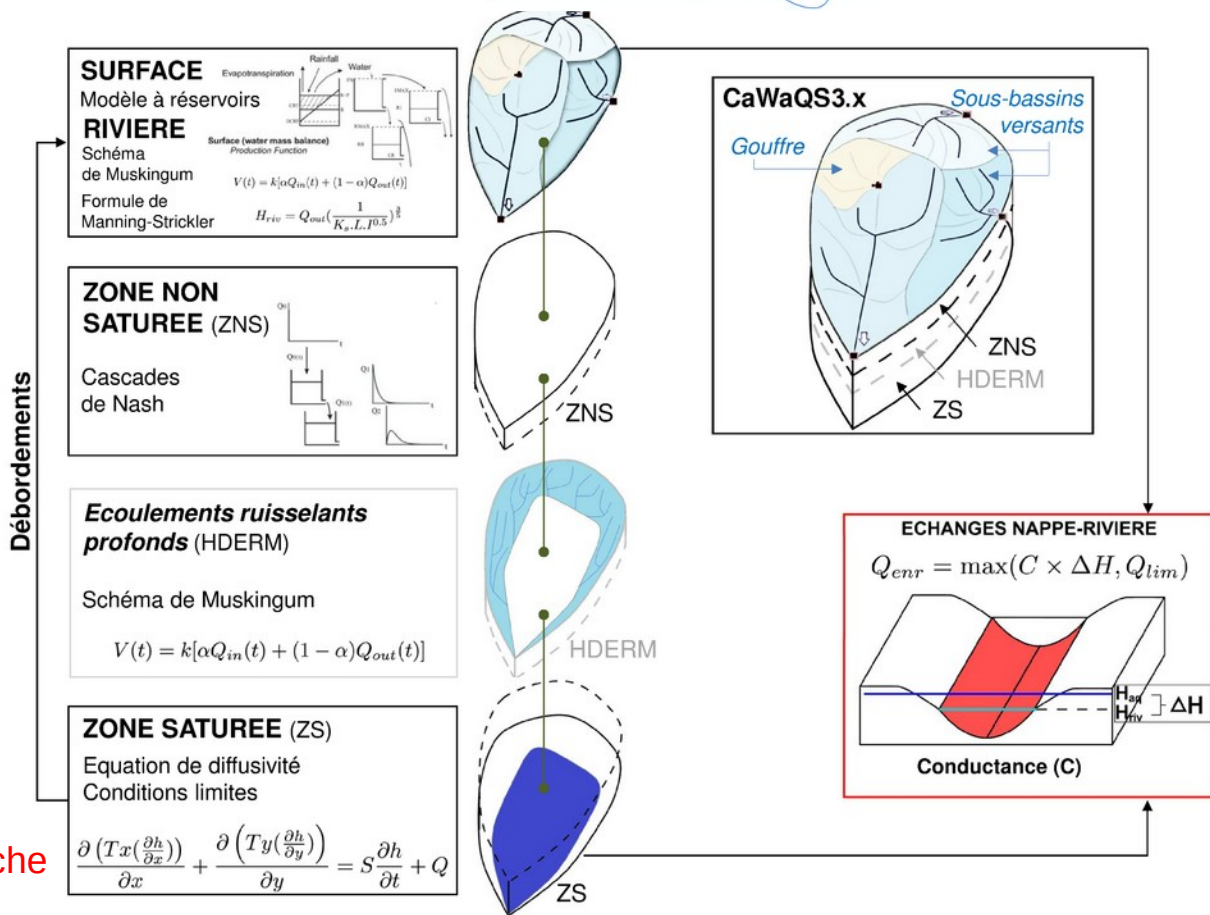


# ■ Modéliser le grand cycle de l'eau avec



- Modélisation **couplée, spatialement distribuée** des écoulements d'eau (**surface - souterrain**).
- Permet de reproduire, à l'échelle d'un bassin versant, le **débit dans réseau hydrographique** et **piézométrie dans le système aquifère (multicouche)** sous jacent
- Prise en compte de **l'anthropisation**
- Pas de temps de calcul **journalier**

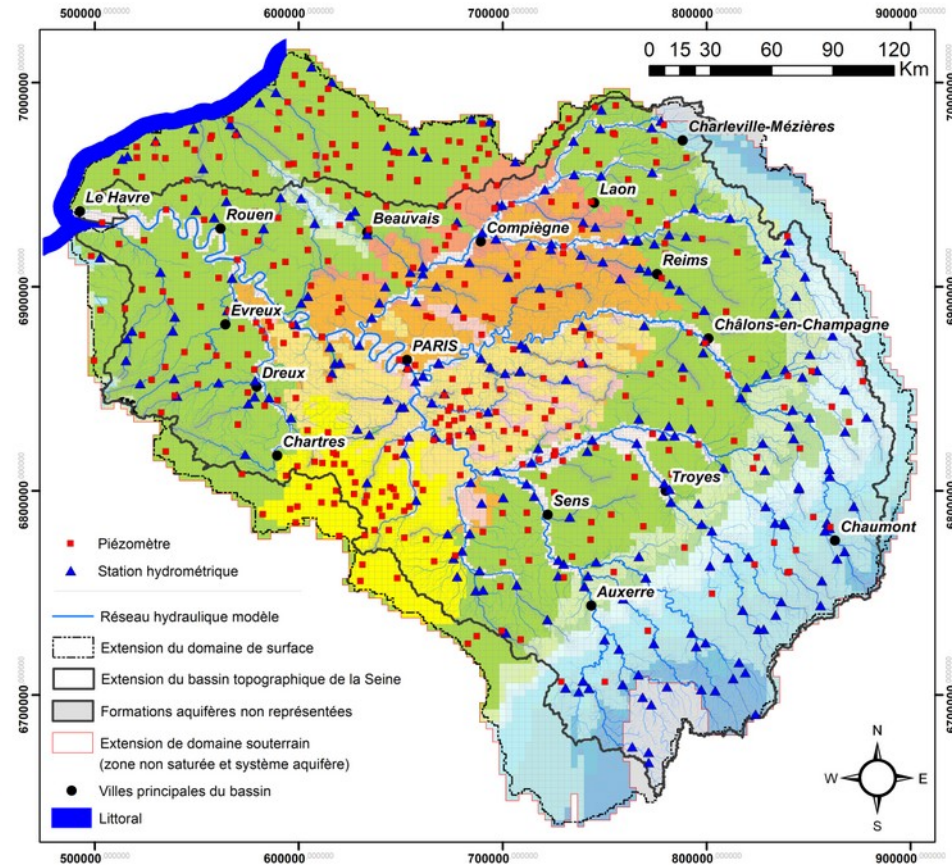
Multi-couche



# Le modèle CaWaQS-Seine en bref

## Premier modèle complet des principaux aquifères du bassin de la Seine :

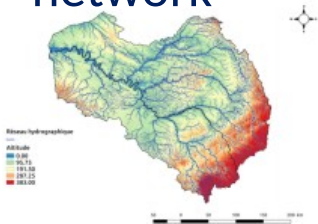
- 96 200 km<sup>2</sup> à l'affleurement
- 28 400 km de réseau hydrographique dont 6 830 explicitement couplés avec le système aquifère
- 20 horizons lithologiques
- Résolution variable (100m → 3200 m)
- 221 stations limnimétriques
- 269 piezomètres



[Gallois et al., 2021]

# De nombreuses données nécessaires

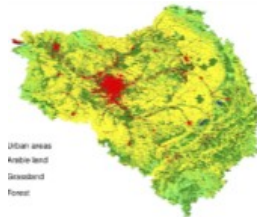
## DEM & stream network



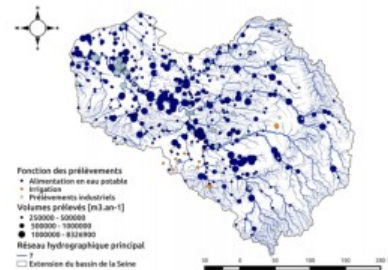
## Geology



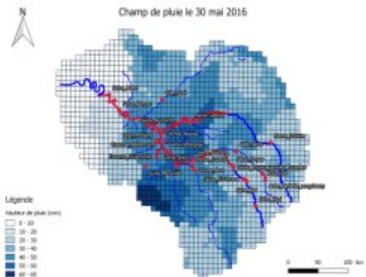
## Land use



## Withdrawals

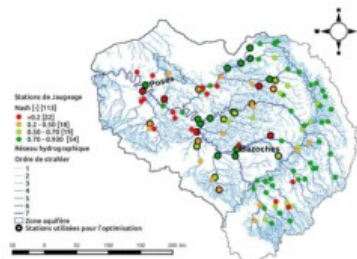


## Météo : Precipitation, PET

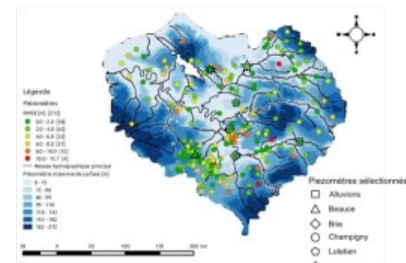


Daily time step

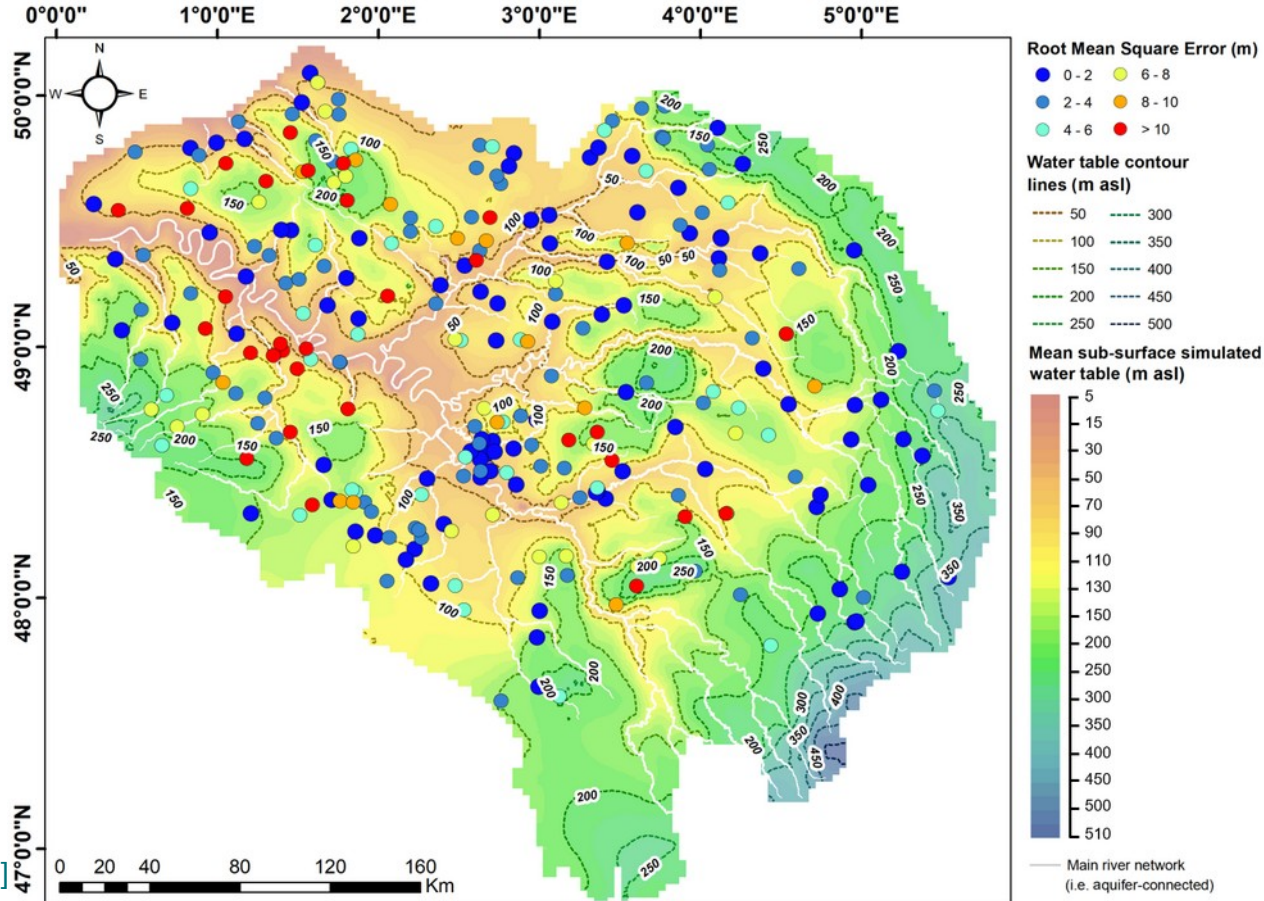
## Discharges



## Piezometers



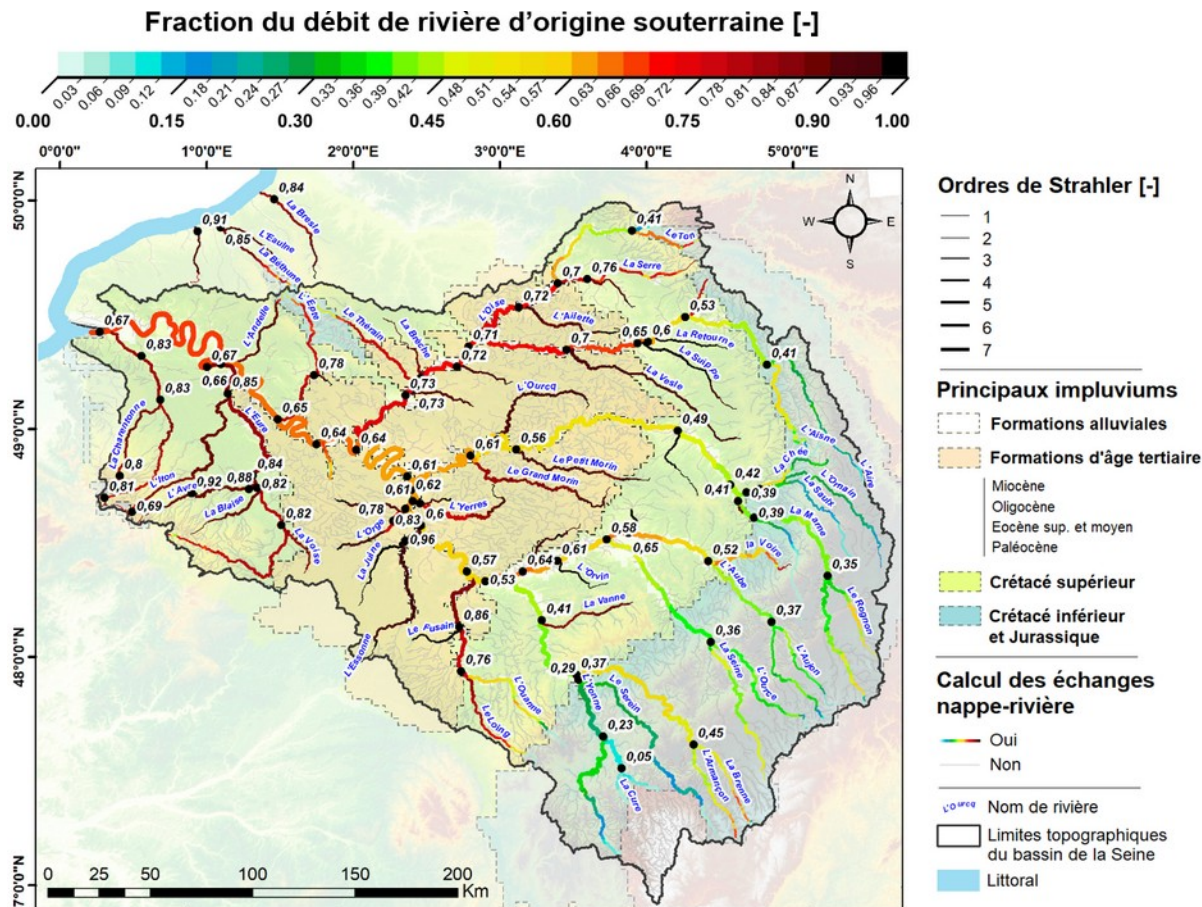
# ■ Carte piézométrique moyenne



[Flipo et al., subm]



# ■ Décomposition des débits des rivières (2003-2020)



[Flipo et al., subm]

# ■ Reconstitution des trajectoires

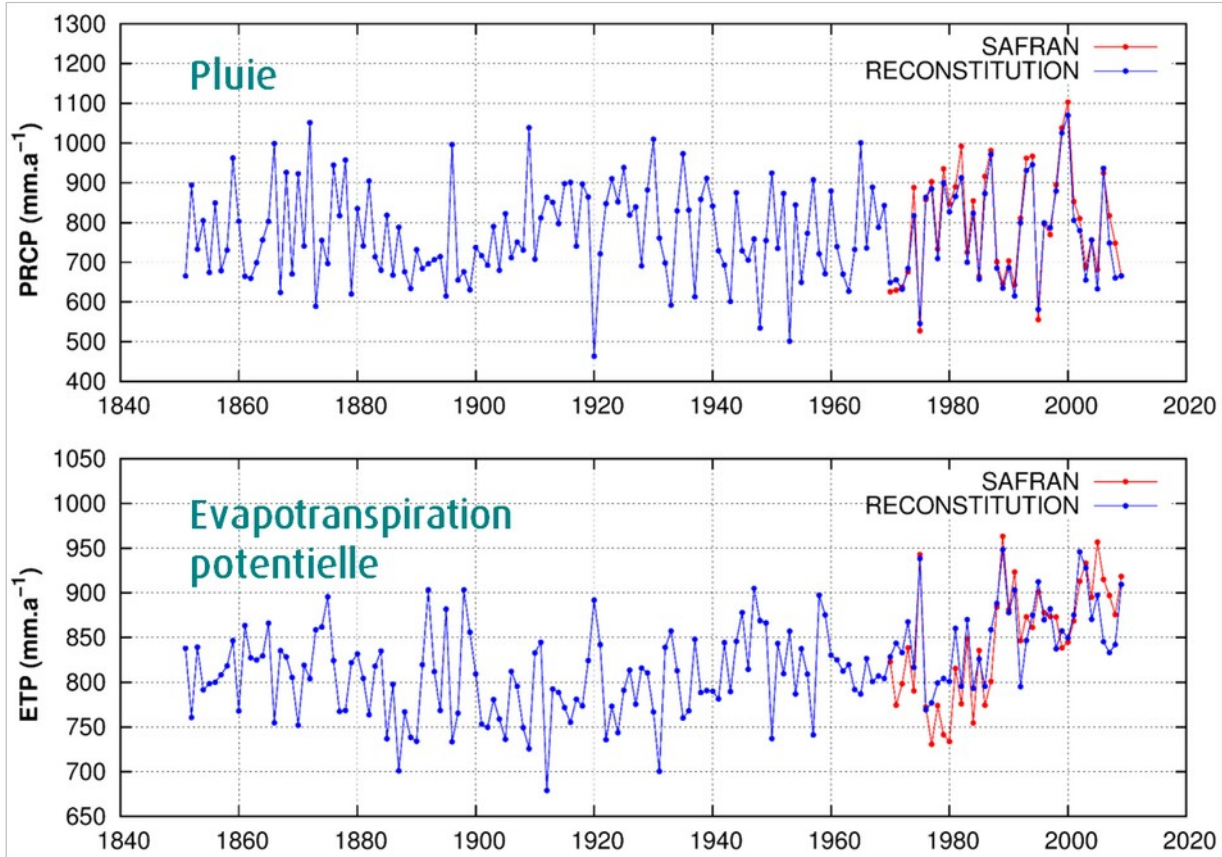
- Passées (début XXe s) et anticipées (fin XXIe s)
- Forçages climatiques
- L'occupation des sols
- Les usages de l'eau



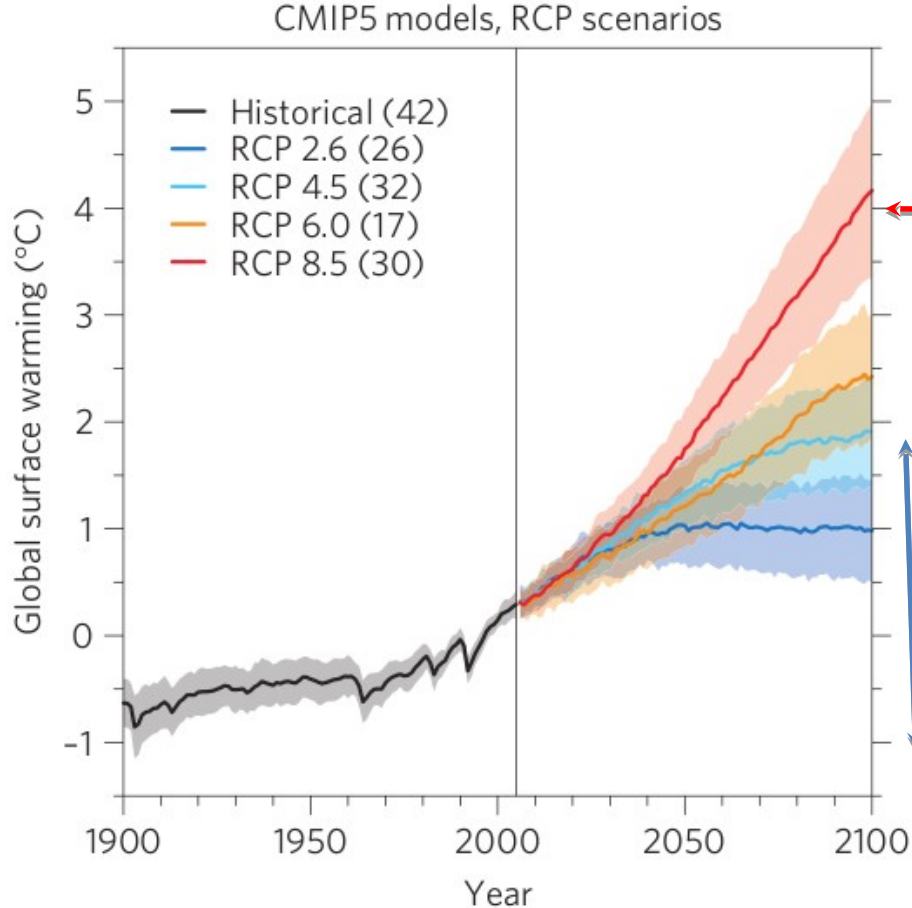
[https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F698\\_2019\\_392.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F698_2019_392.pdf)

# ■ Reconstitutions hydroclimatiques passées

[Bonnet, 2018]



# ■ Scénarios et réchauffement climatique



RCPXX: différents scénarios d'émissions menant à une énergie supplémentaire exprimée en  $W/m^2$

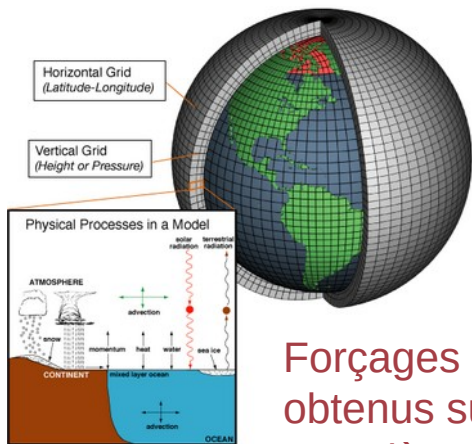
«High-end business-as-usual»  
+5°C

Proche des objectifs des Accords de Paris 2015

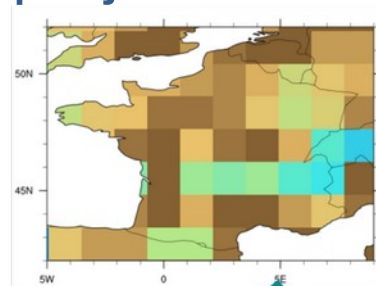
+3°C

Moyennes multi-modèles et intervalles d'incertitudes (Réf: 1986-2005)

# ■ Un modèle sélectionné pour les projections



Forçages hydrometeorologiques obtenus sur des grilles grossières par GCM (Modèles de circulation générale)

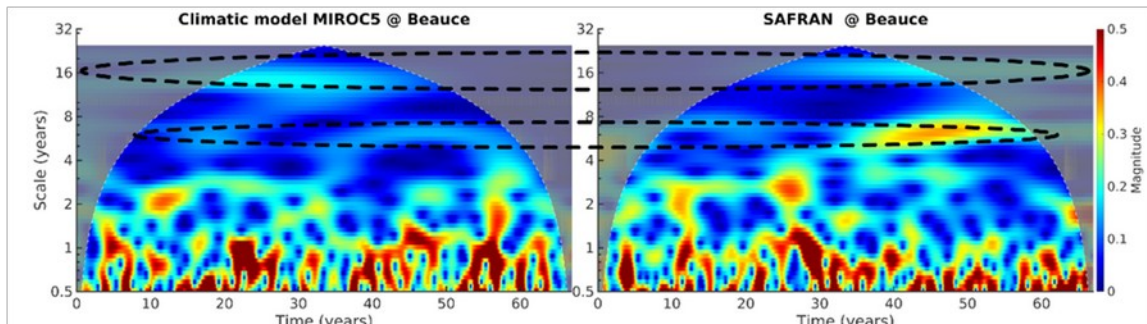
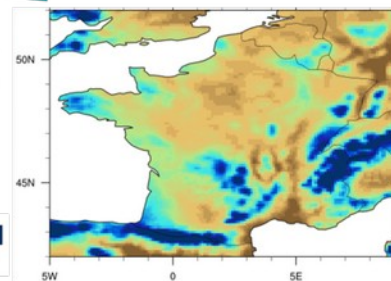
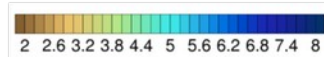


Mis à l'échelle des territoires par régionalisation

Régionalisation

Scénario régionalisé  
Résolution ≈ 10 km

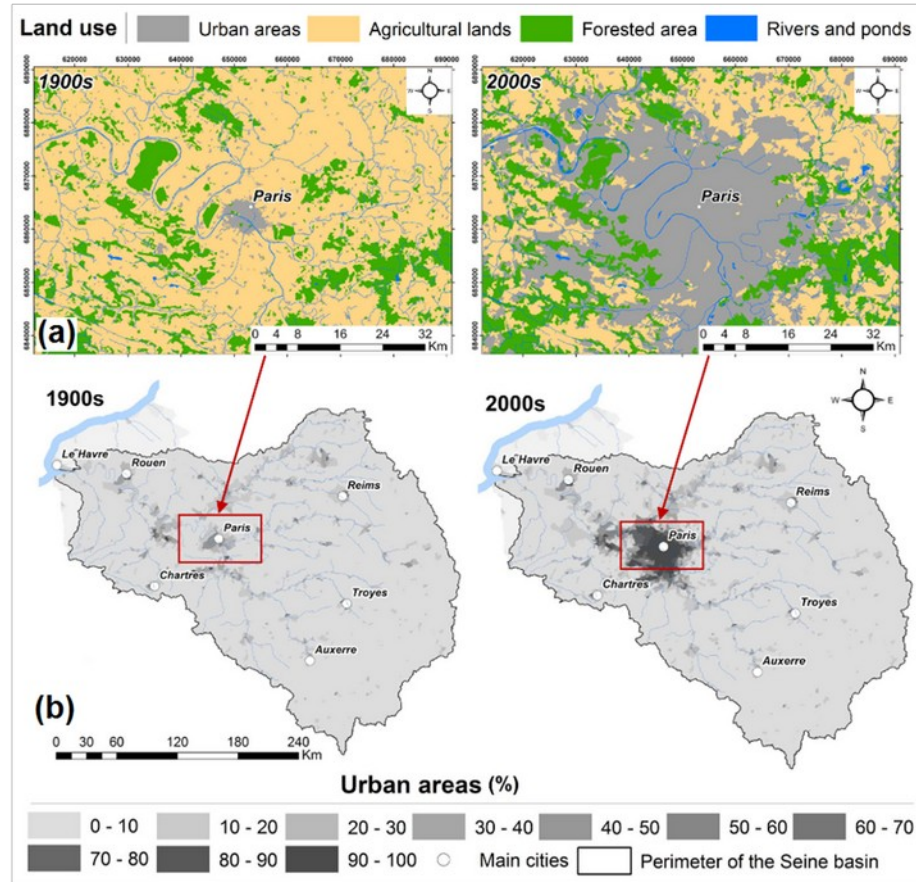
Précipitations moyennes hiver (mm/jour) 1971-2000



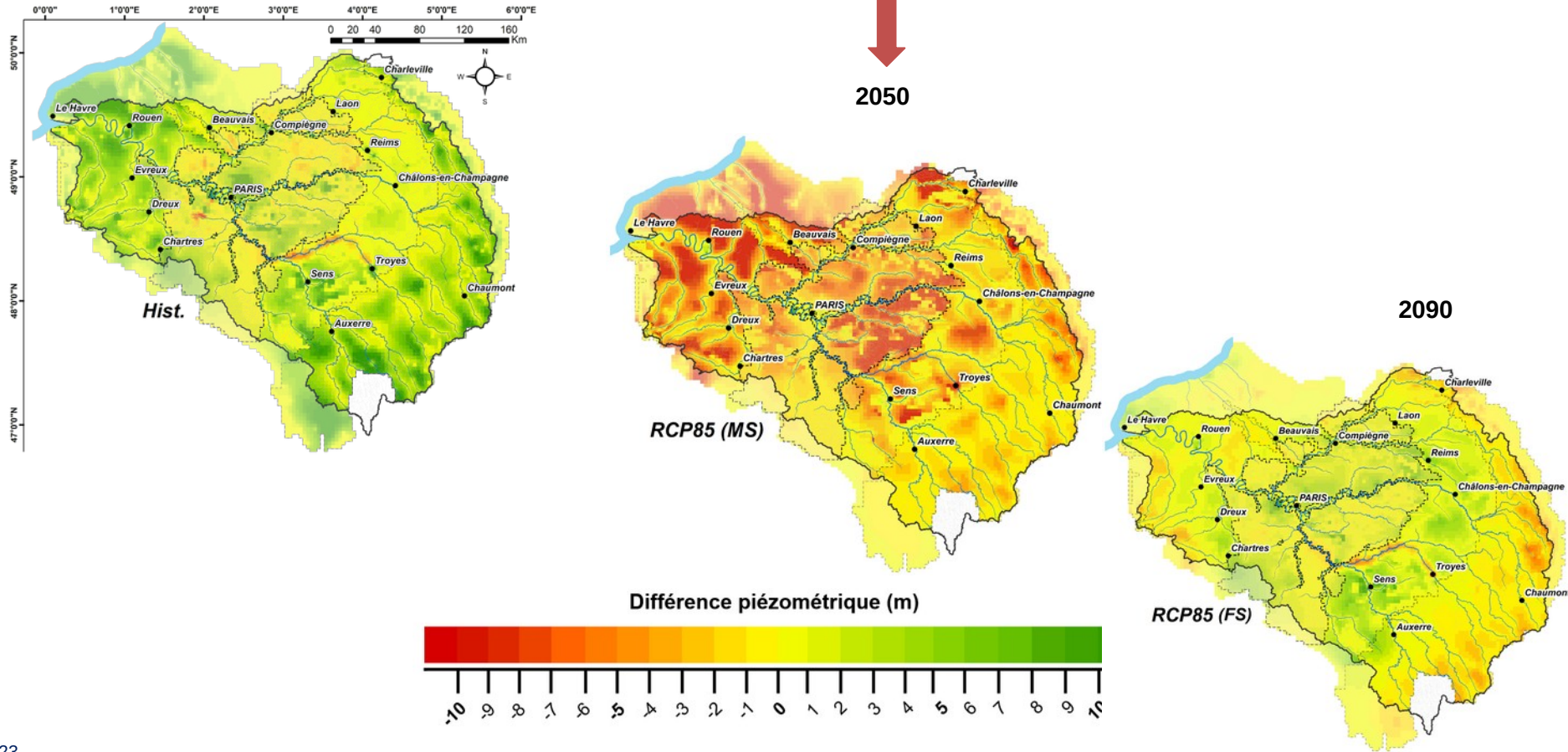
Sélectionné sur les signaux basse fréquence

# ■ Reconstitution de l'occupation du sol

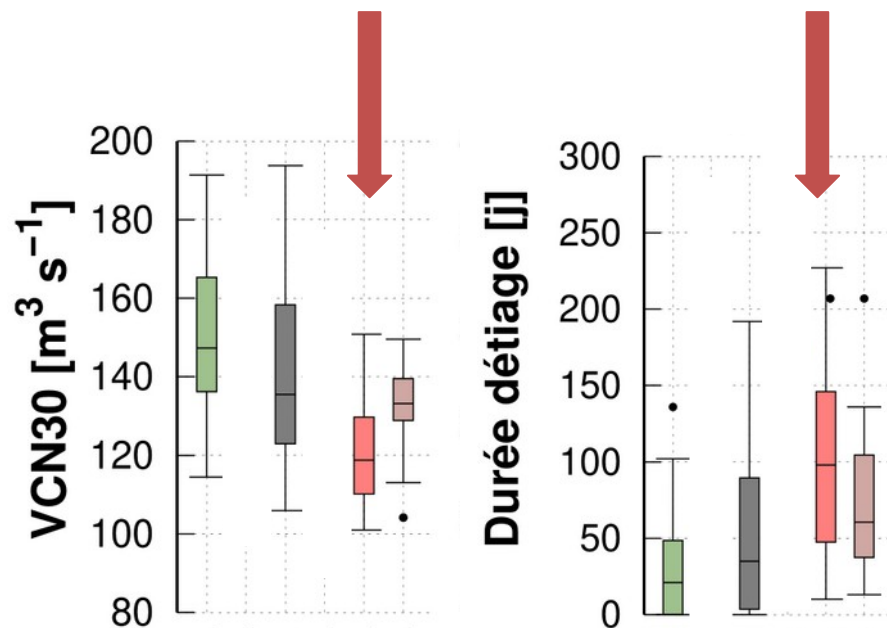
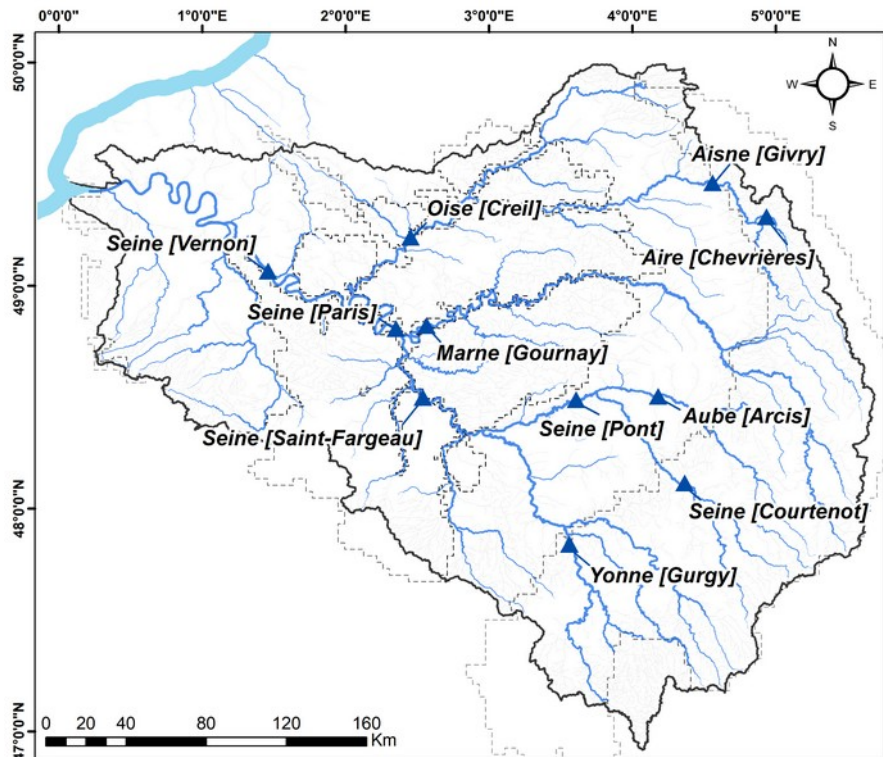
- Zones urbaines :  
recensement INSEE (1901 et 2009)  
Relation surface, densité population  
Données spatialisées locales IAU
- Zones forestières :  
Statistiques agricoles AGRESTE  
Implémentations au détriment des surfaces agricoles



# ■ Une crise de l'eau à mi siècle



# Impact sur le débit d'étiage à Paris Austerlitz



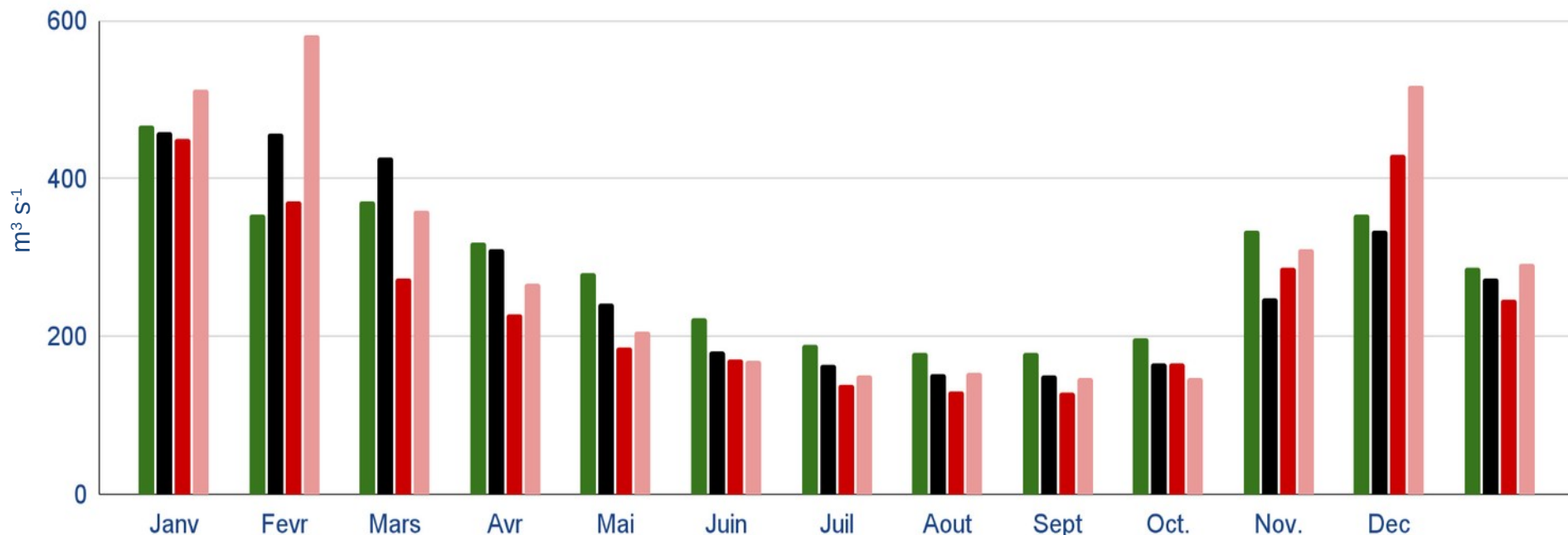
■ Début XXème 1917-1934 ■ Fin XXème 1993-2010 ■ mi XXIème 8.5 2038-2055 ■ Fin XXIème 2083-2100



# ■ Régime hydrologique du bassin en sévère évolution

## Régime hydrologique Paris Austerlitz

■ Début XXème 1917-1934 ■ Fin XXème 1993-2010 ■ mi XXIème 8.5 2038-2055 ■ Fin XXIème 2083-2100



## ■ Conclusions

- L'influence de l'homme sur le climat est certaine, conduisant à l'augmentation de la température moyenne de surface
- Qui engendrera
  - une augmentation des précipitations moyennes et extrêmes aux hautes latitudes
  - des stress hydriques importants menant à différents types de sécheresses hydrologiques,
  - la nécessité d'adapter la gestion de l'eau
- Des changements de pratiques sont indispensables pour limiter le réchauffement qui génèrera des crises successives plus ou moins rapides
- L'ensemble de ces éléments sont simulés à l'échelle régionale du bassin de la Seine → le Nexus eau-énergie-nourriture est à repenser
- A venir estimation des flux de chaleur dans le bassin de la Seine
  - Thèse de Deniz Killiç, **30 septembre 2022**, Mines Paris