

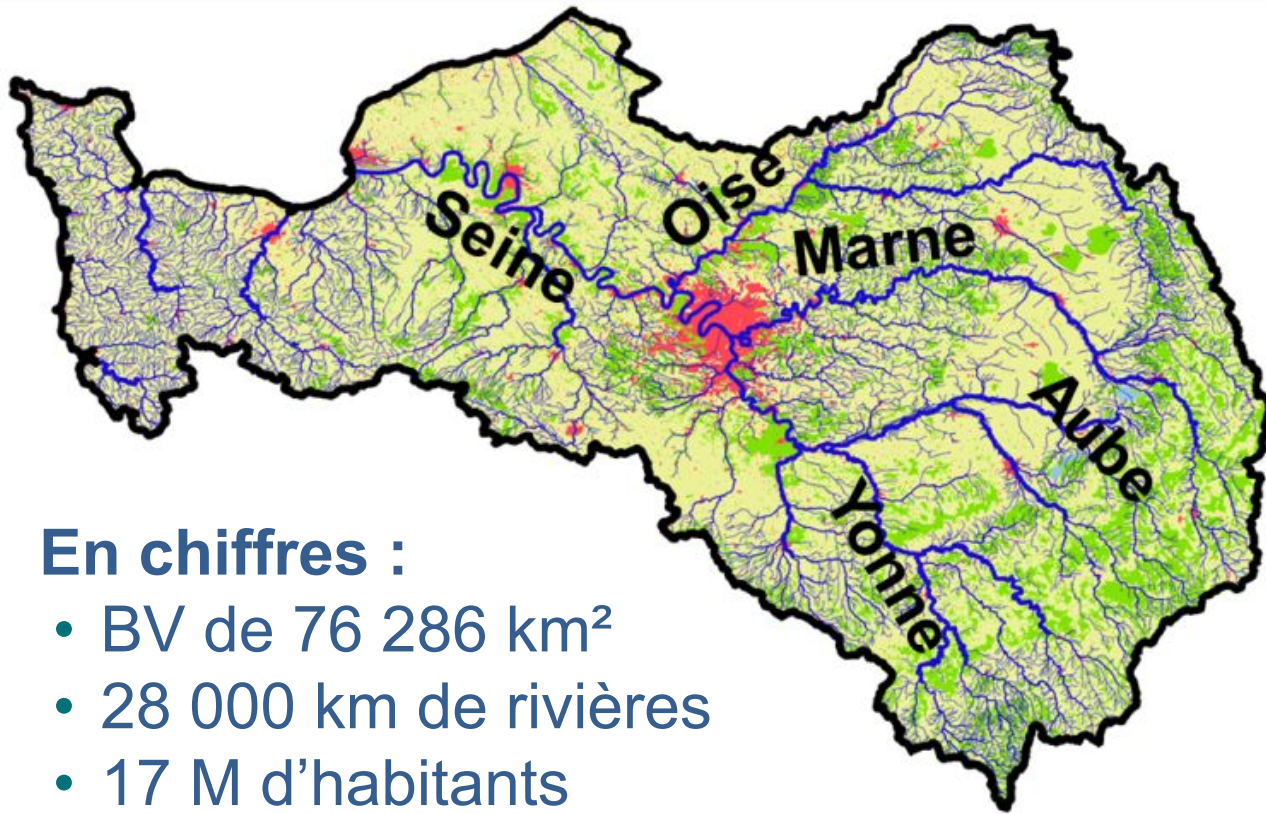
Impacts du changement climatique sur le bassin de la Seine

Nicolas Flipo

Centre de Géosciences, Mines Paris – PSL

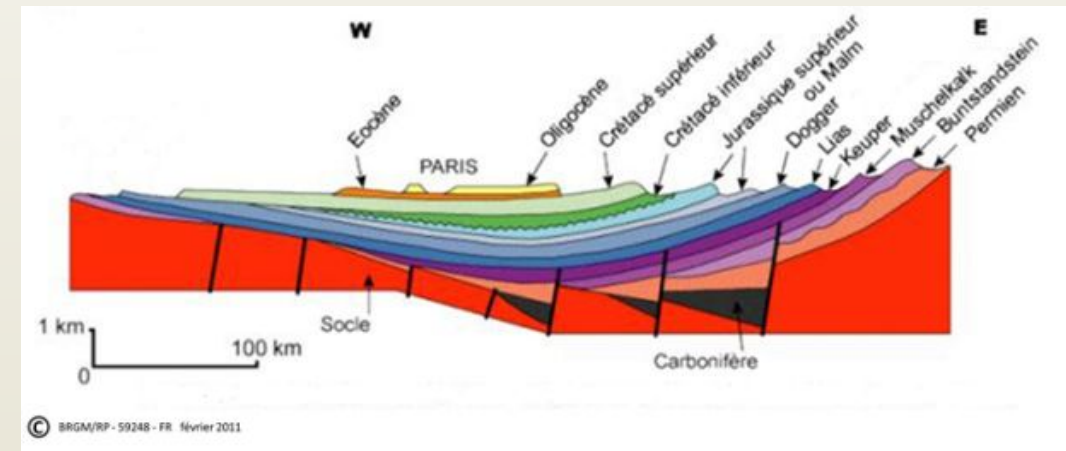
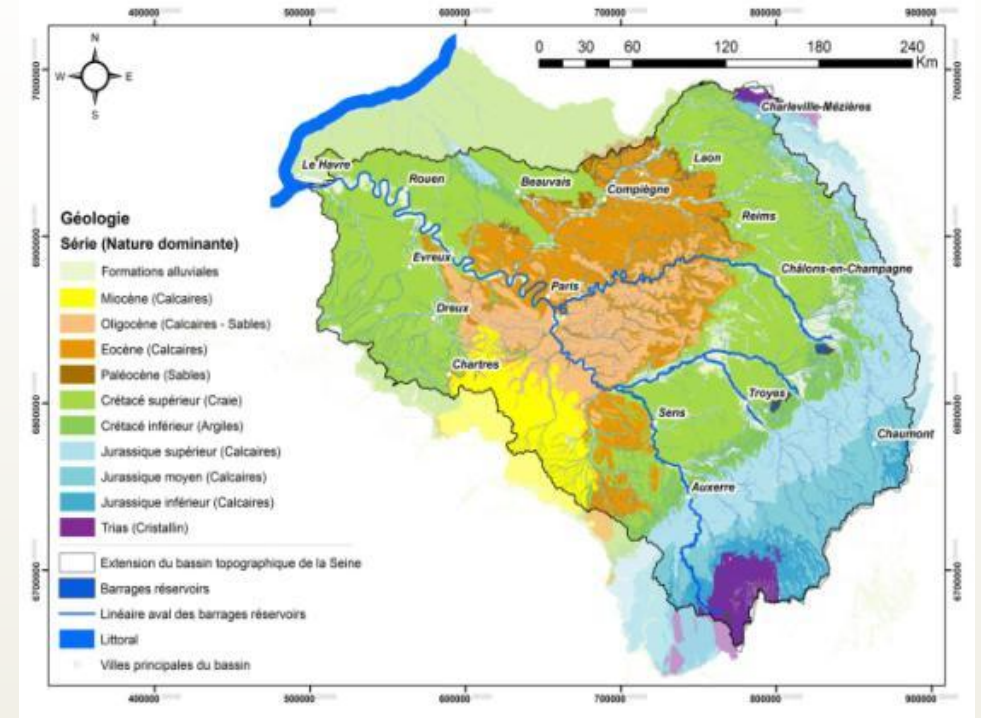
Remerciements : N. Gallois, J. Boé, D. Kiliç, M-L. Merg, A. Rivière, S. Wang, C. le Pichon, A. Ducharne, P. Peylin

Le bassin de la Seine

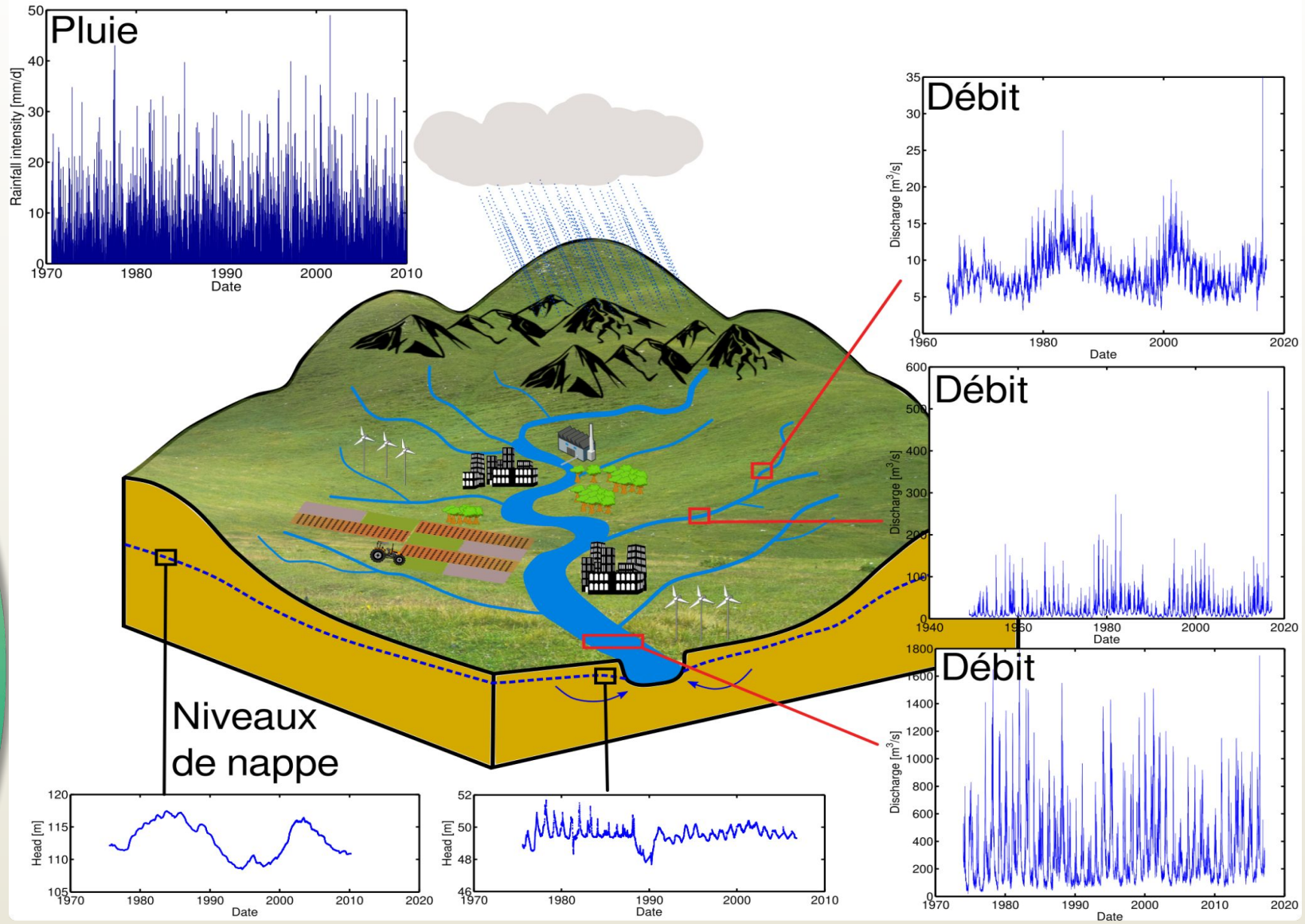


En chiffres :

- BV de 76 286 km²
- 28 000 km de rivières
- 17 M d'habitants
- Premier réservoir d'eau souterraine d'Europe
- des barrages réservoirs (840 10⁶ m³)
- 3 Md m³ prélevés par an



Un bassin, une machine à transformer la pluie



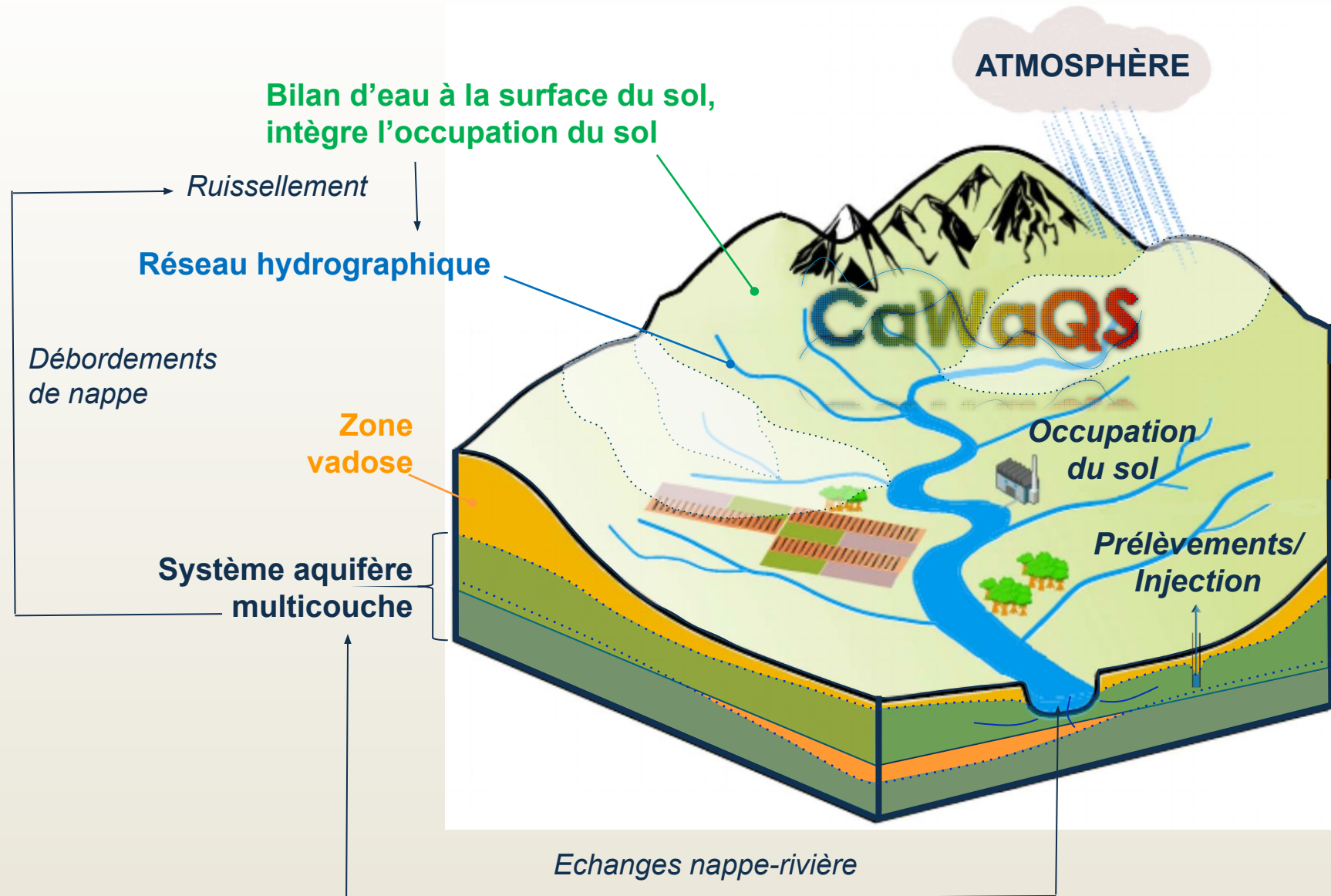
Qui transforme le signal de pluie en signaux de débit et de niveaux d'eau en aquifère (piézométrie)

Cette modulation est spatialisée en fonction des propriétés physiques des territoires

Le modèle hydrologique CaWaQS

<https://gitlab.com/cawaqs/cawaqs>

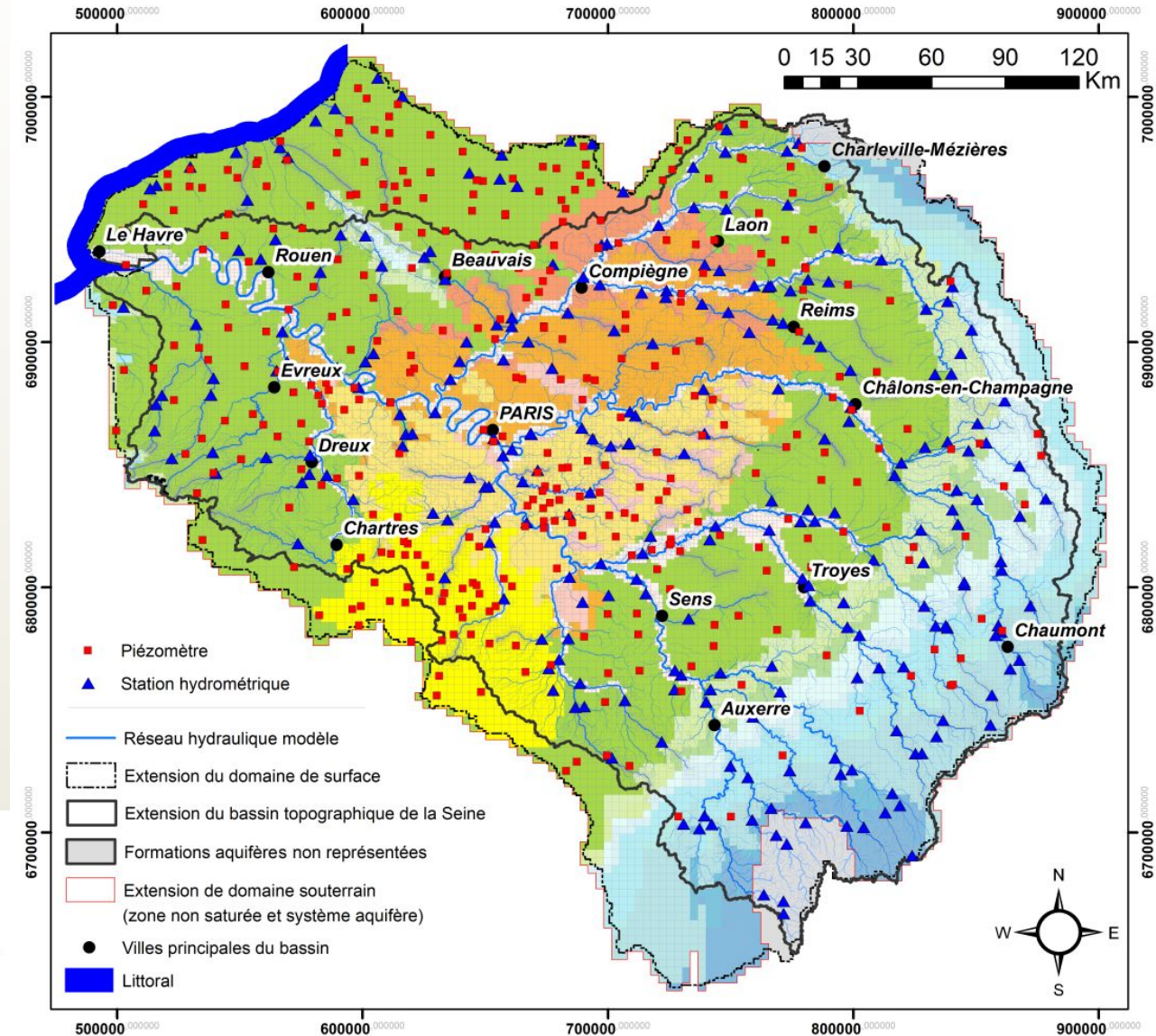
- **Représentation mathématique** des processus physiques
- **Modélisation** couplée, distribuée dans l'espace (200 m-3.2 km) et le temps (jours) des écoulements et des stocks d'eau (surface – souterrain)
- **Simulation des débits** en rivière, sources et piézométrie (niveau d'eau dans le sous-sol)
- **Prise en compte de l'anthropisation** (pompages sout/surf, gravières, barrages-réservoirs)



Un modèle CaWaQS-Seine étendu

Premier modèle complet des principaux aquifères du bassin de la Seine¹ :

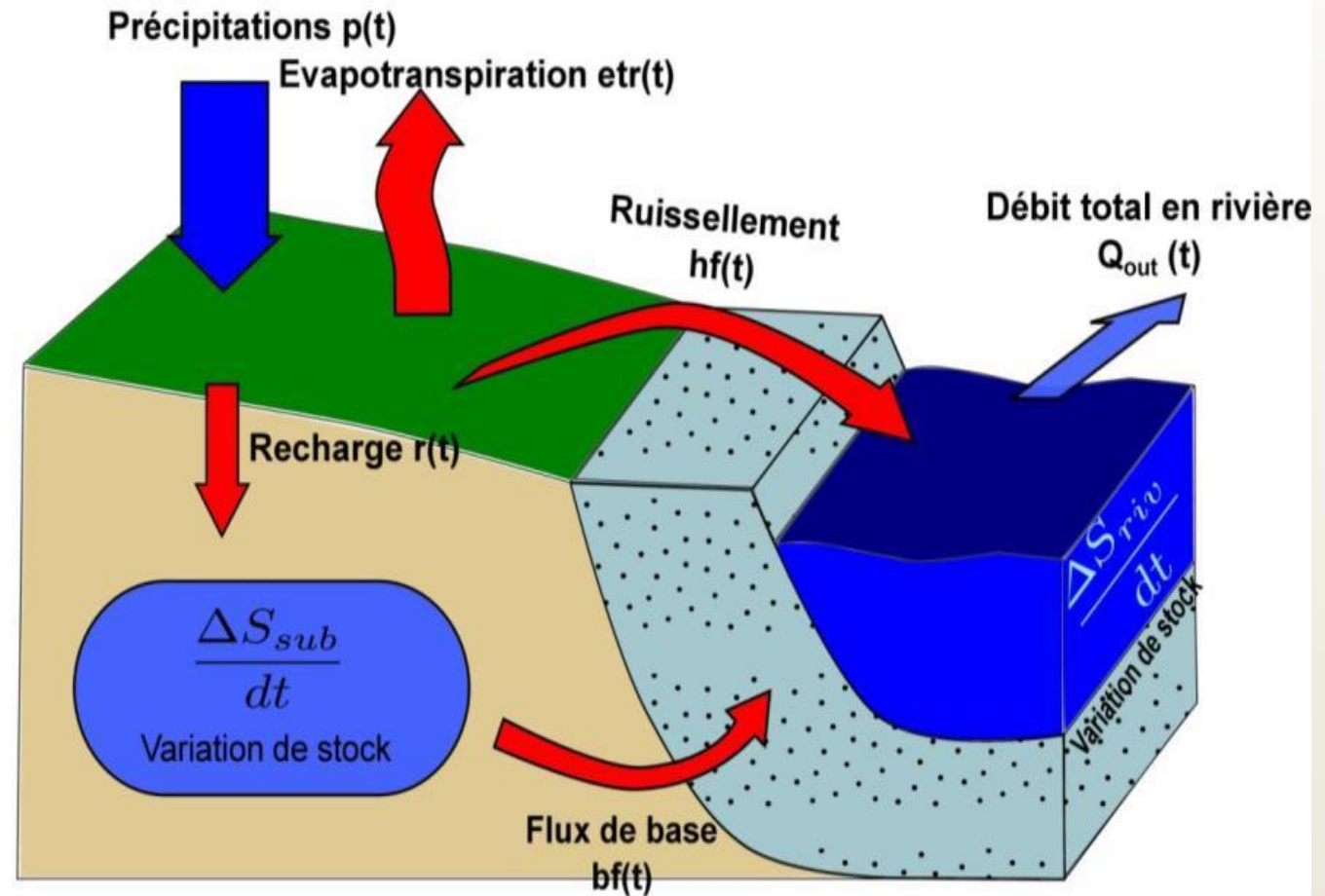
- ✓ 96 200 km² à l'affleurement
- ✓ 28 400 km de réseau hydrographique dont 6 830 explicitement couplés avec le système aquifère
- ✓ 20 horizons lithologiques
- ✓ Résolution variable (100 m □ 3200 m)
- ✓ 221 stations hydrométriques
- ✓ 269 piézomètres



¹ Modèle développé dans le cadre du projet AQUIVAR+ qui bénéficie du soutien financier de l'AESN

Un modèle qui représente les flux internes

- Développement méthodologique majeur permettant d'estimer les **flux internes** au systèmes alors même qu'ils **ne sont pas observés**.
- Le modèle **CaWaQS** est le **seul modèle hydrologique** garantissant une reproduction des flux internes spatialisés compatibles avec les longues séries de données hydrologiques.



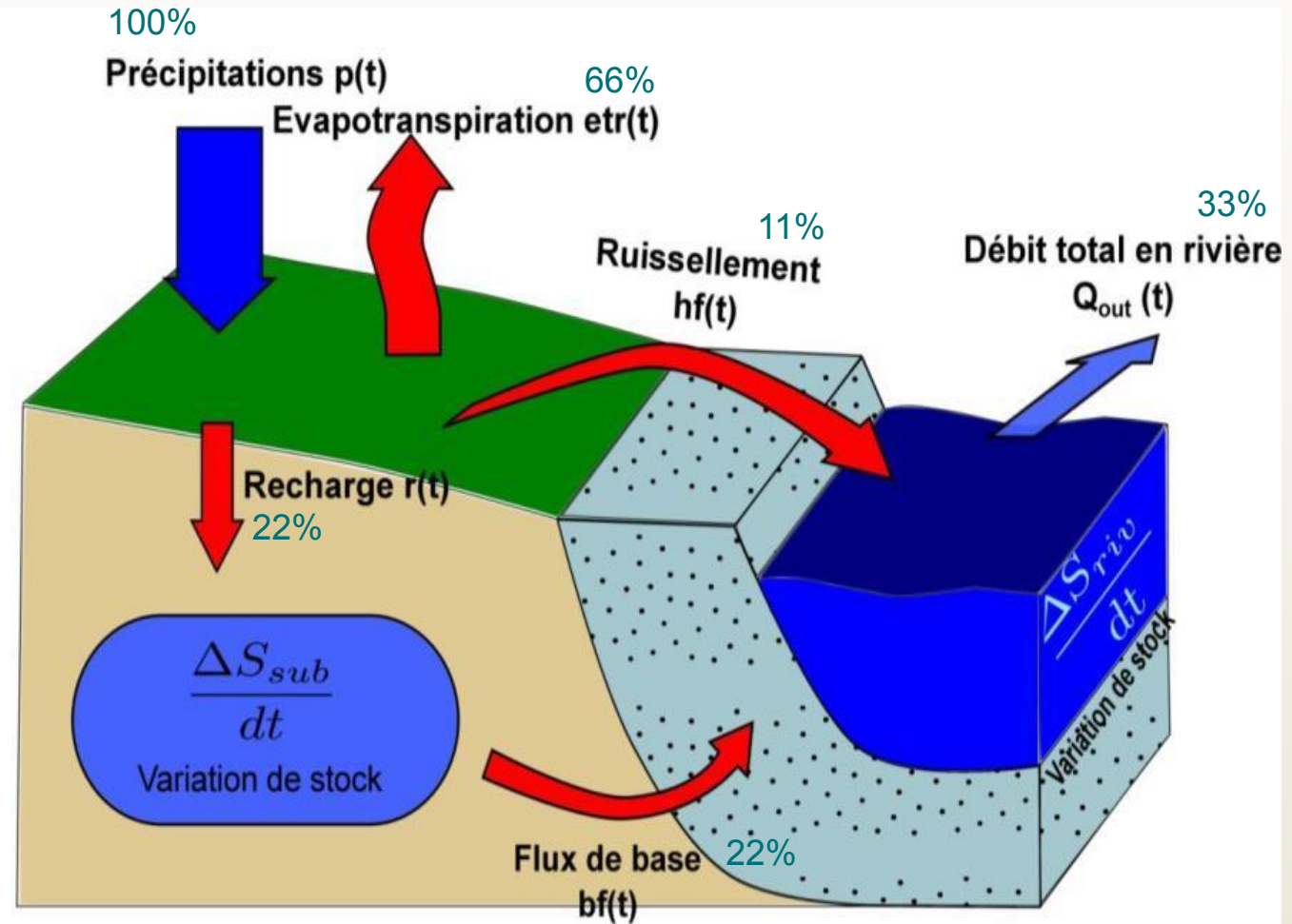
Bilan hydrologique de référence 2003-2020

Évapotranspiration réelle = $\frac{3}{4}$ pluie

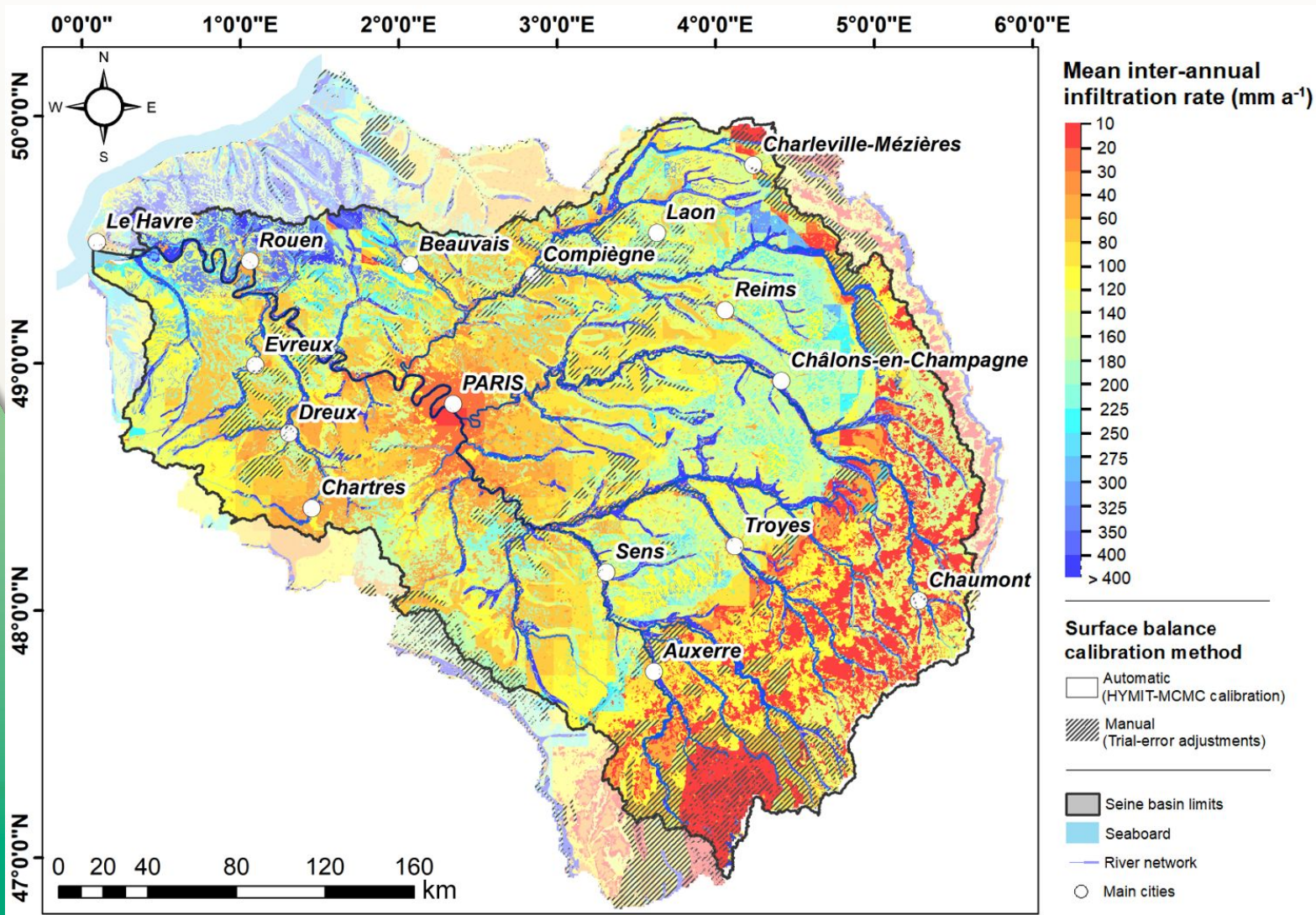
Ruissellement rapide = $\frac{1}{3}$ pluie efficace ($\frac{1}{12}$ pluie)

Recharge système aquifère = $\frac{2}{3}$ pluie efficace ($\frac{1}{6}$ pluie)

La Seine en aval du bassin est alimentée à hauteur de $\frac{2}{3}$ de son débit par les eaux souterraines



Recharge spatialisée du système aquifère (2003-2020)



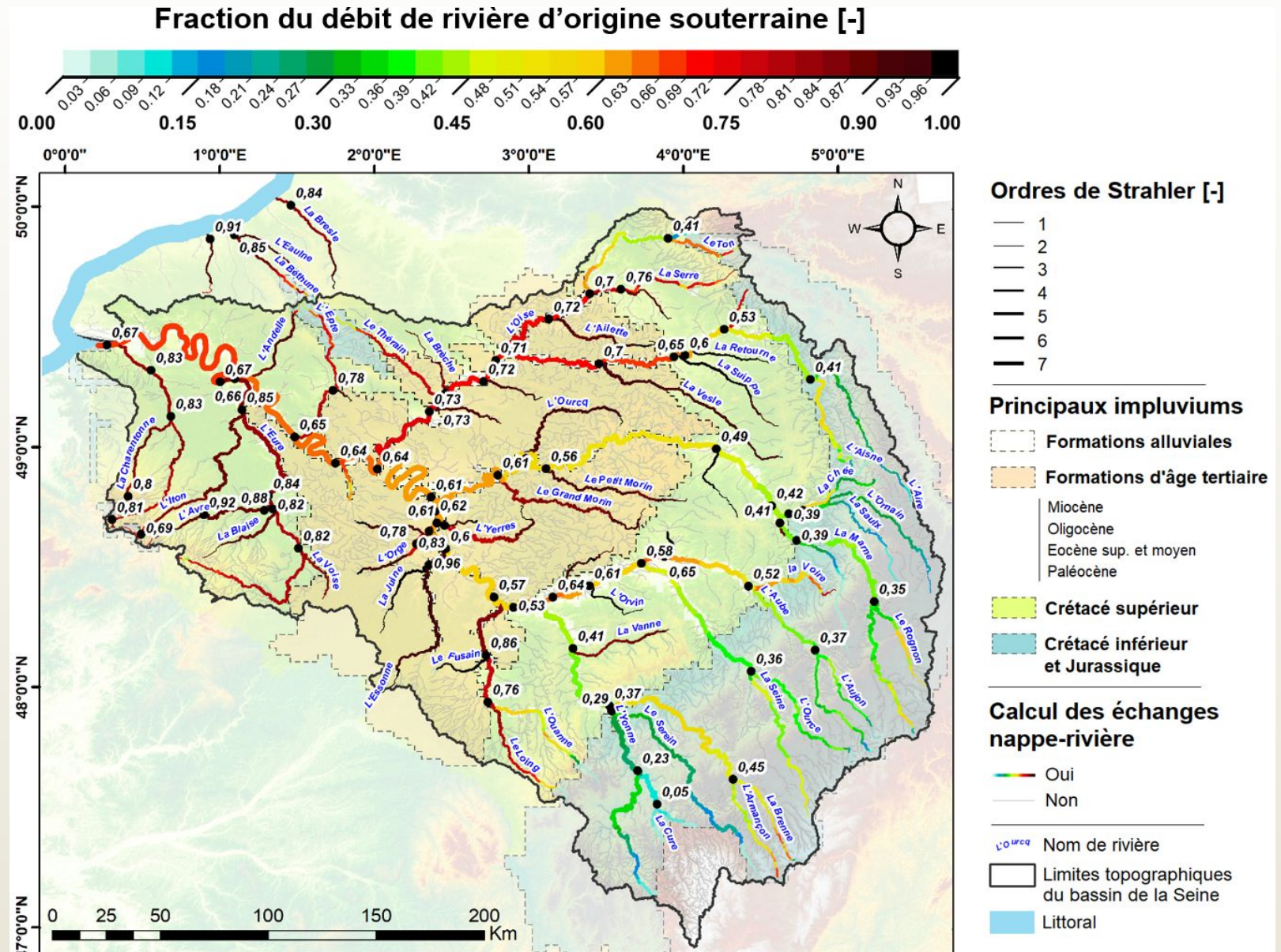
- **Très faible recharge en milieu urbain, et dans la frange orientale sur versants pentus.**
- **Recharge significative sur la Craie à l'affleurement.**
- **Plus modeste sur l'auréole tertiaire centrale.**
- **Très abondante sur la côte.**
- **Seine-et-Marne ~ 70 mm a⁻¹**

Décomposition des débits des rivières (2003-2020)

A l'exutoire, $\frac{2}{3}$ de l'eau provient du système aquifère

Contribution des eaux souterraines au débit des rivières augmente d'amont en aval depuis la frange orientale du bassin

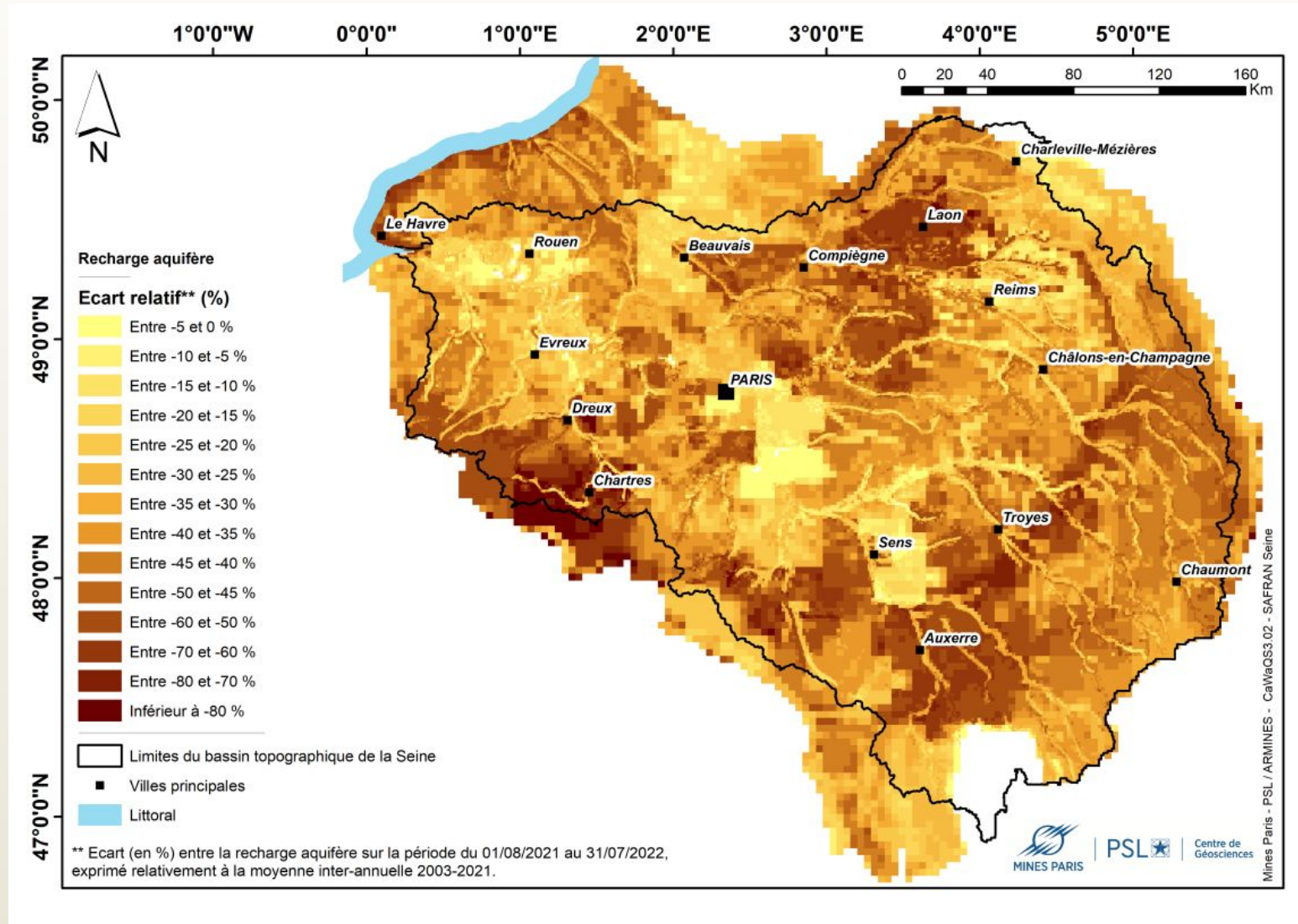
Les rivières en contact avec les formations tertiaires sont principalement alimentées par les eaux souterraines



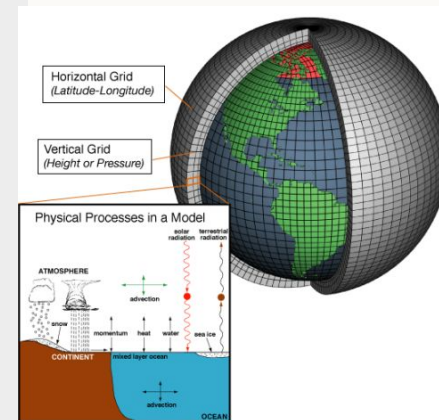
Une expression actuelle du changement climatique

Un déficit drastique de la recharge des eaux souterraines

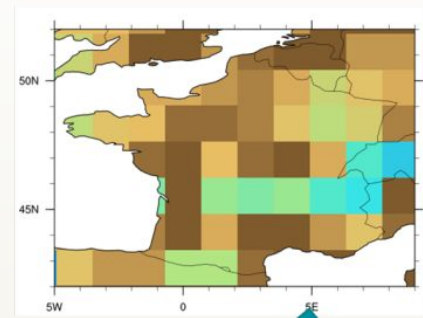
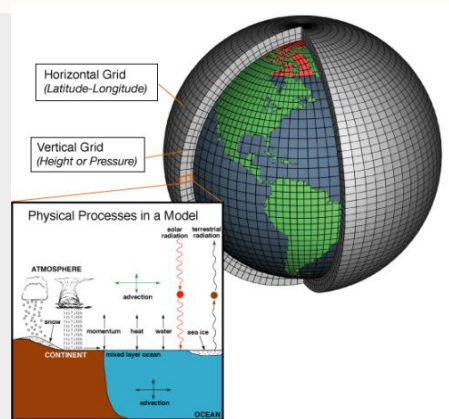
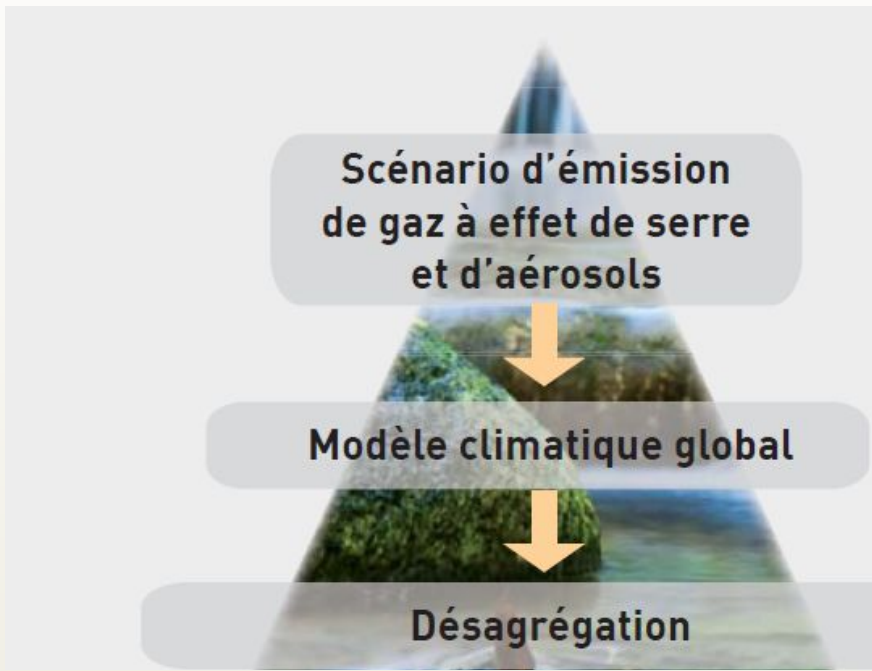
Diminution de la recharge 2021-2022 par rapport à la référence



Evaluation des impacts du Changement climatique sur le fonctionnement du bassin

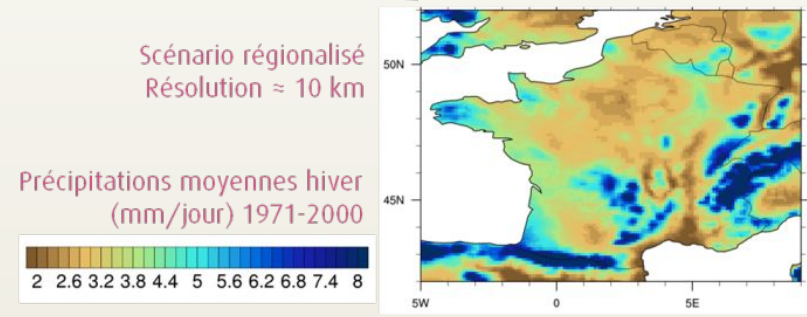


Evaluation des impacts du Changement climatique sur le fonctionnement du bassin

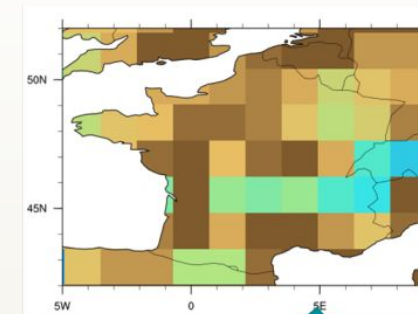
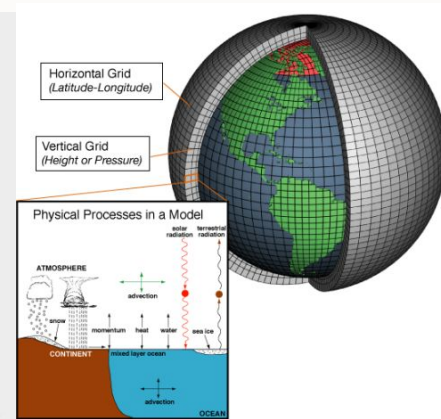
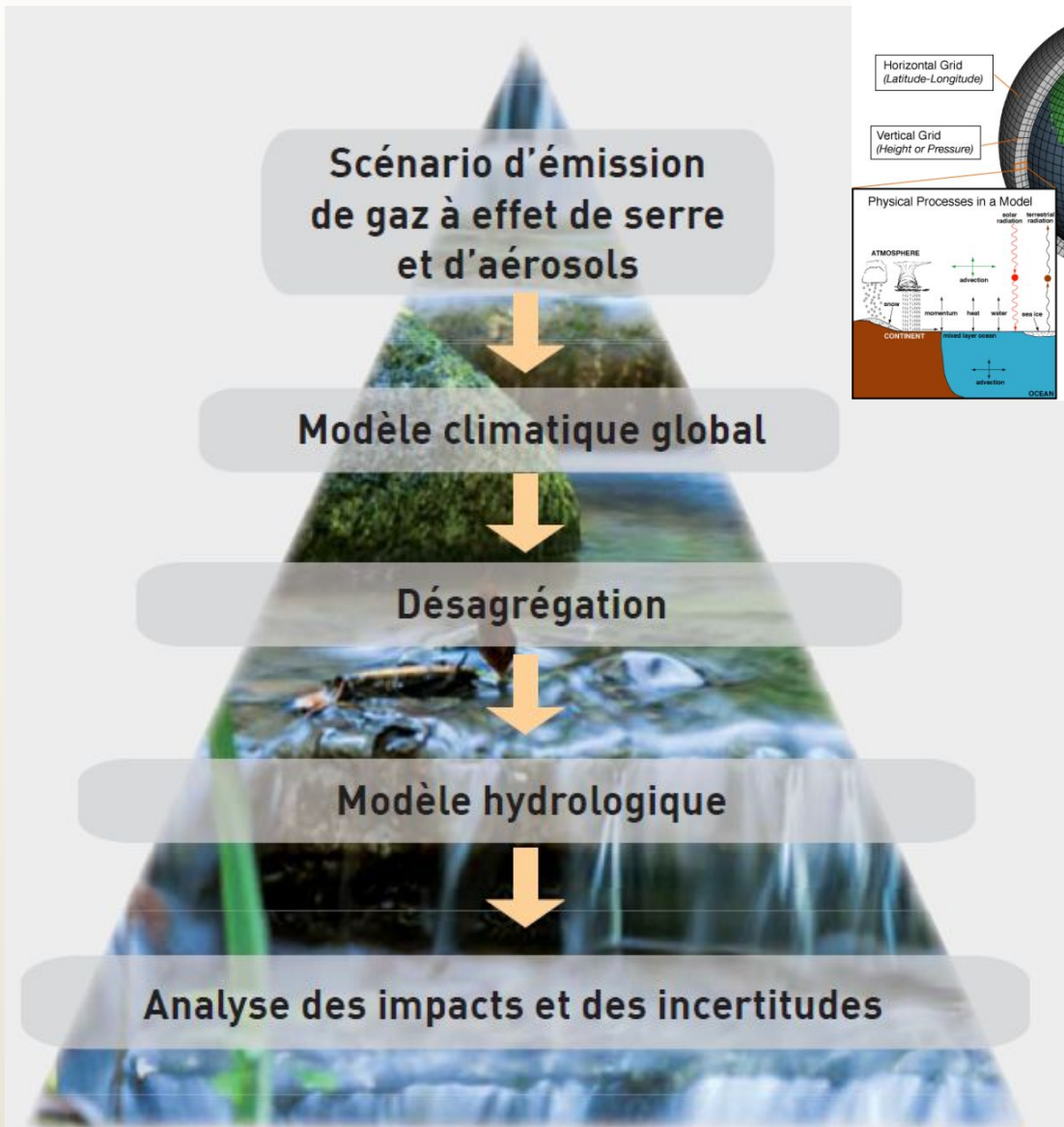


Projection climatique globale sélectionnée
Résolution ≈ 150 km

Régionalisation

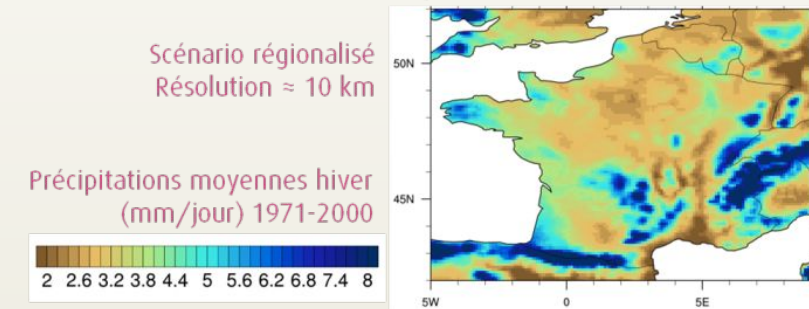


Evaluation des impacts du Changement climatique sur le fonctionnement du bassin



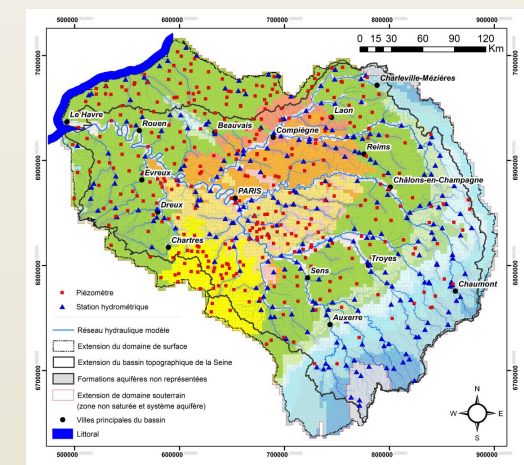
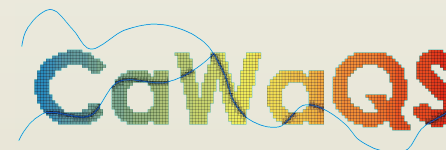
Projection climatique globale sélectionnée
Résolution ≈ 150 km

Régionalisation



Scénario régionalisé
Résolution ≈ 10 km

Précipitations moyennes hiver (mm/jour) 1971-2000



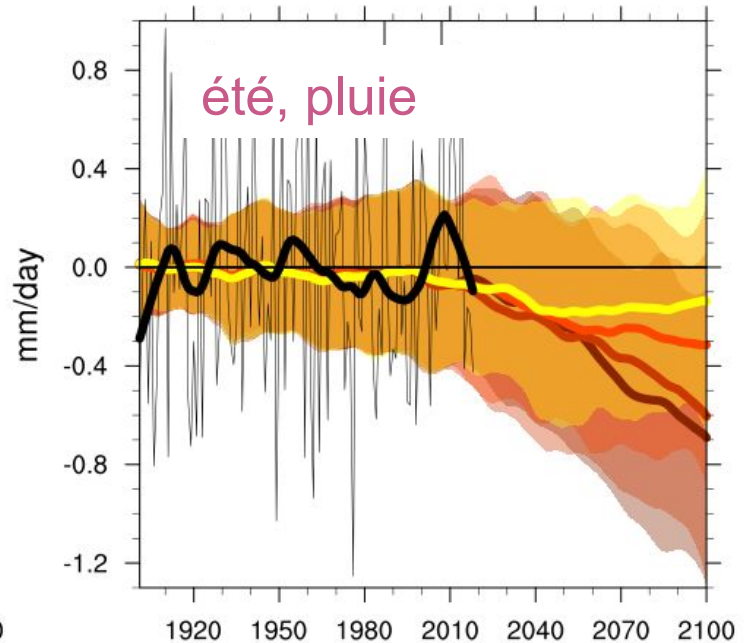
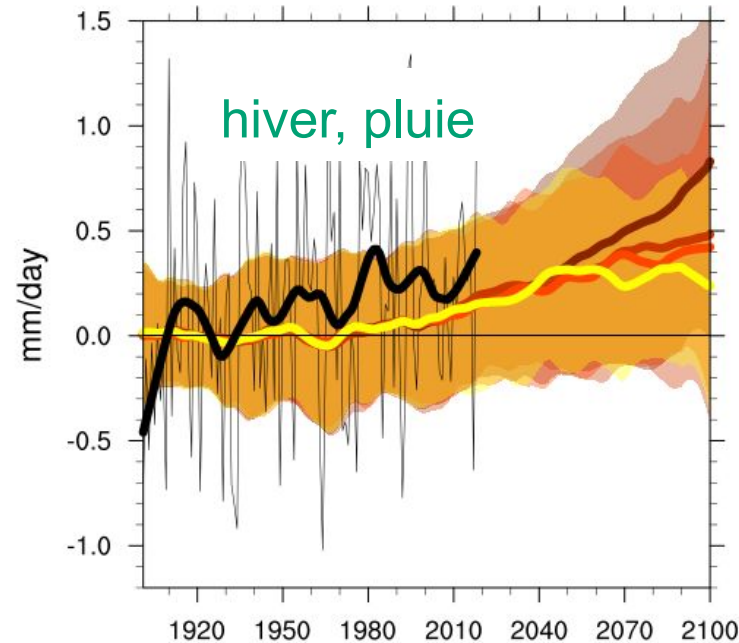
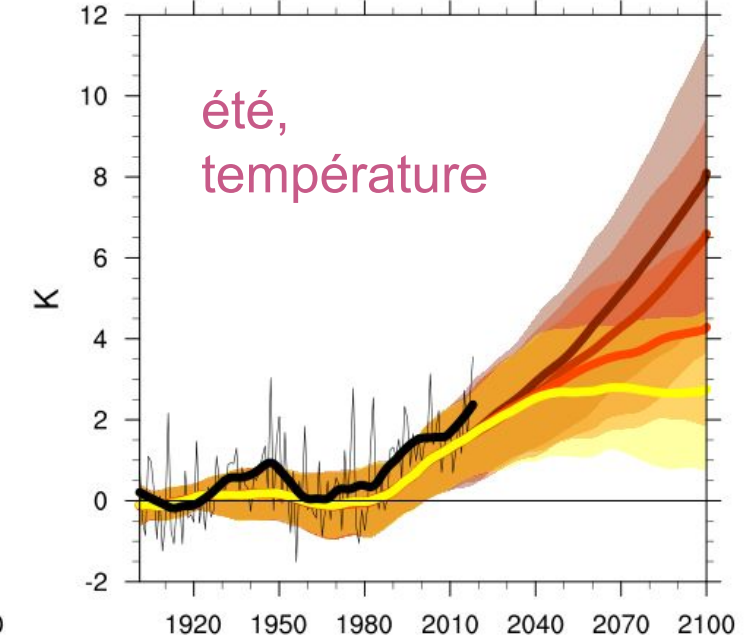
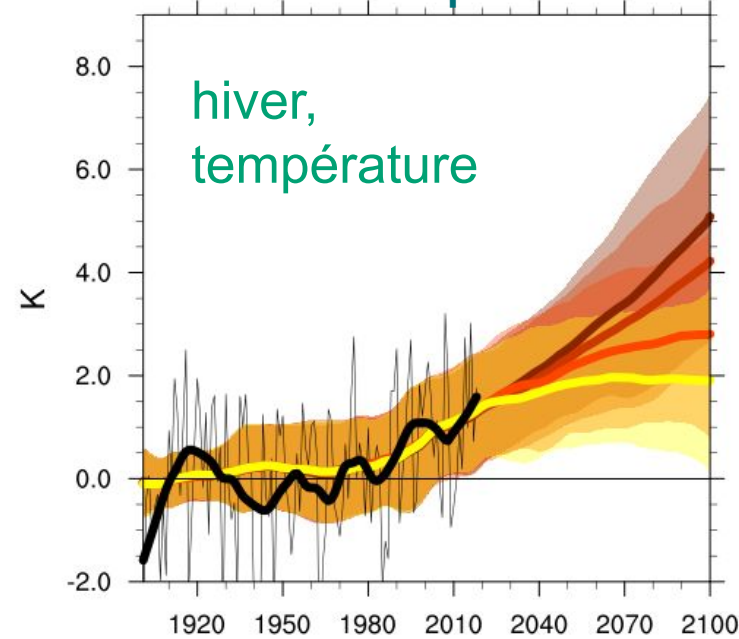
Les impacts hydroclimatiques du changement climatique en Seine

GIEC → évaluation de 5 scénarios sociotechniques : soutenabilité, milieu du chemin, rivalités régionales, inégalités, développement basé sur énergies fossiles

Ces scénarios mènent à une augmentation de l'énergie disponible à la surface du globe

Nous en avons sélectionné 3 : **“Paris”**, **“probable”**, **“pétrole”**

période de référence 1902-1931

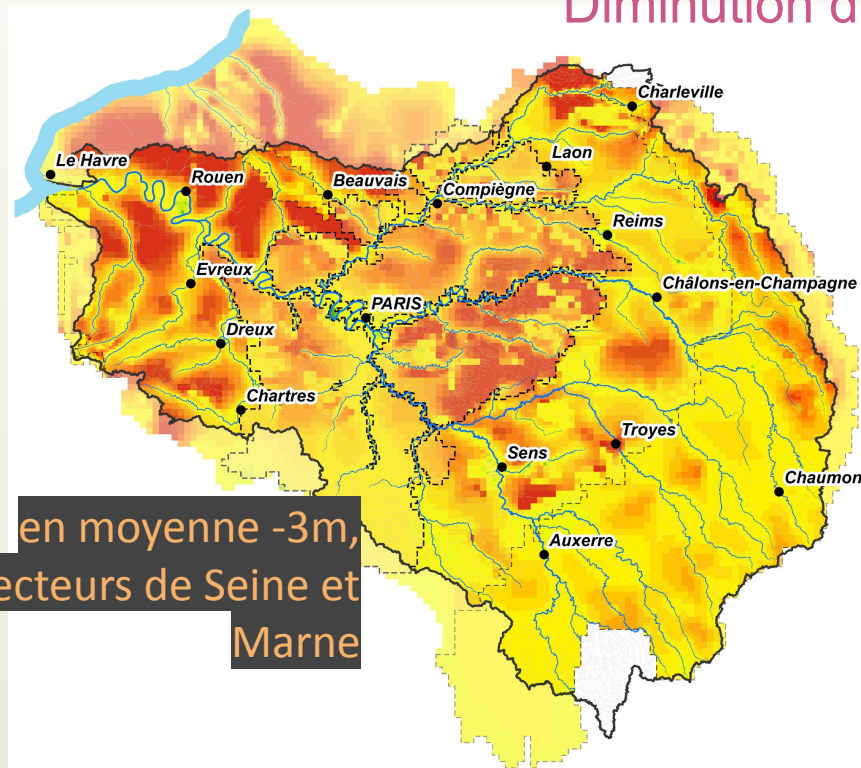


Un avant goût des scénarios “pétrole” et “probable”

Un modèle à probabilité égale aux autres simulations indique pour ces deux scénarios une crise de l'eau majeure à l'horizon mi-siècle dans le premier cas, fin de siècle dans l'autre

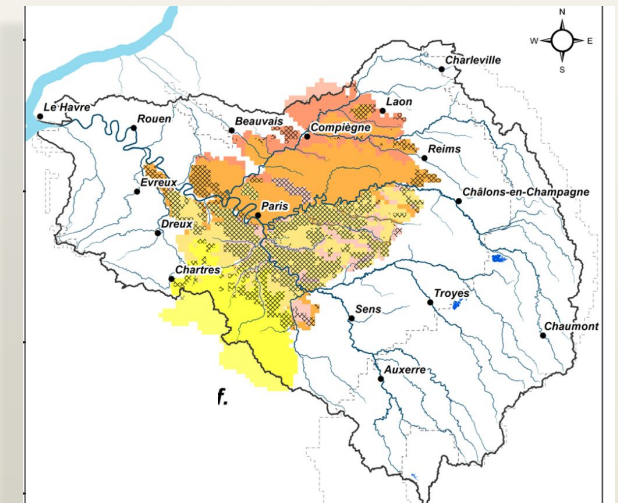
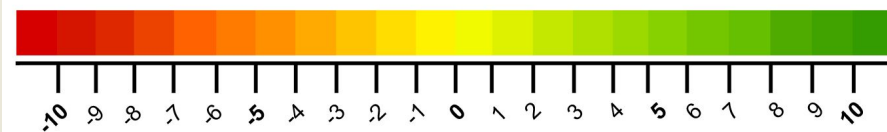
Diminution drastique de la ressource en eau souterraine pendant une vingtaine d'années

Critique pour les cours d'eau amont en contact avec certaines formations tertiaires qui s'assèchent (zones grisées)



en moyenne -3m,
-8 m dans certains secteurs de Seine et
Marne

Différence piézométrique (m)



[Gallois et Flipo, 2022]

La démarche du PIREN-Seine : la sélection des modèles

~50 modèles
CMIP6

~20 modèles avec
toutes les variables
journalières nécessaires
pour les trois scénarios

~ 12 modèles en éliminant
modèles trop similaires (et
ceux avec calendriers
« exotiques »)

Sélection finale de 5 modèles parmi 12

- ✓ Représentatifs des changements vus dans l'ensemble initial
- ✓ Compatibles avec Ribes et al. (2022)
- ✓ Caractéristiques climatologiques convenables

Pour chaque modèle
climatique sélectionné,
3 simulations CaWaQS
sont réalisées pour
évaluer chaque
scénario "Paris",
"probable", "pétrole"

Chaque simulation
couvre une période de
130 ans au pas de
temps journalier :
1970->2100

L'espoir réside dans le respect des accords de Paris

"Paris"

hiver : pas de modification

été : évolutions de débits contenues dans une fourchette +/- 10%

allongement des étiages à l'automne. diminution des débits pouvant atteindre de l'ordre de 15%

"probable"

été : diminution des débits de 5 à 30 % selon les modèles, avec un fort gradient d'amont (baisses les plus importantes) en aval
allongement très significatif des étiages à l'automne (mêmes impacts que été)

hiver : augmentation des débits de 10 à 20 %

"pétrole"

été : diminution des débits de 10 à 60 % selon les modèles, avec un fort gradient d'amont (baisses les plus importantes) en aval
allongement très significatif des étiages à l'automne (mêmes impacts que été)

hiver : augmentation des débits de 15 à 25 %

L'espoir réside dans le respect des accords de Paris

"Paris"

hiver : pas de modification

été : évolutions de débits contenues dans une fourchette +/- 10%

allongement des étiages à l'automne. diminution des débits

pouvant atteindre de l'ordre de 15%

Espoir

l'atténuation permet d'

éviter la catastrophe

"probable"

été : diminution des débits de 5 à 30 % selon les modèles, avec un fort gradient d'amont (baisses les plus importantes) en aval
allongement très significatif des étiages à l'automne (mêmes impacts que été)

hiver : augmentation des débits de 10 à 20 %

"pétrole"

été : diminution des débits de 10 à 60 % selon les modèles, avec un fort gradient d'amont (baisses les plus importantes) en aval
allongement très significatif des étiages à l'automne (mêmes impacts que été)

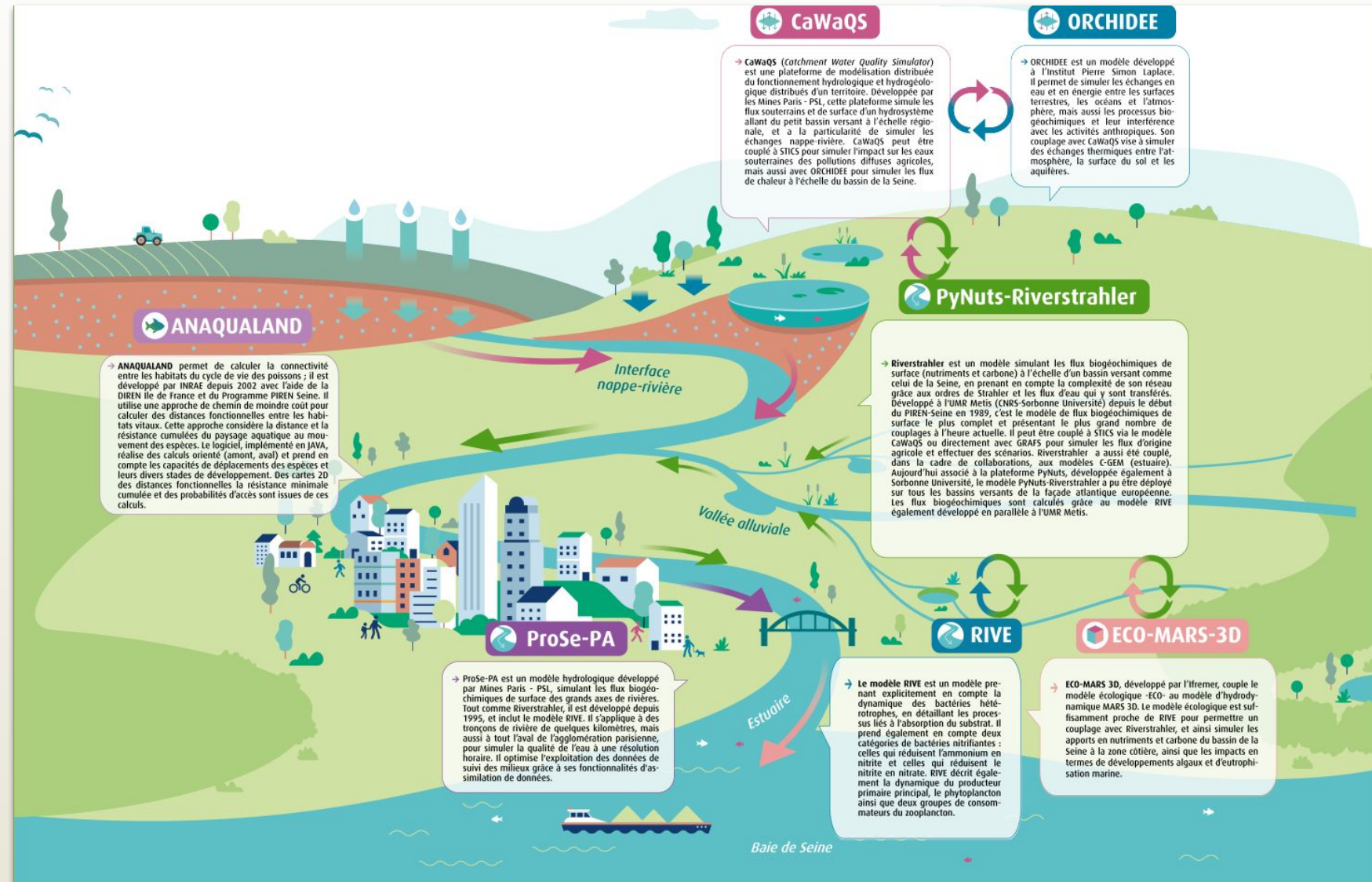
hiver : augmentation des débits de 15 à 25 %

Crises de l'eau
Crises environnementales
Crises sociales

Au delà des aspects quantitatifs, évaluer les impacts sur le vivant

Le PIREN Seine a développé à cet effet une chaîne de modélisation du continuum homme terre mer, capable d'évaluer l'effet du réchauffement des eaux de rivière sur les migrations piscicoles

(Fiche synthétique disponible sur le stand)



Augmentation des températures qui ralentissent, voire empêchent les migrations...

Truite de mer - Juin-Juillet

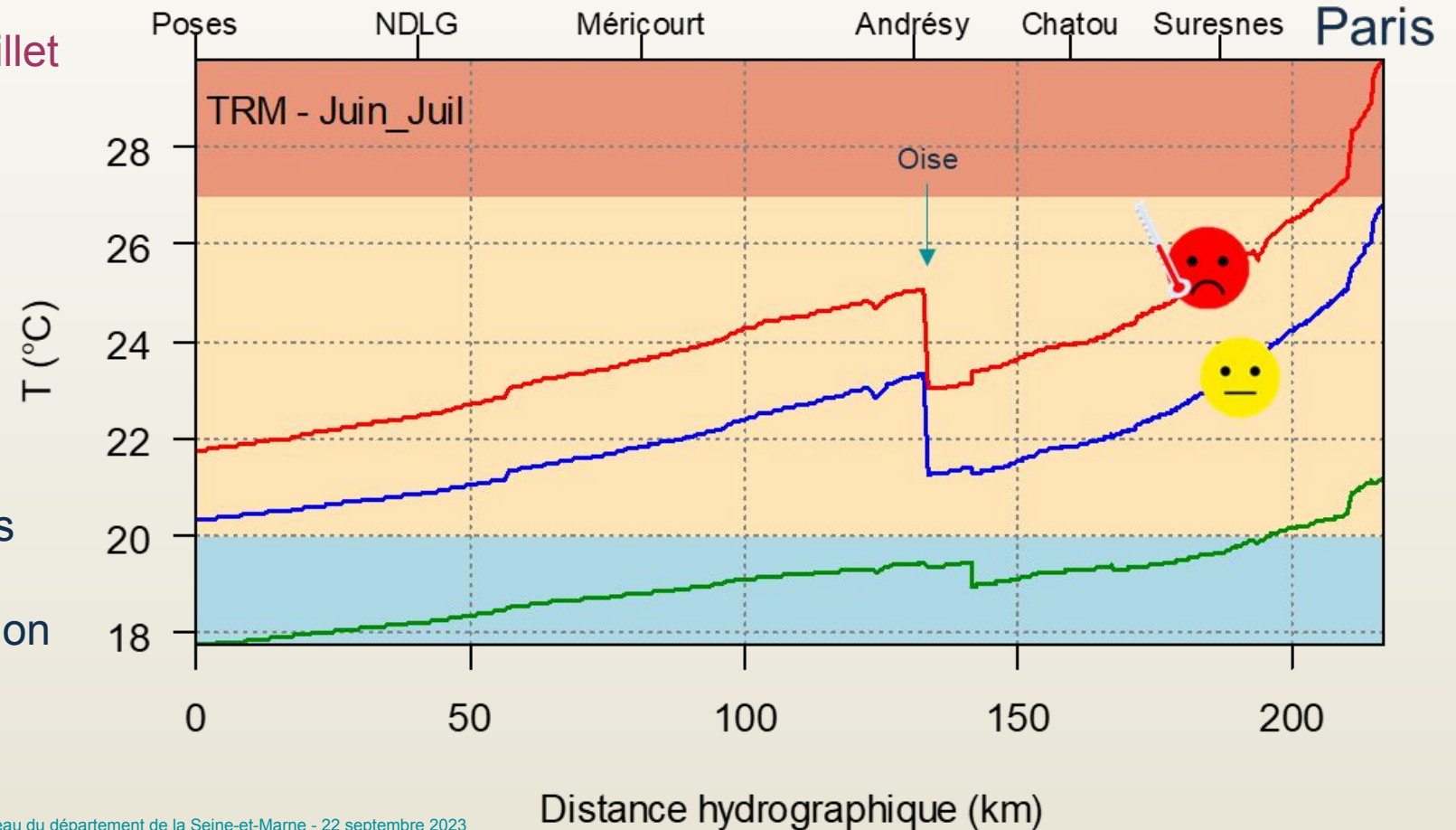


Qualité de migration :

- Conditions idéales
- Migration ralentie
- Arrêt de la migration

Légende:

- “pétrole” 😞
- “probable” 😐
- Scénario actuel 2011 (année sèche)



Conclusions

La ressource en eau du bassin de la Seine dépend de la trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre globale.

Le respect des accords de Paris permettrait d'éviter des crises de l'eau à venir annoncées par un nombre significatif de modèles mobilisés par le GIEC.

Non seulement ces crises mèneront à des tensions sur les eaux souterraines, mais également à la disparition d'écosystèmes aquatiques et à un risque d'effondrement du socio-écosystème du bassin de la Seine.

Tous les rapports annuels et de synthèses du PIREN-seine sont accessibles gratuitement sur son site internet <https://piren-seine.fr/>