

Intensification du Cycle Hydrologique

Défis posés aux scientifiques

Théo VISCHEL
Enseignant-Chercheur

Université Grenoble Alpes – Institut des Géosciences de l'Environnement



Cycle de l'eau à l'échelle globale

Caractéristiques et enjeux





Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau (douce et salée) sur Terre est constant. La majeure partie est composée d'eau salée. L'eau douce, moins de 3 % du total, se déplace entre différents compartiments (atmosphère, continents, océans), en décrivant un cycle sous différentes formes : vapeur, pluies, glace et neige. De cette circulation et de ces équilibres dépend la vie sur Terre.

Ci-dessous : flux mondiaux par an en milliers de km³, avec 1 km³ = 1 000 milliards de litres.

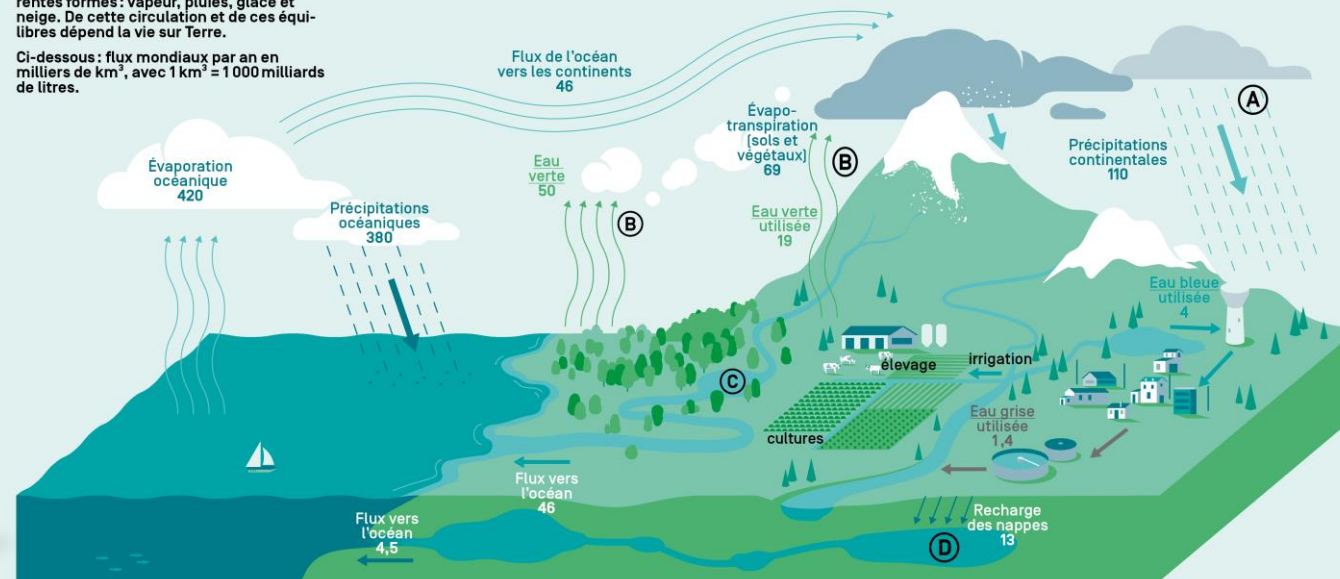
Notes : marges d'erreur non représentées, entre 10 et 50 %, plus grandes pour la recharge des nappes et pour l'eau grise utilisée.

Fortes variations annuelles et interannuelles non représentées.
D'après Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540.

≈ 1,4 milliard de km³
Volume total d'eau sur la planète

≈ 35 millions de km³
Volume total d'eau douce sur la planète

≈ 24 000 km³
Volume d'eau douce utilisée par l'homme par an (environ 6 fois le volume de la Manche)



LES FLUX

Répartition des pluies
Plus de la moitié des précipitations annuelles (A) passe dans le sol et dans les végétaux (cultures, forêts et autres espaces naturels), avant d'être majoritairement évapotranspirée (B). C'est l'eau verte. Le reste des pluies passe dans les cours d'eau (C), les lacs et les

nappes (D). C'est l'eau bleue.
Utilisation humaine mondiale annuelle d'eau douce
Eau verte : utilisée pour les cultures et l'élevage, majoritairement évapotranspirée.
Eau bleue : utilisée pour l'agriculture (irrigation), l'industrie, la production d'énergie, l'eau potable.

Eau grise : eaux usées domestiques et industrielles.

ACTIONS
Éviter les pertes d'eau douce vers la mer
→ Retenues d'eau.
→ Stockage d'eau dans le sol.
Favoriser l'infiltration, diminuer l'érosion, enrichir en matière organique (couverts,

élevage), agriculture de conservation des sols.
→ Infrastructures écologiques pour diminuer le ruissellement et favoriser le stockage dans les paysages : zones humides, haies, bandes enherbées, fossés.
→ Réutilisation des eaux usées après traitement.

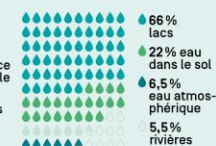
EAU DE LA TERRE



EAU DOUCE



EAU DOUCE DISPONIBLE



Climat

Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau (douce et salée) sur Terre est constant. La majeure partie est composée d'eau salée. L'eau douce, moins de 3 % du total, se déplace entre différents compartiments (atmosphère, continents, océans), en décrivant un cycle sous différentes formes : vapeur, pluies, glace et neige. De cette circulation et de ces équilibres dépend la vie sur Terre.

Ci-dessous : flux mondiaux par an en milliers de km³, avec 1 km³ = 1 000 milliards de litres.

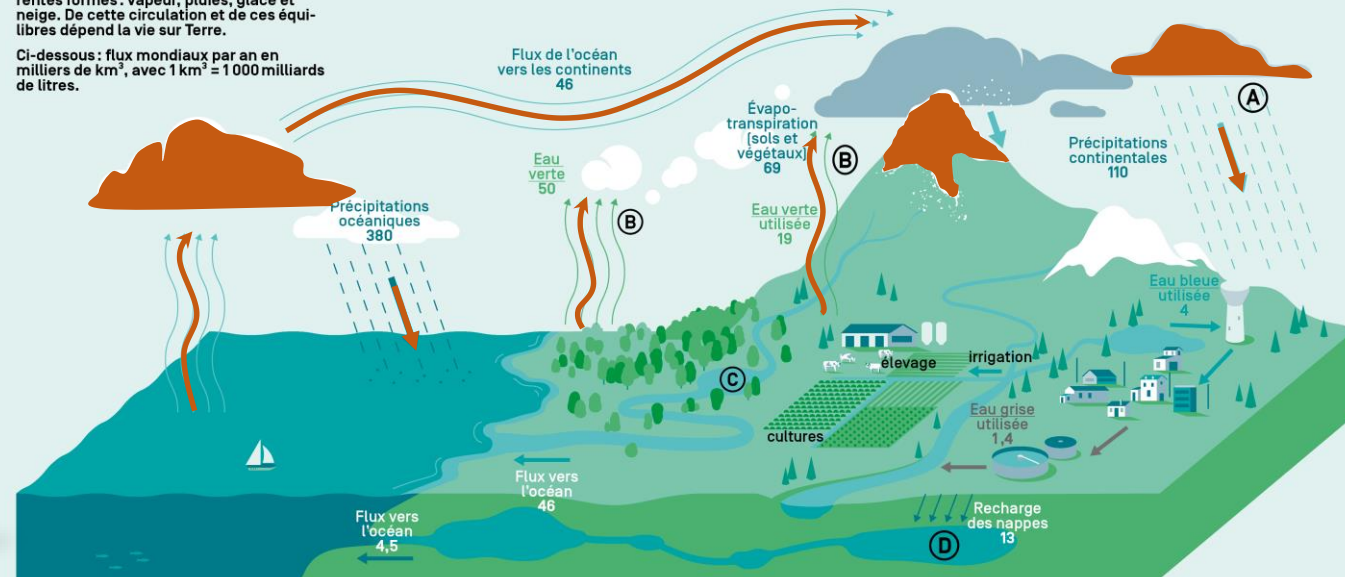
Notes : marges d'erreur non représentées, entre 10 et 50 %, plus grandes pour la recharge des nappes et pour l'eau grise utilisée.

Fortes variations annuelles et interannuelles non représentées.
D'après Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540.

≈ 1,4 milliard de km³
Volume total d'eau sur la planète

≈ 35 millions de km³
Volume total d'eau douce sur la planète

≈ 24 000 km³
Volume d'eau douce utilisée par l'homme par an (environ 6 fois le volume de la Manche)



LES FLUX

Répartition des pluies
Plus de la moitié des précipitations annuelles (A) passe dans le sol et dans les végétaux (cultures, forêts et autres espaces naturels), avant d'être majoritairement évapotranspirée (B). C'est l'eau verte. Le reste des pluies passe dans les cours d'eau (C), les lacs et les

nappes (D). C'est l'eau bleue.
Utilisation humaine mondiale annuelle d'eau douce
Eau verte : utilisée pour les cultures et l'élevage, majoritairement évapotranspirée.
Eau bleue : utilisée pour l'agriculture (irrigation), l'industrie, la production d'énergie, l'eau potable.

Eau grise : eaux usées domestiques et industrielles.

ACTIONS
Éviter les pertes d'eau douce vers la mer
→ Retenues d'eau.
→ Stockage d'eau dans le sol.
Favoriser l'infiltration, diminuer l'érosion, enrichir en matière organique (couverts,

élevage), agriculture de conservation des sols.
→ Infrastructures écologiques pour diminuer le ruissellement et favoriser le stockage dans les paysages : zones humides, haies, bandes enherbées, fossés.
→ Réutilisation des eaux usées après traitement.

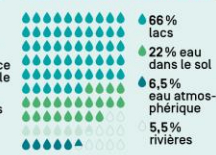
EAU DE LA TERRE



EAU DOUCE



EAU DOUCE DISPONIBLE



Occupation
des
Sols

Climat

Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau (douce et salée) sur Terre est constant. La majeure partie est composée d'eau salée. L'eau douce, moins de 3% du total, se déplace entre différents compartiments (atmosphère, continents, océans), en décrivant un cycle sous différentes formes: vapeur, pluies, glace et neige. De cette circulation et de ces équilibres dépend la vie sur Terre.

Ci-dessous: flux mondiaux par an en milliers de km³, avec 1 km³ = 1 000 milliards de litres.

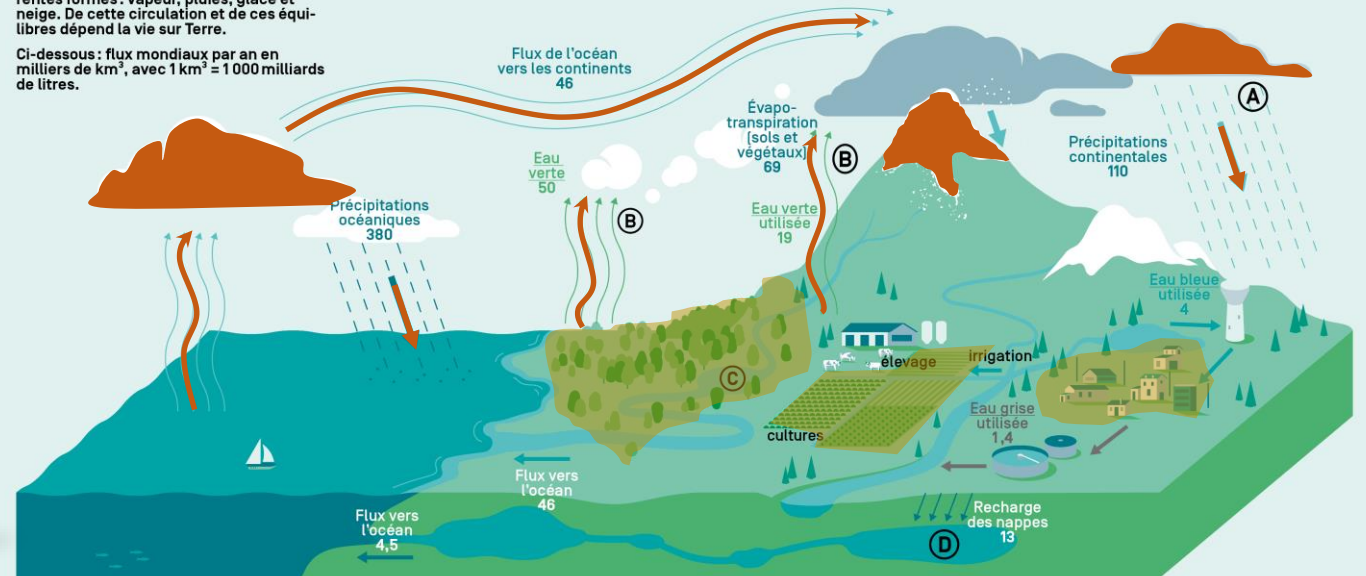
Notes: marges d'erreur non représentées, entre 10 et 50%, plus grandes pour la recharge des nappes et pour l'eau grise utilisée.

Fortes variations annuelles et interannuelles non représentées.
D'après Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540.

≈ 1,4 milliard de km³
Volume total d'eau sur la planète

≈ 35 millions de km³
Volume total d'eau douce sur la planète

≈ 24 000 km³
Volume d'eau douce utilisée par l'homme par an (environ 6 fois le volume de la Manche)



LES FLUX

Répartition des pluies
Plus de la moitié des précipitations annuelles (A) passe dans le sol et dans les végétaux (cultures, forêts et autres espaces naturels), avant d'être majoritairement évapotranspirée (B). C'est l'eau verte. Le reste des pluies passe dans les cours d'eau (C), les lacs et les

nappes (D). C'est l'eau bleue.
Utilisation humaine mondiale annuelle d'eau douce
Eau verte : utilisée pour les cultures et l'élevage, majoritairement évapotranspirée.
Eau bleue : utilisée pour l'agriculture (irrigation), l'industrie, la production d'énergie, l'eau potable.

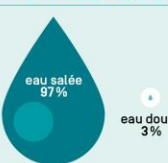
Eau grise : eaux usées domestiques et industrielles.

ACTIONS

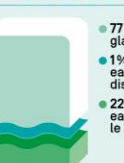
Éviter les pertes d'eau douce vers la mer
→ Retenues d'eau.
→ Stockage d'eau dans le sol.
Favoriser l'infiltration, diminuer l'érosion, enrichir en matière organique (couverts,

élevage), agriculture de conservation des sols.
→ Infrastructures écologiques pour diminuer le ruissellement et favoriser le stockage dans les paysages : zones humides, haies, bandes enherbées, fossés.
→ Réutilisation des eaux usées après traitement.

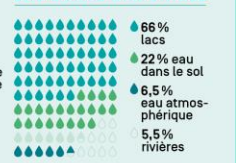
EAU DE LA TERRE

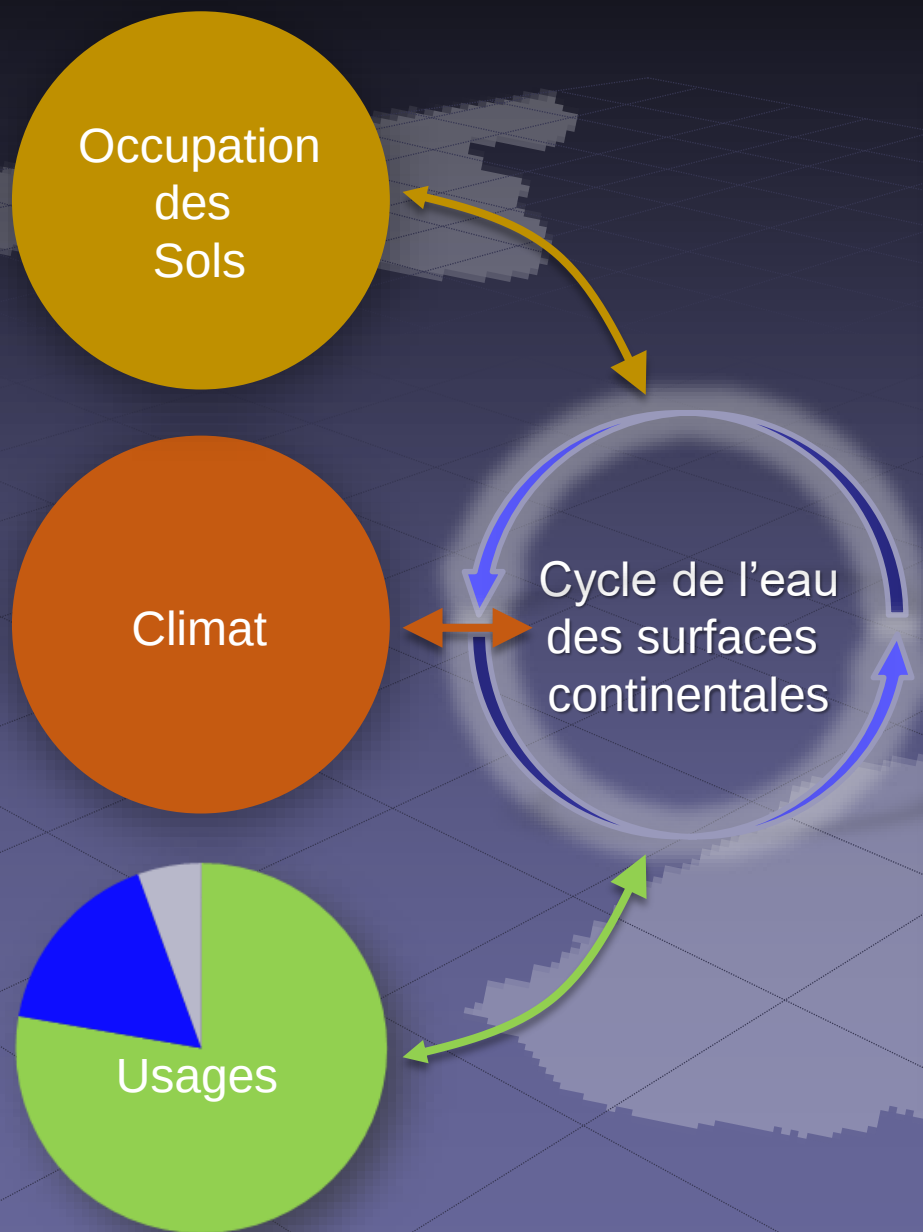


EAU DOUCE



EAU DOUCE DISPONIBLE





Le cycle de l'eau

Le volume total d'eau (douce et salée) sur Terre est constant. La majeure partie est composée d'eau salée. L'eau douce, moins de 3% du total, se déplace entre différents compartiments (atmosphère, continents, océans), en décrivant un cycle sous différentes formes: vapeur, pluies, glace et neige. De cette circulation et de ces équilibres dépend la vie sur Terre.

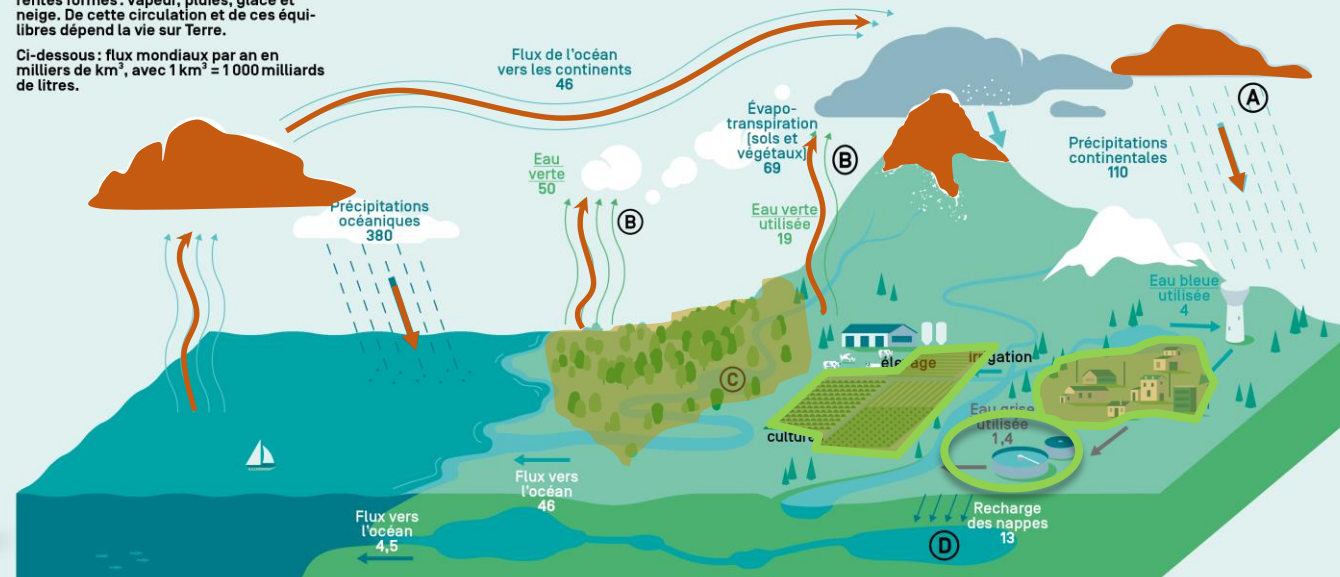
Ci-dessous: flux mondiaux par an en milliers de km³, avec 1 km³ = 1 000 milliards de litres.

Notes: marges d'erreur non représentées, entre 10 et 50%, plus grandes pour la recharge des nappes et pour l'eau grise utilisée.
Fortes variations annuelles et interannuelles non représentées.
D'après Abbott B.W. et al. 2019. *Nature Geoscience* 12, 533-540.

≈ 1,4 milliard de km³
Volume total d'eau sur la planète

≈ 35 millions de km³
Volume total d'eau douce sur la planète

≈ 24 000 km³
Volume d'eau douce utilisée par l'homme par an (environ 6 fois le volume de la Manche)



LES FLUX

Répartition des pluies
Plus de la moitié des précipitations annuelles (A) passe dans le sol et dans les végétaux (cultures, forêts et autres espaces naturels), avant d'être majoritairement évapotranspirée (B). C'est l'eau verte. Le reste des pluies passe dans les cours d'eau (C), les lacs et les

nappes (D). C'est l'eau bleue.
Utilisation humaine mondiale annuelle d'eau douce
Eau verte: utilisée pour les cultures et l'élevage, majoritairement évapotranspirée.
Eau bleue: utilisée pour l'agriculture (irrigation), l'industrie, la production d'énergie, l'eau potable.

ACTIONS
Éviter les pertes d'eau douce vers la mer
→ Retenues d'eau.
→ Stockage d'eau dans le sol.
Favoriser l'infiltration, diminuer l'érosion, enrichir en matière organique (couverts,

élevage), agriculture de conservation des sols.
→ Infrastructures écologiques pour diminuer le ruissellement et favoriser le stockage dans les paysages: zones humides, haies, bandes enherbées, fossés.
→ Réutilisation des eaux usées après traitement.

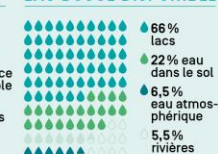
EAU DE LA TERRE

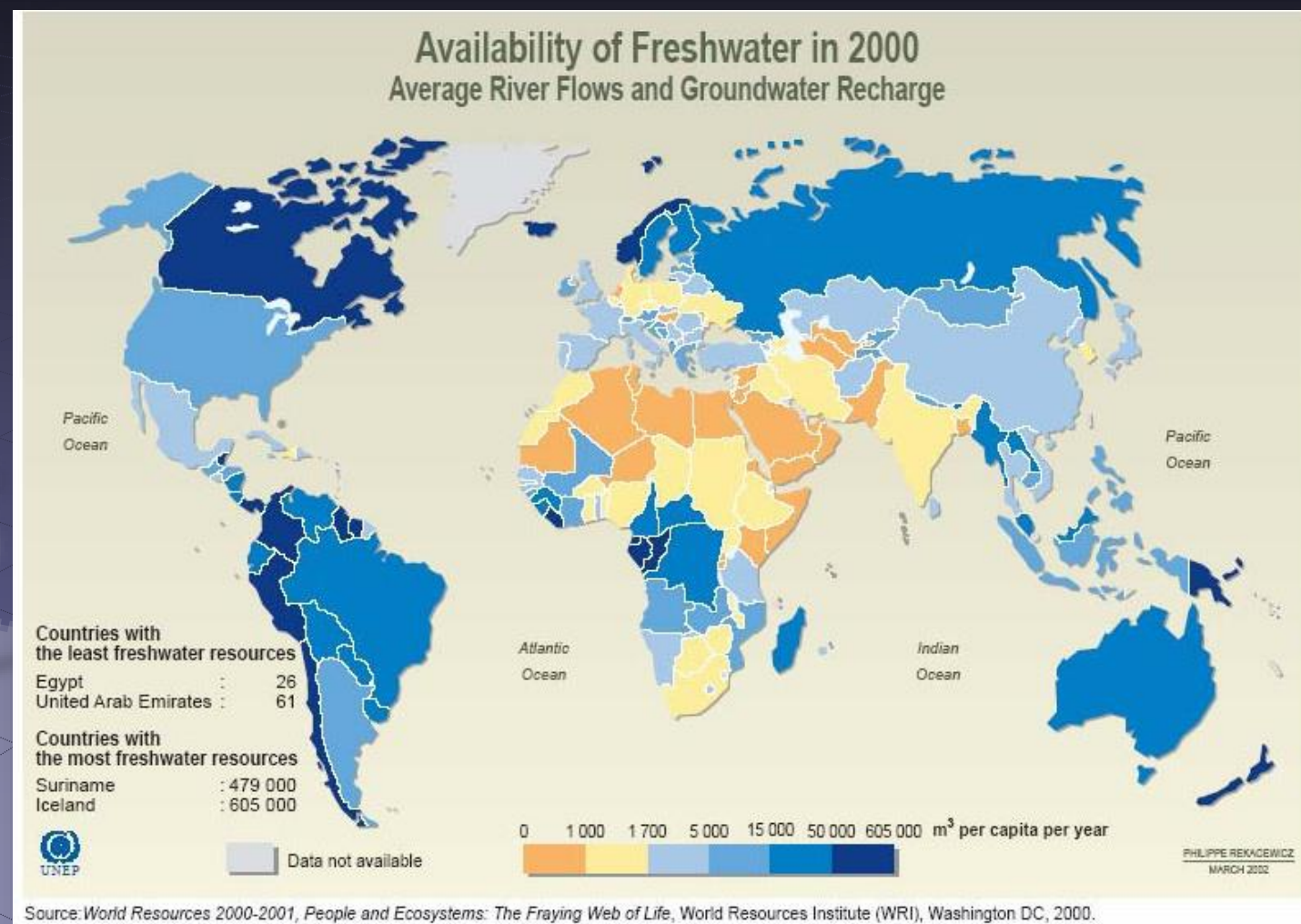
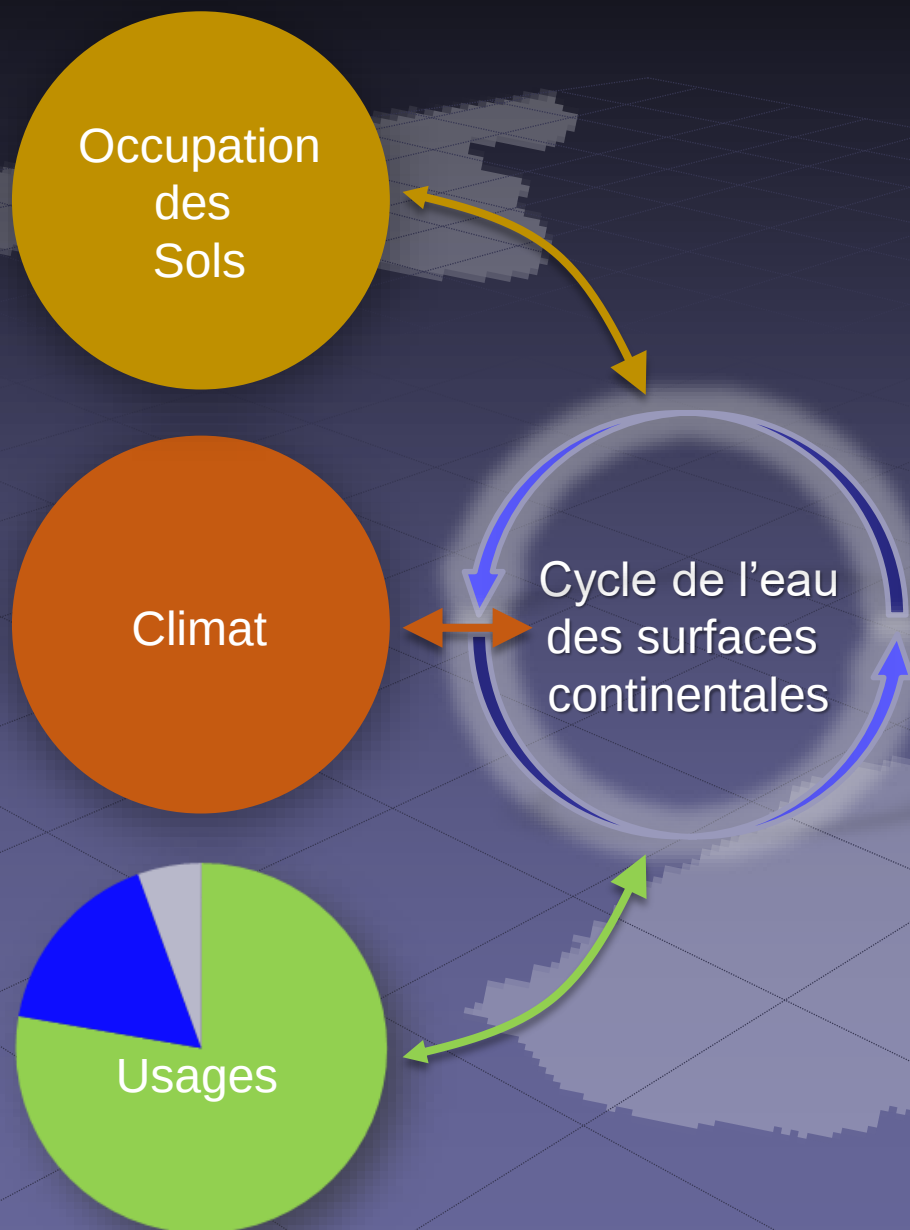


EAU DOUCE



EAU DOUCE DISPONIBLE



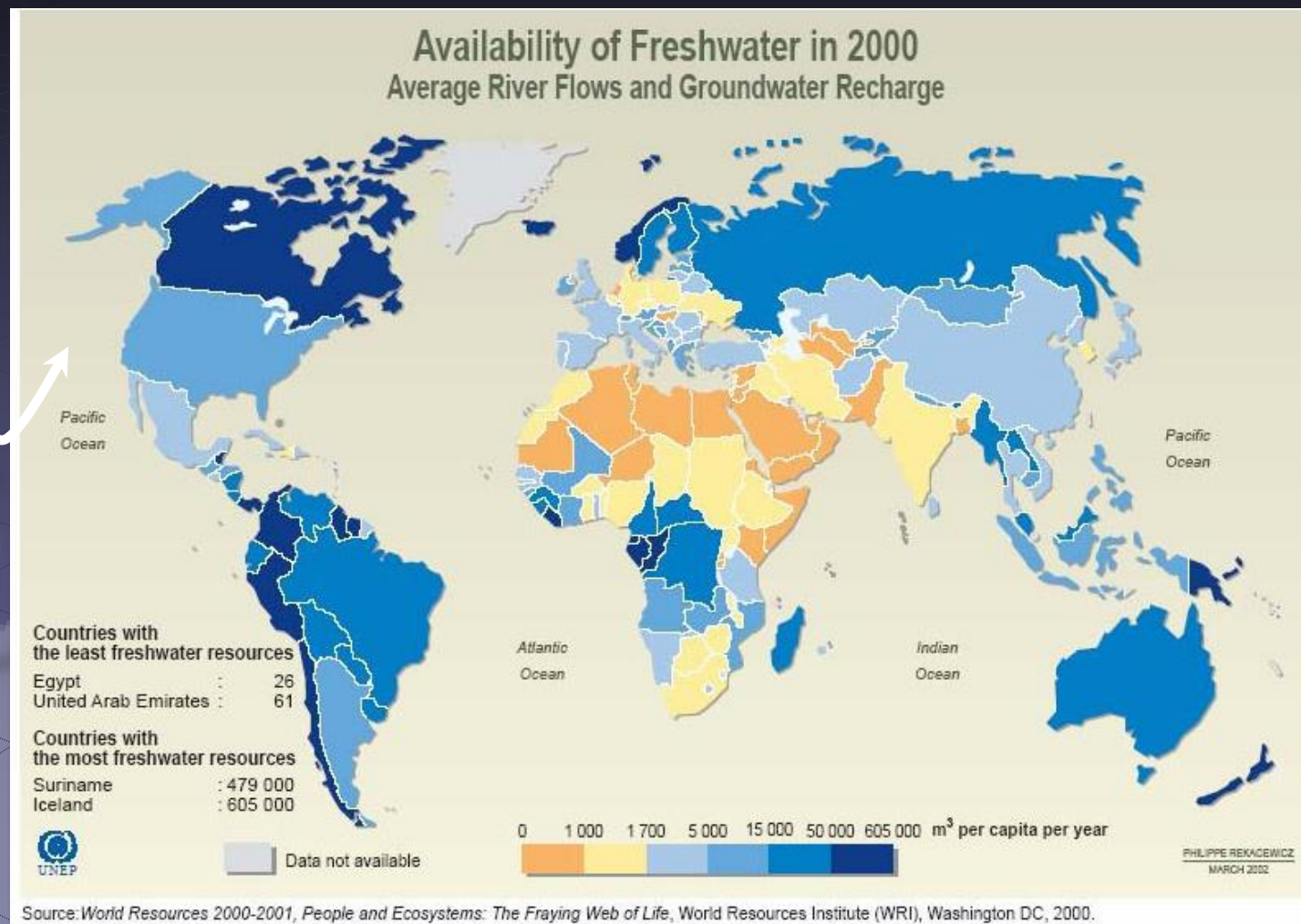


Occupation
des
Sols

Climat

Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

Usages

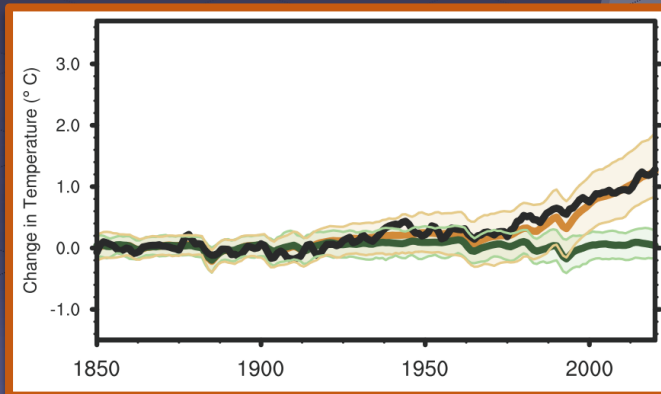


Occupation
des
Sols

Climat

Usages

IPCC AR6, 2021



Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

Intensification

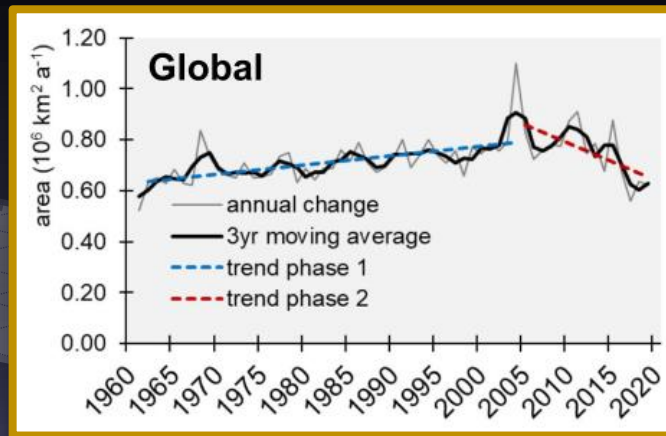
Sécheresses

Pluies Extrêmes

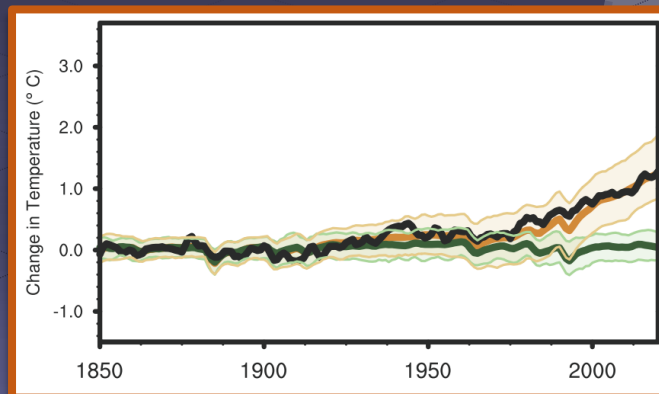
Occupation
des
Sols

Climat

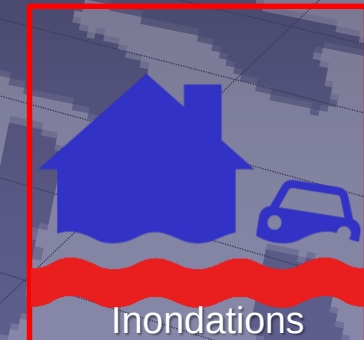
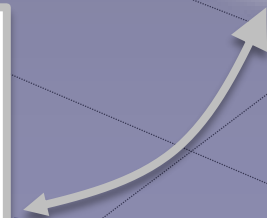
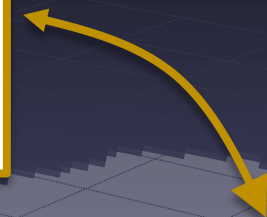
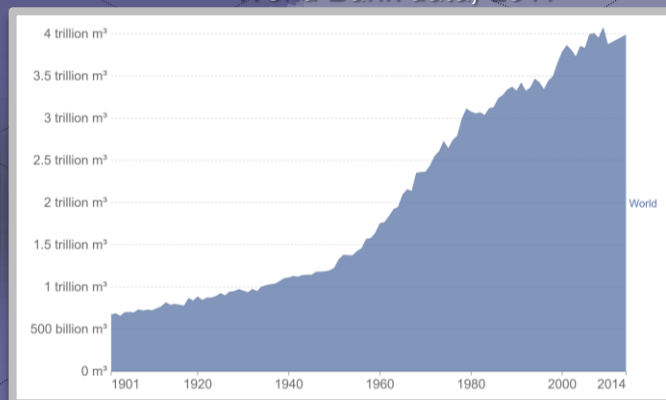
Usages



IPCC AR6, 2021

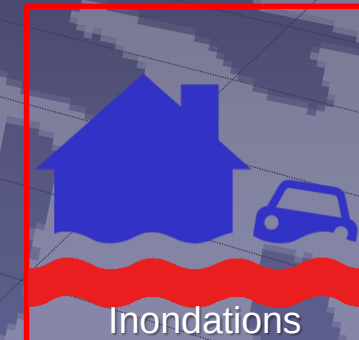


World Bank data, 2017

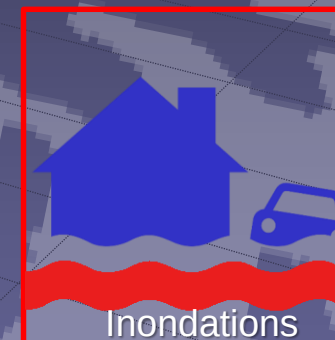


La crise globale de l'eau est déjà là...

- 4 milliards de personnes vivent avec une grave pénurie d'eau
- 2.3 milliards n'ont pas accès à l'eau potable
- Pollution des eaux tue 1.8 millions de personnes/an (1500 enfants/jour en Afrique)
- Plus de 700000 morts de sécheresse entre 1970 et 2019
- Les dommages liés aux inondations ont augmenté de 134% sur 2000-2020 comparé à 1980-2000.
- L'agriculture de certaines régions arides et semi-arides dépendent de ressources en eau non renouvelables
- 70% des rivières, lacs et estuaires souffrent d'eutrophisation
- 83% de baisse de la biodiversité en eau douce depuis 1970
- Disparition des zones humides à un taux 3 fois supérieur aux forêts
- ...



Défis posés aux scientifiques



1

Détection

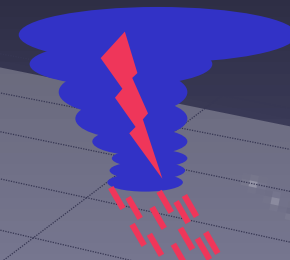
1

Tendances?

Cycle de l'eau
des surfaces
continentales



Sécheresses



Pluies Extrêmes



Inondations



Qualités des eaux

1

Détection

2

Attribution

1
Tendances?

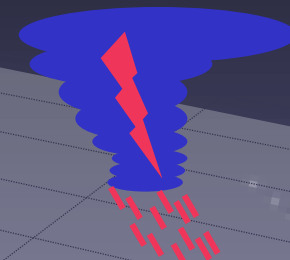
Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

2

Ampleur
du lien
anthropique ?



Sécheresses



Pluies Extrêmes



Inondations



Qualités des eaux

1
Détection

2
Attribution

3
Projection

1
Tendances?

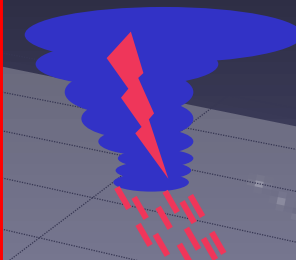
3
Evolution
Future ?

Cycle de l'eau
des surfaces
continentales

2
Ampleur
du lien
anthropique ?



Sécheresses



Pluies Extrêmes



Inondations



Qualités des eaux

1

Détection

2

Attribution

3

Projection

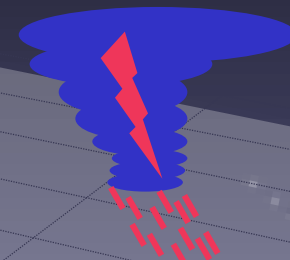
4

Cycle de l'eau
REGIONAL

Solutions
d'adaptation



Sécheresses



Pluies Extrêmes



Inondations



Qualités des eaux

1

Détection

2

Attribution

3

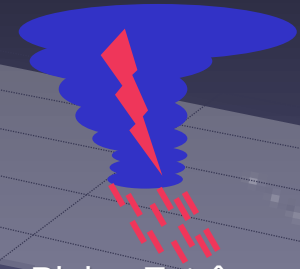
Projection



Solutions
d'adaptation



Sécheresses



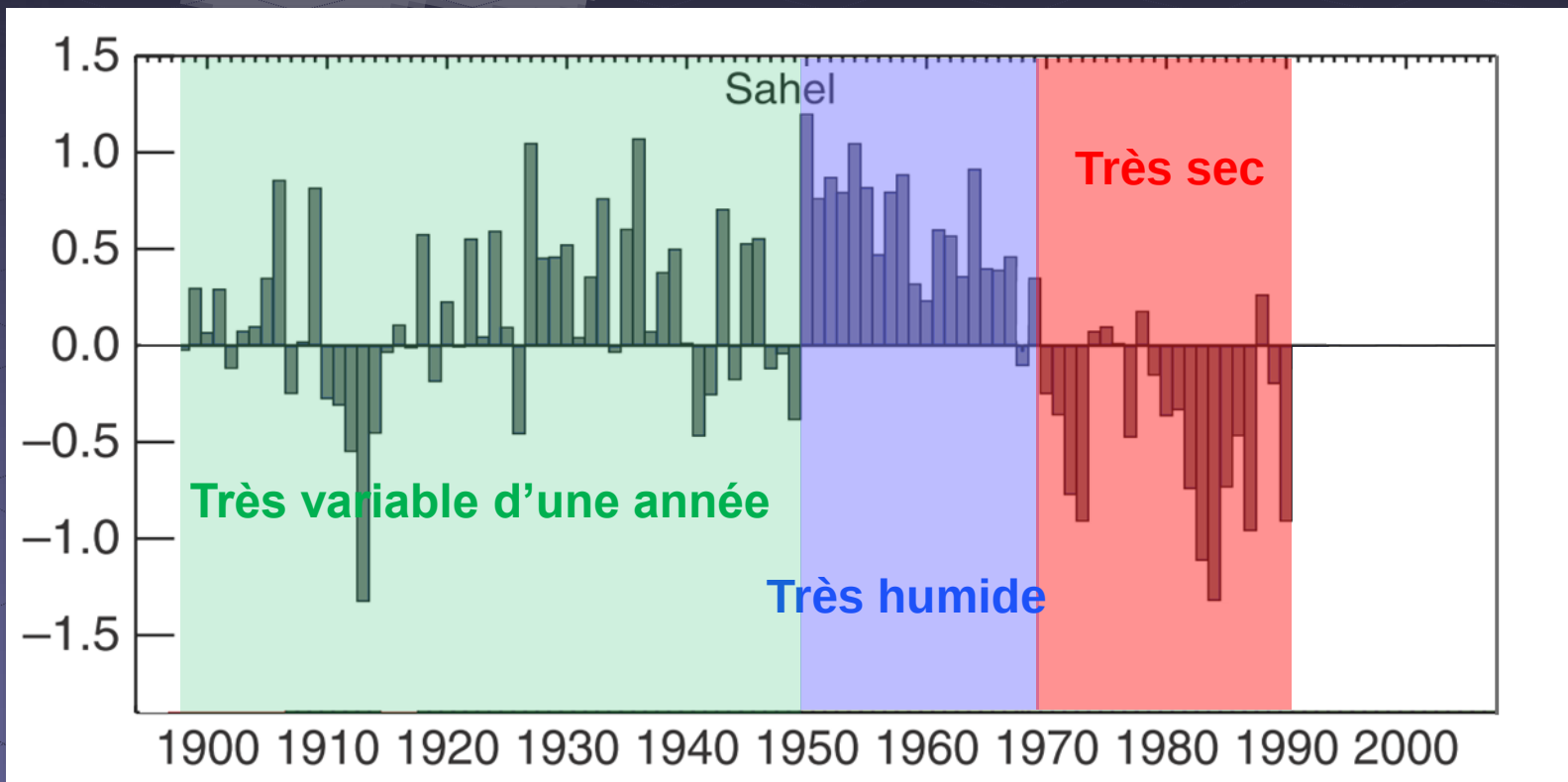
Pluies Extrêmes



Inondations



Qualités des eaux



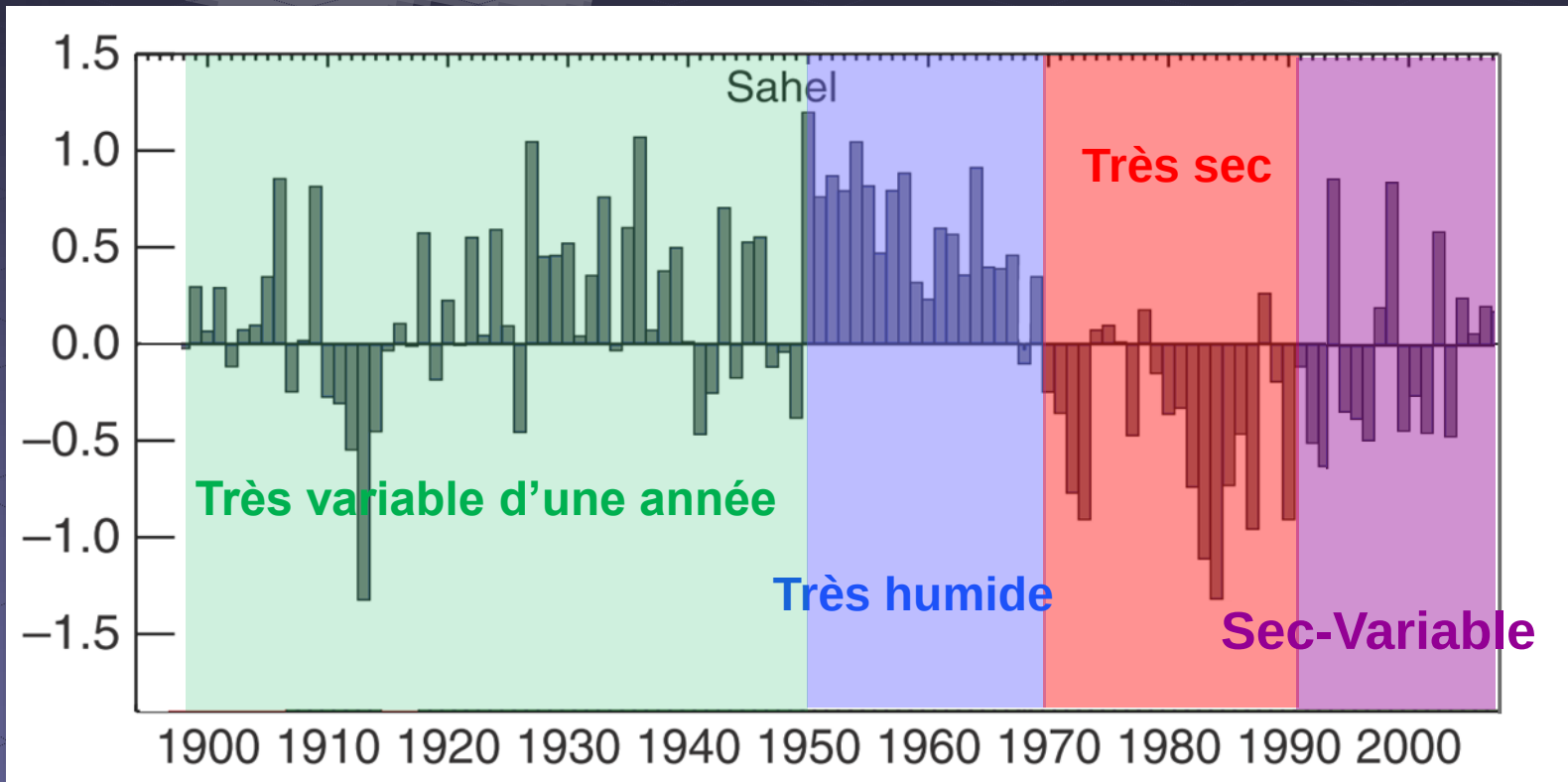
Ressources agricoles



Ressources en eau



- Baisse des ressources agricoles
- Rivières et puits à sec
- Famines meurtrières



- Toujours des années sèches
- Un nouveau fléau: les inondations

Ressources agricoles



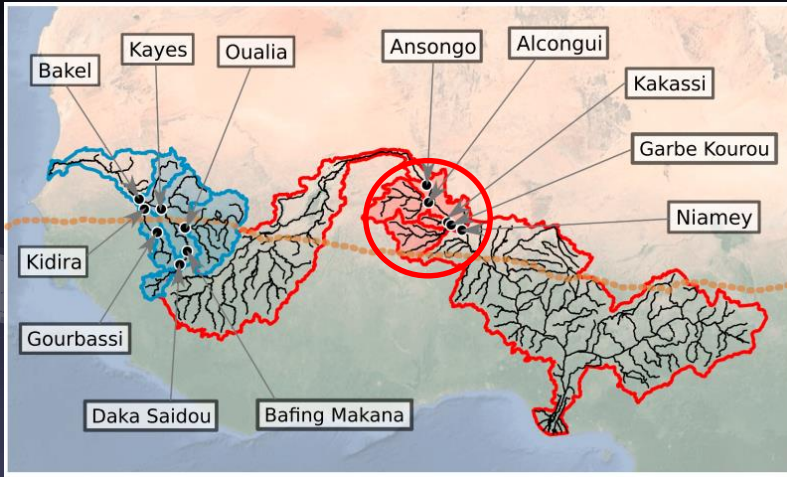
Ressources en eau



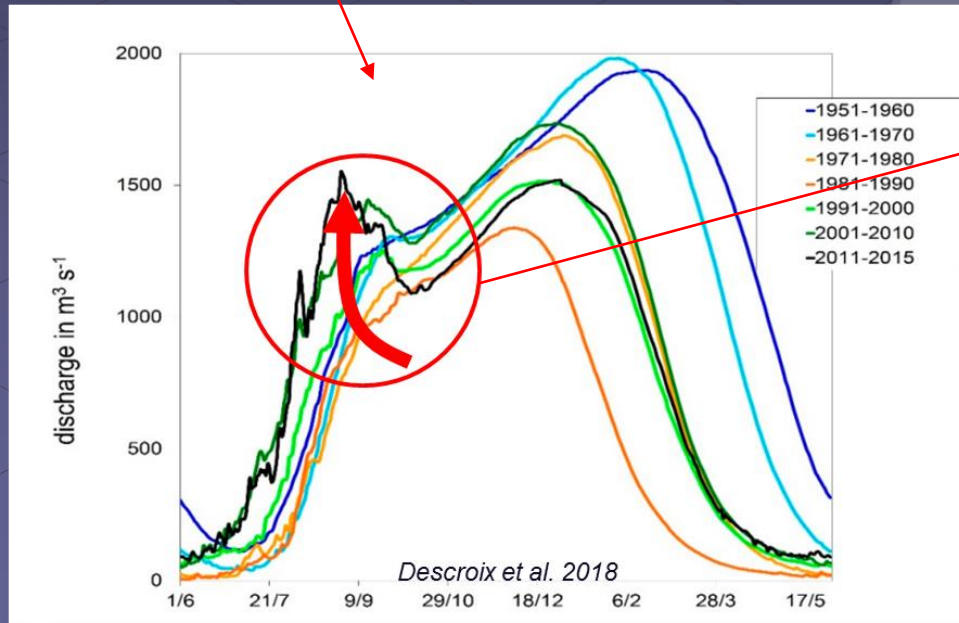
Inondations



Détection



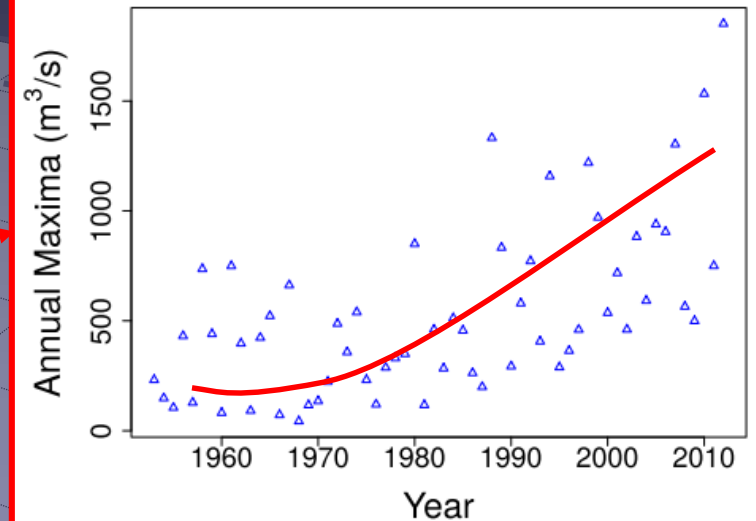
Wilcox et al. 2018, J. of Hydrol.



Descroix et al. 2018



Sahelian Niger River

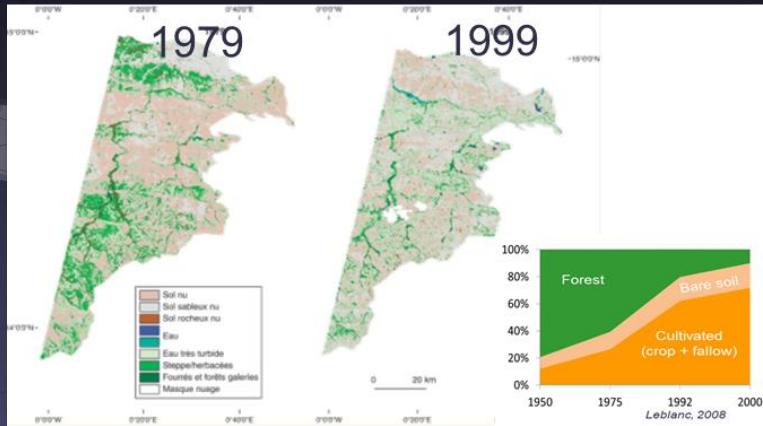


Détection

Attribution

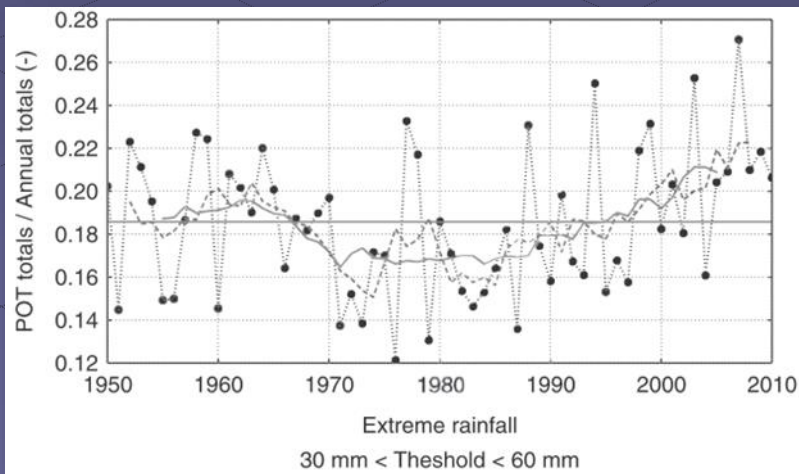
Facteurs d'influence

Dégradation des sols



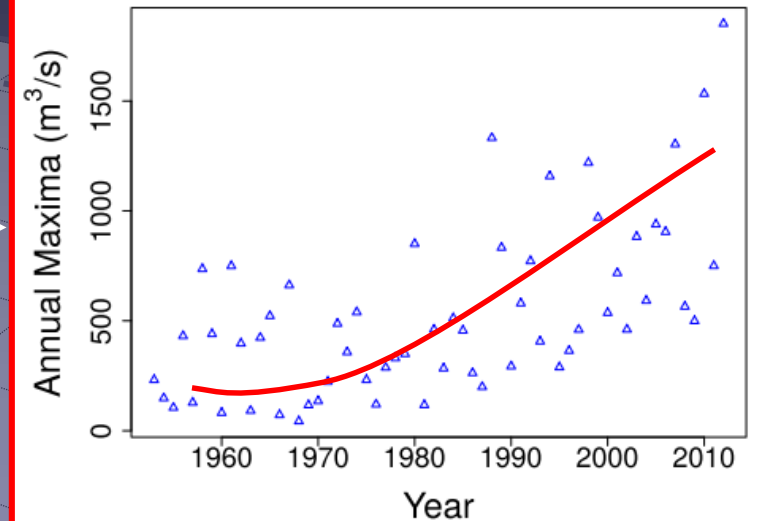
Favreau et al. 2009 WRR, Descroix et al. 2009 JH, 2018 Water

Intensification des précipitations



Panthou et al. 2014 IJOC, Chagnaud et al ERL, 2021

Sahelian Niger River

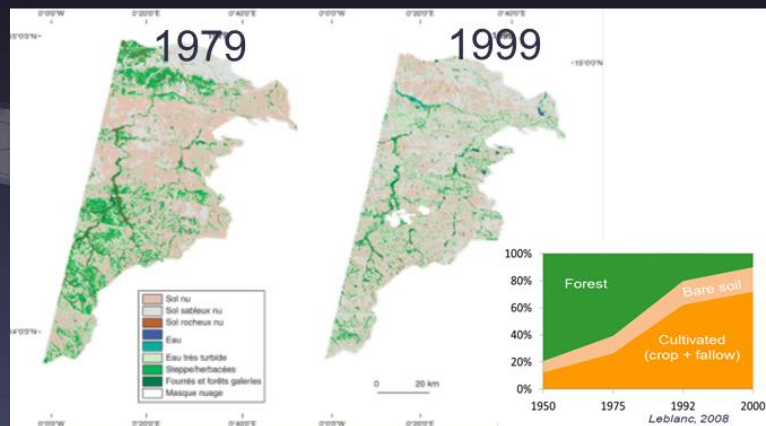


Détection

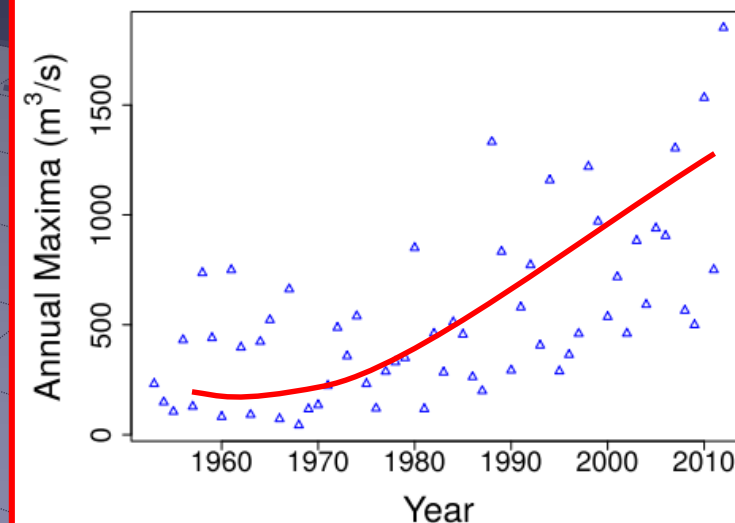
Attribution

Facteurs d'influence

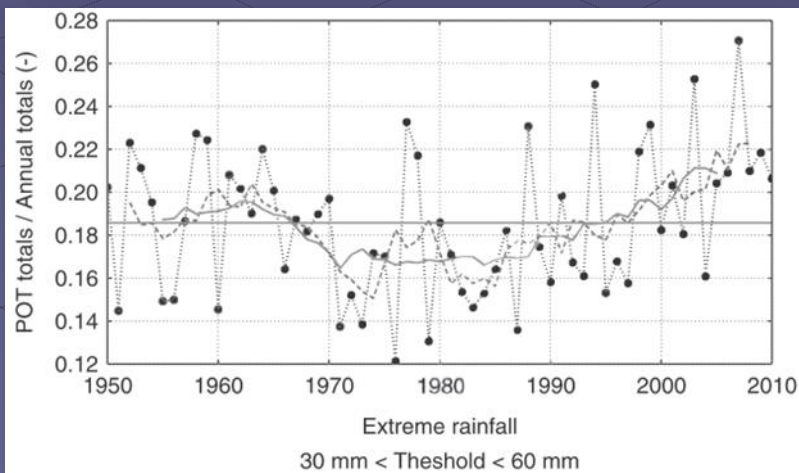
Dégradation des sols



Sahelian Niger River



Intensification des précipitations



Favreau et al. 2009 WRR, Descroix et al. 2009 JH, 2018 Water

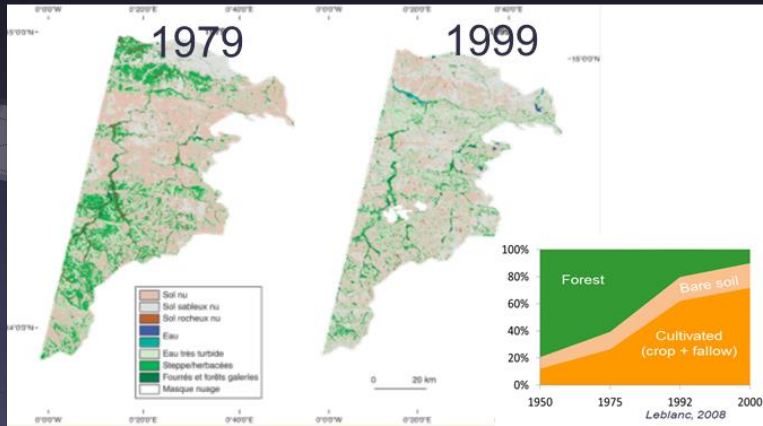
Panthou et al. 2014 IJOC, Chagnaud et al ERL, 2021

Détection

Attribution

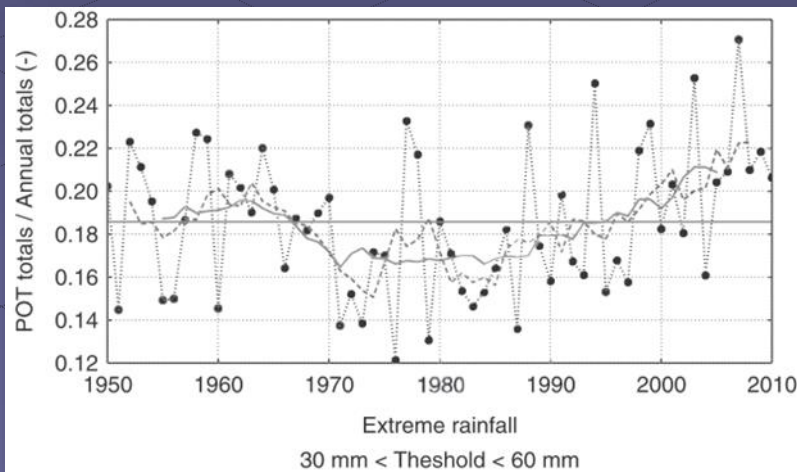
Facteurs d'influence

Dégradation des sols



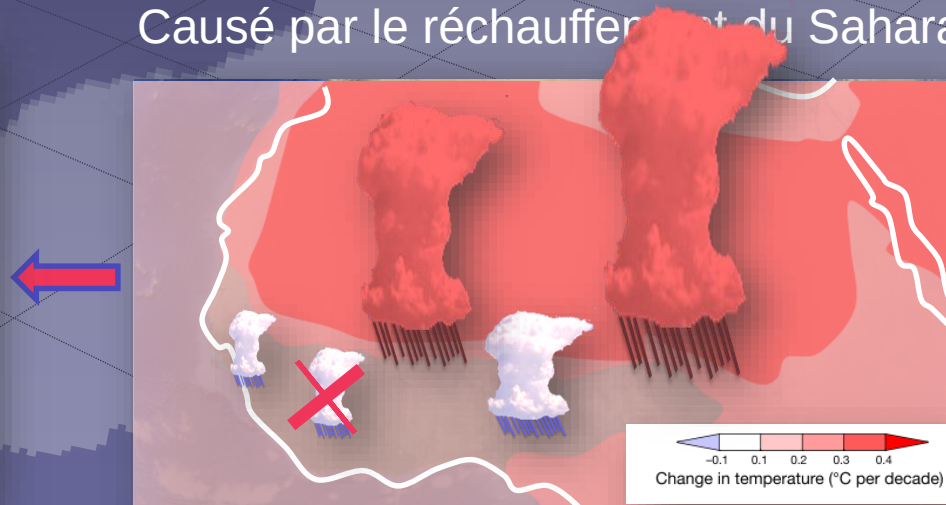
Favreau et al. 2009 WRR, Descroix et al. 2009 JH, 2018 Water

Intensification des précipitations



Panthou et al. 2014 IJOC, Chagnaud et al ERL, 2021

Causé par le réchauffement du Sahara



Taylor et al. 2017, Nature

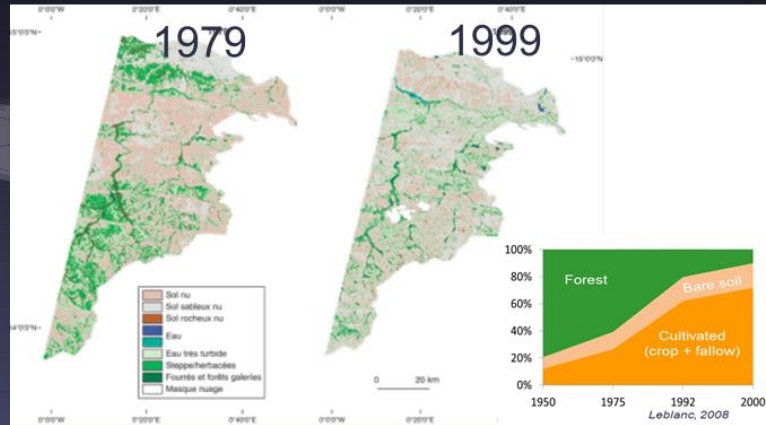
Détection

Attribution

Projection

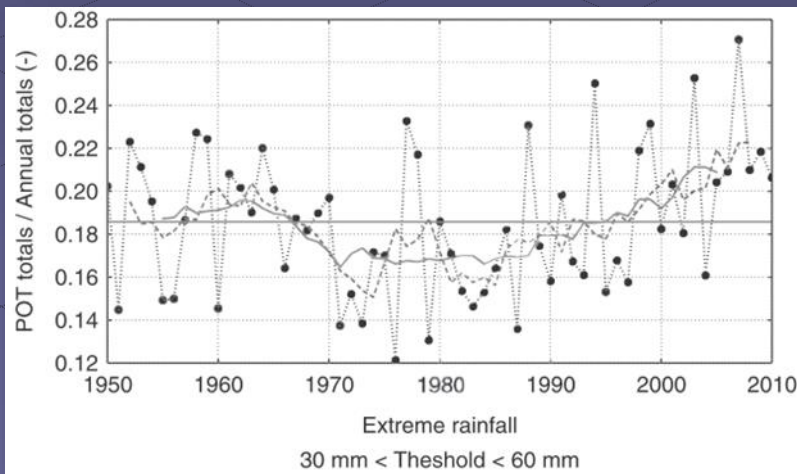
Facteurs d'influence

Dégradation des sols



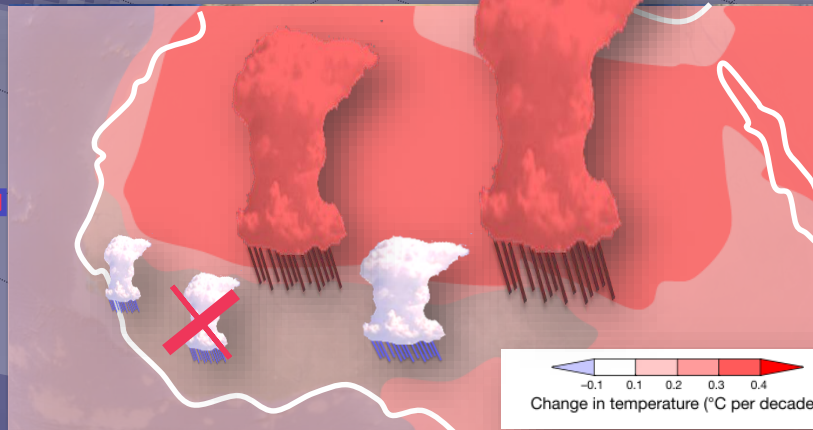
Favreau et al. 2009 WRR, Descroix et al. 2009 JH, 2018 Water

Intensification des précipitations



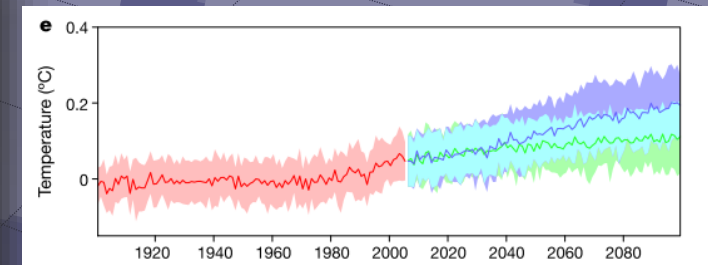
Panthou et al. 2014 IJOC, Chagnaud et al ERL, 2021

Causé par le réchauffement du Sahara



Taylor et al. 2017, Nature

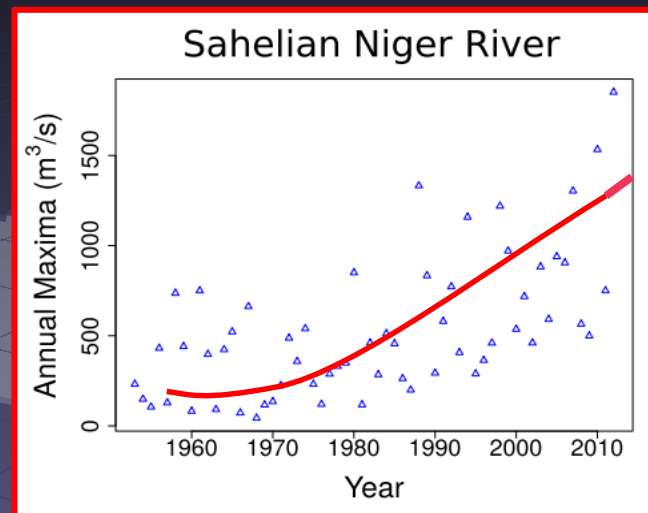
Réchauffement futur du Sahara



Détection

Attribution

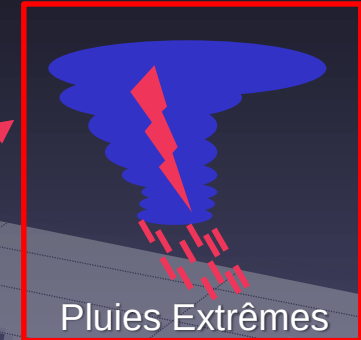
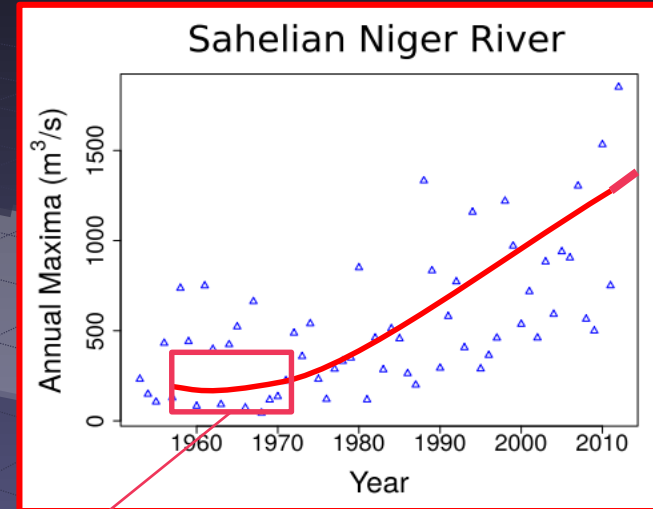
Projection



Détection

Attribution

Projection



Adaptation?



Normes hydrologiques utilisées actuellement

Nouvelles normes en climat changeant



Risque de maladaptation



Réponse immédiate à un problème...pire que le mal



Fleuve Sénégal
La brèche de Saint Louis

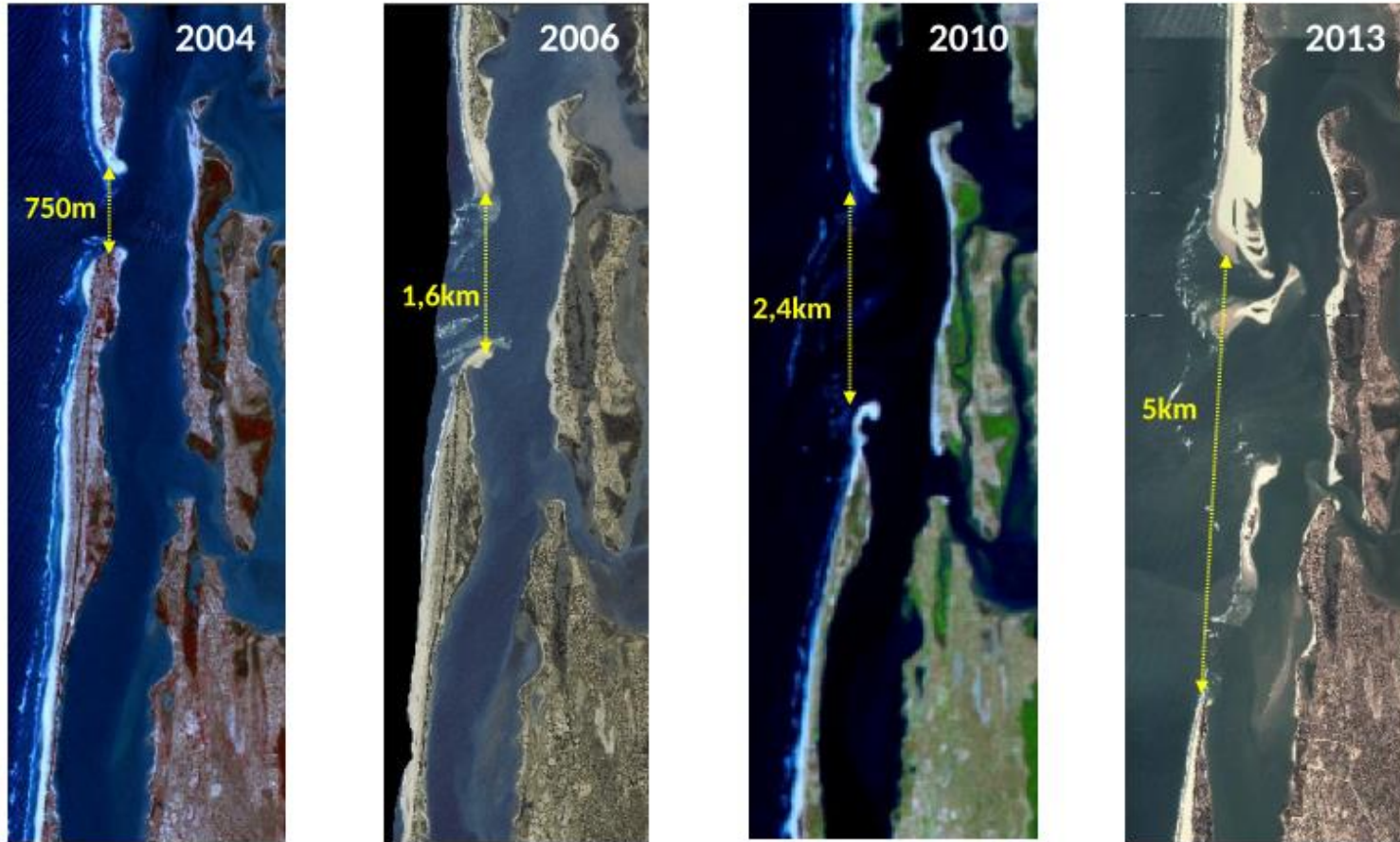
4 octobre 2003: 4 m de largeur



6 oct. 2003: 200 m



Réponse immédiate à un problème...pire que le mal



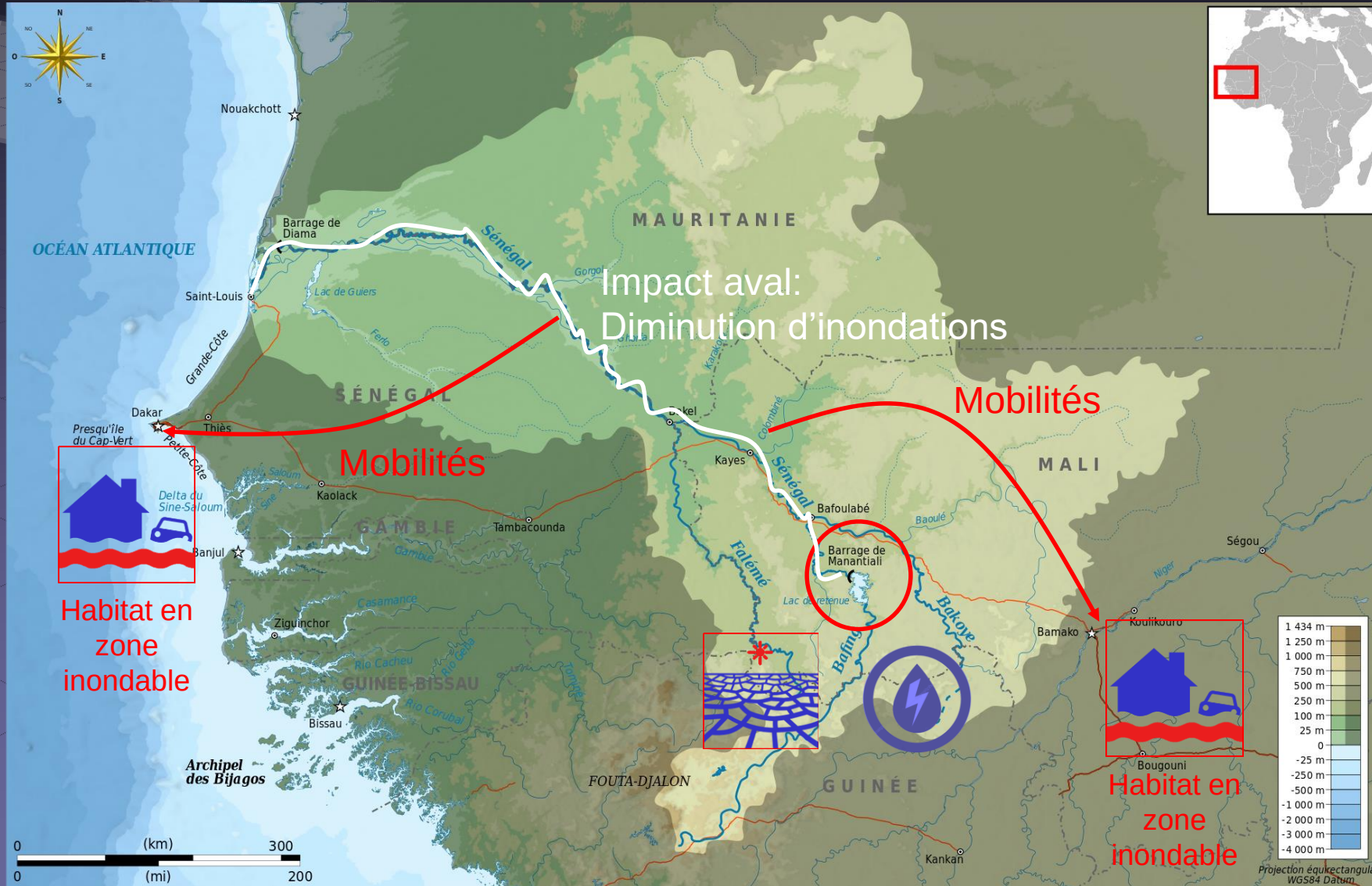
Source: DIENG (2013)

Fleuve Sénégal La brèche de Saint Louis

Remède pire que le mal:
salinisation des terres par
incursion d'eau de mer.

Effets inattendus

Barrage de Manantali



Comment les réservoirs accentuent les vulnérabilités aux sécheresses

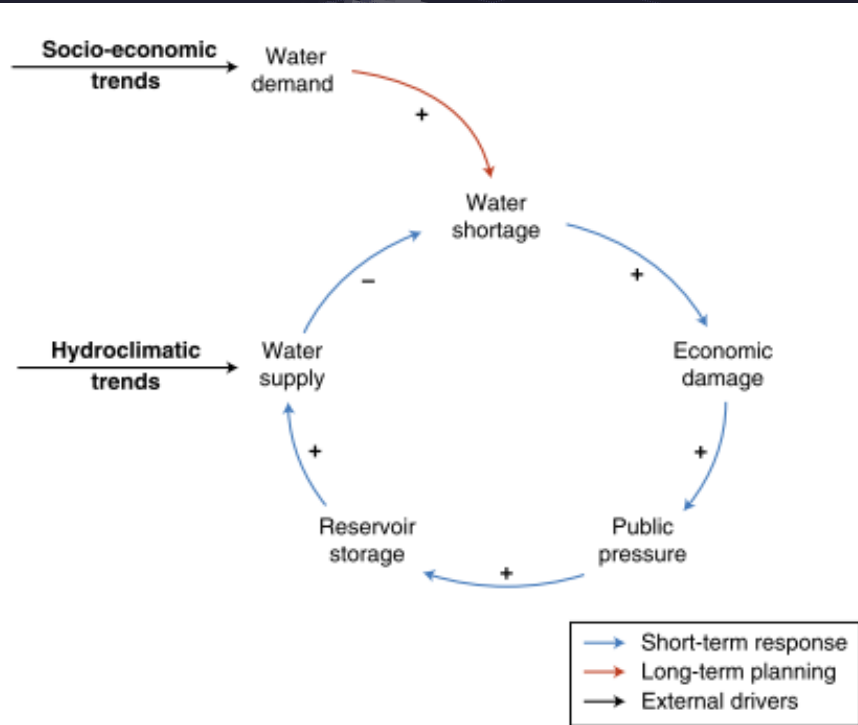


Fig. 1 | Water supply to cope with water shortage. The causal loop diagram shows the positive (+) and negative (−) feedbacks between physical, technical and social processes. This diagram is based on traditional approaches in water management and long-term planning that emphasize the role of external drivers of change (black arrows): socioeconomic trends influencing water demand and hydroclimatic trends influencing water supply.

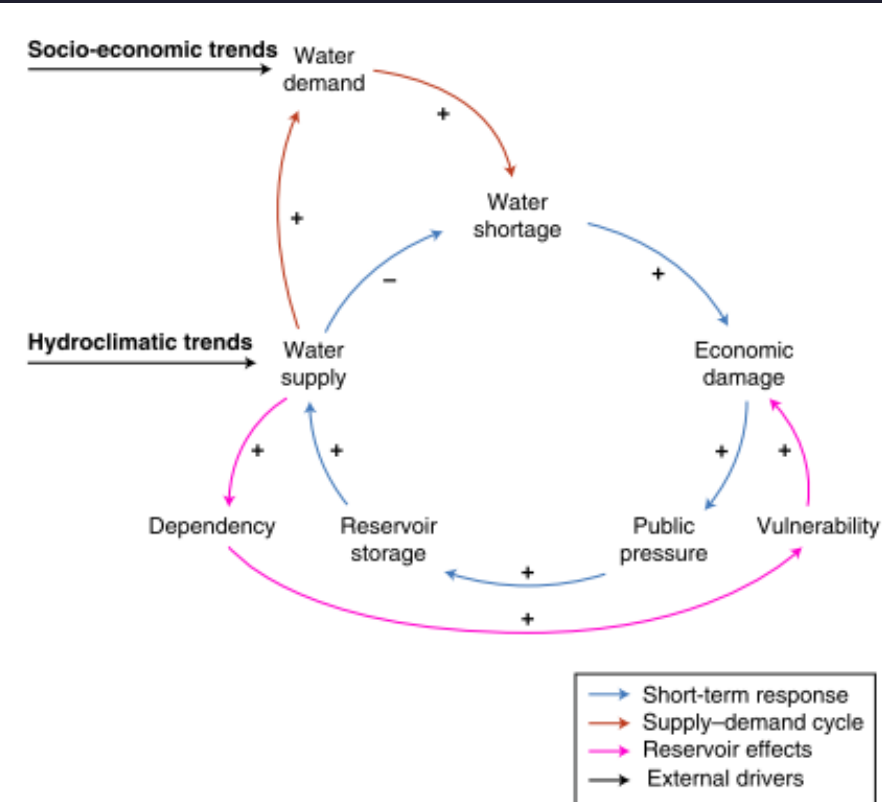
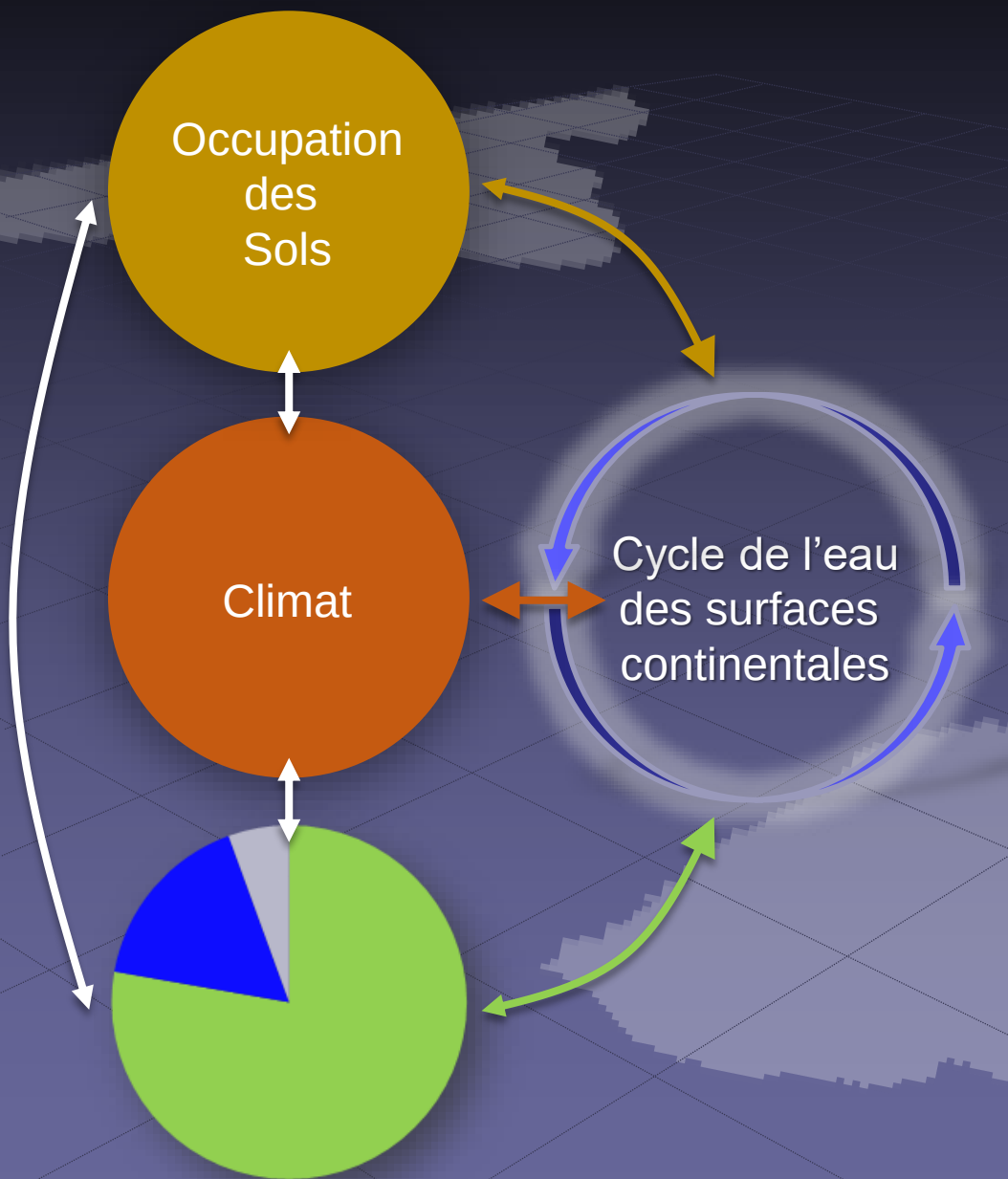
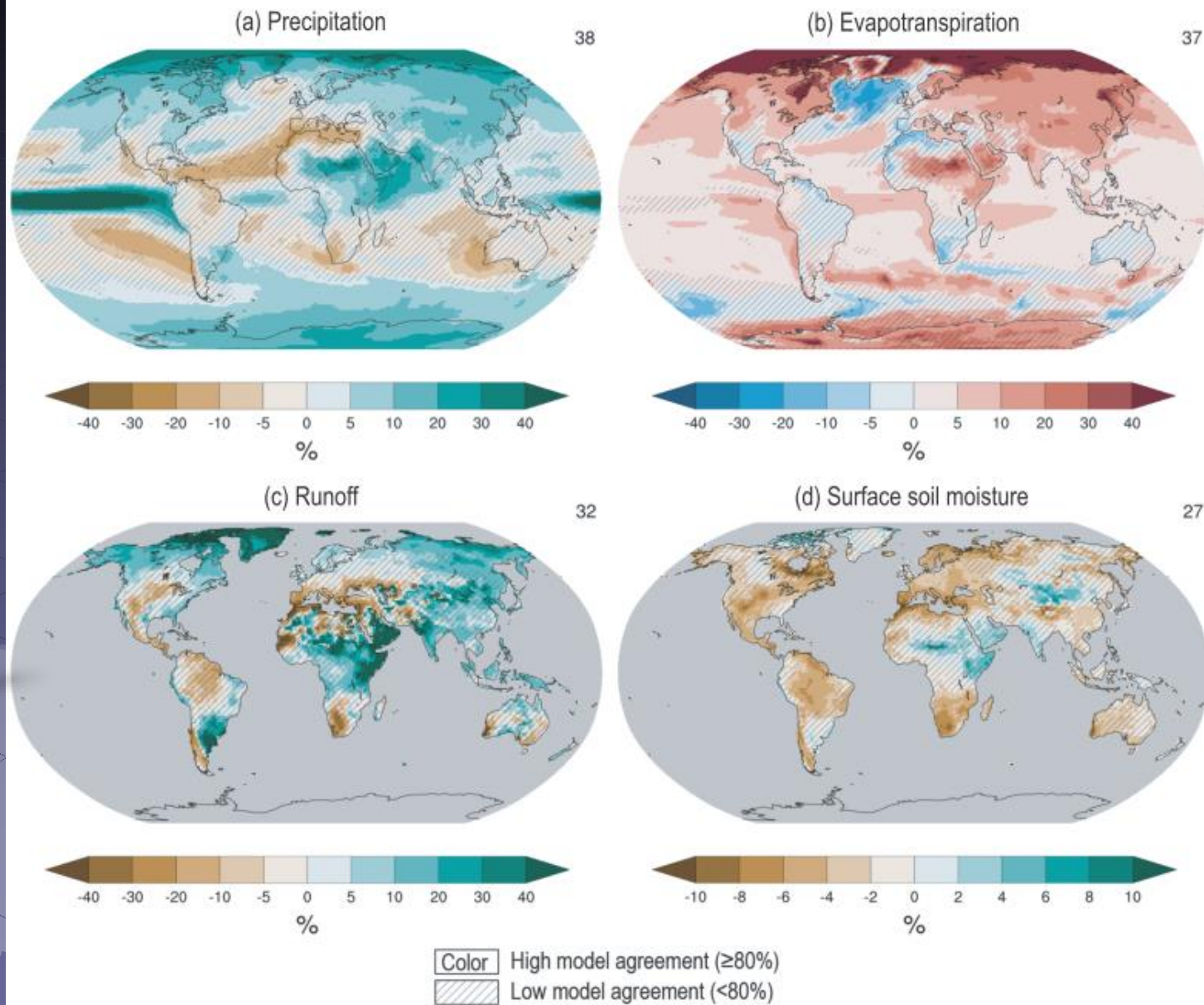


Fig. 2 | Water supply can worsen water shortage. The causal loop diagram shows the positive (+) and negative (−) feedbacks between physical, technical and social processes. Our hypothesis emphasizes the role of internal feedback mechanisms, and the potential emergence of long-term dynamics: supply-demand cycle (red loop) and reservoir effects (pink loop).



Long-term water cycle variables changes for SSP2-4.5 (2081–2100 vs 1995–2014)

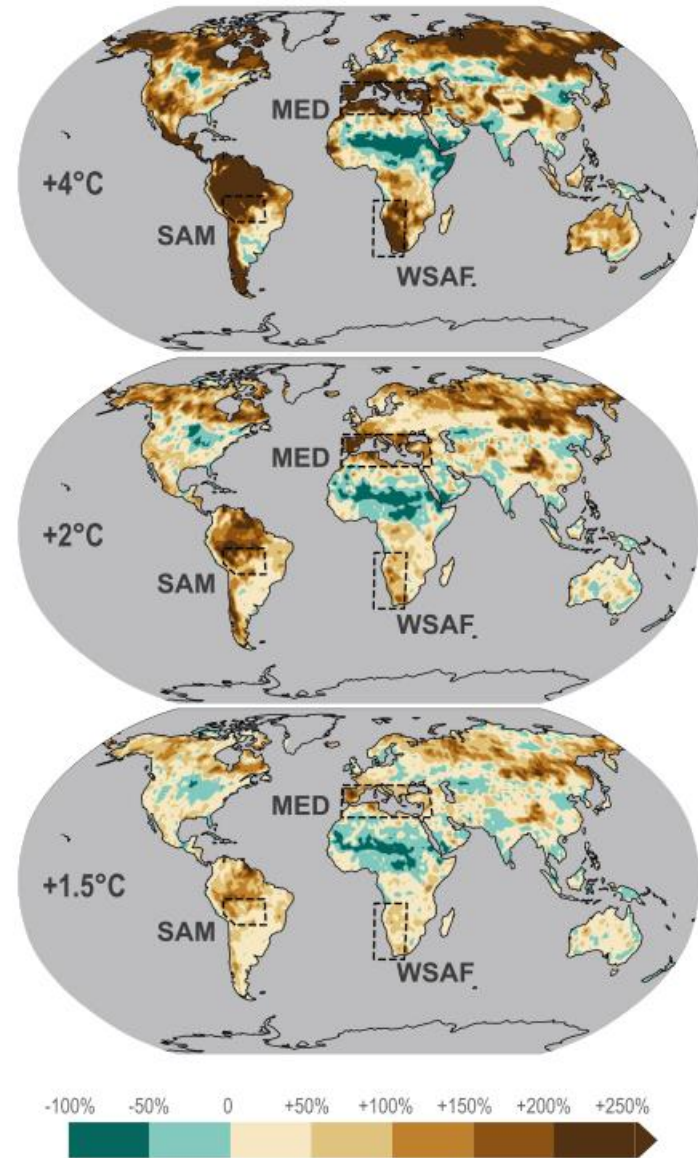


Quelques données supplémentaires

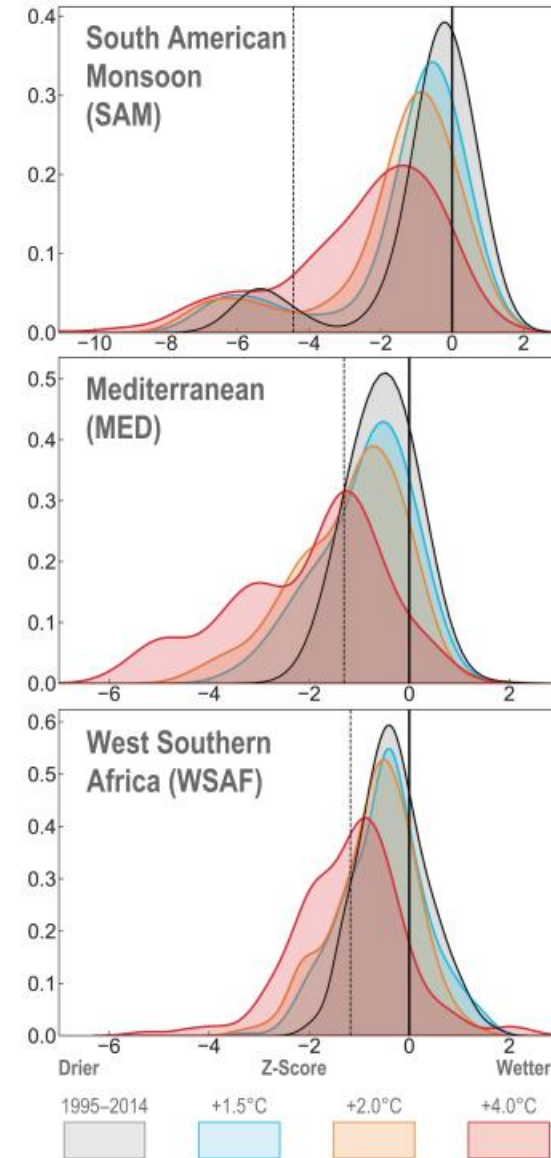


Projected changes in the likelihood of an extreme single-year agricultural (soil moisture) drought event

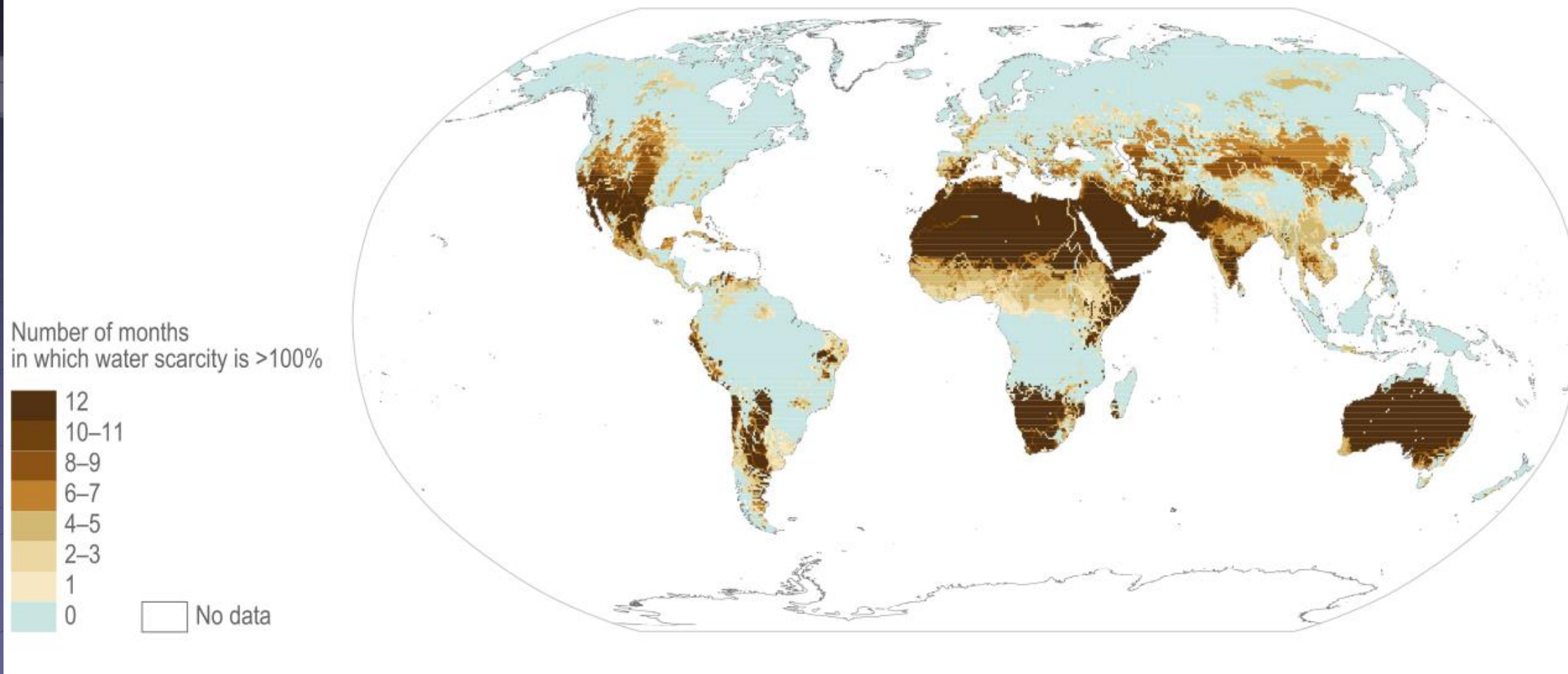
Changes in likelihood of extreme agricultural (soil moisture) drought years



Probability distribution of annual soil moisture anomalies



(a) Number of months per year with severe water scarcity



Agreement between different multi-model ensembles on significant changes in annual mean precipitation and annual maximum 1-day precipitation, at 2°C global warming

(a) Mean precipitation

(b) Extreme precipitation

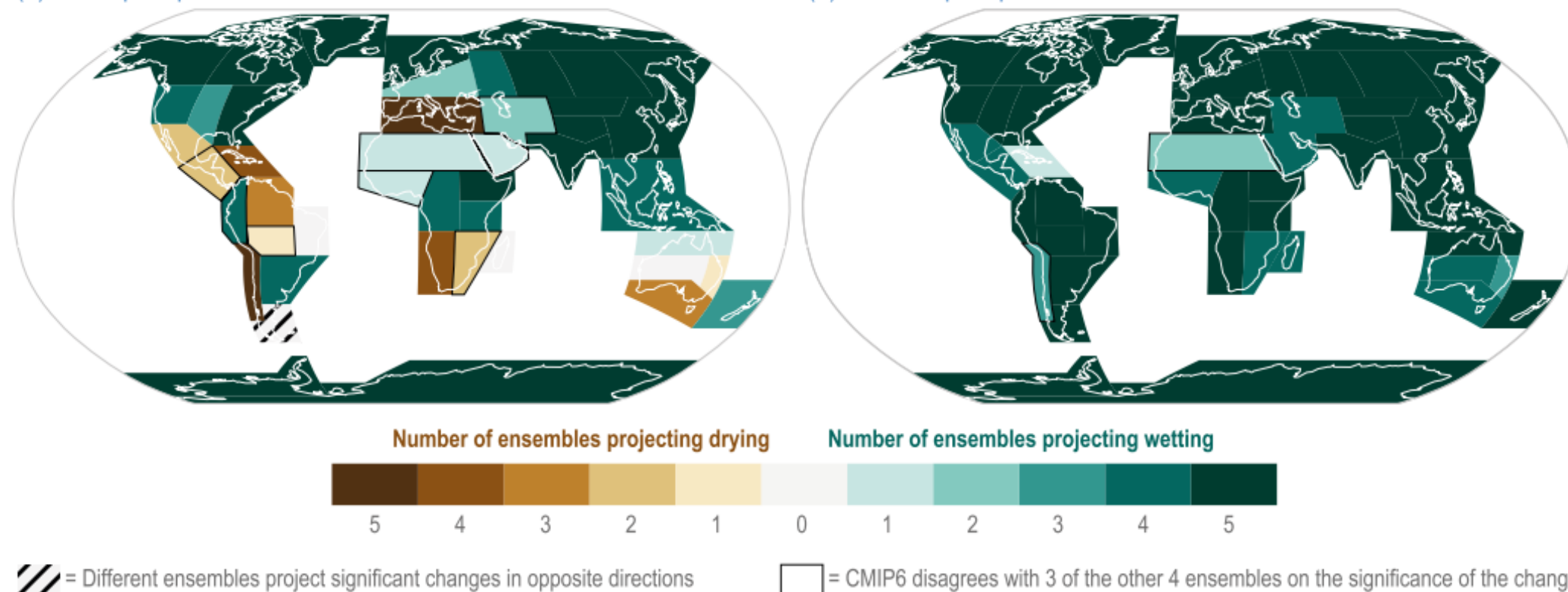
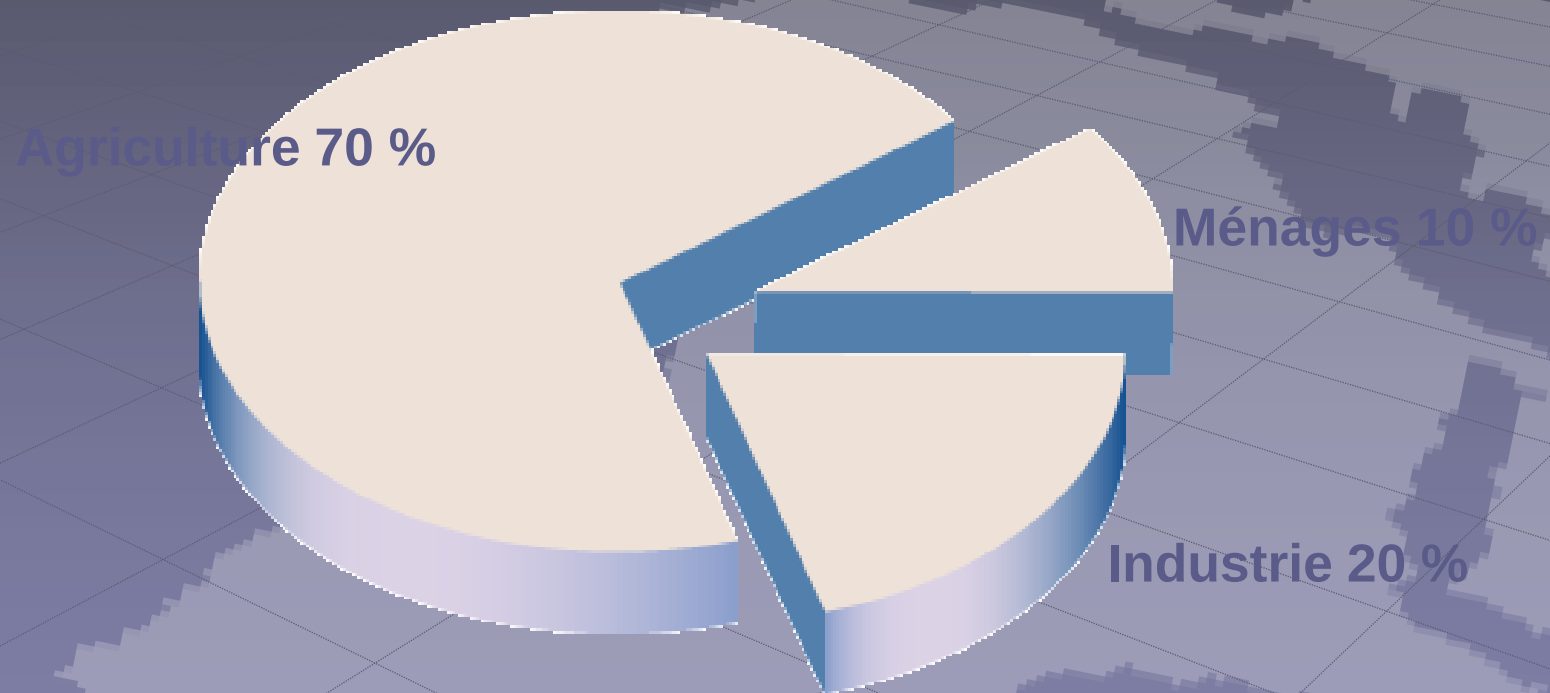
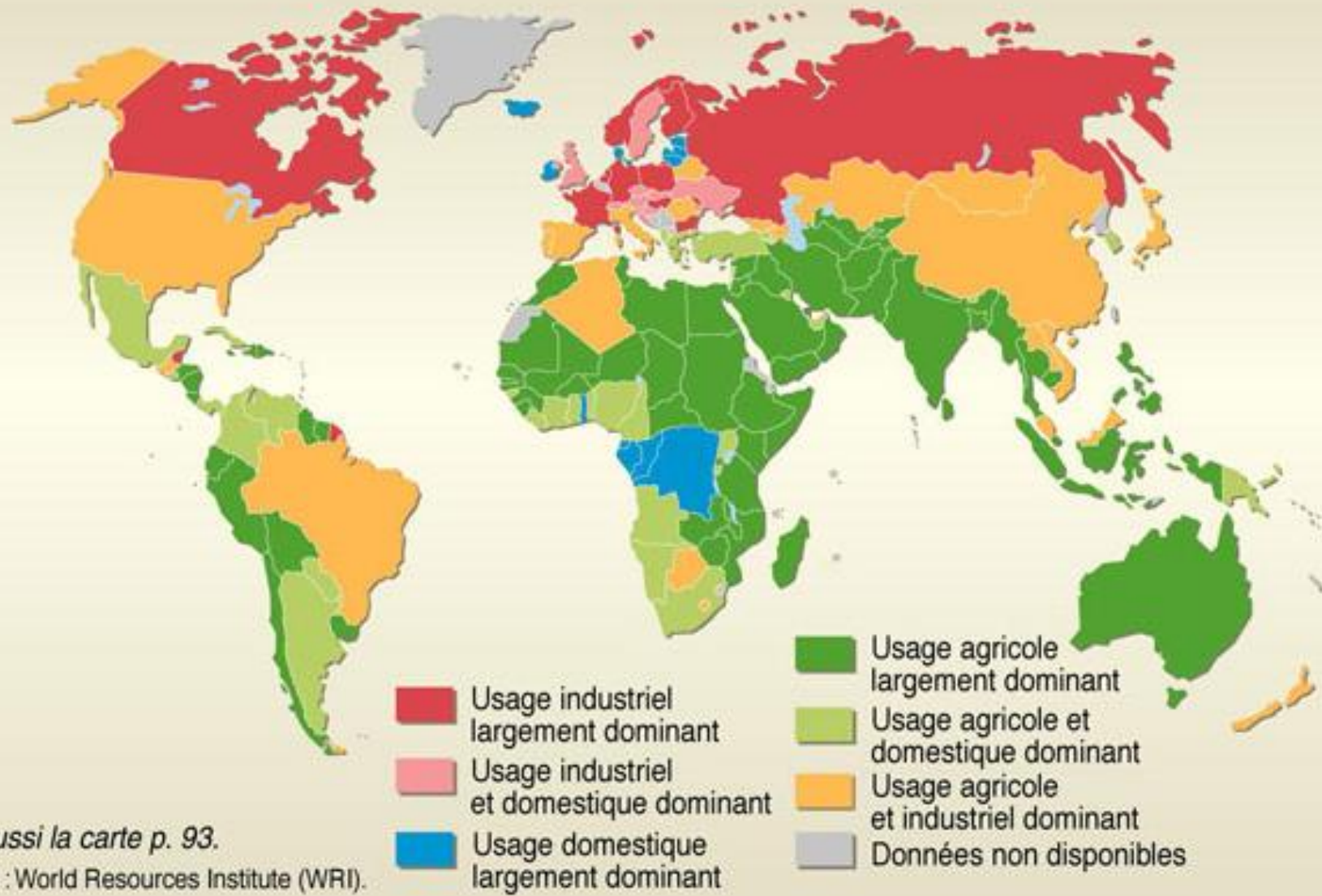


Figure 4.11 | Agreement between different multi-model ensembles on significant changes in (a) annual mean precipitation and (b) annual maximum 1-d precipitation (Rx1day) at 2°C global warming (Uhe et al., 2021). Using central estimates from five ensembles of climate models (CMIP5, CMIP6, HAPPI, HELIX and UKCP18) using different models and different experimental designs for the ensembles, the maps show the number of ensembles for which the central estimate shows a significant drying or wetting change at 2°C global warming relative to pre-industrial levels. The different ensembles reach 2°C global warming at different times. The projected changes are aggregated over the new climatic regions defined for IPCC AR6 (Iturbide et al., 2020). Hatched regions show where different ensembles project significant changes in opposite directions, i.e., there is no agreement on either drying or wetting. Regions with thick outlines are where CMIP6 disagrees with three of the other four ensembles on the significance of the change, highlighting where over-relying on CMIP6 alone may not fully represent the level of confidence in the projections.

En moyenne, à l'échelle planétaire (au début du 21^{ème} siècle) :

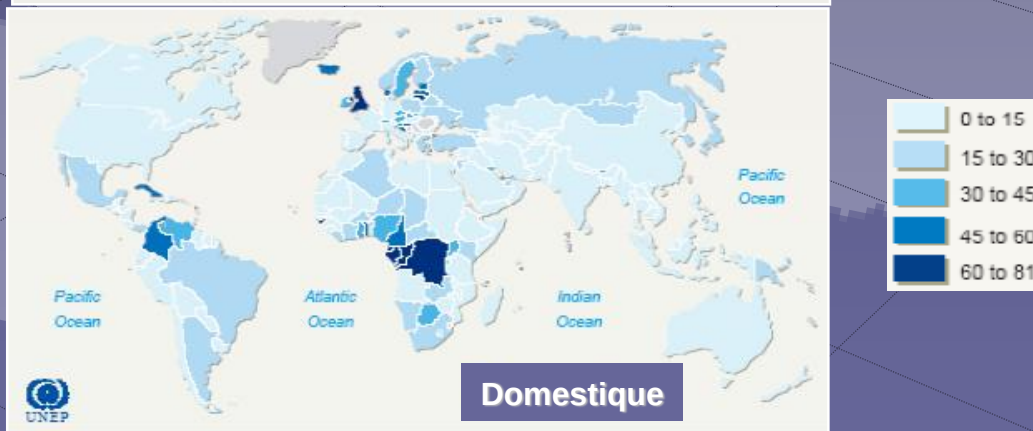
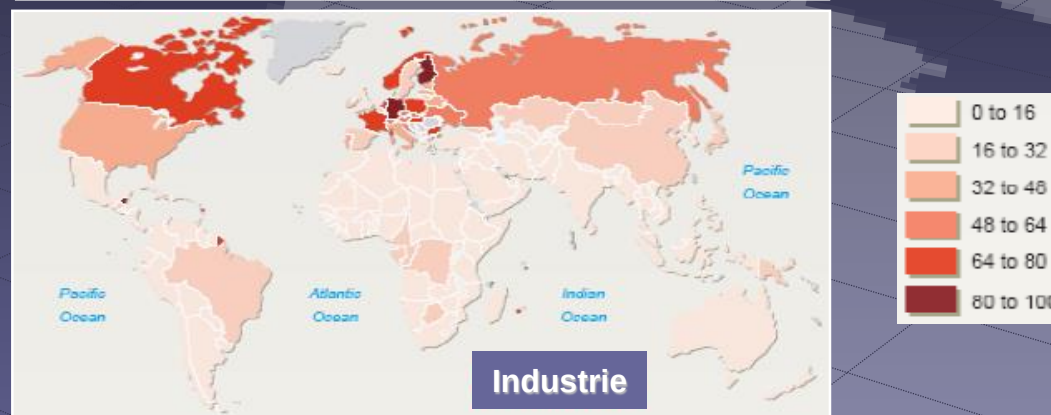




Voir aussi la carte p. 93.

Source : World Resources Institute (WRI).

**Part (en %) de
l'utilisation de l'eau
douce en fonction des
3 principaux secteurs
d'activités**



Un réchauffement intensifié

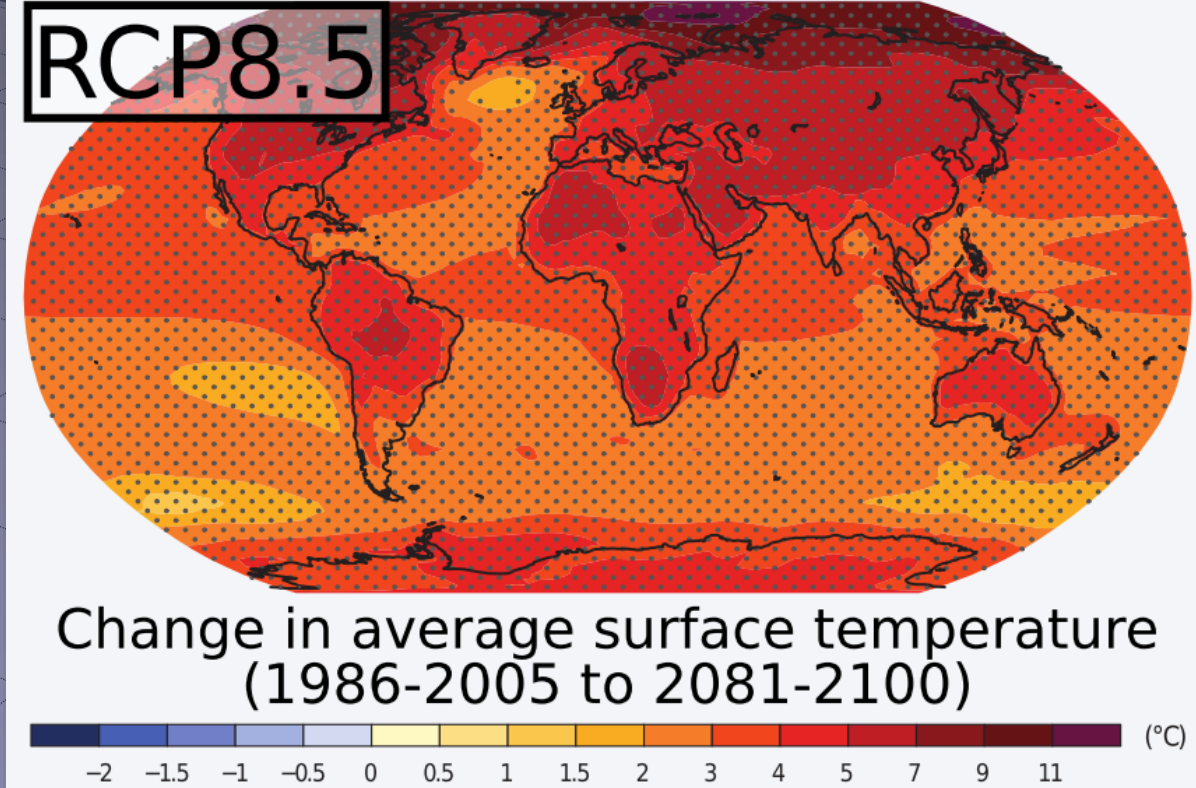
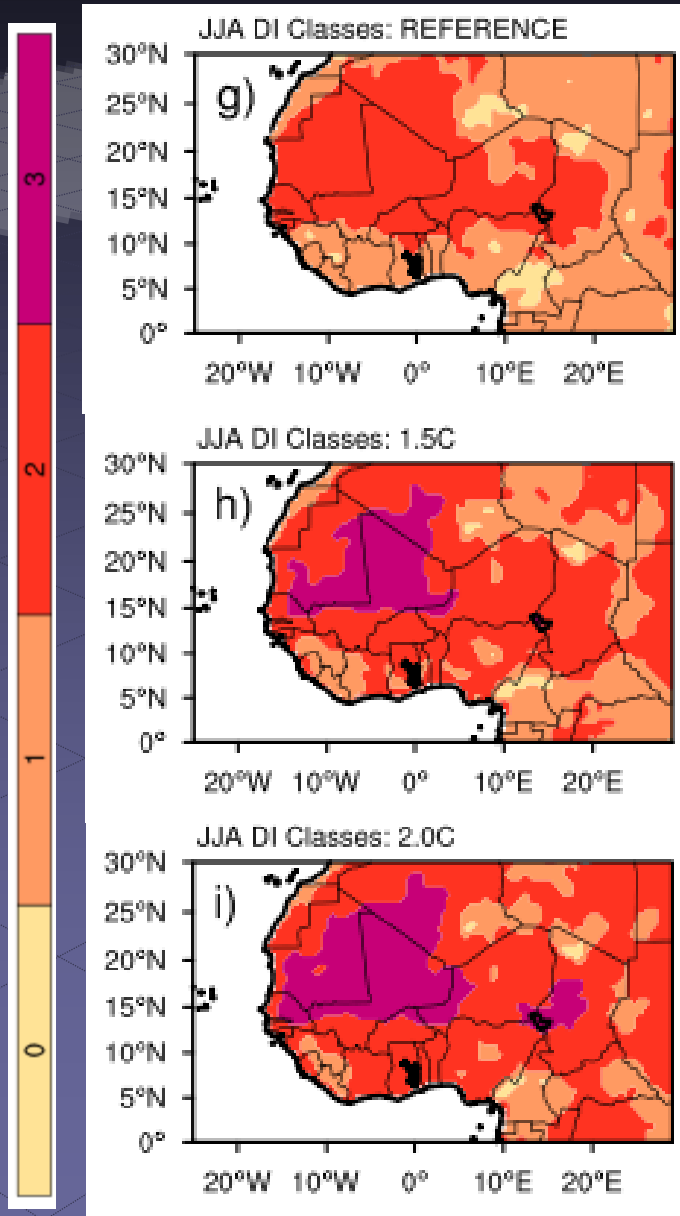
Impact sanitaire

~totalité pop
en souffrance thermique

>50% pop
en souffrance thermique

<50% pop
en souffrance thermique

Conditions thermiques
physiologiquement
acceptables



The background of the slide features a stylized world map in a light blue-grey color, overlaid on a dark blue background with a white grid pattern. The map is centered and shows the outlines of the continents. The text is positioned in the upper left quadrant of the slide.

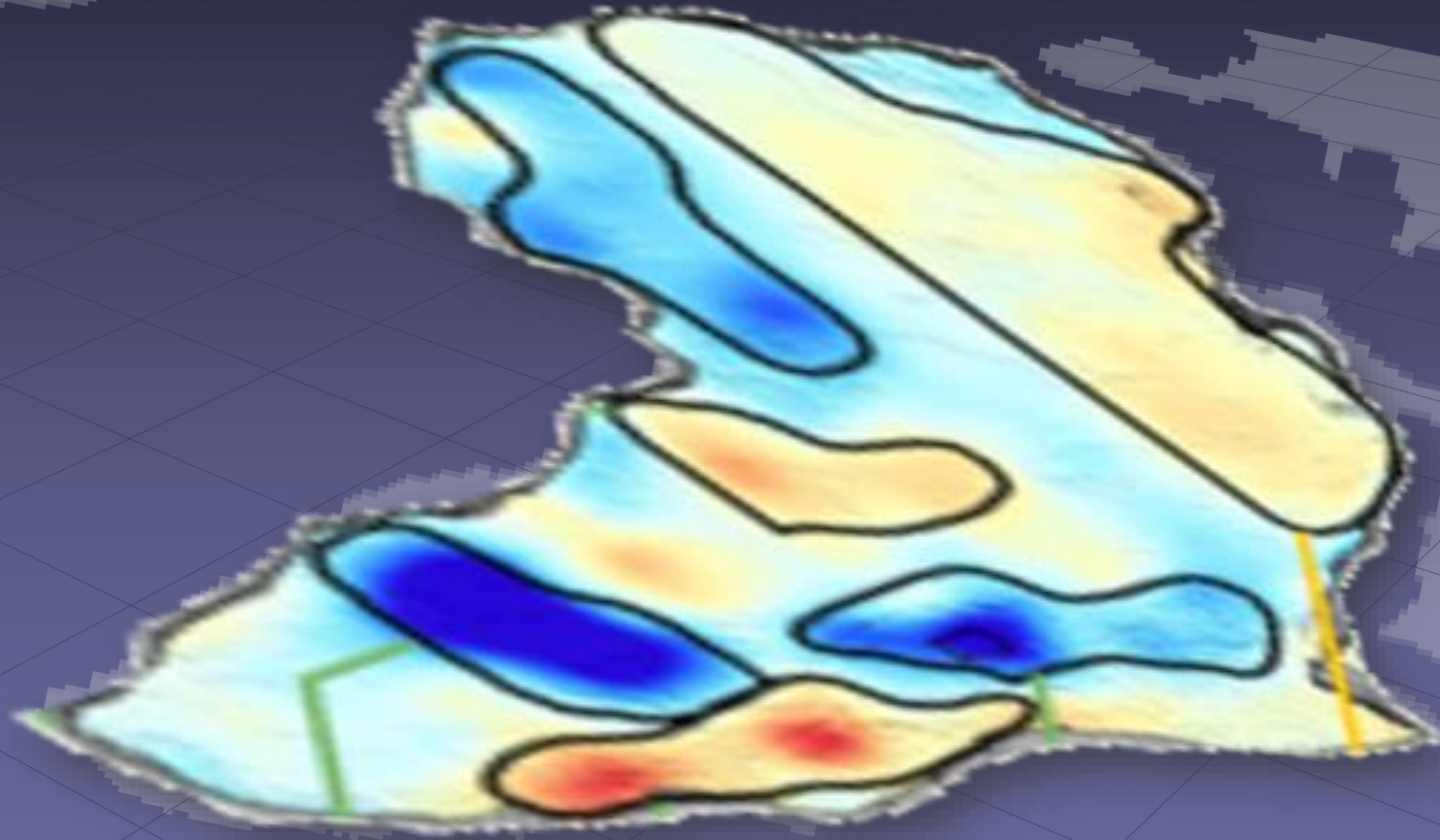
Défis d'adaptation ...

...des leviers possibles

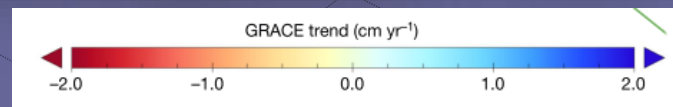
...des défis de connaissance

Des leviers possibles

Accès à l'eau: une ressource en eau souterraine existante

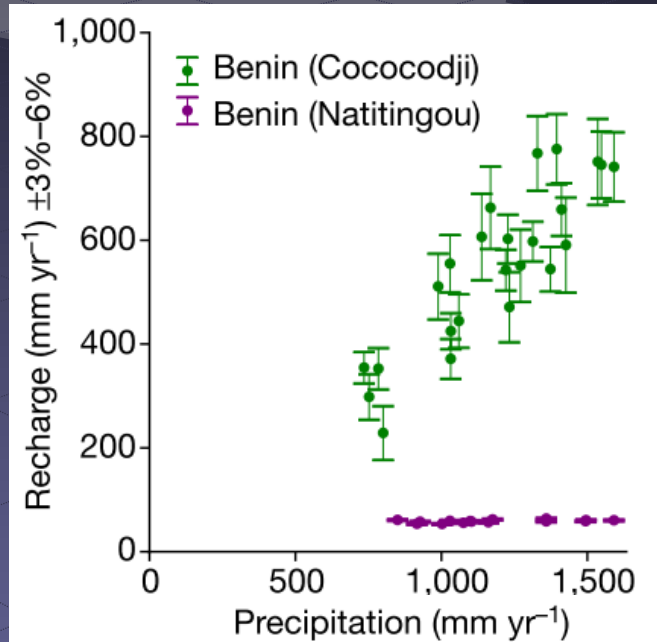


Rodell et al. 2018
(tendance 2002-2016)

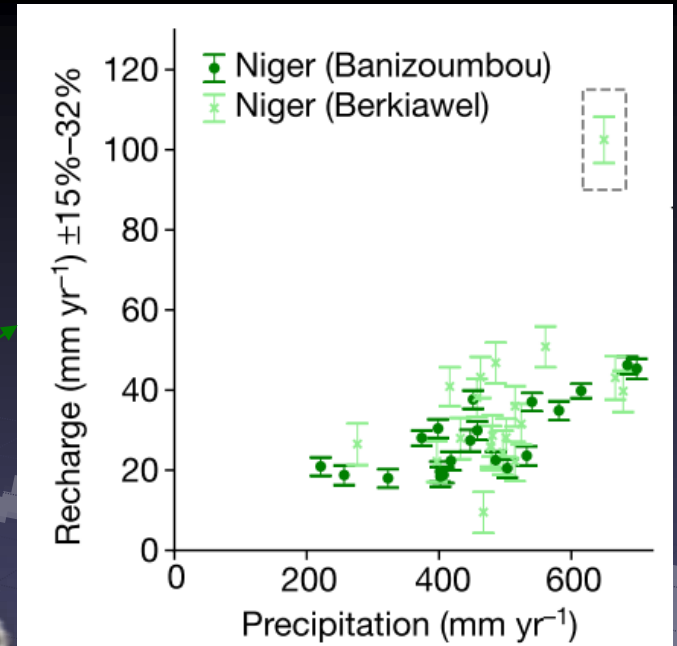


Des leviers possibles

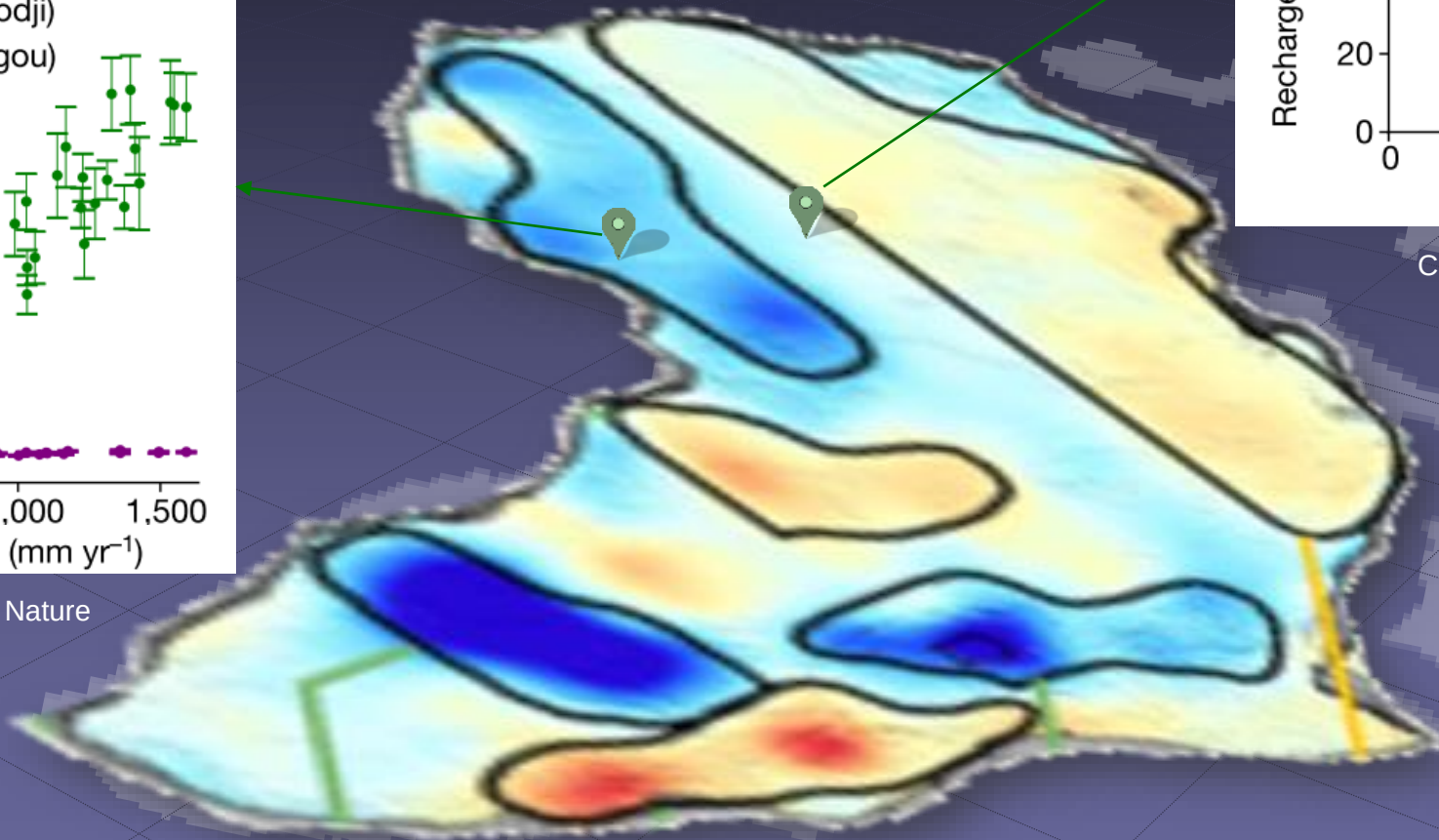
Accès à l'eau: une ressource en eau souterraine existante



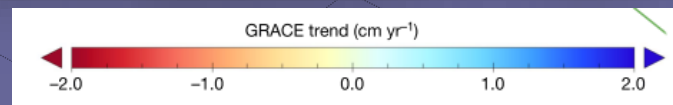
Cuthbert et al. 2019, Nature



Cuthbert et al. 2019, Nature

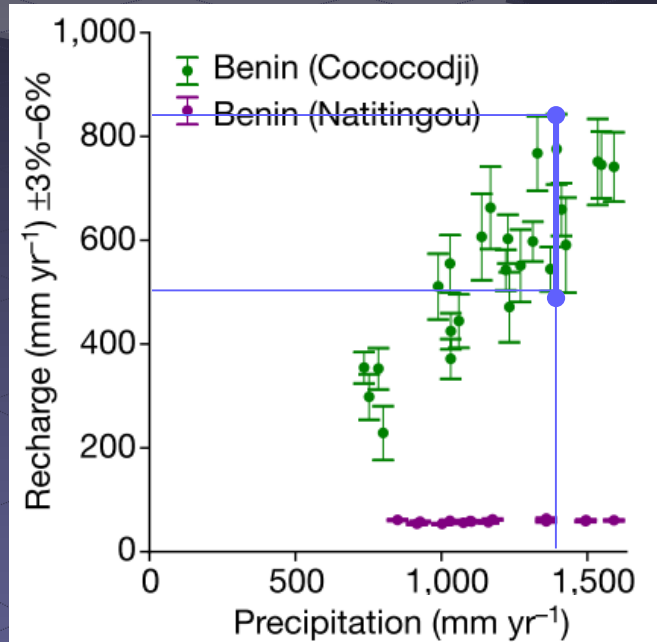


Rodell et al. 2018, Nature
(tendance 2002-2016)

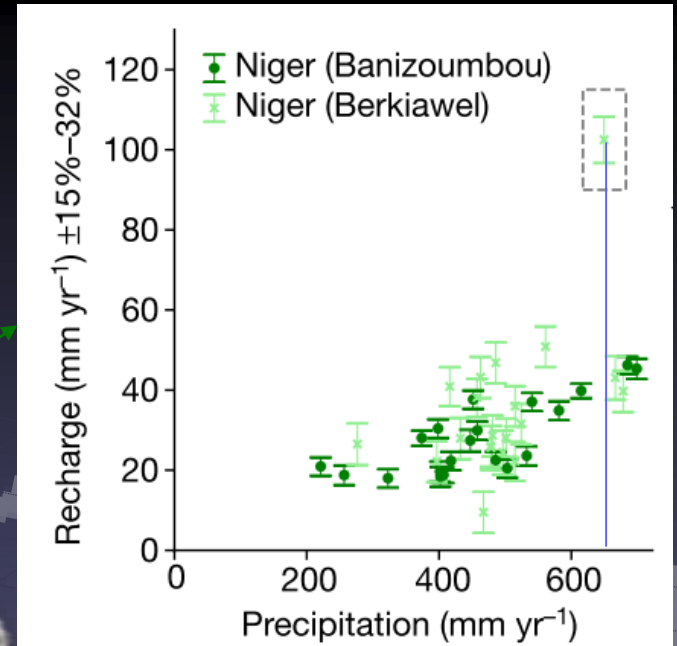


Des leviers possibles

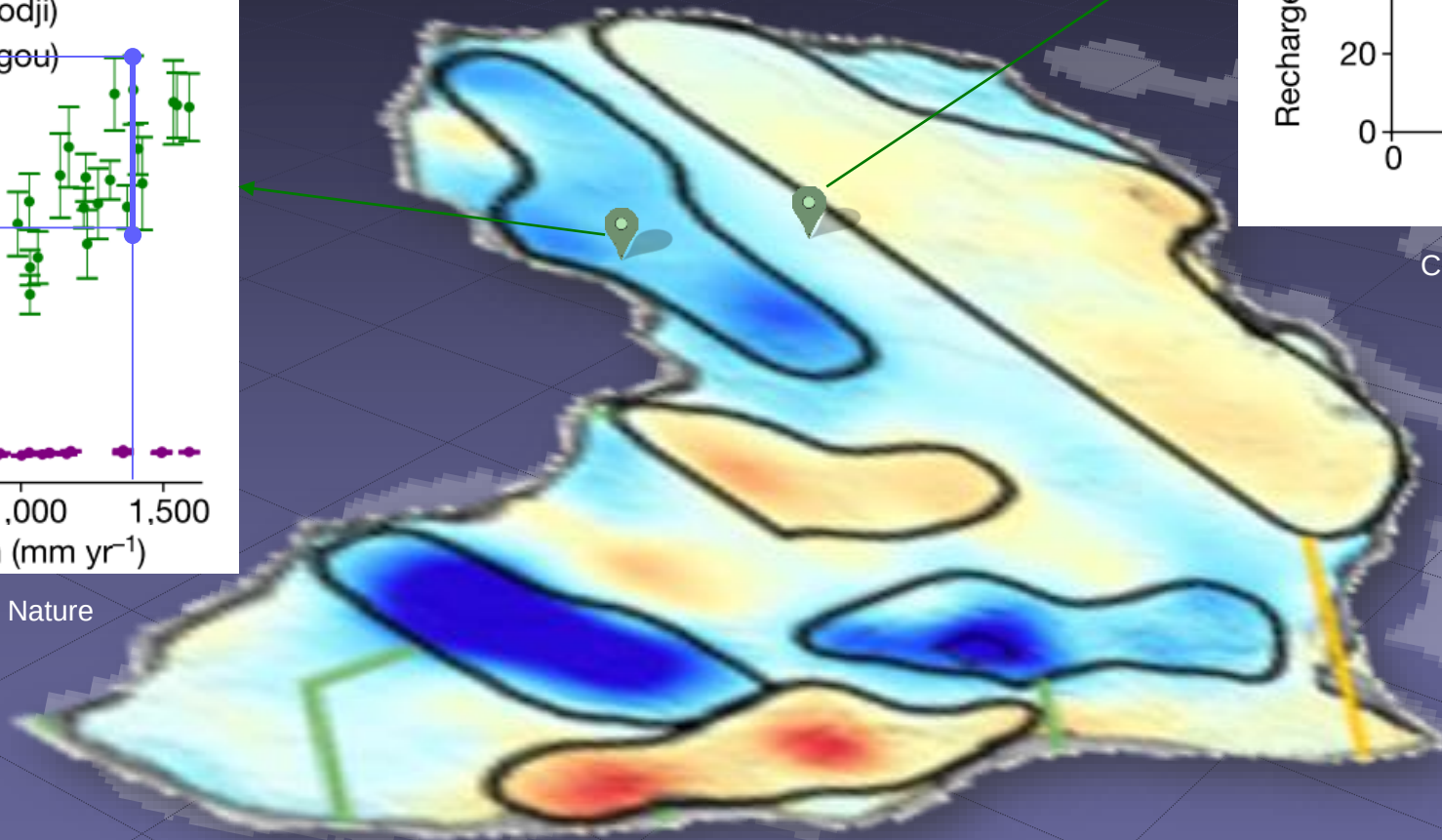
Accès à l'eau: une ressource en eau souterraine existante



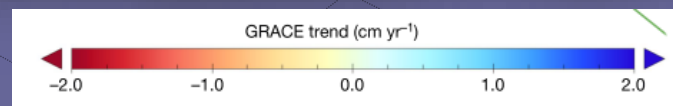
Cuthbert et al. 2019, Nature



Cuthbert et al. 2019, Nature



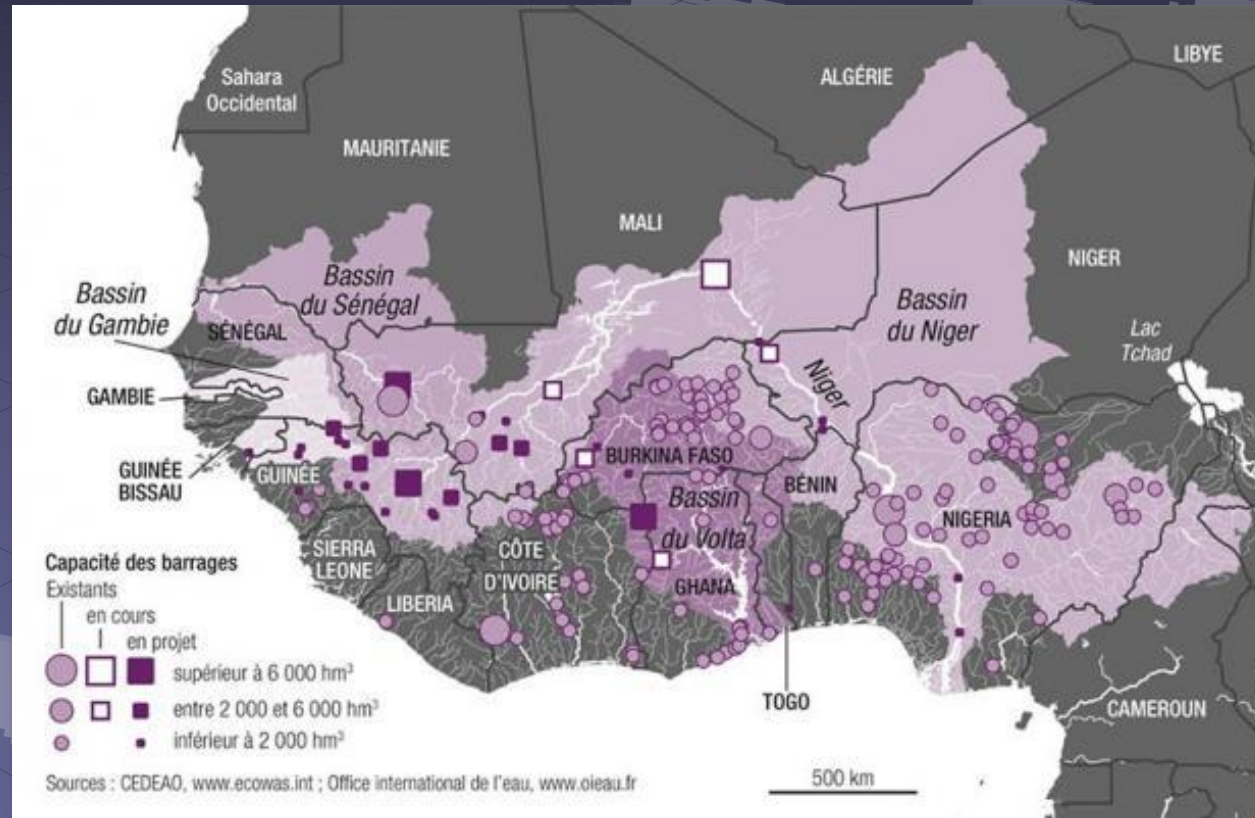
Rodell et al. 2018, Nature
(tendance 2002-2016)



Des leviers possibles et des opportunités

Des options pour mieux gérer les eaux de surface A l'échelle régionale

Barrages



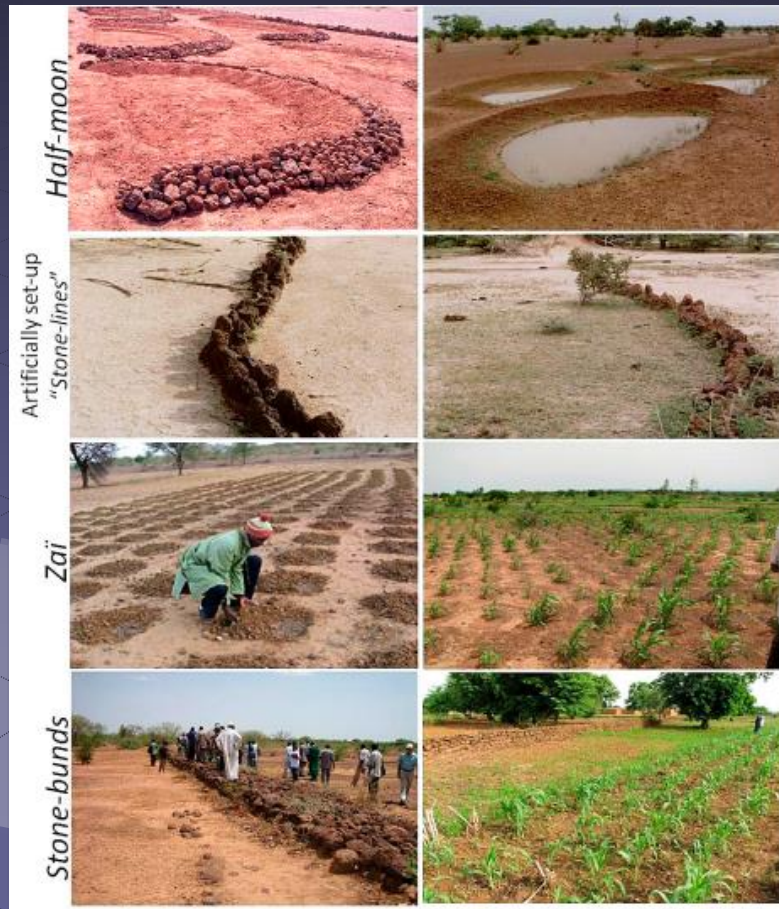
Des leviers possibles et des opportunités

Des options pour mieux gérer les eaux de surface

A l'échelle locale

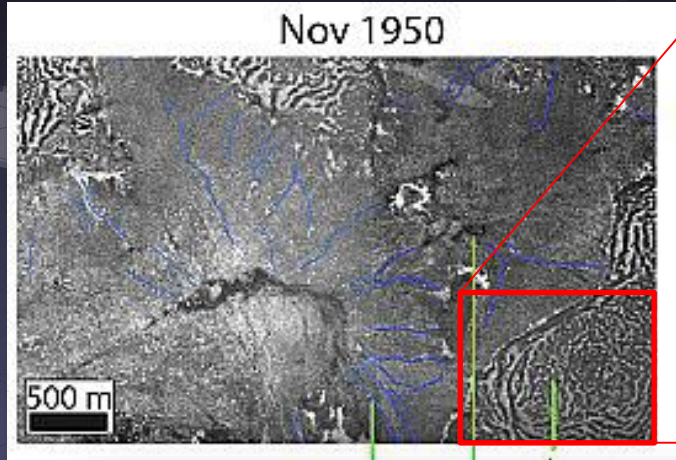
Réhabilitation des sols

Des avantages multiples



- Conservation des sols
- Lutte contre l'érosion
- Prévention des inondations
- Eau pour différents usages (bétail, cultures)

Des leviers possibles et des opportunités



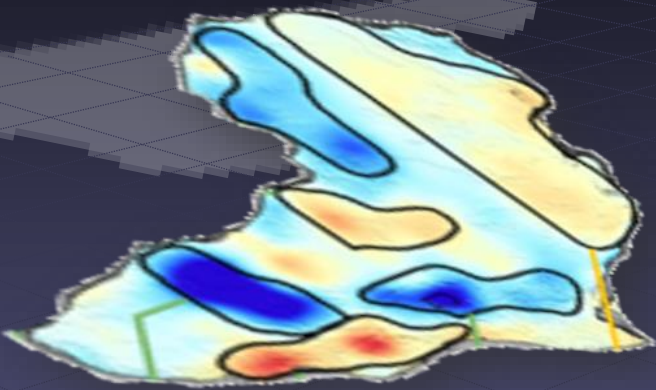
Banquettes



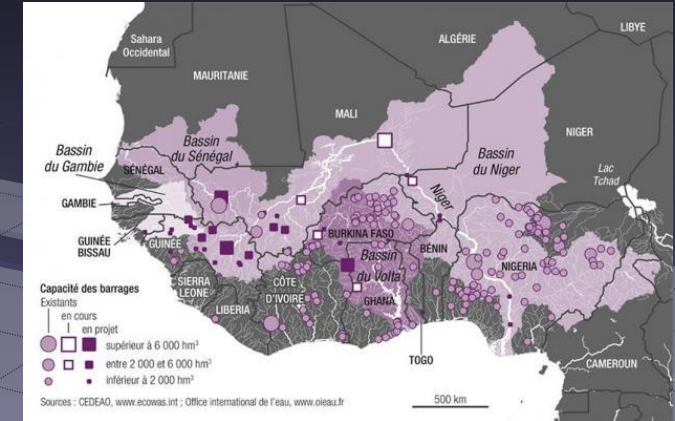
Demi-lunes

Défis de connaissances

Eau souterraine

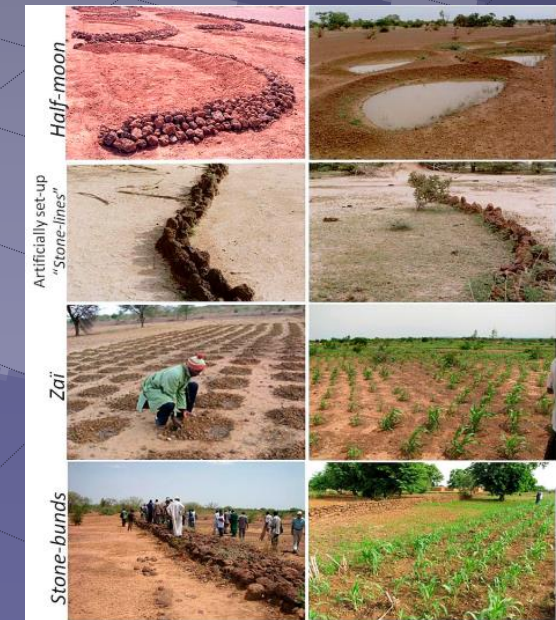


Eau de surface Barrages



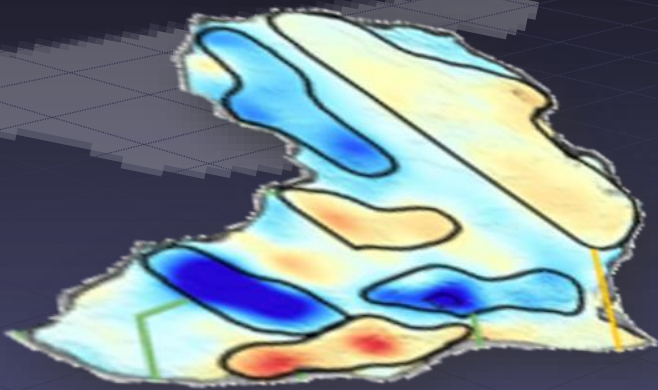
Ces leviers peuvent-ils répondre
au défis des modifications en
cours et à venir ?
→ *Evaluer les opportunités et les
risques*

Réhabilitation des sols



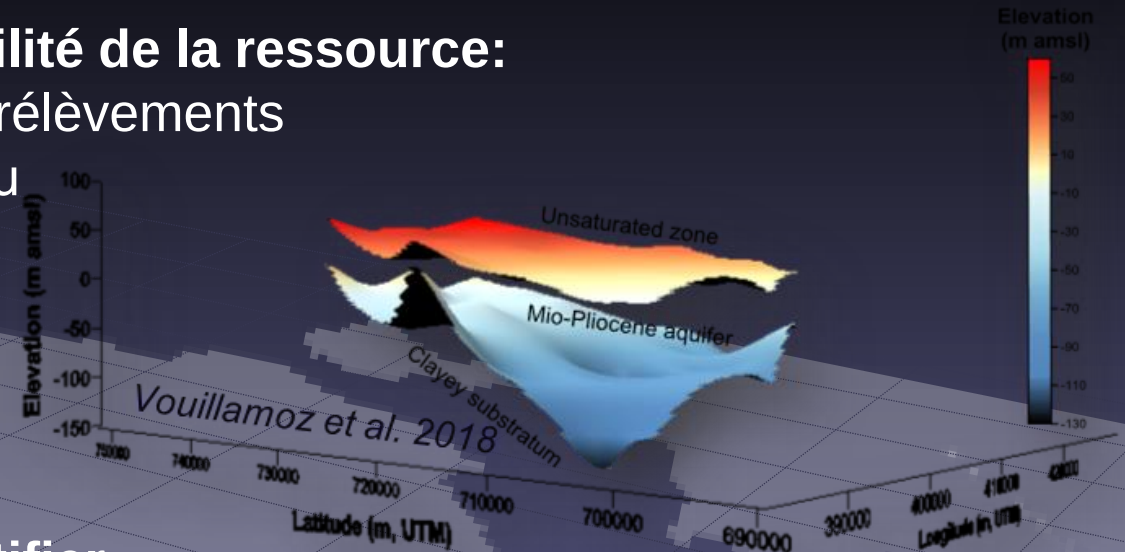
Défis de connaissance

Eau souterraine



Evaluer la durabilité de la ressource:

- Recharge vs prélèvements
- Qualité de l'eau



Mesurer et quantifier:

- Nouvelles techniques géophysiques
- Nouveau modèles numériques

Optimiser les prélèvements:

- Réduire le nombre de forages secs
- Obtenir des puits durables



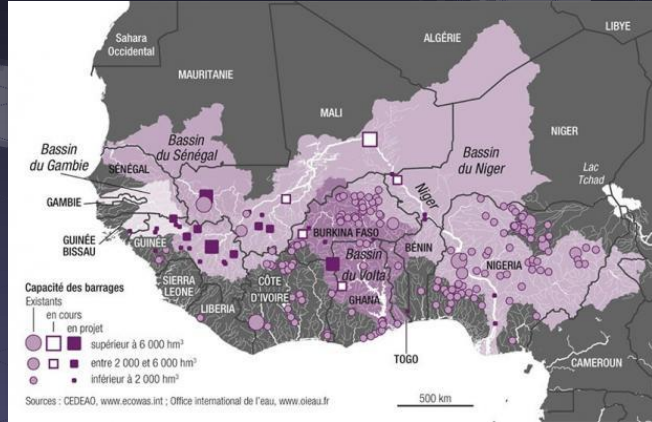
Puits défaillant : pas assez d'eau au regard de la demande, puits asséché...



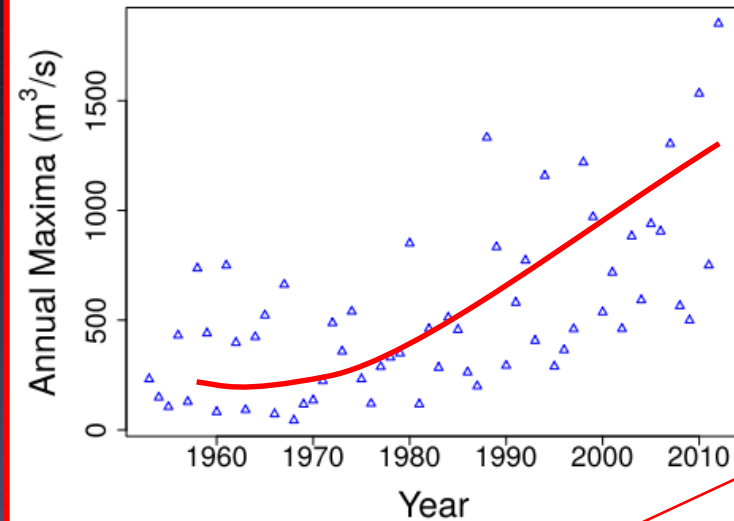
Puits qui fonctionne : quantité et qualité de l'eau en adéquation avec la demande domestique

Défis de connaissance

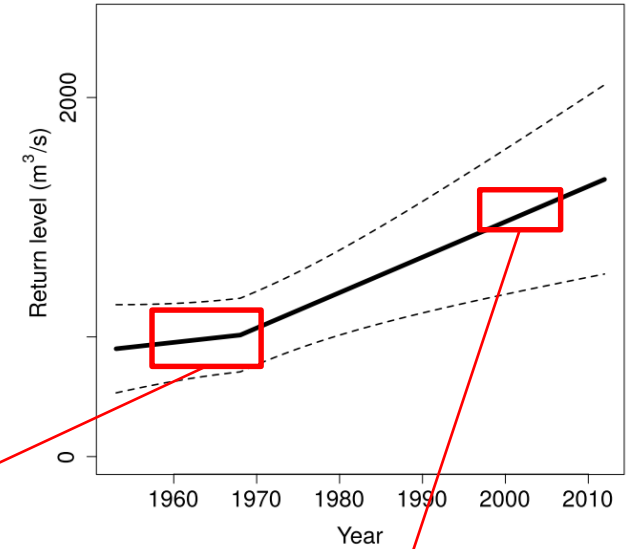
Eau de surface Barrages



Sahelian Niger River



Niger Sum 10-year level



Comment dimensionner
les ouvrages dans un
contexte climatique et
environnemental qui
change?



Normes
Hydrologiques
Années 1970



Burkina Faso (# 2000),
Courtesy J.M. Paturel

Des ouvrages
sous-dimensionnés!

Défis de connaissance

Eau de surface

Réhabilitation des sols



Mesurer



Analyser et comprendre

Les petits aménagements
peuvent-ils avoir de grands
effets?

