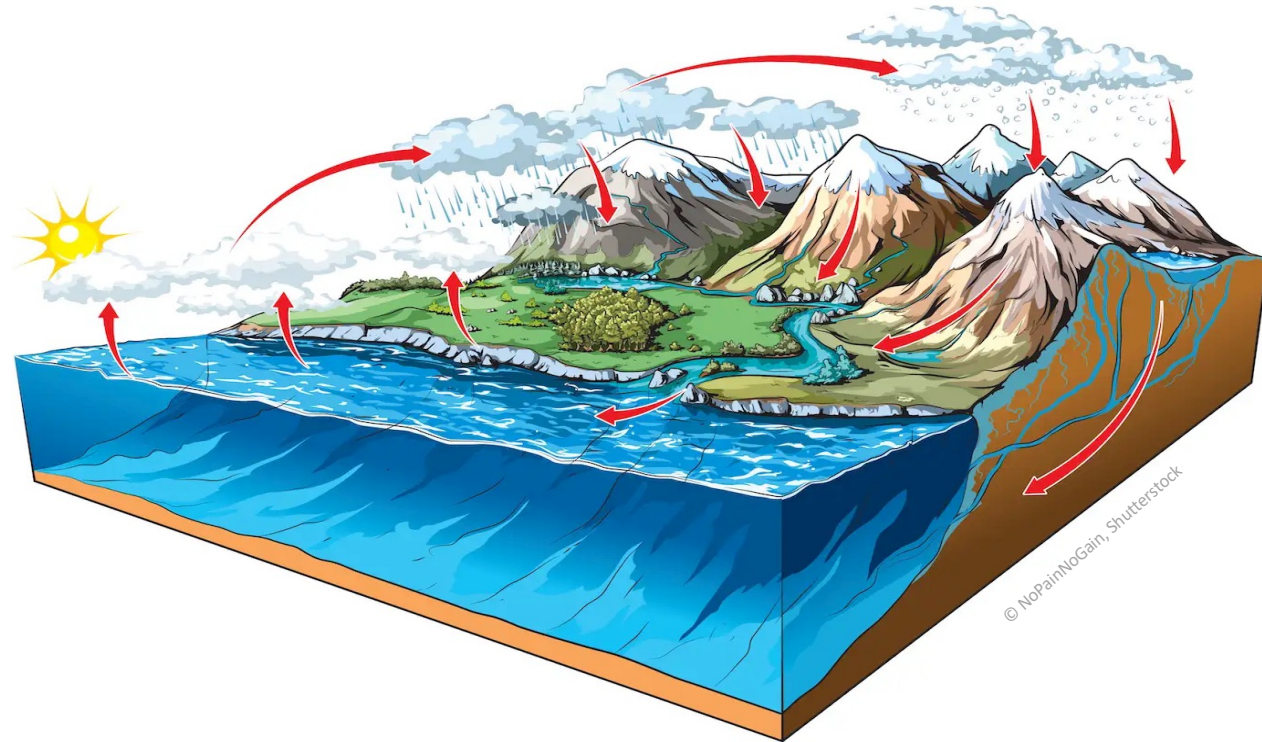


Cycle et flux de l'eau à large échelle - Eau verte/Eau bleue et Forêts ...

Claude Doussan
UMR EMMAH - Avignon



Journées « Forêt, sol et eau, des alliés naturels » - organisée par Forêt Méditerranéenne – Avril 2023



Cycle de l'eau : Un concept très ancien ... Mais toujours remodelé jusqu'à nos jours !

Evoqué dès ~ -600 BC en Asie (Chine) et en Grèce, par ex. Aristote (env. -330 BC) :

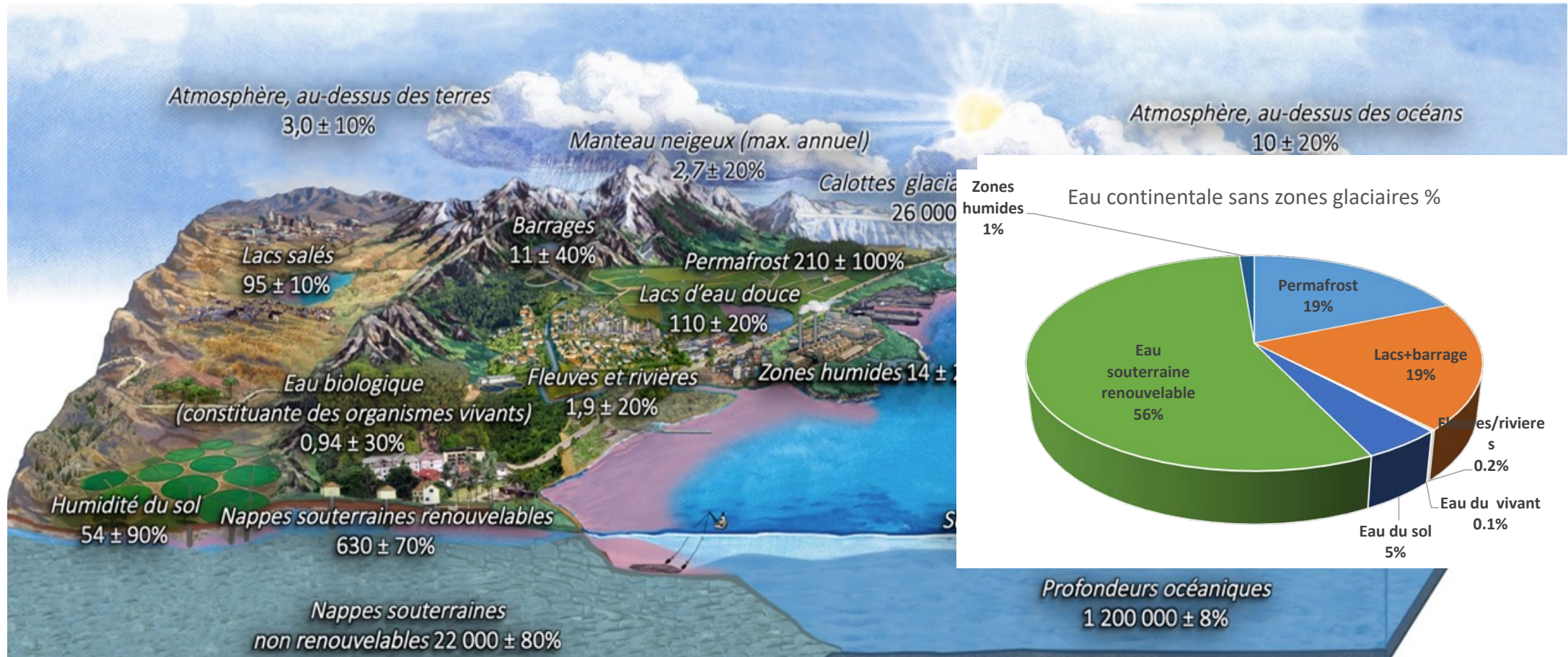
« Le soleil, en se déplaçant comme il le fait, déclenche des processus de changement, de devenir et de décomposition, et par son intermédiaire l'eau la plus fine et la plus douce est chaque jour transportée et se dissout en vapeur et s'élève jusqu'à la région supérieure, où elle est condensée à nouveau par le froid et retourne ainsi à la terre ».

Concept qui a évolué dans « l'ère moderne » en prenant en compte :

- Des temps longs : cycle profond, géologique (i.e. tectonique, volcanisme) ; perte d'eau de la terre sur 4 Milliard d'années,
- L'effet de la biologie et de l'homme sur ce cycle.

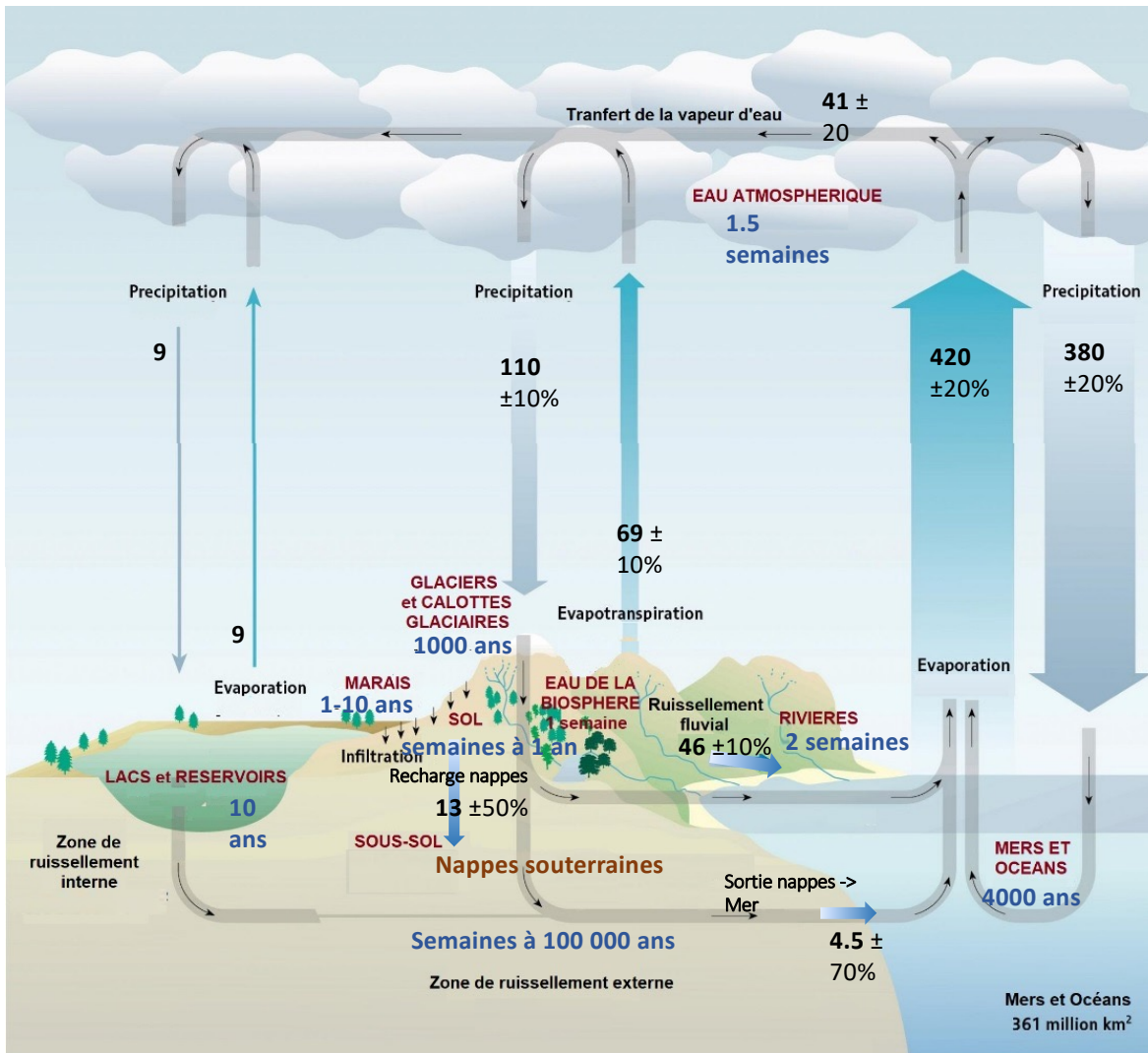
Cycle de l'eau : 1/ Ou est l'eau ?

Valeurs en milliers de km³, ± incertitude en %



Abbott B.W. et al., Corner D., 2019, Nature Geoscience

Cycle de l'eau : 2/ les flux d'eau et son cycle ... sans l'homme

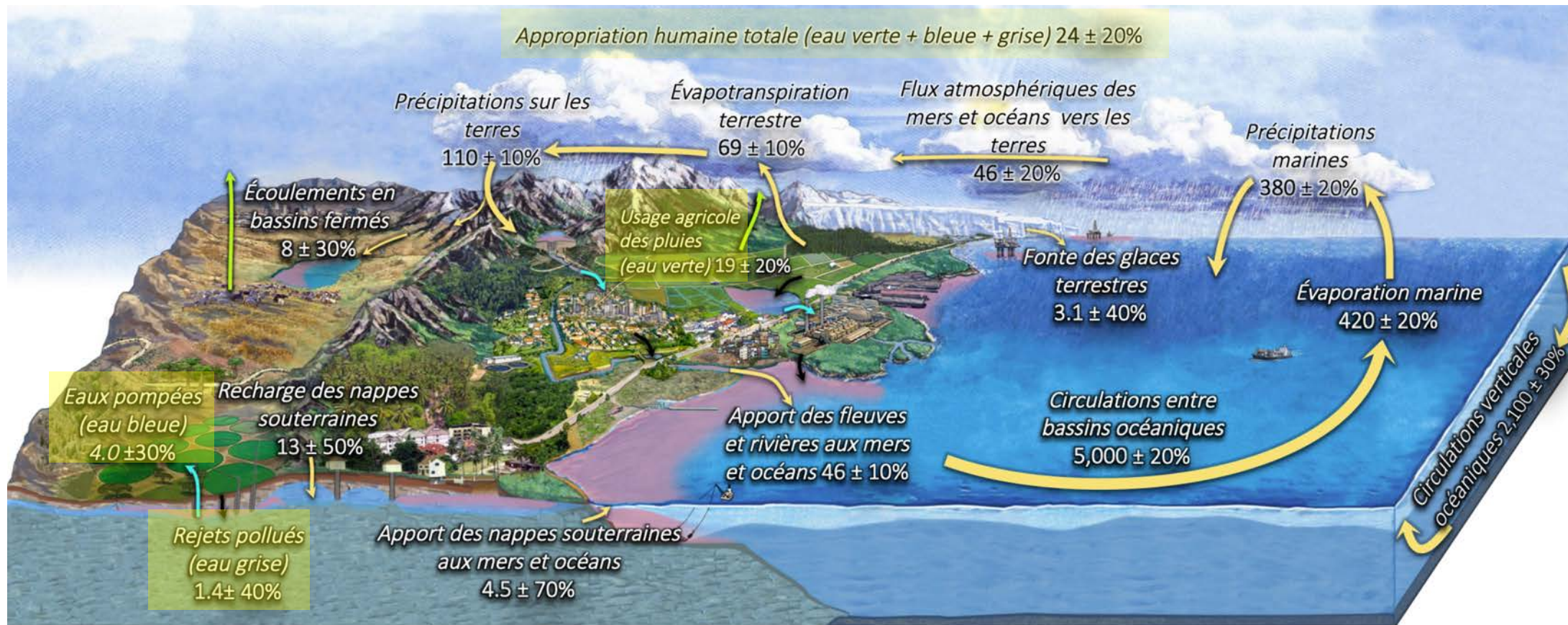


Valeurs en milliers de km³/an, ± incertitude en %

- 90% de l'évaporation marine retourne à la mer en précipitations et seul 10% humidité océanique précipite sur les terres
- ~63% précipitation terrestre retourne à l'atmosphère = Evapotranspiration (sol+plantes). 65% évapotranspiration = transpiration
- ~35% précipitations retournent à la mer par ruissèlement rivières et exutoires nappes souterraines.
- ~60% des précipitations continentales viennent de l'évapotranspiration => recyclage humidité (90% en forêts tropicales humides)
- Variabilité des flux suivant la position : de l'équateur aux pôles (climat/biomes)...

Cycle de l'eau : 3/ les flux d'eau et son cycle ... Avec l'homme

Valeurs en milliers de km³/an, ± incertitude en %

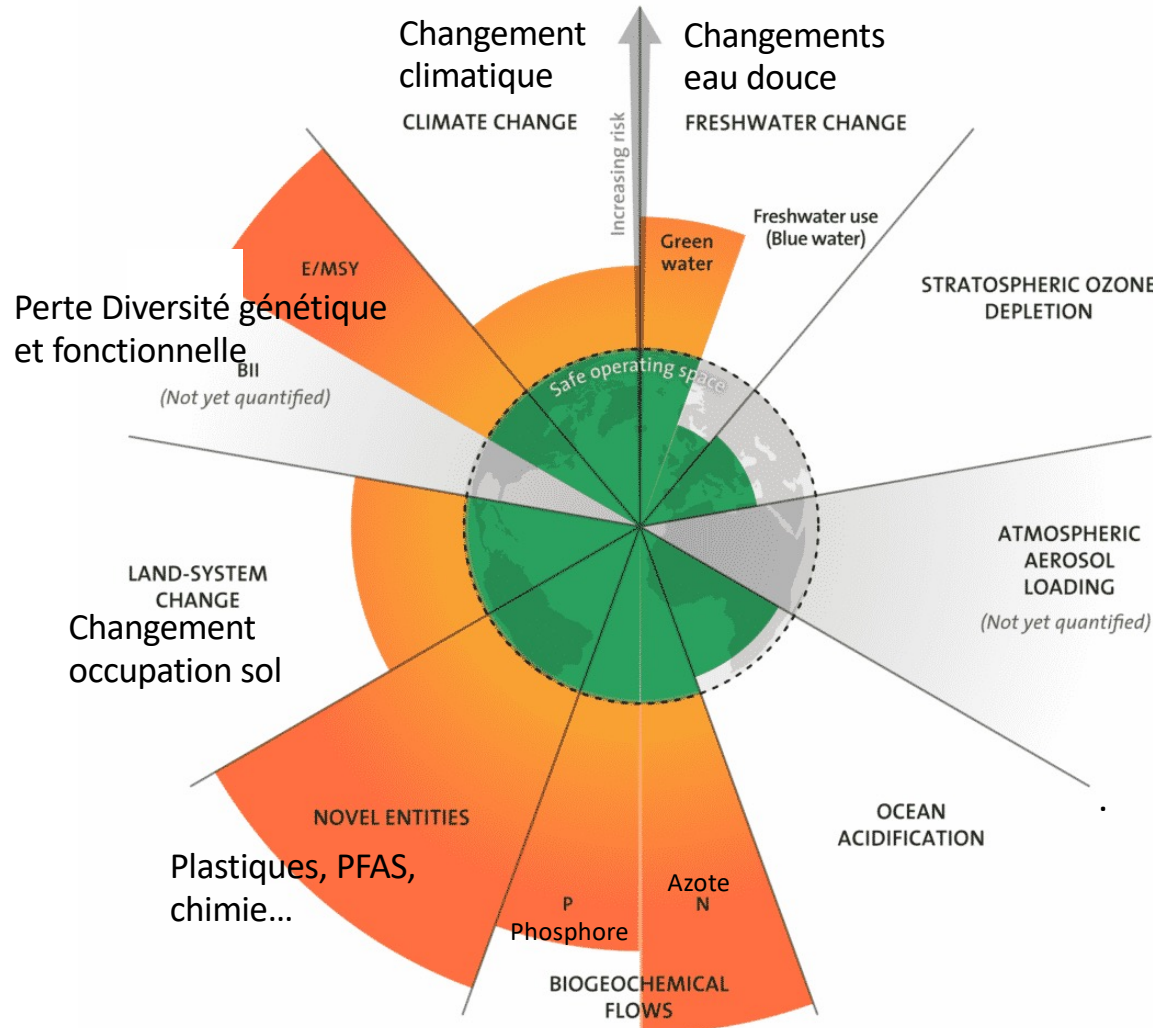


Appropriation humaine représentée par l'utilisation d'eau verte , bleue  et grise 

Abbott B.W. et al., Corner D., 2019, Nature Geoscience

- ➔ Utilisation Eau par l'homme ~ 1/4 des précipitations ; ~ 1/2 de l'eau circulant dans les rivières du monde entier !!
- ~ 70% utilisé pour l'agriculture - Une partie du cycle continental « détourné » de fonction par activité humaine...

Cycle de l'eau : 4/ Dépassement partiel de la limite planétaire portant sur l'eau douce



- Eau verte (=eau du sol) mondiale hors de sa zone de variabilité historique naturelle
- Sol anormalement sec ou trop humides de plus en plus courants
- Ex. Amazonie dont des parties sèchent => savanne
- Déforestation, changement utilisation terres



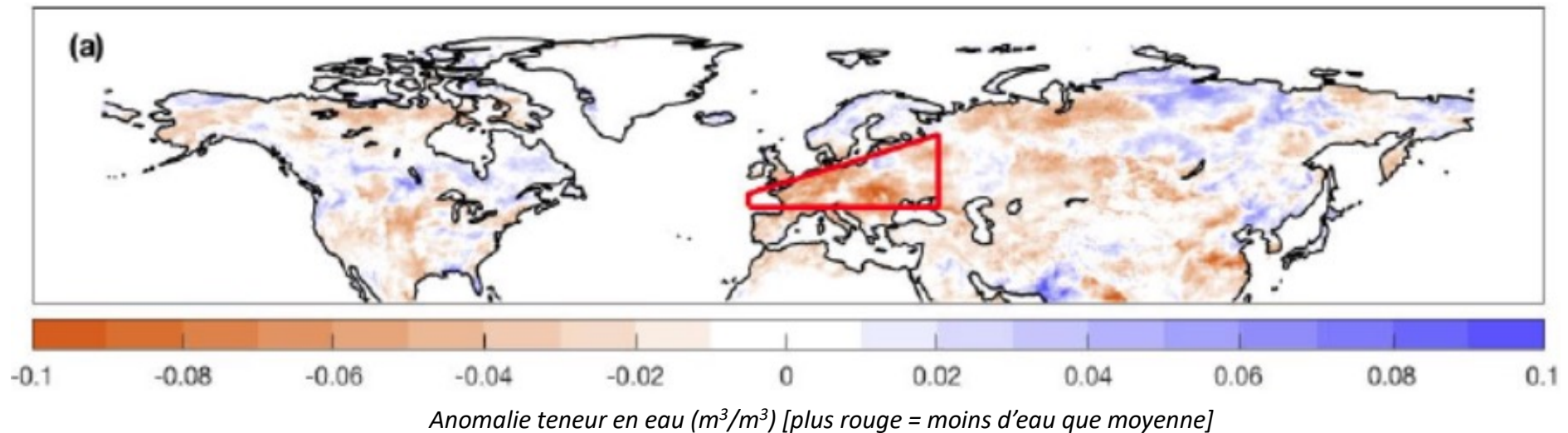
Exemple déforestation en Amazonie, au Brésil.
© AMANDA PEROBELLI / REUTERS

Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R.J. et al. A planetary boundary for green water. *Nat Rev Earth Environ* 3, 380–392 (2022). doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8

Cycle de l'eau : 4/ Dépassement partiel de la limite planétaire portant sur l'eau douce

Sécheresse mondiale 2022

Anomalie de teneur en eau du sol dans la zone racinaire sur Juin, Juillet, Aout 2022



- Peut arriver maintenant 1 fois tous les 20 ans dans climat actuel
- La forte augmentation température serait le facteur principal de cette augmentation secheresse

Schumacher D. et al., 2022, High temperatures exacerbated by climate change made 2022 Northern Hemisphere soil moisture droughts more likely. World Weather Attribution - <https://www.worldweatherattribution.org/>

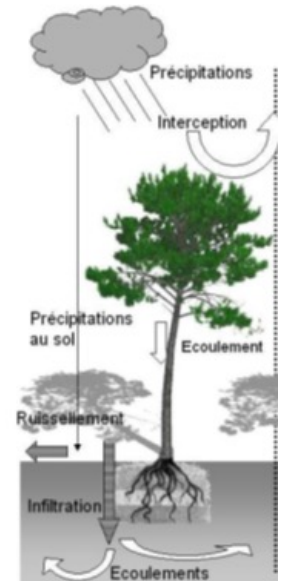
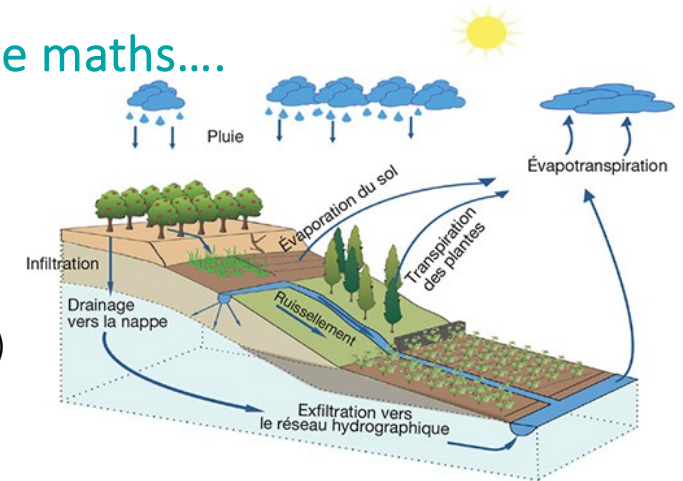
Cycle de l'eau et hydrologie : 1/ quelques concepts + un soupçon de maths....

Bilan hydrique d'une surface terrestre (d'un bassin versant, par ex.):

Pendant un temps t :

$$P = ET - Q + \Delta S \quad (\text{bilan de masse d'eau sur un temps } t)$$

- P = Précipitations totales (pluie, neige, brouillard) en mm
- ET = Evapotranspiration = Evaporation + Transpiration des plantes
 - Evaporation = eau du sol + eau interceptée feuillage
 - Transpiration = eau du sol prélevé par les racines, passant par la plante, évaporée au niveau des feuilles (stomates)
 - → ET en climat humide : gouvernée et limitée par demande climatique (rayonnement, humidité de l'air, température, vent...) = ETP
 - → ET en climat sec : limitée par disponibilité et flux eau dans le sol malgré forte ETP
- Q = Ruissèlement et écoulement dans les rivières (débit)
- ΔS = Variation de stock d'eau dans le sol et la nappe d'eau souterraine
 - Infiltration dans le sol, stockage/drainage vers la nappe

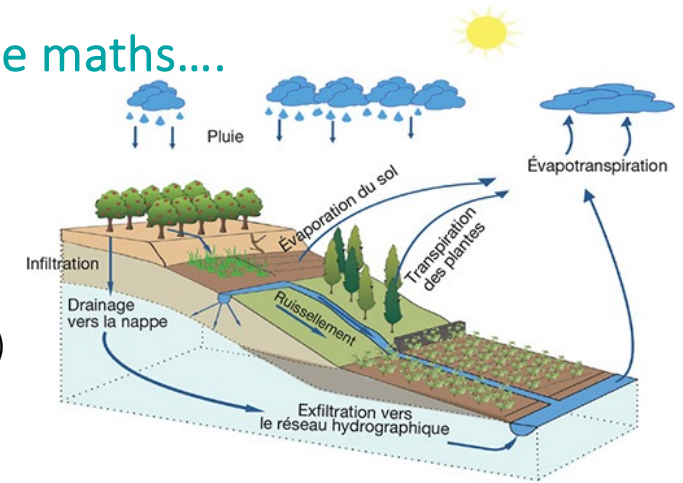


Cycle de l'eau et hydrologie : 1/ quelques concepts + un soupçon de maths....

Bilan hydrique d'une surface terrestre (d'un bassin versant, par ex.):

Pendant un temps t :

$$P = ET - Q + \Delta S \quad (\text{bilan de masse d'eau sur un temps } t)$$



Tous les termes du bilan hydrique sont impactés par la présence d'une forêt !!

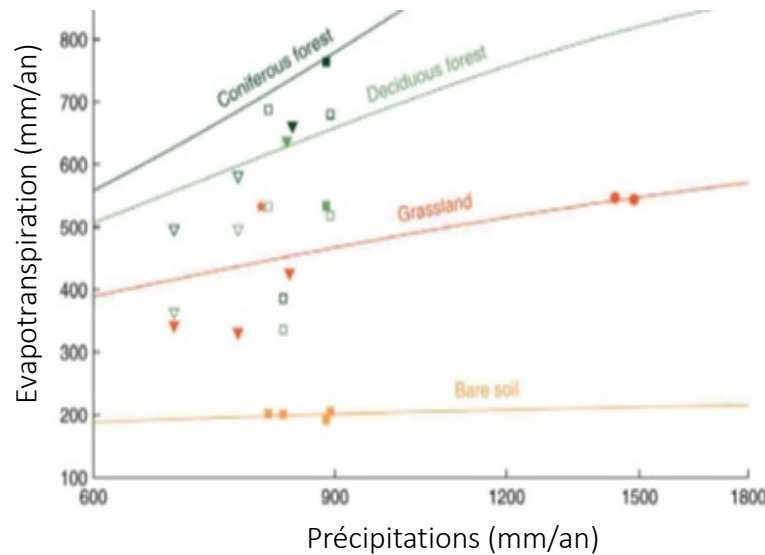
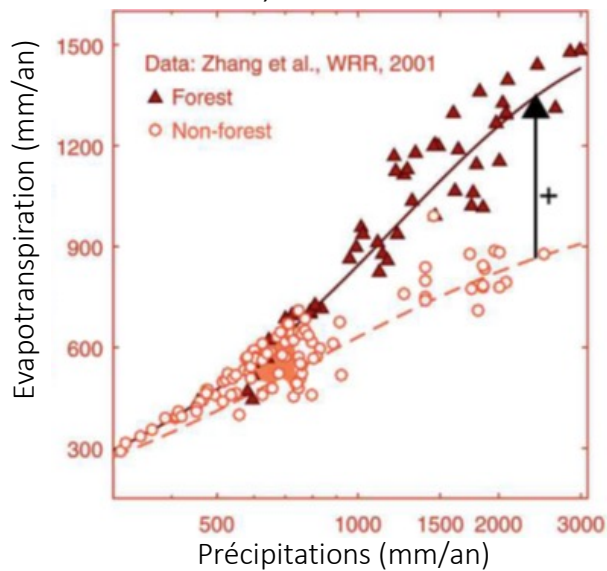
Cycle de l'eau et hydrologie : 2/ Evapotranspiration et forêts (ET)....

Différence entre cultures/prairies et forêts :

- Aérien: possiblement plus de surface foliaire (et différence rugosité aérodynamique, albédo...) / cultures
- Souterrain: plus grande profondeur racinaire forêts : 3 à 20 m (ou plus) racines d'arbres vs 0.5 2 m cultures

➡ Possibilité capter plus d'eau du sol et de la nappe pour forêt / culture => plus forte Evapotranspiration

Evapotranspiration en fonction précipitations forêts ou non-forêts (Teuling A., 2018, Vadose Zone Research)



Evapotranspiration forêt culture dans le Sud-Ouest

Forêt / Culture	Evapotranspiration annuelle (mm)
Blé (printemps)	~ 200
Mais (été =>irrigation)	~ 500
Pins (landes)	~ 650
Coupe rase/jeune (Landes)	~ 350

Cycle de l'eau et hydrologie : 3/ Ecoulement rivières/ruissèlement et forêts (Q)....

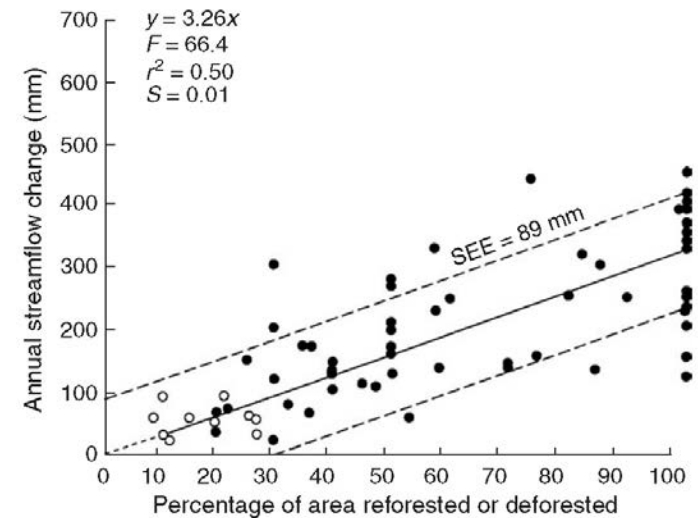
Forêts / Cultures : ↗ Transpiration (ET)
↗ Infiltration et ↘ ruissèlement

➡ Vision générale : Chute débit rivières avec accroissement foret ...

Mais...

- Effets étudiés en général sur paires de bassins versants proches avec occupation sol différente = en général petits bassins versants = petite échelle
- Quid effets à plus grande échelles (recyclage humidité et transport atmosphérique à grande échelle) ?

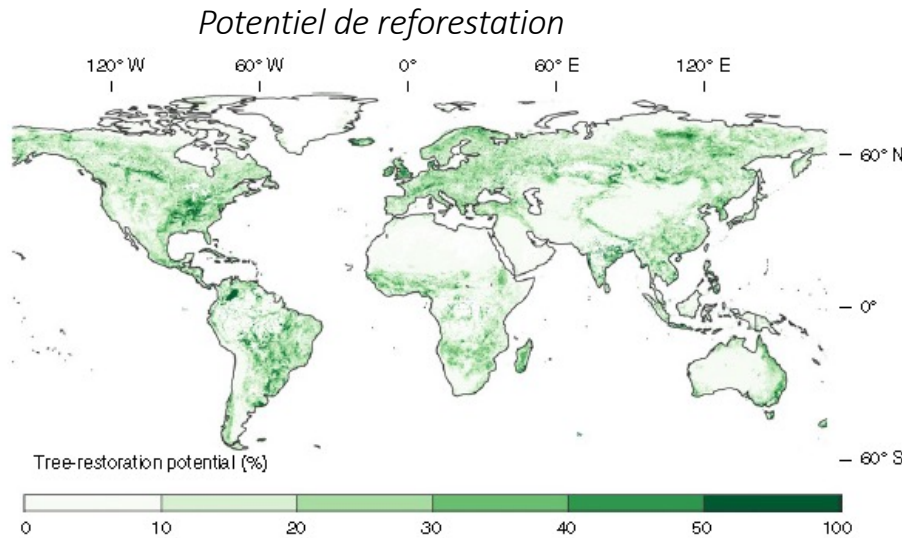
Changement du débit annuel rivière en fonction pourcentage surface forestée/déforestée



(de Scott et al., 2004, Impacts of Forest Plantations on Streamflow. DOI: 10.1016/B0-12-145160-7/00272-6)

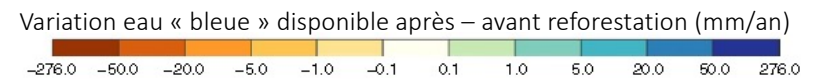
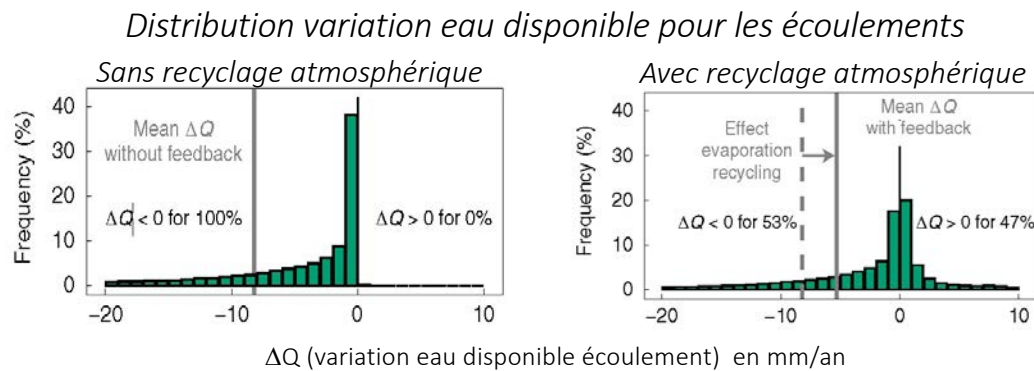
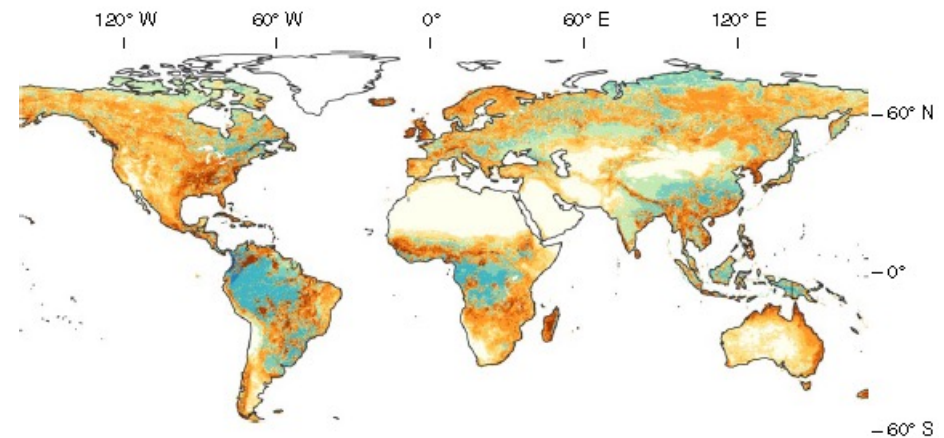
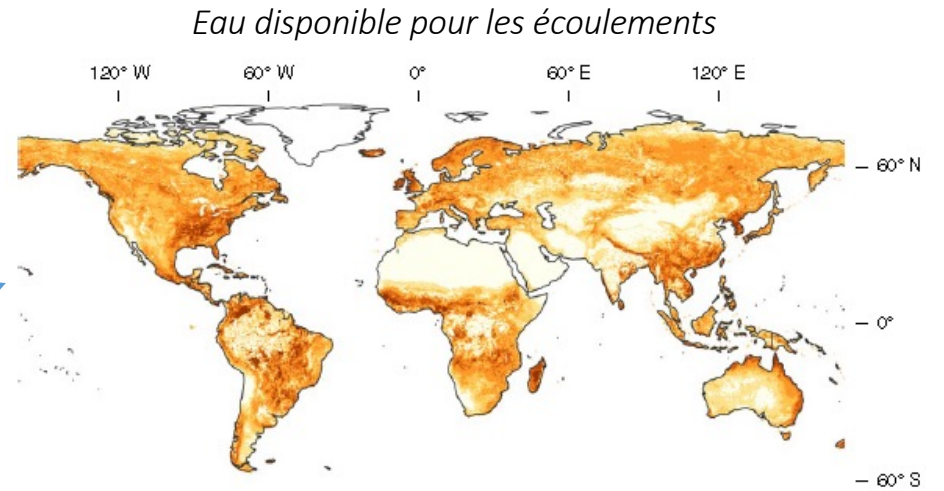
Cycle de l'eau et hydrologie : 3/ Si Reforestation à échelle globale et écoulement rivières (Q)...

Etude numérique effet sur cycle eau d'une reforestation à grande échelle (Van Dijke A., Teuling et al., 2022, Nature Geoscience)



Sans recyclage atmosphérique

Avec recyclage atmosphérique



Cycle de l'eau et hydrologie : 4/ Drainage et recharge des nappes (ΔS)....

- ↗ **Forêts** : ↗ Transpiration (ET)
- ↗ prélèvement à la nappe et ↘ drainage sol vers nappe

➡ Vision classique: Chute de la recharge de la nappe avec accroissement forêt ...

Mais...

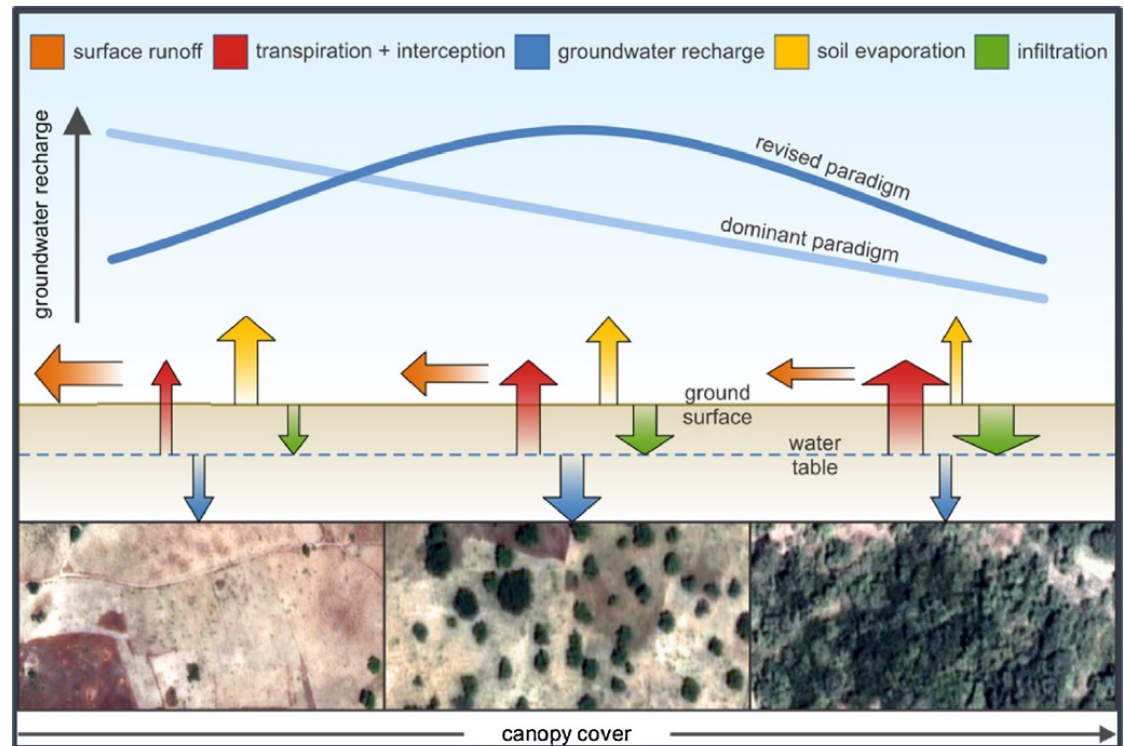
- révision actuelle de ce paradigme .
- Cause= effet des racines d'arbres
 - Plus grande infiltrabilité sol et ombrage (moins évaporation)
 - Redistribution eau à travers les racines
 - Amélioration infiltrabilité du sol jusqu'à 25m de la canopée



Un optimum possible de la densité des arbres / recharge et climat local

(Ellison D. et al., 2017, Global Environmental Change)

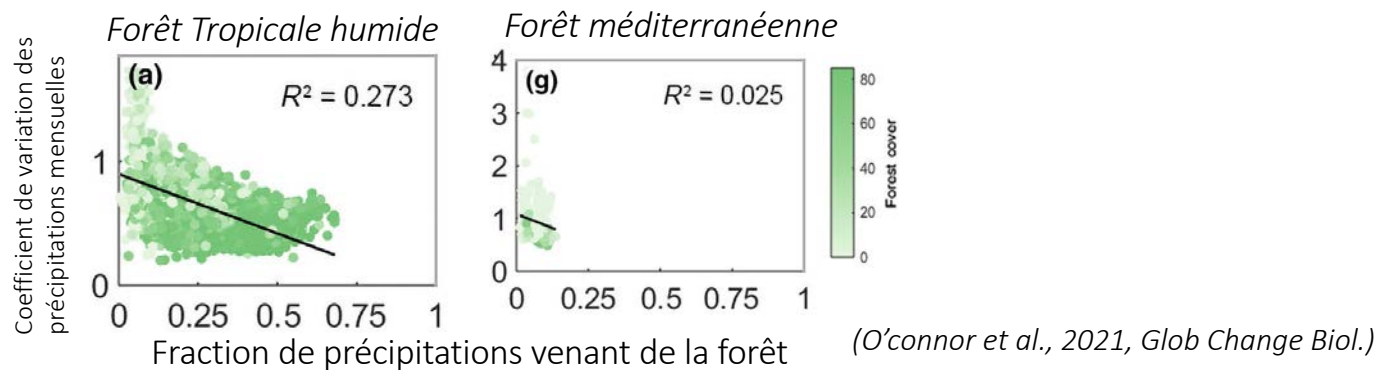
Infiltration et recharge en fonction de la densité d'arbres



Cycle de l'eau et hydrologie : 5/ La pluie (P)....

Recyclage atmosphérique continental de la vapeur d'eau (ET -> P ; ~50%) :

- Plus intense au dessus des forêts : ~70 à 90% sur forêts tropicales , avec un effet régional/transfrontalier (e.g. 70% pluie Rio de la Plata provient ET de l'Amazonie...).
- Effet régional global souvent négligé, en particulier / politique de l'eau ; mais essentiel pour les régions « sous le vent » /éloignement océans
- Modélisation climatique : déforestation à grande échelle pourrait réduire pluie dans d'autres régions jusqu'à 30%
- « Effet forêts » lié à plus forte ET, mais aussi émission aérosols et composés organiques volatiles => noyaux de condensation.
- Les forêts peuvent faire baisser la variabilité temporelle des précipitations



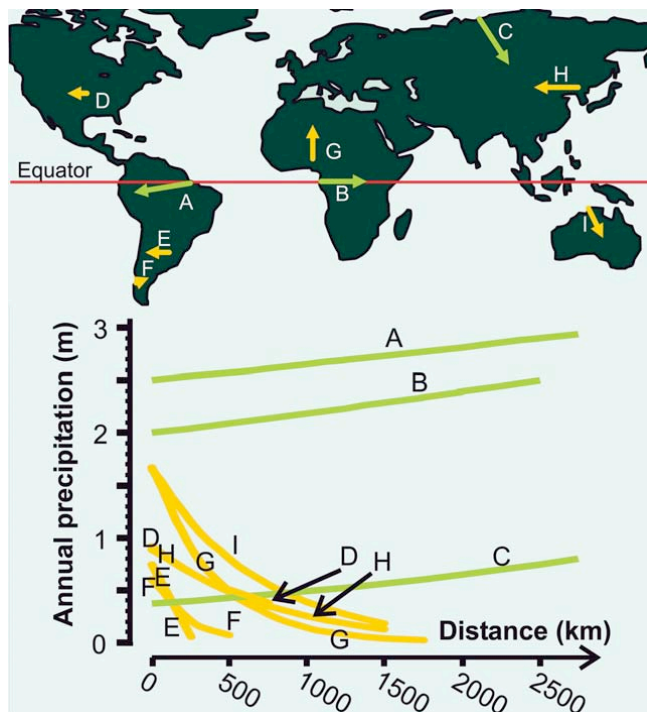
Cycle de l'eau et hydrologie : 5/ La pluie (P)....

Il n'y a pas que le recyclage atmosphérique de la vapeur d'eau...

.... Mais aussi possiblement un effet de pompe (aspiration) biologique de la vapeur d'eau vers le continent à partir des océans par la forêt !

Les faits

Distribution des précipitations annuelles de l'océan vers l'intérieur des continents avec et sans (grandes) forêts

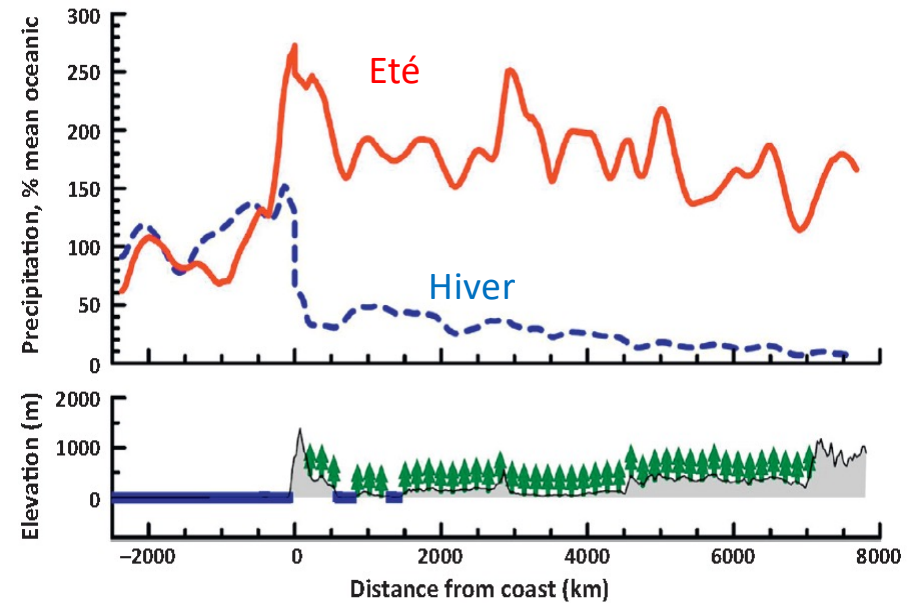


A,B, C = Forêts

D,E,F,G,H,I: Non forestier

(Makarieva AM, Gorshkov VG. 2007, Hydrology and Earth System Sciences)

Précipitations continentale: Forêt eurasienne boréale transect 61°N – effet saisonnier



Cycle de l'eau et hydrologie : 5/ La pluie (P)....

Il n'y a pas que le recyclage atmosphérique de la vapeur d'eau...

.... Mais aussi possiblement un effet de pompe (aspiration) biologique de la vapeur d'eau vers le continent à partir des océans par la forêt !

Les hypothèses

Forêts humides ou tempérées en été



Forêts tempérées/caduques/ hiver



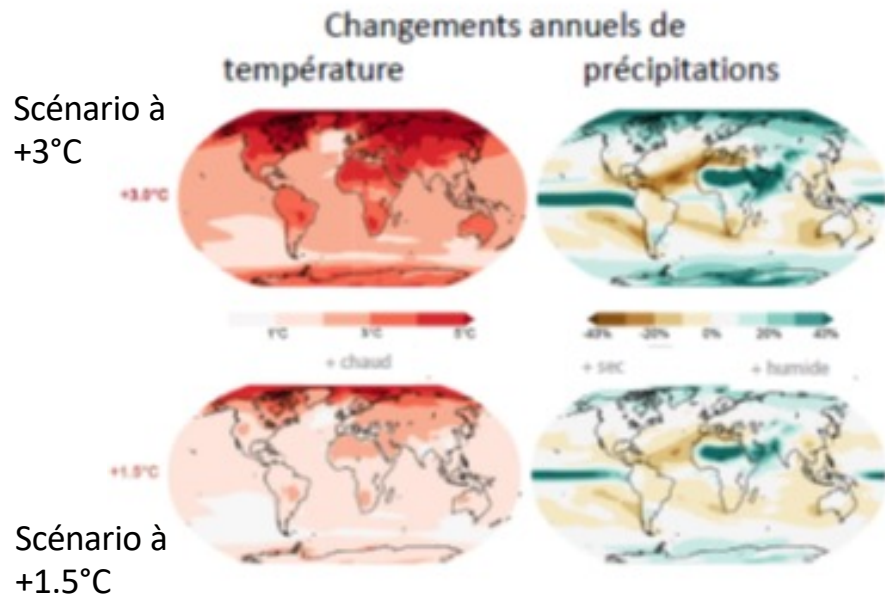
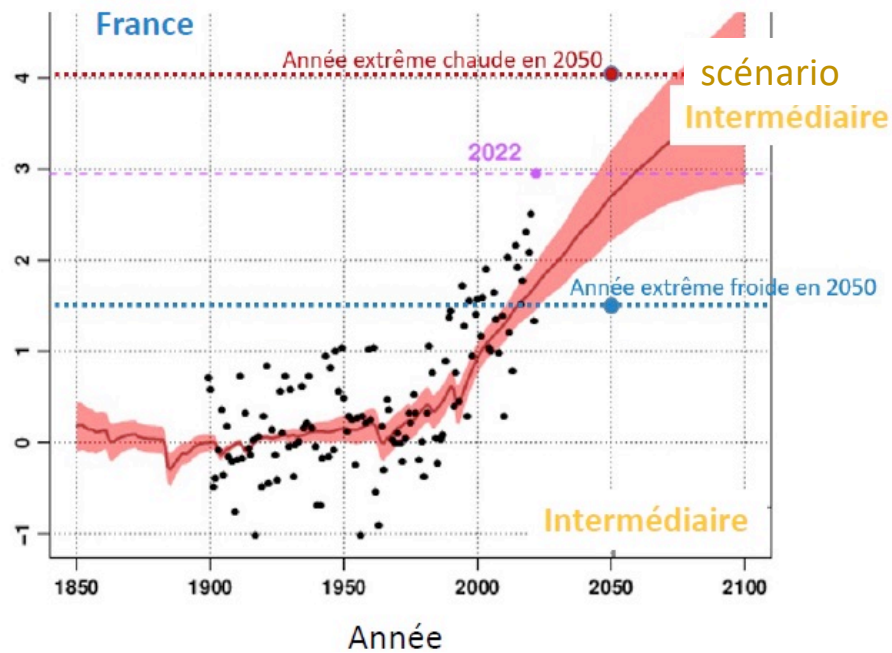
Evapotranspiration importante réduit volume d'air et engendre une dépression -> augmente l'arrivée d'air humide de l'océan -> plus de pluie et d'écoulements... En hiver, moins d'évapotranspiration (milieu tempéré) et pas d'apport océanique. (Air sec retourne à haute altitude, des régions plus humides vers les plus sèches) - Encore des débats sur l'intensité du phénomène....

Conclusions

Les forêts ont un rôle majeur sur le cycle de l'eau : localement, régionalement et globalement

Ce rôle peut être perturbé par l'activité humaine (deforestation et changement d'usage des sols)...

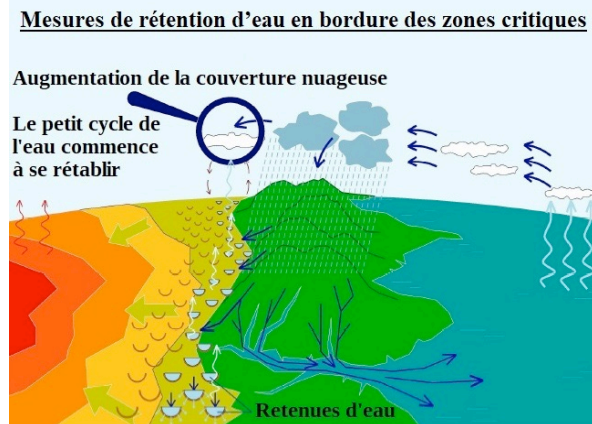
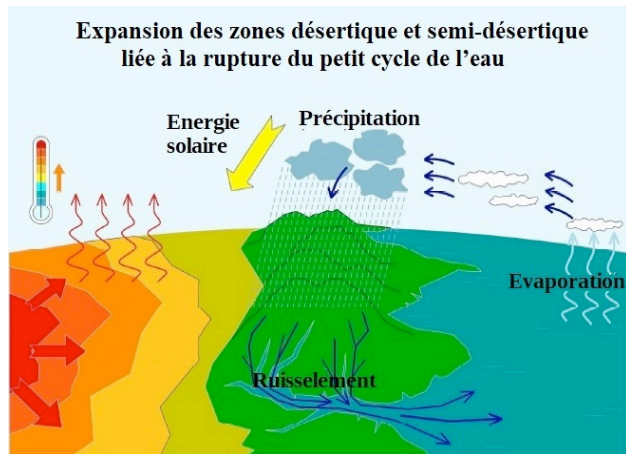
... Mais aussi par le changement climatique



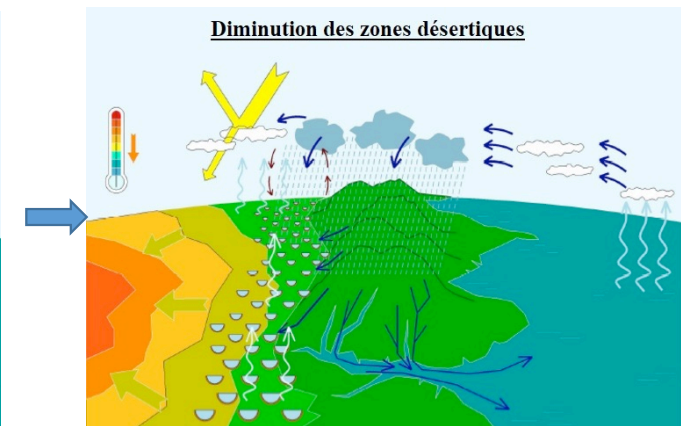
Conclusions

Mais aussi avec des espoirs pour le futur, pour la reconquête des zones sèches par reverdissement (cercle vertueux) en agissant sur cycle de l'eau par revegetalisation...

Situation dégradée



Situation hydrique végétale améliorée



(ISI, 2022, Michal Kravčík)

Merci pour votre attention

