

A photograph of a forest stream flowing over large, moss-covered rocks. The water is clear and creates small cascades. The surrounding forest is dense with green trees and foliage, with sunlight filtering through the canopy. The overall scene is vibrant and natural.

La gestion adaptative des écosystèmes forestiers.

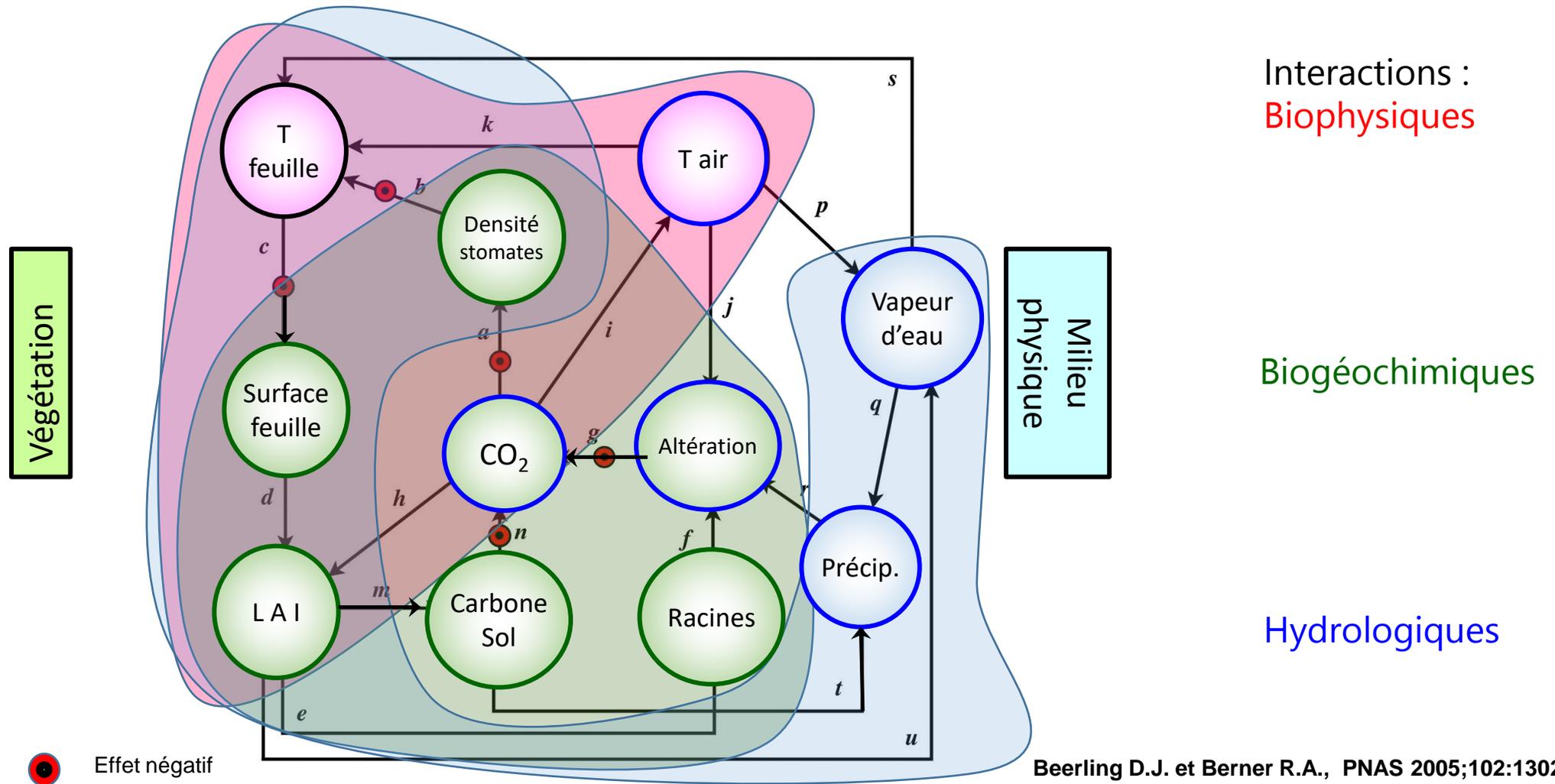
Denis Loustau, INRAE,
denis.loustau@inrae.fr

Sommaire

- Qu'adapte t on ?
Mise en perspective du fonctionnement de l'écosystème forestier.
- A quoi et pourquoi ? La forêt dans l'Anthropocène
Une gestion adaptative des écosystèmes forestiers: la contrainte hydrique
- Conclusion / Messages

L'écosystème forestier

- Des interactions multiples
- Boucles de rétroactions positives (emballement) et négatives (stabilisation)
- Constantes de temps de 10^{-3} à $>10^6$ ans (cycles rapides, moyens, longs)



Les arbres satisfont les contraintes du milieu physique continental



Stoechiométrique

Assimiler en proportion énergie et éléments depuis:

- l'atmosphère (lumière, CO₂)
- le sol (eau, azote, phosphore...)

Thermique

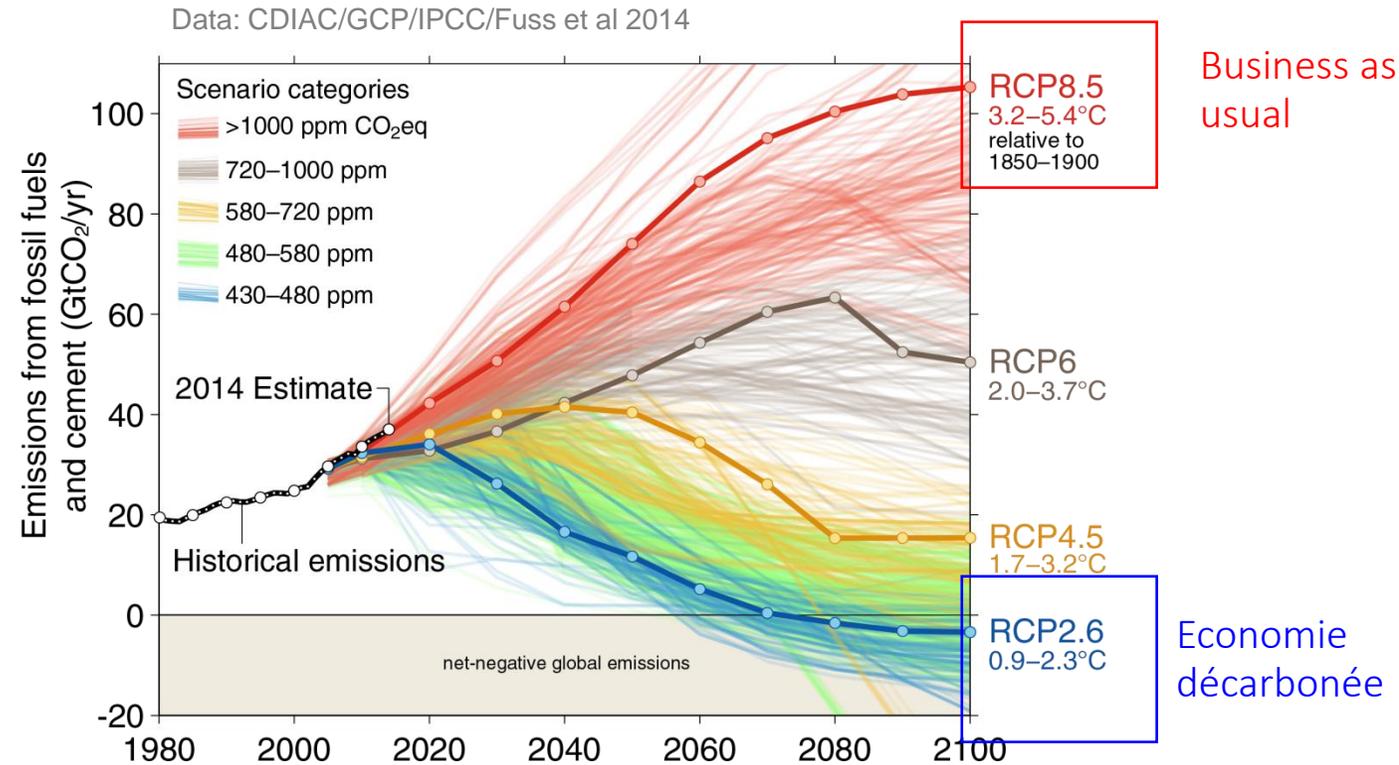
- dissipation de chaleur (aiguille, feuille..)
- capacité de régulation (feuilles, stomates, rugosité)

Hydrique

- Intégration hydraulique : cuticule, stomate, vaisseaux conducteurs, racines, (Da Vinci, Dixon, Milburn, Tyree, Cochard)
- Temps de réponse adaptés: seconde → siècle

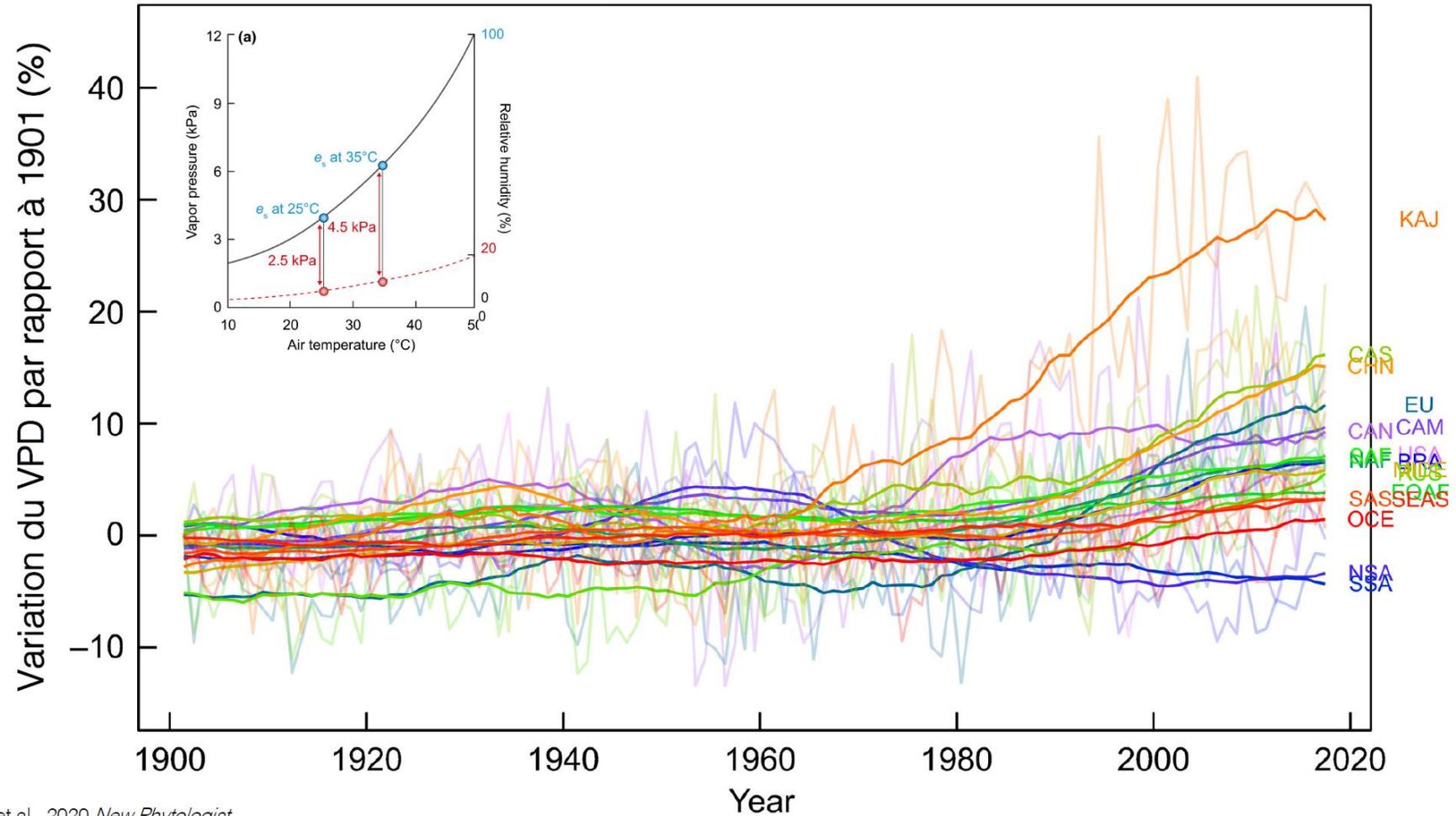
Mécanique

- Résistance au vent
- Ancrage (racines, sol)

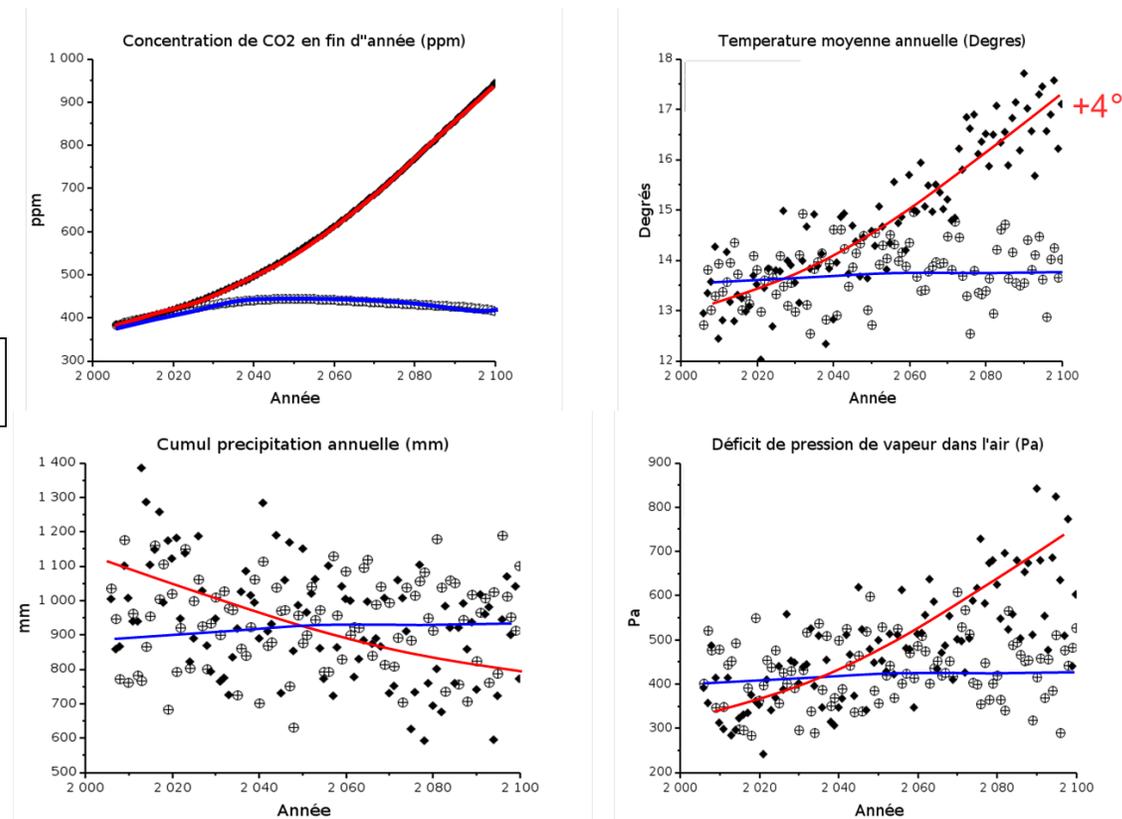


Les émissions de C fossile depuis
1980 sont conformes au RCP 8.5

Augmentation du déficit de pression de vapeur



RCP 2.6
RCP 8.5

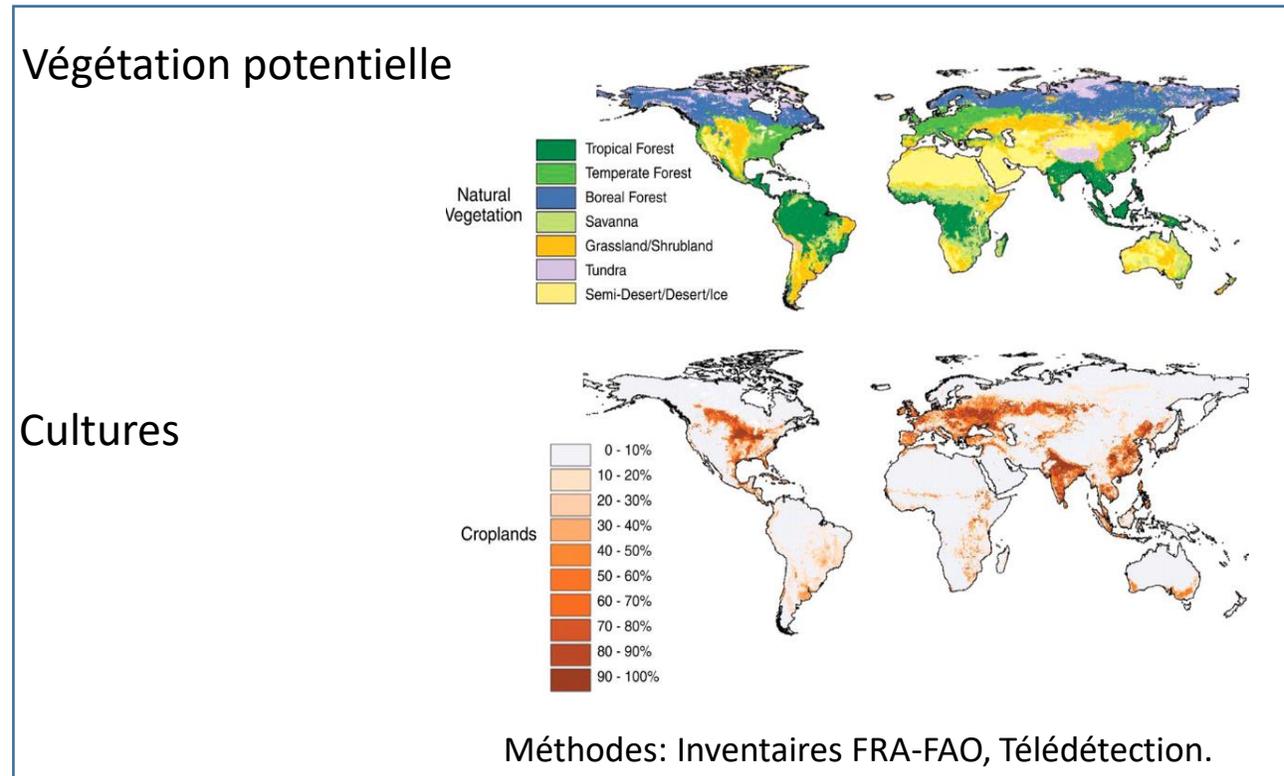


PRINCIPALES TENDANCES

- Forte différence d'évolution de $[CO_2]$ atmosphérique
- Différence de température de $+4^{\circ}C$ en fin de siècle
- Diminution des précipitations de 1100 \rightarrow 800 mm/an
- Doublement du VPD en fin de siècle (demande évaporative + forte)

A quoi adapter ? Les forêts dans l'Anthropocène.

Les activités humaines déconnectent les rétroactions entre forêts et milieu physique:



Foley et al. 2005, Science

Luyssaert et al. 2011, Nature Geoscience

Pan et al. 2011, Nature

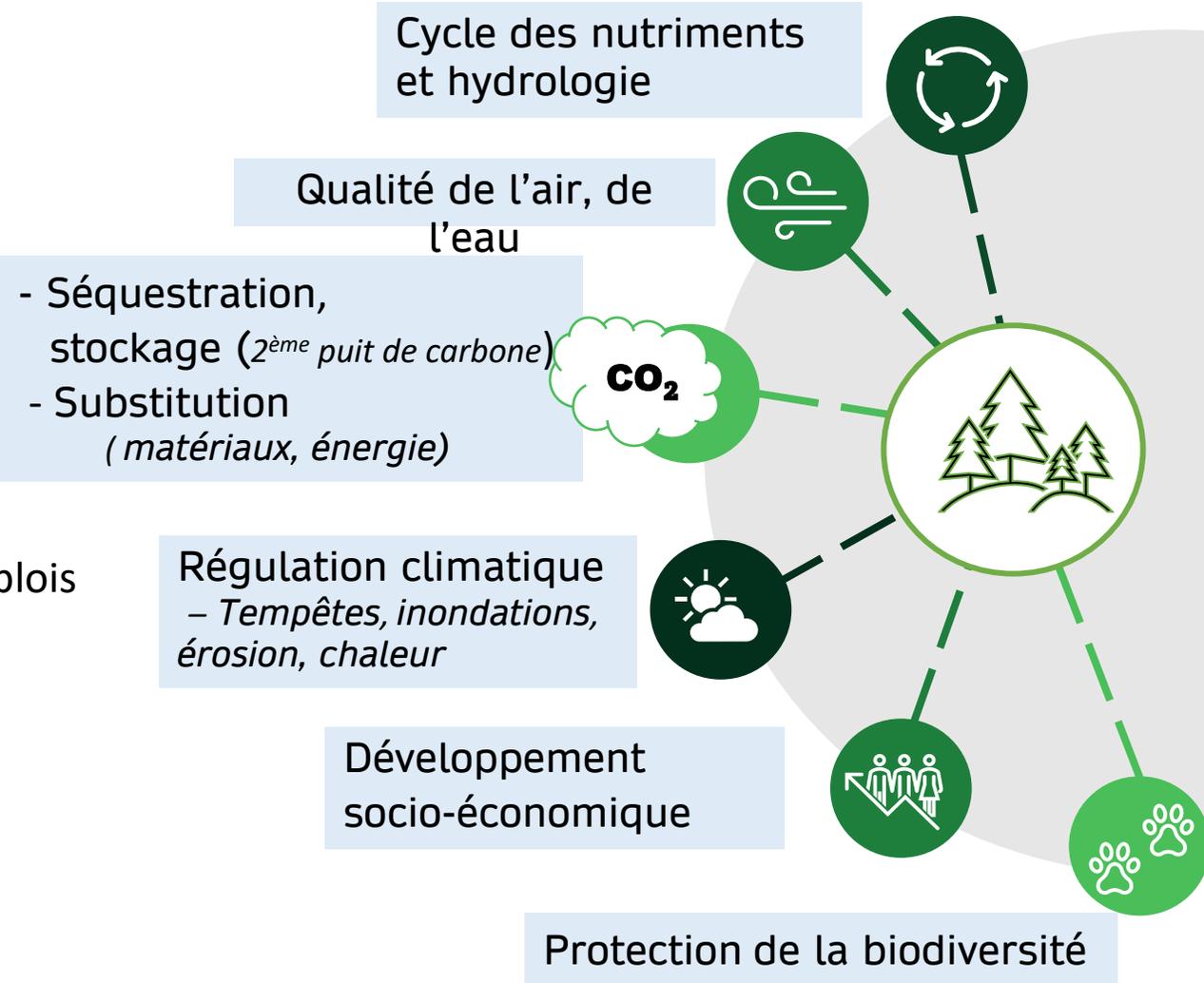
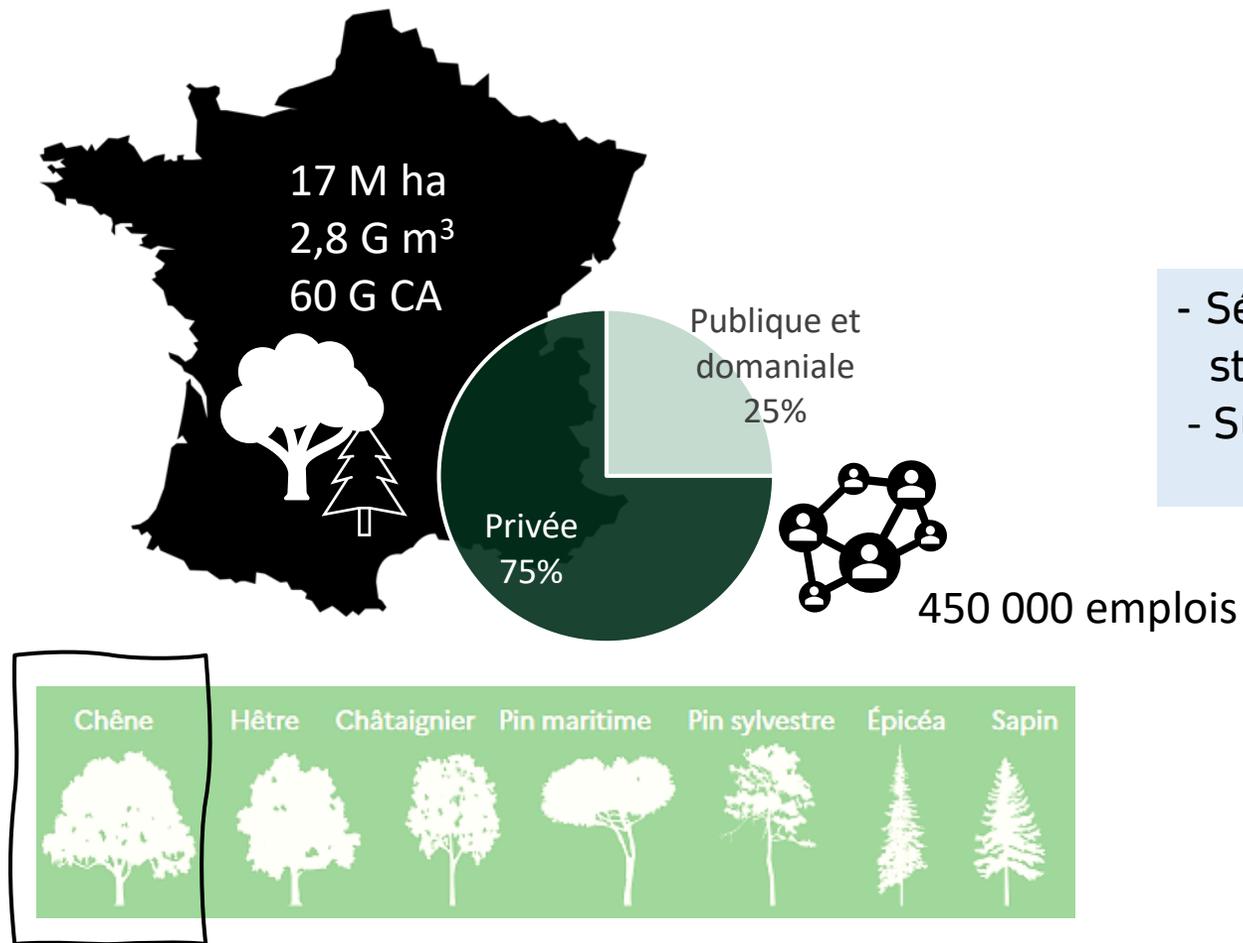
Bastin et al. 2019, Science

Erb et al. 2018, Nature

- Le cycle du carbone du surface est forcé par les émissions de C fossile
- L'atmosphère modifiée provoque un dérèglement climatique brutal.
- La superficie des forêts est réduite de 67 à 41 Mkm² (- 40%)
- Le stock de C biomasse des forêts exploitées (85%) est diminué de :
 - 23-38 % en zone tropicale
 - 32-34 % en zone tempérée
 - 21-25 % en zone boréale
-

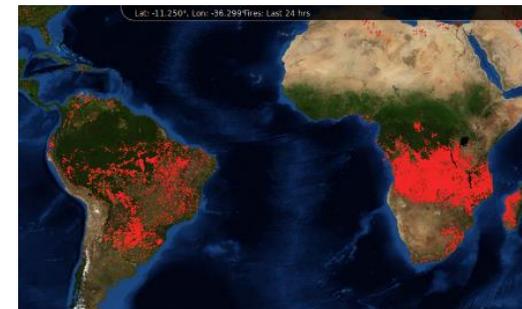
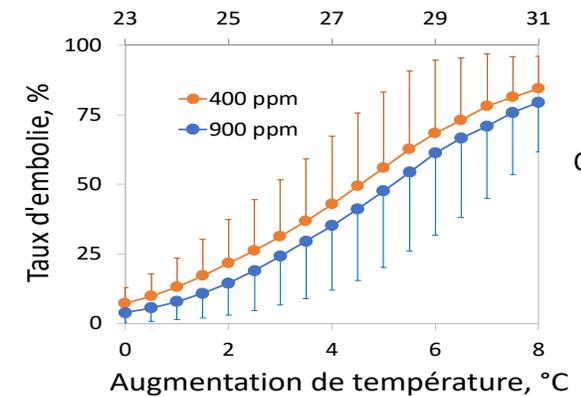
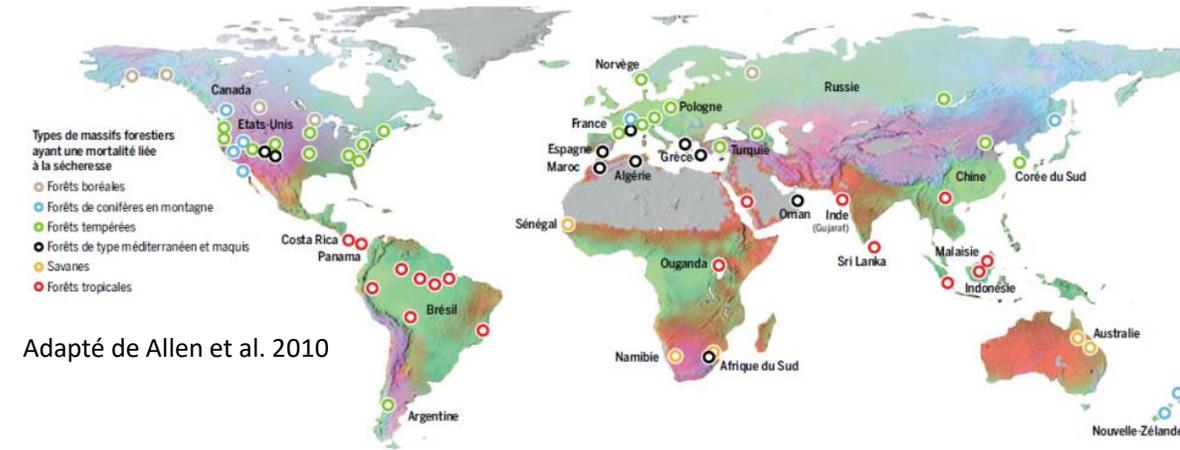
Les forêts dans l'Anthropocène

Les services attendus des forêts. Cas de la France

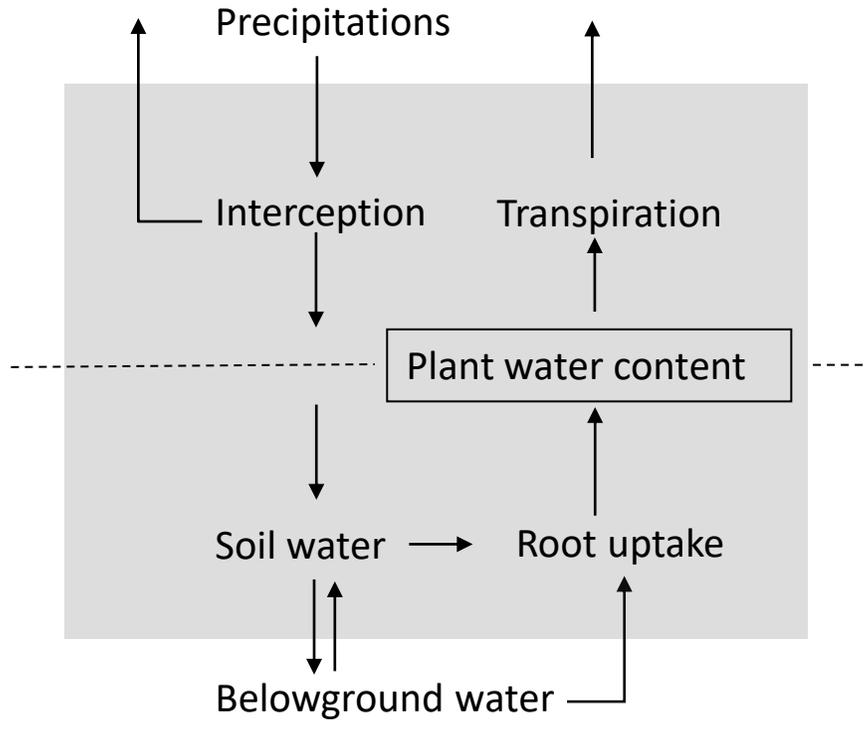


Les forêts dans l'Anthropocène. Vulnérabilité des biomes forestiers

- 5 à 40 % de la surface des biomes forestiers est vulnérable au dérèglement climatique (Gonzalez et al. 2010)
- La mortalité des arbres liées aux sécheresses est globale, générale et atteindrait des niveaux catastrophiques en 2050 (Allen et al. 2010, Choat et al. 2012, Cochard 2022, Grossiord 2022).
- La fréquence des évènements extrêmes s'accroît, ex.
 - Incendies en Amérique du Sud et en Afrique, 23 Août 2019
 - Tempêtes en Europe : Klaus, Lothar, Martin, 1999 - 2009.
- La capacité d'adaptation des forêts est dépassée par la vitesse du dérèglement climatique (Smith et Beaulieu 2009)



Adapter les forêts: le cas de la contrainte hydrique

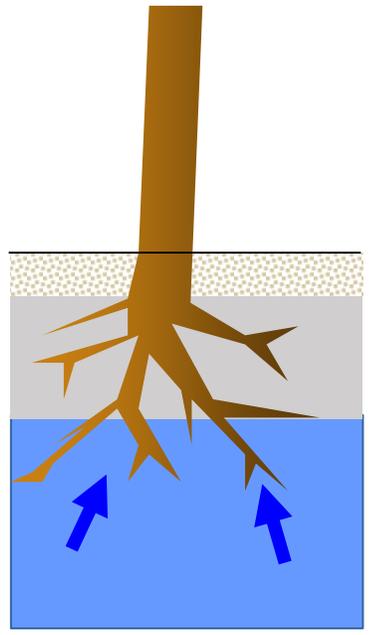


Cause 1. Précipitations < Évapotranspiration

Cause 2. Eau insuffisamment accessible :

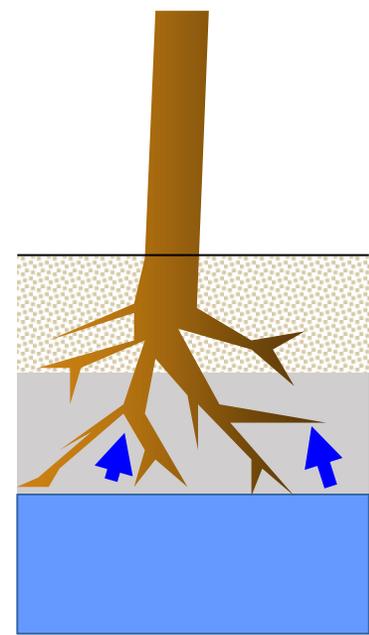
- Faible réserve utile
- Nappe inaccessible
- Réseau hydraulique inefficace

Prélèvement direct dans la nappe



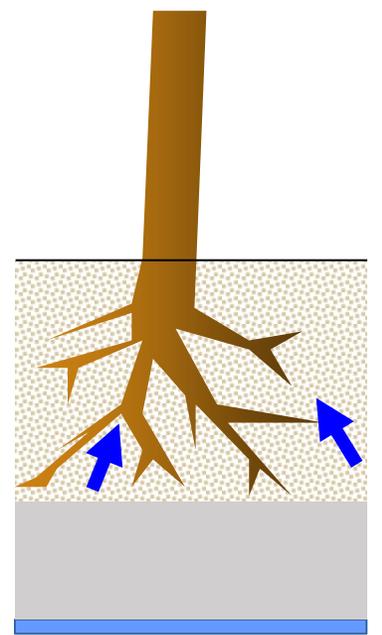
Hiver, Printemps

Prélèvement dans la frange capillaire



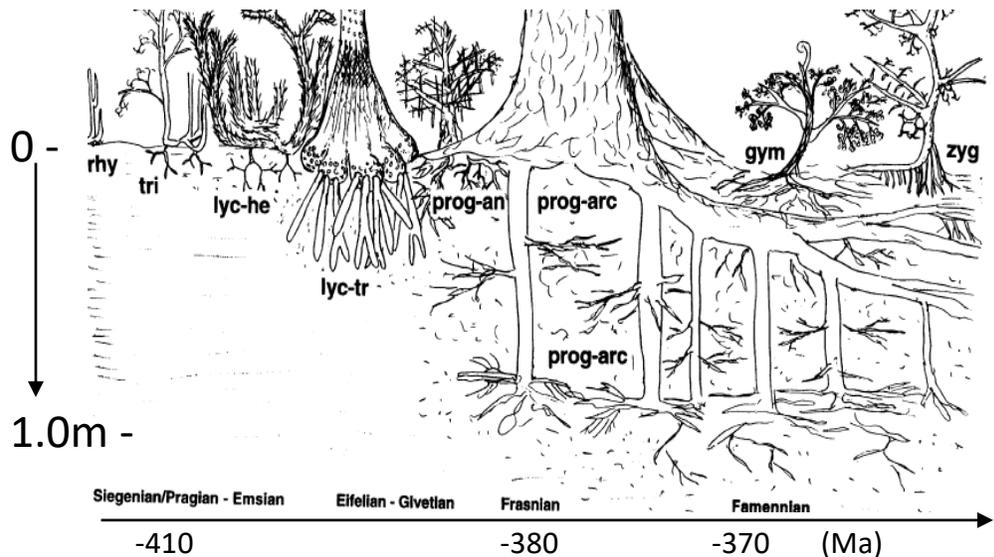
Printemps, Été

Prélèvement hors nappe



Été, Automne

Adapter les forêts: le cas de la contrainte hydrique



- Disposer d'un réservoir
 - pédogénèse (10^4 ans)
 - altération des silicates
- Une régulation hydrique adaptée
 - Un système conducteur intégré : cuticule et stomate, vaisseaux et racines (10 ans) (Da Vinci, Dixon, Milburn, Tyree, Cochard,..)
 - Une régulation de la transpiration (s, mn, h, j a).

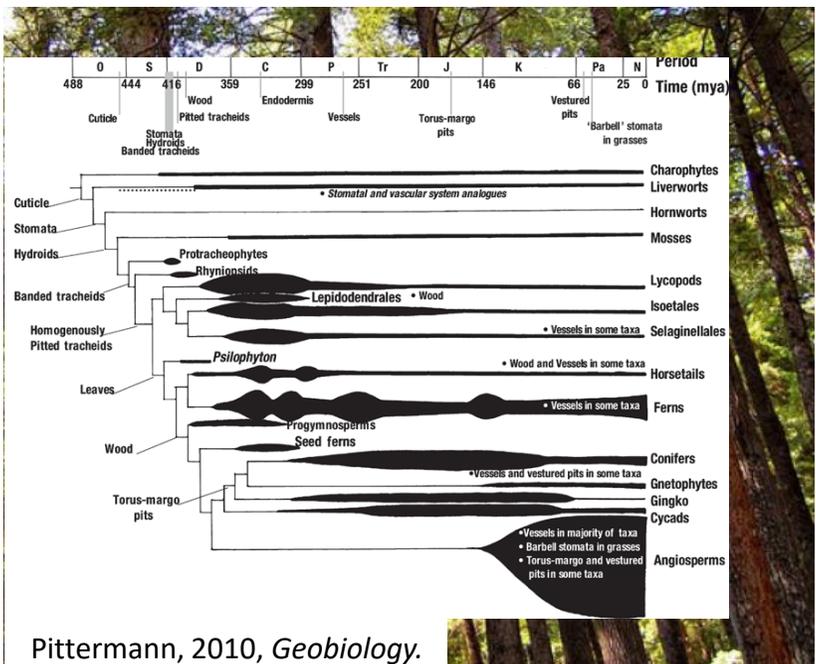


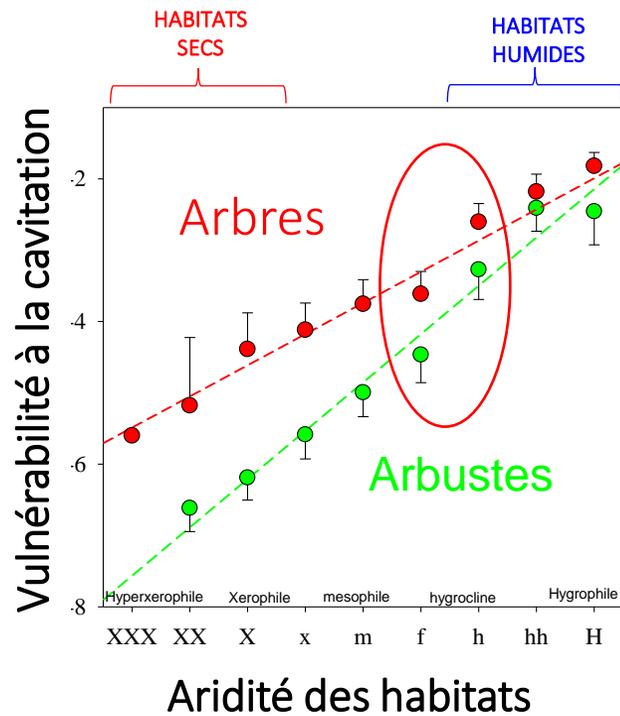
Fig. 4.1. Leonardo da Vinci's sketch of tree architecture showing that the transverse-sectional area of the trunk is equal to the sum of branch transverse-sectional areas. Note that Leonardo wrote in mirror-image. (Richter 1970)

Da Vinci, 15XX

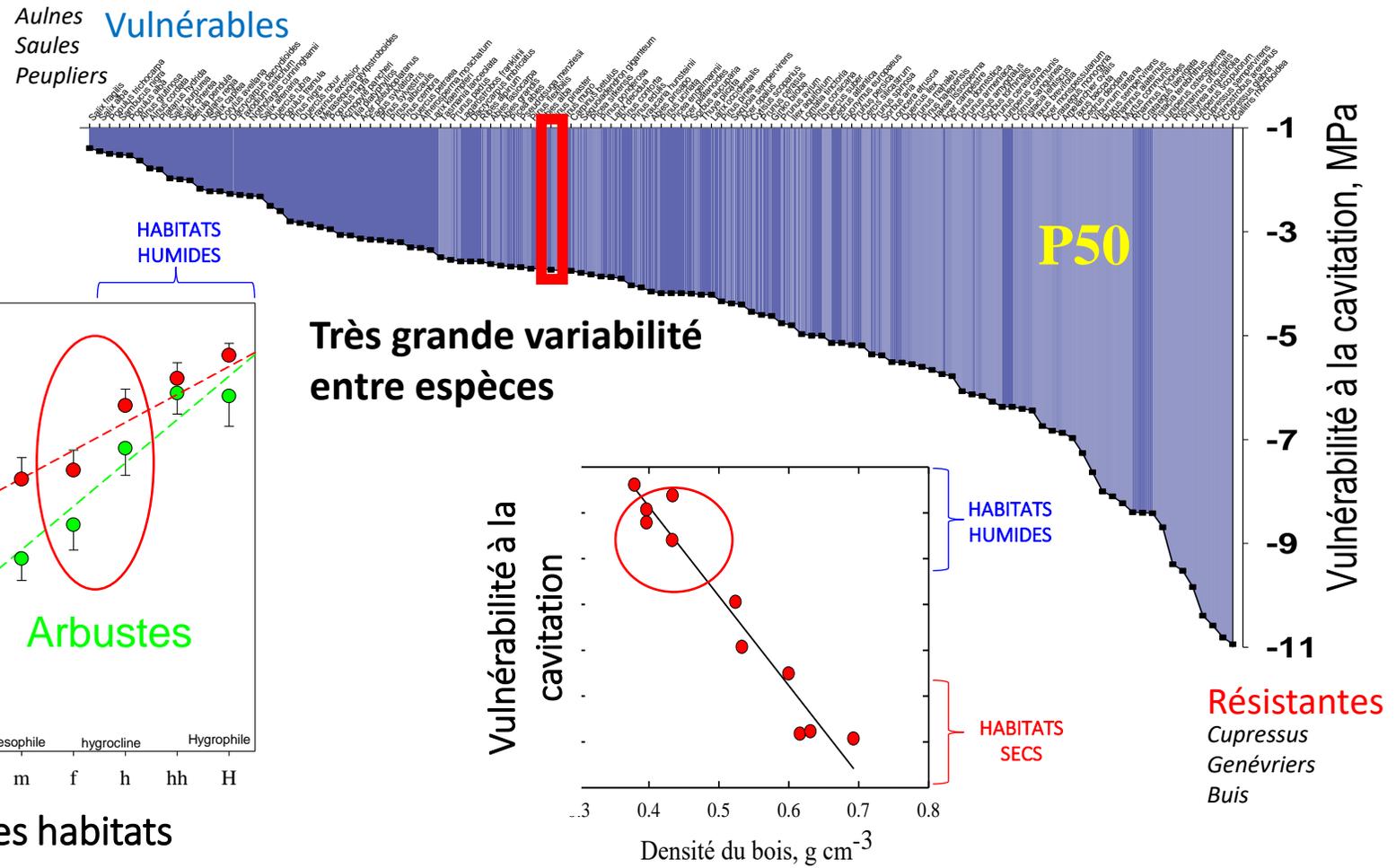
La vulnérabilité à la cavitation des espèces ligneuses européennes

COCHARD, 2022, Acad. Agric.

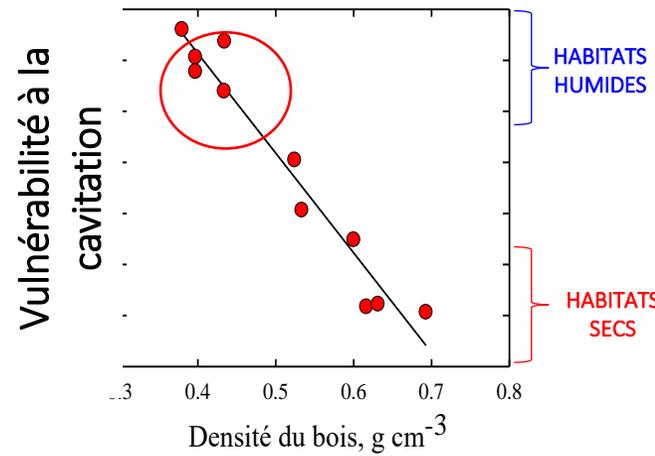
Liée à l'écologie des espèces



Le Pin maritime est une espèce plutôt vulnérables à la cavitation.



Très grande variabilité entre espèces



Adapter à la contrainte hydrique: le niveau local

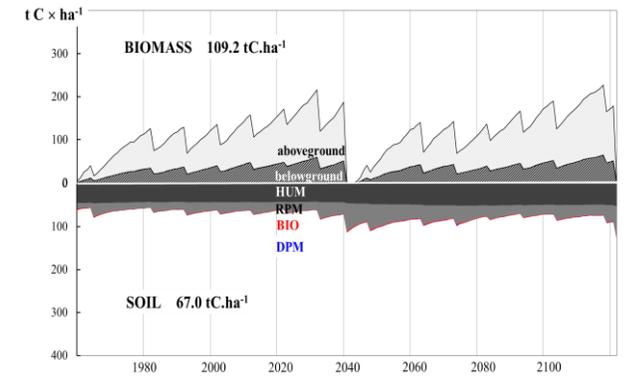
Au niveau local, le régime de conduite des peuplements contrôle leur bilan d'énergie (albédo) et le stock de carbone *in situ*.



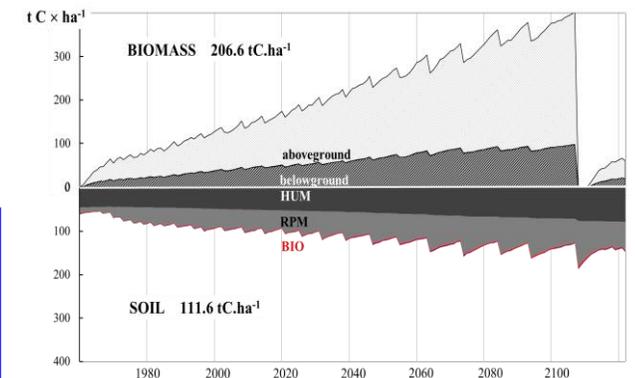
Sylviculture intensive
Stock moyen : 176 tC ha⁻¹

Couvert continu
Stock moyen : 222 tC ha⁻¹

Forêts de La Teste-de-Buch - Sud Arcachon



D cible = 60 cm
Révolution = 10 y
Compétition (RDI) = 0.35

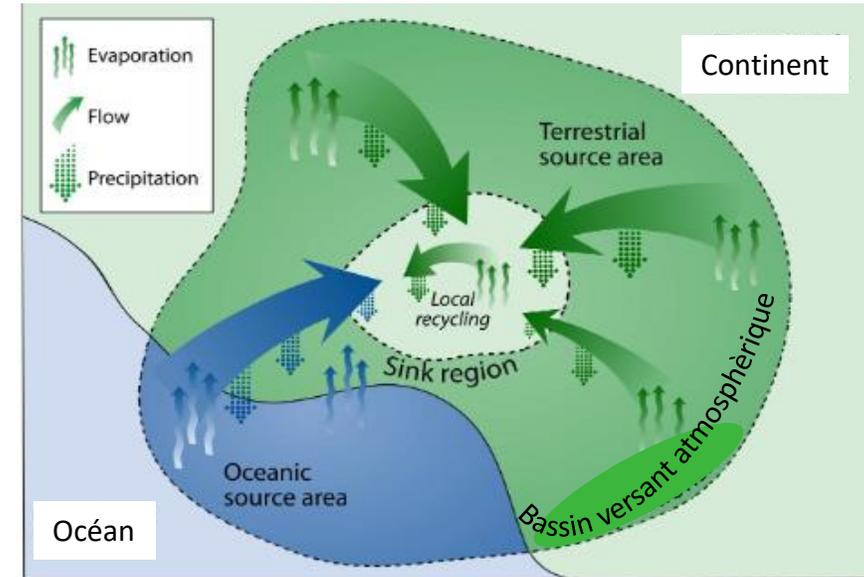


Age = 150 ans
R = variable
C = 1.0

Gérer la contrainte hydrique : le niveau régional

La répartition régionale des usages des terres impactent directement le fonctionnement hydrique des forêts :

- les précipitations reçues proviennent d'un bassin atmosphérique collectant l'ETR de plusieurs 100aines de km²
- Réciproquement, l'ETR d'une forêt impacte toute une région aval ou « puits »



D'après Keys et al.
(Biogeosciences, 2012)



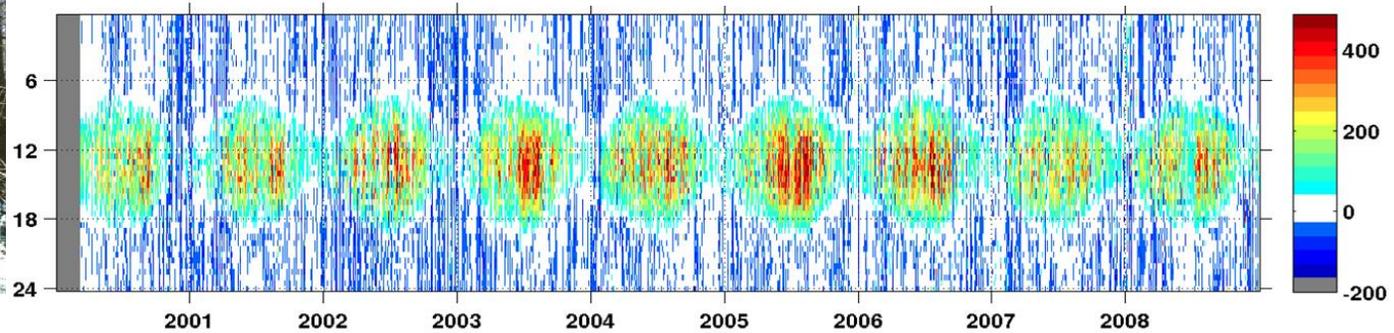
(Pline l'ancien, Livre XXXI)

Gérer la contrainte hydrique: le niveau local

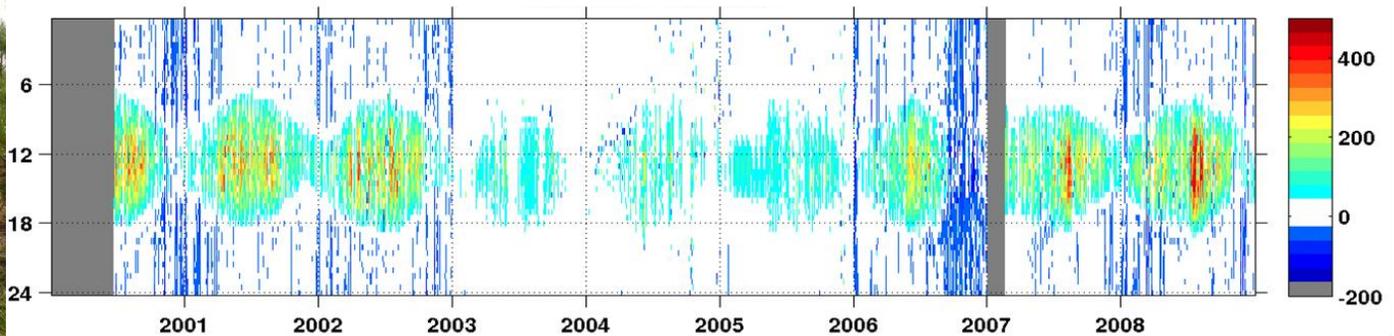
La gestion sylvicole contrôle les flux convectifs forêt-atmosphère (dissipation de chaleur sensible et latente)



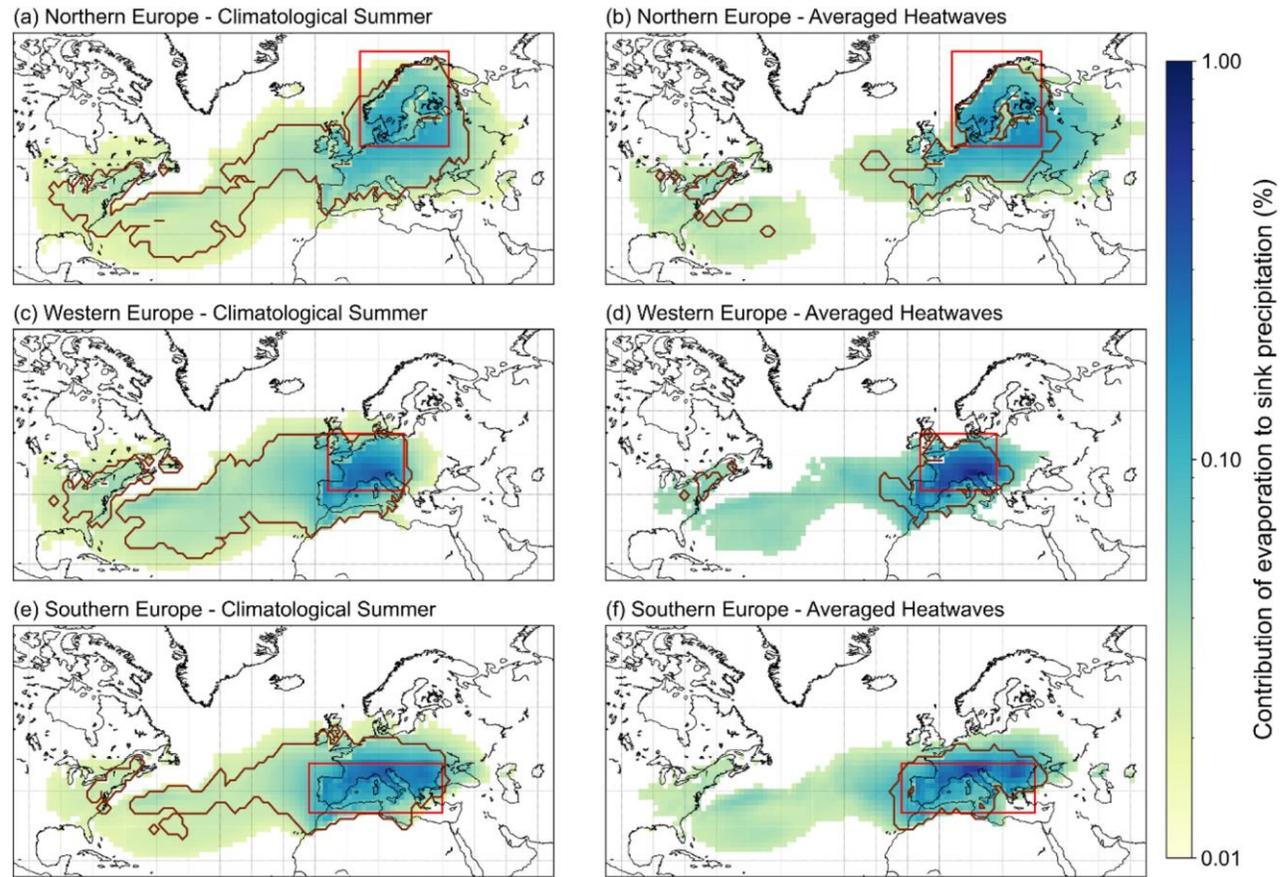
1) régime de couvert continu ($H, W \text{ m}^{-2}$)



2) régime de coupe rase ($H, W \text{ m}^{-2}$)



Gérer la contrainte hydrique: niveau régional



Dynamique du bassin versant atmosphérique en Europe durant les canicules:

- En Europe du Nord et Ouest, les hautes pressions coupent les forêts de leur BV océanique durant les canicules
- Les précipitations deviennent majoritairement sourcées par la végétation continentale
- La déforestation réduit les précipitations des zones aval:
Spracklen and Garcia-Carreras [2015](#); Badger and Dirmeyer [2015](#); Keys et al. [2016](#))

1. L' écosystème global

- Stabiliser le milieu physique:
 - Atmosphère et climat
 - Eaux continentales
- Prendre en compte les interactions forêt-milieu physique:
 - Bilan d'énergie
 - Bassin versant atmosphérique
 - Bassin versant hydrologique et gestion de l'eau bleue
 - Séquestration de carbone

2. Adapter les forêts

- Maîtriser le régime hydrique local
 - Gestion des nappes
 - Ressources en eaux superficielles
- Adapter les peuplements à la ressource en eau
 - Composition des essences
 - Conduite du peuplement (éclaircies, coupes, entretien)
 - Sol
- Donner du temps à l'adaptation
 - Continuités spatiales et temporelles
 - Migration assistée
 - Réserves intégrales
- Accroître la résilience aux év^{ts} extrêmes
 - Mesures de protection physiques (DFCI, Lisières,..)
 - Barrières sanitaires (quarantaines,..)

Messages

- Les approches inférentielles ou de sélection récurrente ne répondent pas à l'adaptation à un environnement nouveau, imprévisible et chaotique des arbres forestiers.
- L'adaptation locale des forêts doit être forcée par la gestion, la Nature ne fera pas tout !
- Une gestion anticipatrice des forêts doit s'adresser aux niveaux, global, régional et local
- Les alternatives de gestion des forêts en France sont connues (rapport Bianco, 1998, Roux et al. 2017, Canopée-Fern 2020, Rapport Cattelot 2020) mais mal ou non appliquées.
- Elles se heurtent à des ressorts de décision inadaptés : ignorance, conservatisme, court-termisme, Recherche « sous le lampadaire », réductionnisme, conflit d'intérêts...





Merci pour votre attention

Forêt pluviale, Tasmanie