

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 undergrowth, with sunlight filtering through the canopy.

Structure des couverts forestiers et exposition
des forêts et arbres forestiers aux sécheresses :
enseignements pour la sylviculture.

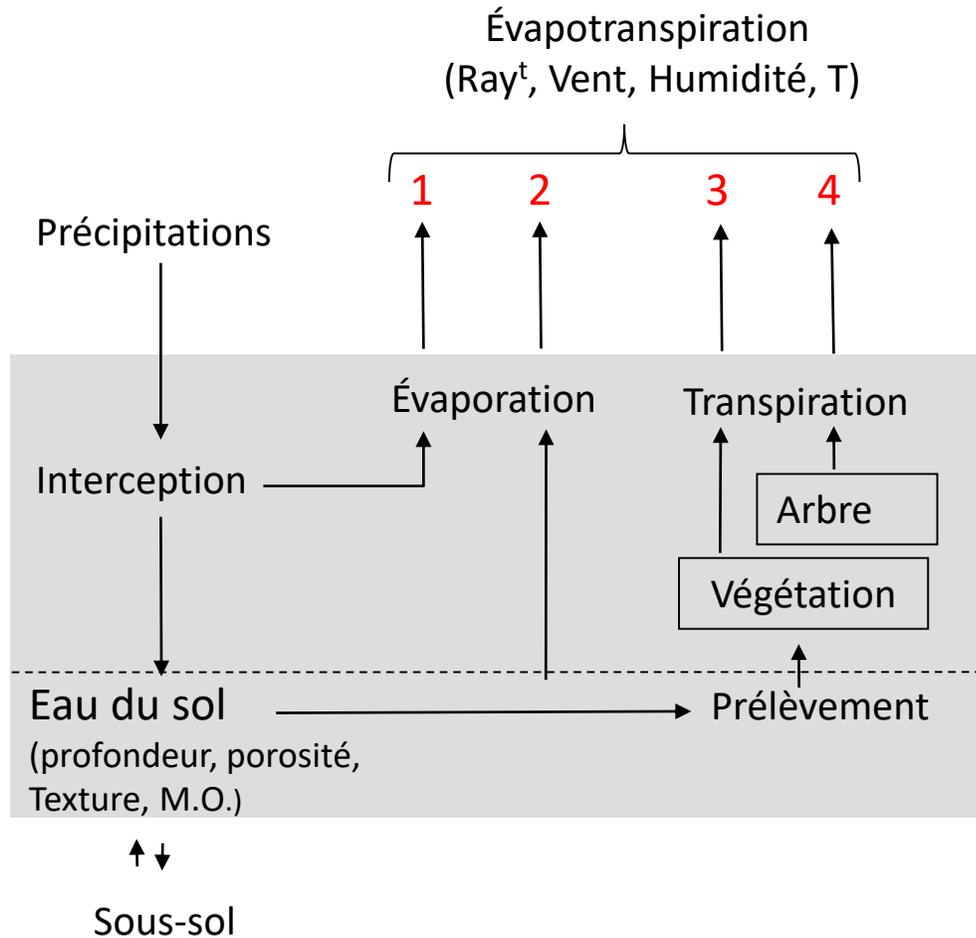
Nathalie Bréda, INRAE, UMR Silva, Nancy.

Denis Loustau, INRAE, UMR ISPA, Bordeaux.

Sommaire

- Stress hydrique et forêt
- Les interactions forêts-climat: une coévolution multi échelles
- Sylviculture et stress hydrique

Fonctionnement hydrique de l'écosystème forêt

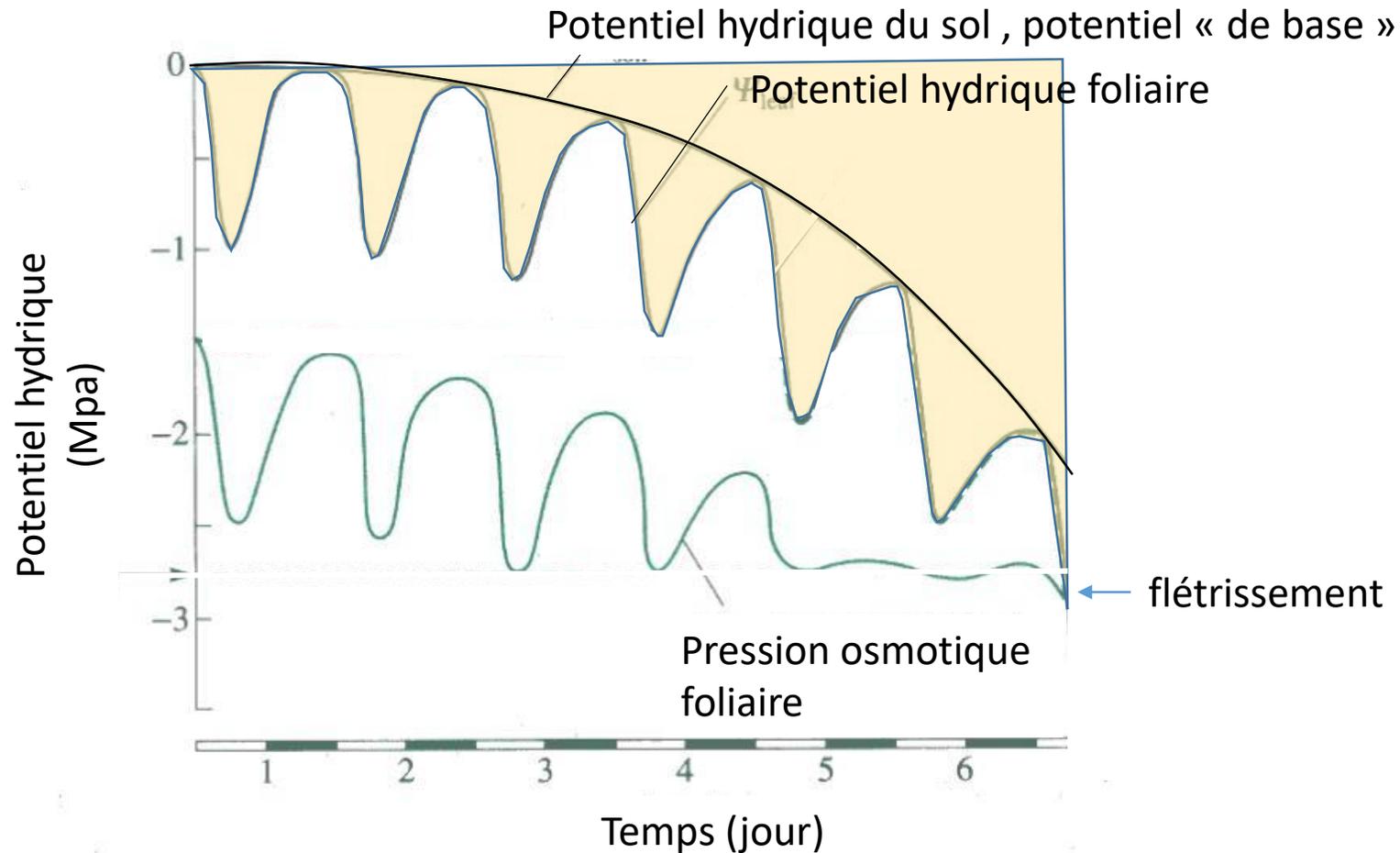


1. Évaporation des précipitations interceptées
2. Évaporation directe du sol
3. Transpiration du sous-étage
4. Transpiration des arbres

L'arbre relie le sol et l'atmosphère dont l'état hydrique diffère par:

- la constante de temps :
 - seconde-heure (atmosphère)
 - jour (sol)
- un changement de phase: liquide (sol) → vapeur (atmosphère)
- la vitesse de transport
 - m / sec (atmosphère)
 - m / heure (sol-arbre)

Le stress hydrique



Le déficit hydrique de l'arbre résulte de deux composantes :

- Fluctuations atmosphériques, à haute fréquence (sec, heure)
- Disponibilité de l'eau du sol à basse fréquence (jour)

Le stress hydrique est le potentiel hydrique négatif, ou tension, générée par le déficit hydrique.

Brève revue du stress hydrique chez les arbres

Dixon, 1914, Chambre à pression, théorie de la tension-cohésion.

Développement de la chambre à pression Scholander , 1963

Détection acoustique de la cavitation (Milburn, 1963)

Conceptualisation de l'adaptation au stress: Kramer, Hsiao, Kozlowski

Architecture hydraulique des arbres (De Vinci 150X, Shinozaki 1964, Zimmermann et Tyree, 1988)

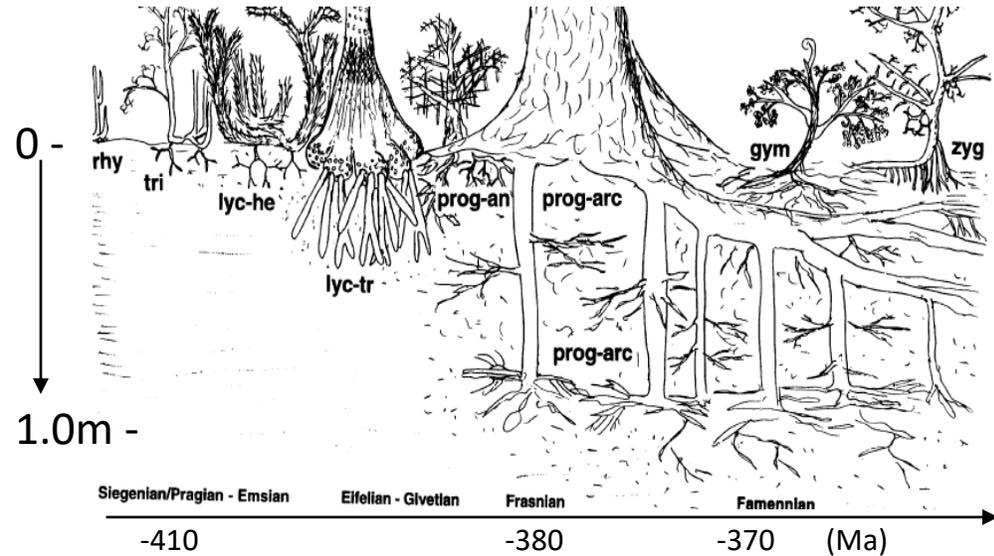
Cinétique du potentiel hydrique sous sécheresse (1976) Aussenac et Granier (1978).

Invention du capteur de flux de sève à chaleur continue (Granier, 1987)

Mesure de la vulnérabilité à la cavitation (Tyree et Cochard, 1990)

2022: et toujours la chambre à pression !

Echapper au stress: 1. la coévolution du système Sol – Forêt- Atmosphère



- Construire un réservoir hydrique: le sol (10^4 ans)
 - pédogénèse (sol)
 - altération des silicates

- Maintenir un état hydrique stable

→ Un système conducteur intégré : cuticule et stomate, vaisseaux et racines (10 ans) (Da Vinci, Dixon, Milburn, Tyree, Cochard,..)

→ Une régulation de la transpiration adaptée (s, mn, h, j a).

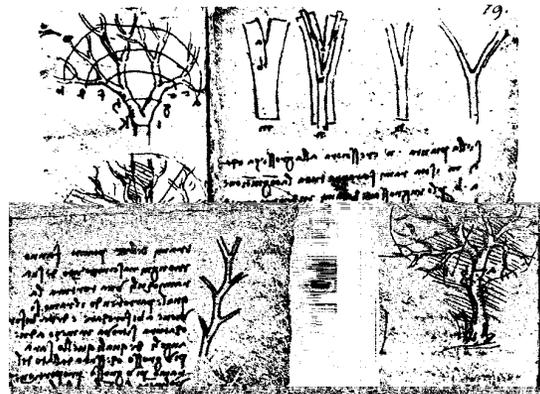
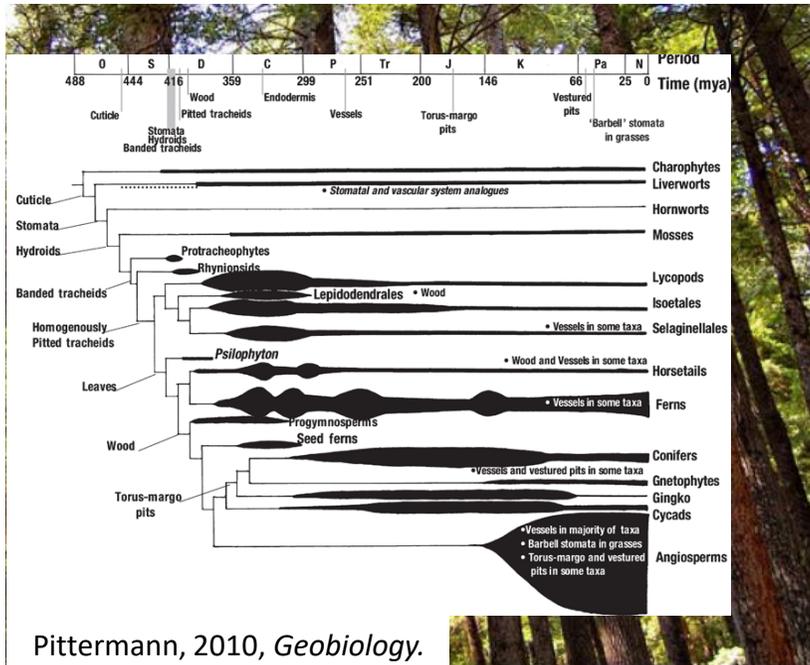
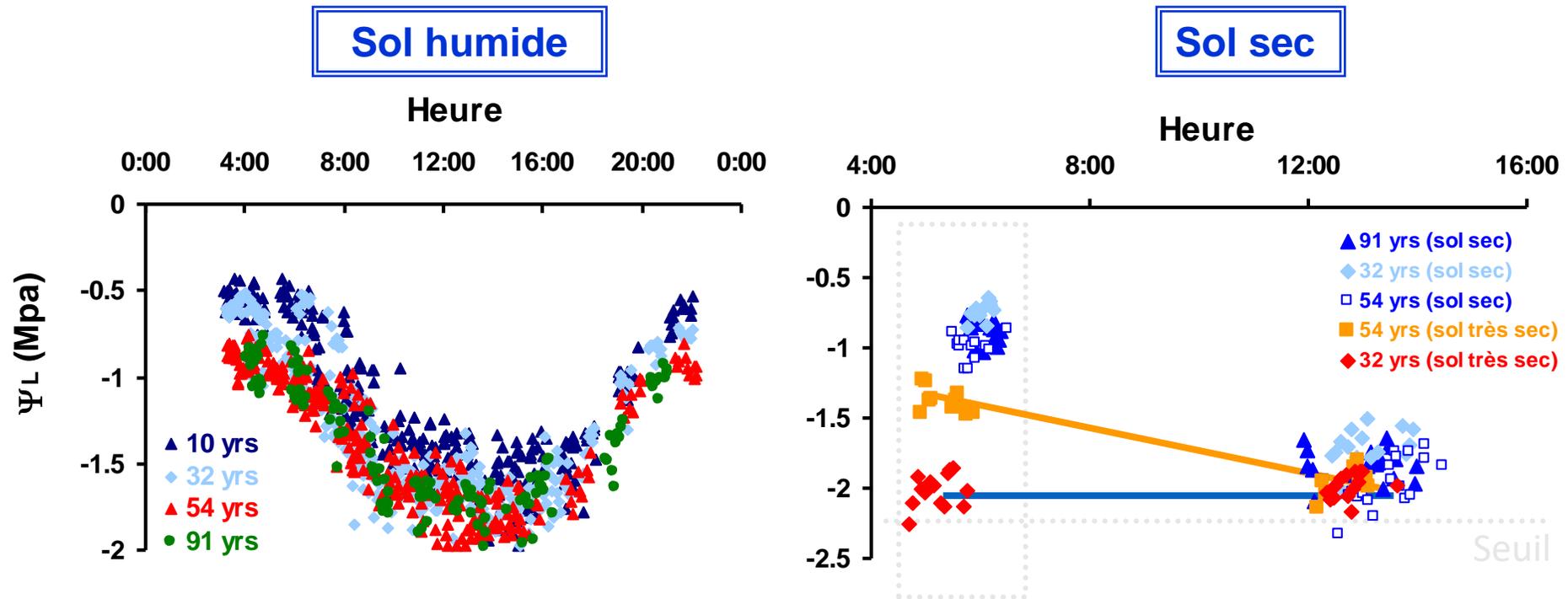


Fig. 4.1. Leonardo da Vinci's sketch of tree architecture showing that the transverse-sectional area of the trunk is equal to the sum of branch transverse-sectional areas. Note that Leonardo wrote in mirror-image. (Richter 1970)



Le succès évolutif de l'homéostasie hydraulique des arbres: ex. pour une chronoséquence de Pin maritime de 10 à 91 ans



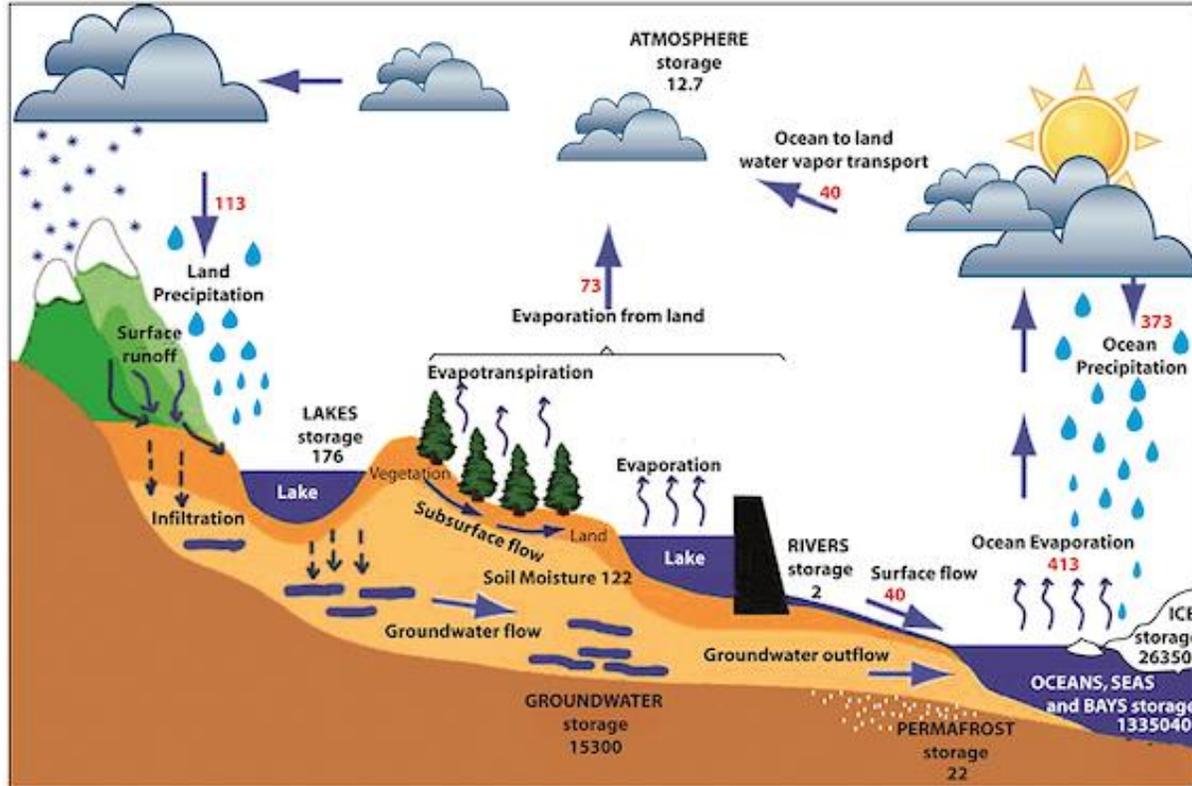
Cinétiques journalières de potentiel hydrique foliaire d'une chronoséquence de 4 peuplements (Delzon et al. Plant Cell & Env't, 2003)

Le potentiel hydrique foliaire est maintenu dans une gamme étroite, indépendamment de l'âge ou de la hauteur de l'arbre

Echapper au stress: 2. Recyclage hydrique à l'échelle continentale

Les forêts dans le cycle hydrologique global:

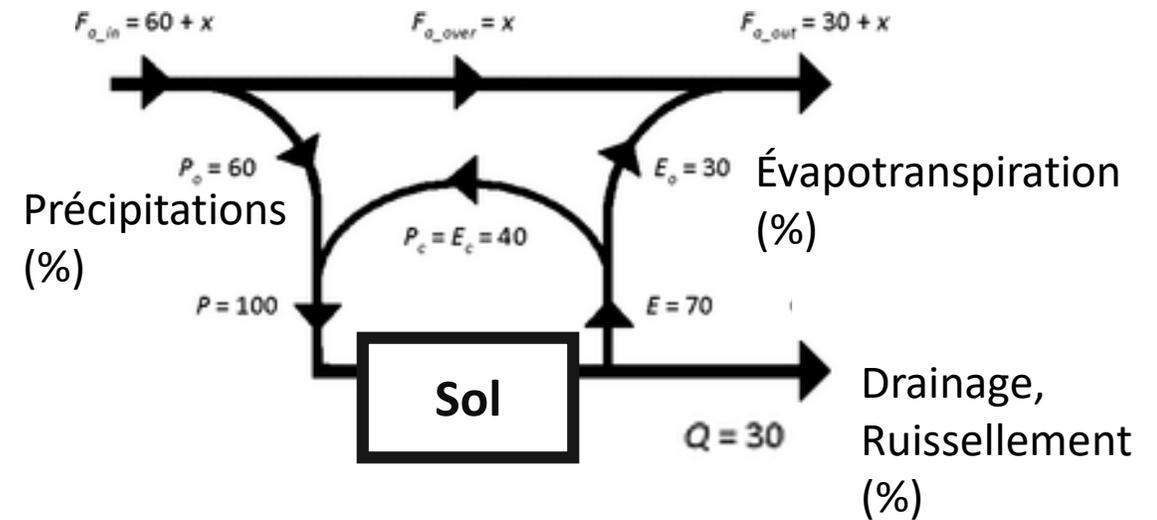
- recyclent 57% de l'ETR en précipitations continentales
- restituent 30% des précipitations comme eau « bleue » filtrée (rivières, nappe, lacs..)



Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation

Gimeno et al. 2012. *Reviews of Geophysics*, Volume: 50, Issue: 4, First published: 08 November 2012, DOI: (10.1029/2012RG000389)

Stock en 10^3 km^3
 Flux en $10^3 \text{ km}^3 \text{ an}^{-1}$



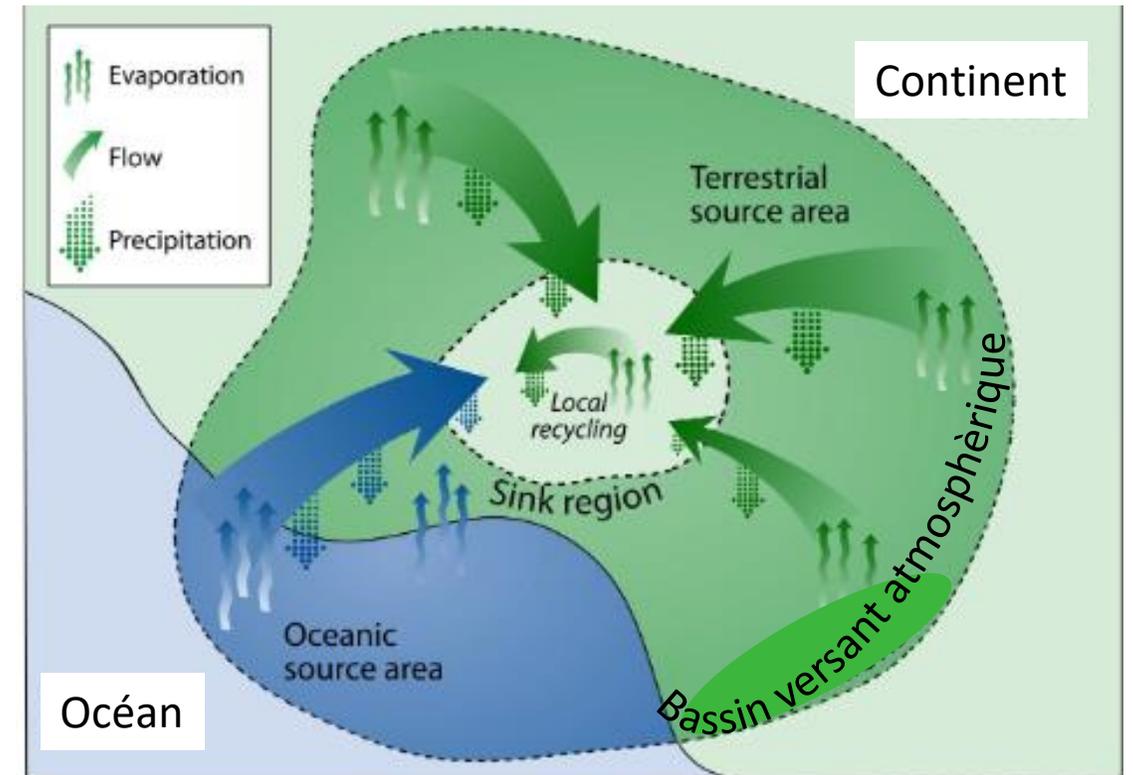
The importance of proper hydrology in the forest cover-water yield debate: commentary on Ellison *et al.* (2012) *Global Change Biology*, 18, 806–820

Global Change Biology

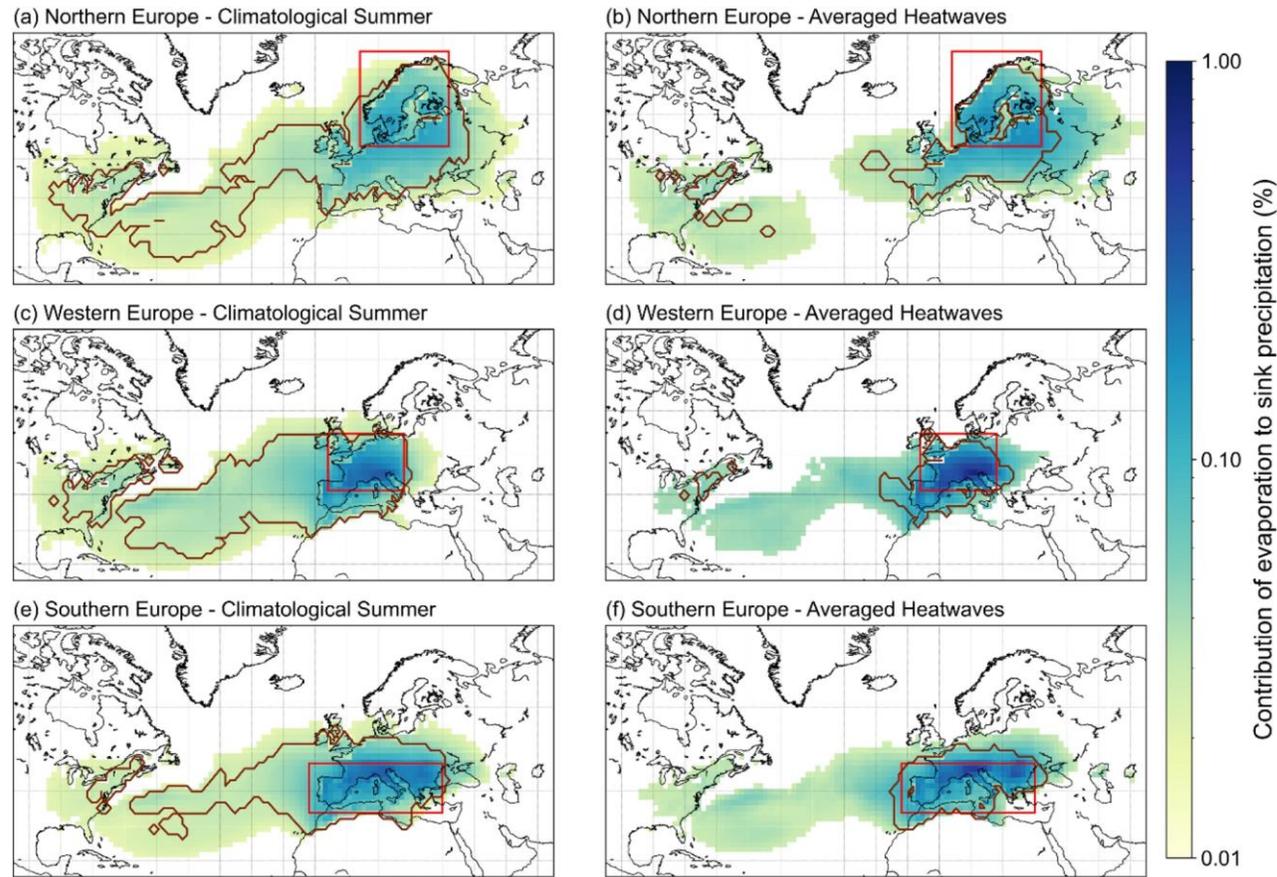
Volume 18, Issue 9, pages 2677-2680, 6 AUG 2012 DOI: 10.1111/j.1365-2486.2012.02703.x
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2012.02703.x/full#gcb2703-fig-0001>

Echapper au stress: 2. le 'recyclage' hydrologique

- Les forêts constituent une source de vapeur et de précipitations (vapeur, rugosité, nuclei de condensation) (O'Connor et al. 2021, GCB):
 - L'ETR d'une forêt impacte toute une région aval ou « puits »
 - Les précipitations incidentes proviennent d'un bassin versant (BV) atmosphérique étendu sur plusieurs 100aines de km



Keys et al. (2012)



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](#))

Observations historiques sur les bassins versants forestiers



(Pline l'ancien, Livre XXXI)

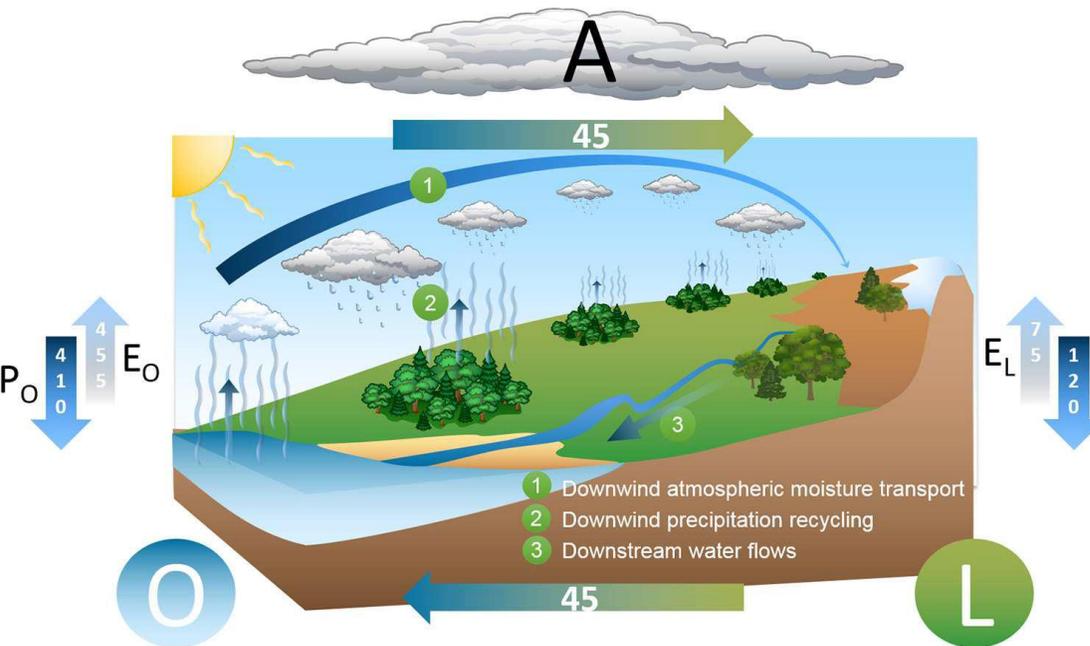
“Après que les forêts soient coupées, des sources émergent : par exemple, sur le mont Himus, quand Cassandre assiégeait les Gaulois qui rasèrent la forêt.

Des torrents déastreux se forment après la coupe de forêts de montagne qui retiennent les nuages et s'en nourrissent.

Conséquence pour la sylviculture (s.l.)

Le fonctionnement hydrique des forêts régule le climat régional:

Cycle de l'eau continental



Impact des forêts sur le régime de précipitations

Biome Removed	$\Delta T_{\text{devegetated region}}$	$\Delta T_{\text{all land}}$	ΔT_{global}	$\Delta P_{\text{devegetated region}}$	$\Delta P_{\text{all land}}$	ΔP_{global}
tropical forest	1.18 °C	0.71 °C	0.24 °C	-1.34 mm day ⁻¹	-0.55 mm day ⁻¹	-0.11 mm day ⁻¹
boreal forest	-2.75 °C	-1.58 °C	-0.77 °C	-0.27 mm day ⁻¹	-0.11 mm day ⁻¹	0.00 mm day ⁻¹
temperate forest	-1.07 °C	-0.46 °C	-0.22 °C	-0.49 mm day ⁻¹	-0.18 mm day ⁻¹	-0.06 mm day ⁻¹
savanna	0.87 °C	0.37 °C	0.12 °C	-1.10 mm day ⁻¹	-0.61 mm day ⁻¹	-0.19 mm day ⁻¹
grassland / steppe	0.75 °C	0.20 °C	0.05 °C	-0.41 mm day ⁻¹	-0.31 mm day ⁻¹	-0.12 mm day ⁻¹
shrubland / tundra	0.32 °C	0.04 °C	-0.01 °C	-0.35 mm day ⁻¹	-0.31 mm day ⁻¹	-0.08 mm day ⁻¹

Table S2A. Estimated Changes in Temperature and Precipitation That Could Result from Large-Scale Land Cover Change. A set of global climate model simulations (S23) have demonstrated how large-scale land cover change – removing an entire biome from the surface of the planet, one at a time – could affect the global climate system. Each biome’s potential influence on the annual average temperature (°C) and precipitation (mm day⁻¹) are presented as differences (vegetation removal – control simulations). The results are summarized over the areas where vegetation was removed (“devegetated”), over all land areas (“all land”) and the entire globe (“global”). Only gridcells with a statistically significant change in temperature or precipitation (using a two-sided Student’s t-Test, at 95% confidence) are used in this analysis. (Adapted from ref. S23)

Conséquences pour la sylviculture: 2. le niveau local

Articles fondateurs 1980-1995

- Nnyamah JU, Tan CS (1977) The Role of Thinning in Improving the Forest Soil Moisture Regime. 6th British Columbia Soil Science Workshop Report 148-166.
- Aussenac G, Granier A (1988) Effects of Thinning on Water Stress and Growth in Douglas Fir. *CanJForRes* 18:100-105.
- Whitehead D, Kelliher FM (1991) A Canopy Water Balance Model for a Pinus-Radiata Stand Before and After Thinning. *Agricultural and Forest Meteorology* 55:109-126.
- Bréda N, Granier A, Aussenac G (1995) Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea*). *Tree Physiology* 15:295-306.

Eclaircie systématique et amélioration du bilan hydrique : interception des précipitations



Tableau I Principales caractéristiques des deux peuplements étudiés (fin mars 1980, après l'éclaircie)

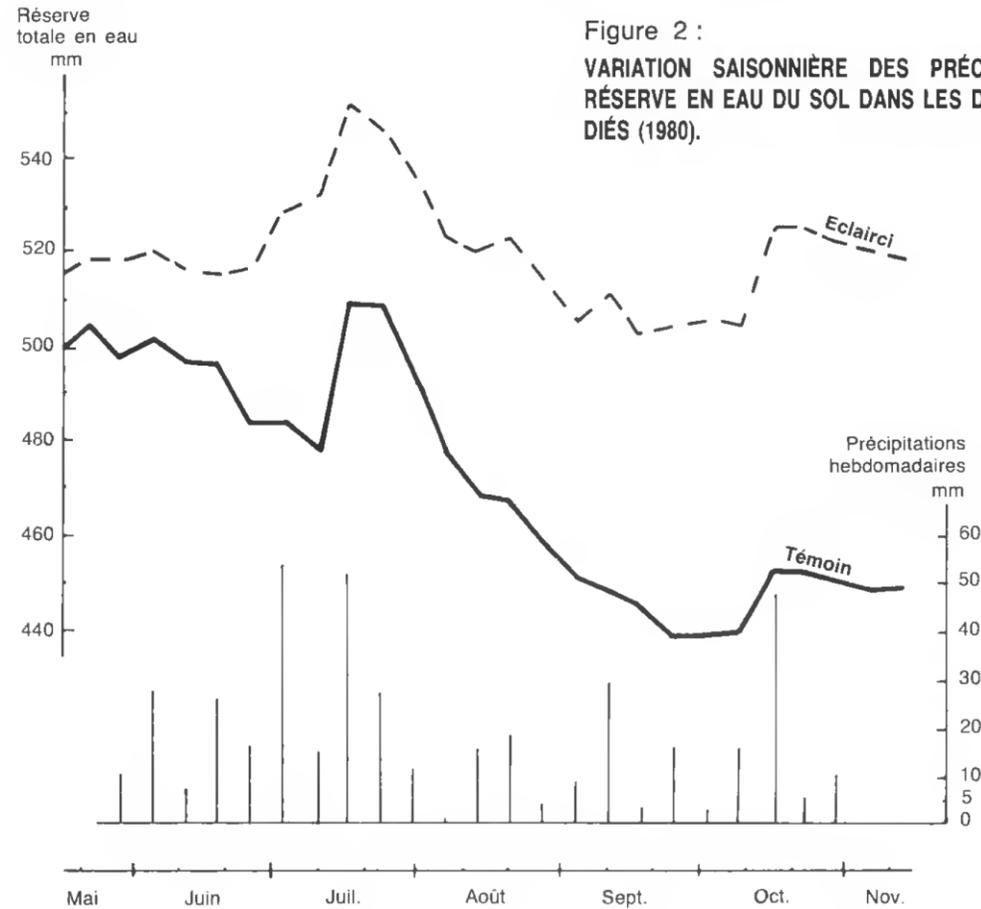
	Peuplement témoin	Peuplement éclairci
Âge (ans)	19	19
Hauteur moyenne (m)	11,5	11,5
Circonférence moyenne à 1,30 m (cm)	39,9	40,4
Densité (tiges/ha)	2 932	1 447
Surface terrière (m ² /ha)	39,27	19,85
Facteur d'espacement (%)	15	23

Tableau III Interception des précipitations dans les deux peuplements (période du 12 juin au 30 octobre 1980)

	Précipitations incidentes (P_i)		Précipitations au sol (P_s)		Ecoulement le long des troncs (P_t)		Interception (I_n)	
	mm		mm	%	mm	%	mm	%
Peuplement témoin ...	388,4		177,9	45,8	42,0	10,8	168,5	43,4
Peuplement éclairci ..	388,4		240,1	61,8	30,5	7,9	117,8	30,3

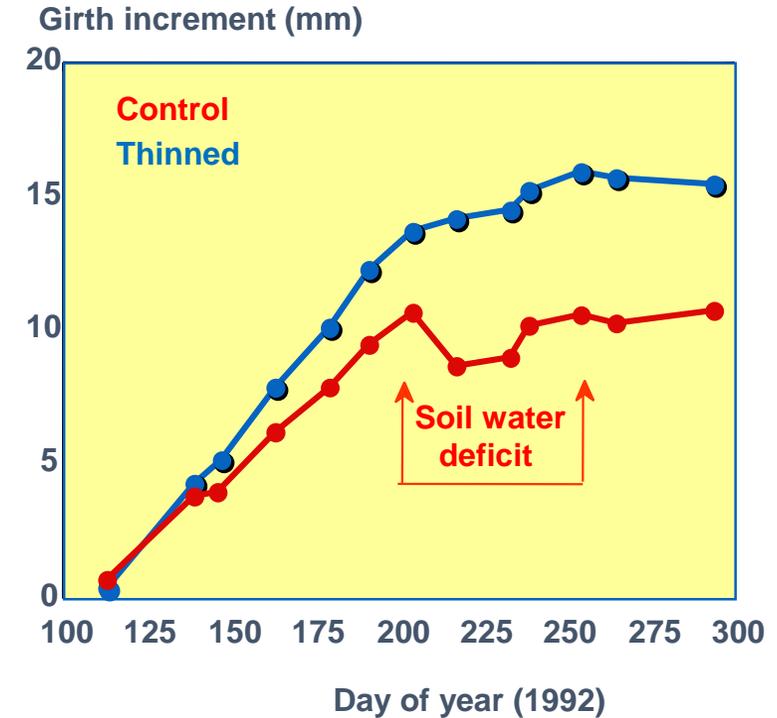
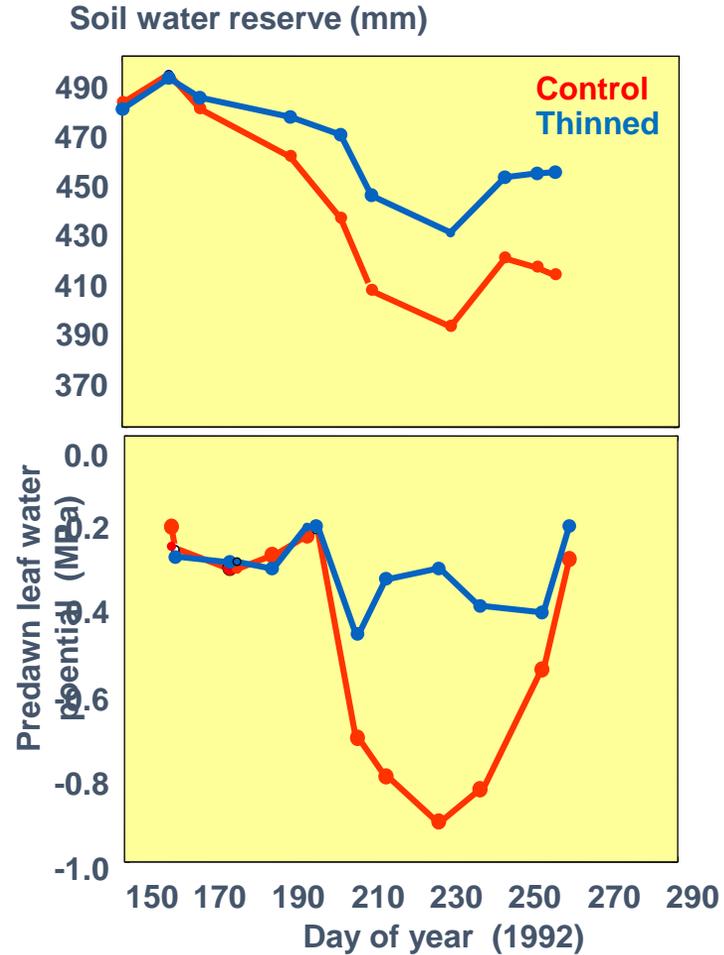
Aussenac, Granier, Naud, 1984

Eclaircie systématique et amélioration du bilan hydrique : disponibilité en eau dans le sol



Aussenac, Granier, Naud, 1984

Eclaircir pour réduire le stress (Chênes, 45 ans)



Bréda, Granier, Aussenac, 1995

De la mesure des flux élémentaires d'eau au bilan hydrique: le modèle BILJOU

- Modifications microclimatiques
 - Transpiration des arbres (flux de sève)
 - Etat hydrique des arbres (potentiels hydriques)
 - Mesure directe de l'évapotranspiration (covariances turbulentes)
 - Interception des précipitations
 - Contenu en eau du sol
 - Indice foliaire des couverts
- > bilan hydrique calculé
- > naissance de Biljou (1999)



Biljou© utilisé dans la communauté internationale sur sécheresse x densité / éclaircie

esa

ECOSPHERE

Sixty-five years of fire manipulation reveals climate and fire interact to determine growth rates of *Quercus* spp.

TYLER REFSLAND ^{1,†} BENJAMIN KNAPP,² KIRSTEN STEPHAN,³ AND JENNIFER FRATERIGO^{1,4}

Forest Ecology and Management 432 (2019) 436–445



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Forest Ecology and Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/foreco

How do mixing tree species and stand density affect seasonal radial growth during drought events?

Jordan Bello^{a,*}, Patrick Vallet^{a,b}, Thomas Perot^a, Philippe Balandier^a, Vincent Seigner^a, Sandrine Perret^a, Camille Couteau^a, Nathalie Korboulewsky^a

Annals of Forest Science
DOI 10.1007/s13595-013-0348-y

ORIGINAL PAPER

Thinning has a positive effect on growth dynamics and growth–climate relationships in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees of different crown classes

Jorge Olivar · Stella Bogino · Cyrille Rathgeber · Vivien Bonnesoeur · Felipe Bravo

Agricultural and Forest Meteorology 213 (2015) 77–90



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Agricultural and Forest Meteorology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agrformet

Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes

Miquel De Cáceres^{a,b,*}, Jordi Martínez-Vilalta^{b,c}, Lluís Coll^{a,b}, Pilar Llorens^d, Pere Casals^a, Rafael Poyatos^b, Juli G. Pausas^e, Lluís Brotons^{a,b,f}

Ecological Modelling 356 (2017) 141–150



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Ecological Modelling

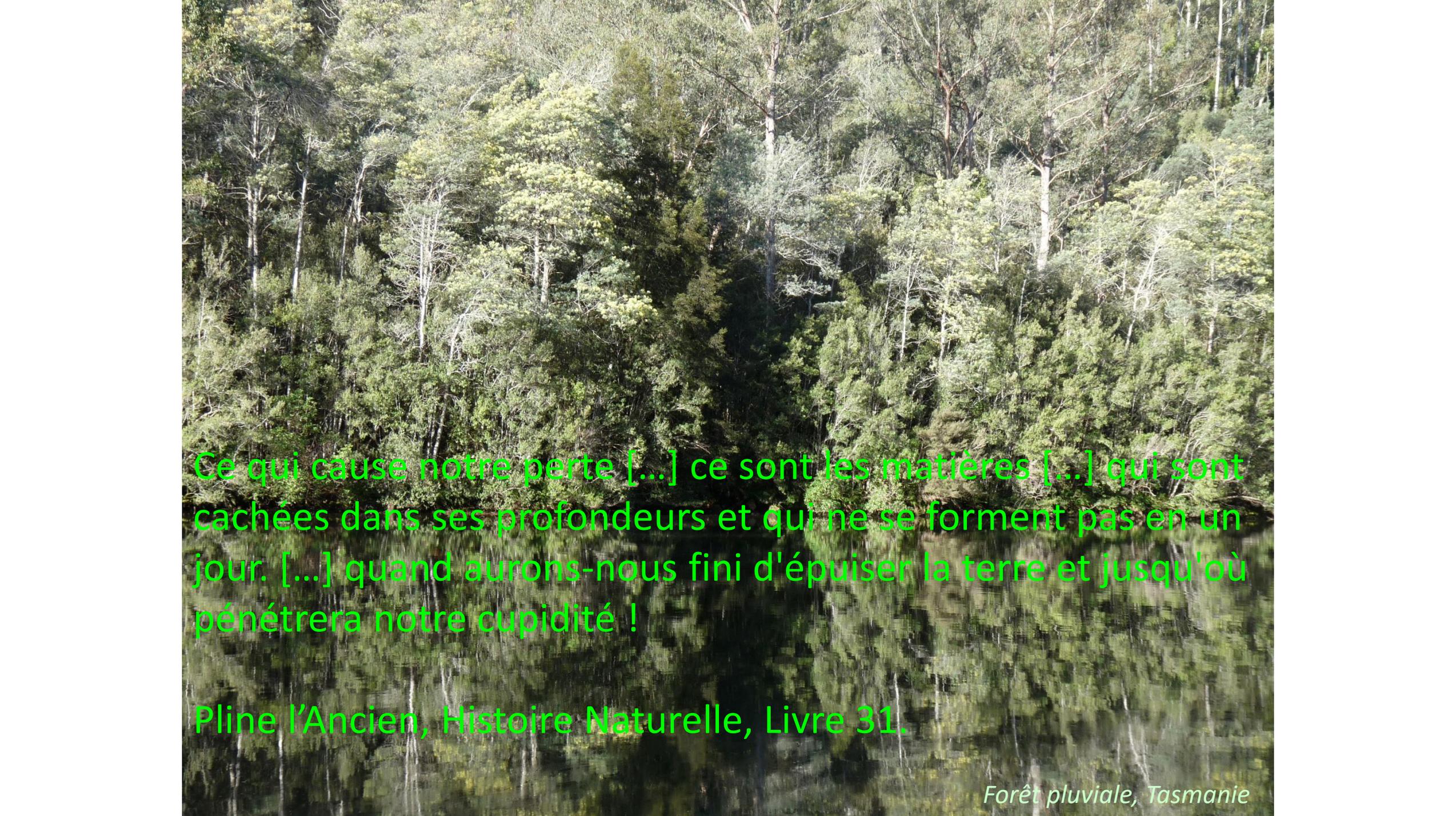
journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolmodel

Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change: A modelling approach

Aitor Ameztegui^{a,b,*}, Antoine Cabon^{a,b}, Miquel De Cáceres^{a,b}, Lluís Coll^{a,b,c}

Une sylviculture de l'eau et des forêts

- Aménager l'écosystème global
 - Stabiliser le climat global:
 - Transition zéro carbone !
 - Prendre en compte les impacts régionaux:
 - Bassin versant atmosphérique
 - Région puits alimentée
 - Bassin versant hydrologique et gestion de l'eau bleue
- Adapter l'écosystème local selon ses finalités
 - Stabiliser le régime hydrique
 - Adapter l'ETR des peuplements à la ressource en eau
 - Essences (phénologie, comportement)
 - Conduite du peuplement (LAI)
 - Sous étage
 - Production: ... il faut de l'eau !!
 - Fonctionnalités non productives : laisser le temps à l'adaptation

A photograph of a dense forest of tall, thin trees, likely eucalyptus, reflected in a calm body of water. The trees are mostly green with some yellowish-green foliage. The water is very still, creating a clear mirror image of the forest above. The sky is not visible, and the overall scene is peaceful and natural.

Ce qui cause notre perte [...] ce sont les matières [...] qui sont cachées dans ses profondeurs et qui ne se forment pas en un jour. [...] quand aurons-nous fini d'épuiser la terre et jusqu'où pénétrera notre cupidité !

Pline l'Ancien, Histoire Naturelle, Livre 31.

Forêt pluviale, Tasmanie

3. La forêt fait la pluie et le beau temps

3.1. Forêt et humidité de l'air

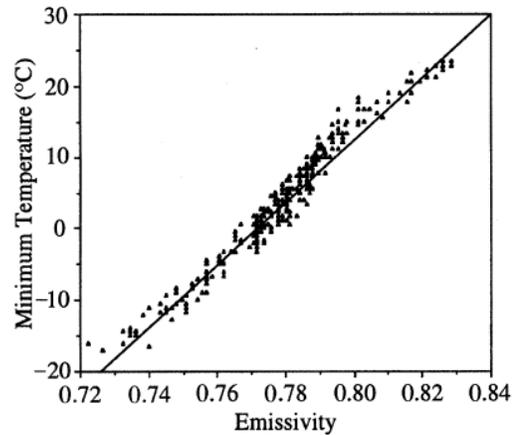
□ Impact sur la température:

1^{er} Feed back +:

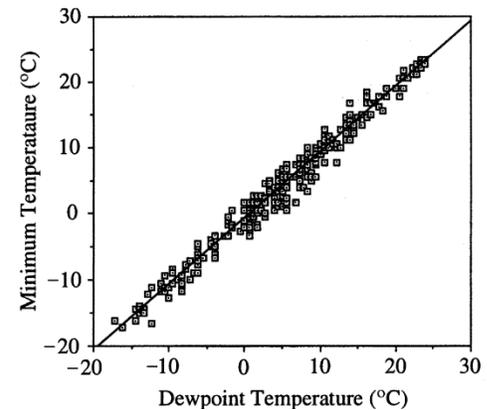
ETR → Humidité de l'air → rayonnement IR atmosphérique → T min ↑

2^{ème} Feed back +

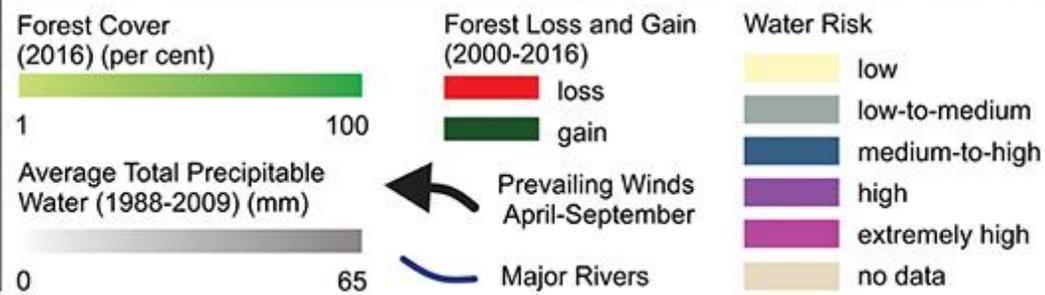
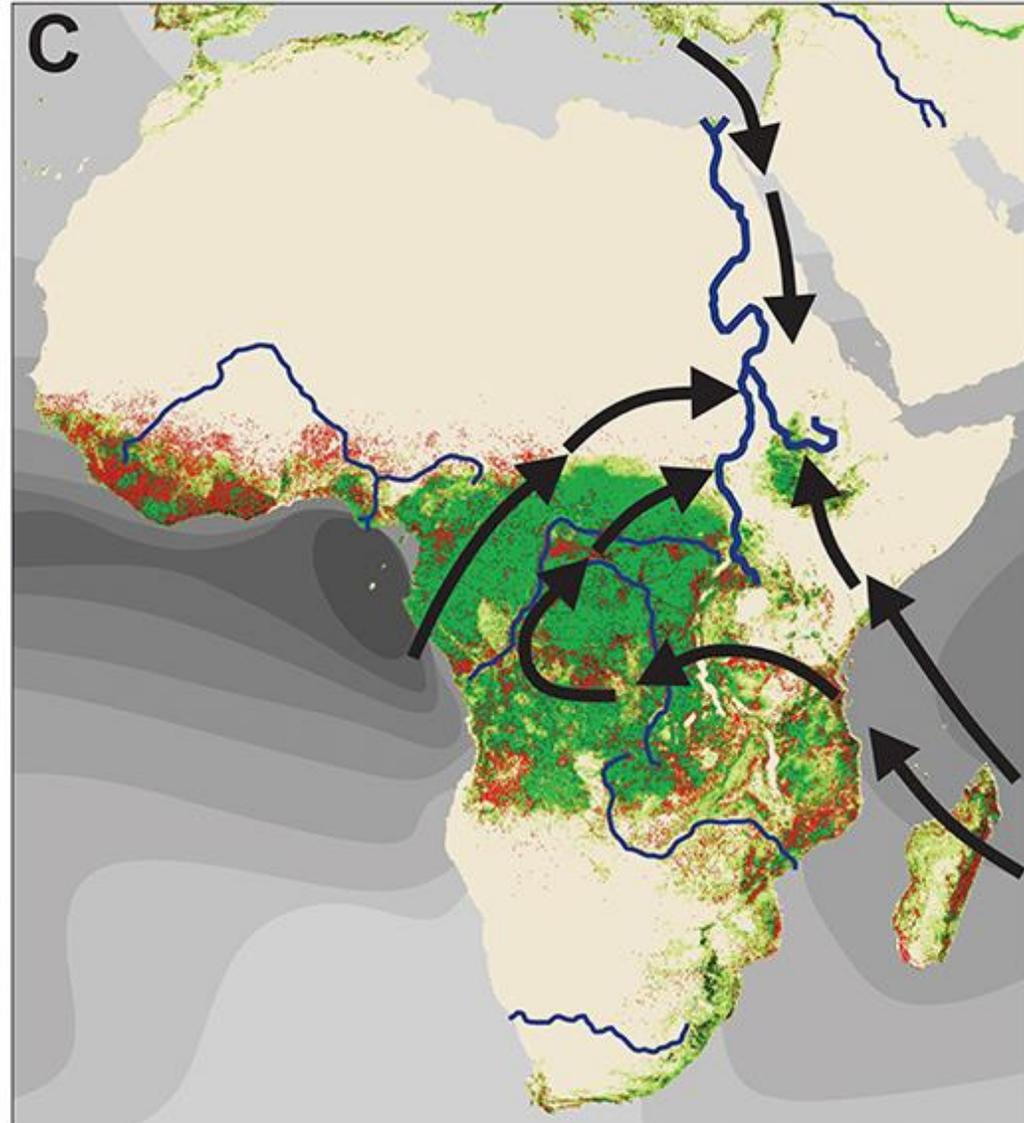
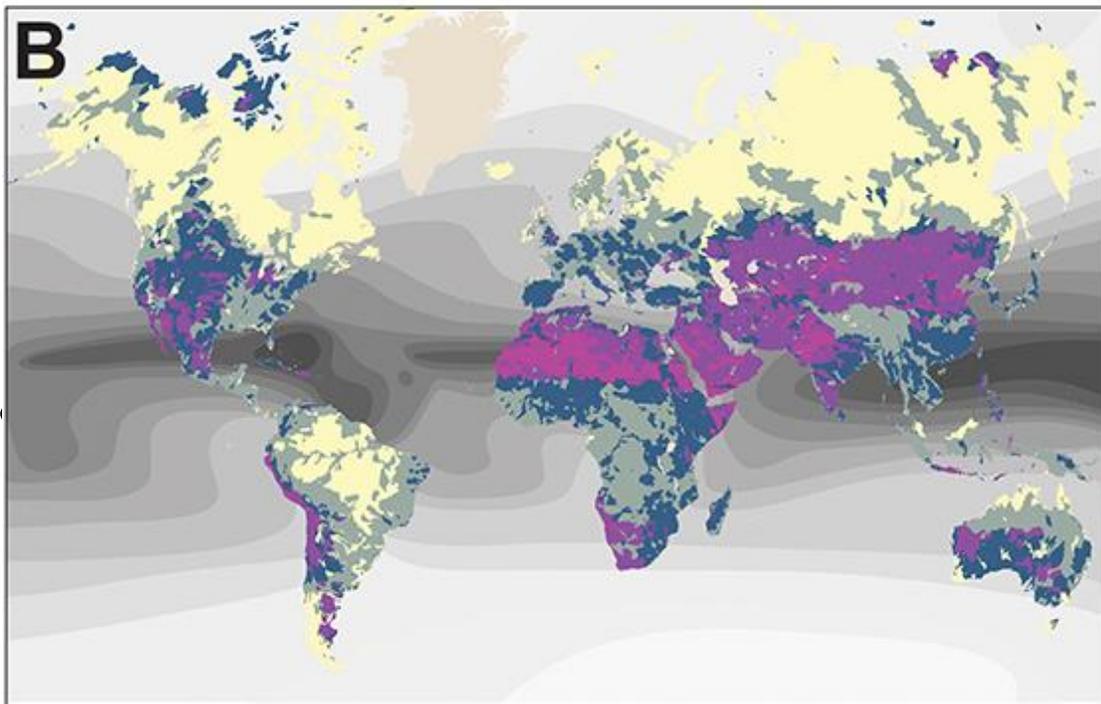
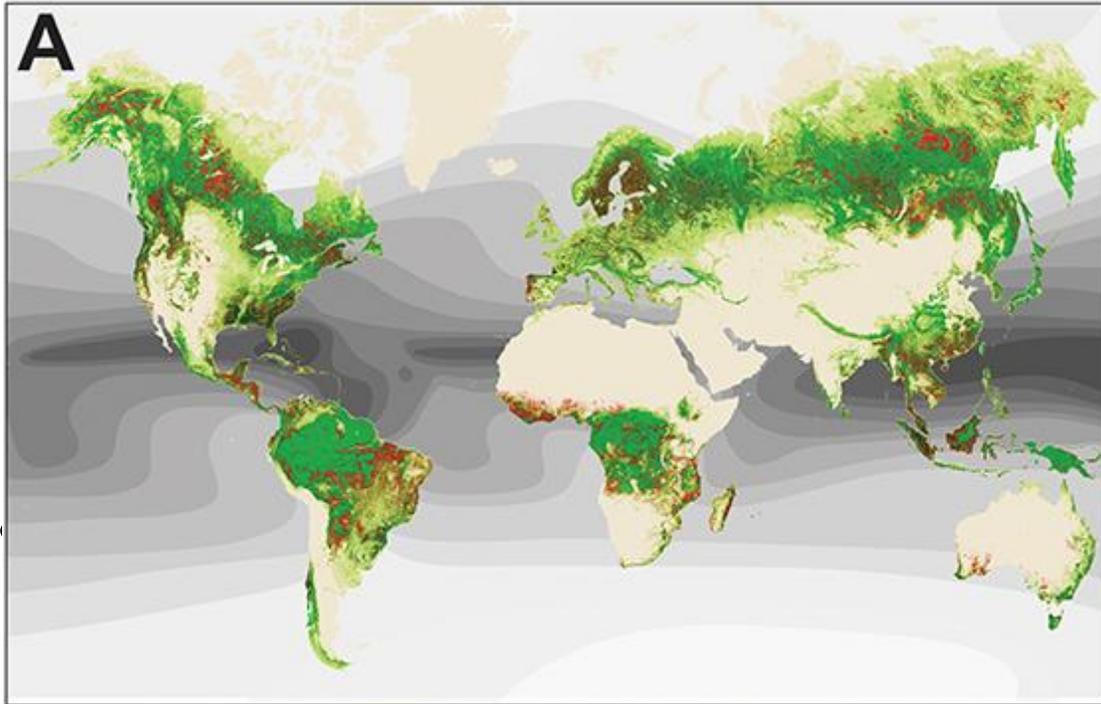
ETR → Humidité de l'air → T rosée → Chaleur de condensation → Tmin ↑



Corrélation entre émissivité atmosphérique et température minimale pour 222 stations météo N Americ.



Corrélation entre T rosée et Tmin pour 222 stations météo Janvier et Juillet.



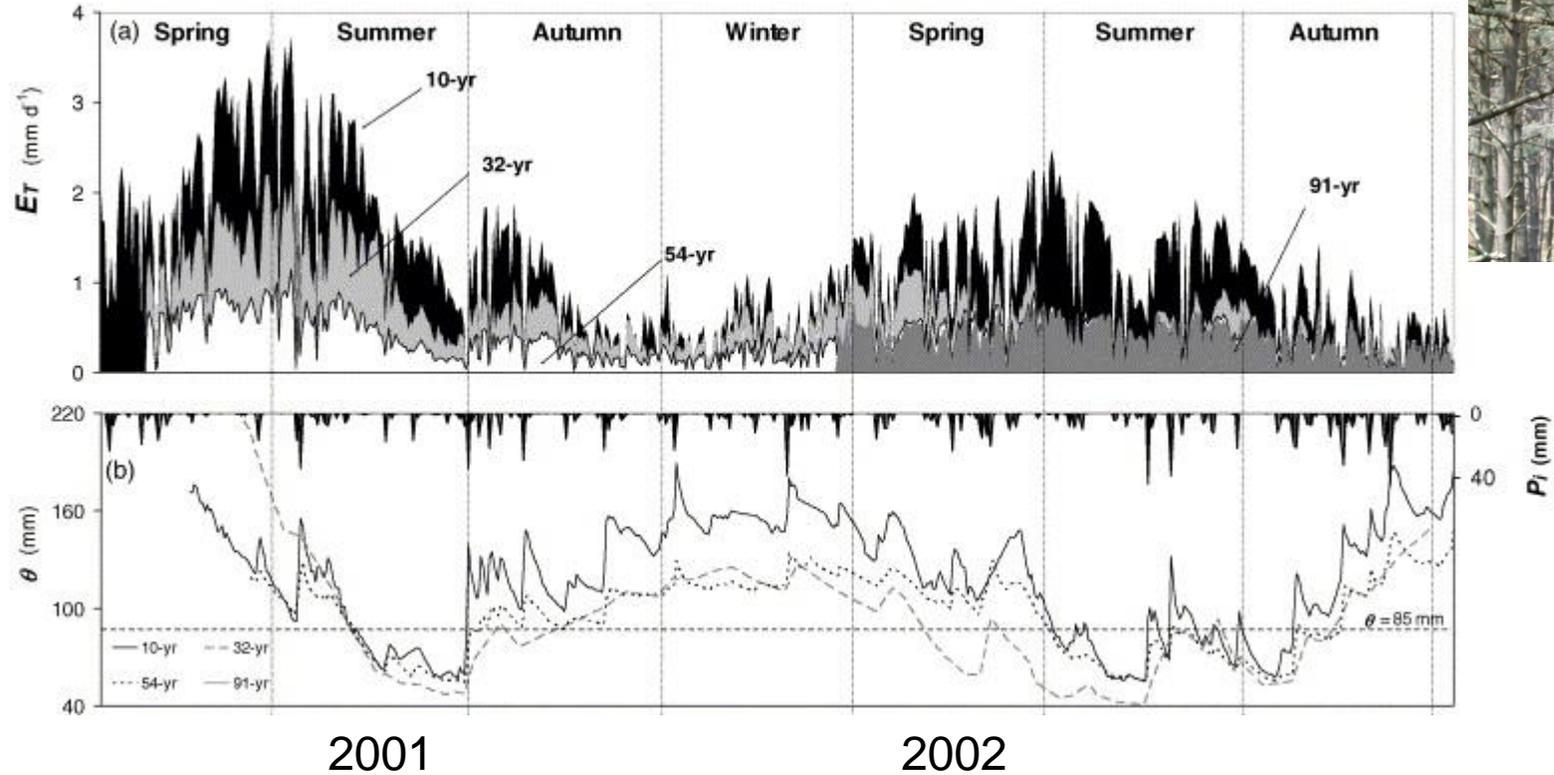
3. La forêt fait la pluie et le beau temps

3.1. Humidité de l'air: illustration pour l'Amazonie

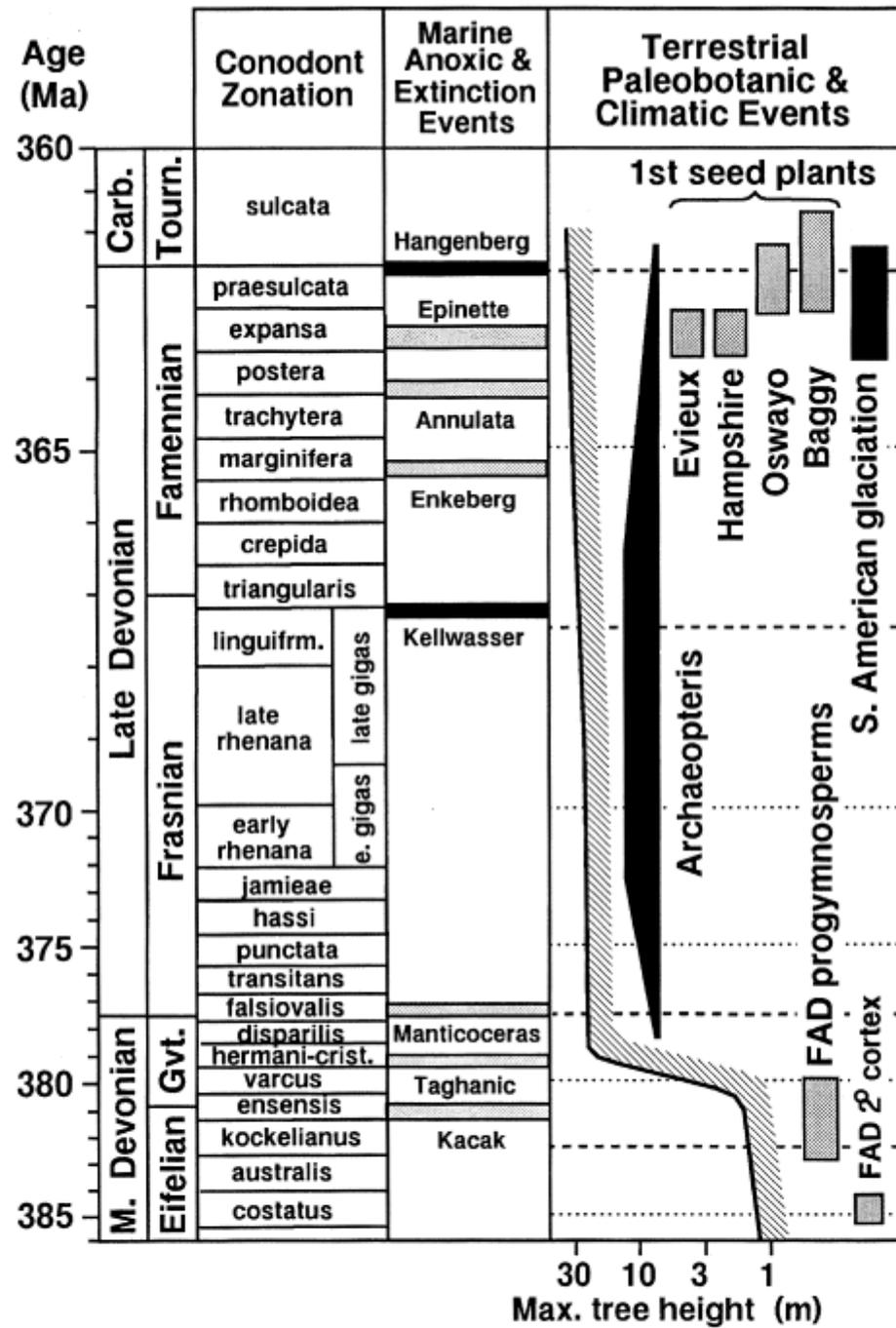


2. Evaporation components : do they compensate for each other as forest ages ?

2. Tree transpiration.



Seasonal course of maritime Pine transpiration across a 4 stand chronosequence (ET) for 2001 and 2002. (Delzon et al. Agr For Met, 2005)



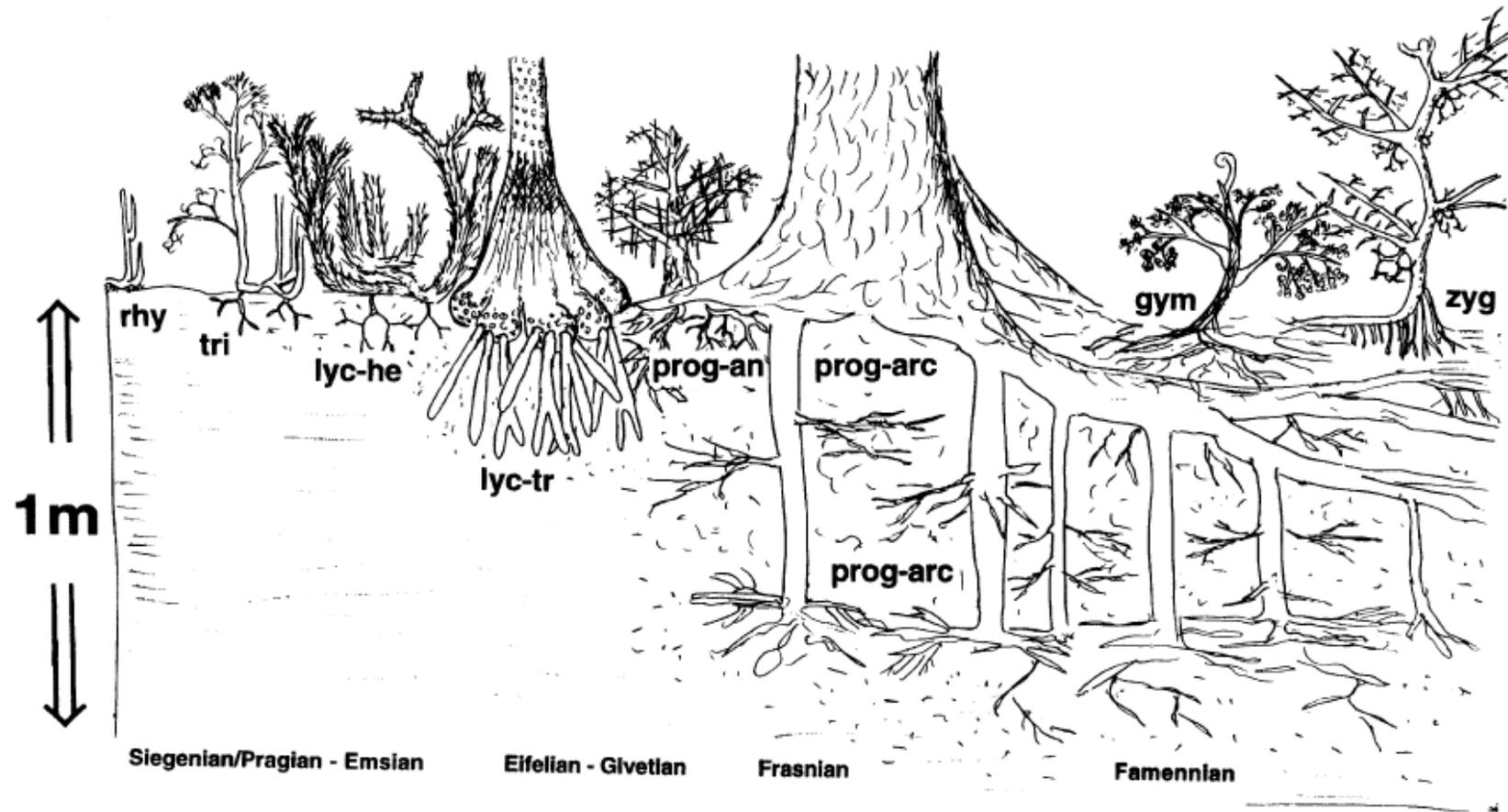
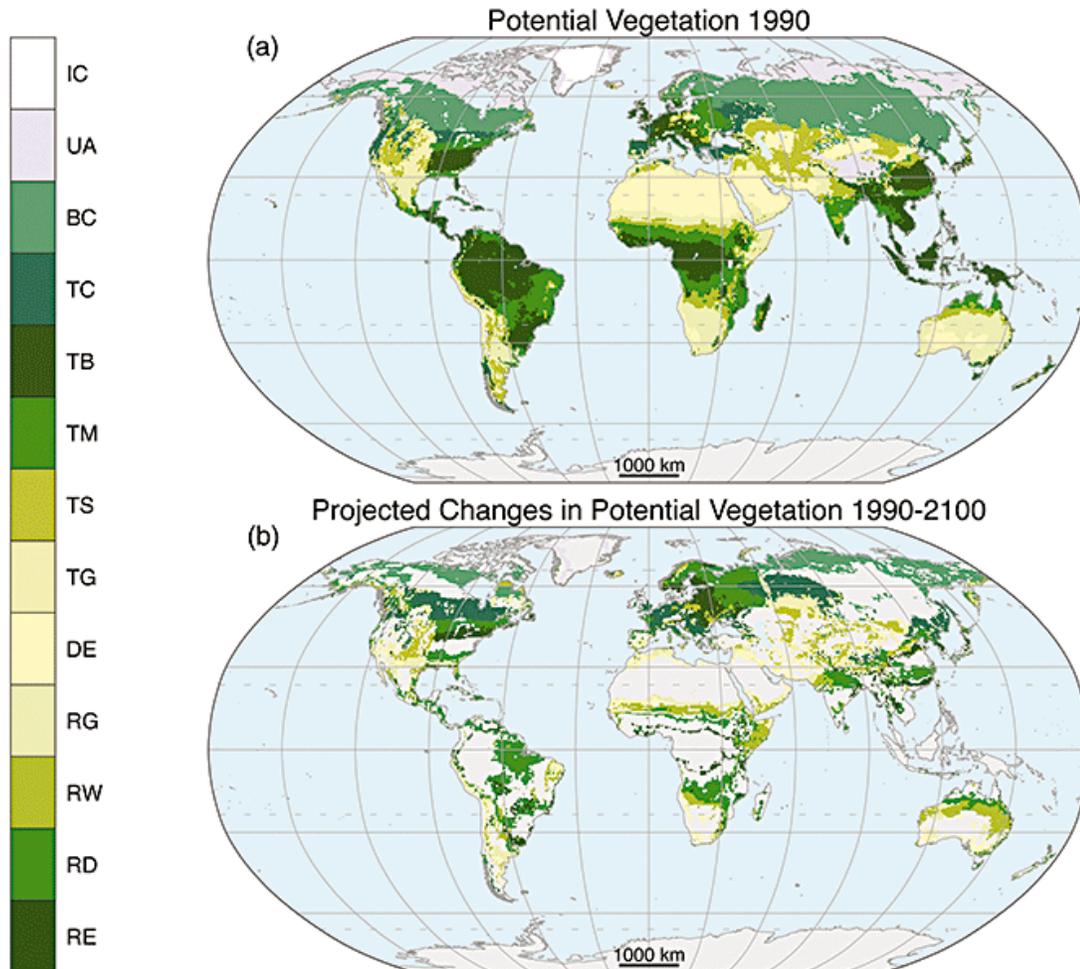


Figure 3. Diagram of the relative sizes, morphologies, and penetration depths of the root systems of selected Early, Middle, and Late Devonian plants. Abbreviations: rhy=rhyniophytes such as *Aglaophyton* or *Horneophyton*; tri=trimerophytes such as *Psilophyton*; lyc-he=early herbaceous lycopods such as *Asteroxylon* or *Drepanophycus*; lyc-tr=early tree lycopods such as *Lepidosigillaria* or *Cyclostigma*; prog-an=aneurophyte progymnosperms such as *Tetraxylopteris*; prog-arc=*Archaeopteris* progymnosperms; gym=early gymnosperms such as *Elkinsia* or *Moresnetia*; and zyg=zygopterid ferns such as *Rhacophyton*. Scale bar, 1 m.

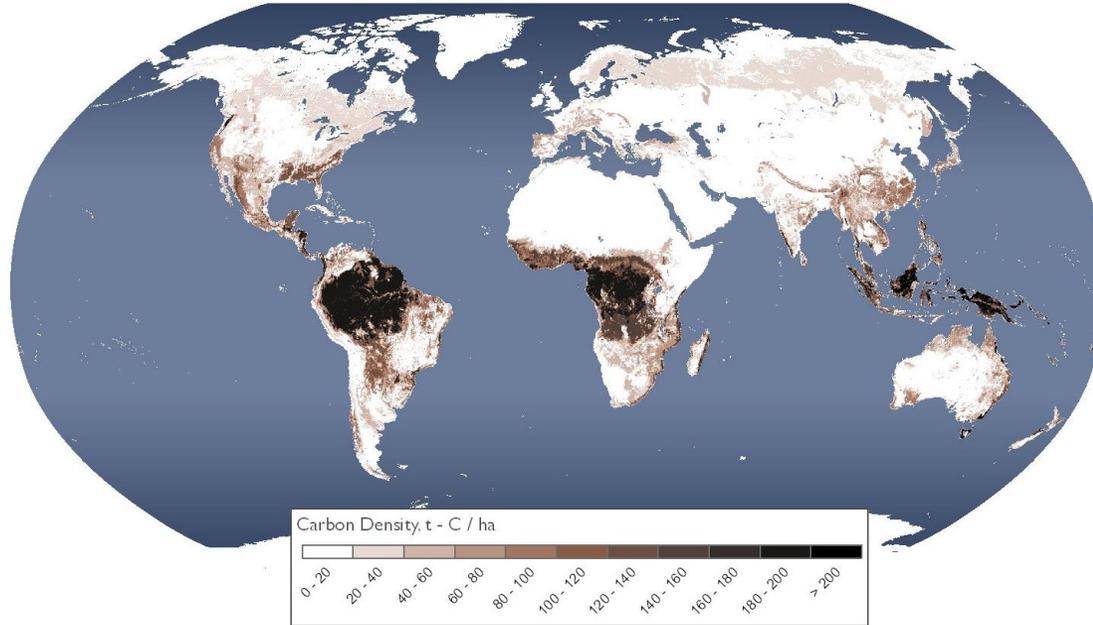


Gonzalez et al. *Global Ecol. & Biogeog.* 2010

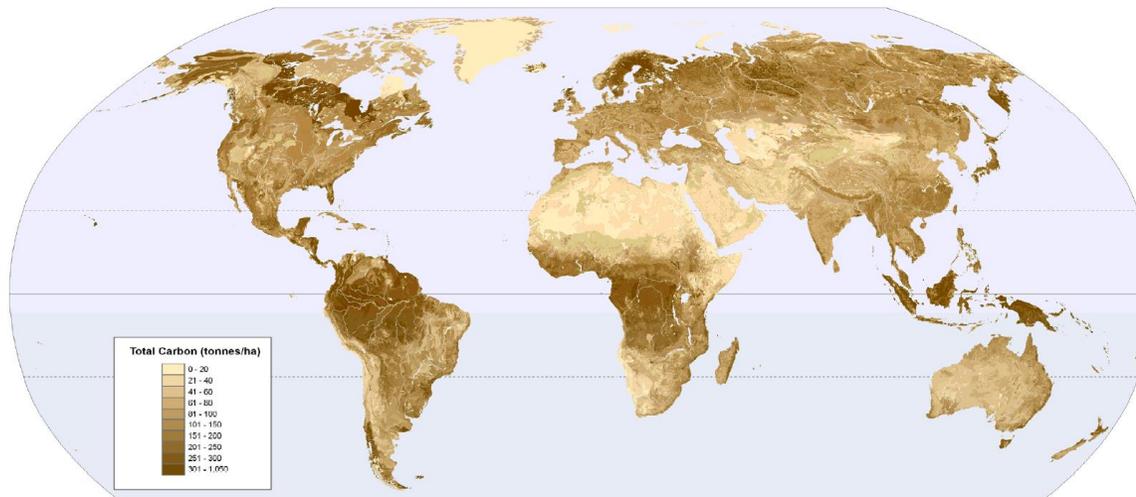
5 à 40 % de la surface des biomes forestiers est vulnérable au changement climatique (Gonzalez et al. 2010)

La capacité de migration et d'adaptation intrinsèques des essences forestières sont limitées. (cf. Smith et Beaulieu 2009)

Global Above- and Below-ground Living Biomass Carbon Density



Ruesch, et al. 2008. New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000.



Scharlemann, J., Hiederer, R., Kapos, V. (2009). *UNEP-WCMC & EU-JRC*, Cambridge, UK.

Les zones vulnérables ont les plus fortes densités en carbone:

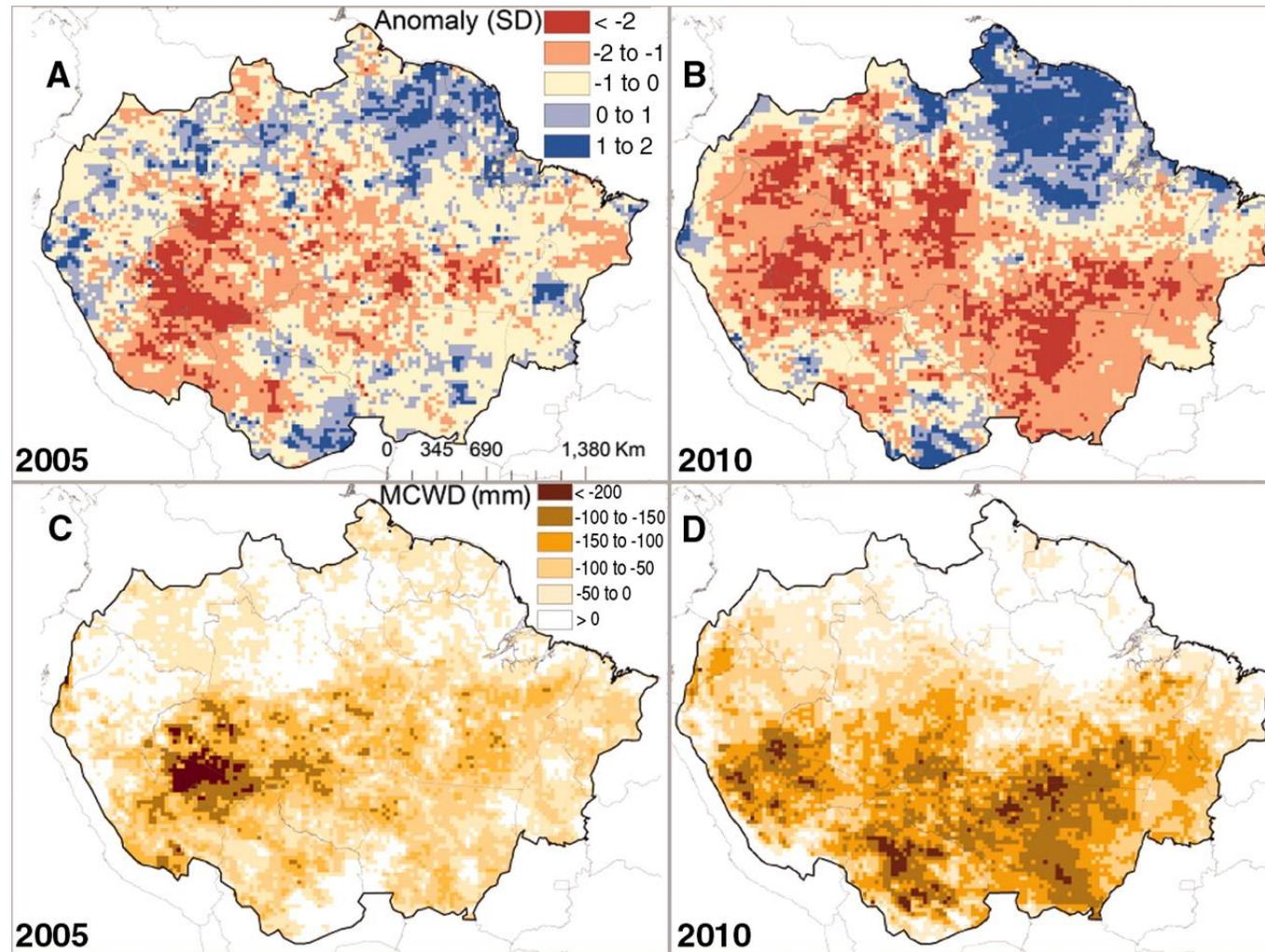
← Biomasse (zone tropicale)

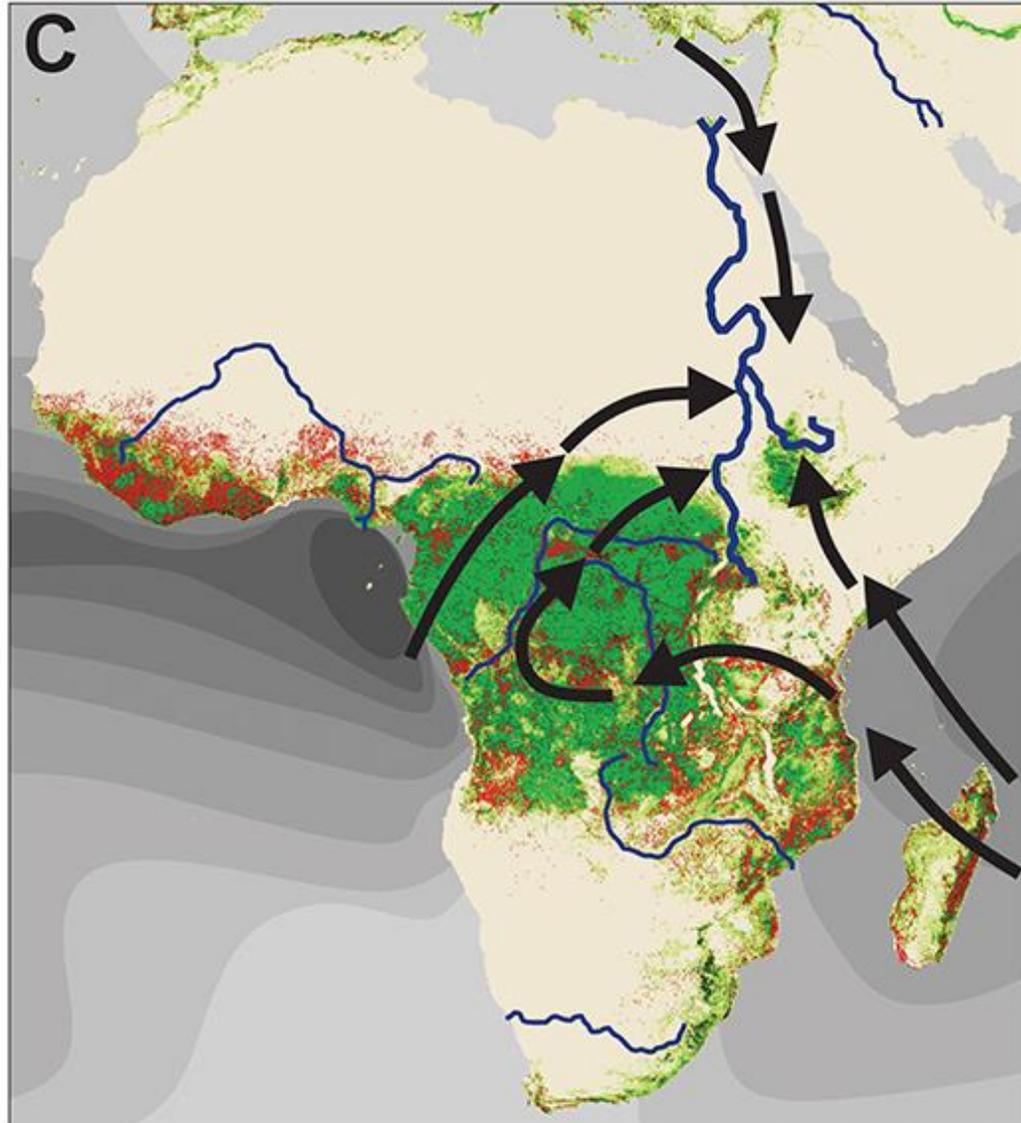
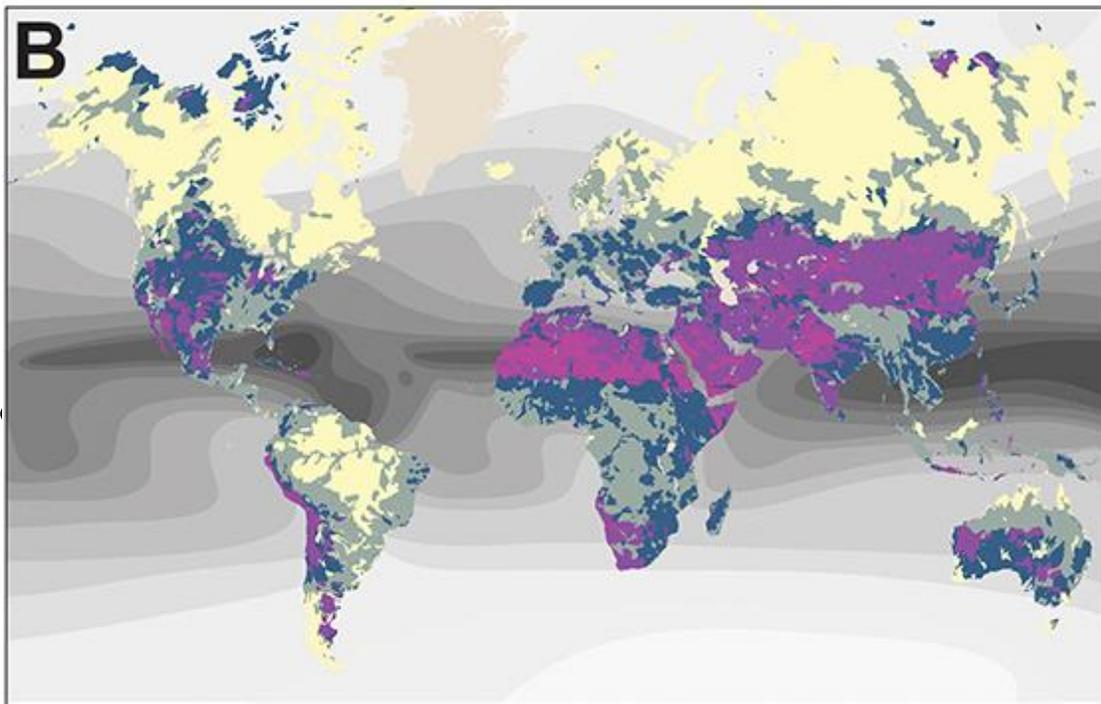
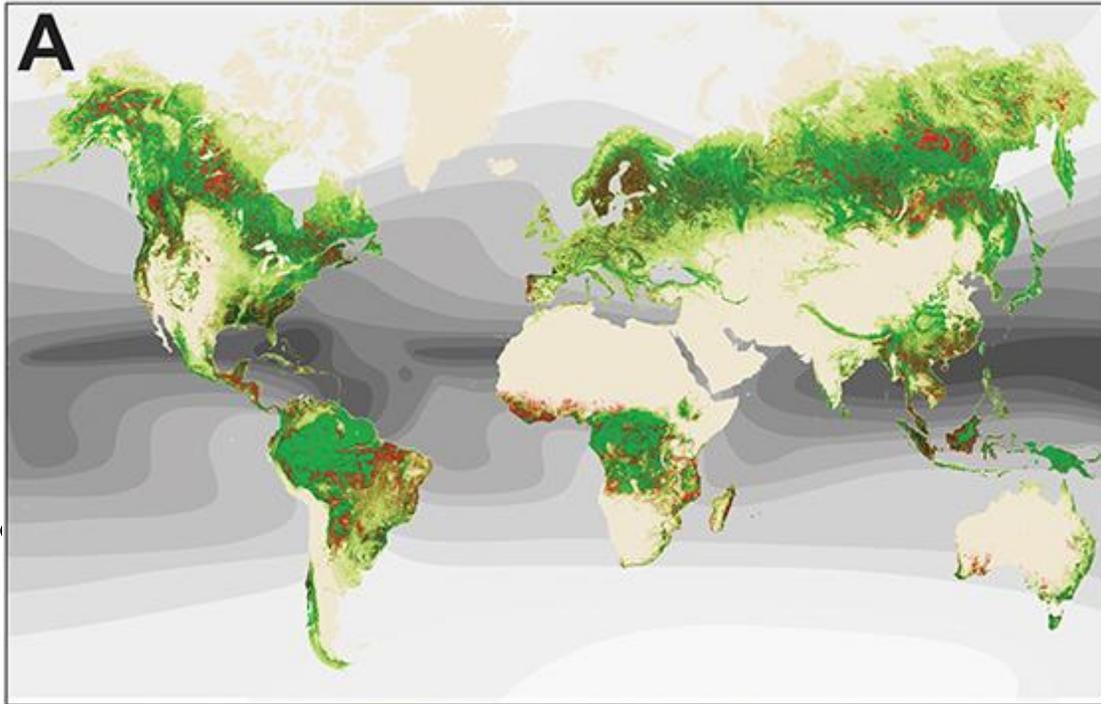
← Sol (permafrost et tourbières boréales)

(Schuur et al. 2008, Muskett et Romanovsky, *Natural Science*, 2011)

Cette rétroaction n'est pas encore prise en compte dans les scénarios climatiques analysés.

Repeated drought events led Amazonian rainforest from a weak sink to a strong source





3. La forêt fait la pluie et le beau temps

3.2 Effet sur les précipitations

« Forêt pluviale » ou plutôt Pluie forestière !

Christophe Colomb ,Thomas Jefferson, d'autres... :

Les forêts sont responsables de près de 50% des précipitations continentales.

Elle permet de « projeter » les précipitations à l'intérieur des continents: 88 % des précipitations de l'ouest amazonien provient de l'évaporation de la forêt.

