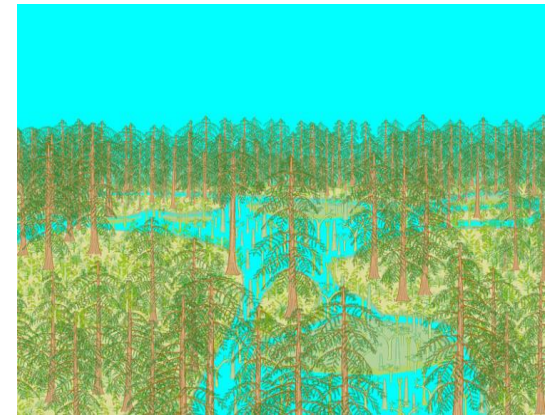
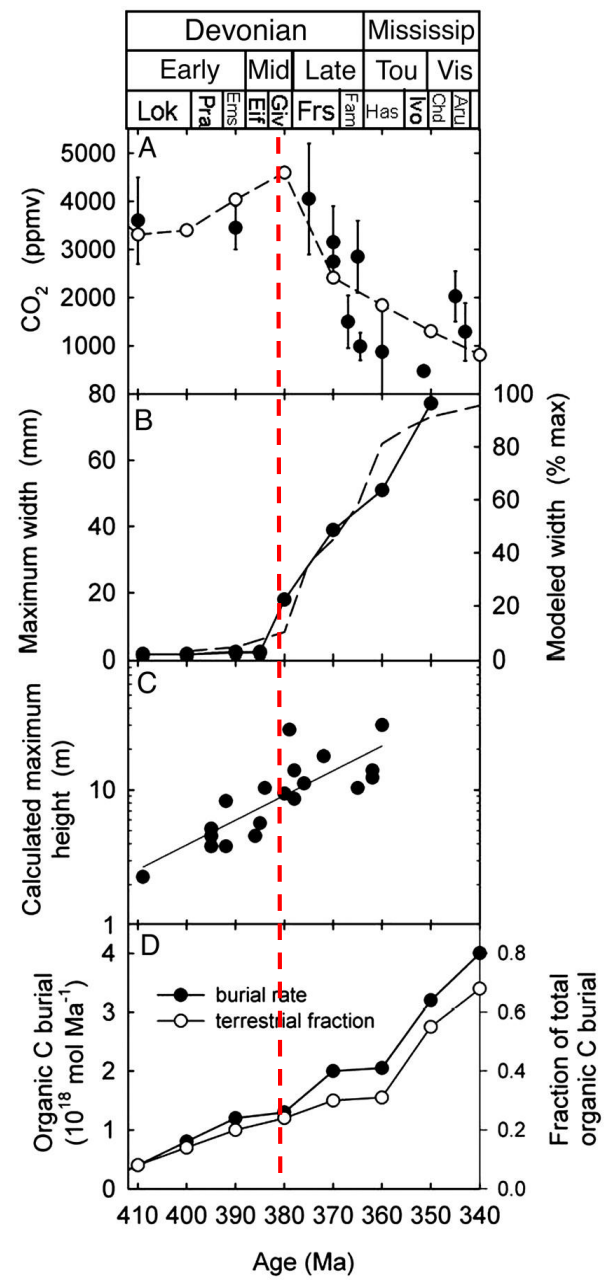


Le rôle des forêts dans le cycle global du carbone

Forêt et cycle du carbone: une histoire de 400 Ma

CO₂ et végétation continentale au paléozoïque

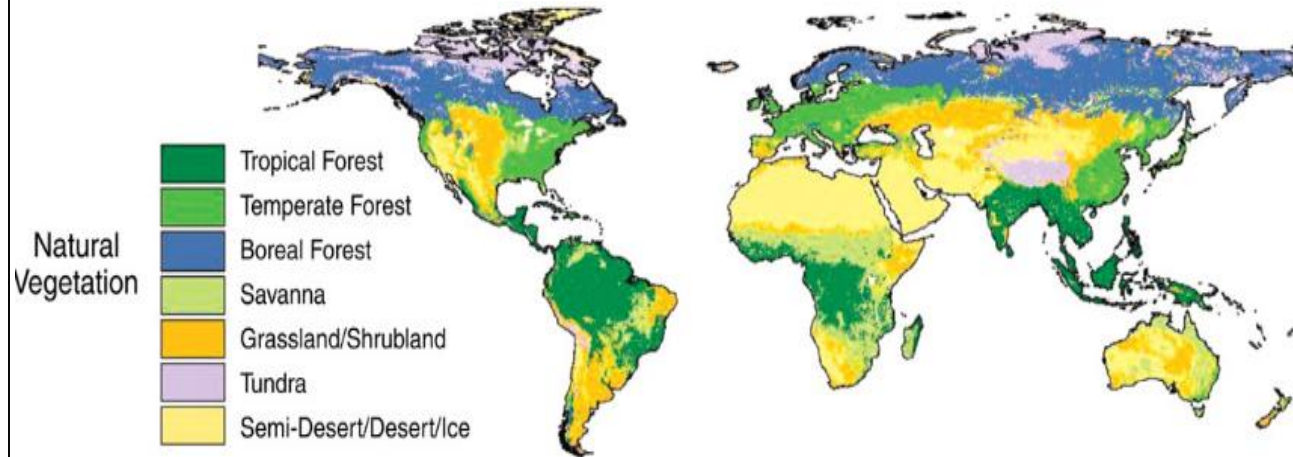
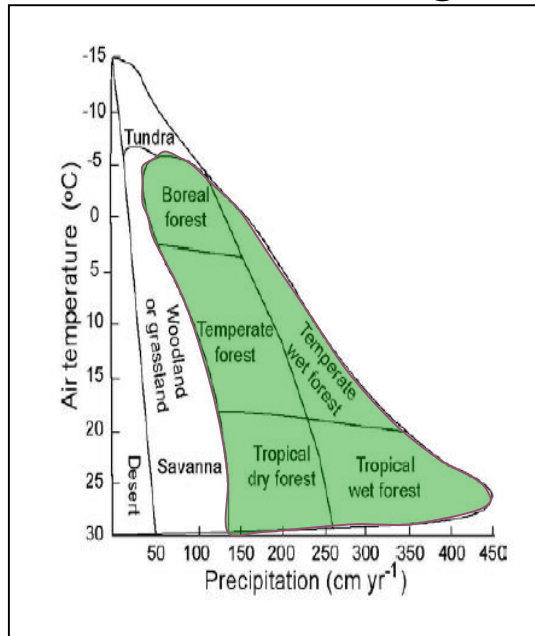
- Tissus conducteurs (trachéides simples) →
- Bois (lignine) →
- Feuilles
- Ponctuations à tores →
- Des arbres (conifères) →
- Des sols →



Beerling D J , Berner R A
 PNAS 2005;102:1302-1305
 ©2005 by National Academy of Sciences

La forêt avant l'Homme

- Terme ultime des successions végétales terrestres,
- Phanérophyte: organe pérenne= tronc, branches, grosses racines
- Formation végétale dominante : 65 % des terres émergées, 85% du couvert végétalisés



Niche climatique de la forêt

Les arbres et leurs contraintes :



Stoechiométrique

- assimiler en proportion énergie et éléments depuis l'atmosphère ($SW\downarrow$, CO_2) et le sol (H_2O , N, P...)

Thermique (maintien de la température entre ~ 0 et $+45$ °C)

- dissipation de chaleur (aiguille, feuille..)
- capacité de régulation (LAI, stomate, rugosité)

Hydrique (maintenir un état hydrique \sim stable en milieu terrestre entre $z=0$ et $z= 100$ m)

- Intégration hydraulique : cuticule et stomate, vaisseaux et racines, temps de réponse (Da Vinci, Dixn, Milburn, Tyree, Cochard,..)

Mécanique

- Tissus
- Ancrage (racines, sol)

Forêt – climat : les interactions biophysiques

- Physique

un système thermodynamique ouvert, dissipatif, homéostatique

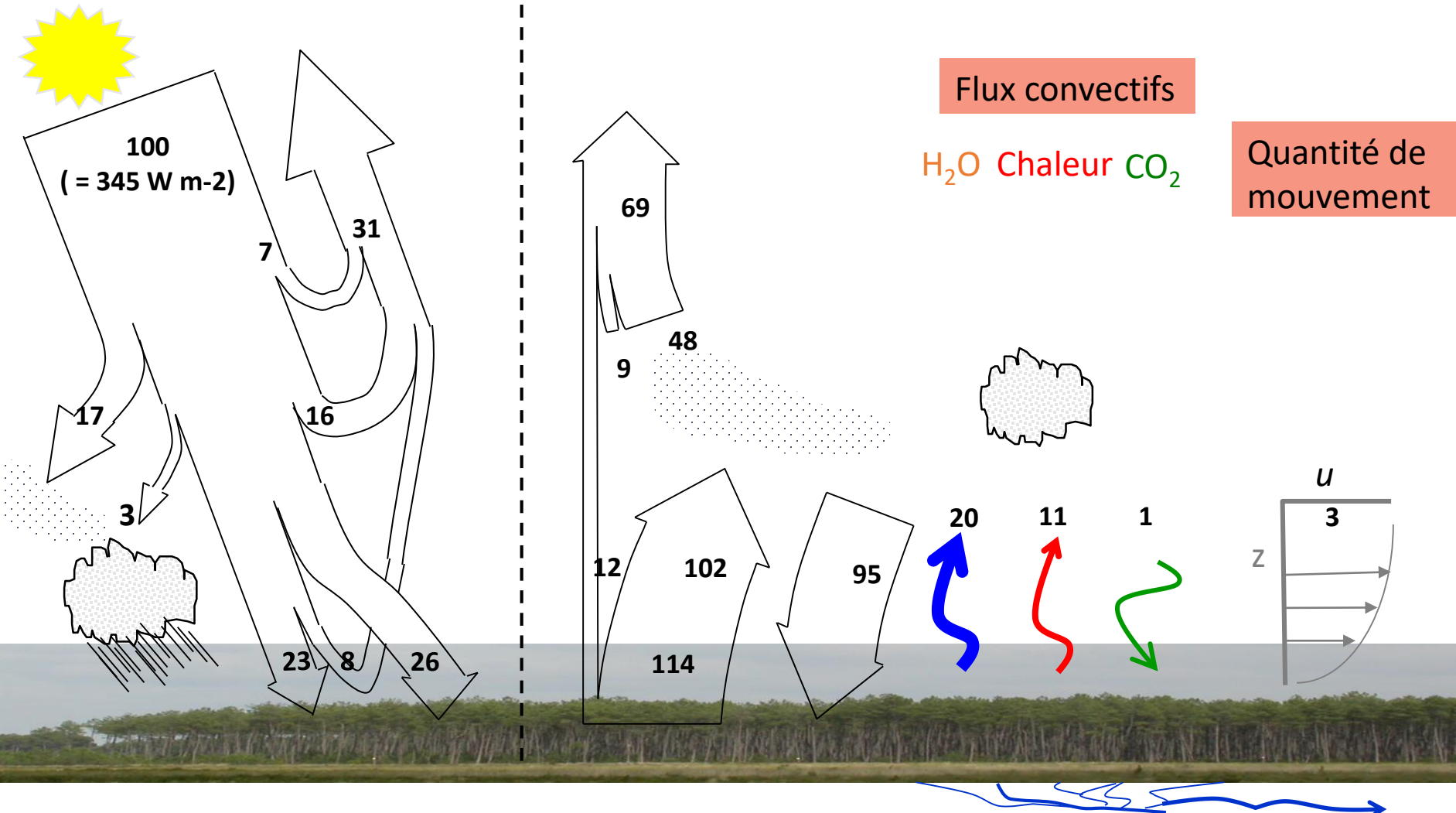
Rayonnement solaire

Rayonnement terrestre

Flux convectifs

H₂O Chaleur CO₂

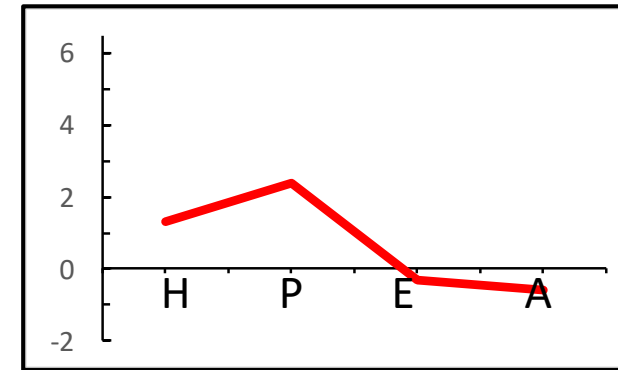
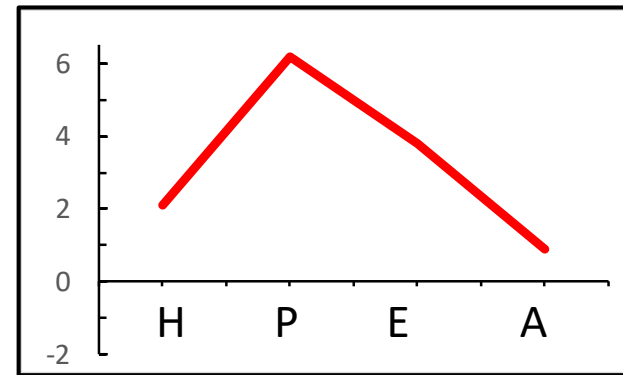
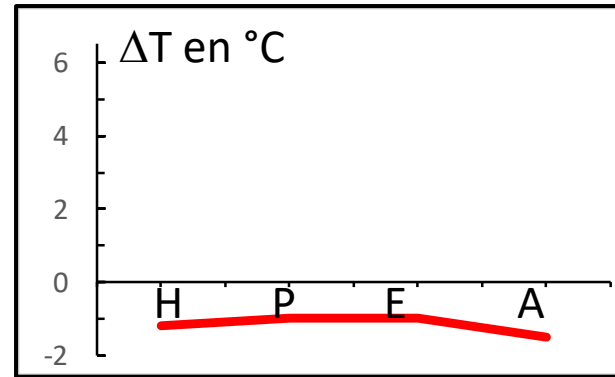
Quantité de mouvement



Forêt : effets biophysiques sur l'atmosphère

Effet biophysique des biomes forestiers sur le climat global.

Biome Removed	$\Delta T_{\text{devegetated region}}$	$\Delta T_{\text{all land}}$	ΔT_{global}
tropical forest	1.18°C	0.71°C	0.24°C
boreal forest	-2.75°C	-1.58°C	-0.77°C
temperate forest	-1.07°C	-0.46°C	-0.22°C



Expérimentation « in silico » :

- Remplacement de chaque biome par un désert
- 25 ans, CO_2 constant, 250km² résolution

Snyder et al. Climate Dynamics (2004)

Forêt : effets hydrologiques

Impacts hydrologique des forêts

Snyder et al. 2004.

(Pline l'ancien, Livre XXXI, 30).

Biome Removed	$\Delta P_{\text{devegetated region}}$	$\Delta P_{\text{all land}}$	ΔP_{global}
tropical forest	-1.34 mm day ⁻¹	-0.55 mm day ⁻¹	-0.11 mm day ⁻¹
boreal forest	-0.27 mm day ⁻¹	-0.11 mm day ⁻¹	0.00 mm day ⁻¹
temperate forest	-0.49 mm day ⁻¹	-0.18 mm day ⁻¹	-0.06 mm day ⁻¹

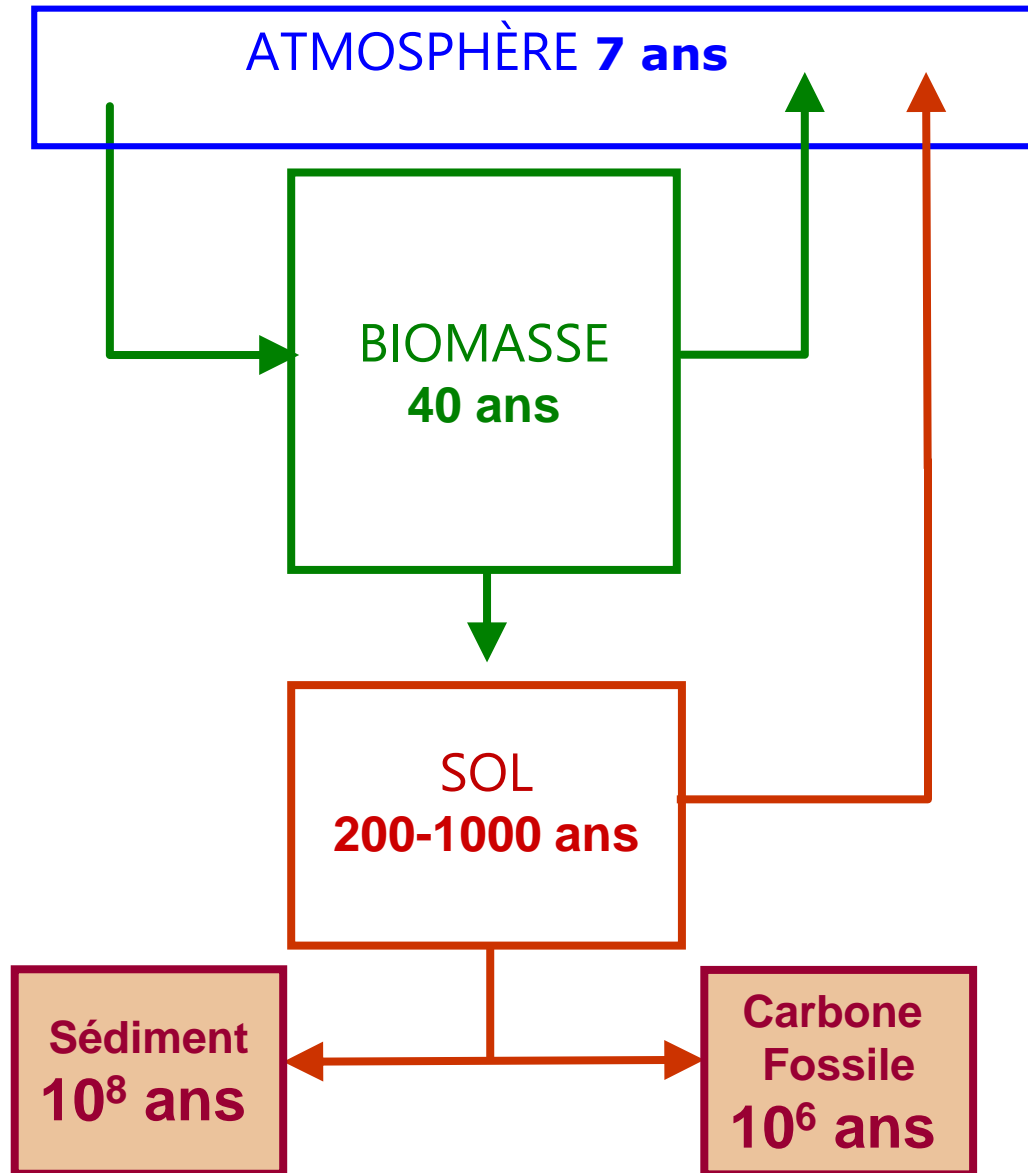
Les biomes forestiers accélèrent le cycle hydrologique (formation des nuages, nucléation, précipitations)



« De désastreux torrents se forment souvent à la suite du déboisement de forêts qui retenaient les nuages et s'en nourrissaient. »

Forêt : les interactions biogéochimiques

Cycle du carbone *in situ* en forêt

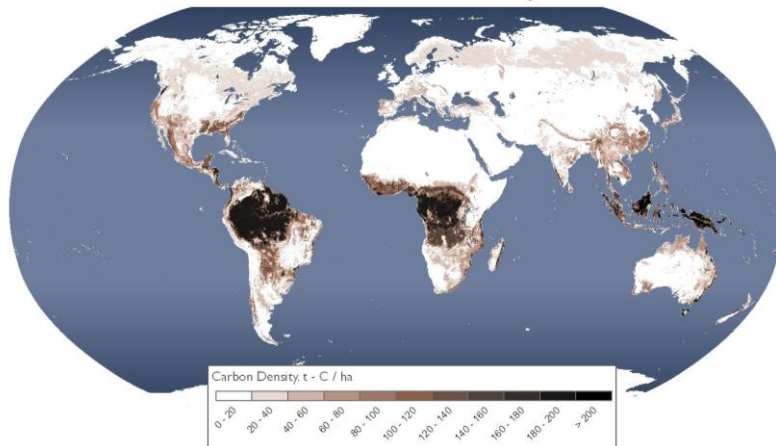


Forêt : effet sur la biogéochimie du carbone

- Le développement des forêts a accéléré l'altération des roches silicatées et la pédogénèse
- Les forêts forment un stock de carbone considérable dans la biomasse et les sols

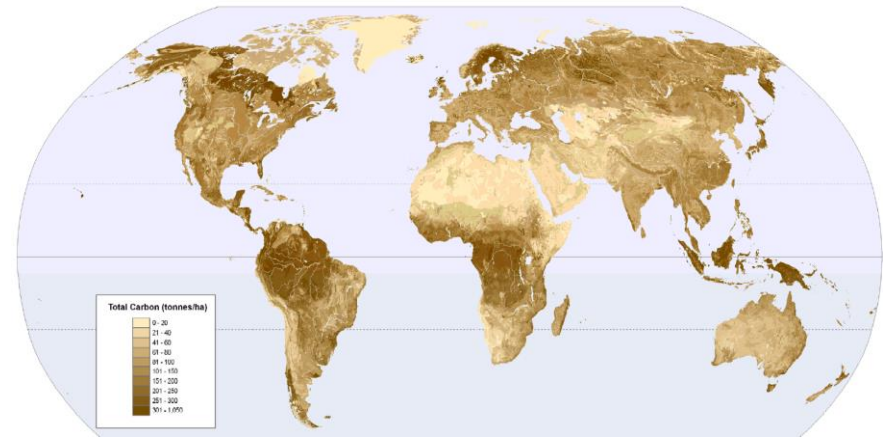
BIOMASSE ~800 -1000 PgC

Global Above- and Below-ground Living
Biomass Carbon Density



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

SOLS 1500 - 2500 PgC

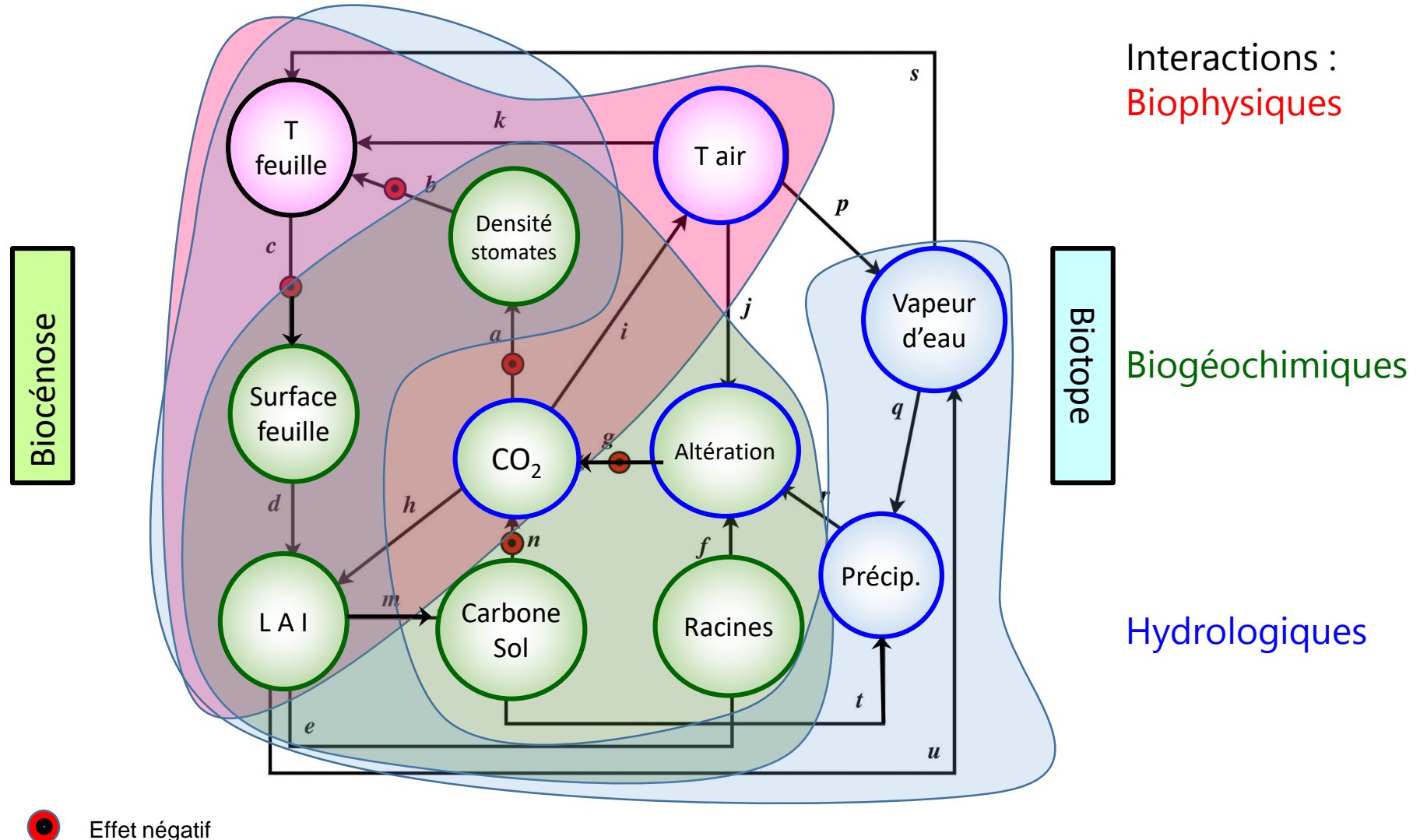


Gibbs H K ; Ruesch A (2008): New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map for the Year 2000. *CDIAC*. doi:10.15485/1463800

Forêt : les interactions forêt -atmosphère

Rétroactions entre physiologie des forêts et atmosphère:

- Temps de réponse 1 à $>10^6$ ans (cycles rapide, moyen, long)
- Stabilisant le cycle du carbone global: un modèle d'écosystème global



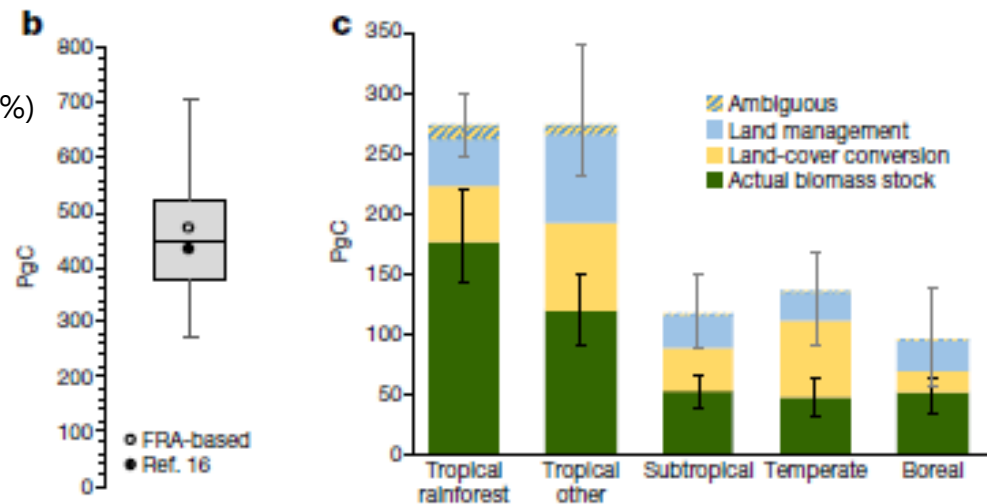
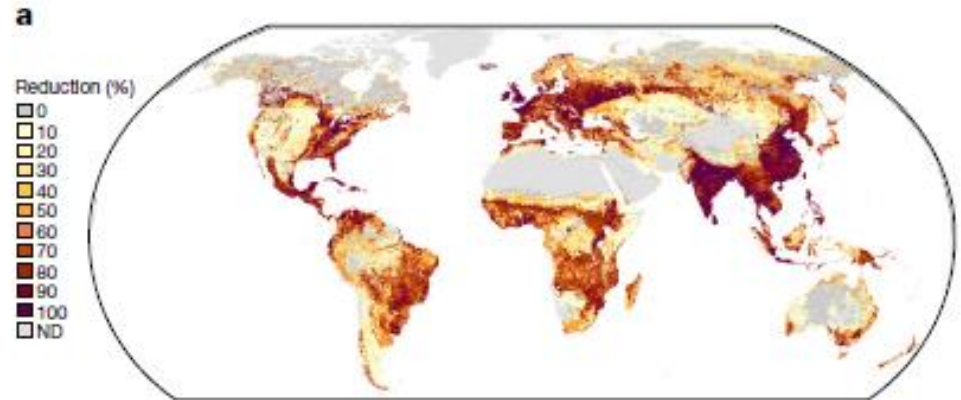
● Effet négatif

L'Anthropocène. Le stock de C forêts est réduit.

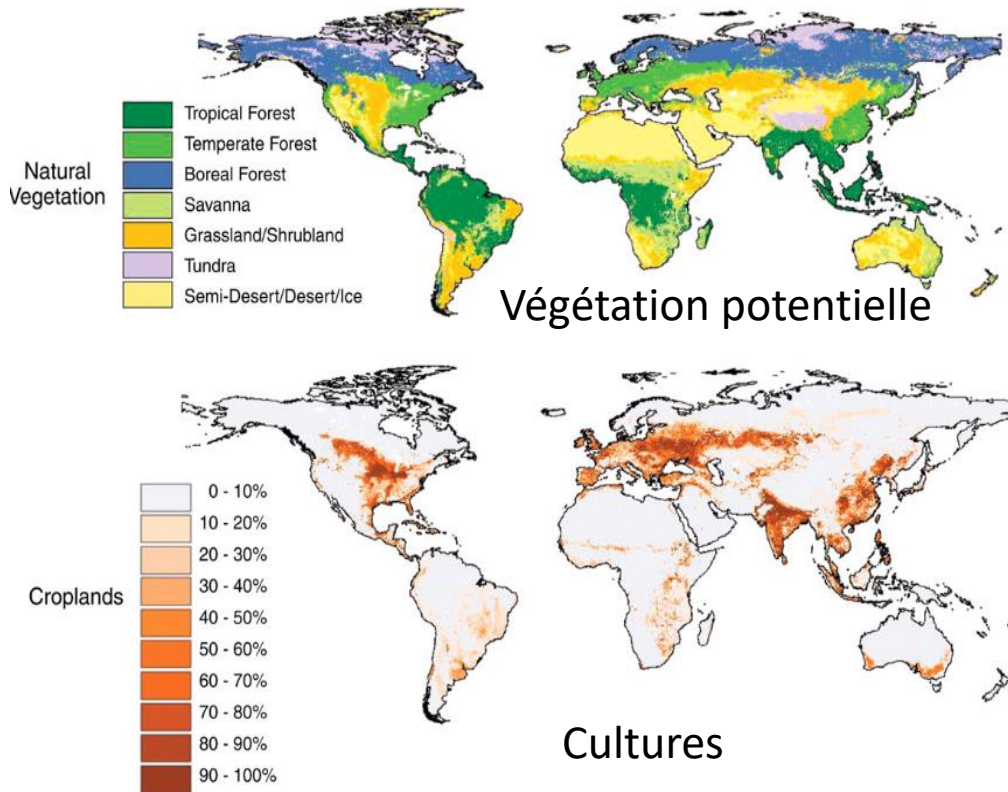
Le stock actuel de biomasse est estimé à 443 – 460 PgC (contre ~800-1000 PgC auparavant). Cette réduction est attribuée à:

- Déforestation : 247 – 265 Pg C (53-57%)
(15 à -25 Mkm²)

- Exploitation des terres: 200 – 219 Pg C (43-47%)
dont biomes forestiers: 126 Pg C



L'Anthropocène. Le stock de C forêts est réduit.



La superficie des continents couverte par les forêts est passée de 55- 67 → 41 Mkm² Soit - 40%

85% des forêts restantes sont exploitées (34,7 Mkm²).

Le stock de C biomasse des forêts exploitées est diminué de 30% soit:

- 23-38 % en zone tropicale
- 32-34 % en zone tempérée
- 21-25 % en zone boréale

Méthodes: Inventaires FRA-FAO, Télédétection.

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

L'Anthropocène. Impact de l'exploitation – Ex. Hêtre en France.

- ITK Intensif (« Biomasse et Energie »)

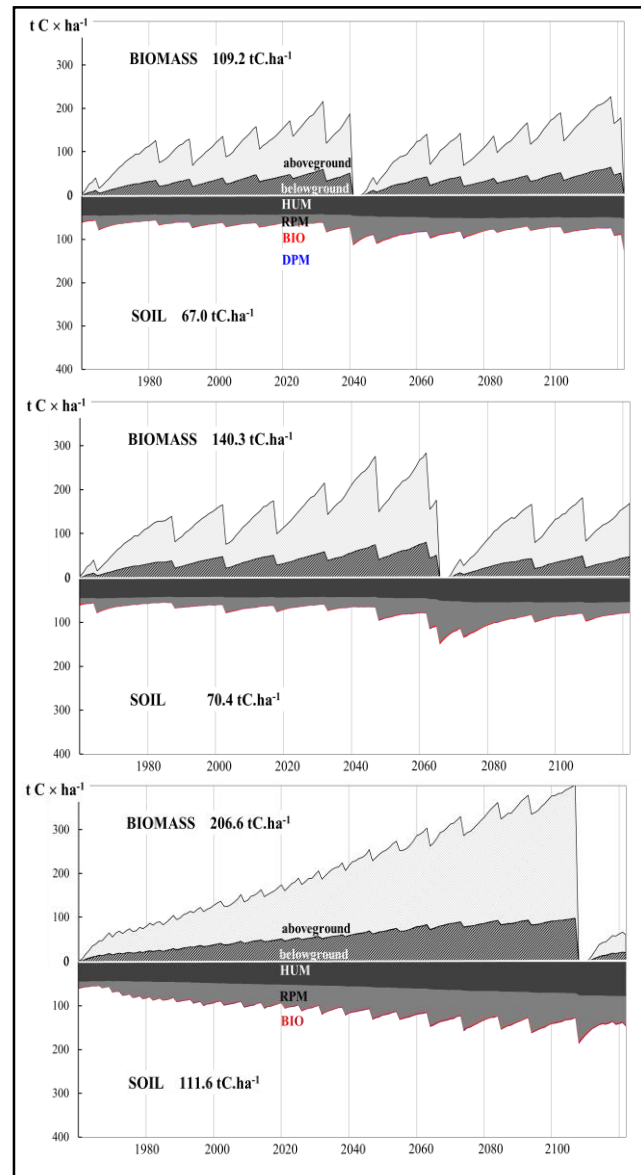
D cible = 60 cm
Révolution = 10 y
Compétition (RDI) = 0.35

- ITK Standard (« Bois d'oeuvre »)

D = 80 cm
R = 15 y
C = 0.35

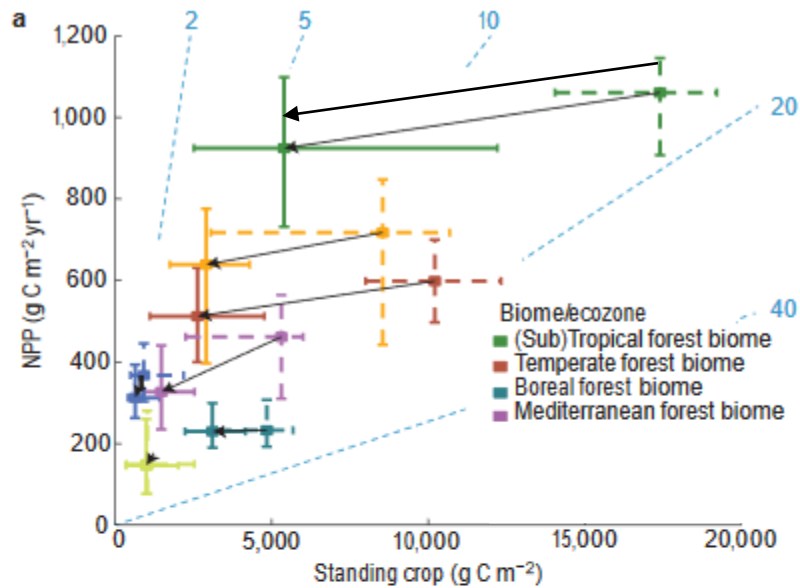
- Non gestion (« Autoéclaircie »)

Age = 150 ans
R = variable
C = 1.0

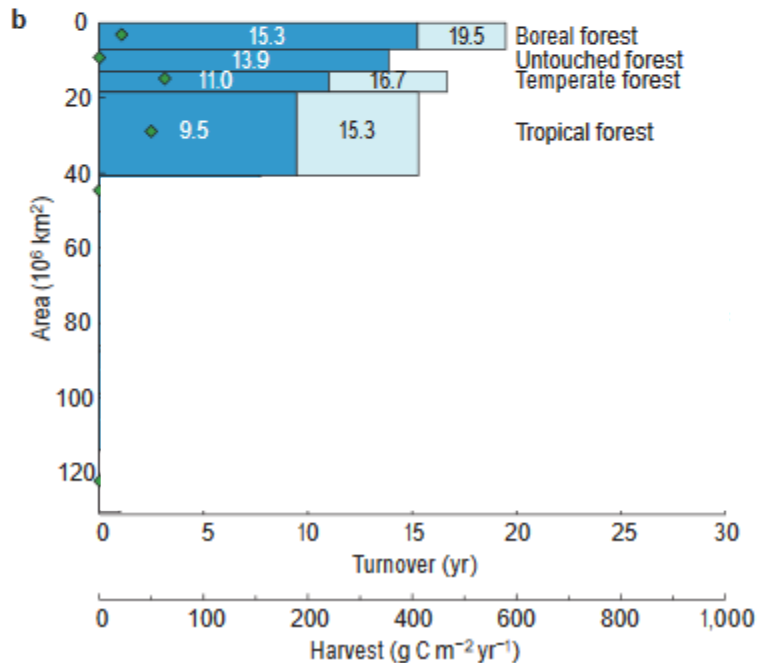


- L'exploitation :
- accroît la productivité primaire
 - réduit la durée du cycle de vie
 - diminue les stocks sol et biomasse

L'Anthropocène. Réduction du temps de résidence du C des sols et biomasse



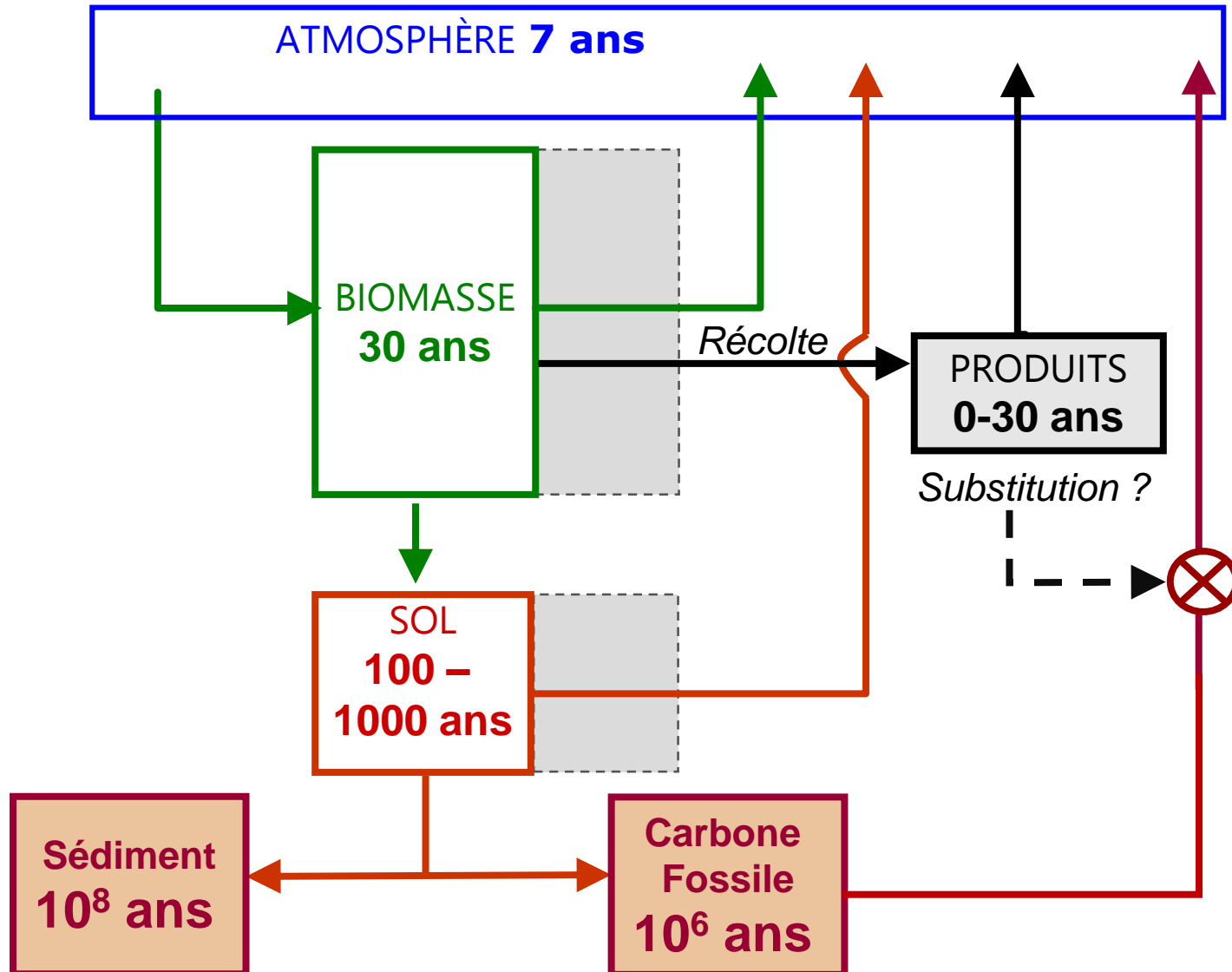
Le TMR du carbone en forêt est diminué de 21, 34 et 37% en zones boréale, tempérée et tropicale.



Erb et al. Nature Geoscience, 2016.

L'Anthropocène.

Cycle du carbone en forêt



L'Anthropocène. Rétroaction des forêts sur le carbone atmosphérique

Flux de carbone global des Forêts (en Pg C . an⁻¹)

Carbon sink and source in biomes	1990–1999	2000–2007	1990–2007
Boreal forest	0.50 ± 0.08	0.50 ± 0.08	0.50 ± 0.08
Temperate forest	0.67 ± 0.08	0.78 ± 0.09	0.72 ± 0.08
Tropical intact forest*	1.33 ± 0.35	1.02 ± 0.47	1.19 ± 0.41
Total sink in global established forests†	2.50 ± 0.36	2.30 ± 0.49	2.41 ± 0.42
Tropical regrowth forest‡	1.57 ± 0.50	1.72 ± 0.54	1.64 ± 0.52
Tropical gross deforestation emission§	-3.03 ± 0.49	-2.82 ± 0.45	-2.94 ± 0.47
Tropical land-use change emission	-1.46 ± 0.70	-1.10 ± 0.70	-1.30 ± 0.70
Global gross forest sink¶	4.07 ± 0.62	4.02 ± 0.73	4.05 ± 0.67
Global net forest sink#	1.04 ± 0.79	1.20 ± 0.85	1.11 ± 0.82

Equations of global forest C fluxes

$$F_{\text{established forests}} = F_{\text{boreal forests}} + F_{\text{temperate forests}} + F_{\text{tropical intact forests}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$F_{\text{tropical land-use change}} = F_{\text{tropical gross deforestation}} + F_{\text{tropical regrowth forests}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$F_{\text{gross forest sink}} = F_{\text{established forests}} + F_{\text{tropical regrowth forests}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$F_{\text{net forest sink}} = F_{\text{established forests}} + F_{\text{tropical land-use change}} \quad (\text{Eq. 4})$$

La séquestration nette de C par les forêts correspond à 10-25%
des émissions de C Fossile

(Pan et al. *Science* 2011)

L' Anthropocène. Quel gain de stockage attendre des forêts ?

- Brown et al. 1996, Cannell 2003.
~ 1,2 - 2,0 Gt C.an⁻¹
(12% des émissions fossiles)

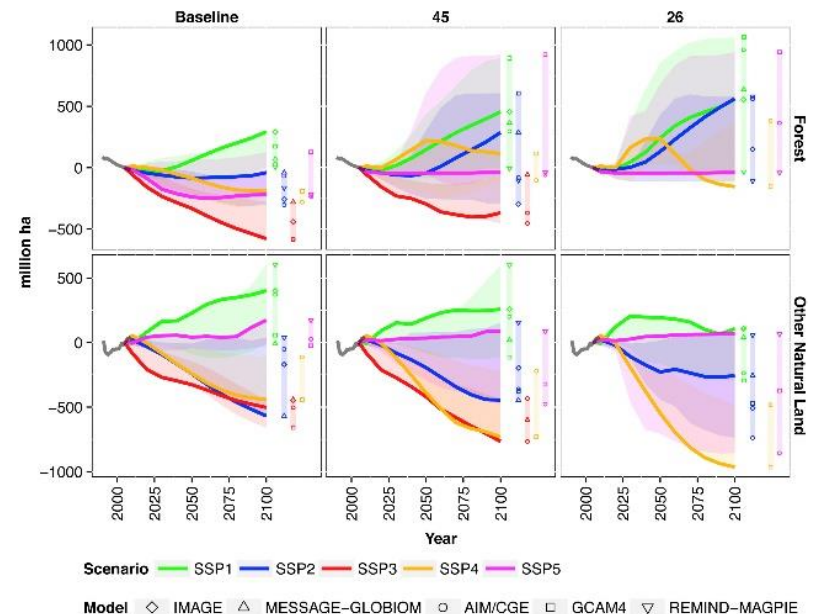
Tableau 2. Estimations mondiales de la quantité potentielle de C stockée et conservée grâce aux pratiques de gestion forestière entre 1995 et 2050 (tiré de Brown *et al.* 1996).

Latitudes	Pratique	Superficie (Mha)	C stocké et conservé (Pg)
Hautes	Boisement	95,2 ¹	2,4
	Agroforesterie	6,5	0,7
Basses	Boisement	66,9	16,4
	Agroforesterie	63,2	6,3
	Régénération ²	217	11,5-28,7
	Déboisement ralenti ¹	138	10,8-20,8
Total		700	60-87

¹ Comprend les forêt insuffisamment reboisées du Canada

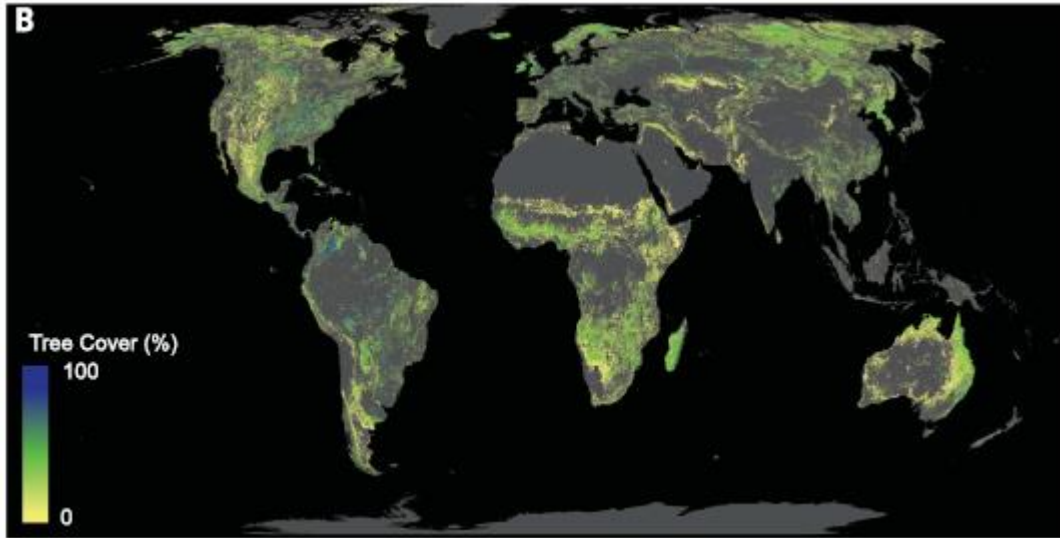
² Comprend 25% additionnels de C dans la biomasse aérienne pour tenir compte de la biomasse souterraine (racines, litière et sol) (d'après les données de Nilsson et Schopfhauser, 1995 et Brown *et al.*,1993b); la fourchette des valeurs est le résultat de l'emploi d'estimations faibles et élevées de la densité de carbone dans la biomasse dû à l'incertitude des estimations.

- IPCC, Rapport 1,5°C , 2018
+ 9,5 MKm²
+ 0,5 – 0,9 GtC an⁻¹ (50 – 90 PgC)



L' Anthropocène. Gain potentiel de stockage de C par les forêts.

- Bastin et al., Science, 2019 superficie potentielle 100% couvrable par des arbres (canopy cover): images google, photo-
interprétation / classification automatique (Random Forest) / vérification terrain
+ 17 MKm²
→ + 205 - 212 GtC



Surface susceptible d'être reboisée (Bastin et al. 2019)

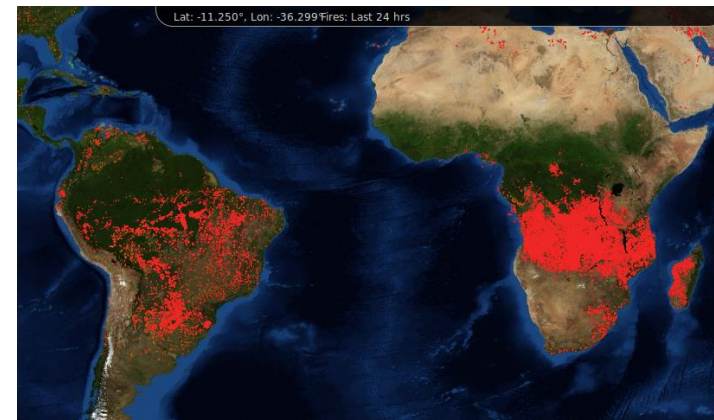
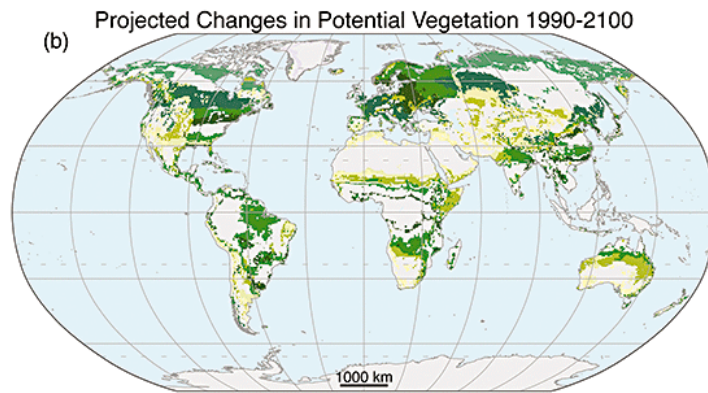


Surestimation (?) due à

- Hypothèse de non exploitation (irréaliste)
- Non prise en compte du stock initial

L'Anthropocène . Vulnérabilité des biomes forestiers

- Tempête Klaus, Gironde, 2009.
- 5 à 40 % de la surface des biomes forestiers est vulnérable au changement climatique (Gonzalez et al. 2010)
- La capacité de migration et adaptation intrinsèques des essences forestières sont << niches climatiques, pathogènes (Smith et Beaulieu 2009)
- Incendies en Amérique du Sud et en Afrique, 23 Août 2019



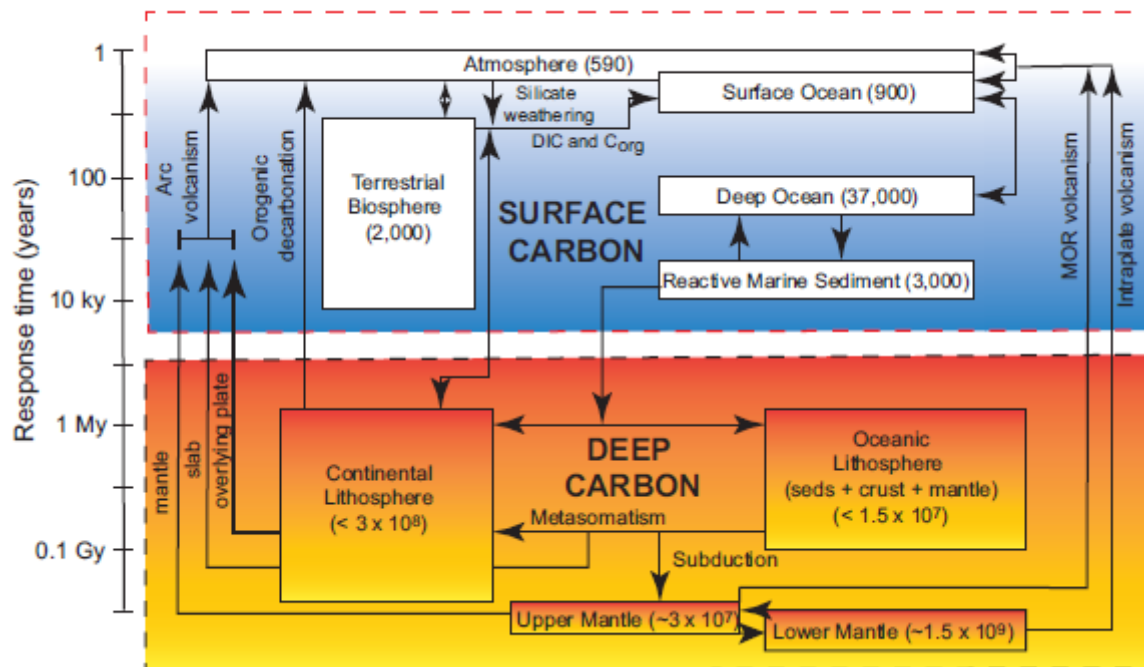
L'agenda des forêts dans l'Anthropocène

- L'adaptation du socio éco-système forêt – bois
- L'accroissement des stocks de carbone biosphériques (biomasse, sol)
- La substitution des usages du carbone fossile par les produits forestiers
- La continuité des services de protection, régulation, production des forêts



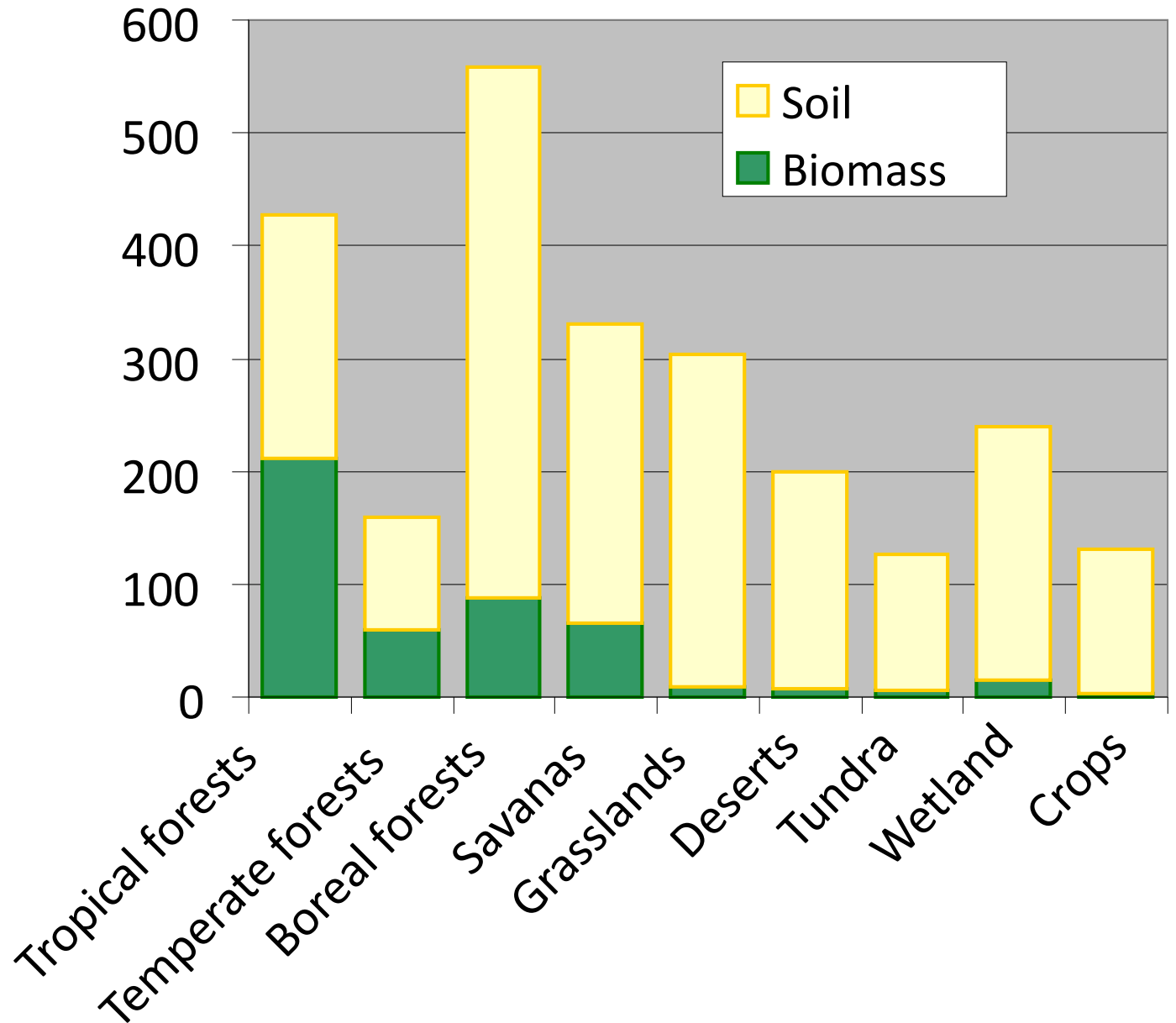
A dense forest of tall trees, including many birches, is reflected in a calm body of water. The scene is peaceful and natural.

Merci pour votre attention



L'Anthropocène. Le stock de C forêts.

Carbon stocks
(Pg C)
(total ~2500 PgC)



Séquestration et substitution

- La séquestration de carbone est un déplacement de la masse de carbone vers les compartiments à long temps de résidence:

atmosphère → biomasse → sol

La substitution est le remplacement d'une source d'énergie ou d'un matériau par du C forestier.

<i>Acier</i>	→ <i>bois</i>
<i>Aluminium</i>	→ <i>bois</i>
<i>Charbon</i>	→ <i>biomasse</i>
<i>Méthane</i>	→ <i>granulés</i>