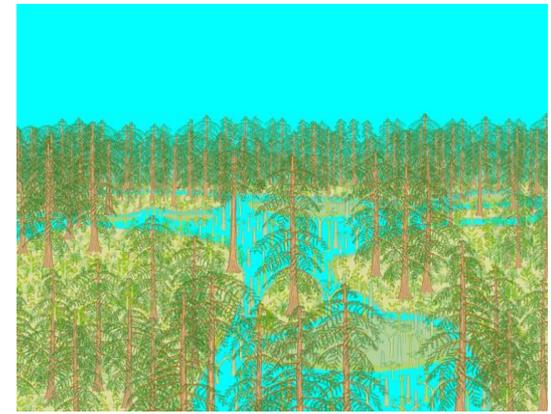
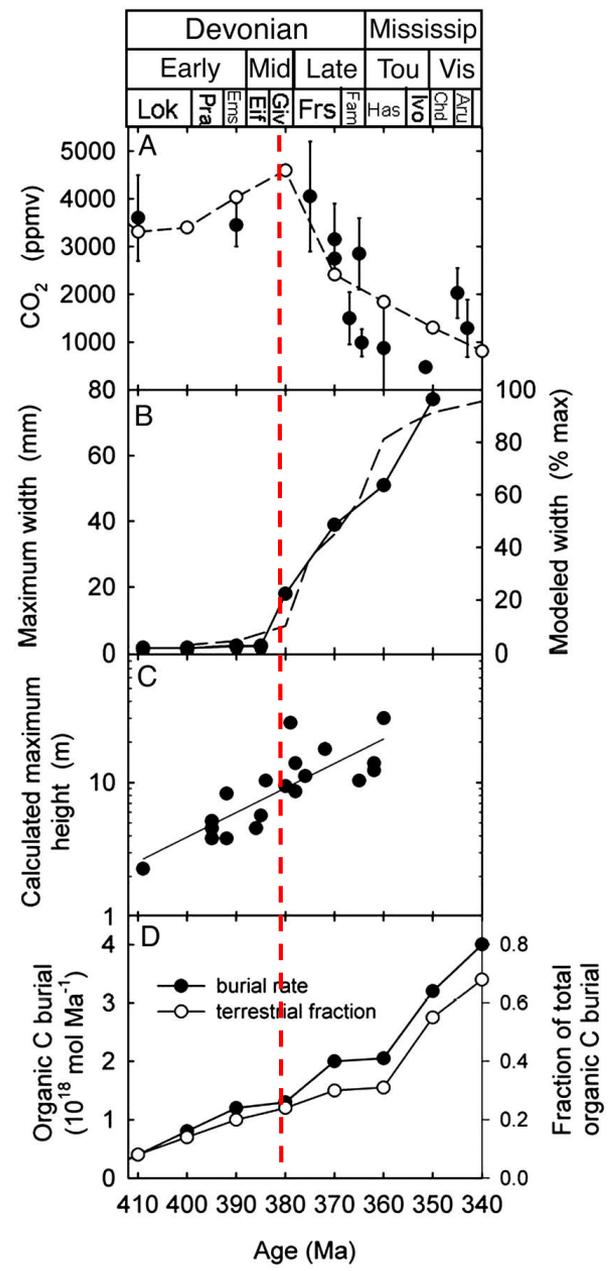


# Le rôle des forêts dans le cycle global du carbone

# Forêt et cycle du carbone: une histoire de 400 Ma

## CO<sub>2</sub> et végétation continentale au paléozoïque

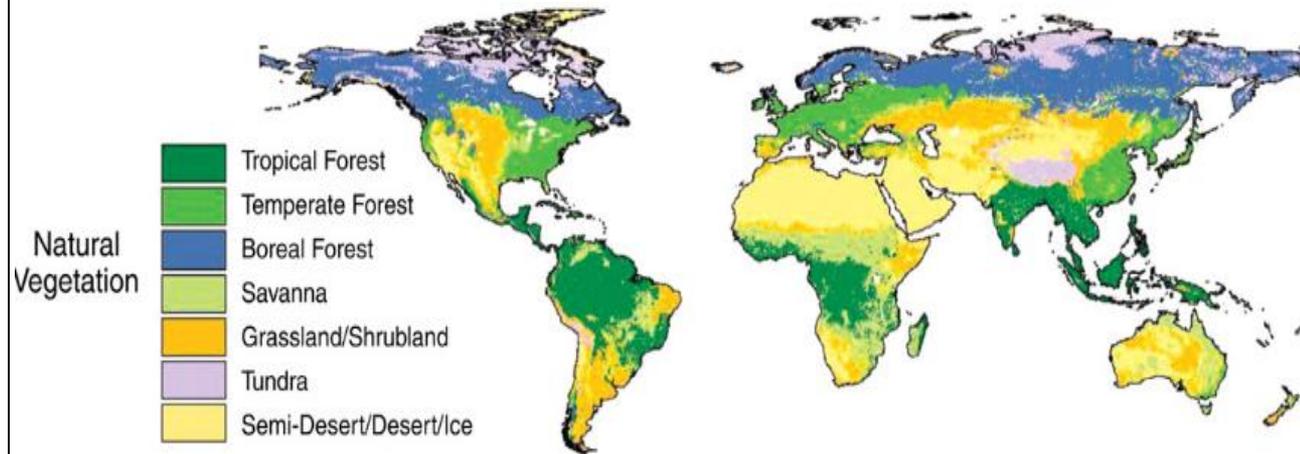
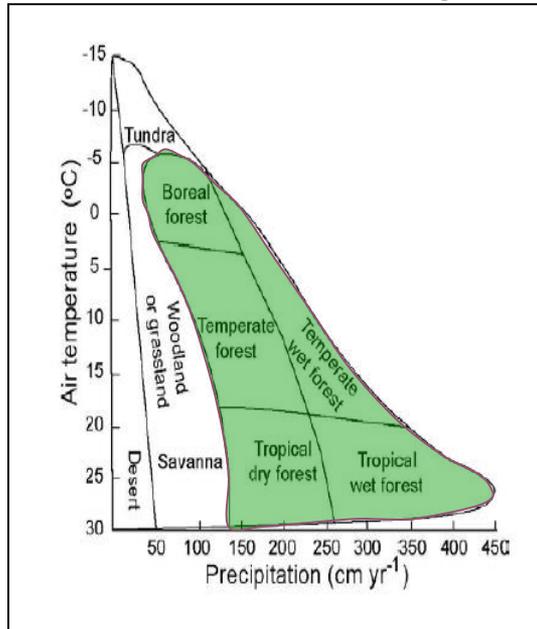
- Tissus conducteurs (trachéides simples) →
- Bois (lignine) →
- Feuilles
- Ponctuations à tores →
- Des arbres (conifères) →
- Des sols →



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 $\sim 0$ 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

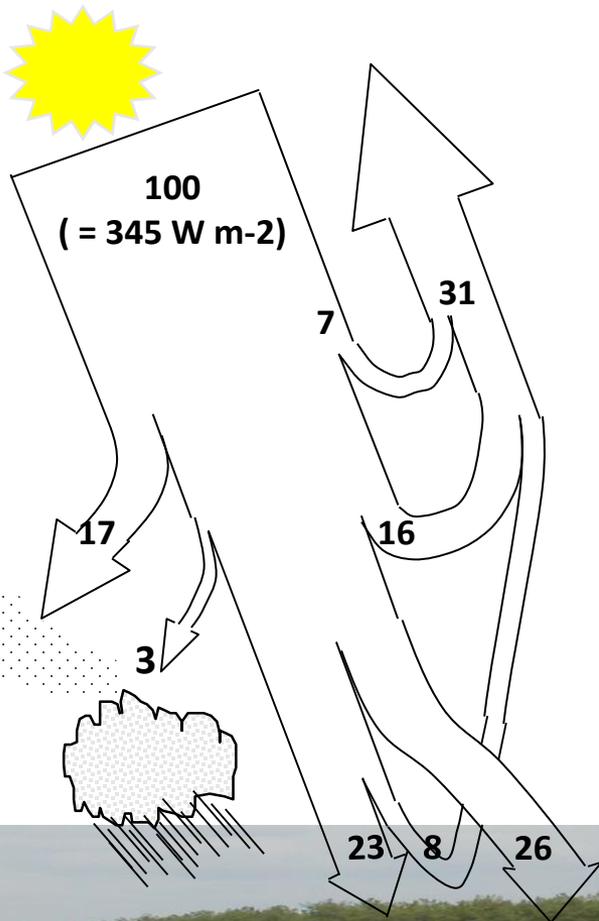
- Tissus
- Ancrage (racines, sol)

# Forêt – climat : les interactions biophysiques

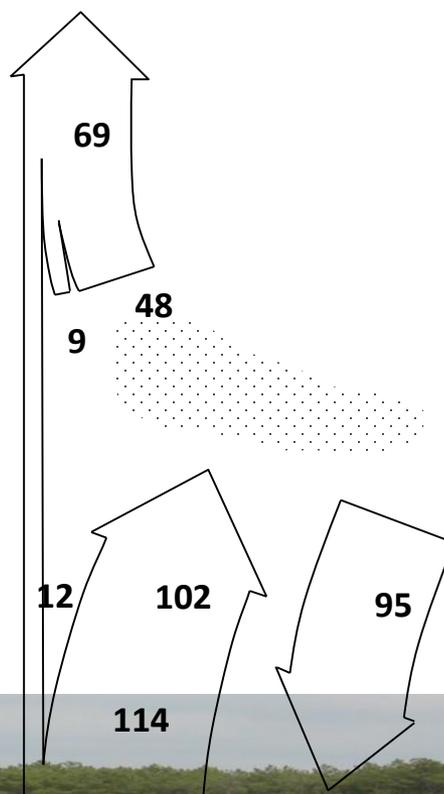
- Physique

un système thermodynamique ouvert, dissipatif, homéostatique

Rayonnement solaire



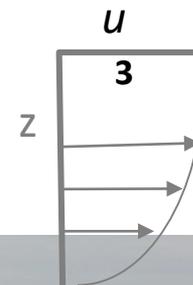
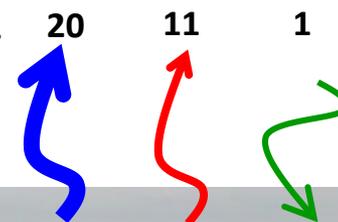
Rayonnement terrestre



Flux convectifs

H<sub>2</sub>O Chaleur CO<sub>2</sub>

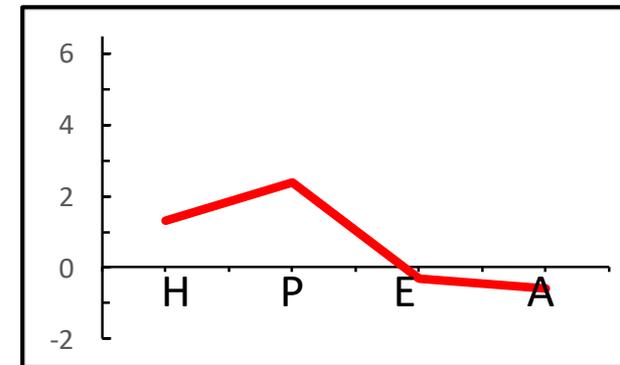
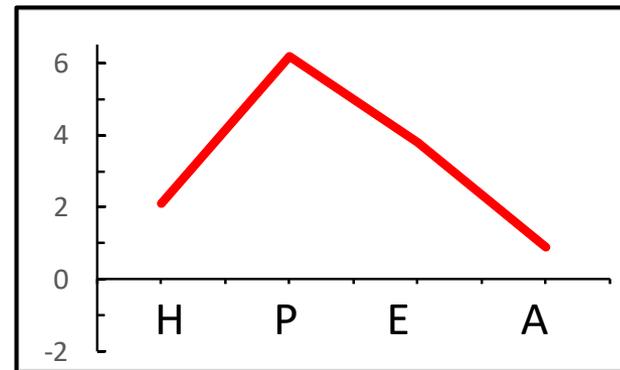
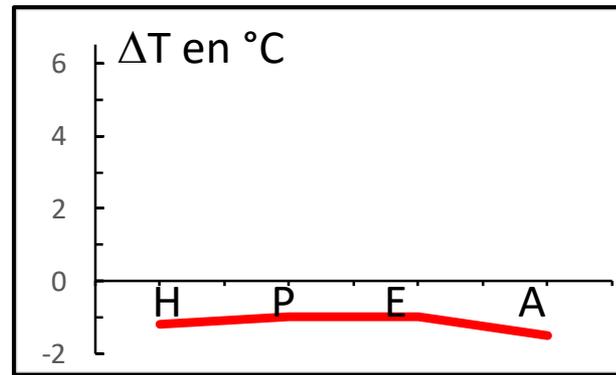
Quantité de mouvement



# Forêt : effets biophysiques sur l'atmosphère

Effet biophysique des biomes forestiers sur le climat global.

Biome Removed	$\Delta T_{\text{devegetated region}}$	$\Delta T_{\text{all land}}$	$\Delta T_{\text{global}}$
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<sub>2</sub> constant, 250km<sup>2</sup> 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	$\Delta P_{\text{devegetated region}}$	$\Delta P_{\text{all land}}$	$\Delta P_{\text{global}}$
tropical forest	-1.34 mm day <sup>-1</sup>	-0.55 mm day <sup>-1</sup>	-0.11 mm day <sup>-1</sup>
boreal forest	-0.27 mm day <sup>-1</sup>	-0.11 mm day <sup>-1</sup>	0.00 mm day <sup>-1</sup>
temperate forest	-0.49 mm day <sup>-1</sup>	-0.18 mm day <sup>-1</sup>	-0.06 mm day <sup>-1</sup>

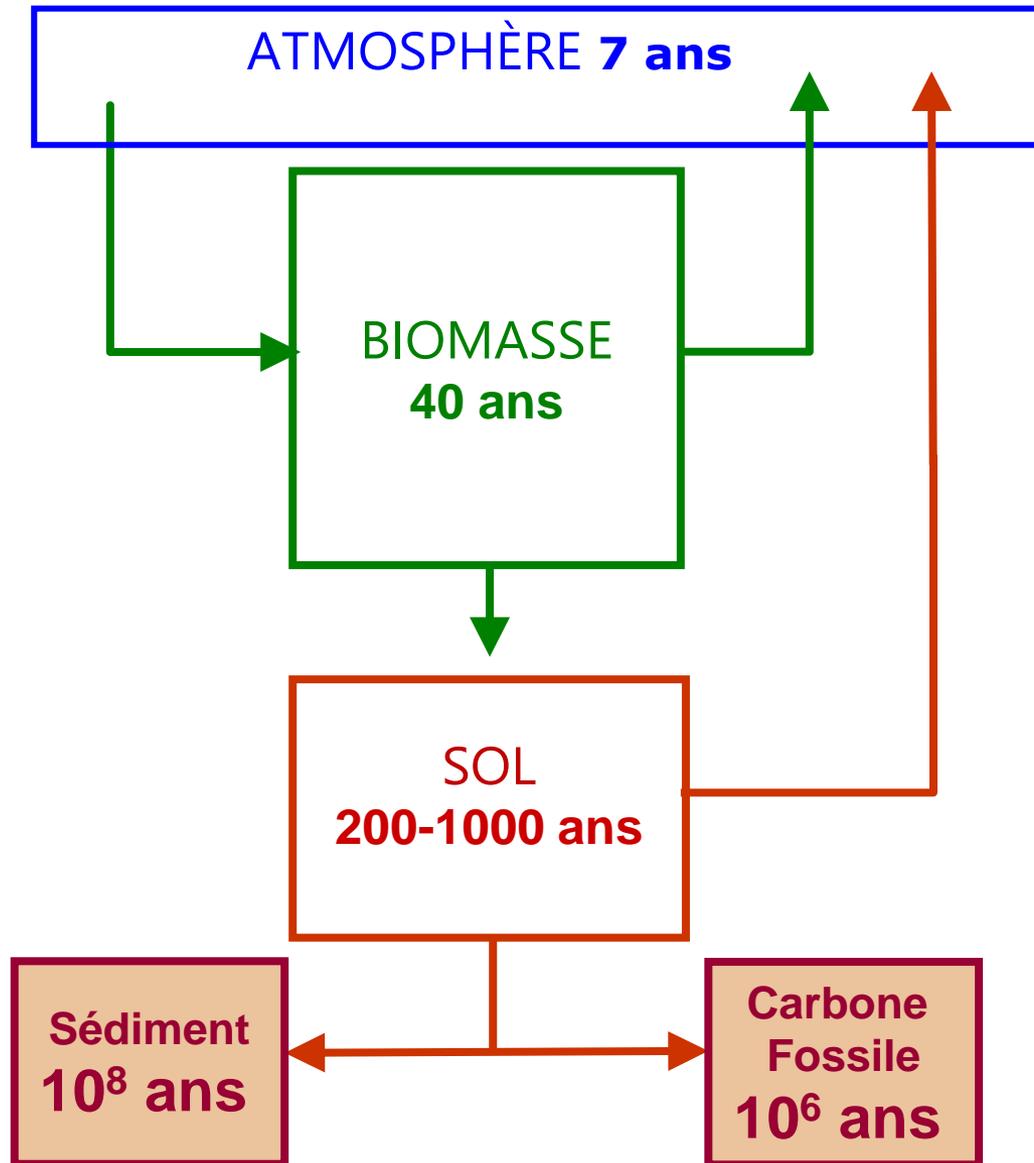
Les biomes forestiers accélèrent le cycle hydrologique (formation des nuages, nucléation, précipitations)



*« 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

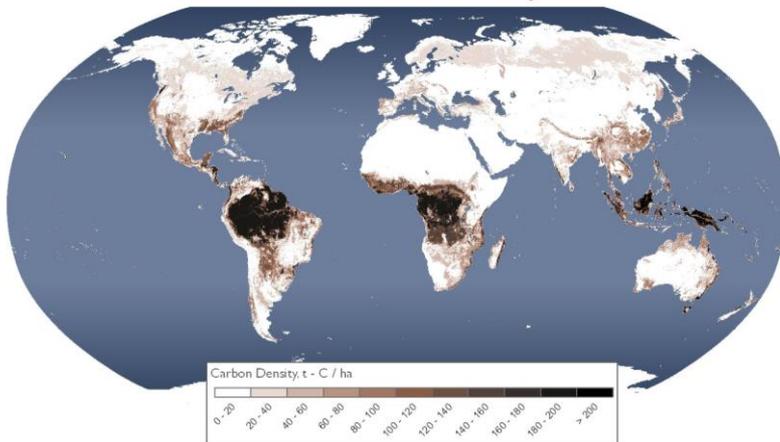


# Forêt : effet sur la biogéochimie du carbone

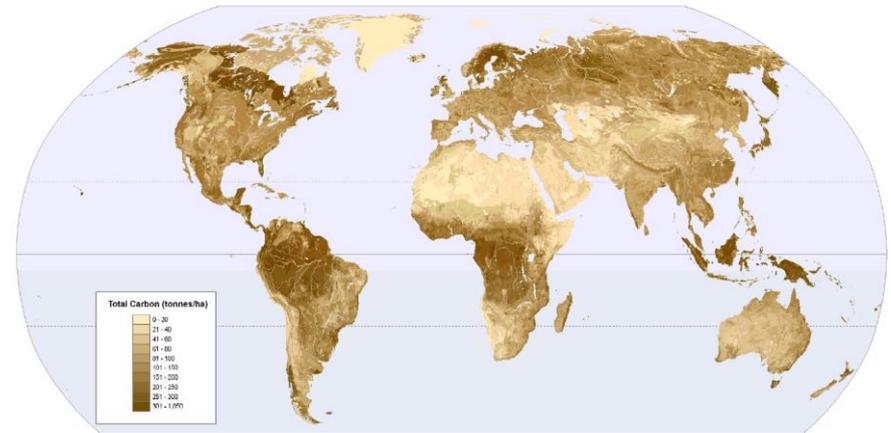
- Le développement des forêts a accéléré l'altération des roches silicatées et la pédogénèse
- Les forêts forment un stock de carbone considérable dans la biomasse et les sols

BIOMASSE ~800 -1000 PgC

Global Above- and Below-ground Living  
Biomass Carbon Density



SOLS 1500 - 2500 PgC



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

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

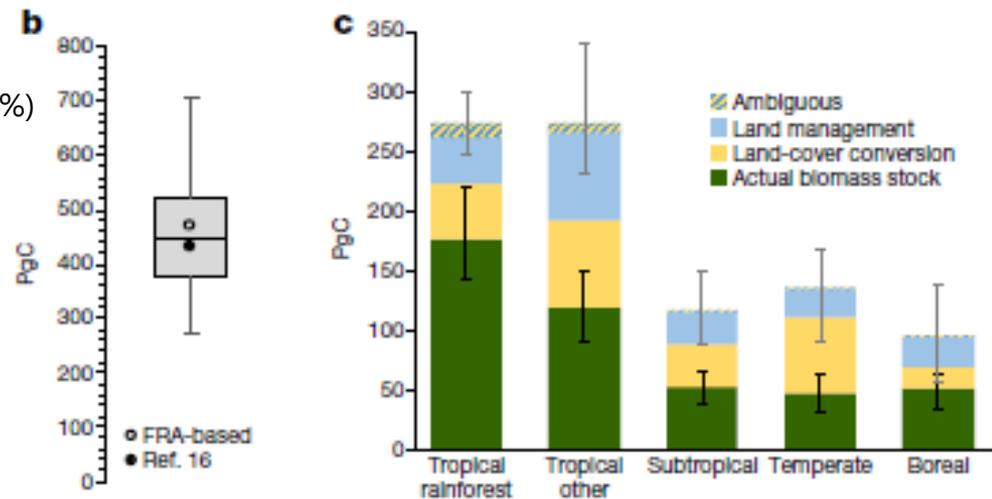
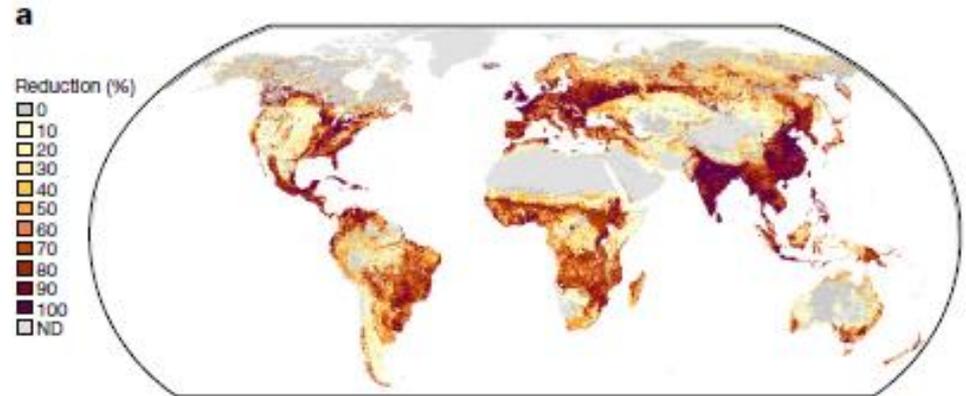


# L'Anthropocène. Le stock de C forêts est réduit.

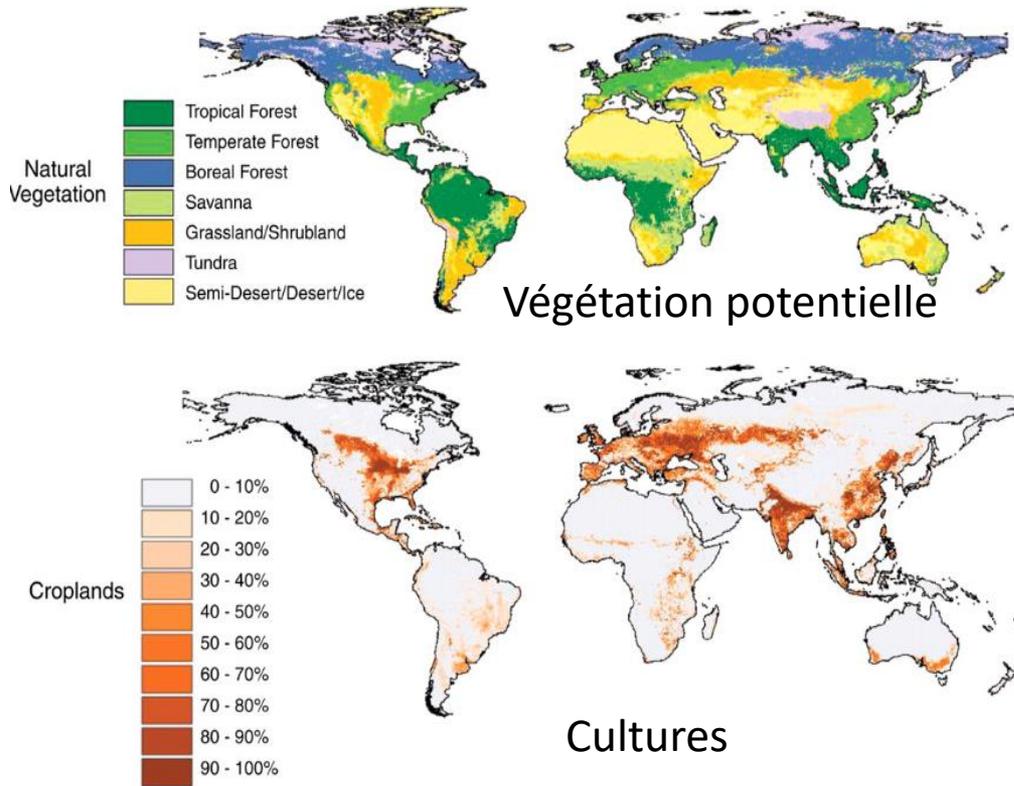
Le stock actuel de biomasse est estimé à 443 – 460 PgC ( contre ~800-1000 PgC auparavant). Cette réduction est attribuée à:

- Déforestation : 247 – 265 Pg C (53-57%)  
(15 à -25 Mkm<sup>2</sup>)

- 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 Mkm<sup>2</sup> Soit - 40%

85% des forêts restantes sont exploitées (34,7 Mkm<sup>2</sup> ).

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 »)

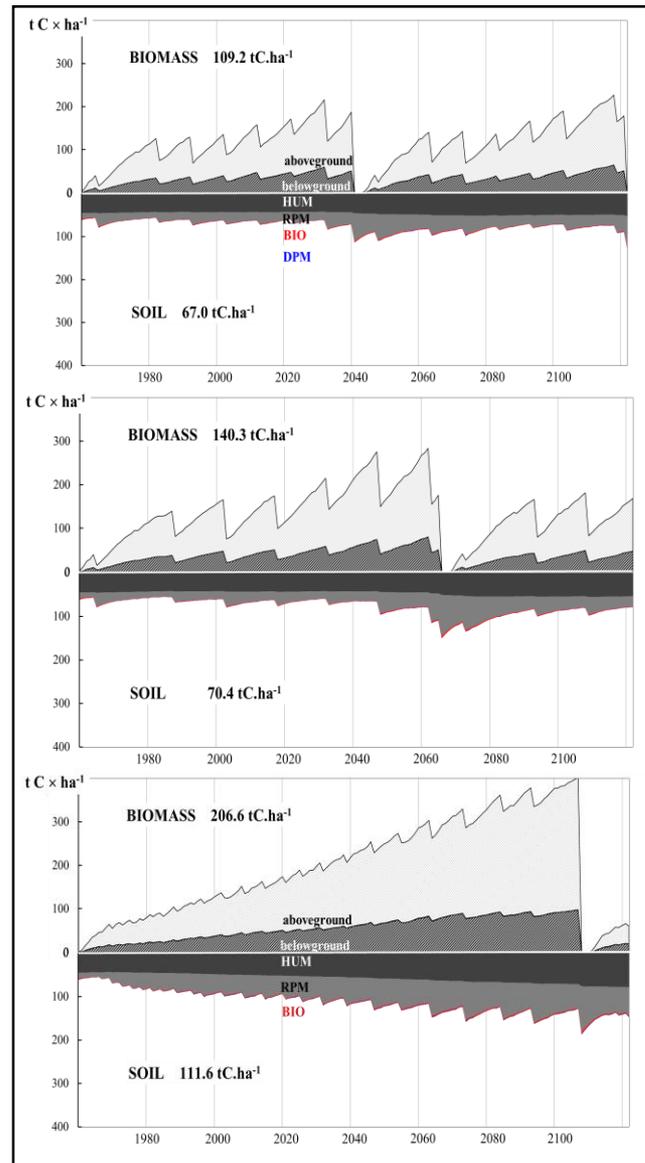
D cible = 60 cm  
Révolution = 10 y  
Compétition (RDI) = 0.35

- ITK Standard (« Bois d'oeuvre »)

D = 80 cm  
R = 15 y  
C = 0.35

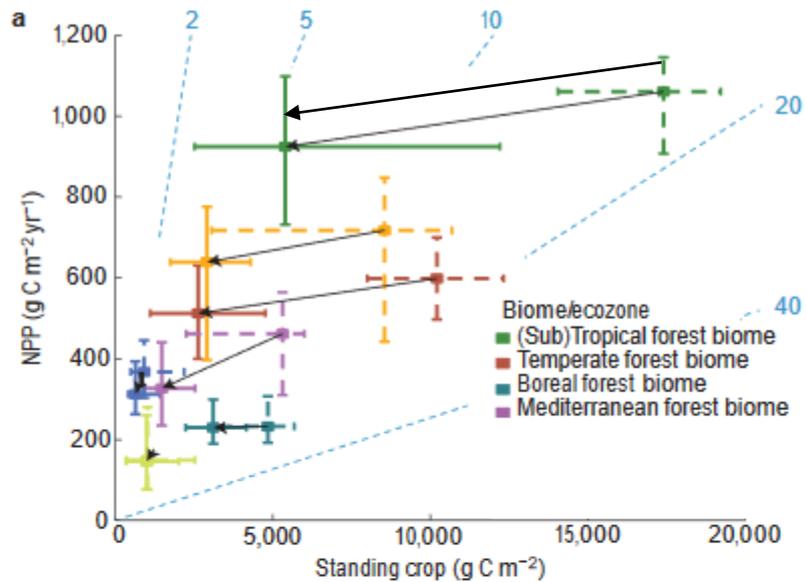
- Non gestion (« Autoéclaircie »)

Age = 150 ans  
R = variable  
C = 1.0

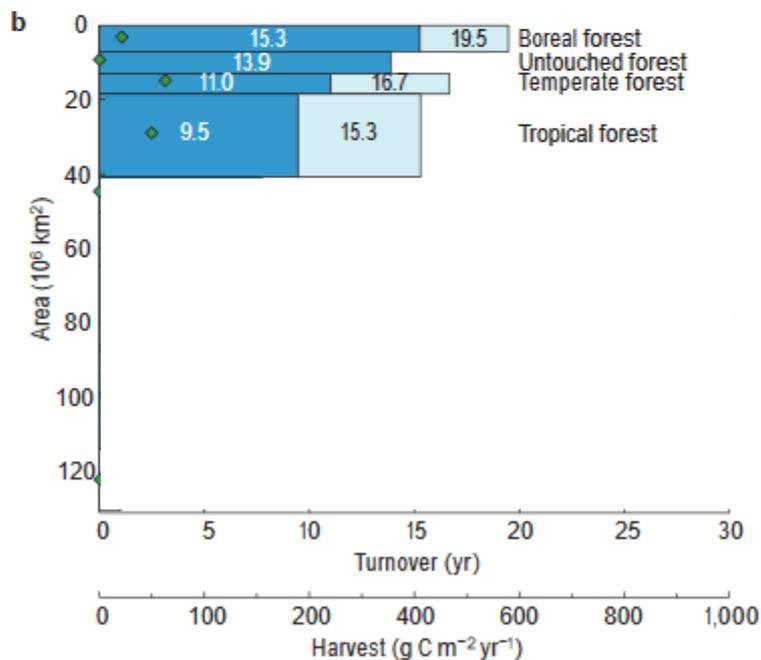


- L'exploitation :
- accroît la productivité primaire
  - réduit la durée du cycle de vie
  - diminue les stocks sol et biomasse

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



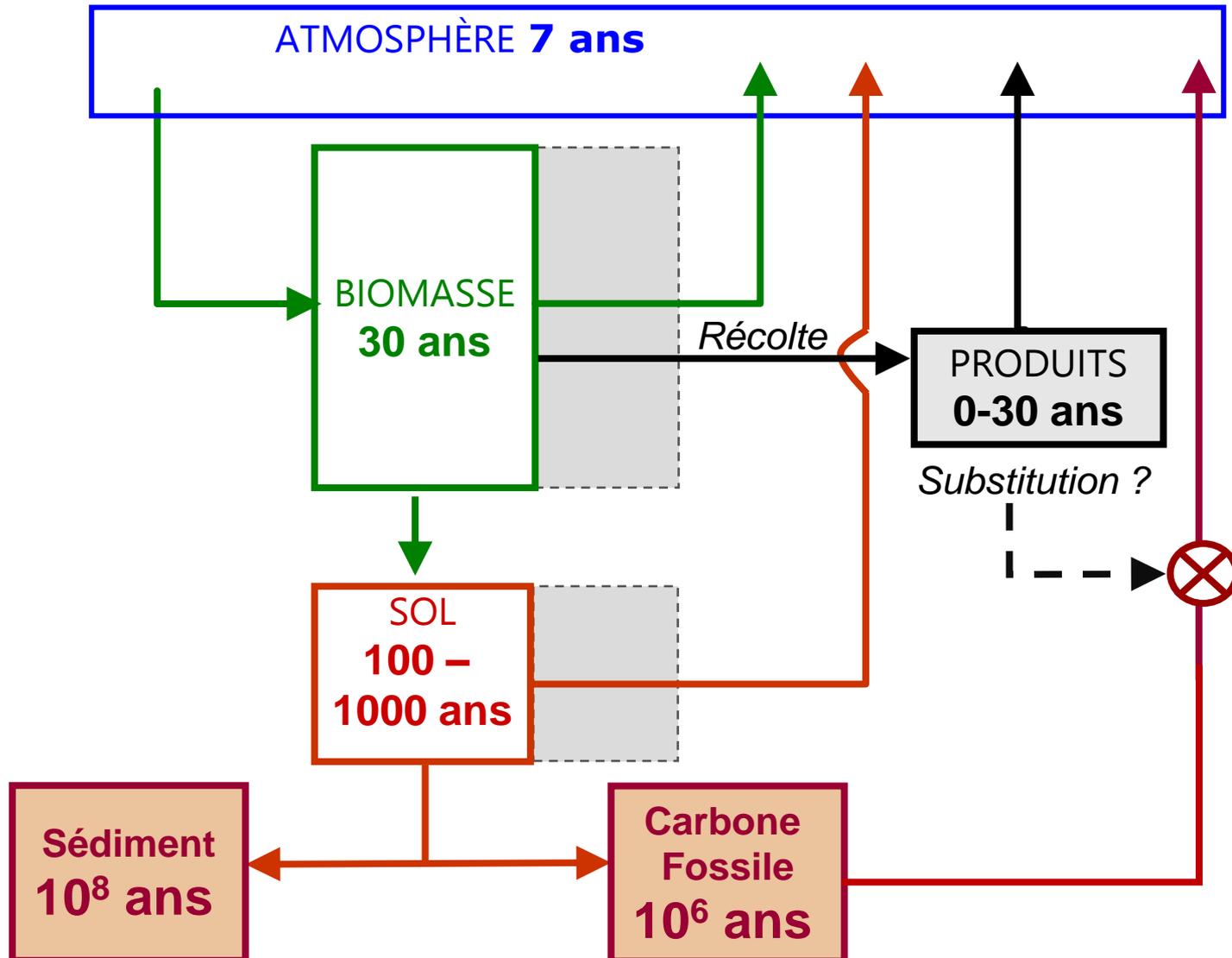
Le TMR du carbone en forêt est diminué de 21, 34 et 37% en zones boréale, tempérée et tropicale.



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<sup>-1</sup>)

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<sup>-1</sup>  
(12% des émissions fossiles)

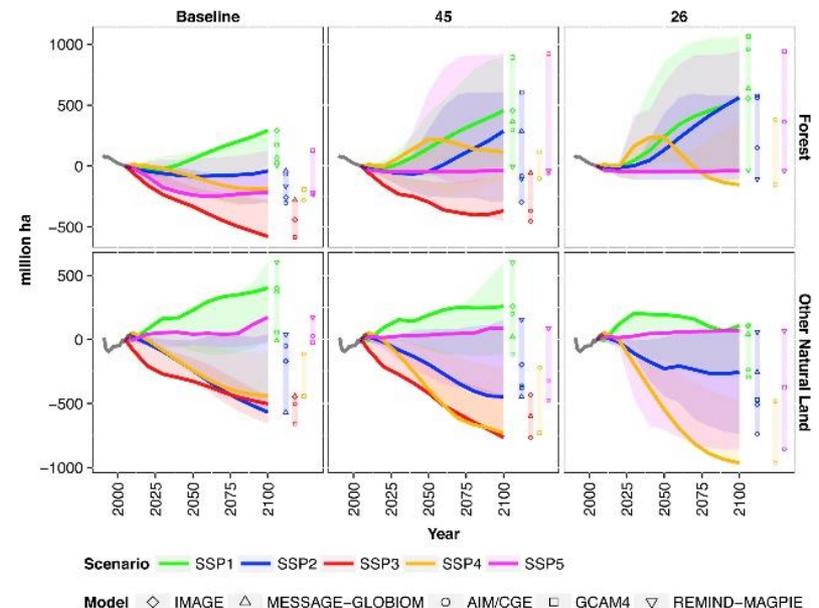
Tableau 2. Estimations mondiales de la quantité potentielle de C stockée et conservée grâce aux pratiques de gestion forestière entre 1995 et 2050 (tiré de Brown *et al.* 1996).

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

<sup>1</sup> Comprend les forêt insuffisamment reboisées du Canada

<sup>2</sup> 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 MKm<sup>2</sup>  
+ 0,5 – 0,9 GtC an<sup>-1</sup> (50 – 90 PgC)

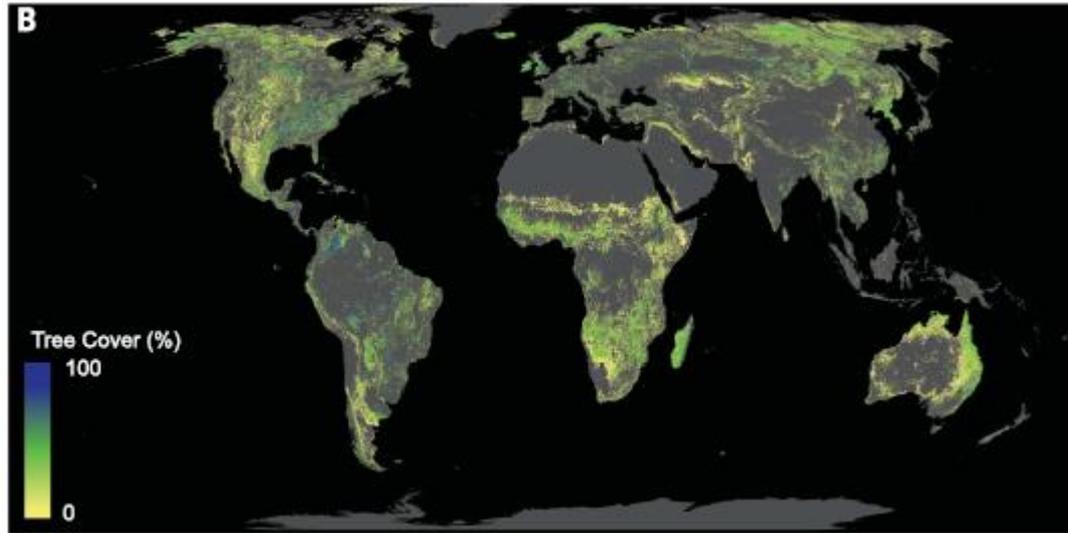


# L' Anthropocène. Gain potentiel de stockage de C par les forêts.

- 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 MKm<sup>2</sup>

→ + 205 - 212 GtC



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

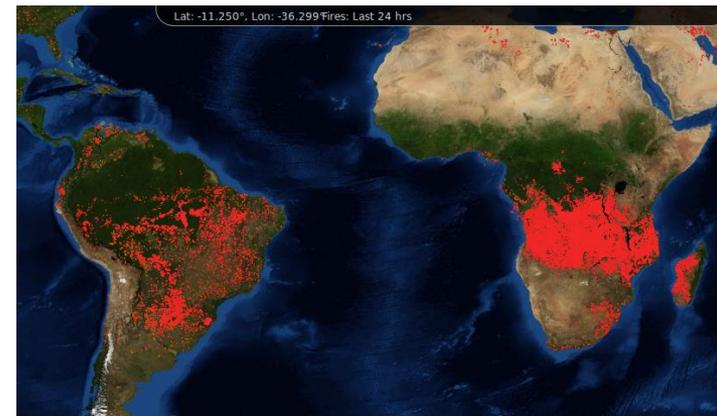
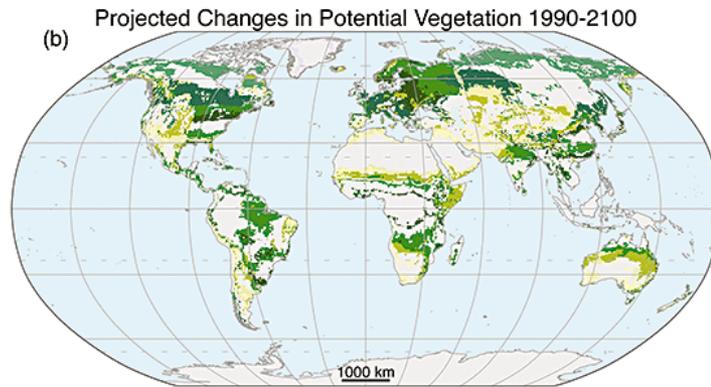
Surestimation (?) due à

- 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



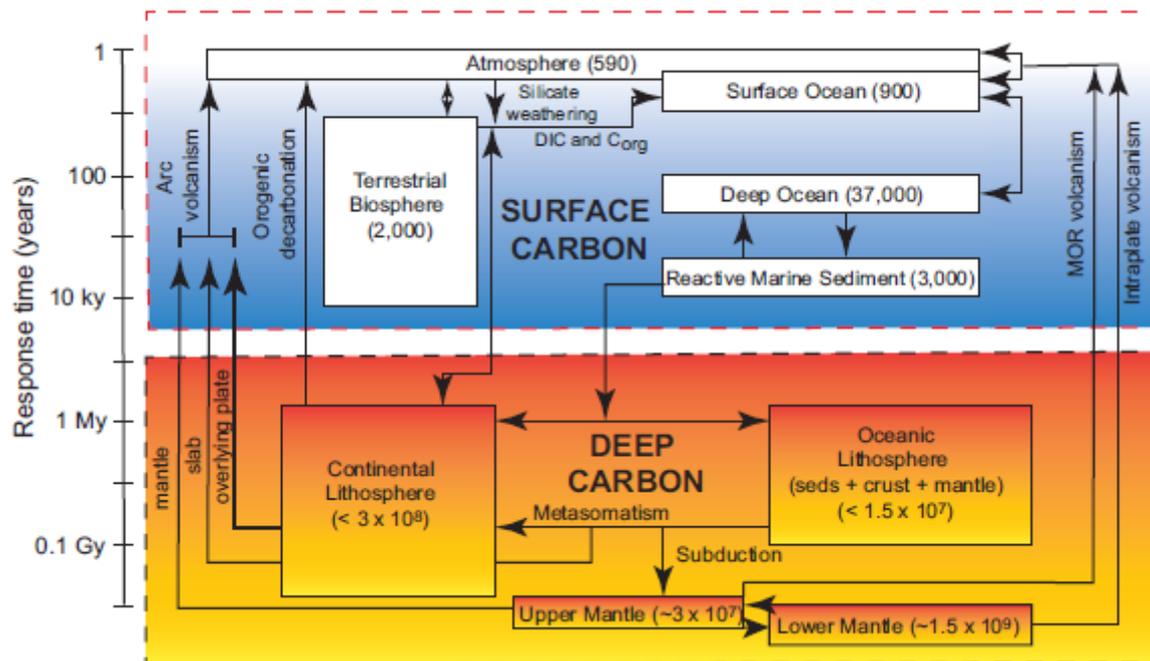
# L'agenda des forêts dans l'Anthropocène

- 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



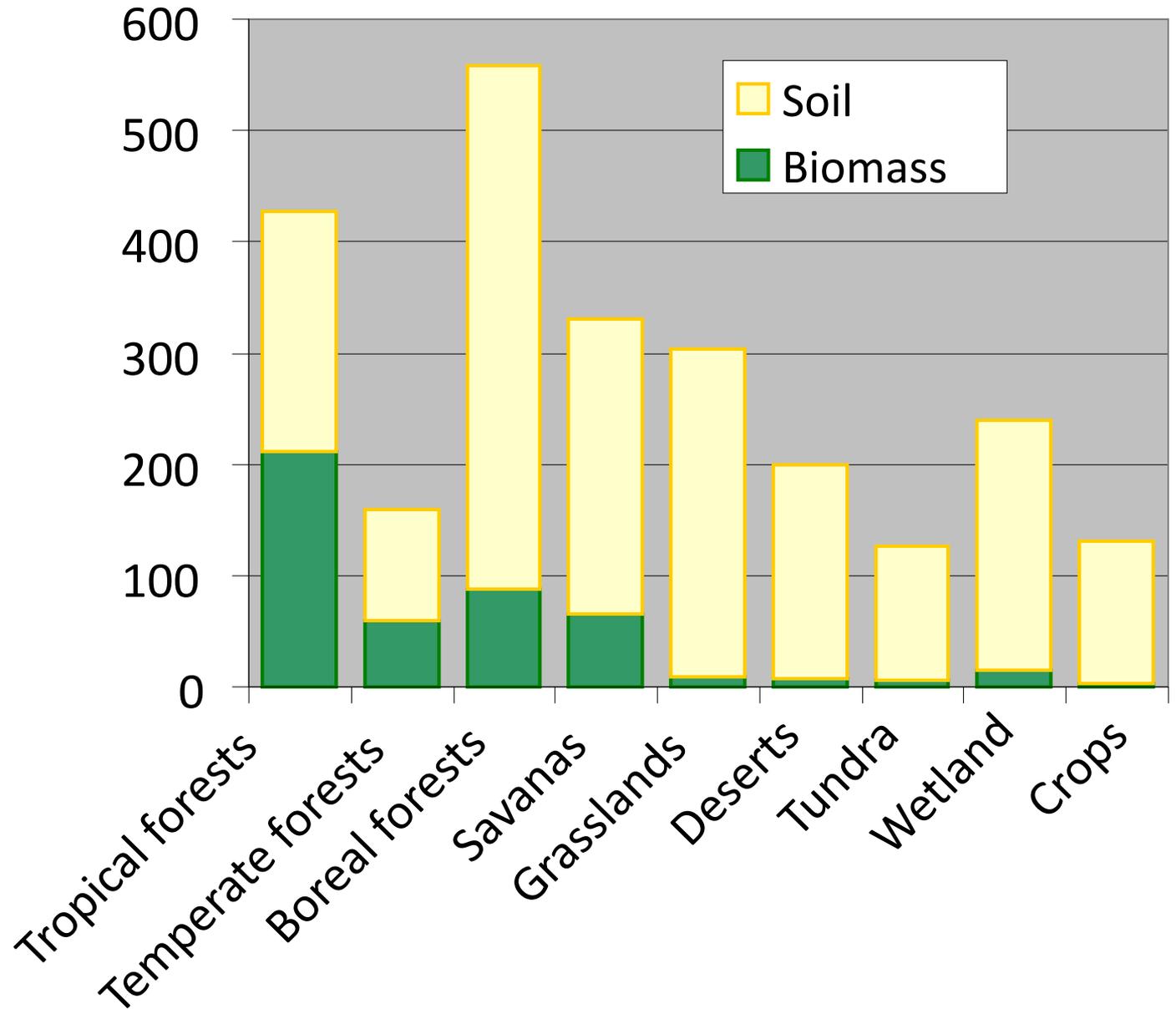
A dense forest of tall trees, including many birches, is reflected in a calm body of water. The scene is peaceful and natural. The text "Merci pour votre attention" is overlaid in white on the water.

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>