



HAL
open science

Le cycle du carbone en forêt et son rôle dans le cycle biogéochimique global des gaz à effet de serre

Denis Loustau

► **To cite this version:**

Denis Loustau. Le cycle du carbone en forêt et son rôle dans le cycle biogéochimique global des gaz à effet de serre. Le bilan carbone des forêts : enjeux scientifiques et écologiques, Sep 2010, Magny-les-Hameaux, France. 47 pl. hal-02811681

HAL Id: hal-02811681

<https://hal.inrae.fr/hal-02811681v1>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le cycle du carbone en forêt

et son rôle dans le cycle biogéochimique global des gaz à effet de serre

Denis Loustau

Conférence Colas 28 sept. 2010

Unité EPHYSE, www.inra.fr/ephyse.

ALIMENTATION
AGRICULTURE
ENVIRONNEMENT





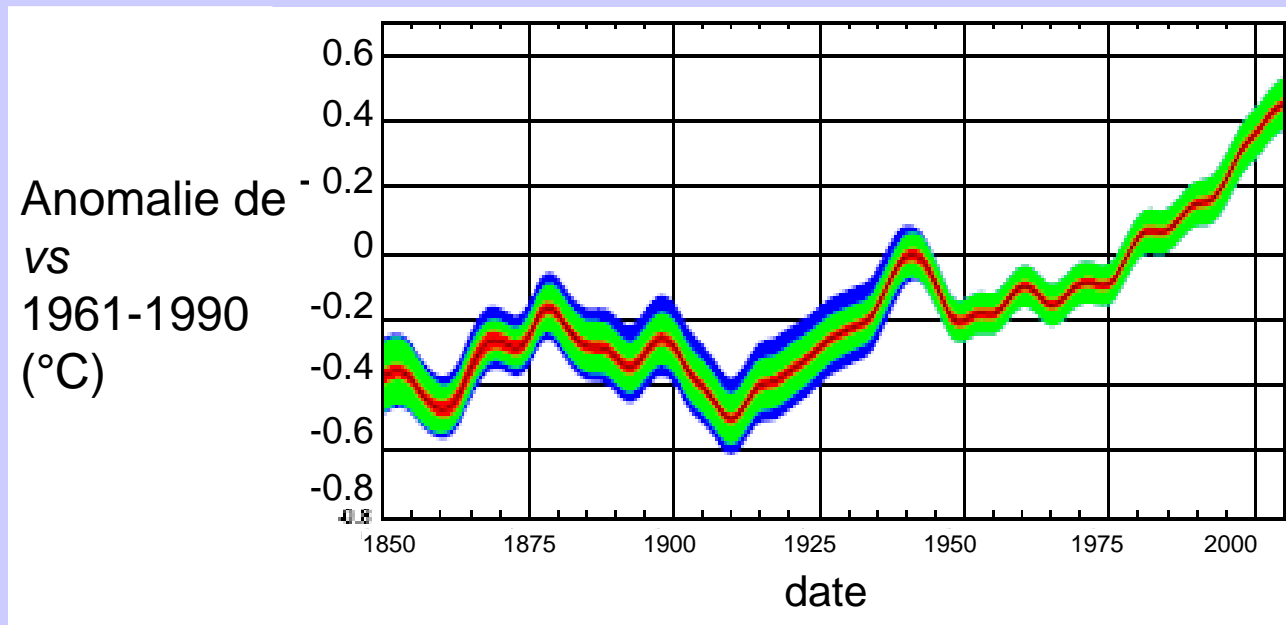
1. Survol introductif

2. Le cycle du C en forêt

3. Réflexions pour une sylviculture du carbone



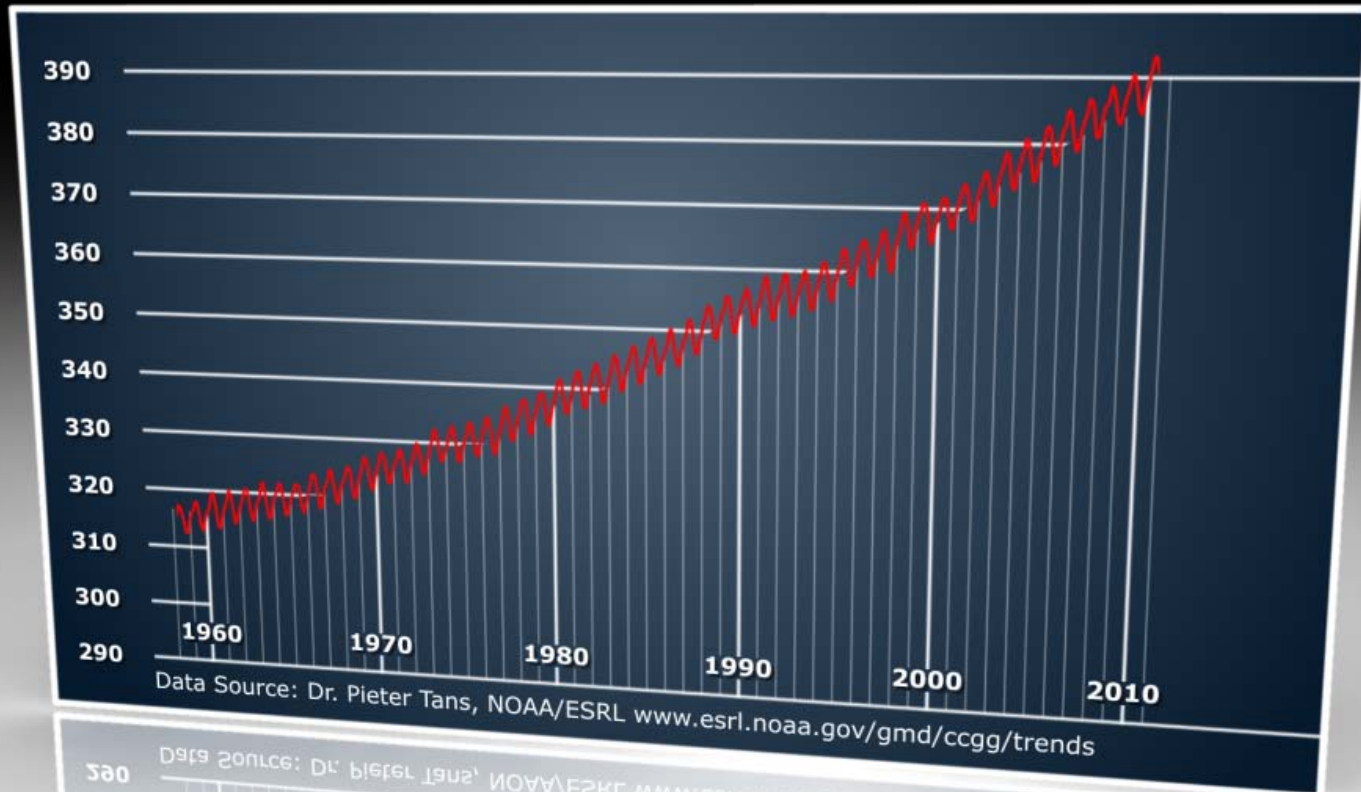
Climat et cycle du carbone : le réchauffement, brutal, global



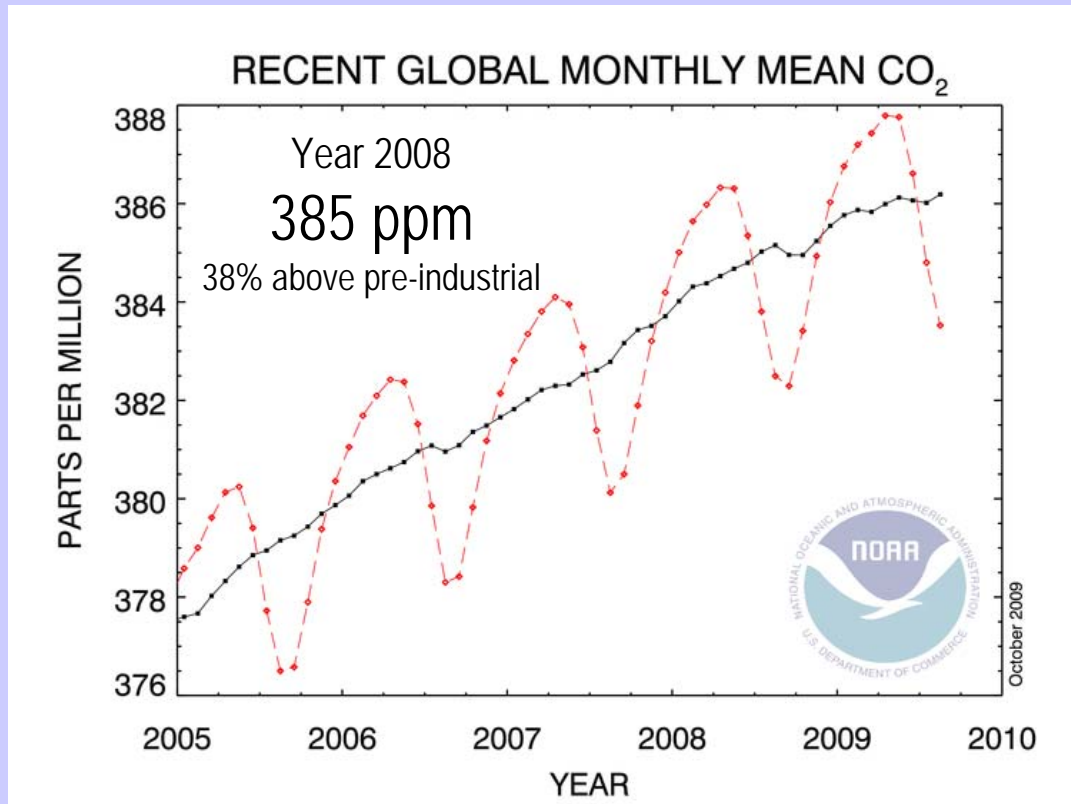
Evolution de la température moyenne terrestre relativement à 1961-90. (moyenne pondérée des données filtrées et corrigées d'un ensemble de base de 4389 stations météo)

CO₂ atmosphérique depuis 1958

Atmospheric CO₂ (ppm)



Les 5 dernières années



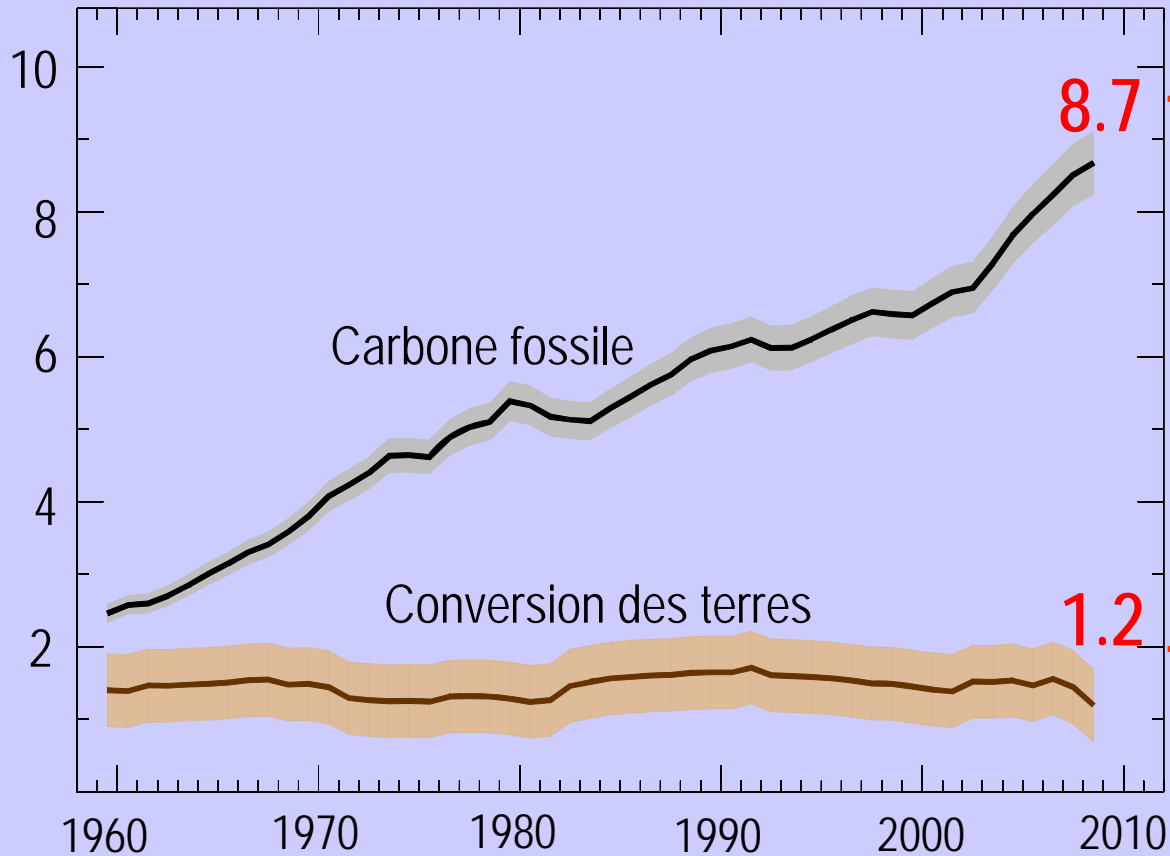
Annual Mean Growth Rate

2008	1.79
2007	2.12
2006	1.77
2005	2.41
2004	1.62
2003	2.22
2002	2.40
2001	1.85
2000	1.24

1960 – 1970: 0.9 ppm a⁻¹
1970 – 1979: 1.3 ppm a⁻¹
1980 – 1989: 1.6 ppm a⁻¹
1990 – 1999: 1.5 ppm a⁻¹
2000 - 2008: 1.9 ppm a⁻¹

Emissions d'origine humaine, données 2008

Émissions de CO₂ (GtC a⁻¹)



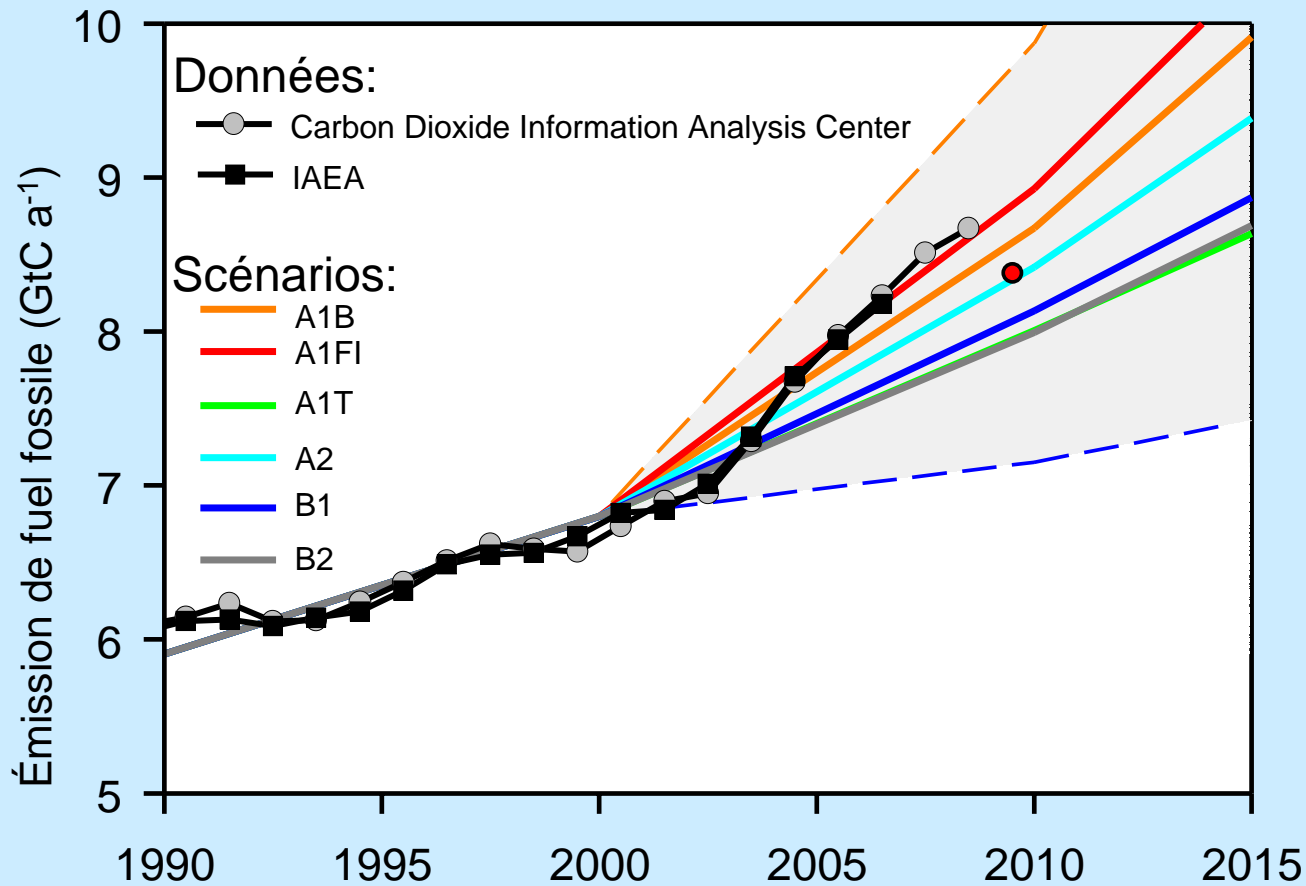
9.9 GtC



1.2

1 Gt = 10⁹ tonnes

Trajectoire des émissions et scénarios du GIEC



Projection **2009**

Emissions: -2.8%
PIB: -1.1%
Intensité en C du PIB: -1.7%

Raupach et al. 2007, *PNAS*, updated; Le Quéré et al. 2009, *Nature Geoscience*; FMI 2009

Fate of CO₂ anthropogenic emissions (2000-2008)

7.7 GtC y⁻¹



1.4 GtC y⁻¹ +



4.1 GtC y⁻¹

45%



continental biosphere

3.0 GtC y⁻¹

29%

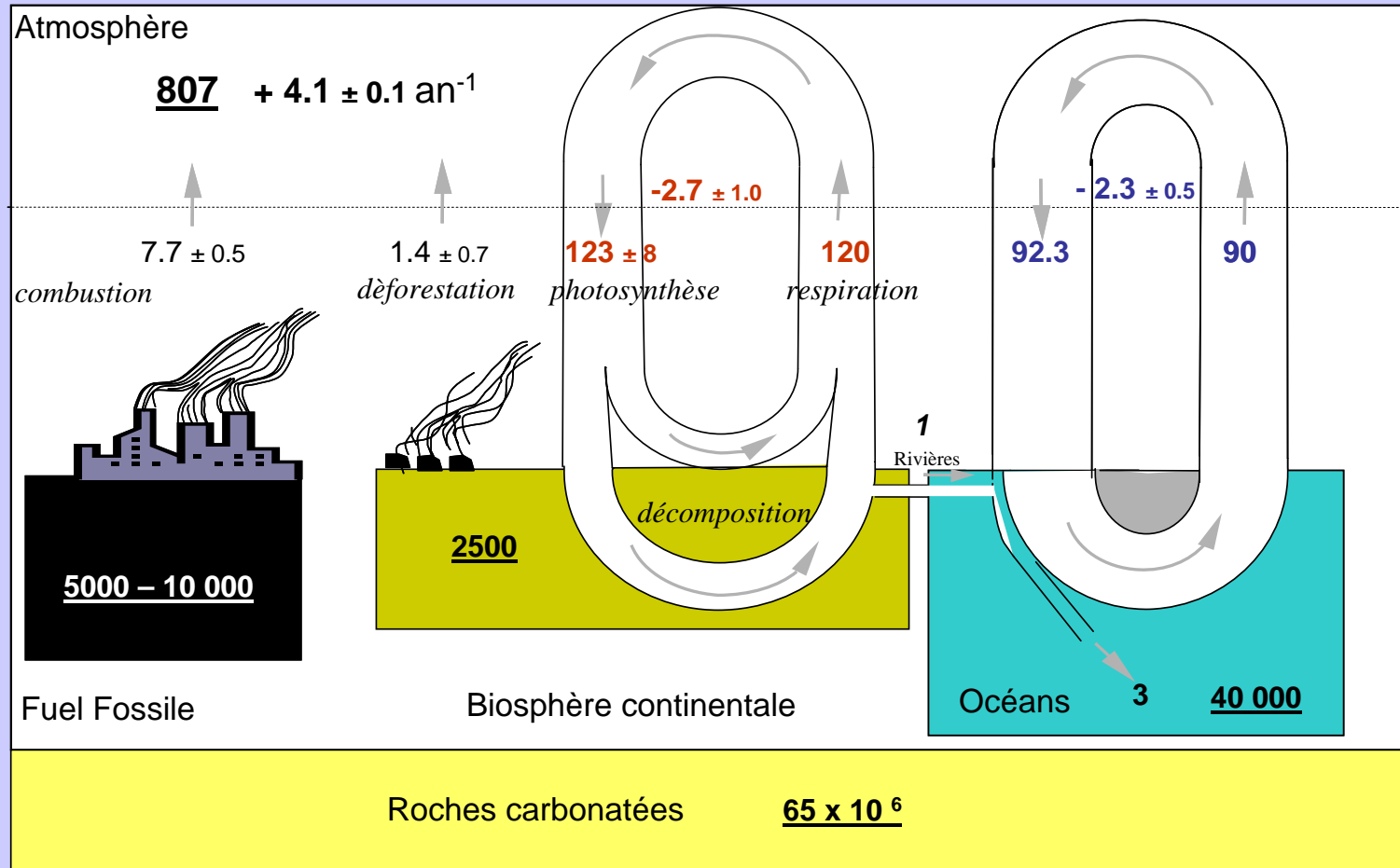


26%

2.3 GtC y⁻¹



Cycle global du carbone 2000-2008



(stocks en GtC, flux en GtC.an⁻¹)

(Canadell et al. 2007, Beer et al. *Science*, 2010)

- Une addition croissante de carbone fossile dans le cycle naturel
- L'atmosphère est le stock le plus faible, à plus fort turn over (0.25 an^{-1})
- Les échanges avec la biosphère continentale sont les plus forts

Rôle de la déforestation (2000-2005)

Borneo, Courtesy: Viktor Boehm



Déforestation tropicale:
13 millions ha chaque année



2000-2005

Amérique	0.6	Gt C a ⁻¹
Asie	0.6	Gt C a ⁻¹
Afrique	0.3	Gt C a ⁻¹
	1.5	Gt C a ⁻¹

1. Un bref survol introductif

2. Cycle du C en forêt

1. Généralités

2. Flux et stocks de carbone

3. Temps de résidence, turn over

3. Réflexions pour une sylviculture du carbone



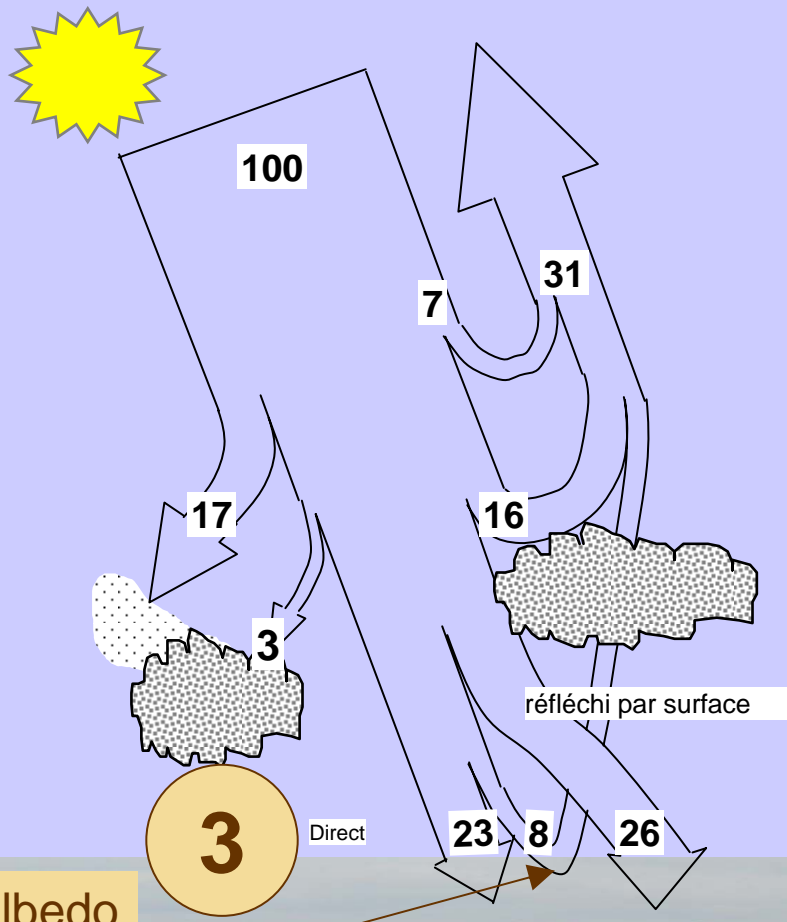
Généralités

- Écosystèmes composés d'espèces pérennes de grande taille
- Terme final des successions végétales terrestres, forte biodiversité
- Fonctionnement:
 - Biophysique: albedo faible, rugosité élevée...
 - Biogéochimie:
 - flux et stocks importants (carbone, azote,...)
 - régulations biologiques

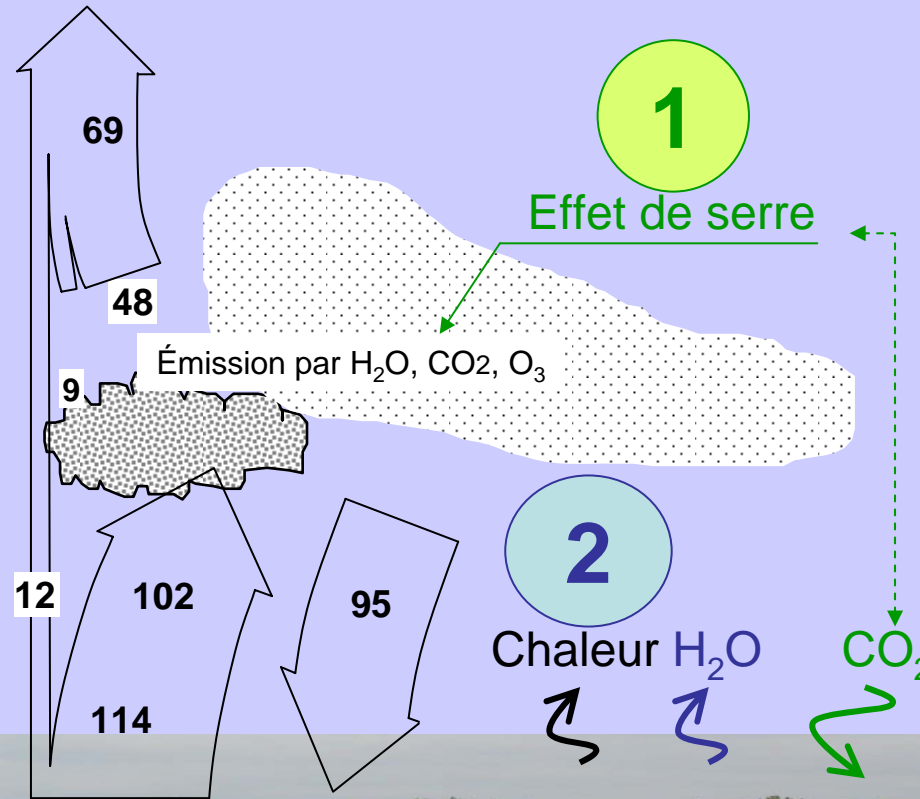


Action des forêts sur le climat :

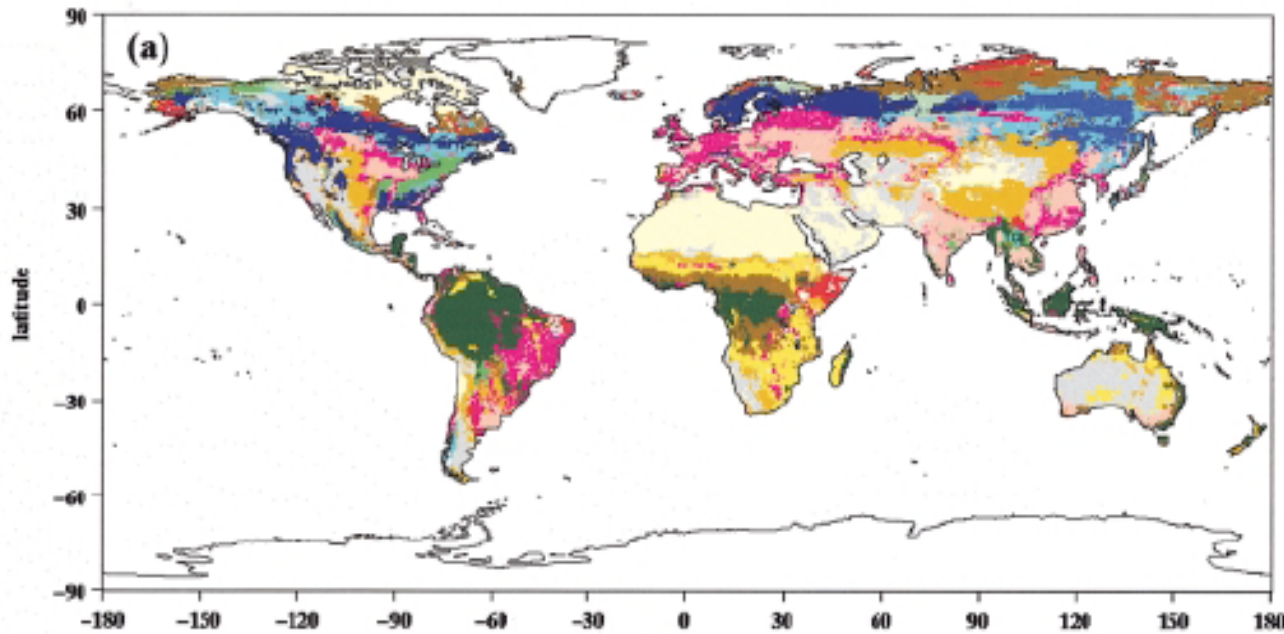
Rayonnement solaire



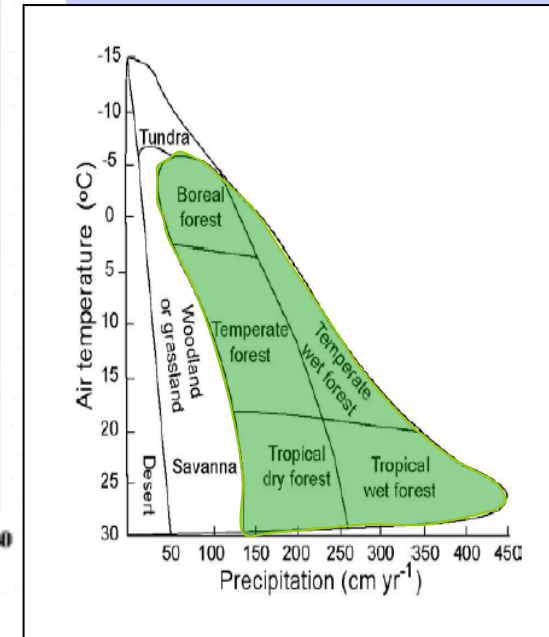
Rayonnement terrestre



Les forêts dans le monde



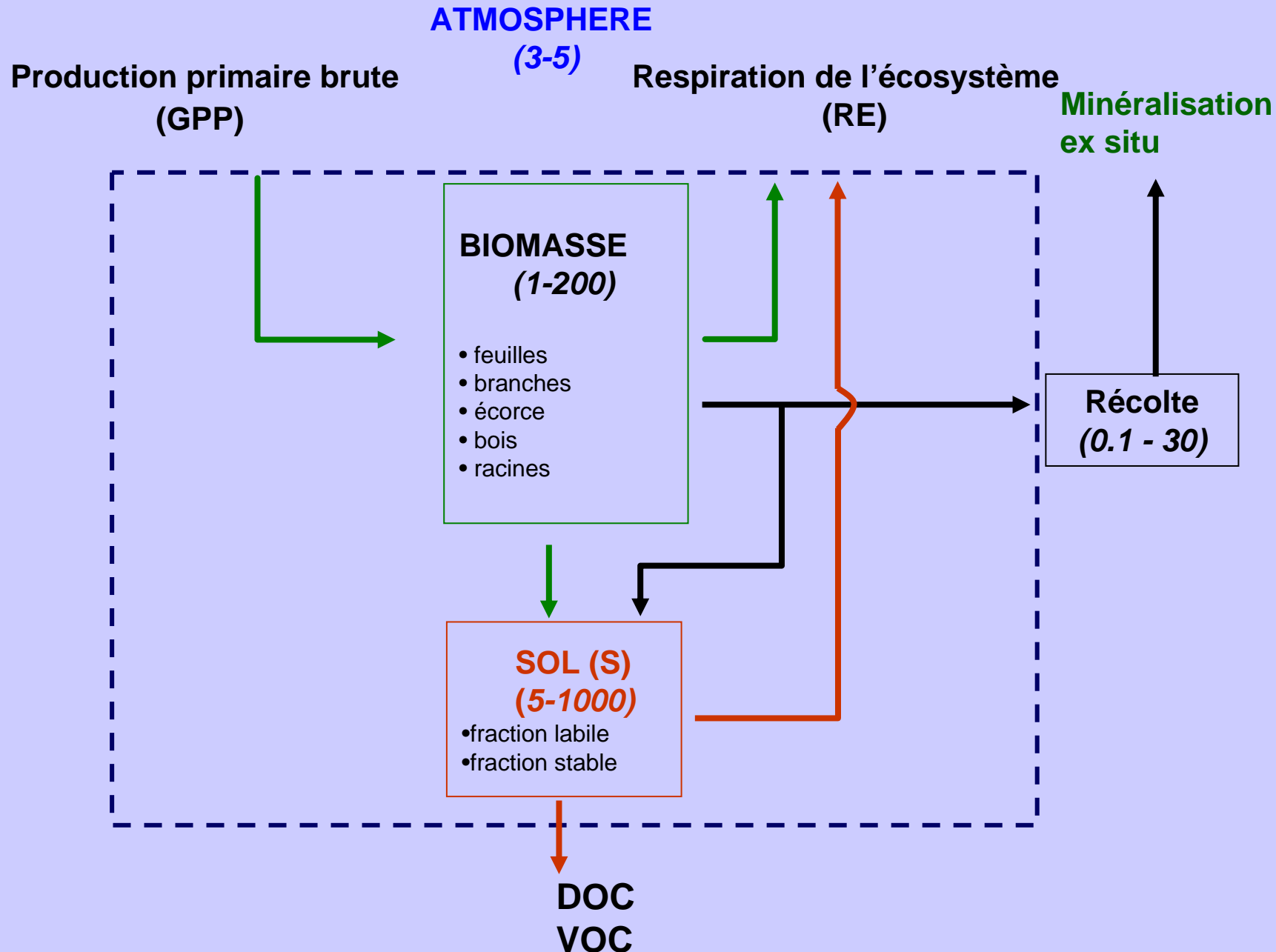
- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 Evergreen Needleleaf Forest | 9 Savanna |
| 2 Evergreen Broadleaf Forest | 10 Grassland |
| 3 Deciduous Needleleaf Forest/Woodland | 11 Permanent wetland |
| 4 Deciduous Broadleaf Forest | 12 Cropland |
| 5 Mixed Forest | 13 Cropland/Natural vegetation mosaic |
| 6 Closed Shrubland | 14 Bare Soil/Sparsely vegetated |
| 7 Open Shrubland | 16 Snow/Ice |
| 8 Woody Savanna | |



Niche climatique

Répartition globale des biomes interprétée d'indice de végétation (NDVI / NOAA AVHRR)

2.2. Cycle du carbone dans un écosystème forestier: principaux flux et temps moyen de résidence (années)

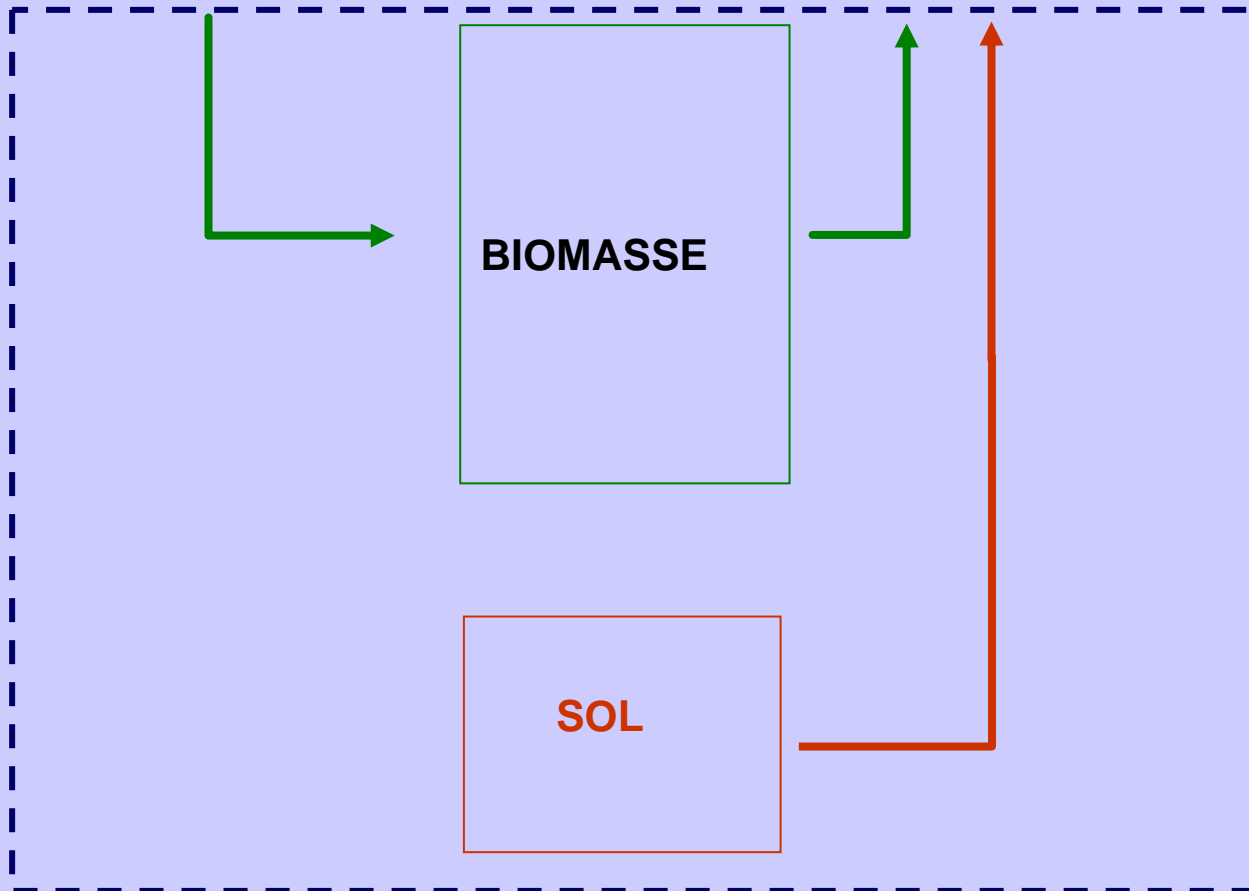


Cycle du carbone dans un écosystème forestier: principaux flux et temps moyen de résidence (années)

Echanges nets (CO_2) de l'écosystème ($\text{NEE} = \text{GPP} + \text{RE}$)

Production primaire brute
(GPP)

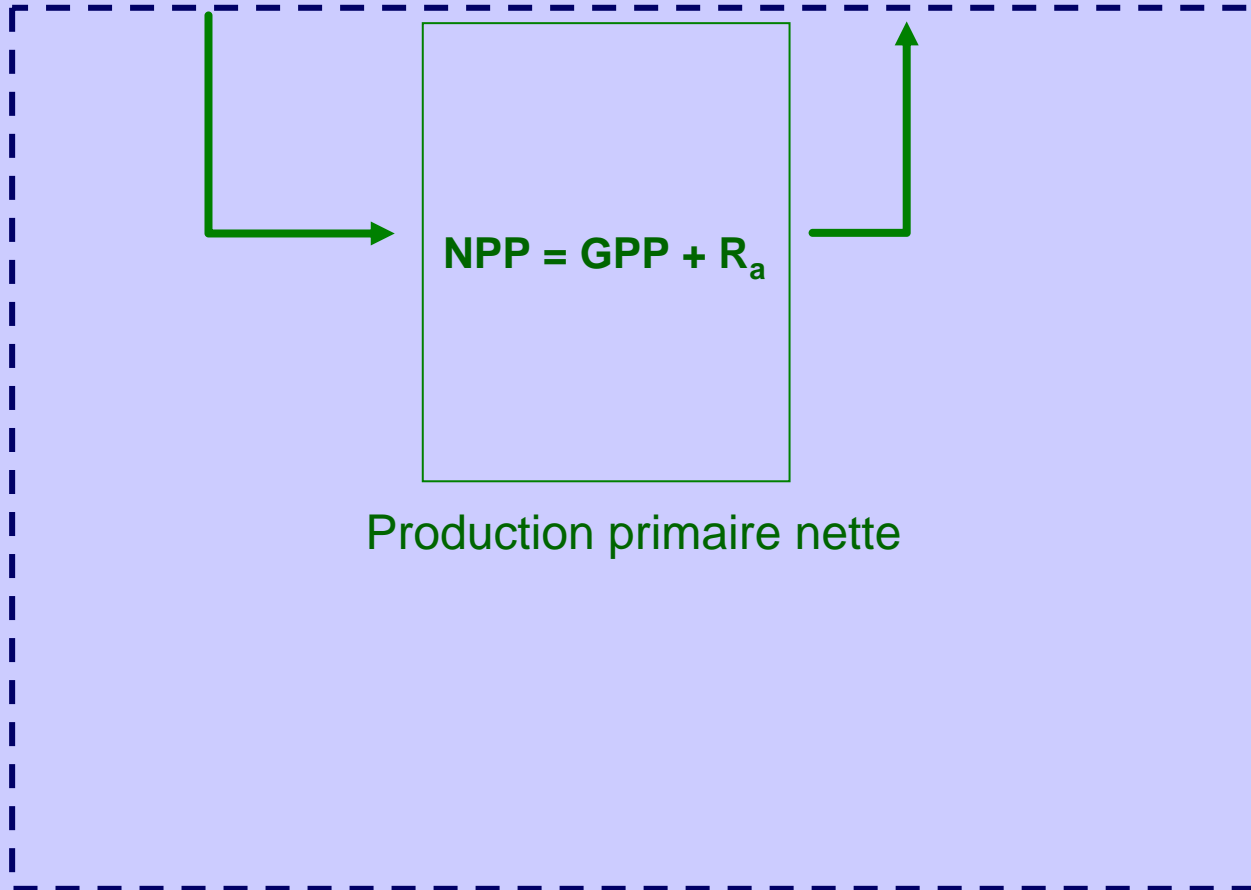
Respiration de l'écosystème
(RE)



Cycle du carbone dans un écosystème forestier: principaux flux et temps moyen de résidence (années)

Production primaire brute
(GPP)

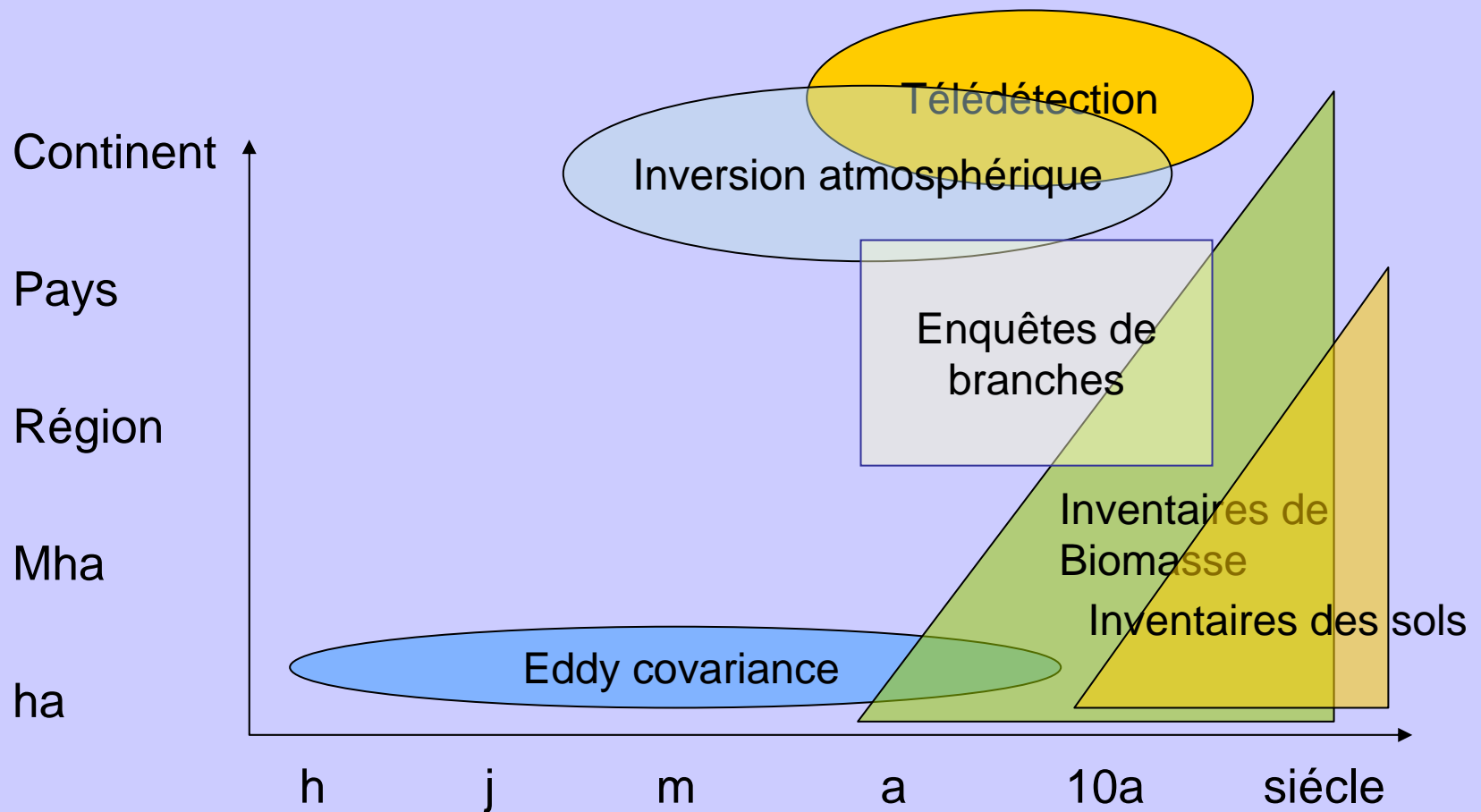
Respiration de l'écosystème
(RE)



$$NPP = GPP + R_a$$

Production primaire nette

Méthodes de détermination des stocks et flux de Carbone



Approche expérimentale du bilan de carbone



Eddy covariance
e=10-15%



Chambres de mesure (e=70%)

Mortalité, litière,

e = 30%

$$\text{Flux net de CO}_2 = \Delta W + c + d - R_h$$

inventaires



Biomasse aérienne
e=5%

Enquêtes (e=5%)
Herbivorie ?

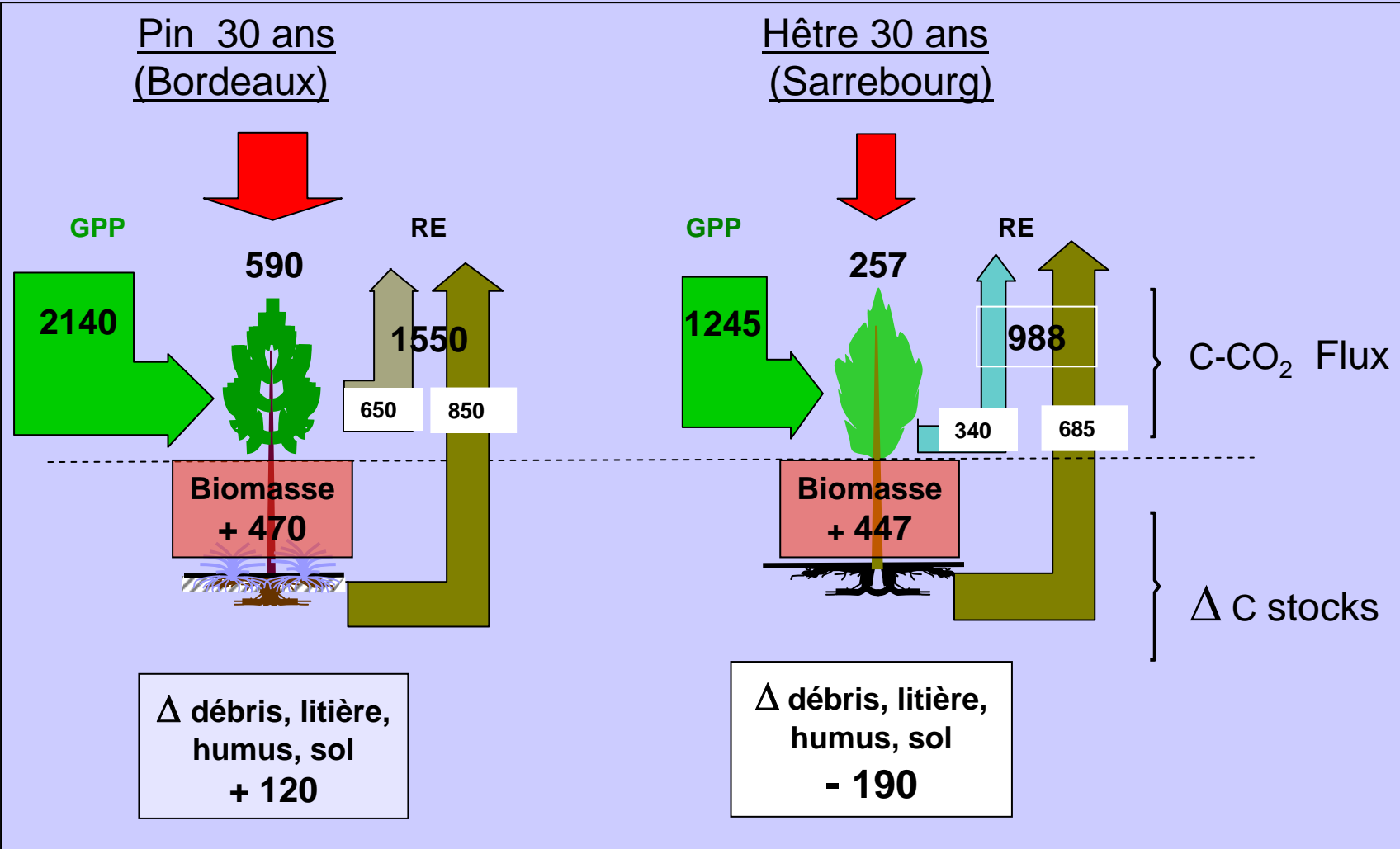


B. souterraine
e=50%



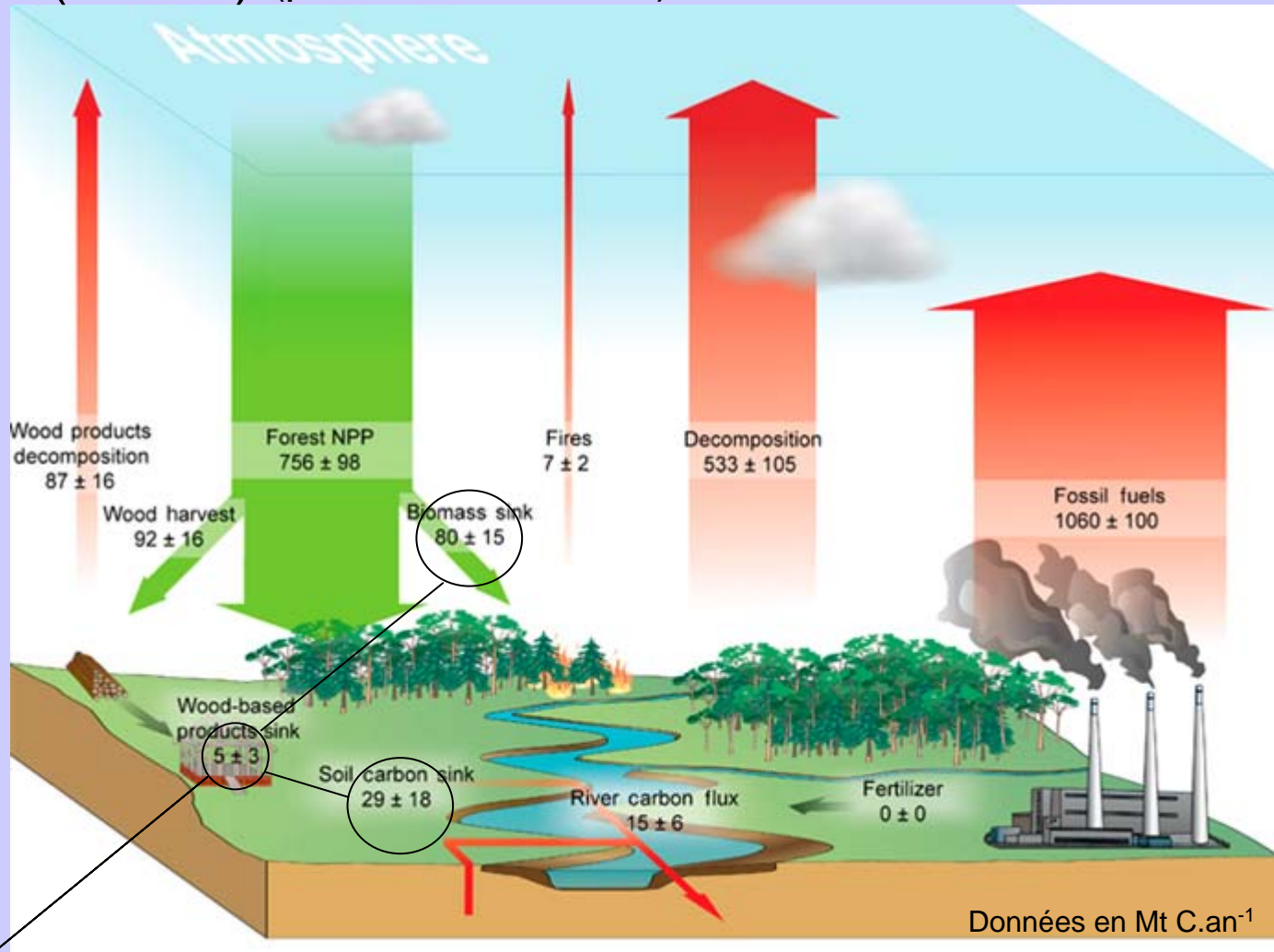
Neglected:
C loss as DOC, DIC, VOC

Résultat type: bilan de carbone de forêts de conifères (Pin maritime) et feuillus (Hêtre) (gC m⁻² an⁻¹)



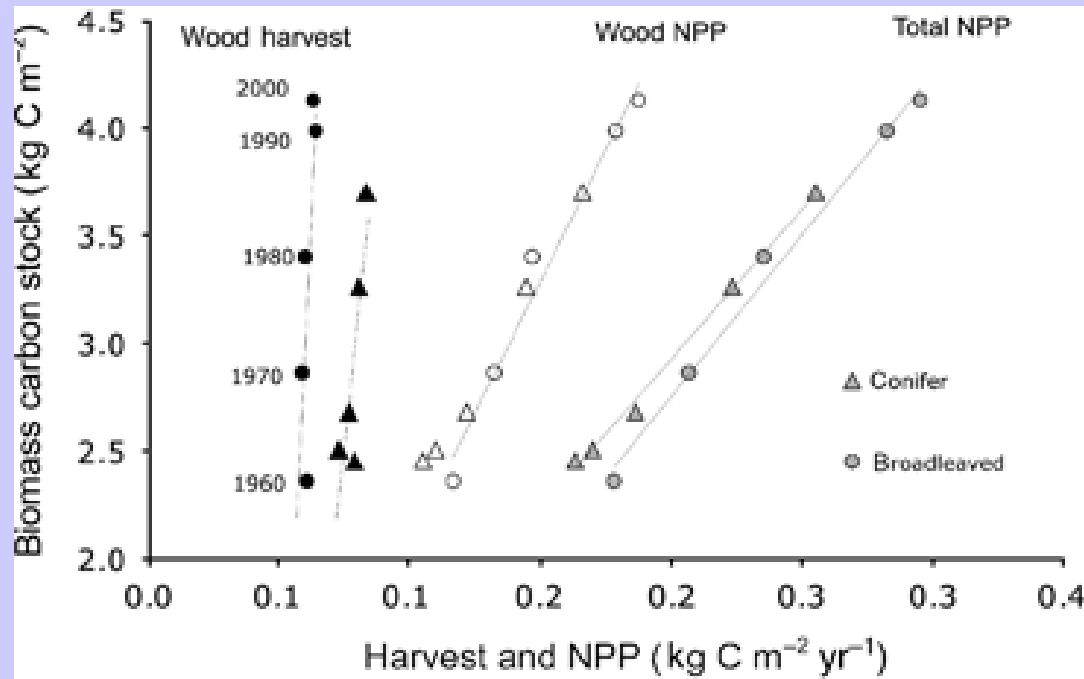
Granier et al 2000, *Funct. Ecol.*, Berbigier et al. 2001, *Agric For Met.*, Loustau et al. AGU 2008, Stella et al. *Biogeosciences*, 2010

Généralisation : sources et puits de carbone du secteur forestier européen (EU-25) (période 1990-2003)



Accumulation nette de $0.114 \text{ Gt C. an}^{-1}$ dans la biomasse (80), le sol (29) et les produits forestiers (5)

Sources et puits de carbone du secteur forestier européen (EU-25) (période 1990-2003)



Luyssaert et al. *Global Change Biology*, 2007.

Puits de carbone expliqué par l'âge moyen « jeune » des forêts européennes et un déficit de récolte

Synthèse globale des résultats provenant de 513 sites

	Boreal humid	Boreal semiarid		Temperate humid		Temperate semiarid	Mediterranean warm	Tropical humid
	Evergreen	Evergreen	Deciduous	Evergreen	Deciduous	Evergreen	Evergreen	Evergreen
GPP	973 ± 83	773 ± 35	1201 ± 23	1762 ± 56	1375 ± 56	1228 ± 286	1478 ± 136	3551 ± 160
NPP	271 ± 17	334 ± 55	539 ± 73	783 ± 45	738 ± 55	354 ± 33	801 ± NA	864 ± 96
fNPP	73 ± 9	47 ± 5	109 ± 11	159 ± 19	235 ± 13	56 ± 11	134 ± NA	316 ± 32
wNPP	205 ± 28	110 ± 20	304 ± 36	280 ± 29	329 ± 47	117 ± 20	389 ± NA	212 ± 52
rNPP	69 ± 9	157 ± 31	112 ± 22	235 ± 14	207 ± 20	172 ± 19	278 ± NA	324 ± 56
NEP	131 ± 79	40 ± 30	178 ± NA	398 ± 42	311 ± 38	133 ± 47	380 ± 73	403 ± 102
R_e	824 ± 112	734 ± 37	1029 ± NA	1336 ± 57	1048 ± 64	1104 ± 260	1112 ± 100	3061 ± 162
R_a	489 ± 83	541 ± 35	755 ± 31	951 ± 114	673 ± 87	498 ± 58	615 ± NA	2323 ± 144
R_h	381 ± 40	247 ± 26	275 ± 31	420 ± 31	387 ± 26	298 ± 16	574 ± 98	877 ± 96
$\Sigma(\delta\text{Flux})$	439 ± 122	176 ± 81	163 ± 90	216 ± 102	206 ± 95	713 ± 314	359 ± 131	774 ± 225
R_e/GPP	0.88 ± 0.09	0.97 ± 0.04	0.86 ± 0.01	0.77 ± 0.03	0.77 ± 0.04	0.87 ± 0.22	0.76 ± 0.07	0.88 ± 0.04
R_e/GPP	0.85 ± 0.14	0.95 ± 0.06	0.86 ± 0.02	0.76 ± 0.04	0.76 ± 0.06	0.96 ± 0.38	0.76 ± 0.10	0.86 ± 0.06

The R_e/GPP ratio was calculated for each bootstrap before and after balance closure.

NPP, net primary production; NEP, net ecosystem production; GPP, gross primary production.

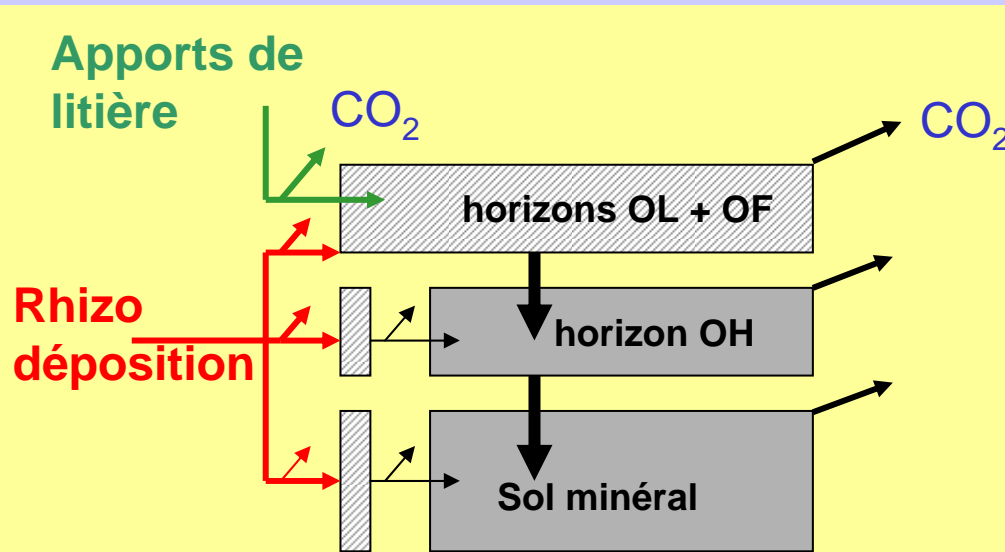
Valeurs annuelles de production primaire brute (GPP) agrégées par biome.

Biome	GPP (Gt C an ⁻¹)	NPP (Gt C an ⁻¹)	Stocks de C biomasse (Gt C)	Stocks de C Sol (Gt C)
Tropical forests	41	22	340	214
Temperate forests	10	8	139	153
Boreal forests	8	3	57	338
Total of Forests	59	33	535	705
Tropical savannahs and grasslands	31	15	80	247
Temperate grasslands and shrublands	9	7	22	247
Deserts	6	4	10	159
Tundra	2	1	2	115
Croplands	15	4	4	11
Total	122	63	653	1484

Beer C. et al. 2010, *Science*; Roy et al. 2001, *Academic Press*,
Grace, *J Ecol.* 2004, Robinson et al. *Proc Roy Soc B*, 2007

2.3 Datation et turn over du carbone

1. Méthode de datation ^{14}C appliquée au carbone du sol



Modèle

- 3 compartiments
- décomposition du 1^{er} ordre

▨ M.O. particulaire, débris

■ M.O. fine, colloïdale

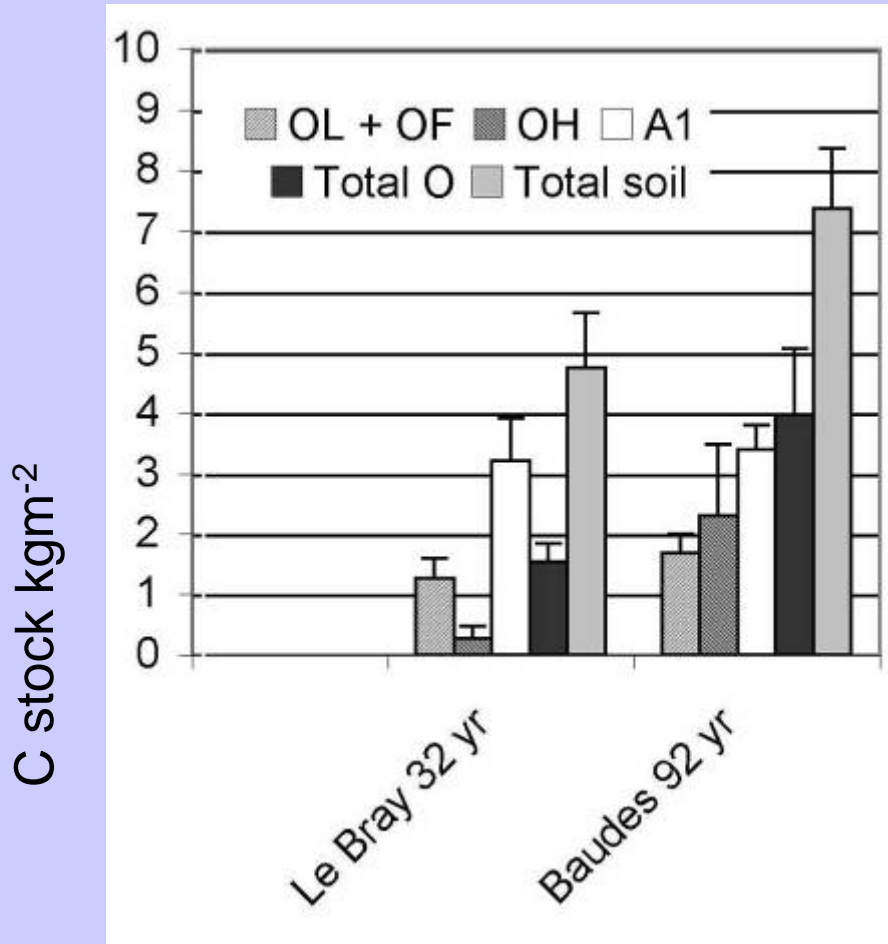
↗ : minéralisation rapide (≤ 1 an)

↘ : minéralisation lente

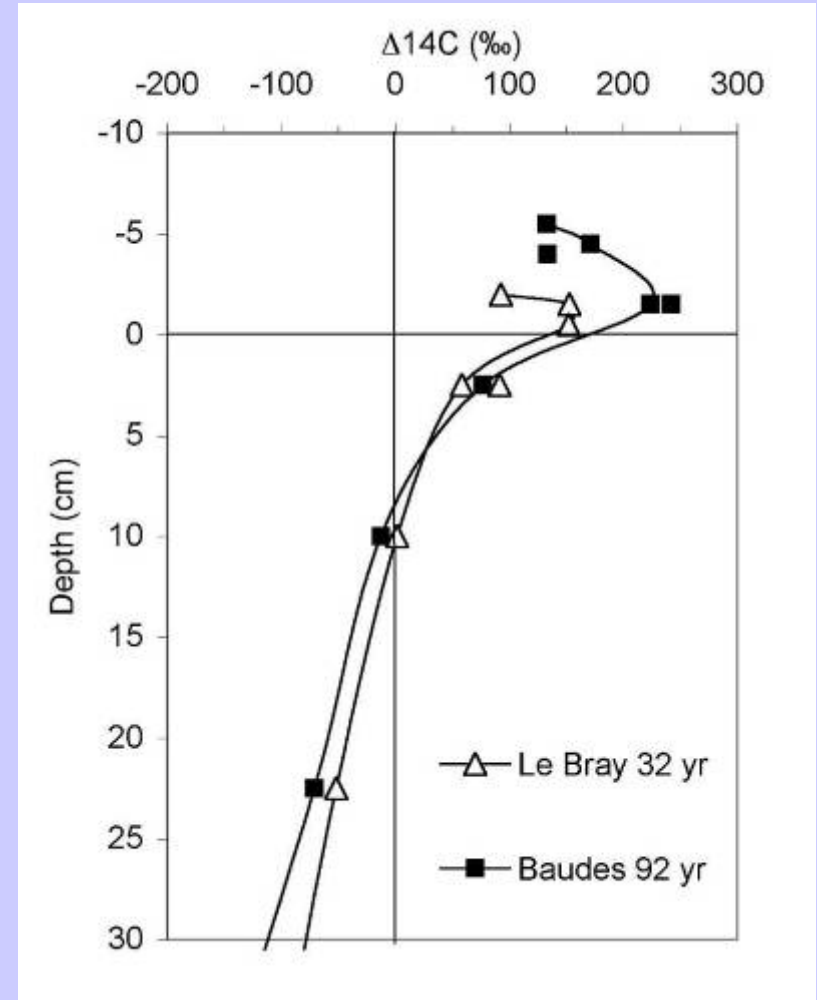
↓ : humification

Datation et turn over du carbone

1. Méthode de datation ^{14}C appliquée au carbone du sol, cas de la pinède



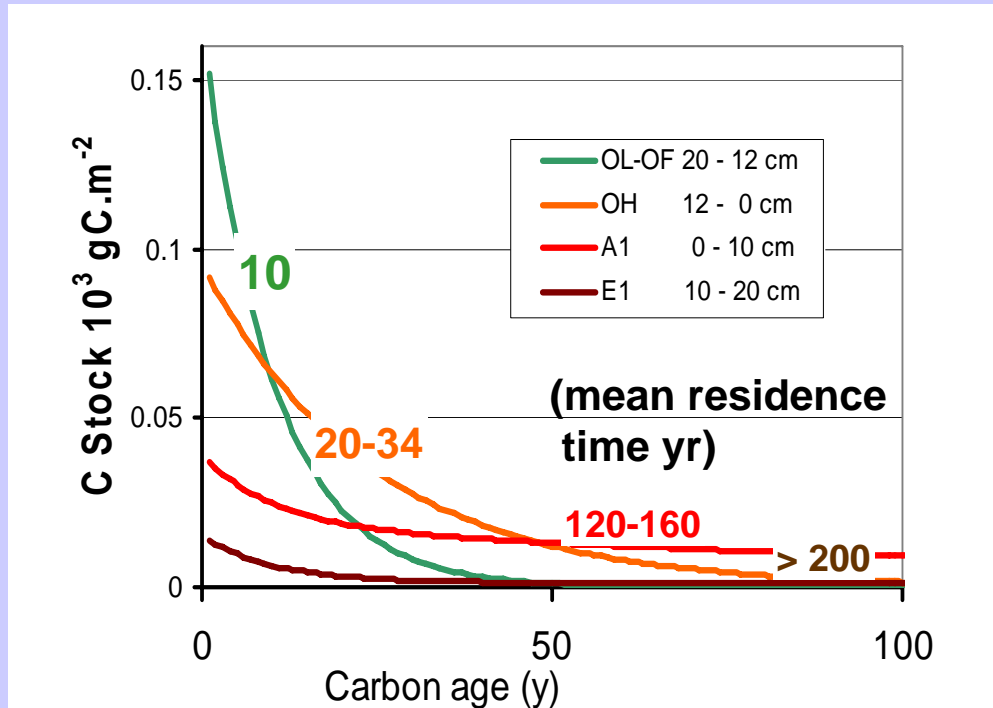
Profil de carbone organique de peuplements de Pin maritime



Profils d'activité ^{14}C

Datation et turn over du carbone

1. Méthode de datation ^{14}C appliquée au carbone du sol



Distribution de l'âge apparent du carbone dans le sol de la pinède landaise

La formation du stock de carbone organique du sol est un processus « lent ».

(Guillet et al., in *Forest Carbon cycle and climate change* 2010, Loustau et al. AGU 2008)

Datation et turn over du carbone

2. Transferts de carbone atmosphère - plante - sol

Expérimentations : les réseaux d'observation-recherche (SOERE) sur les écosystèmes forestiers (INRA, CNRS, CIRAD, GIP Ecofor)



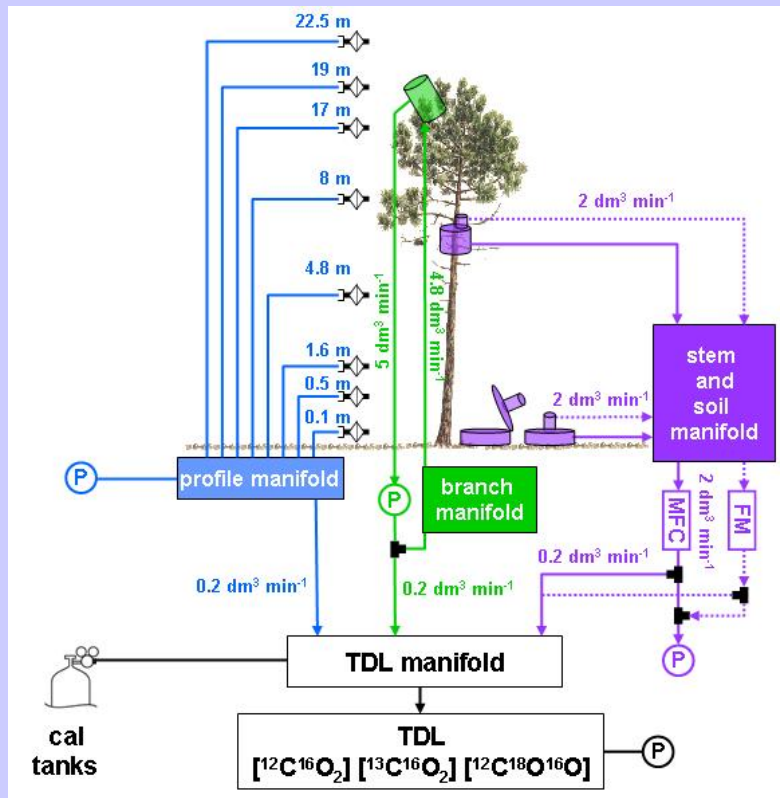
Instrumentation

- Micrométéorologie
- Hydrologie
- Inventaires écologiques
- Flux de sève brute des arbres
- Flux de CO₂, H₂O, O₃, chaleur, dépôts azotés

Datation et turn over du carbone

2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

Mesure *in situ* et en continu du $^{12}\text{CO}_2$ et $^{13}\text{CO}_2$ respiré par spectrométrie à diode laser modulable

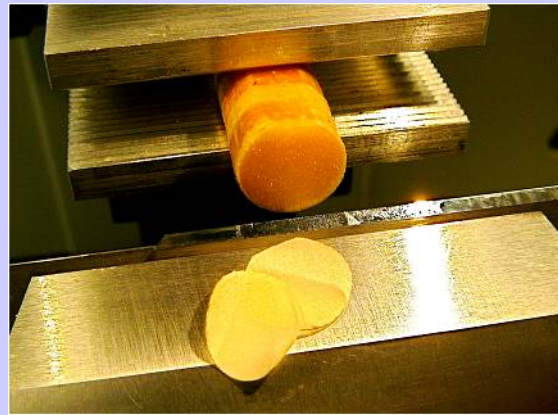


Datation et turn over du carbone

2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

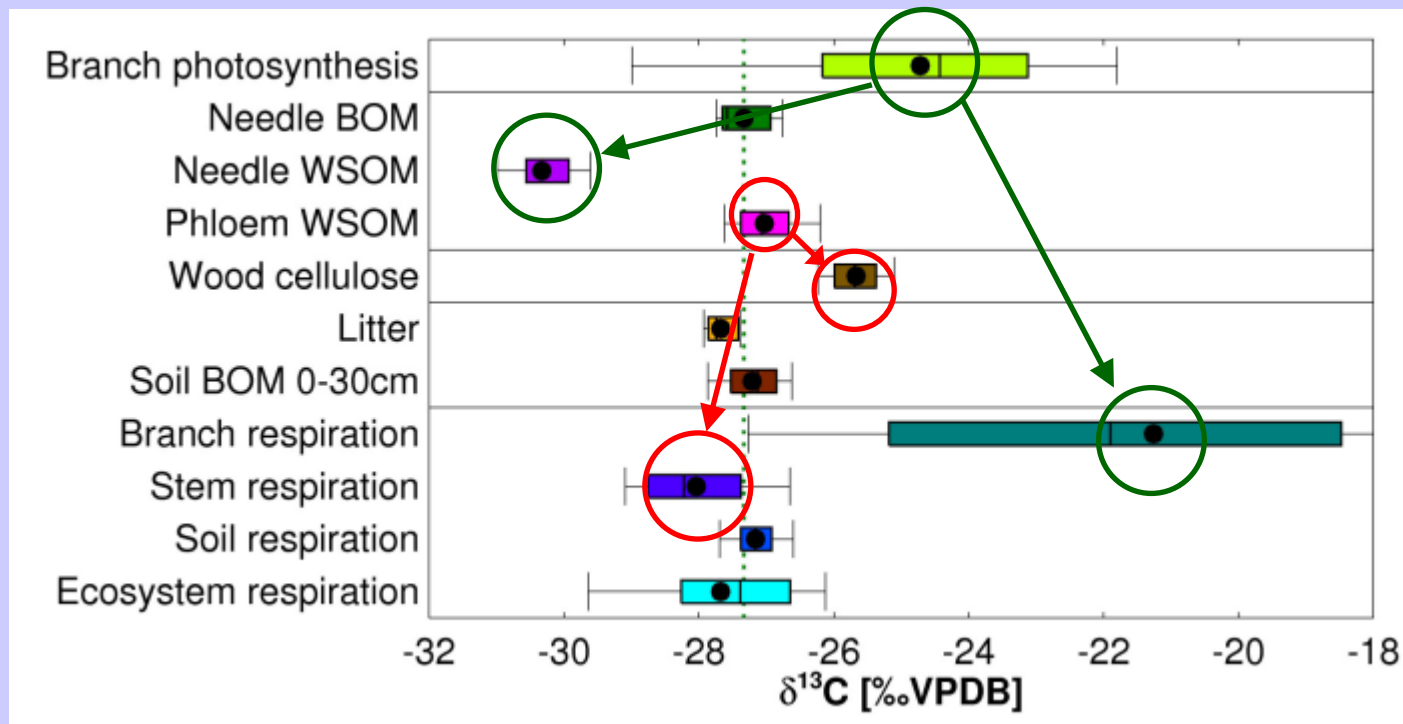
Détermination à **haute résolution** du profil radial du $\delta^{13}\text{C}$ de la cellulose des cernes

La haute résolution permet une description fine des variations inter- et intra-annuelles du $\delta^{13}\text{C}$ de la cellulose



Datation et turn over du carbone

2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

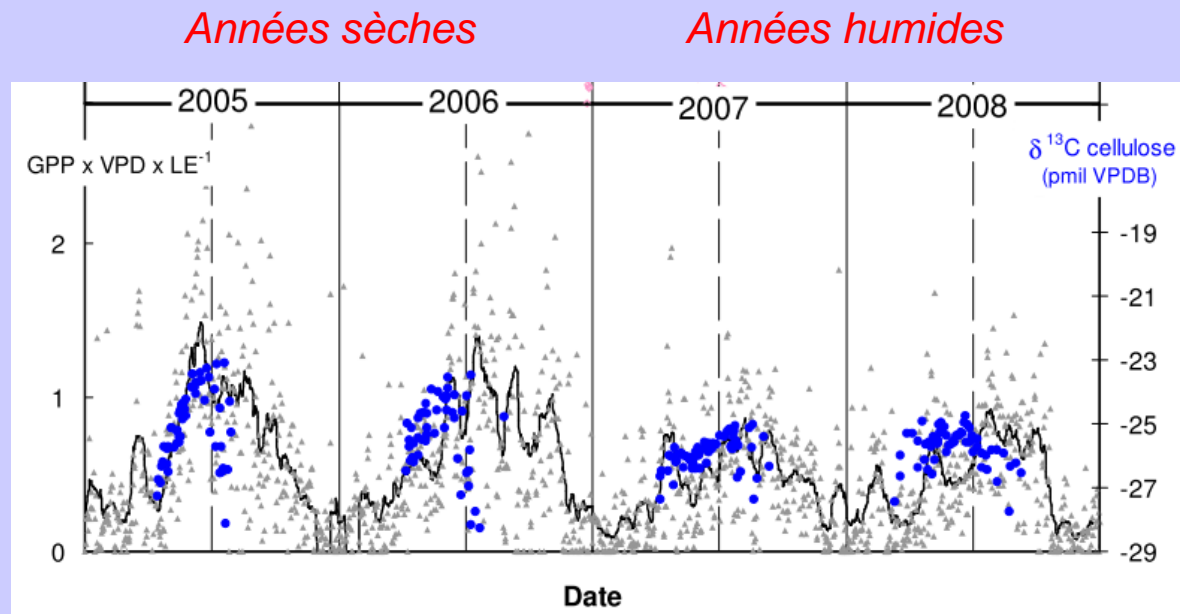


Trace isotopique des processus de transfert de carbone de l'échelle du tronc à l'échelle de l'écosystème

Datation et turn over du carbone

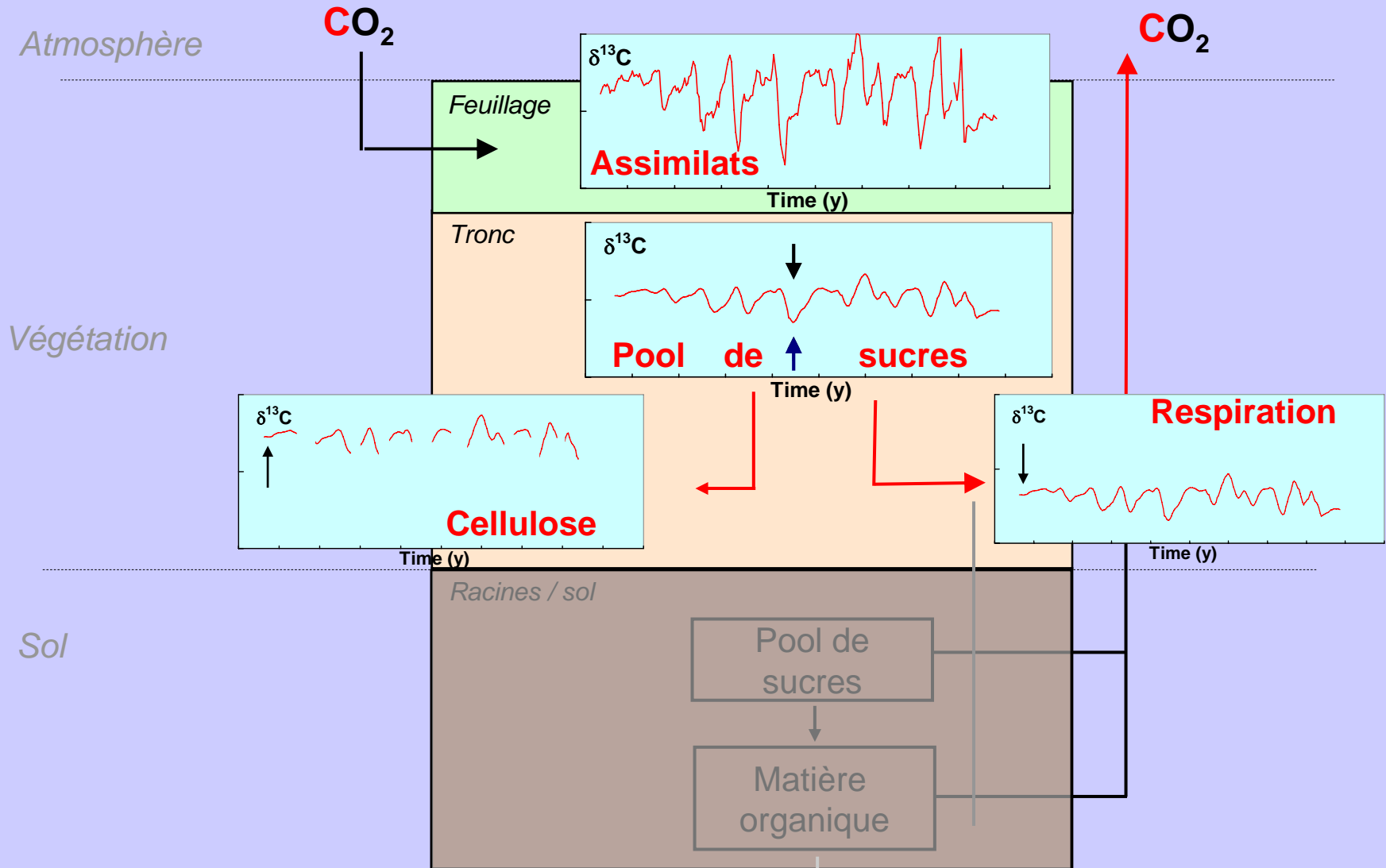
2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

Le $\delta^{13}\text{C}$ de la cellulose peut être relié directement l'assimilation photosynthétique (A / g_s)



Datation et turn over du carbone

Vers une compréhension de la dynamique du cycle du carbone de l'atmosphère au sol et aux cernes des arbres.



1. Un bref survol introductif

2. Cycle du C en forêt

3. Réflexions pour une sylviculture du carbone

1. Comment (1) : la reforestation

2. Comment (2): la sylviculture

3. Combien de carbone peut on stocker ?

Quoi faire ?

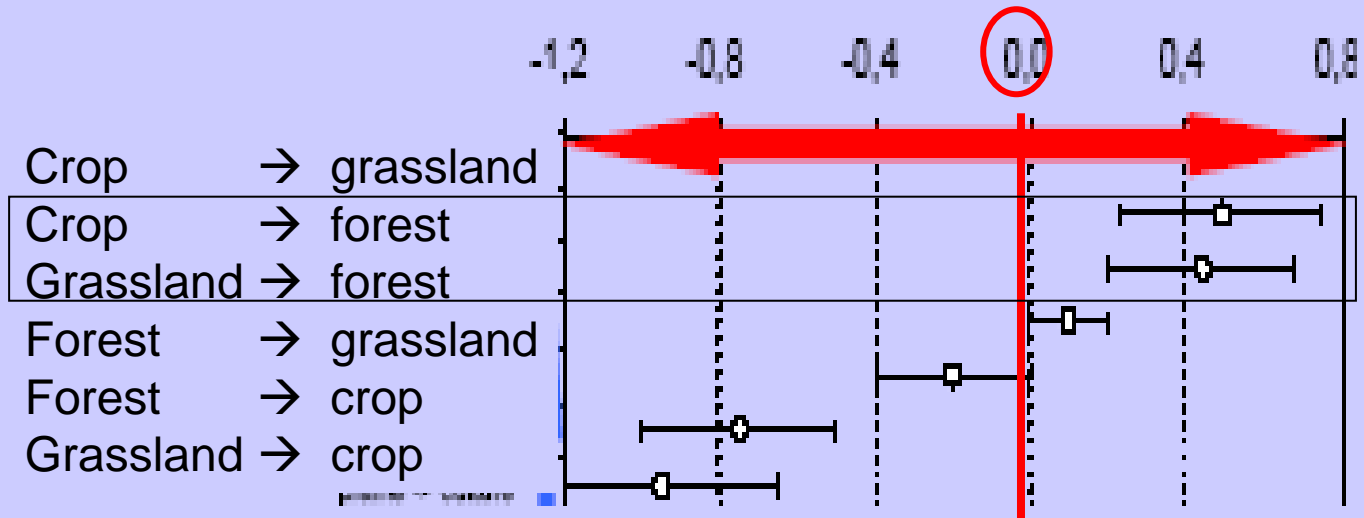
- Augmenter les stocks en place
- Accroître le temps de résidence du Carbone dans la biosphère
- Substituer le C fossile par du C renouvelable

Comment le faire ?

- Conversion des terres
- Sylviculture et carbone

Conversion des terres en forêt

Carbon stock change on site ($\text{tC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{y}^{-1}$)



(Values averaged over 20 years. Arrouays et al. INRA)

Question



(Pinède cultivée, France)



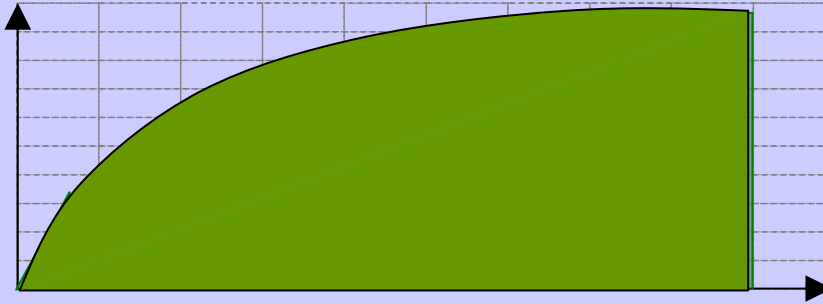
*(forêt pluviale littorale SW
Nelle Zélande)*

Cultiver et récolter.....ou stocker sur place ?

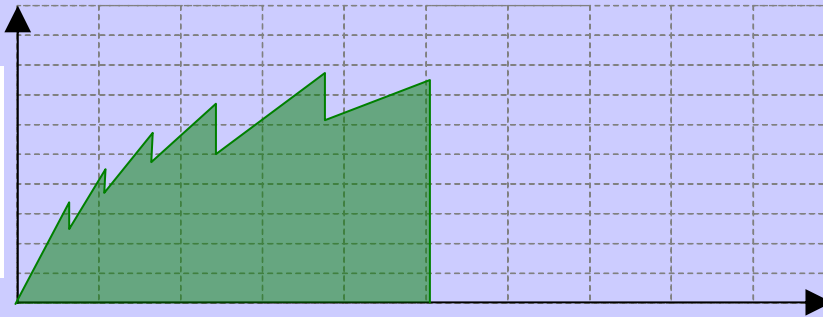
Analyse de trois options de sylviculture

Biomass

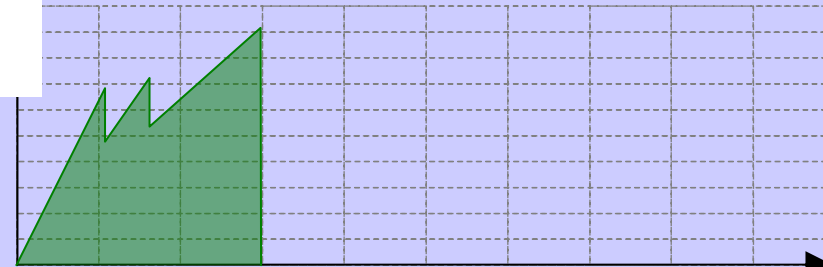
**Non
gérée
(UM)**



**Gérée
(M)**



**Intensifiée
(FI)**



age

Regeneration assisted

Thinnings

Clearcut

Timber logging

Soil preparation

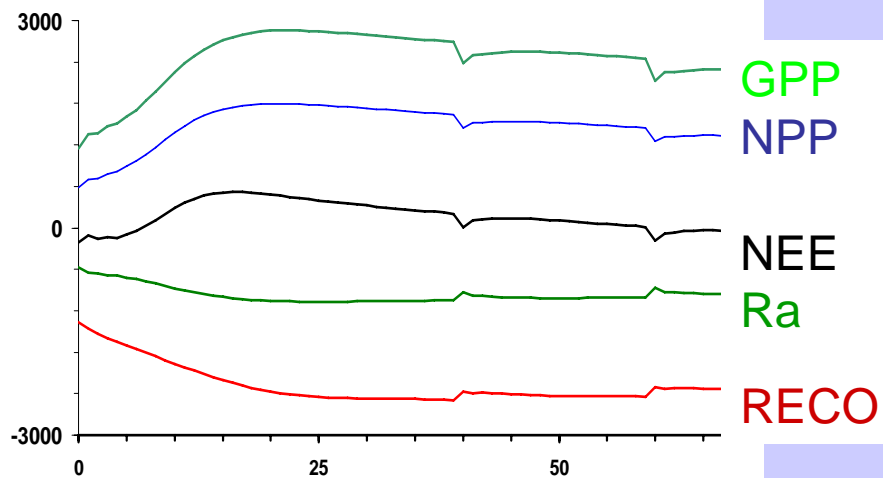
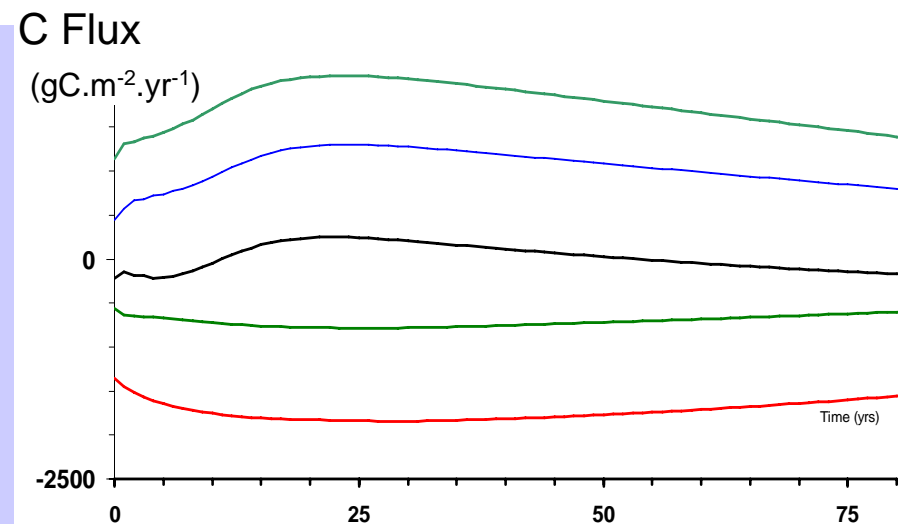
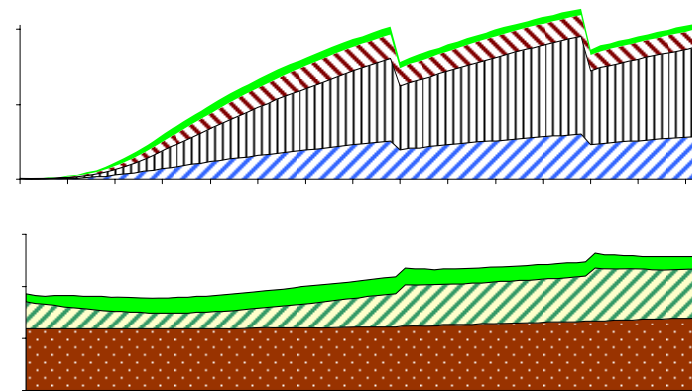
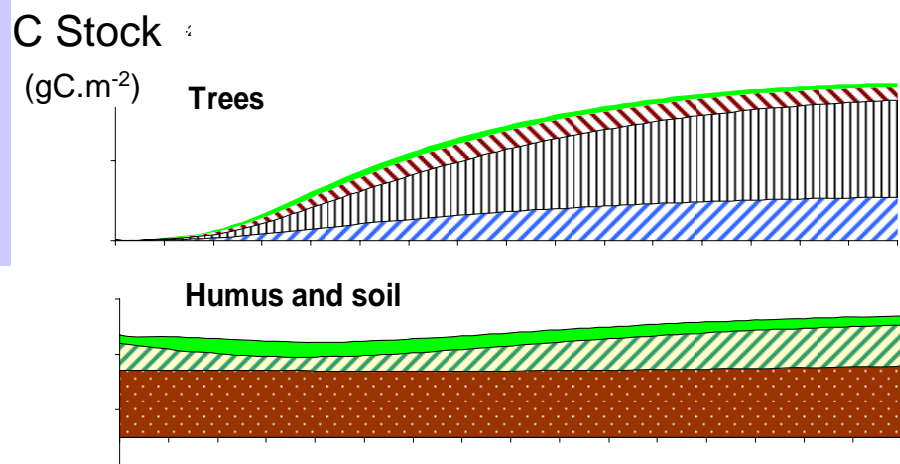
Plantation / seeding

Fertilisation, drainage

Weed control

Pest control

Whole tree harvesting



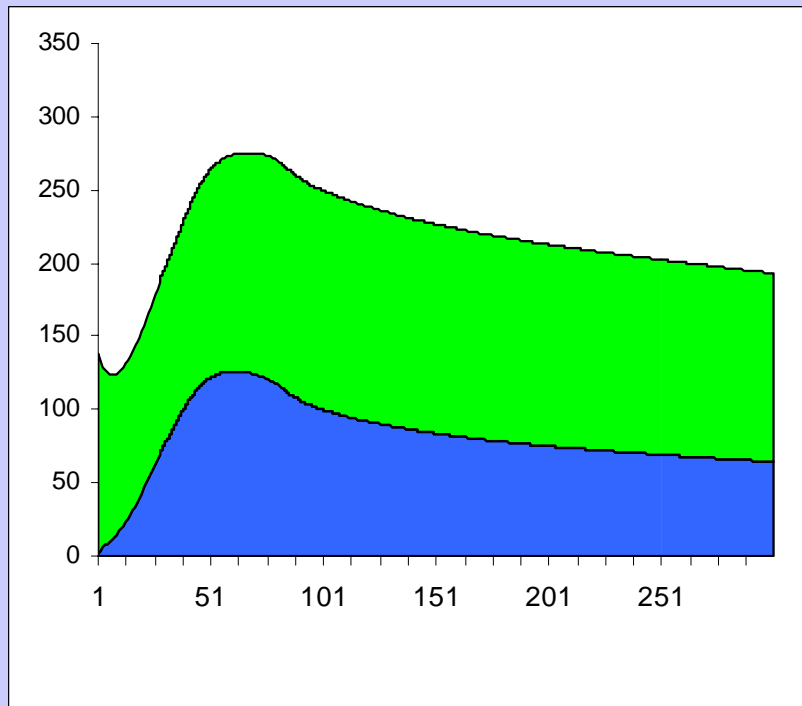
La gestion forestière :

- raccourcit a durée de révolution
- accroît la productivité (NPP, GPP)
- augmente l'indice de récolte
- diminue les stocks en place (biomasse et sol)

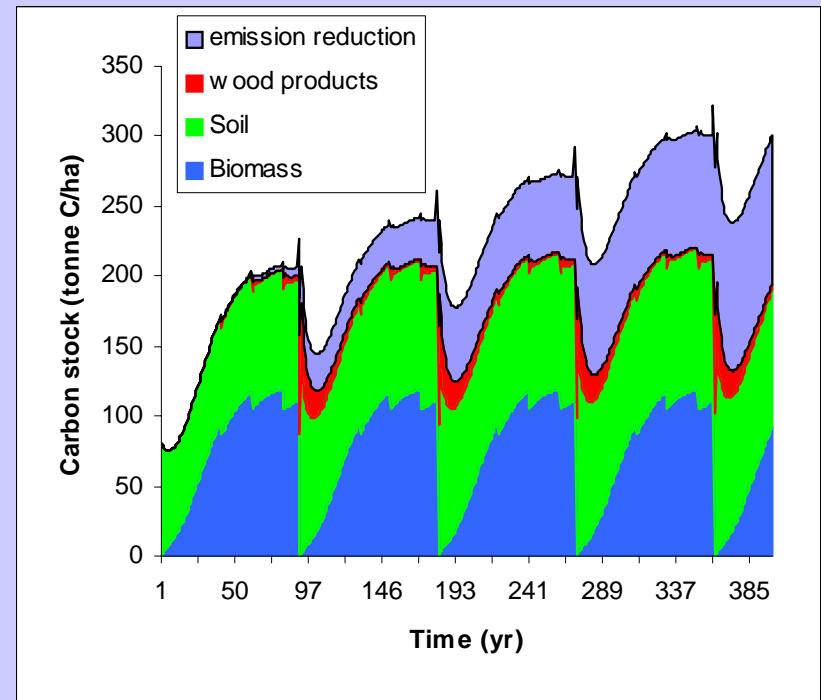
Stock en place et substitution

OPTIONS	C stock <i>in situ</i> (tC.ha ⁻¹)			Production moyenne (m ³ .ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Substitu- tion (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
	Biomasse				
	arbres	autres	sol		
UM	57.5	7.5	100	6	1.3
M	27.7	5.0	80	12	2.6
FI	14.2	0	40	18	3.9

Impact en carbone d'une forêt non exploitée et d'une forêt gérée.



Non gérée



Gérée

Index de réchauffement global vs scénario B.A.U.

	Effet stock	Substitution	Albedo	Total
20 y				
FI	0.24	-0.11	-0.01	+0.12
UM	-0.22	0.11	0.01	-0.10
50 y				
FI	0.24	-0.27	-0.01	-0.04
UM	-0.22	0.27	0.01	+0.06

- Importance de l'échelle temporelle
- Effet substitution s'accroît avec la durée
- Δ albedo a peu d'effet

Quelle quantité de carbone peut séquestrer la biosphère forestière ?

Le potentiel de la sylviculture

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).

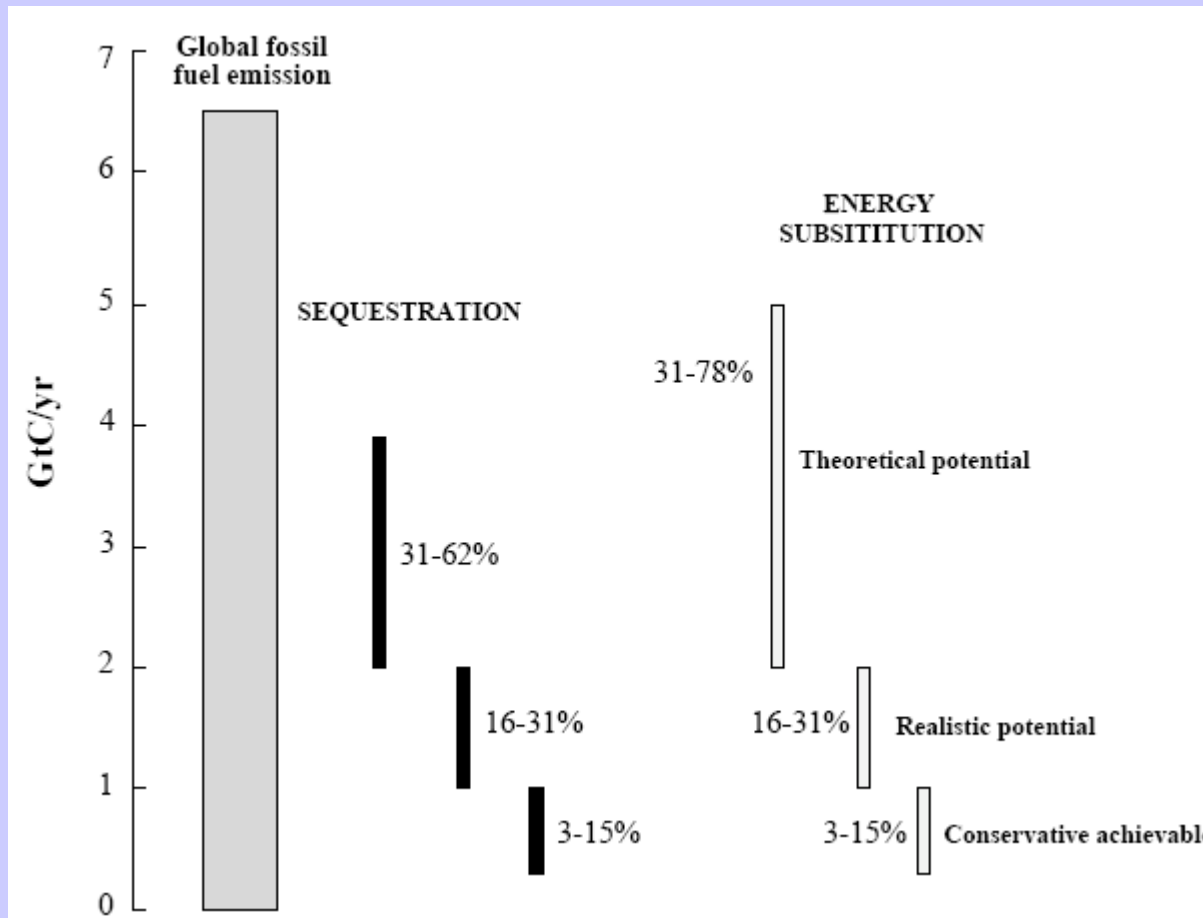
Latitudes	Pratique	Superficie (Mha)	C stocké et conservé (Pg)
Hautes	Afforestation	95,2 ¹	2,4
Moyennes	Afforestation	113	11,8
	Agroforestry	6,5	0,7
Basses	Afforestation	66,9	16,4
	Agroforestry	63,2	6,3
	Reforestation	217	11,5-28,7
	Avoided deforestation	138	10,8-20,8
	Total	700	60-87

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.

= environ 12% des émissions de carbone d'origine anthropique (base 2008)

Potentiels de “séquestration” globaux de la filière forêt



Deux voies :

- Séquestration *in situ*
- Substitution du C fossile (Cannell, 2003)

Les forêts pour atténuer l'impact du CO₂ ?

- Les forêts n'offrent qu'un tampon temporaire atténuant le pic maximal
- Mais la réponse du fonctionnement des forêts aux changements environnementaux futurs est hautement incertaine
- Le compartiment sol à faible turn over doit être privilégié
- Les produits « bois » offrent un potentiel de substitution majeur
- L'observation systématique et organisée du cycle du carbone et du fonctionnement des forêts est une priorité de recherche stratégique.
- Toute analyse d'impact climatique doit être globale

A dirt path winds through a dense forest of tall, thin trees. Sunlight filters through the canopy, creating dappled light on the path and surrounding foliage. The trees have green leaves, and the overall atmosphere is peaceful and natural.

Merci