



**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-02811681>**

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](http://www.inra.fr/ephyse).

ALIMENTATION  
AGRICULTURE  
ENVIRONNEMENT





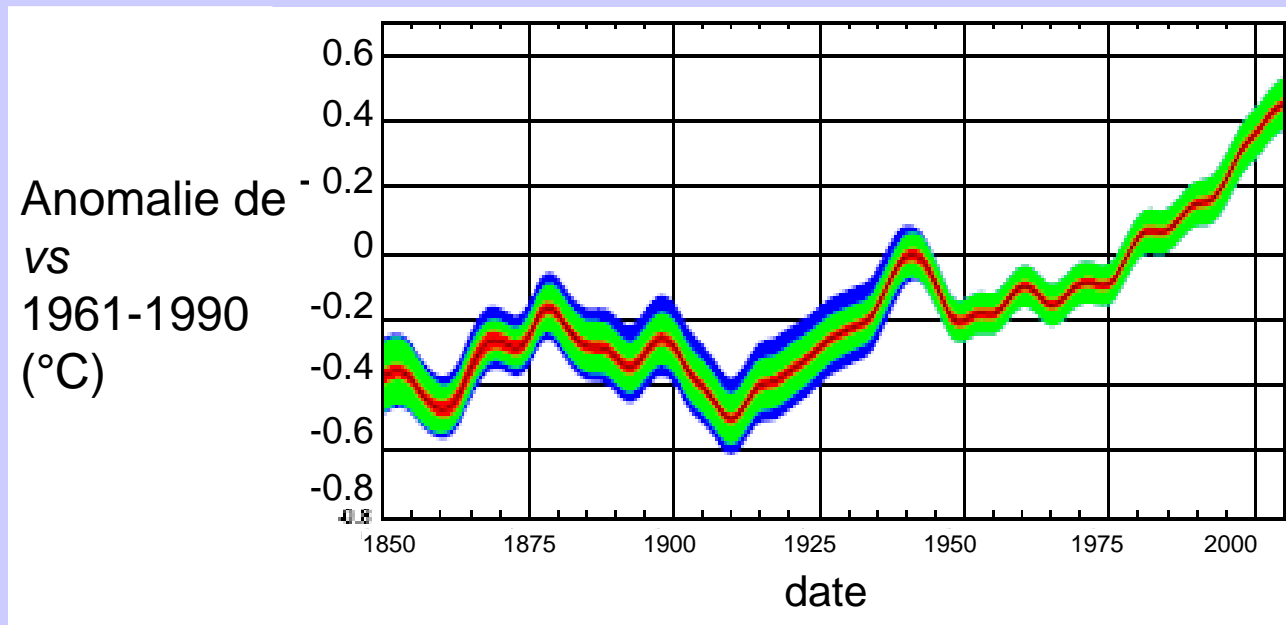
1. Survol introductif

2. Le cycle du C en forêt

3. Réflexions pour une sylviculture du carbone



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

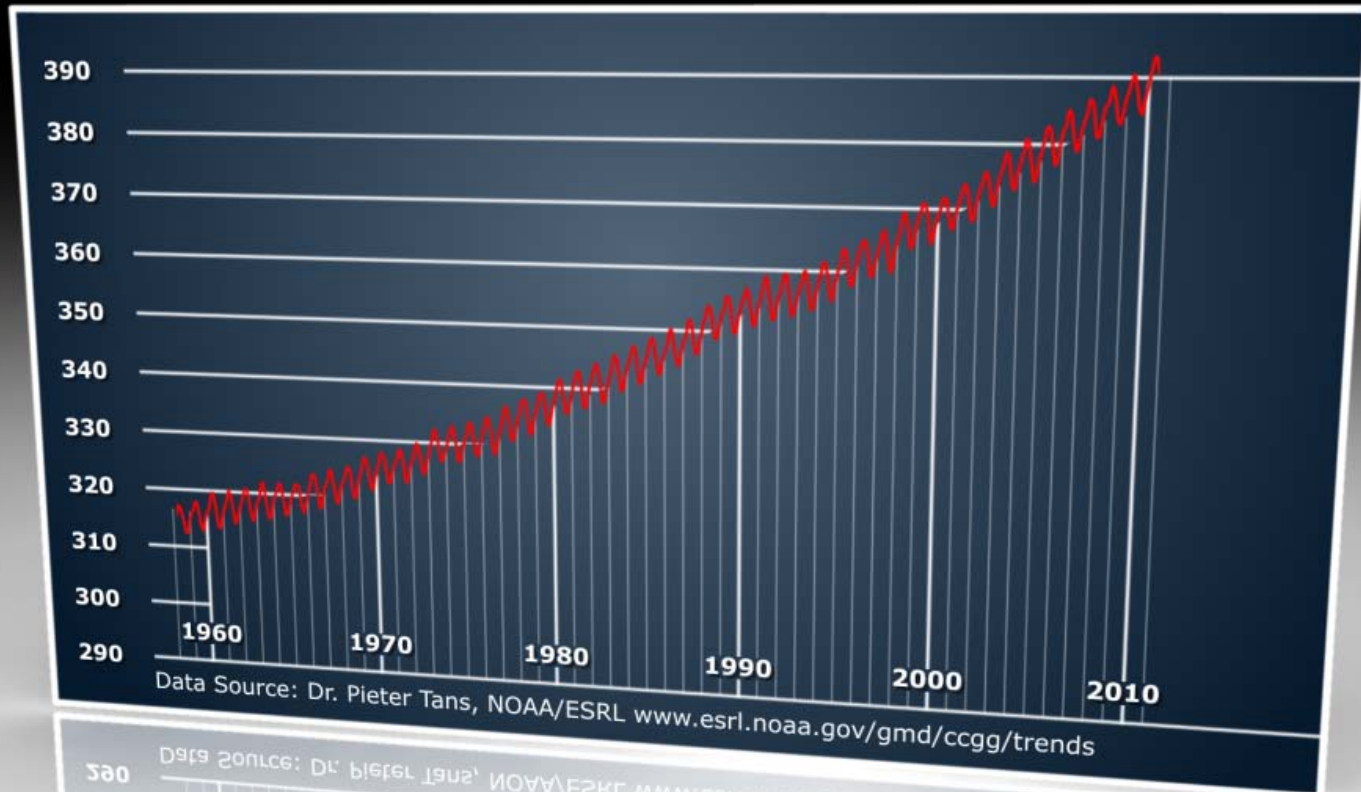


Evolution de la température moyenne terrestre relativement à 1961-90. (moyenne pondérée des données filtrées et corrigées d'un ensemble de base de 4389 stations météo )

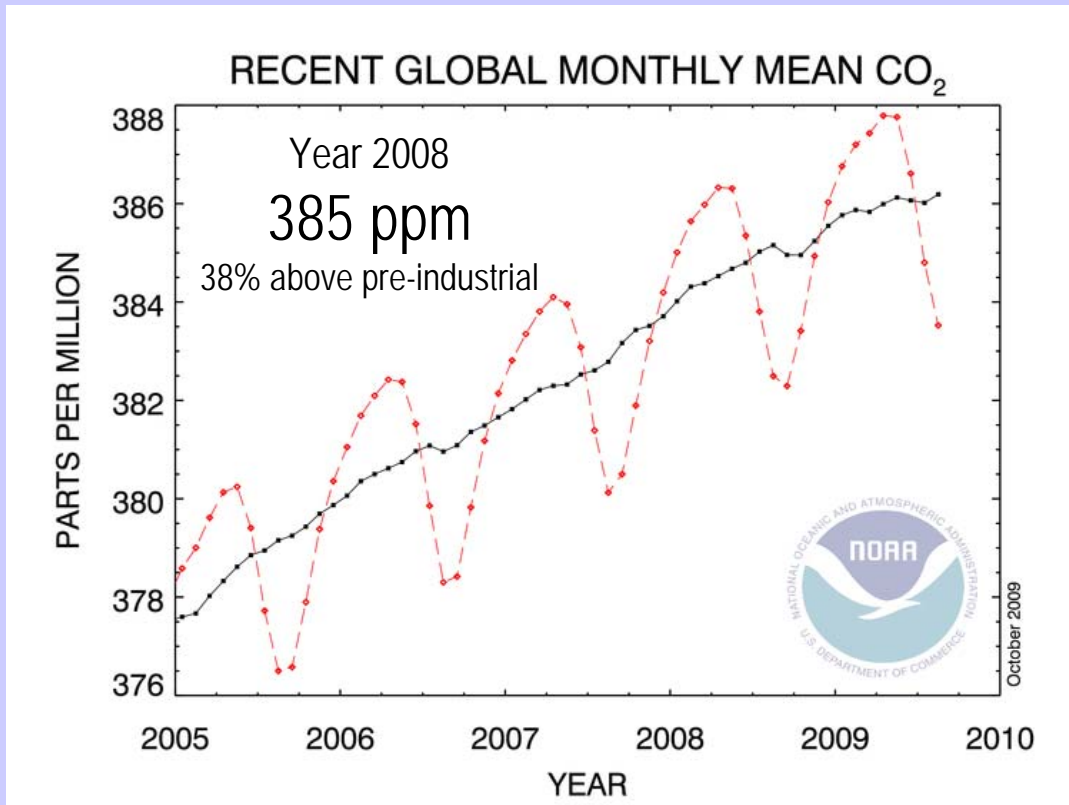


# CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis 1958

## Atmospheric CO<sub>2</sub> (ppm)



# Les 5 dernières années



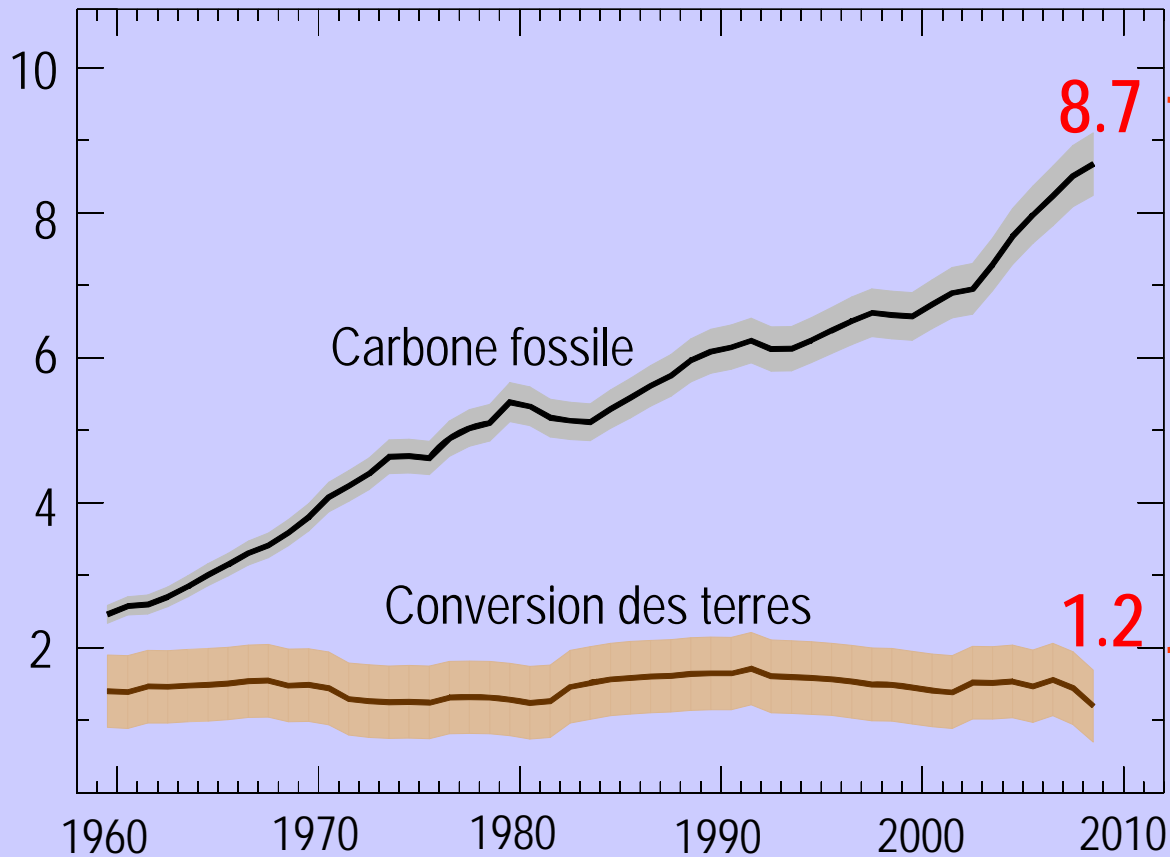
## Annual Mean Growth Rate

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<sup>-1</sup>  
1970 – 1979: 1.3 ppm a<sup>-1</sup>  
1980 – 1989: 1.6 ppm a<sup>-1</sup>  
1990 – 1999: 1.5 ppm a<sup>-1</sup>  
2000 - 2008: 1.9 ppm a<sup>-1</sup>

# Emissions d'origine humaine, données 2008

Émissions de CO<sub>2</sub> (GtC a<sup>-1</sup>)



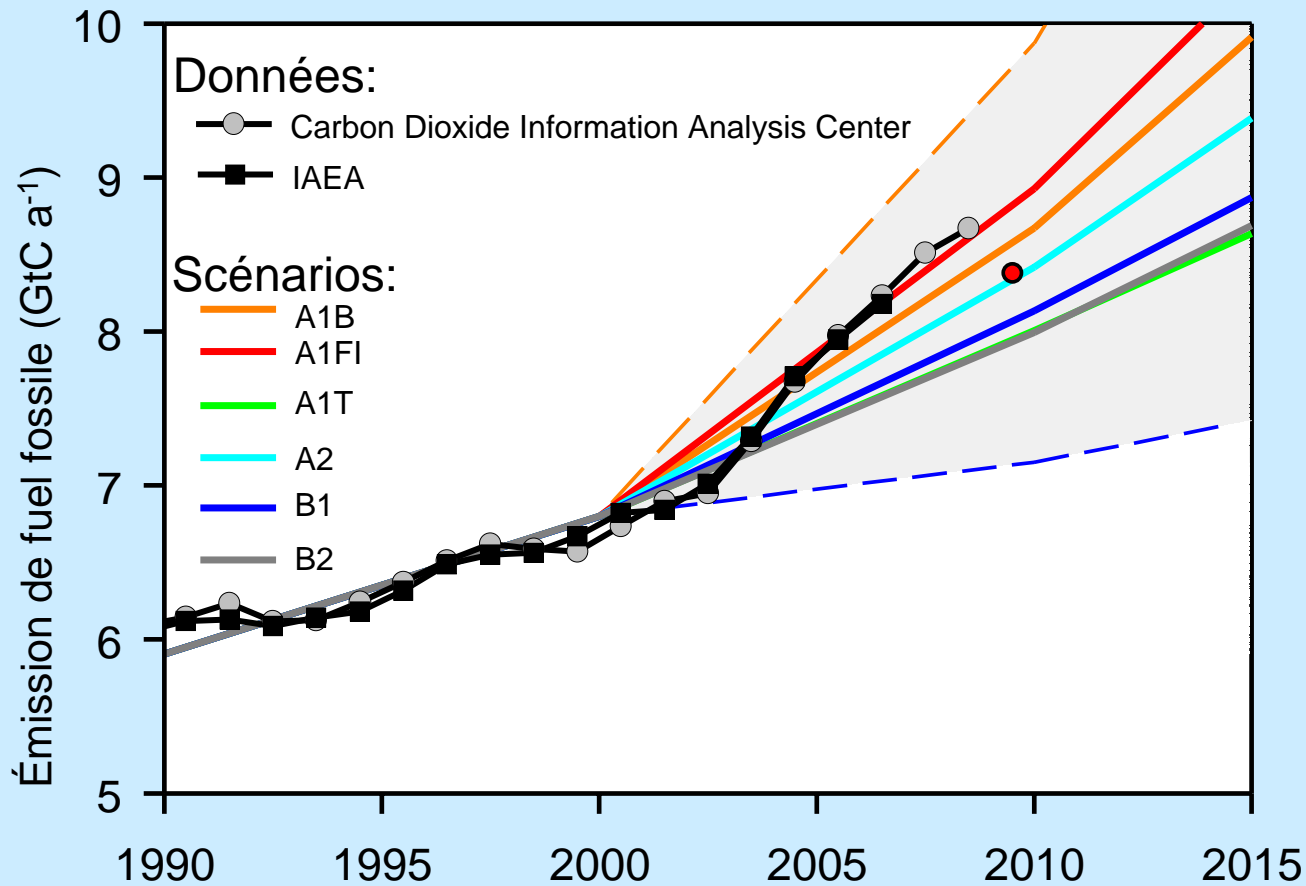
9.9 GtC



1.2

1 Gt = 10<sup>9</sup> 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 CO<sub>2</sub> anthropogenic emissions (2000-2008)

7.7 GtC y<sup>-1</sup>



1.4 GtC y<sup>-1</sup> +



4.1 GtC y<sup>-1</sup>

45%



continental biosphere

3.0 GtC y<sup>-1</sup>

29%

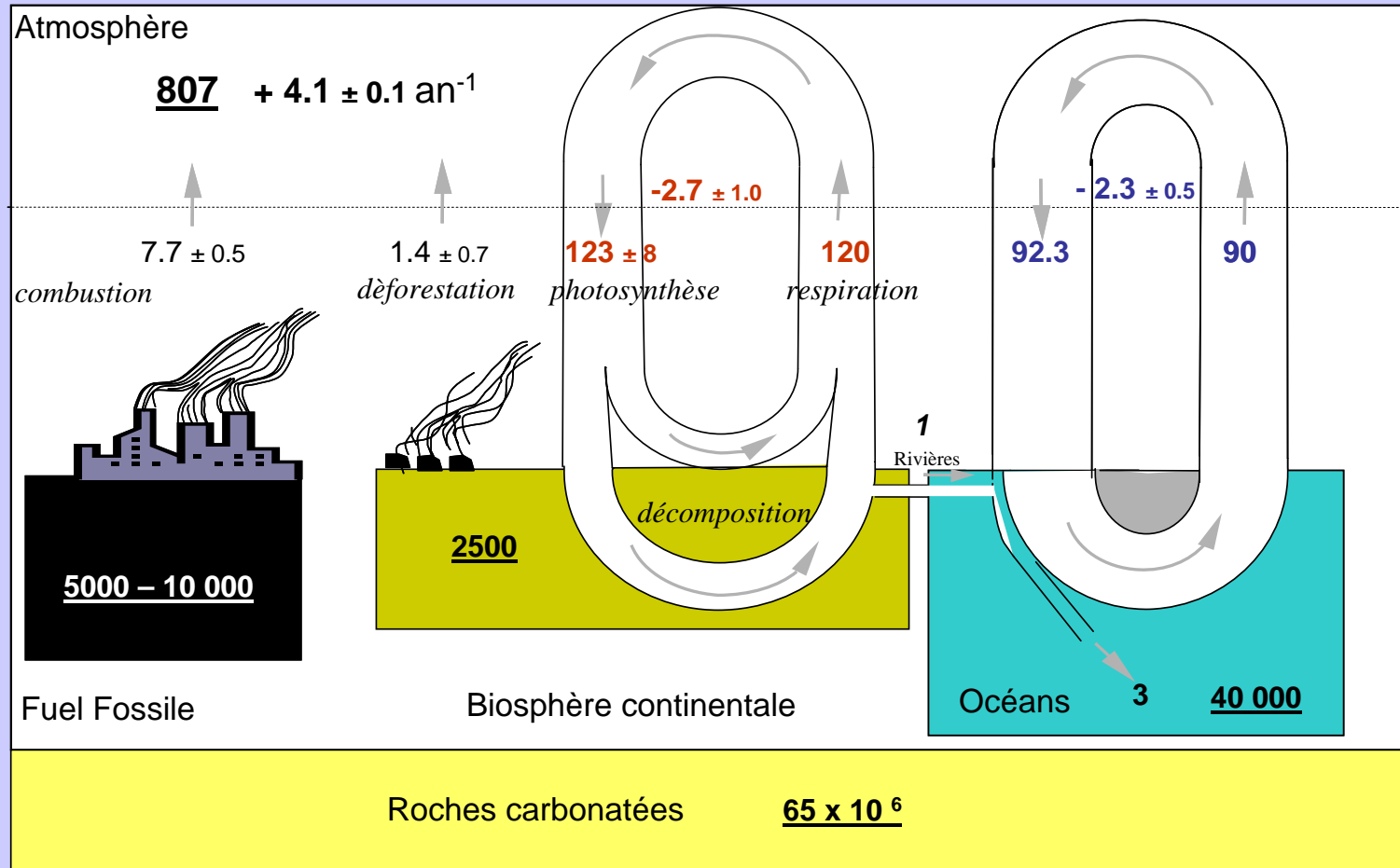


26%

2.3 GtC y<sup>-1</sup>



# Cycle global du carbone 2000-2008



(stocks en GtC, flux en GtC.an<sup>-1</sup>)

(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 ( $0.25 \text{ an}^{-1}$ )
- 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 <sup>-1</sup>
Asie	0.6	Gt C a <sup>-1</sup>
Afrique	0.3	Gt C a <sup>-1</sup>
	1.5	Gt C a <sup>-1</sup>

## 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

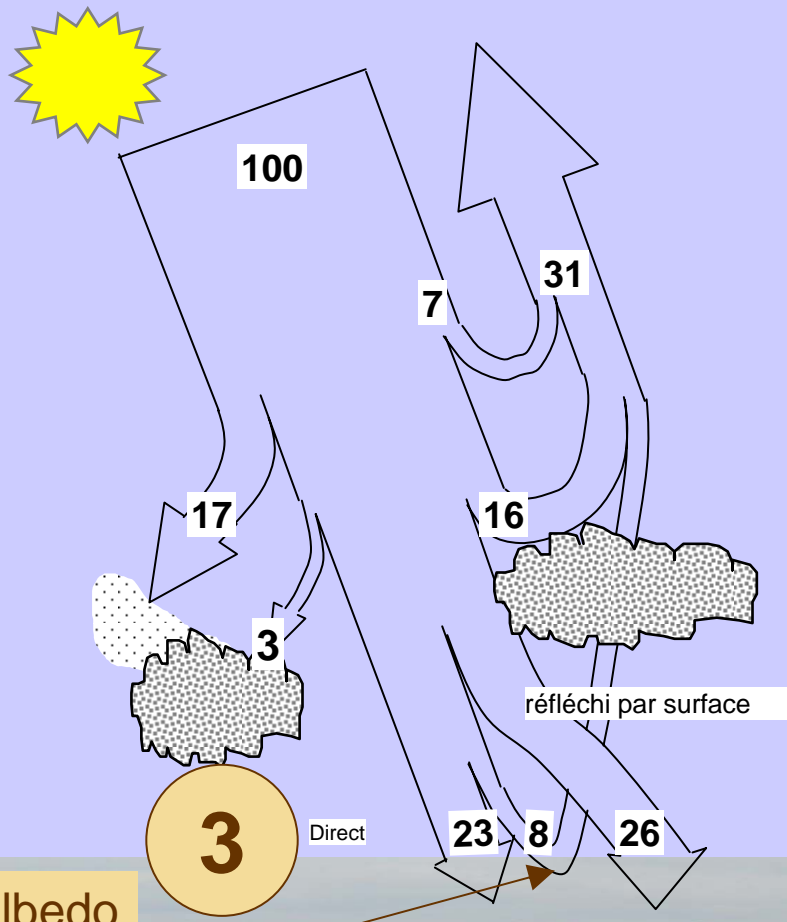
- Écosystèmes composés d'espèces pérennes de grande taille
- Terme final des successions végétales terrestres, forte biodiversité
- Fonctionnement:
  - Biophysique: albedo faible, rugosité élevée...
  - Biogéochimie:
    - flux et stocks importants (carbone, azote,...)
    - régulations biologiques



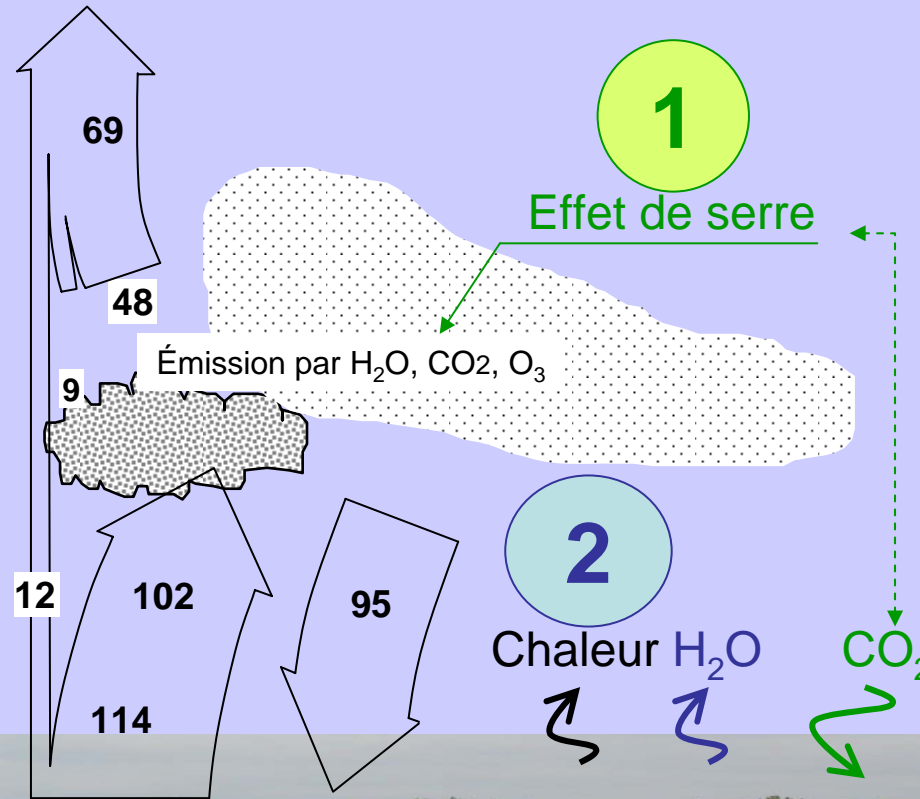


# Action des forêts sur le climat :

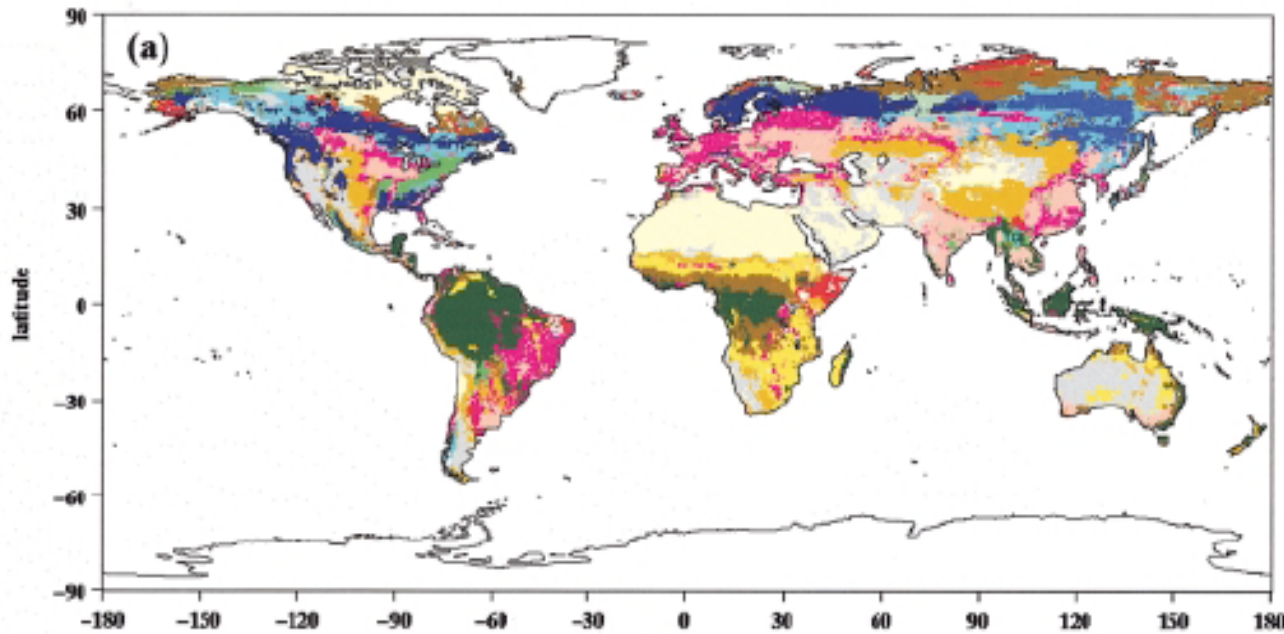
## Rayonnement solaire



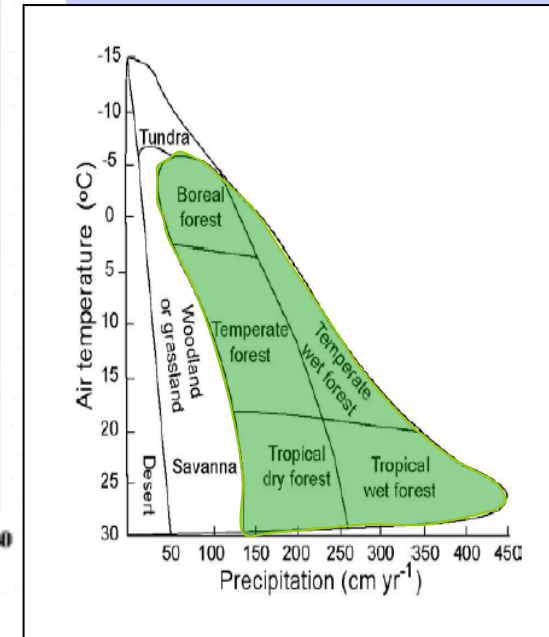
## Rayonnement terrestre



# Les forêts dans le monde



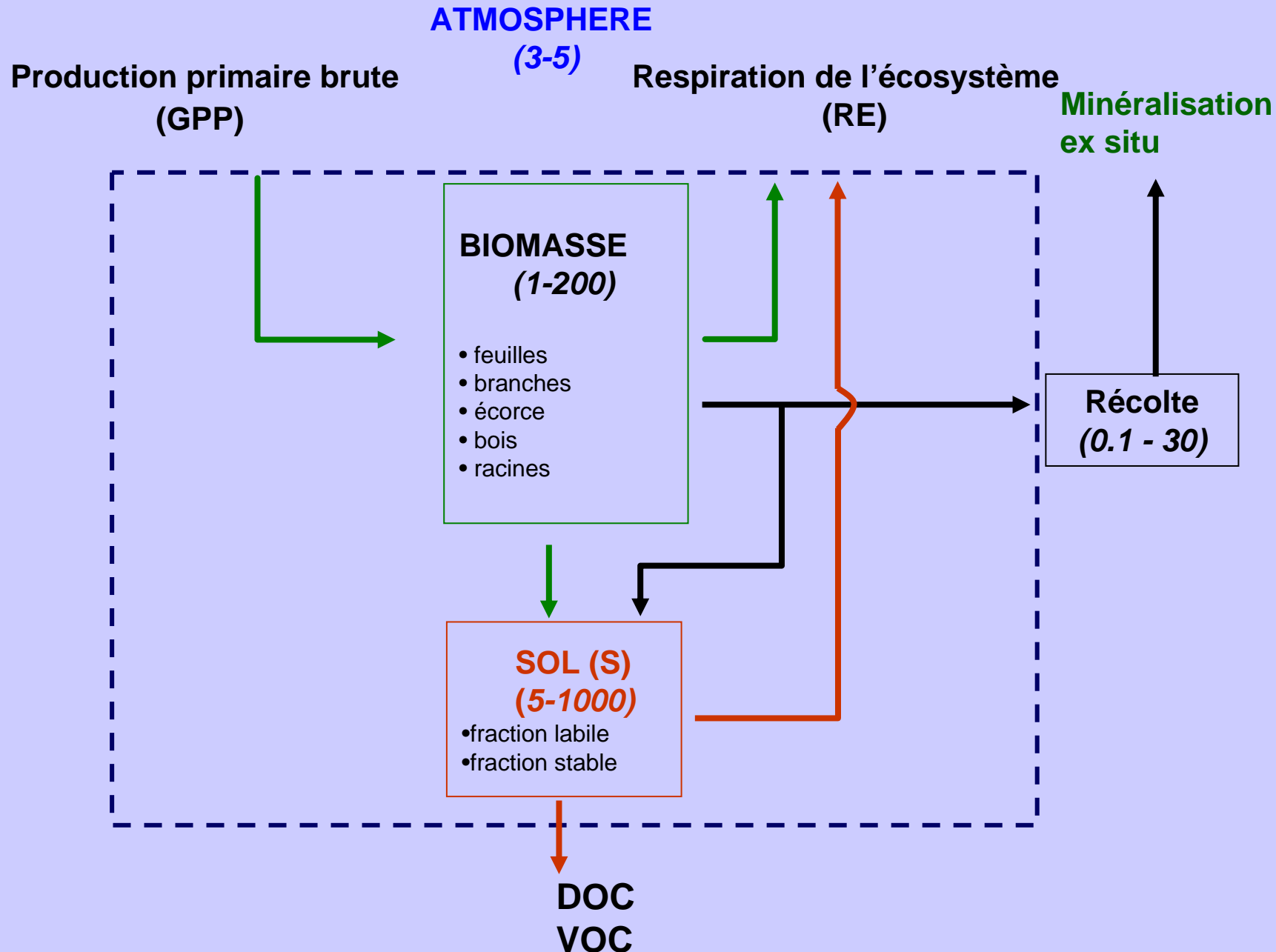
- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 1 Evergreen Needleleaf Forest          | 9 Savanna                             |
| 2 Evergreen Broadleaf Forest           | 10 Grassland                          |
| 3 Deciduous Needleleaf Forest/Woodland | 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)

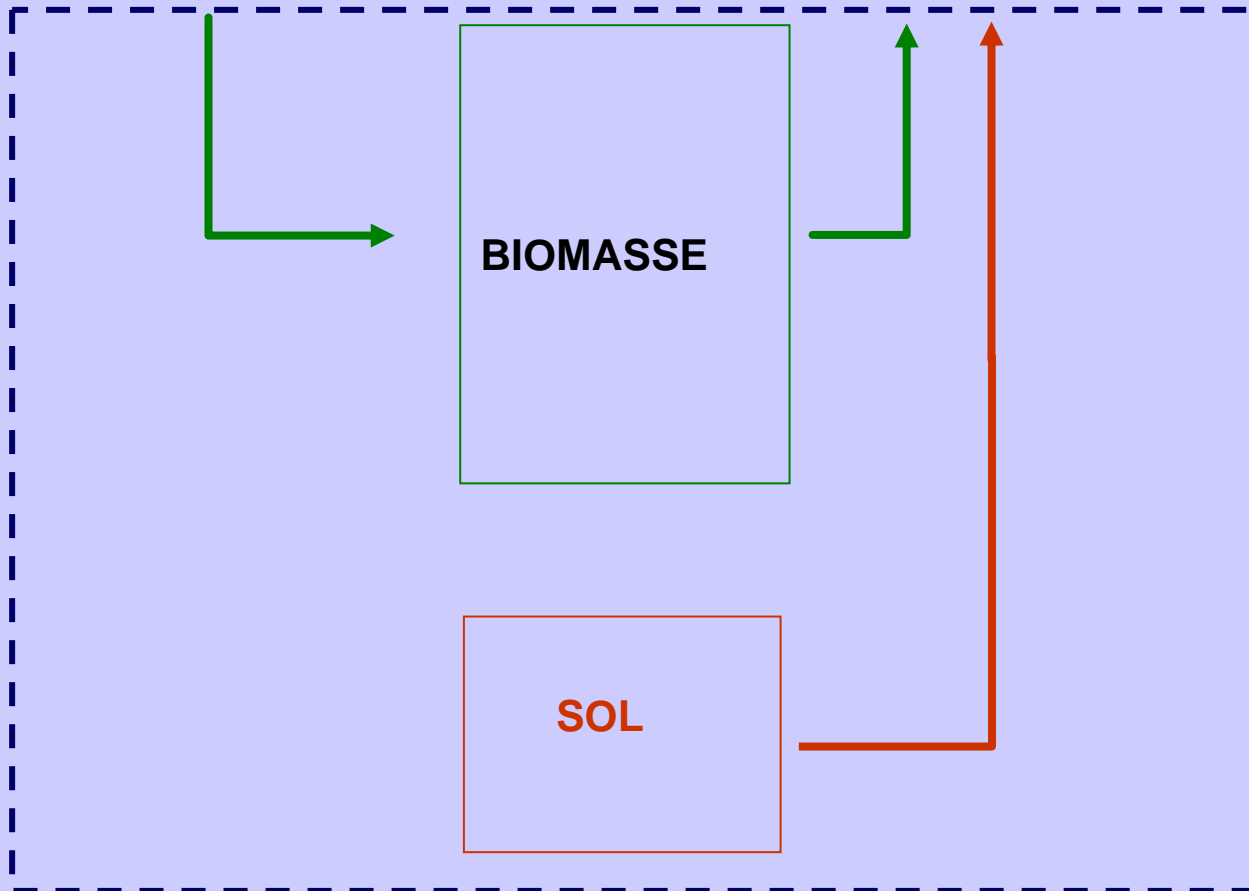


# Cycle du carbone dans un écosystème forestier: principaux flux et temps moyen de résidence (années)

Echanges nets ( $\text{CO}_2$ ) de l'écosystème ( $\text{NEE} = \text{GPP} + \text{RE}$ )

Production primaire brute  
(GPP)

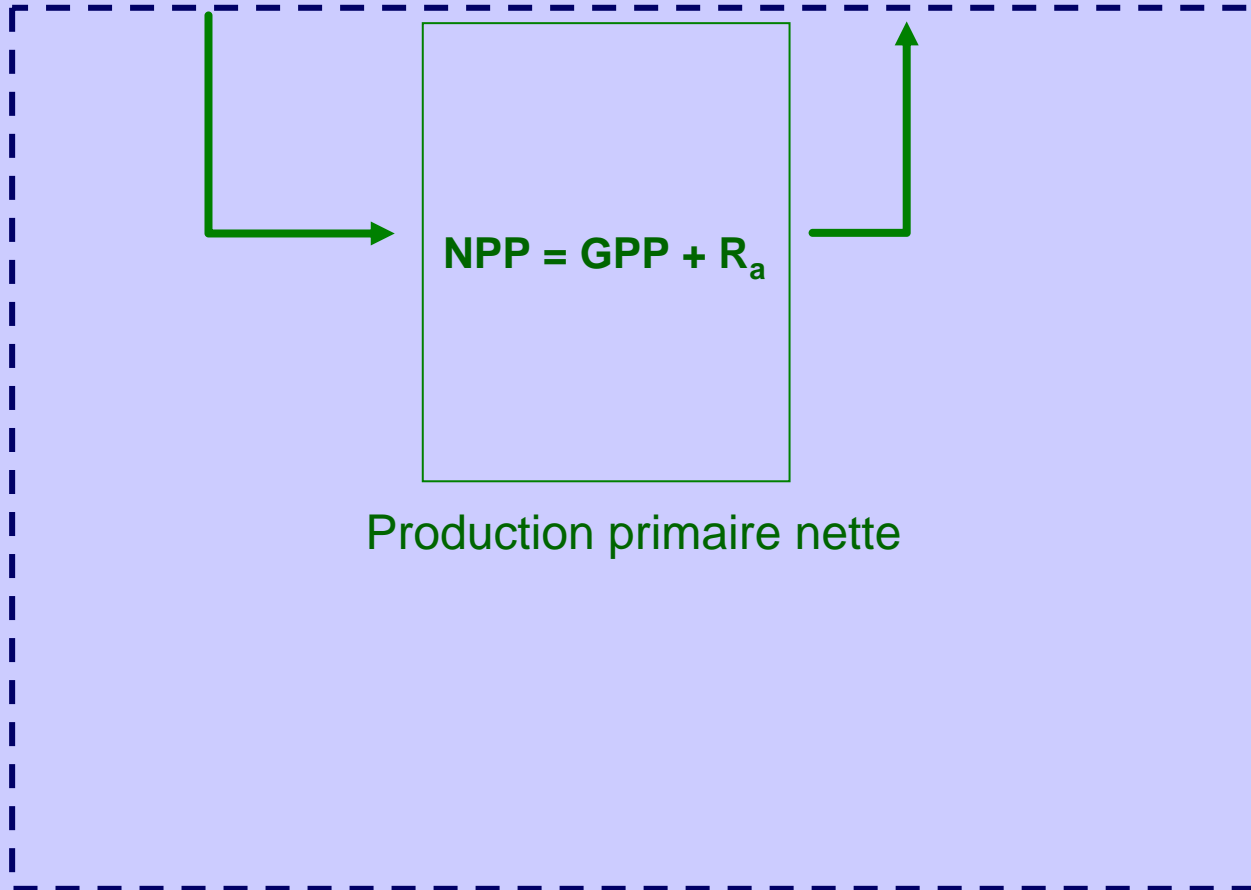
Respiration de l'écosystème  
(RE)



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

Production primaire brute  
(GPP)

Respiration de l'écosystème  
(RE)

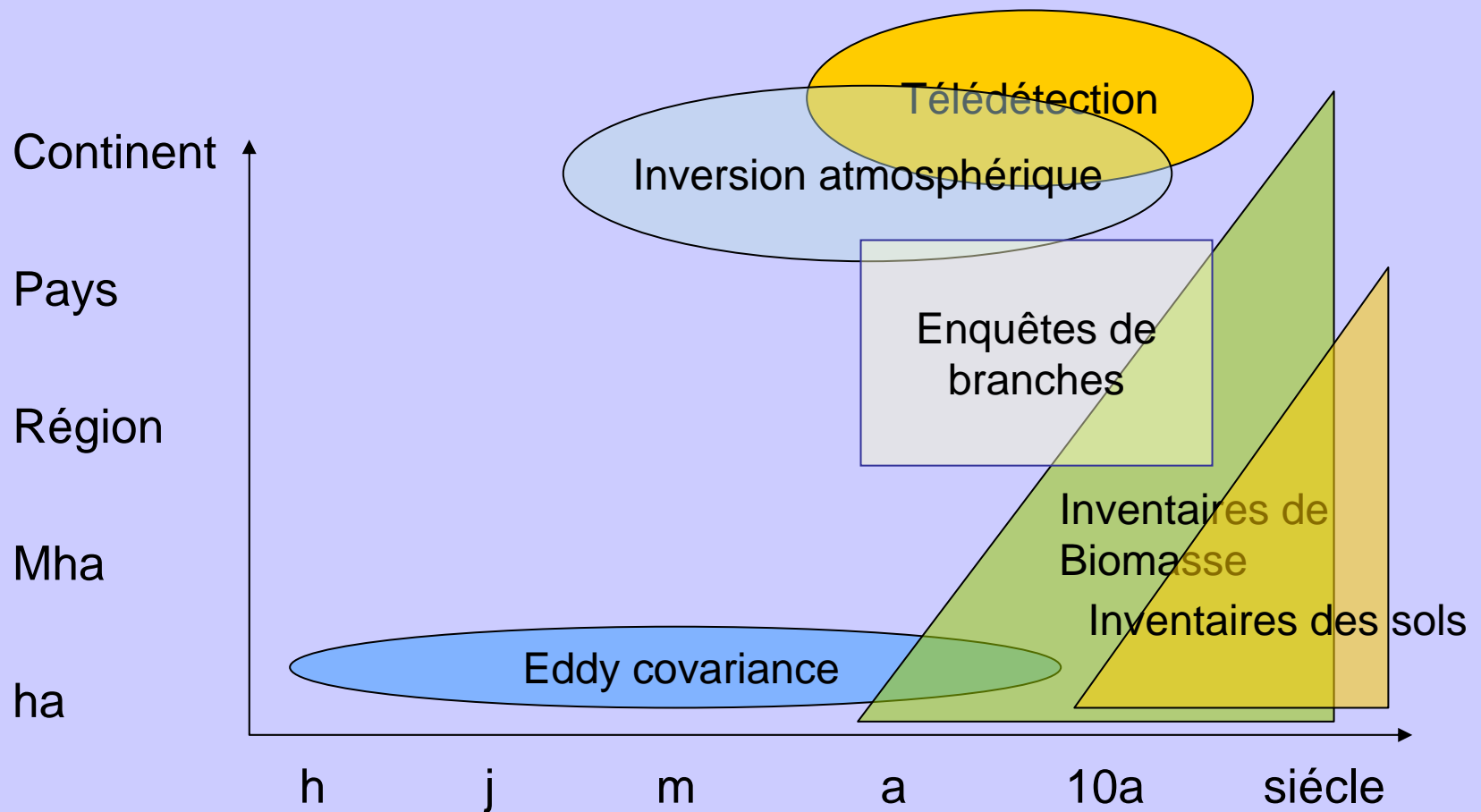


$$NPP = GPP - R_a$$

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 ?

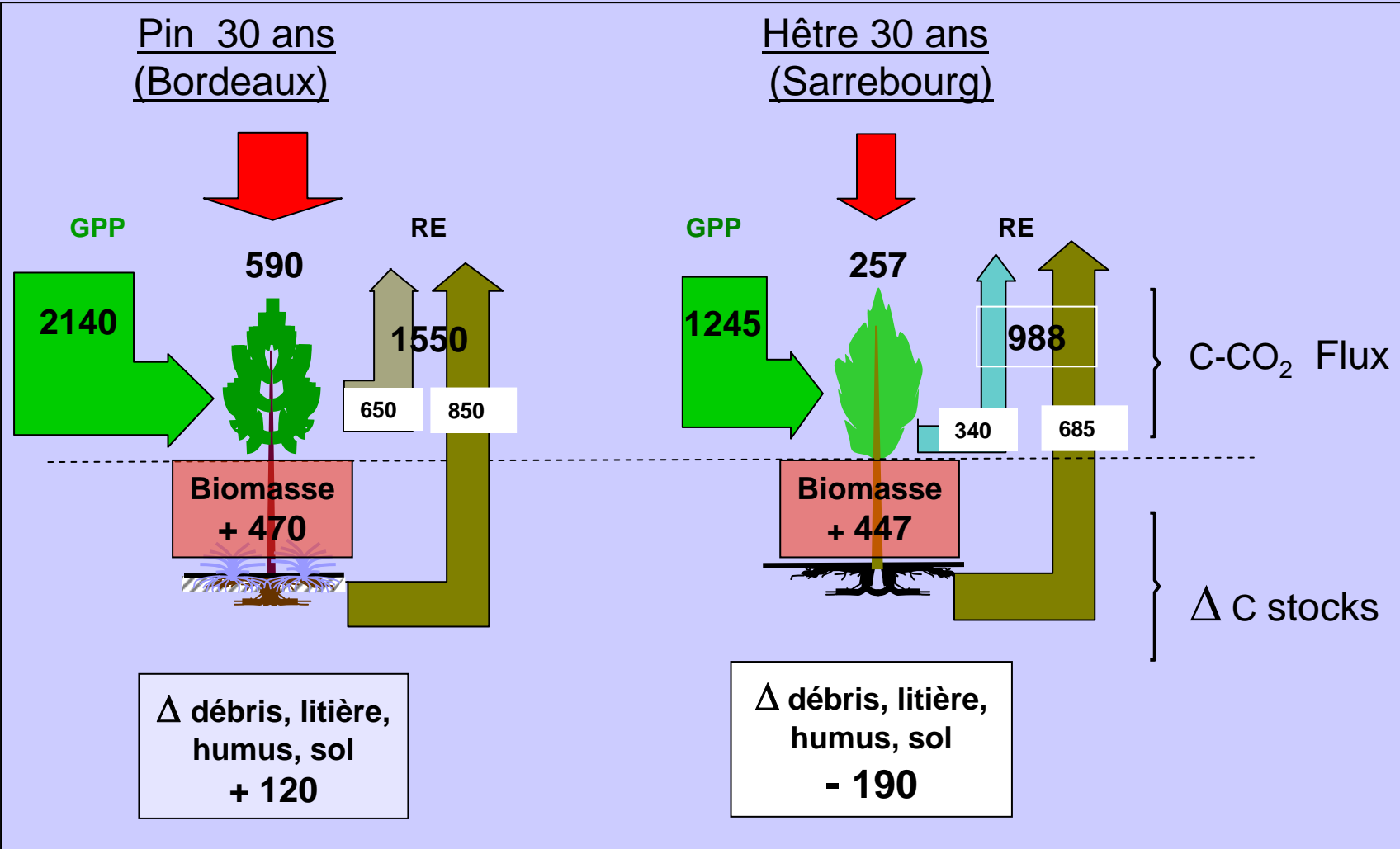


B. souterraine  
e=50%



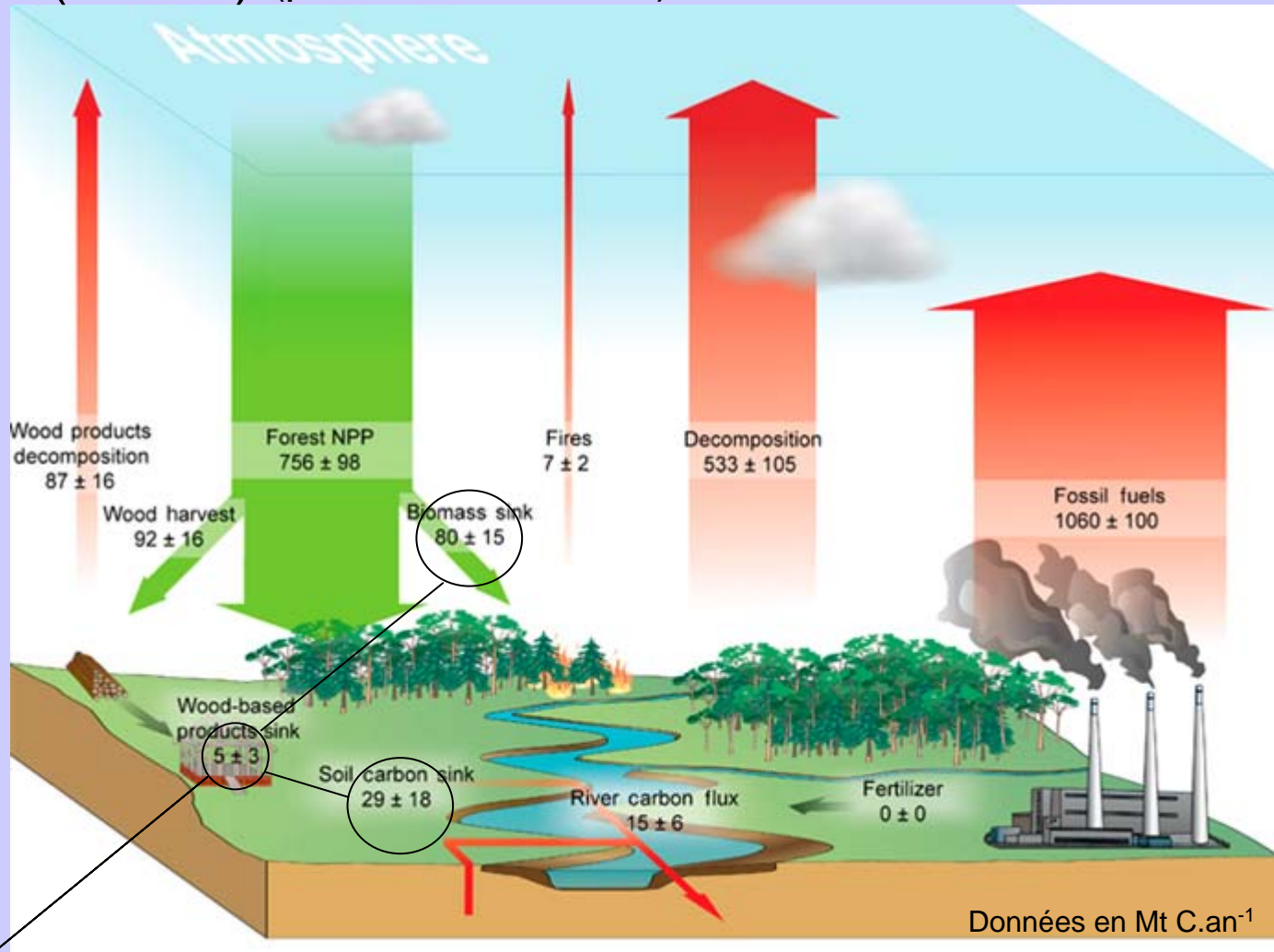
Neglected:  
C loss as DOC, DIC, VOC

# Résultat type: bilan de carbone de forêts de conifères (Pin maritime) et feuillus (Hêtre) (gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>)



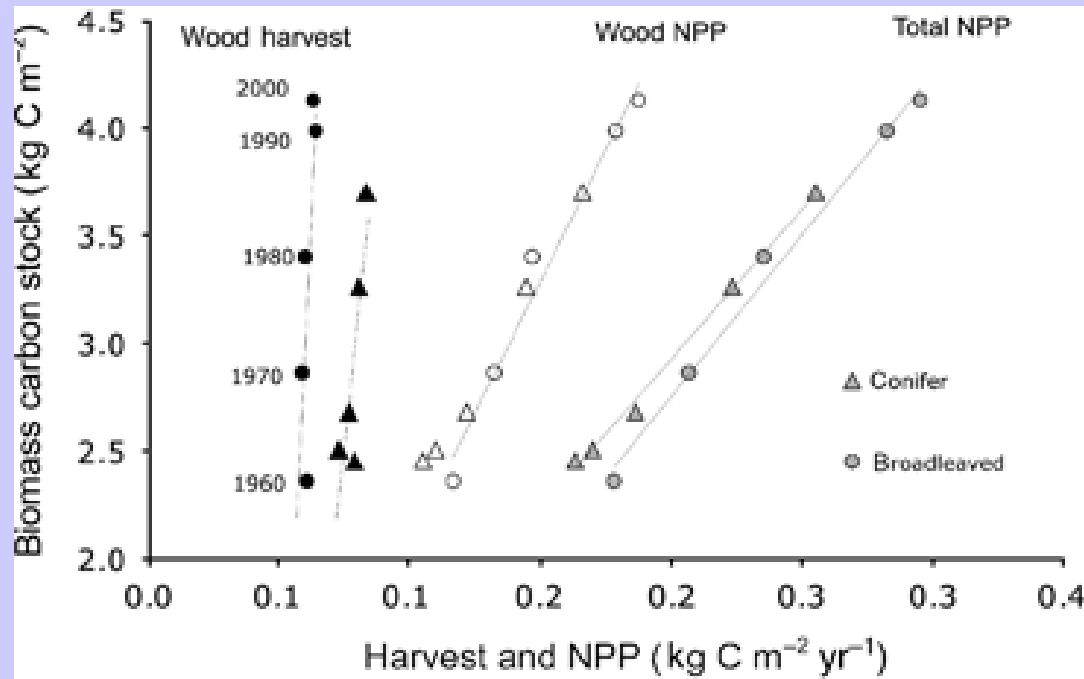
Granier et al 2000, *Funct. Ecol.*, Berbigier et al. 2001, *Agric For Met.*, Loustau et al. AGU 2008, Stella et al. *Biogeosciences*, 2010

# 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
$R_e/\text{GPP}$	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
$R_e/\text{GPP}$	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  $R_e/\text{GPP}$  ratio was calculated for each bootstrap before and after balance closure.

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

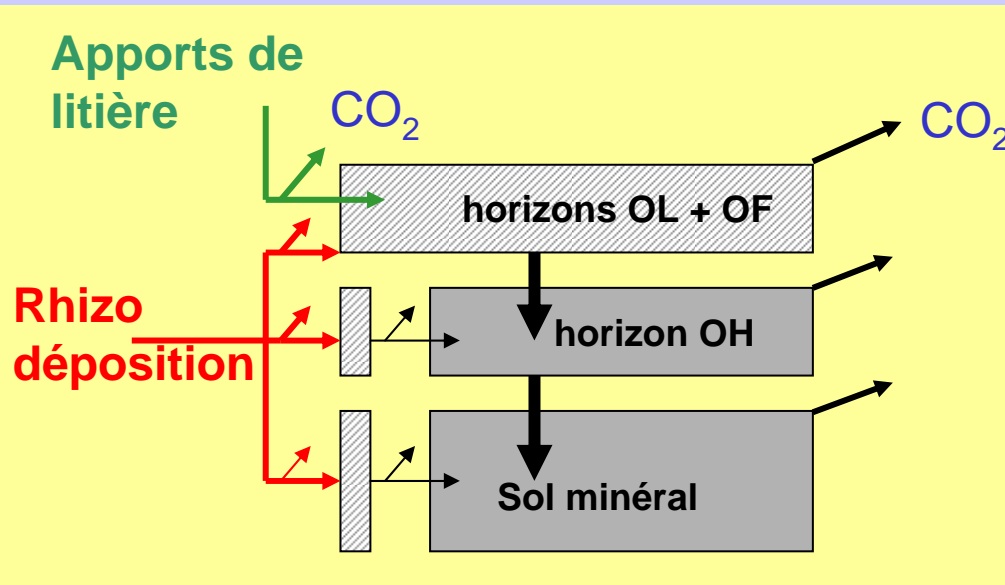
Valeurs annuelles de production primaire brute (GPP) agrégées par biome.

<b>Biome</b>	<b>GPP</b> (Gt C an <sup>-1</sup> )	<b>NPP</b> (Gt C an <sup>-1</sup> )	<b>Stocks de C biomasse</b> (Gt C)	<b>Stocks de C Sol</b> (Gt C)
Tropical forests	41	22	340	214
Temperate forests	10	8	139	153
Boreal forests	8	3	57	338
<b>Total of Forests</b>	<b>59</b>	<b>33</b>	<b>535</b>	<b>705</b>
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
<b>Total</b>	<b>122</b>	<b>63</b>	<b>653</b>	<b>1484</b>

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 $^{14}\text{C}$ appliquée au carbone du sol




### Modèle


- 3 compartiments
- décomposition du 1<sup>er</sup> ordre

 M.O. particulaire, débris

 M.O. fine, colloïdale

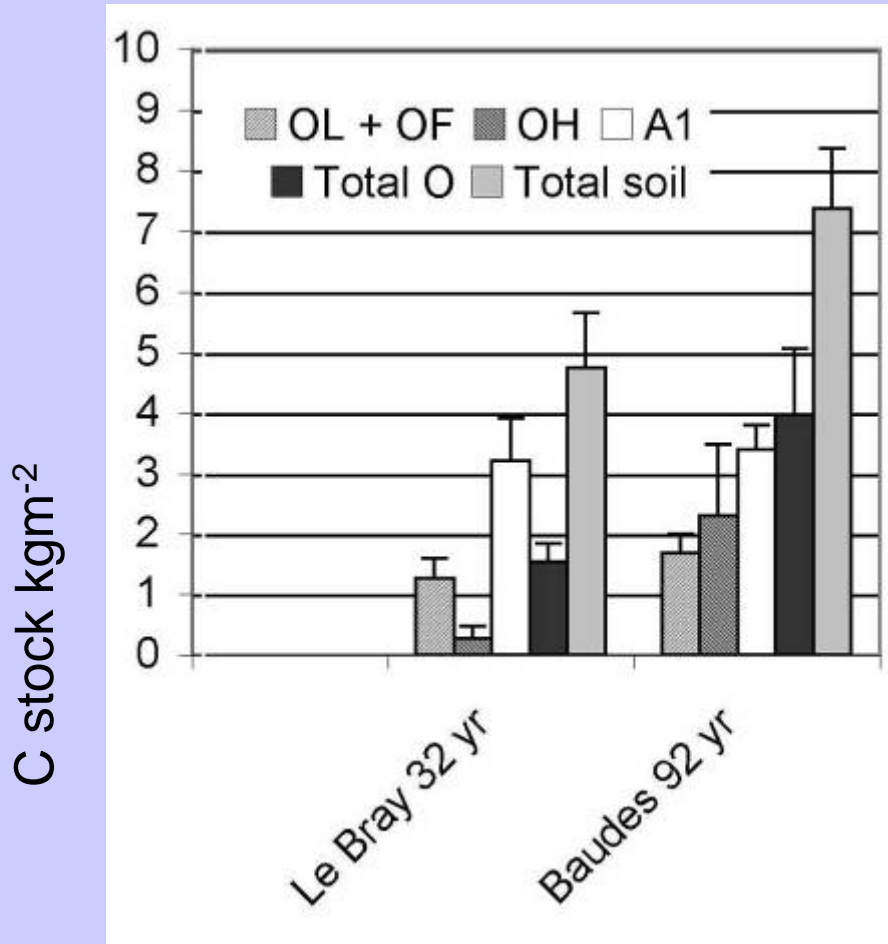
 : minéralisation rapide ( $\leq 1$  an)

 : minéralisation lente

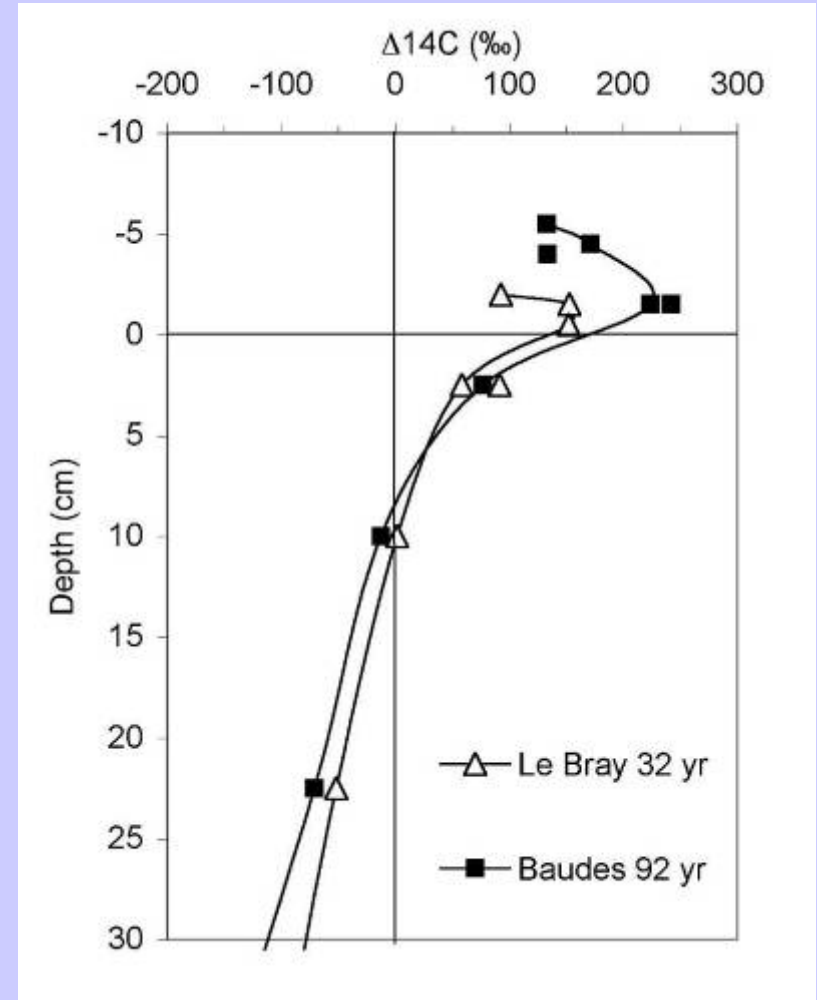
 : humification

# Datation et turn over du carbone

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



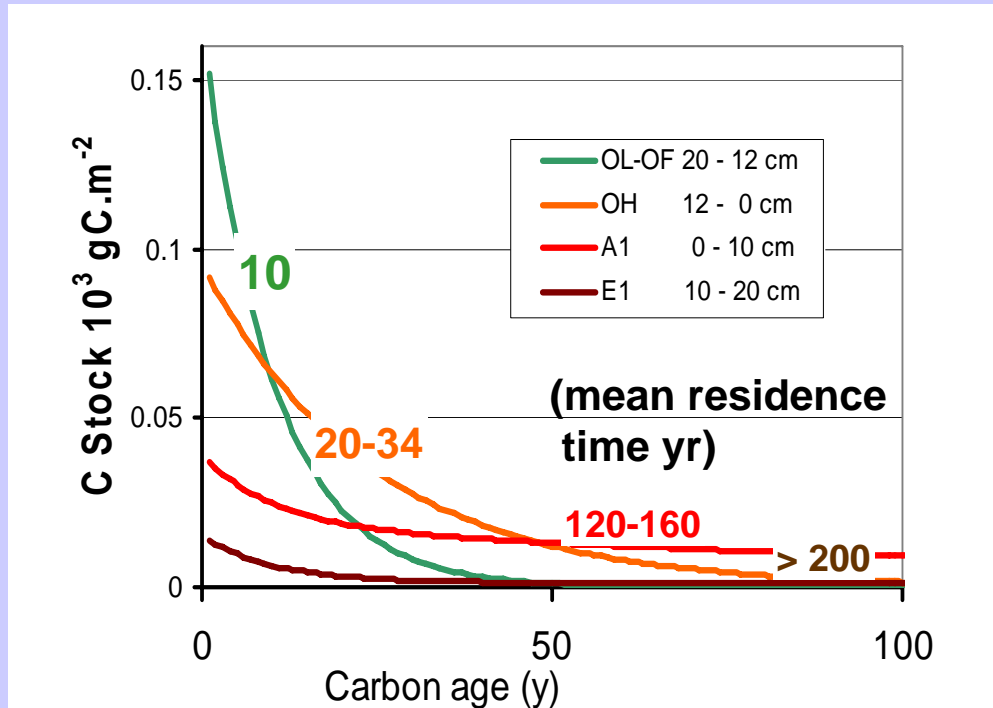
Profil de carbone organique de peuplements de Pin maritime



Profils d'activité  $^{14}\text{C}$

# Datation et turn over du carbone

## 1. Méthode de datation $^{14}\text{C}$ 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)



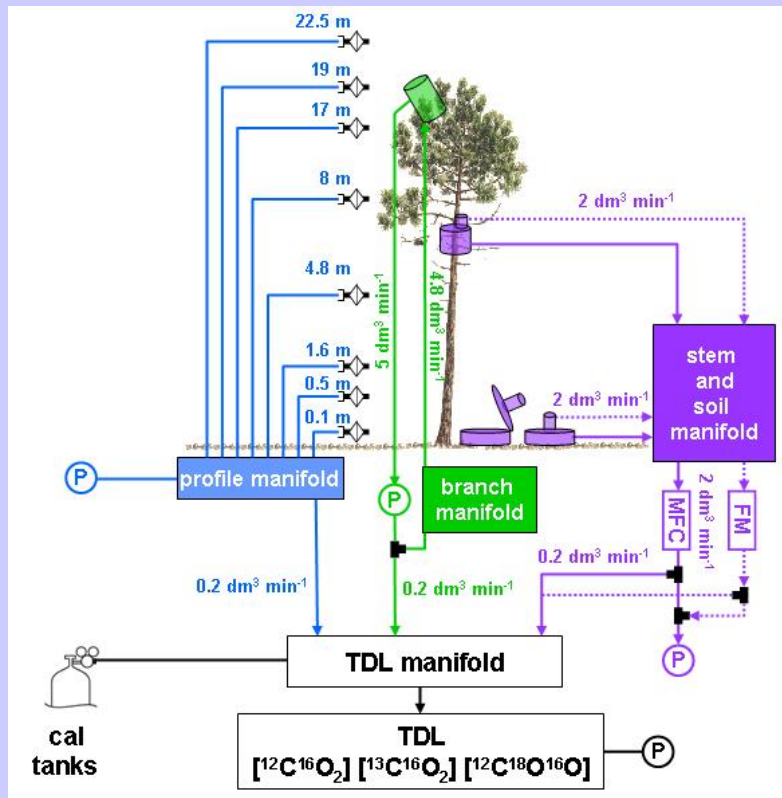
### Instrumentation

- Micrométéorologie
- Hydrologie
- Inventaires écologiques
- Flux de sève brute des arbres
- Flux de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ , 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

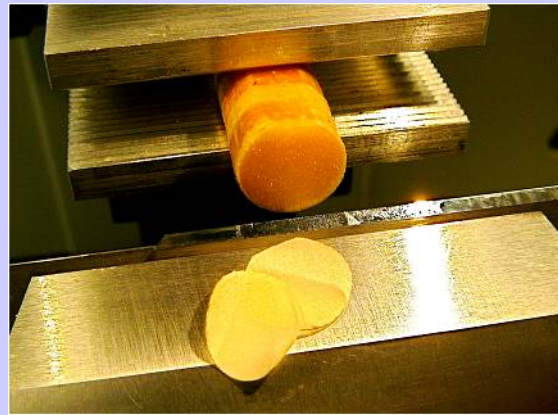


# Datation et turn over du carbone

## 2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

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

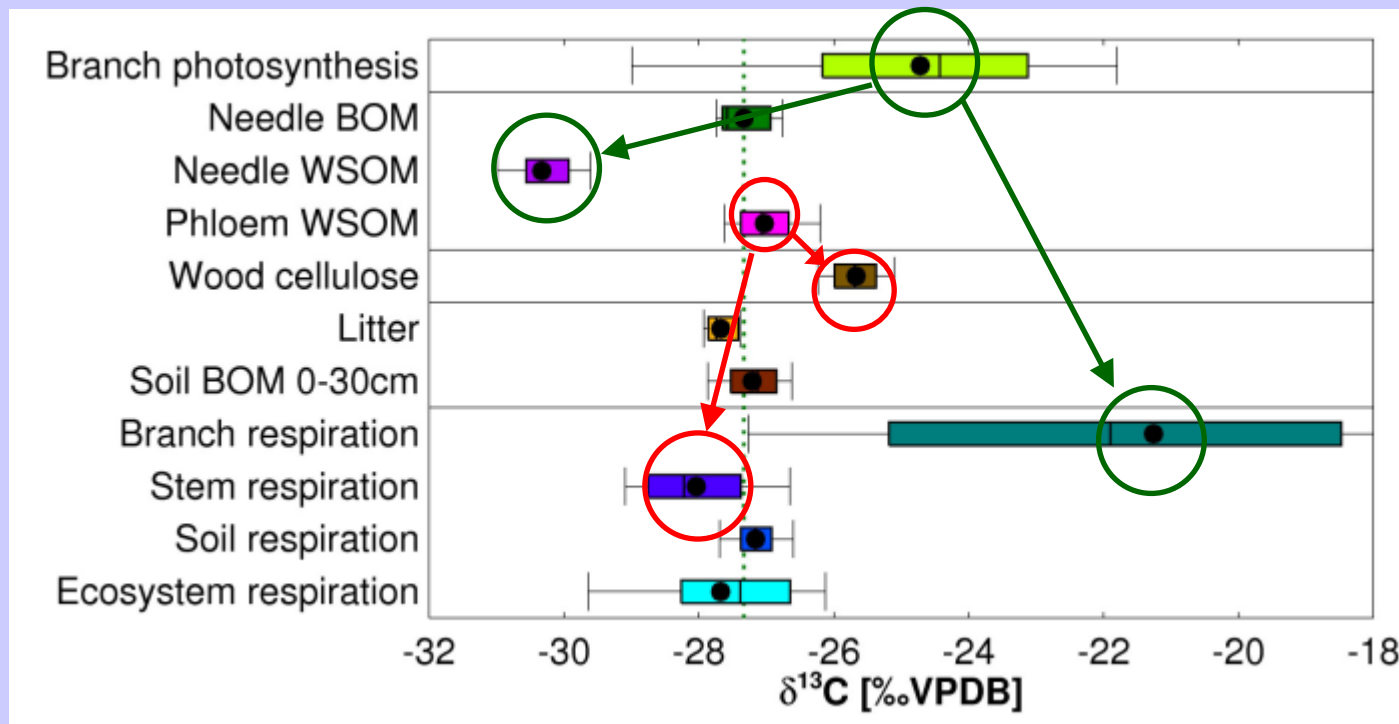
La haute résolution permet une description fine des variations inter- et intra-annuelles du  $\delta^{13}\text{C}$  de la cellulose





# Datation et turn over du carbone

## 2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

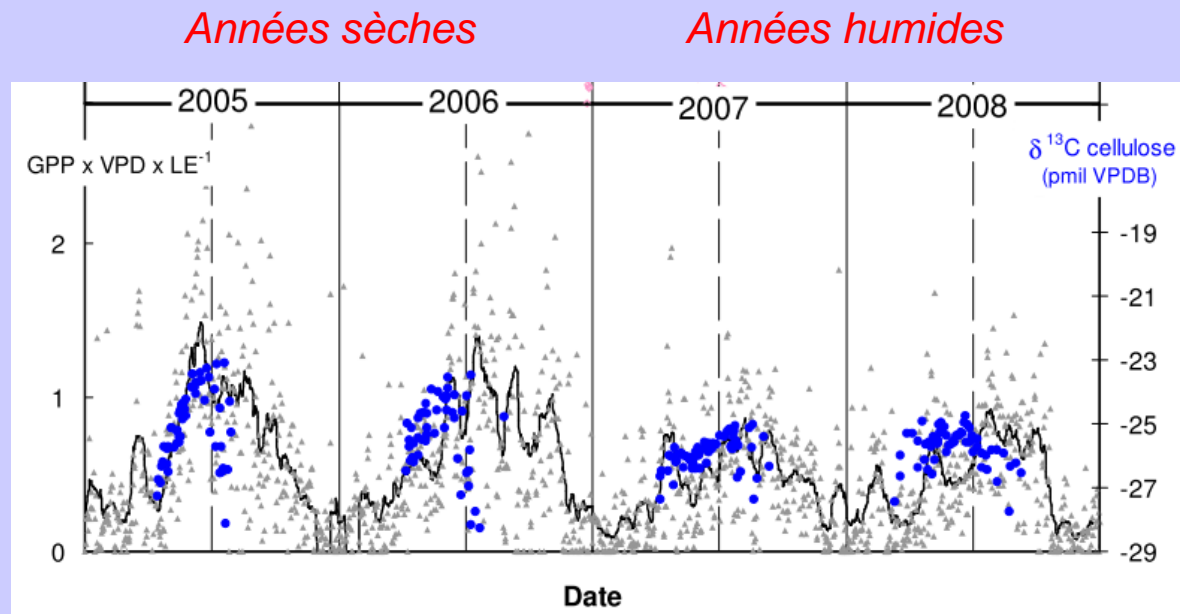


**Trace isotopique des processus de transfert de carbone de l'échelle du tronc à l'échelle de l'écosystème**

# Datation et turn over du carbone

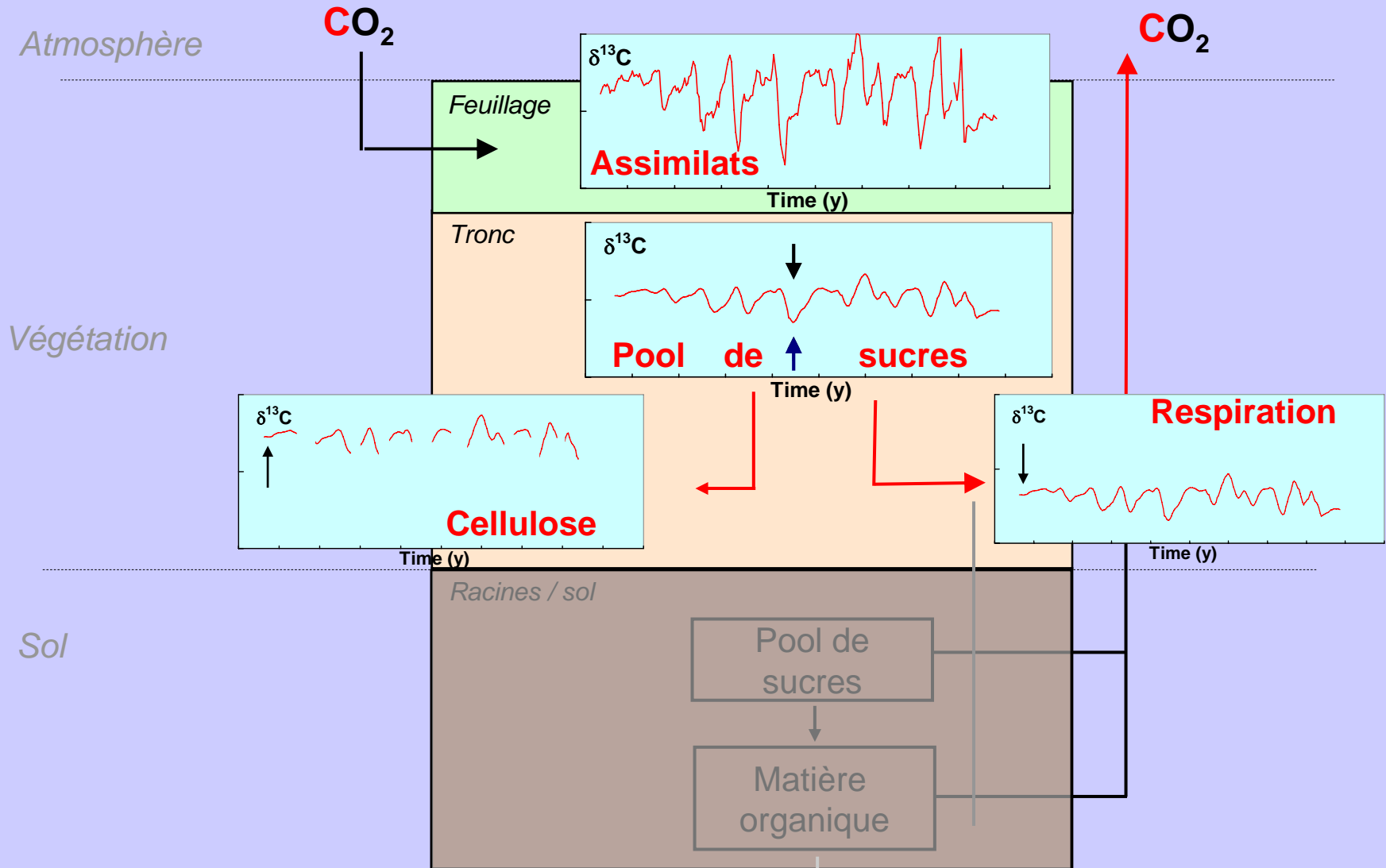
## 2. Transferts de carbone atmosphère plante - Sol

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 ?

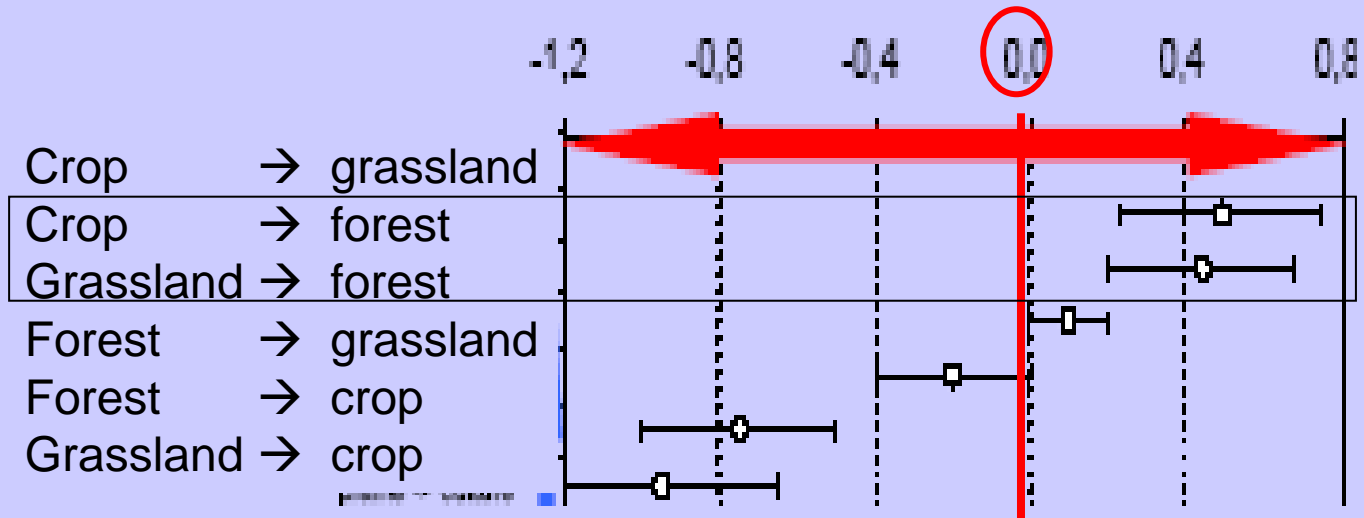
- Augmenter les stocks en place
- Accroître le temps de résidence du Carbone dans la biosphère
- Substituer le C fossile par du C renouvelable

# 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)*



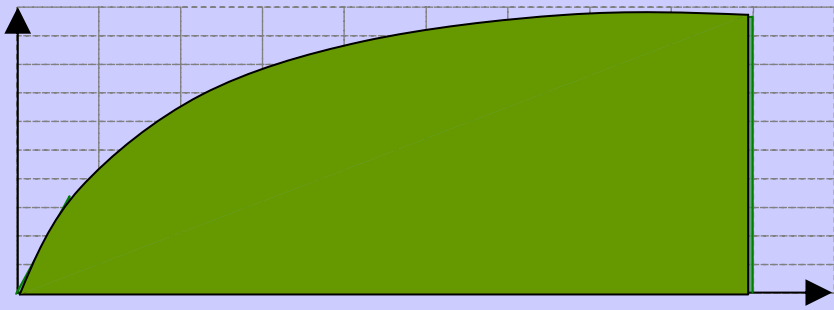
*(forêt pluviale littorale SW  
Nelle Zélande)*

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

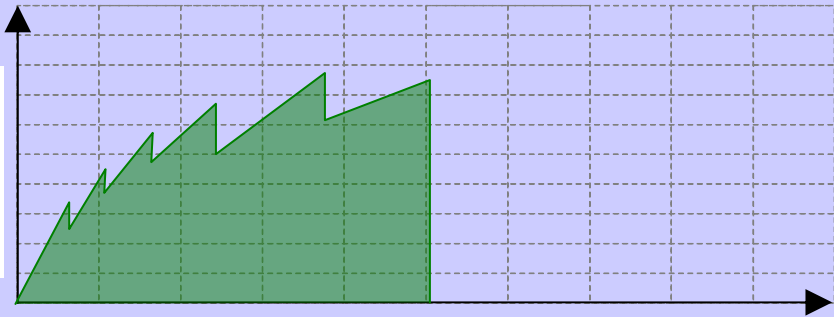
# Analyse de trois options de sylviculture

*Biomass*

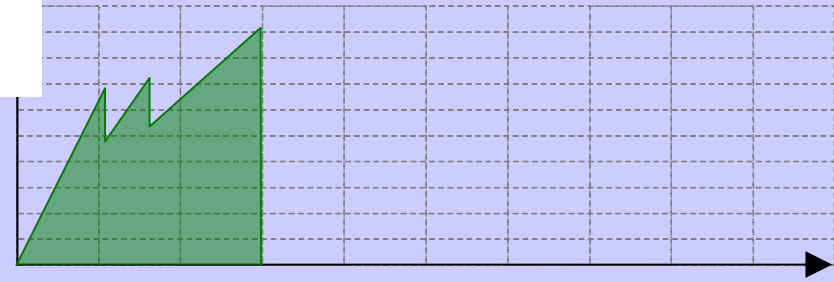
**Non  
gérée  
(UM)**



**Gérée  
(M)**



**Intensifiée  
(FI)**



age

Regeneration assisted

Thinnings

Clearcut

Timber logging

Soil preparation

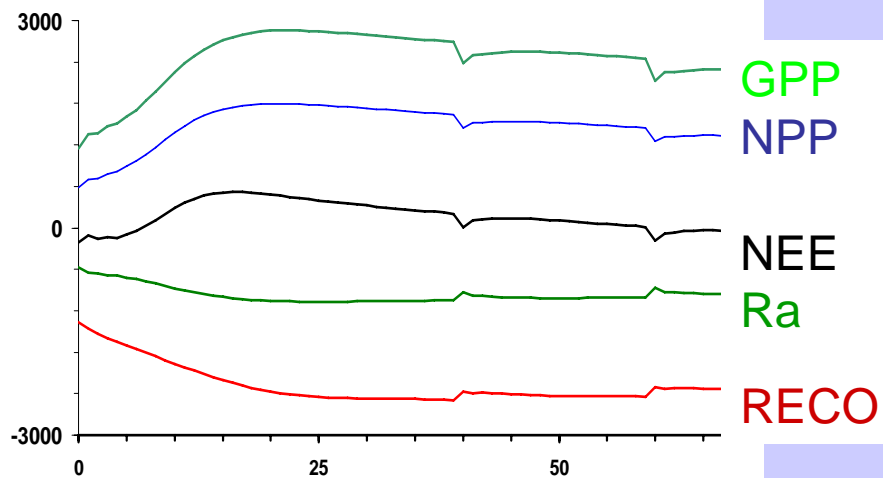
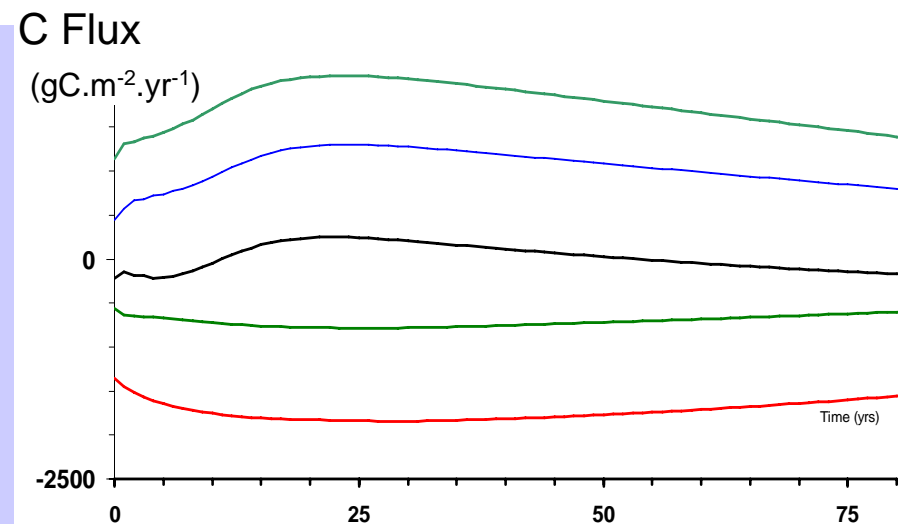
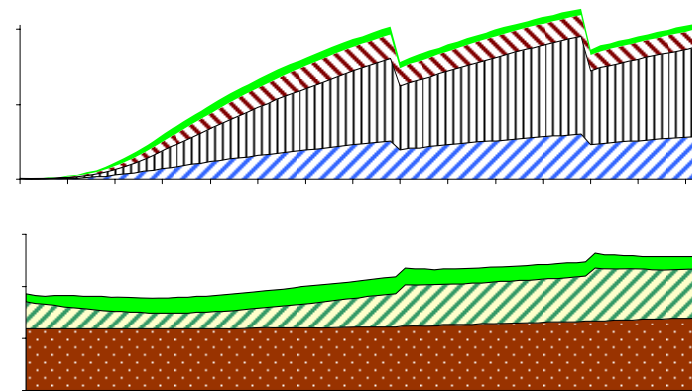
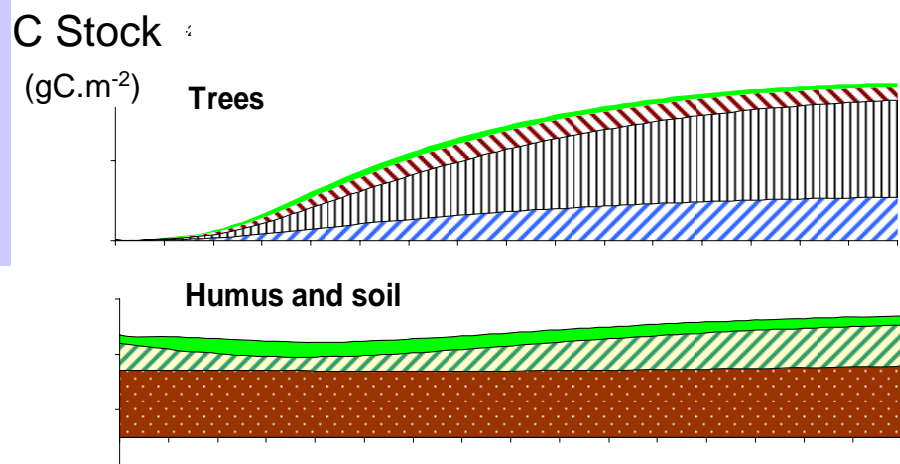
Plantation / seeding

Fertilisation, drainage

Weed control

Pest control

Whole tree harvesting



## La gestion forestière :

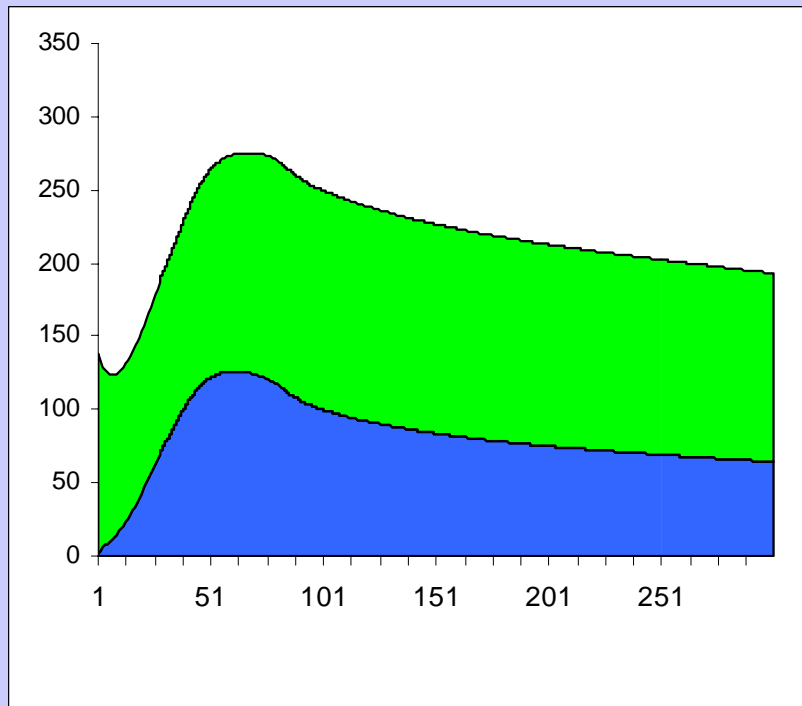
- raccourcit a durée de révolution
- accroît la productivité (NPP, GPP)
- augmente l'indice de récolte
- diminue les stocks en place (biomasse et sol)



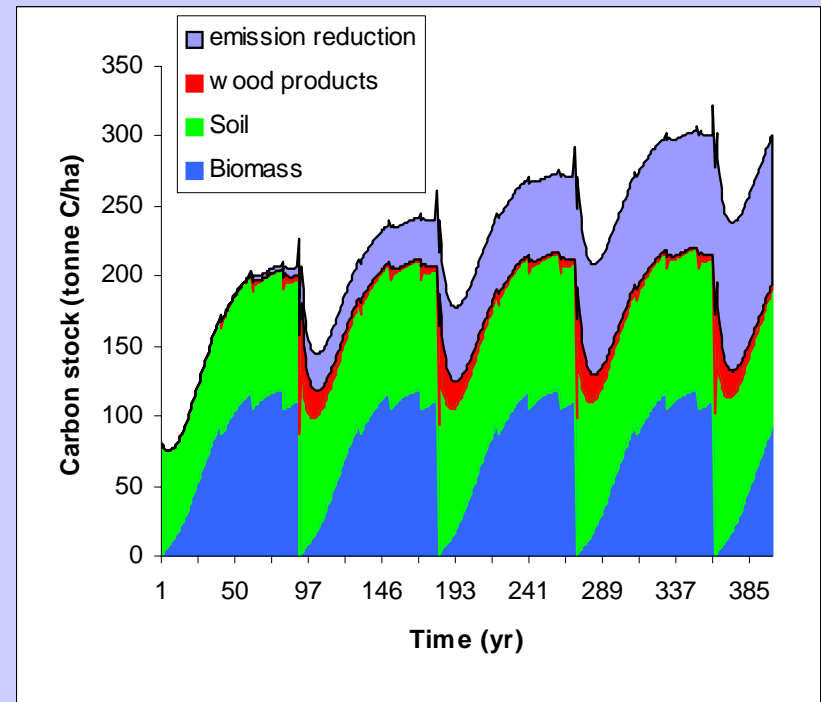
# Stock en place et substitution

OPTIONS	C stock <i>in situ</i> (tC.ha <sup>-1</sup> )			Production moyenne (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )	Substitu- tion (tC.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )
	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
<b>20 y</b>				
FI	0.24	-0.11	-0.01	<b>+0.12</b>
UM	-0.22	0.11	0.01	<b>-0.10</b>
<b>50 y</b>				
FI	0.24	-0.27	-0.01	<b>-0.04</b>
UM	-0.22	0.27	0.01	<b>+0.06</b>

- Importance de l'échelle temporelle
- Effet substitution s'accroît avec la durée
- $\Delta$  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).

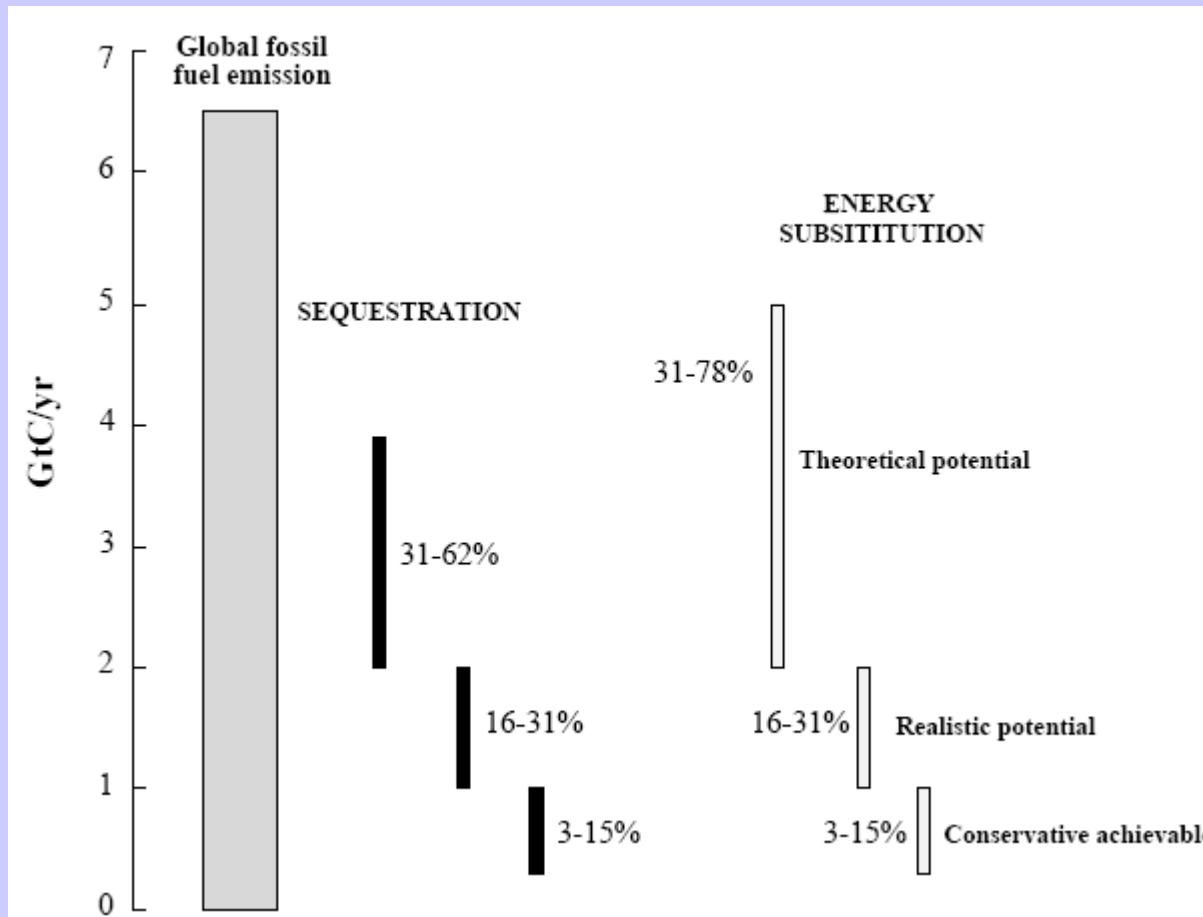
Latitudes	Pratique	Superficie (Mha)	C stocké et conservé (Pg)
Hautes	Afforestation	95,2 <sup>1</sup>	2,4
Moyennes	Afforestation	113	11,8
	Agroforestry	6,5	0,7
Basses	Afforestation	66,9	16,4
	Agroforestry	63,2	6,3
	Reforestation	217	11,5-28,7
	Avoided deforestation	138	10,8-20,8
	<b>Total</b>	<b>700</b>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

= 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 CO<sub>2</sub> ?

- 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 with lush green foliage. Sunlight filters through the canopy, creating dappled light on the path. The word "Merci" is centered in the middle of the image.

Merci