



# L'Amazonie : comment ça marche ?

**Alain Pavé, Laboratoire de Biométrie et de Biologie Evolutive,  
Université Lyon1-CNRS**

*Ifé, Lyon le 4 avril 2013*

# Un aperçu



- ◆ Grande Amazonie: 7,5 millions de km<sup>2</sup>
- ◆ Bassin de l'Amazone: 6,9 millions de km<sup>2</sup>
- ◆ Forêts: env. 5,5 millions de km<sup>2</sup> ( $\pm 10\%$ ), dont 4 millions au Brésil
- ◆ États et territoires concernés : **Brésil, Equateur, Venezuela, Guyana, Suriname, Colombie, Pérou et Bolivie (OTCA), Guyane française**
- ◆ Population : 22 millions habitants dont 1 million amérindiens
- ◆ 10 à 13% de la biodiversité mondiale (pour 5% des terres émergées)
- ◆ Amazone : longueur = 6 500 km, débit moyen sur l'année # 250 000 m<sup>3</sup> /s
- ◆ **Guyane française** : 84 000 km<sup>2</sup>, dont forêt = 75 000 km<sup>2</sup>, 220 000 ha





*Point de départ :*

Pourquoi la biodiversité de la forêt amazonienne se maintient-elle, à petite et à grande échelle, et sur le(très) long terme?

# Quelques données

- De l'ordre de 200 *espèces* d'arbres/ha pour 600 individus (DBH > 10 cm) ; 12 000 pour l'ensemble de la forêt Amazonienne de 5 à 6 millions de km<sup>2</sup> (à comparer aux 130 espèces natives de l'Europe continentale : 10 millions de km<sup>2</sup>, soit 1 milliard d'ha)
- Grande hétérogénéité : des arbres voisins sont en général d'espèces différentes
- Mais, il y a des « préférences » les associations d'arbres différentes selon les contextes édaphiques et bioclimatiques
- La forêt amazonienne a commencé à s'installer il y a 55 millions d'années; elle a connu des variations importantes en superficie

# Evaluations (number of species)

	Actually ident. (estimated)	Total (estimated)
Amazonie	190 500 ± 10%	1 800 000 ± 30% (1)
Monde	1 750 000 ± 10%	13 600 000 ± 30% (1) 5 000 000 ± 3 000 000 (2)
% Amazonie	10,9	13,2

(1) Lewinsohn T.M., Prado P.I. *Conserv. Biology*, 19, 2005, 619-624.

(2) Costello M.J. et al, *Science*, 339, 2013, 413-416

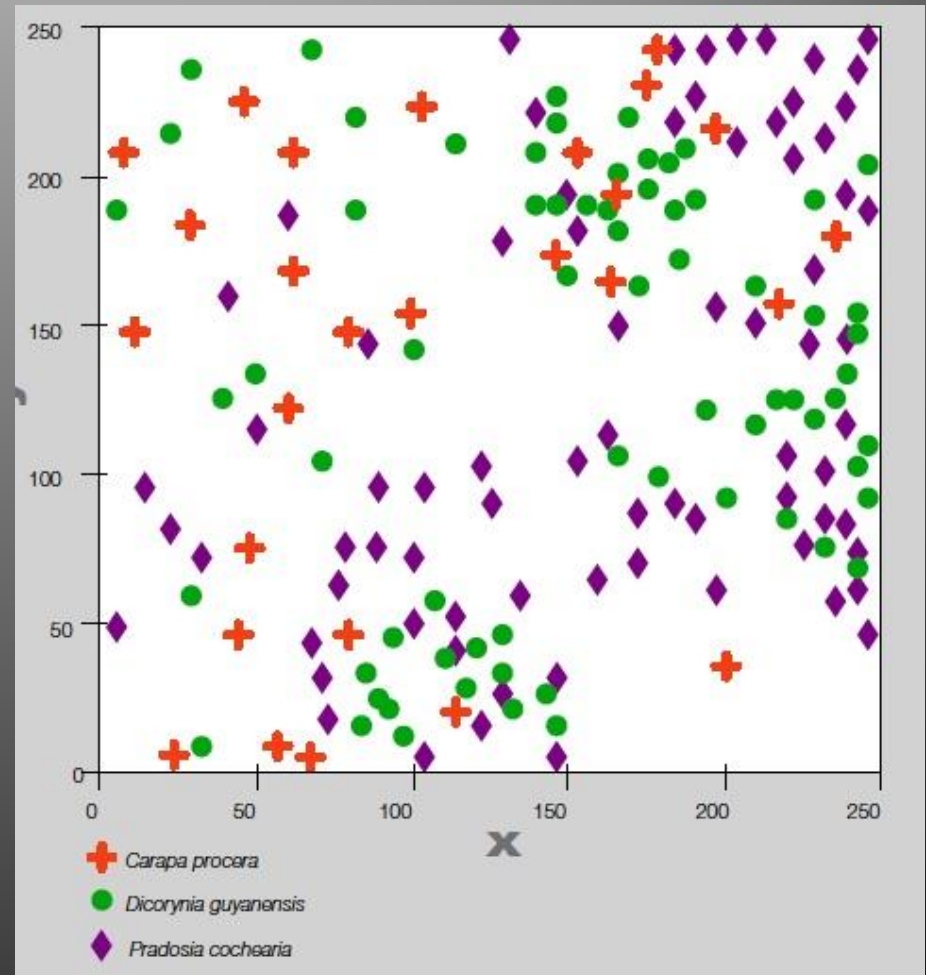
## Metagenome (the future)

C	Sites	No of core soil samples	No of plots	Sequencing platform	No of sequences analyzed	No of families identified
	<b>Boreal</b> (Varanger Fjord, Norway)	72	8	Roche 454 FLX	176 283	33
	<b>Temperate</b> (French Alps, France)	8	1	Illumina GA IIx	396 054	5
	<b>Tropical</b> (Nouragues Field Station, French Guiana)	49	1	Illumina GA IIx	1 636 455	34

Taberlet P. et al. Soil sampling and isolation of extracellular DNA from large amount of starting material suitable for metabarcoding studie. *Molecular Ecology*, 2012, 21,8, 1816-1820;

Yoccoz et al, DNA from soil mirrors plant taxonomic and growth form diversity. *Molecular Ecology*, 2012 (to be published, available on-line)

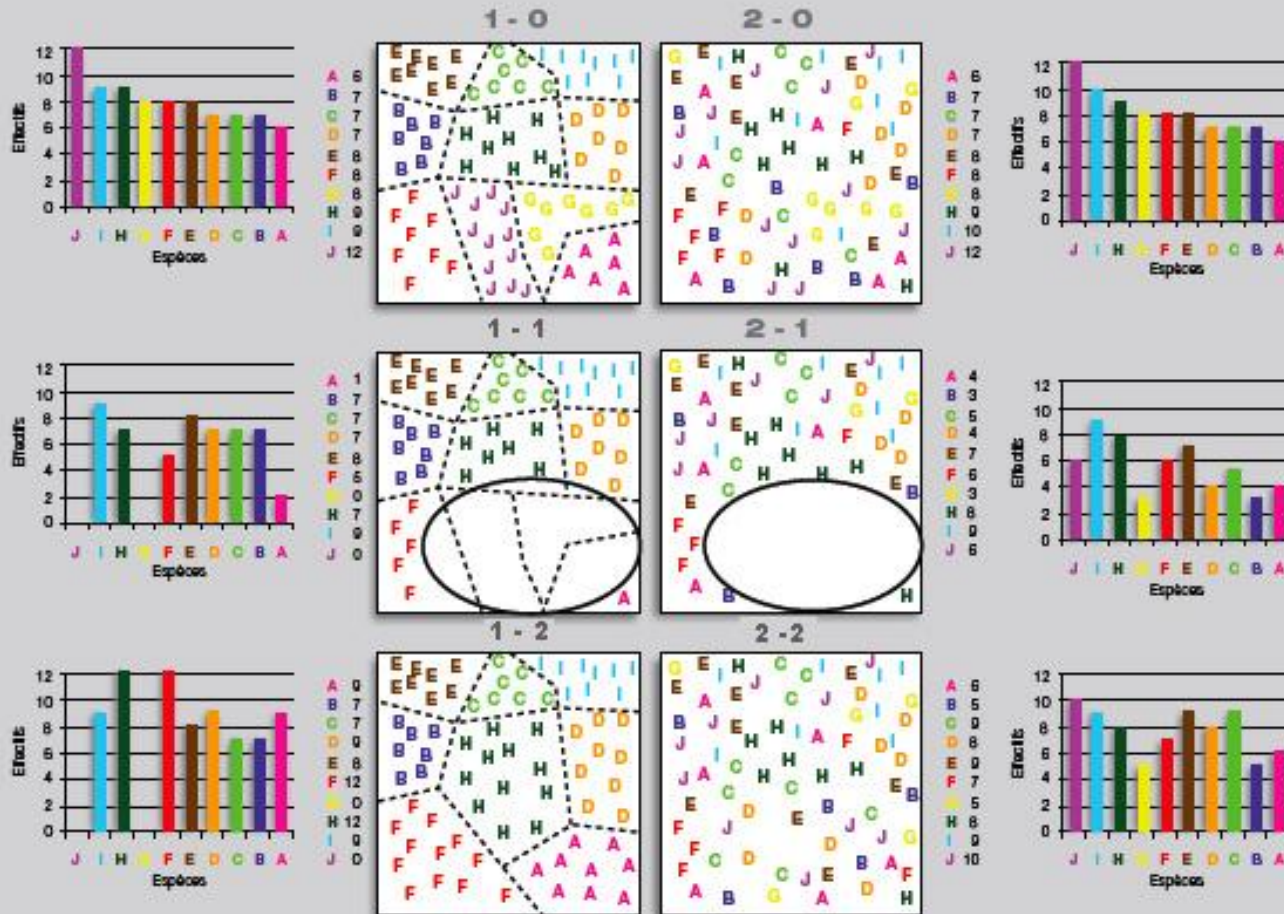
# Distribution aléatoire des arbres en forêt naturelle amazonienne





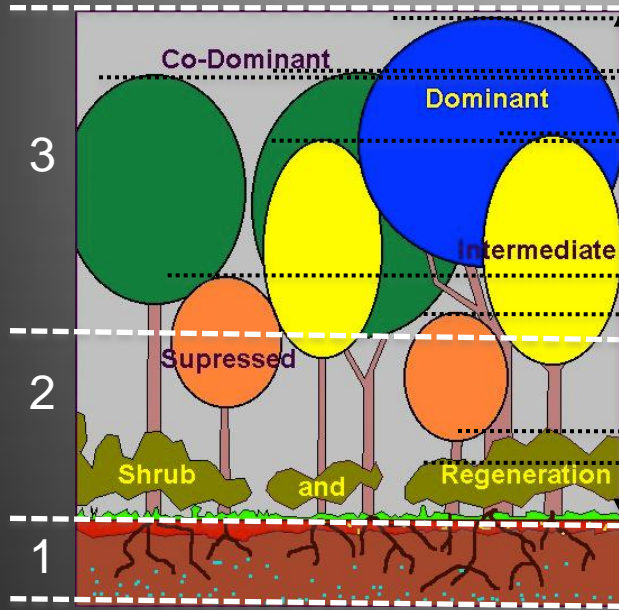
# De quelle(s) propriété(s) la distribution aléatoire des individus munit-elle les « écosystèmes » ?

EXEMPLE SIMPLIFIÉ D'UNE DISTRIBUTION SPATIALE D'ARBRES DANS UNE FORÊT DIVERSIFIÉE, COMME LA FORÊT AMAZONNIENNE

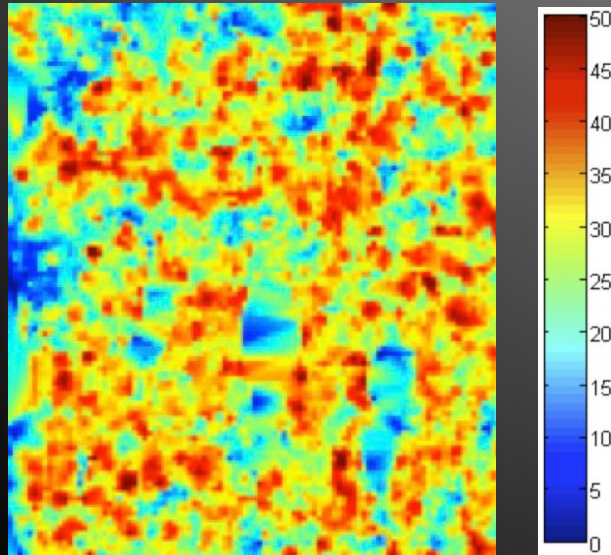


=> Maintien de la biodiversité

# Et la structure verticale ?



Hauteur variable  $\pm$  aléatoire?



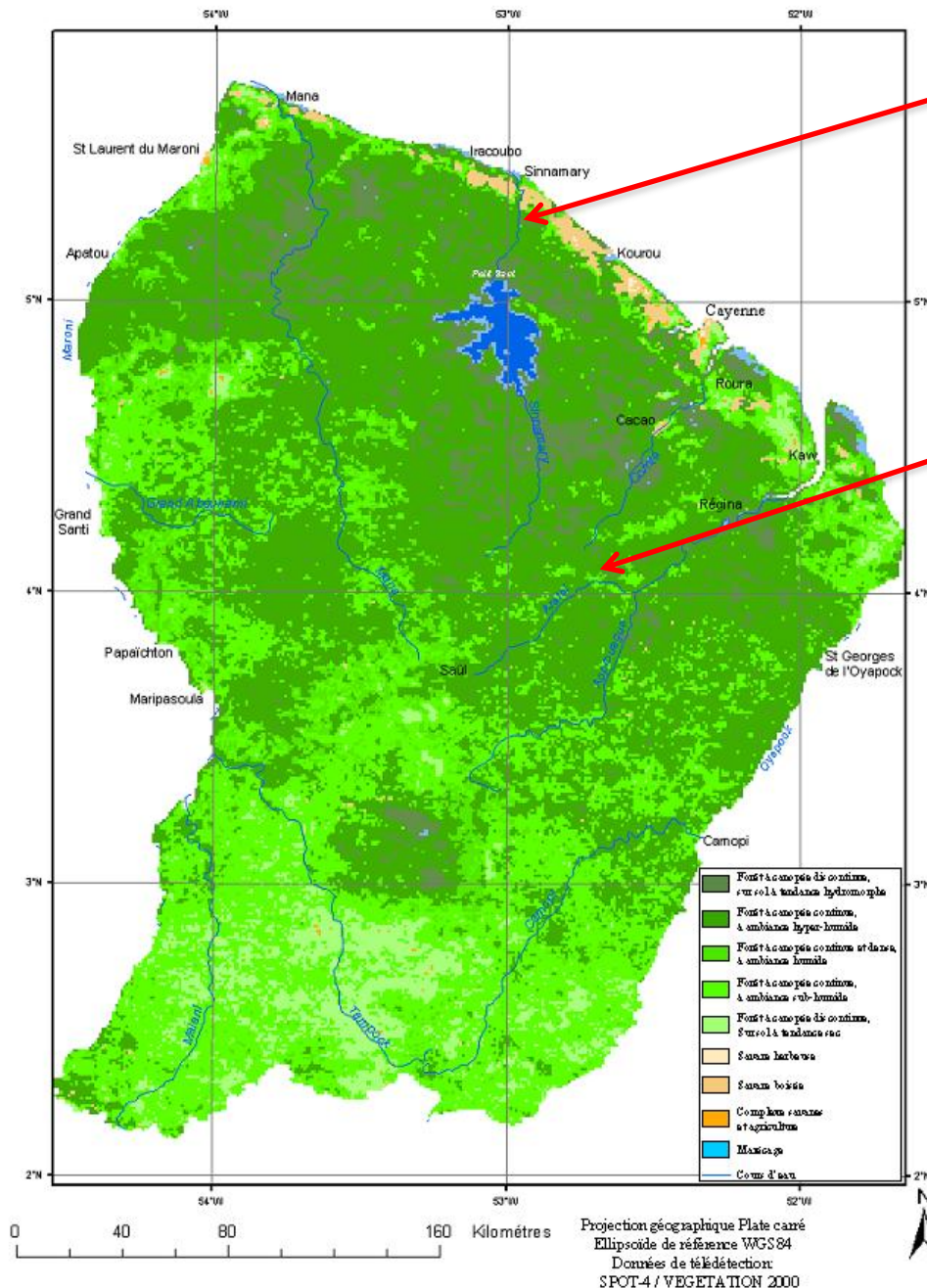
## *Hétérogénéité verticale*

**Causes** : remplacement aléatoire des arbres morts et hétérogénéité du milieu

**Conséquences** : diversité des âges et des tailles, meilleur accès à la lumière et meilleure productivité



# La végétation en Guyane française



Paracou

Seulement 40%  
d'espèces  
communes  
d'arbres

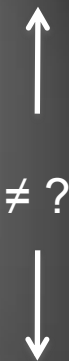
Nouragues

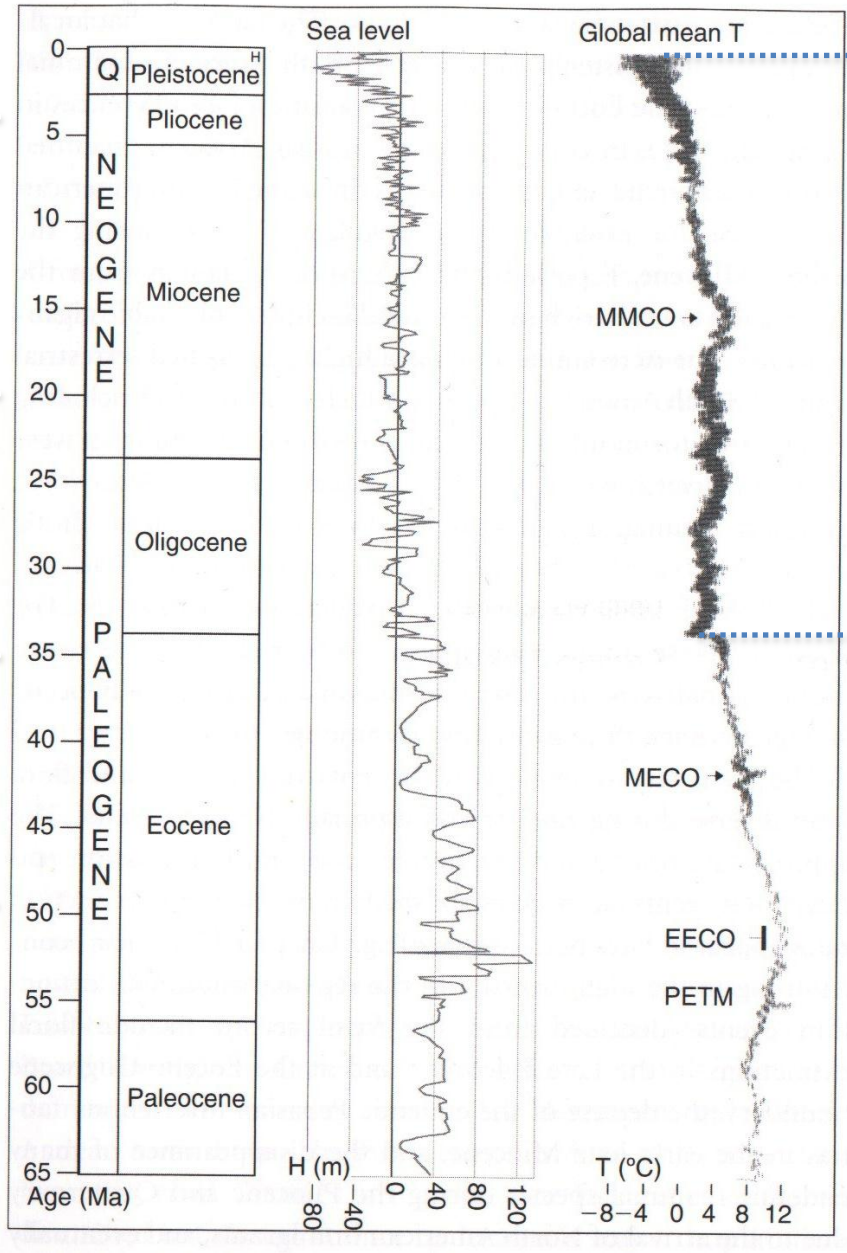
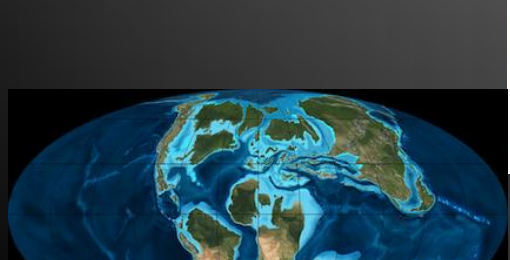
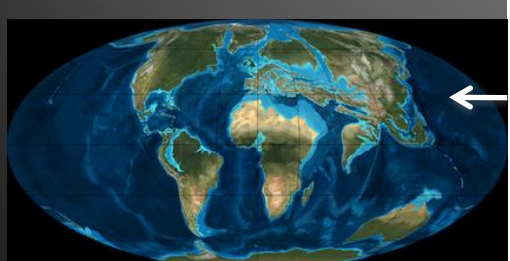
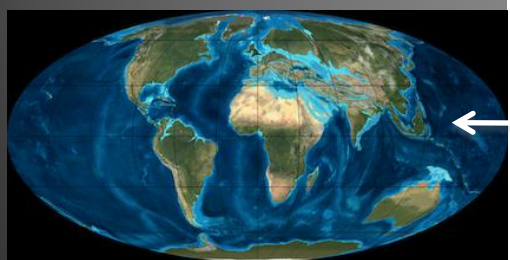
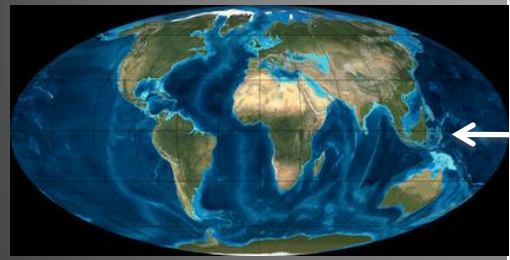
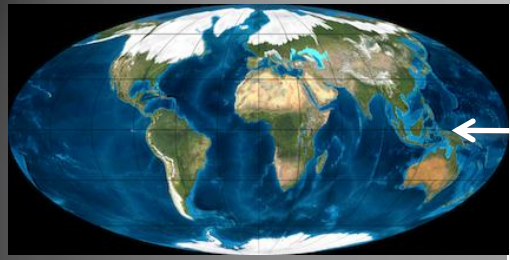
Forêt : 7 500 000 ha

150 à 200 espèces  
différentes par ha  
(Europe : 127)

~5 milliards d'arbres  
( $\varnothing > 10$  cm / DBH)

1200 espèces décrites  
1800-2000 au total





actual

Mammal migrations from the North

Spéciations Andines

Crash  
End of the Eocene  
N families # actual

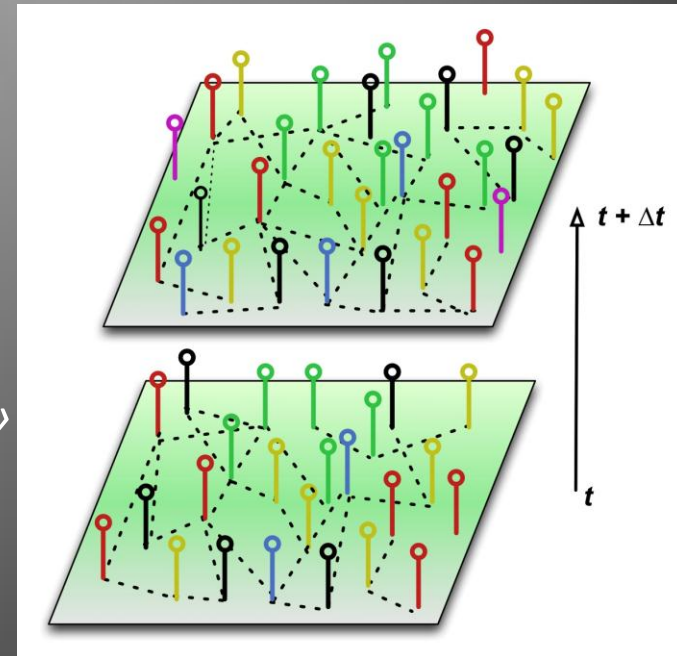
Installation

90 Ma (end of Cretaceous)

Variations of the biodiversity in Amazonia (tendencies)

# Bases théoriques de la dynamique des écosystèmes « naturels »

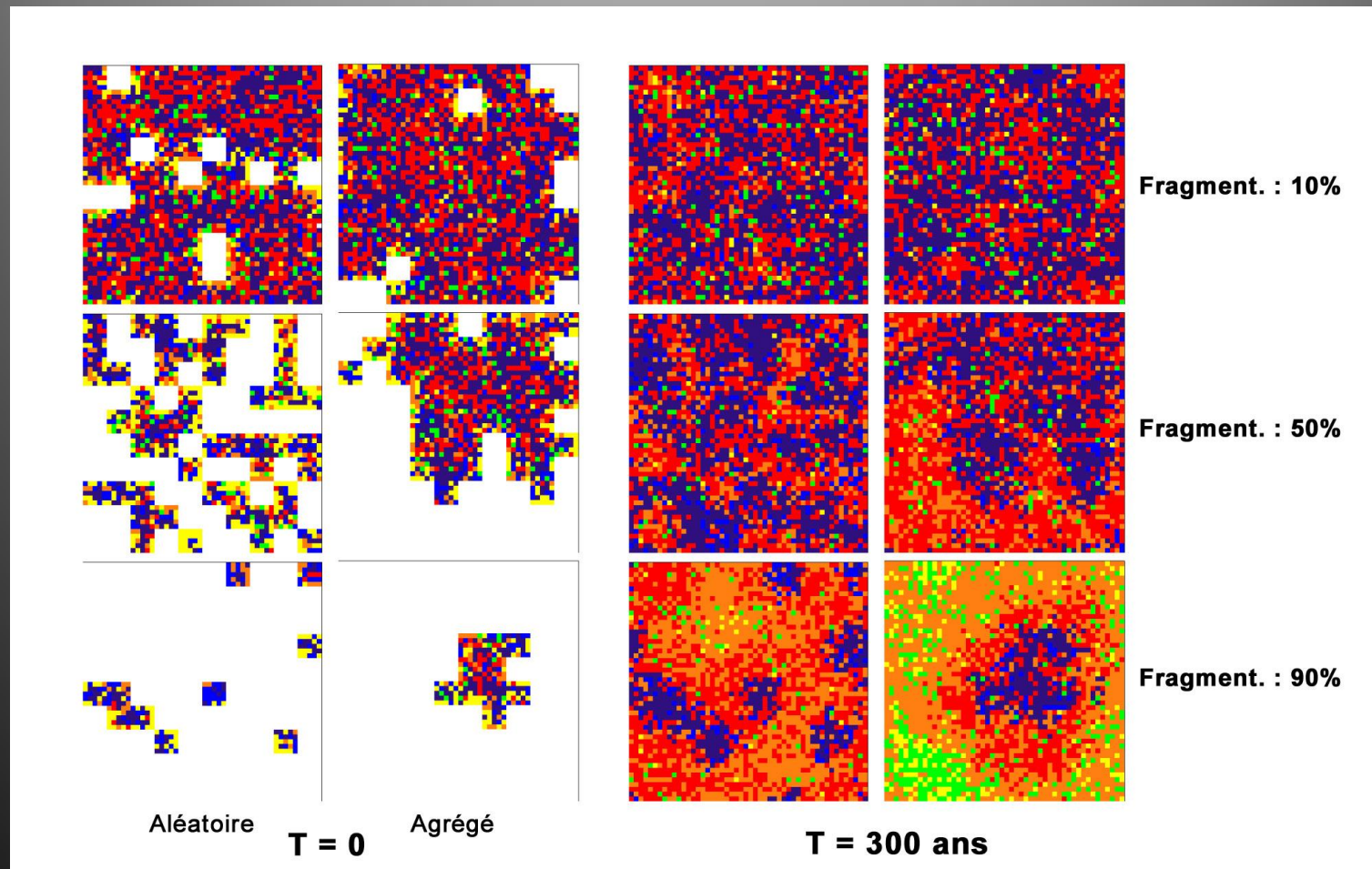
- Long terme : processus évolutifs
- Moyen et court terme :
  - Processus démographiques voisins *théorie neutraliste de la biodiversité* (vs théorie de la niche)
  - Préférences environnementales : *théorie du filtrage environnemental*
  - Distribution au hasard : *théorie des « roulettes » biologiques et écologiques*
  - Processus de coexistence (ex. interactions écologiques locales, effets des substances chimiques biologiquement actives, des signaux physiques et chimiques) : *théorie des interactions biologiques et écologiques*
  - Perturbations : *théorie des perturbations naturelles et anthropiques*





# Simulation exploitation et régénération

Modèle individu-centré



Khöler P. et al, « Simulating the Long-term Response of Tropical Wet Forests to Fragmentation », *Ecosystems*, n° 6, p. 114-128, 2003.

# Des représentations, des modèles pour mieux comprendre

## Généralité du schéma darwinien

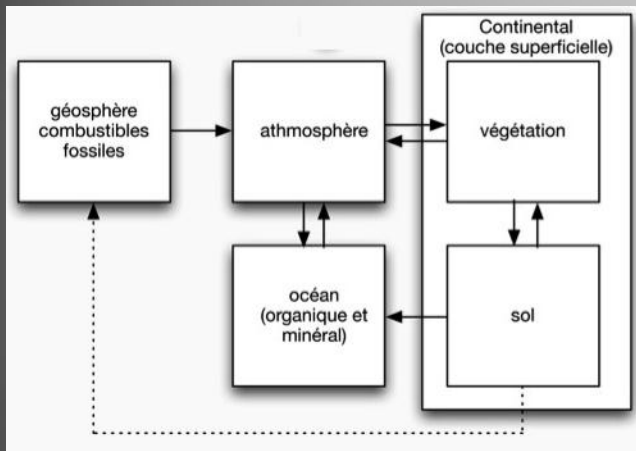
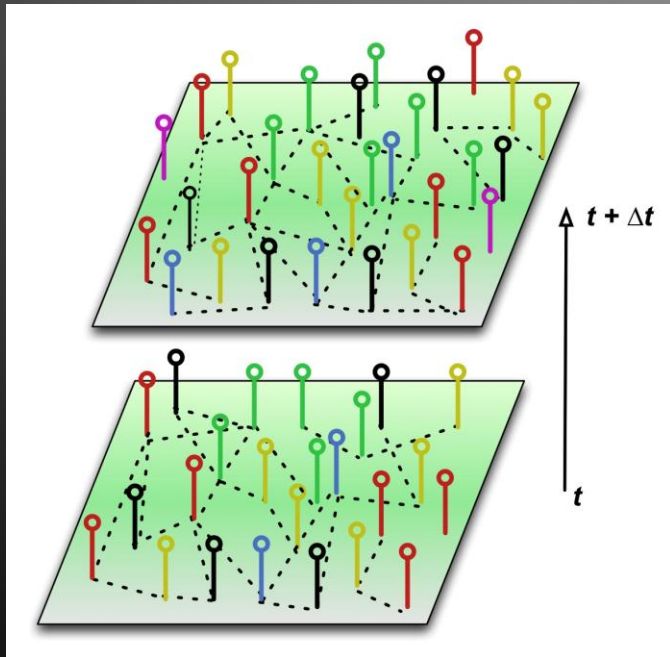
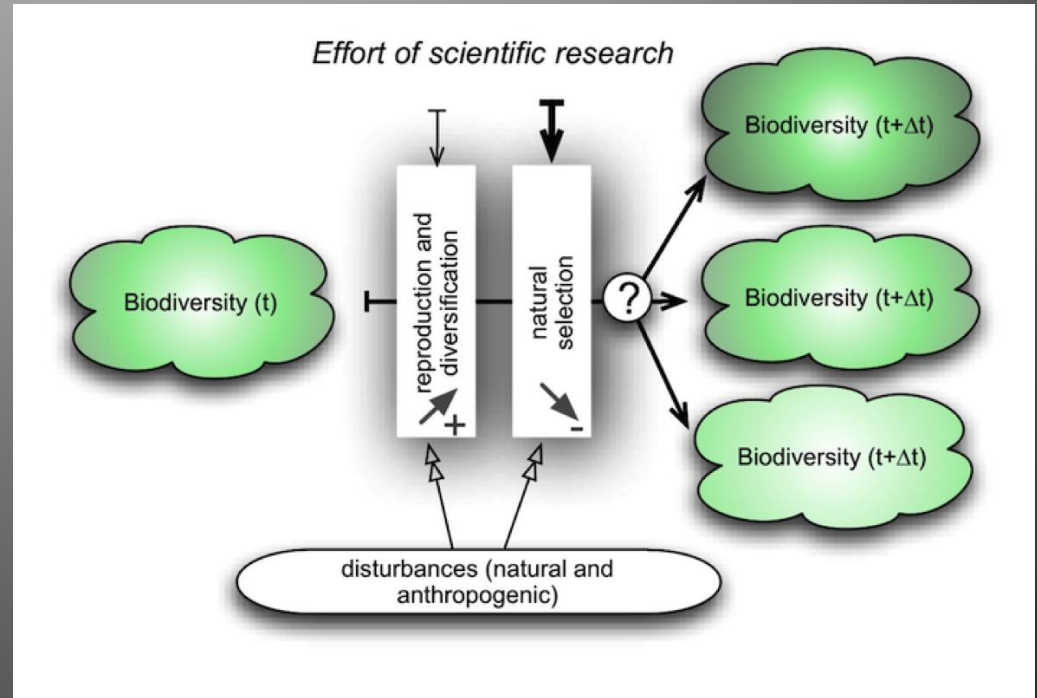


Schéma écosystémique  
flux de matière et d'énergie



Un écoréseau  
« auto-désorganisé »



mais qui ne sont qu'une réalité  
recomposée

# Origines et rôles du hasard dans les systèmes vivants

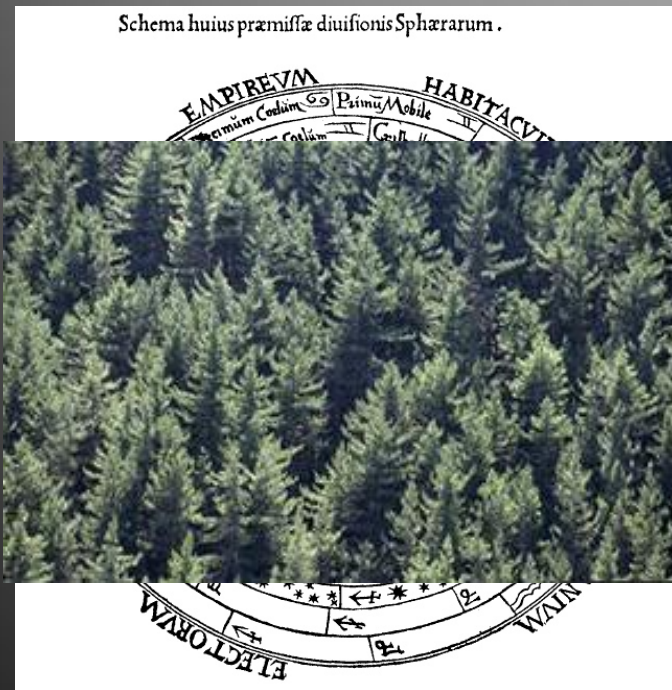
- Origines :
  - exogène (environnement géo-physico-chimique) : « contingence »
  - endogène (processus biologiques et écologiques engendrant des résultats erratiques, aléatoires) : « mécanique »
- Production d'une diversité d'organismes (génétique et spécifique) => biodiversité, mais aussi de réponses aux perturbations aléatoires provenant de l'environnement
- Assure la permanence des systèmes vivants et permet leur évolution
- Les processus biologiques engendrant du hasard sont à la fois des produits et des moteurs de l'évolution



# Le hasard au cœur du vivant ?

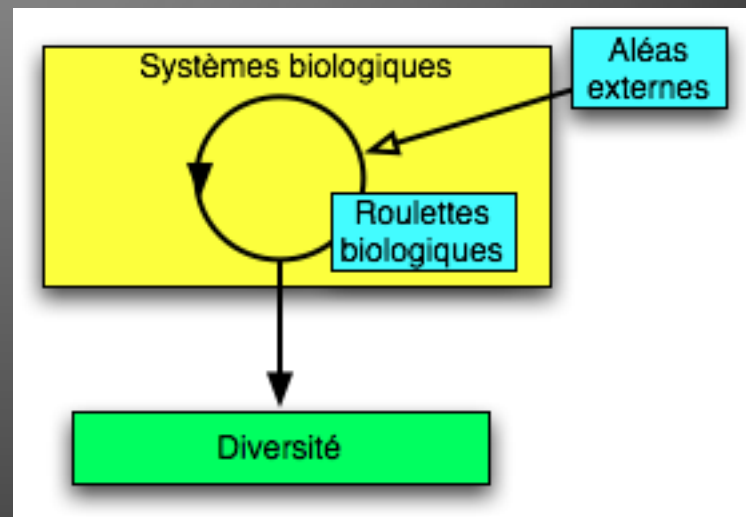
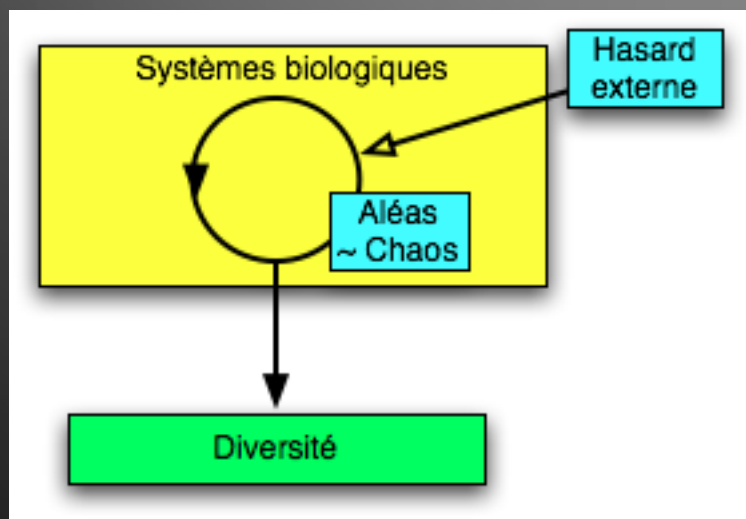
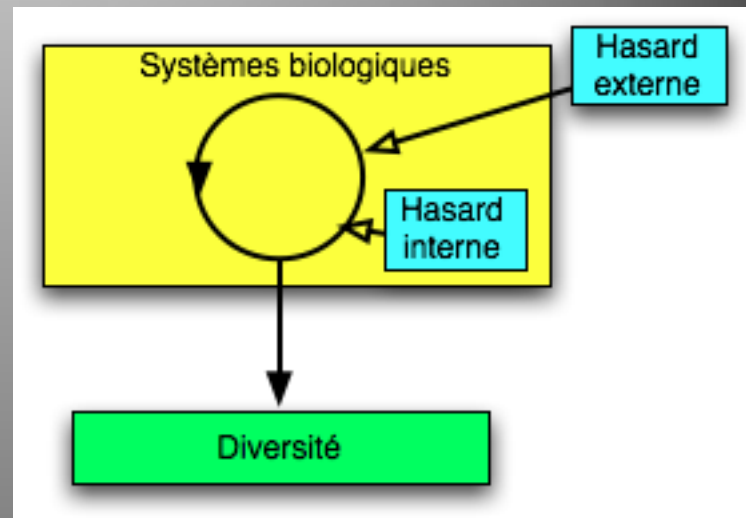
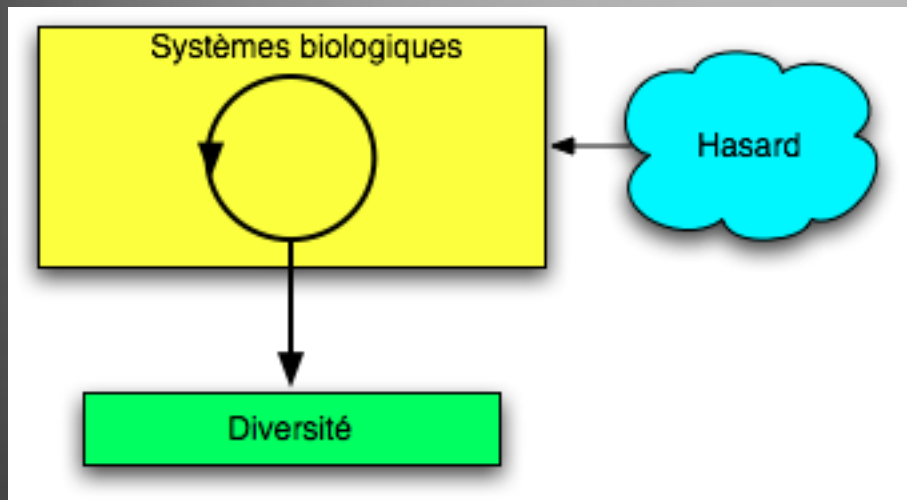
- Une sorte de **révolution copernicienne** faisant passer d'une vision mécaniste et déterministe des êtres vivants à une représentation plus souple et adaptative grâce un hasard produit par ces mêmes systèmes
- Un hasard utile mais un hasard surveillé et contrôlé car s'il produit trop de « bruit » il risque de mettre en danger les systèmes vivants : **sélection de mécanismes de régulation**
- Les systèmes vivants sont fondamentalement « non linéaires », ils produisent spontanément de l'aléatoire : ne serait-ce pas le cas pour tout système complexe ?

# Écosystème : vers un changement de paradigme ?



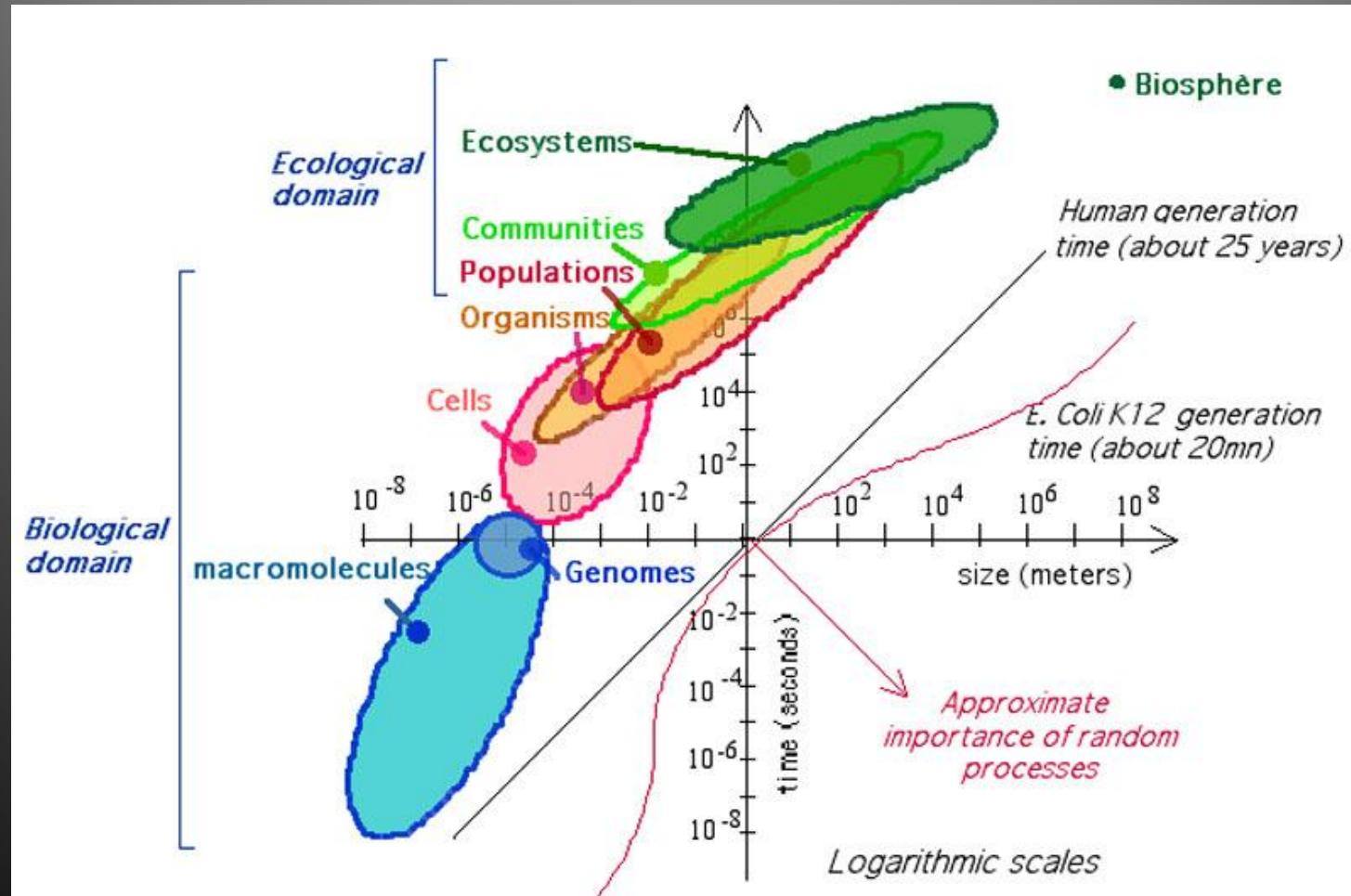
Ensemble ordonné allant vers un équilibre :  
« Cosmos écologique »  
Au cœur : mécanique d'auto-organisation et  
un ordre émergent

Ensemble désordonné  
et continuellement changeant :  
« Chaos écologique »  
Au cœur : processus écologiques  
produisant du désordre (*hasard*)



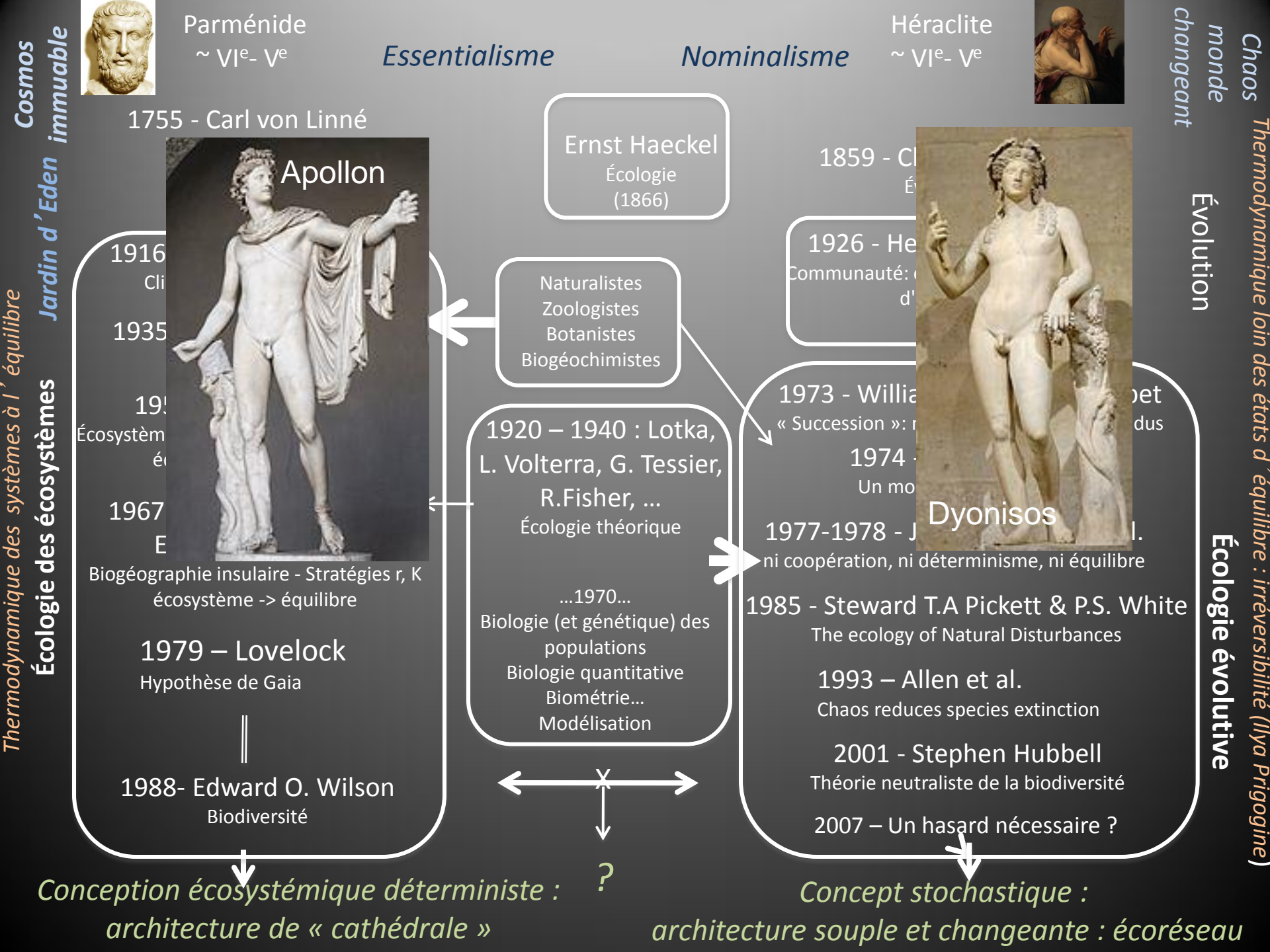


# Organisation levels and scales



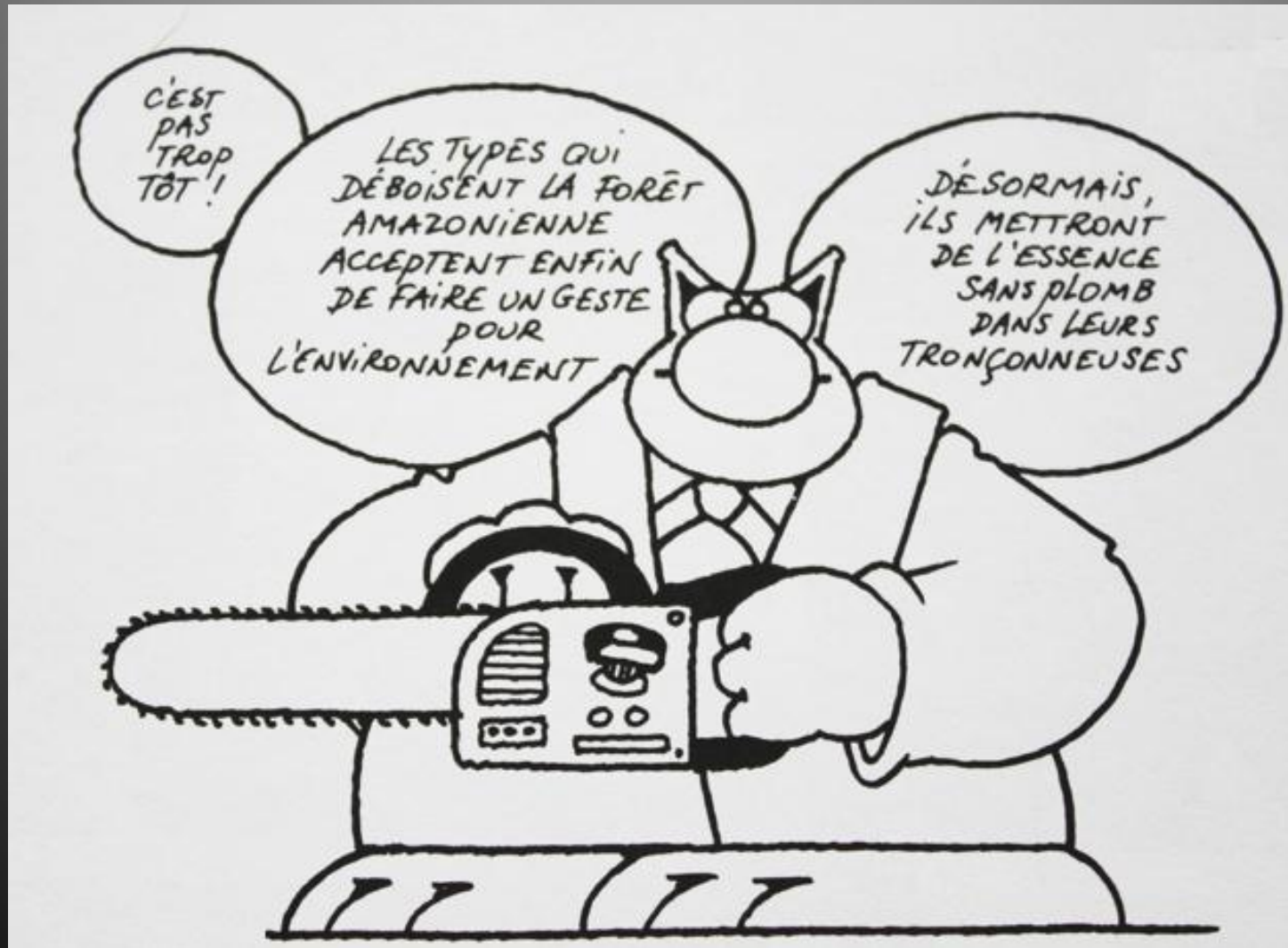
# Faire avec le hasard

- Évaluer et, si nécessaire, réguler les processus engendrant du hasard, de l'incertitude, de la diversité biologique :
  - Maintien (écosystèmes naturels : mélange aléatoires)
  - Diminution (par exemple, limiter l'apparition de variants chez les organismes pathogènes)
  - Augmentation (locale et globale)





# Merci pour votre attention



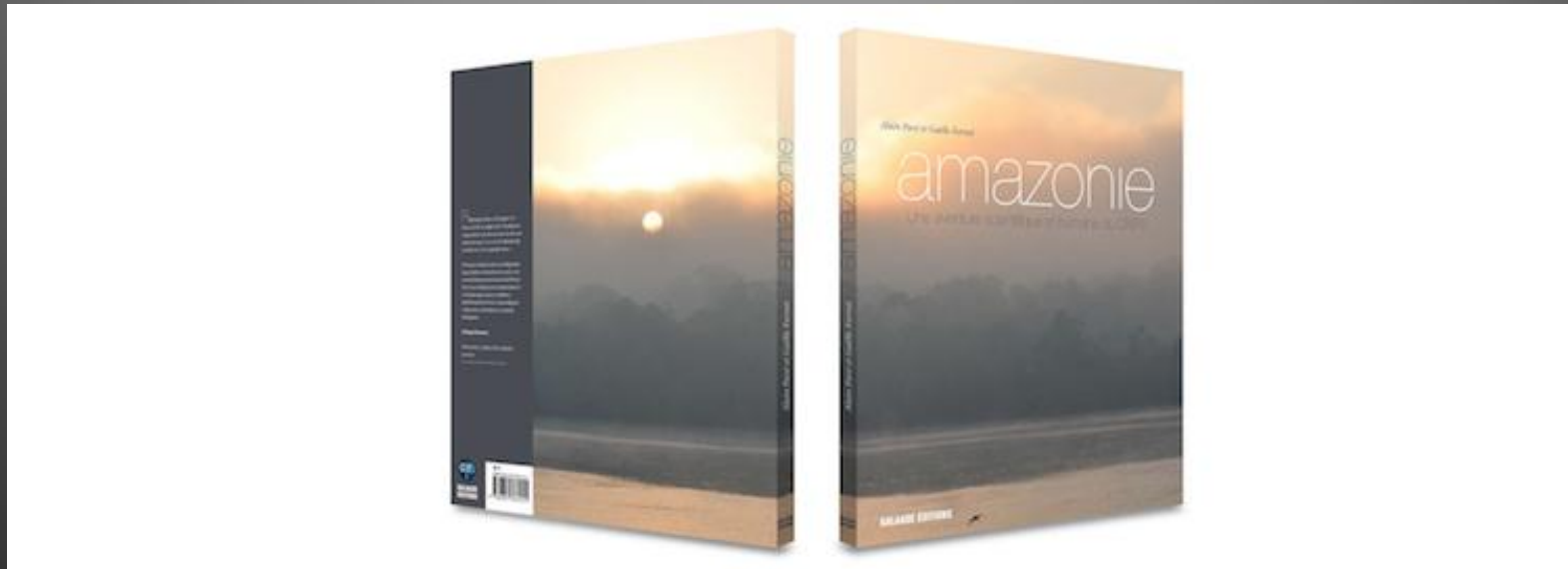
Les illustrations sont principalement tirées de l'ouvrage

Alain Pavé et Gaëlle Fornet

# Amazonie une aventure scientifique et humaine du CNRS

Galaade Editions, Paris

En librairie depuis le 21 octobre 2010



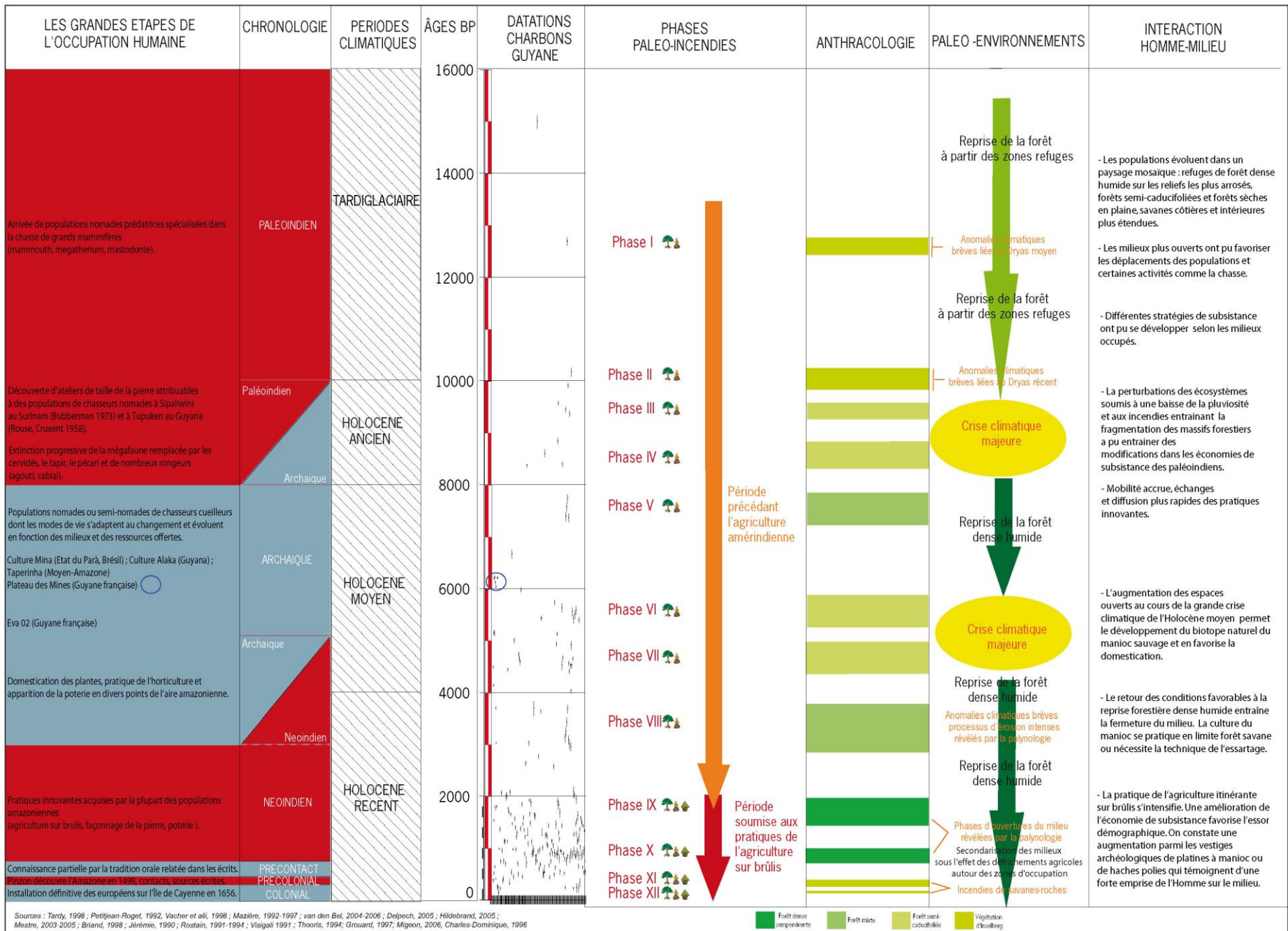
Avec des articles de synthèses et les principales références des publications du CNRS-Guyane et du Programme Amazonie

Et :

**Pavé A.** *La nécessité du hasard – Vers une théorie générale de la biodiversité.* EDP-Sciences, 2007, 192p.

**Pavé A.** *On the Origins and Dynamics of Biodiversity : the Role of Chance.* Springer, New-York, 2010.

**Pavé A.** *La course de la Gazelle.* EDP Sciences, Les Ulis, 2011 (à paraître).



Sources : Tardy, 1998 ; Petitjean-Rogot, 1992 ; Vacher et alii, 1998 ; Mazzière, 1992-1997 ; van den Bel, 2004-2006 ; Delpéch, 2005 ; Hildebrand, 2005 ; Mestre, 2003-2005 ; Briand, 1998 ; Jérémie, 1990 ; Rostain, 1991-1994 ; Visigalli 1991 ; Theoris, 1994 ; Grouard, 1997 ; Migeon, 2006 ; Charles-Dominique, 1996

■ Forêt dense sempitrante
 ■ Forêt mixte
 ■ Forêt semi-caducifoliée
 ■ Végétation d'Insulberg



# Modélisation de la croissance des plantes

# Modélisation de la croissance des plantes (ex. arbres)

## Mesure

Taille (hauteur, diamètre à 1,30 m, etc.) =  $f(t)$

...

## Historique:

*Tailles*

Fibonacci (1202, modèle démographique)

Gompertz (1825)

Logistique (Verhulst, 1844)

Allométrie (d'Arcy Thompson) :  $y = A x^\mu$

□

*Forme*

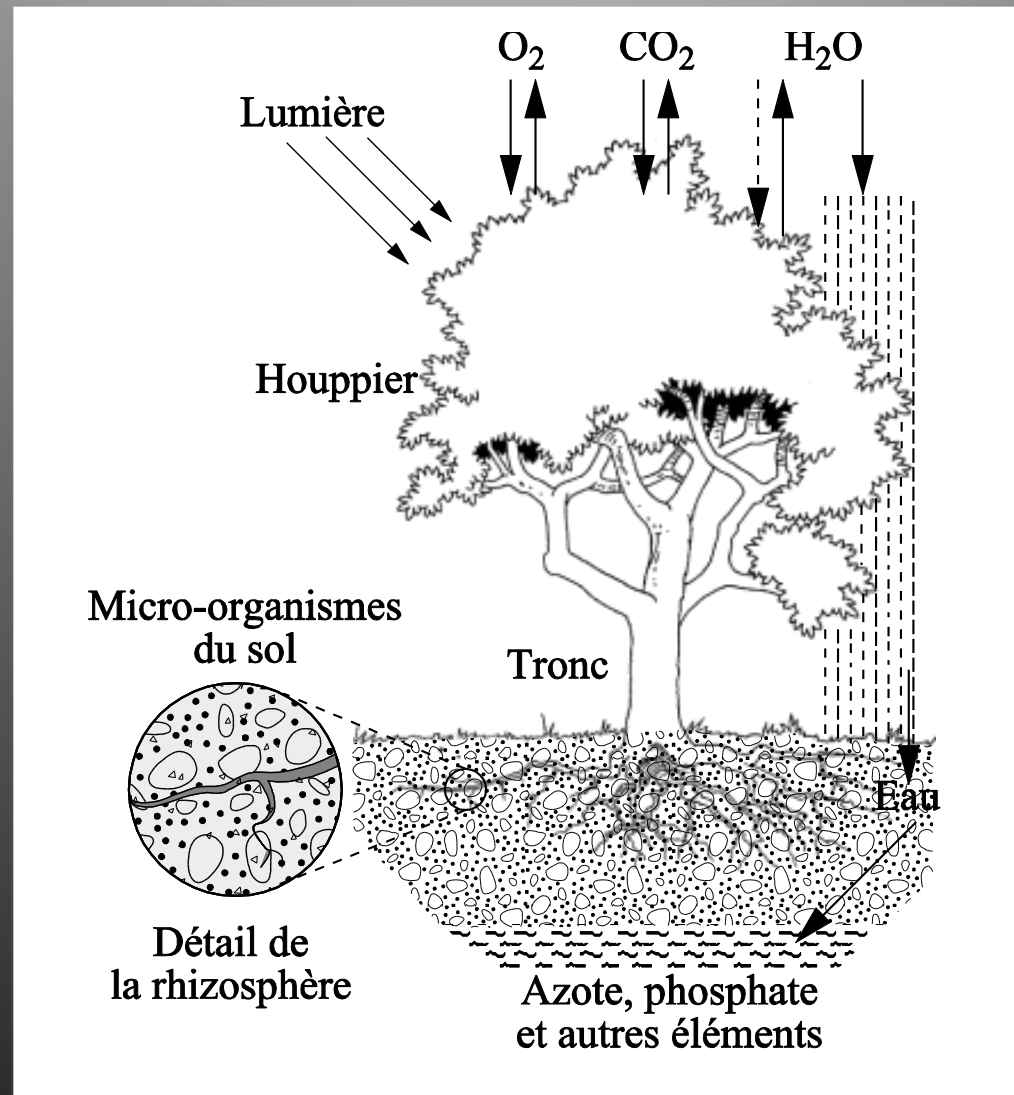
-Lindenmayer,

-fractales,

-de Reffye... Modèles d'Amap



# Arbre : facteurs de croissance





# Croissance du pin noir

Monomoléculaire :

$$y = p_3 + p_1 \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{p_2}\right) \right)$$

Logistique :

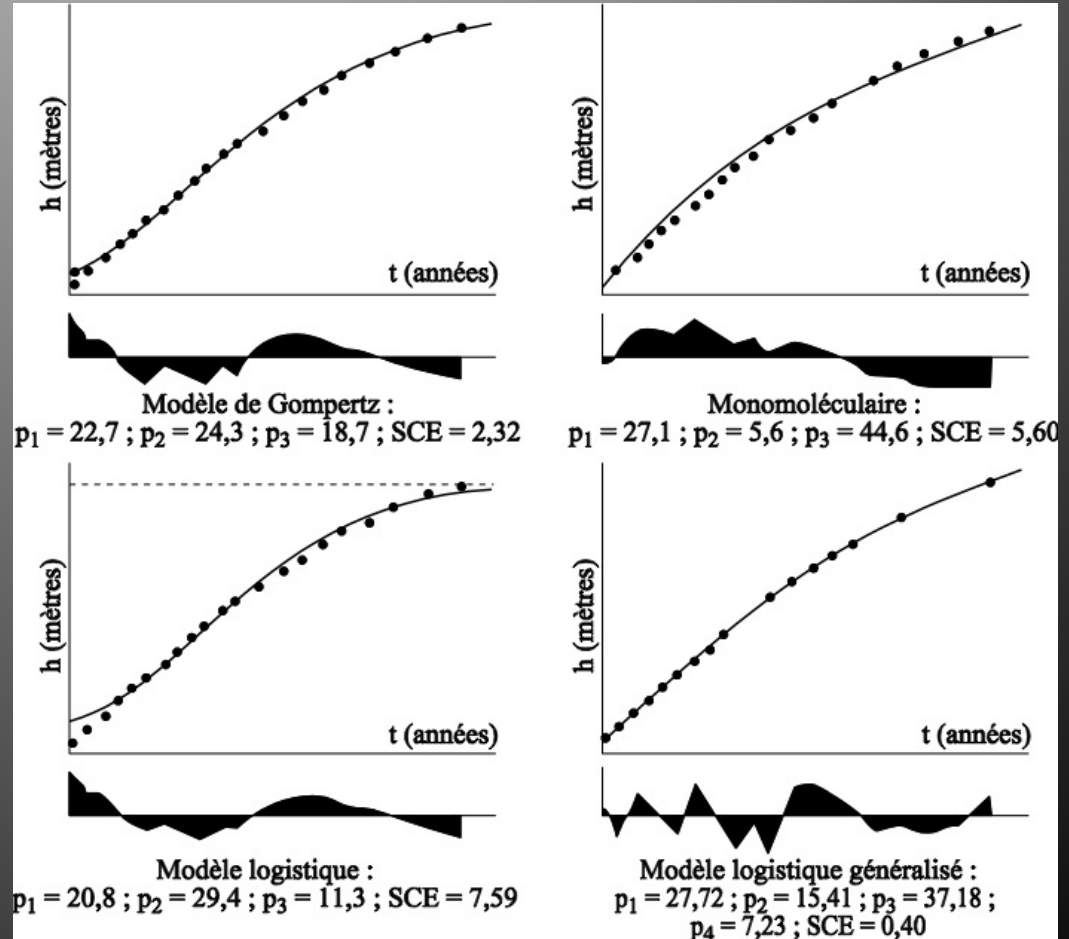
$$y = \frac{p_1}{1 + \exp\left(\frac{p_2 - t}{p_3}\right)}$$

Logistique généralisée :

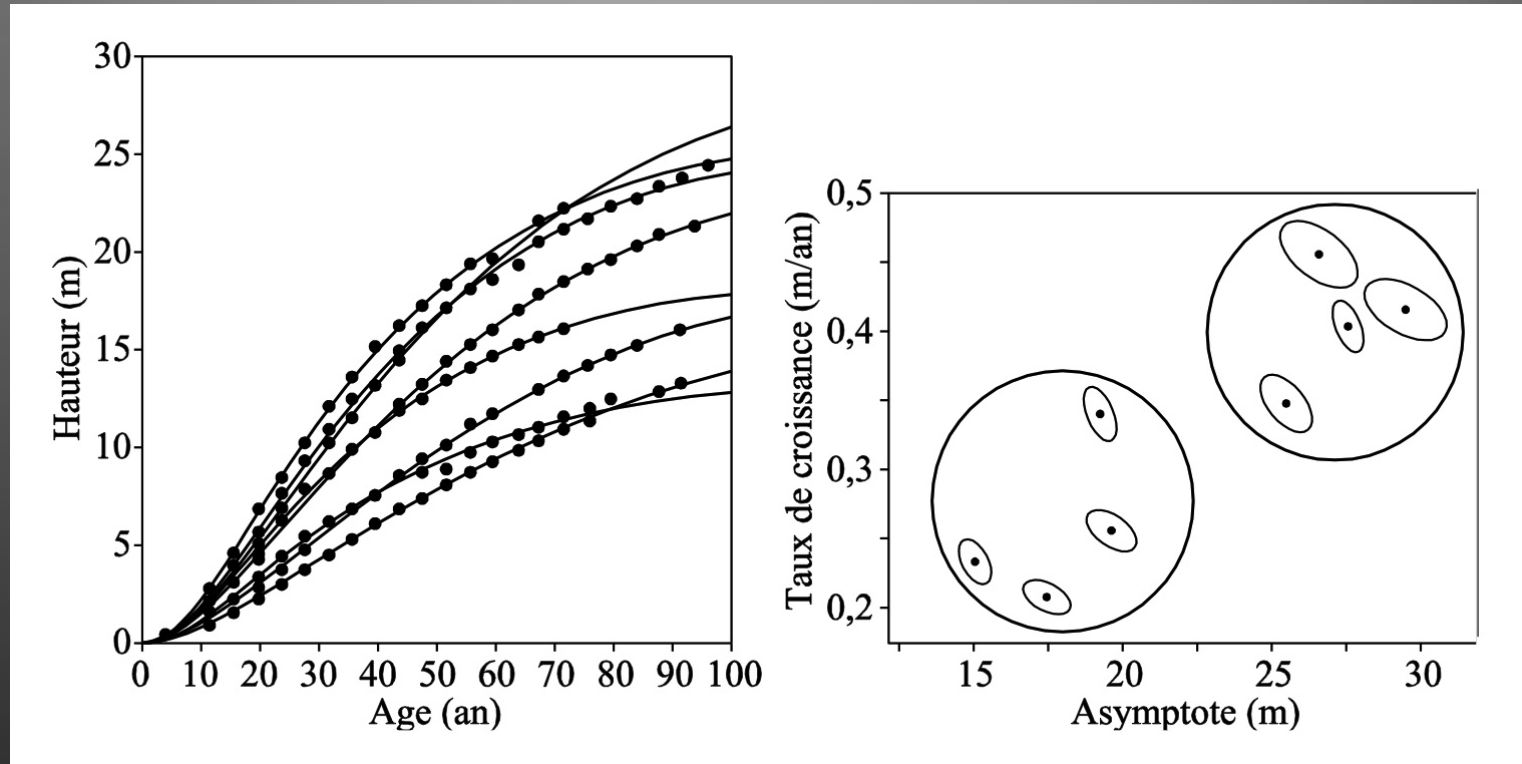
$$y = p_1 \left( 1 + \exp\left(\frac{p_2 - t}{p_3}\right) \right)^{-\frac{1}{p_4}}$$

Gompertz :

$$y = p_1 \exp\left[ \frac{1}{e \frac{p_2 - t}{p_3}} \right]$$



# Comparaison de courbes de croissance



Houllier F., Échantillonnage et modélisation de la dynamique des peuplements forestiers. Application au cas de l'Inventaire Forestier National, Thèse de Doctorat de l'Université Claude Bernard - Lyon 1, 1986.

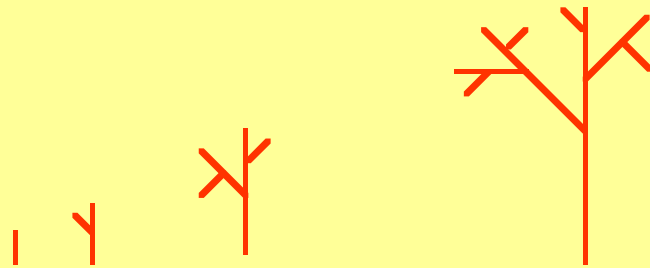
Pavé A., Corman A., Bobillier-Monot B., *Biométrie-Praximétrie*, n° 26, p. 123-140, 1986.

# Formes

axiome : {a}

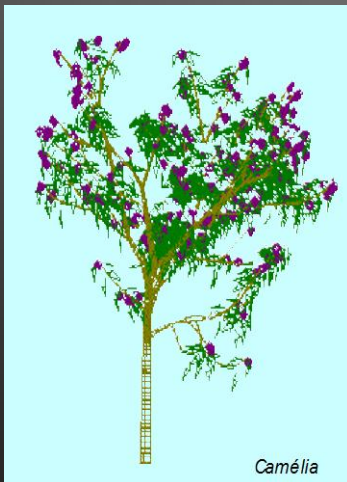
vocabulaire : {a, b, [, ]}

règles : {a -> b[a]a, b-> bb, [->[, ]->]}

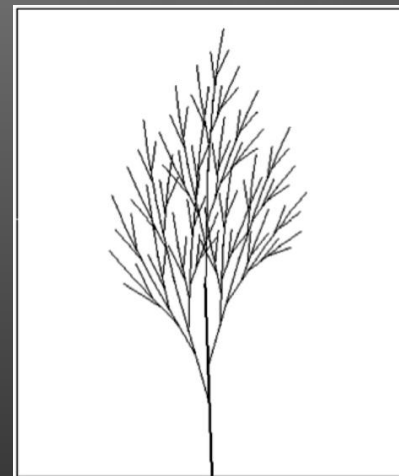


a    b[a]a    bb[b[a]a]b[a]a    bbbb[bb[b[a]a]a]bb[b[a]a]b[a]a

Lindenmayer



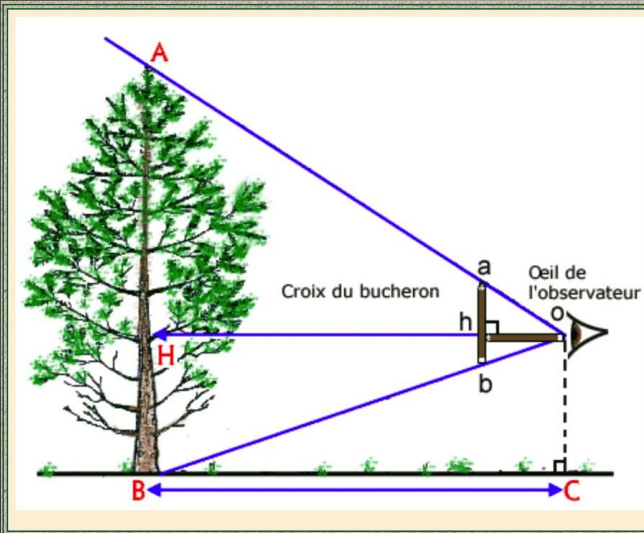
Amap



Fractale



# Mesures



## Estimation d'une hauteur à l'aide de la croix du bûcheron

- Prendre deux crayons (ou bâtons) de même dimension (sur le schéma :  $ab = oh$ )
- Placer le premier crayon en position horizontale et le deuxième en position verticale.
- Se placer face à l'objet à estimer (ici un arbre), à une distance voisine approximativement de sa hauteur.
- Faire coïncider sur une même ligne, le pied de l'arbre, le bas du bâton et son œil.
- Faire de même, en se déplaçant si nécessaire, pour que coïncident le haut de l'arbre, le haut du bâton et l'œil.
- Lorsque les deux extrémités de l'arbre correspondent bien aux extrémités du bâton, mesurer la distance entre soi et l'objet. (BC sur le schéma)

La hauteur de l'arbre (ici AB) est alors égale à la distance BC.

## Hauteur



Instruments de mesures Photo : D. LAUBRAY

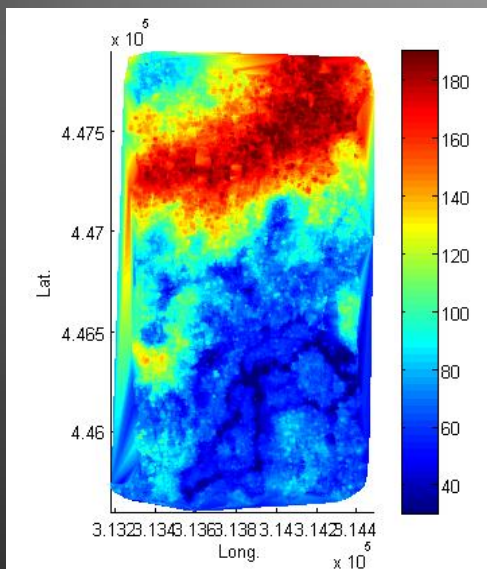
## Instruments de mesure du forestier



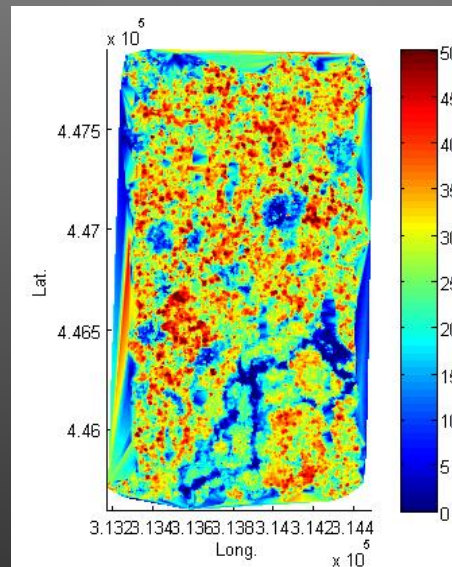
## âge

# Altimétrie Laser : mesure de la canopée Nouragues, 2010

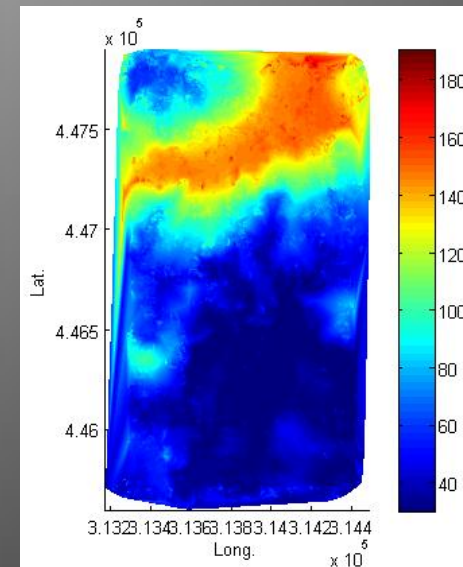
Données brutes



Hauteur canopée



Altitude sol



Cnes et Onera  
Projet Tropisar

# Principe (Altoa, Cnes)

