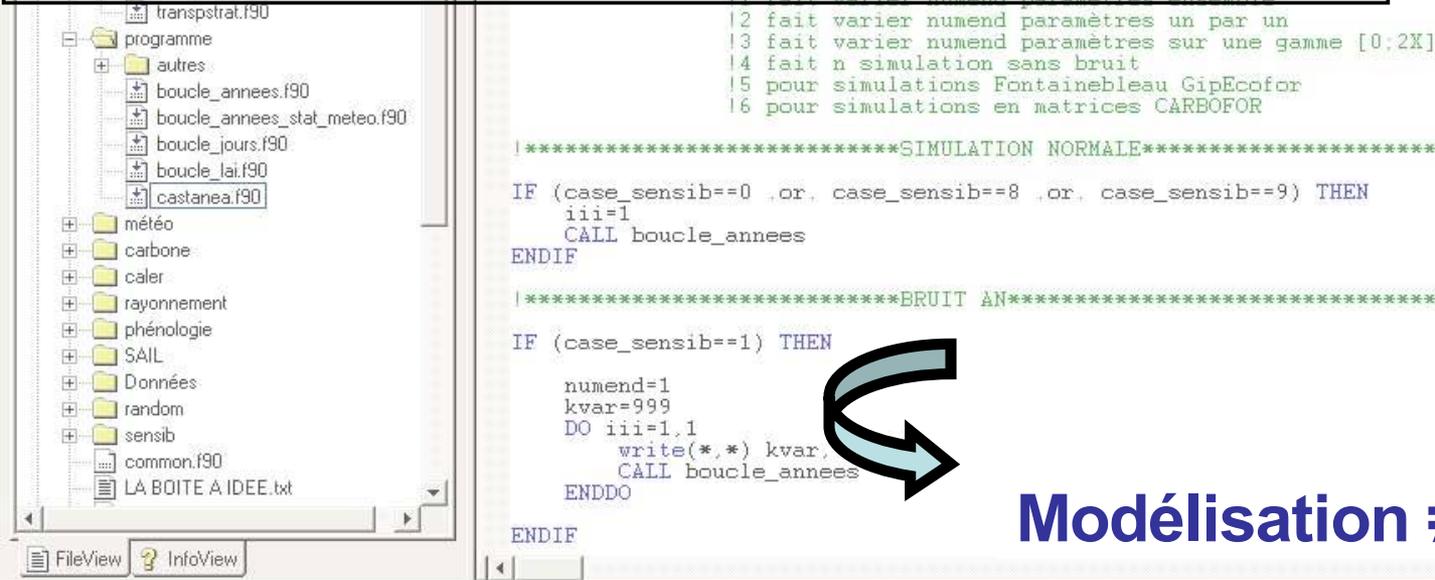


Introduction à la modélisation en écologie



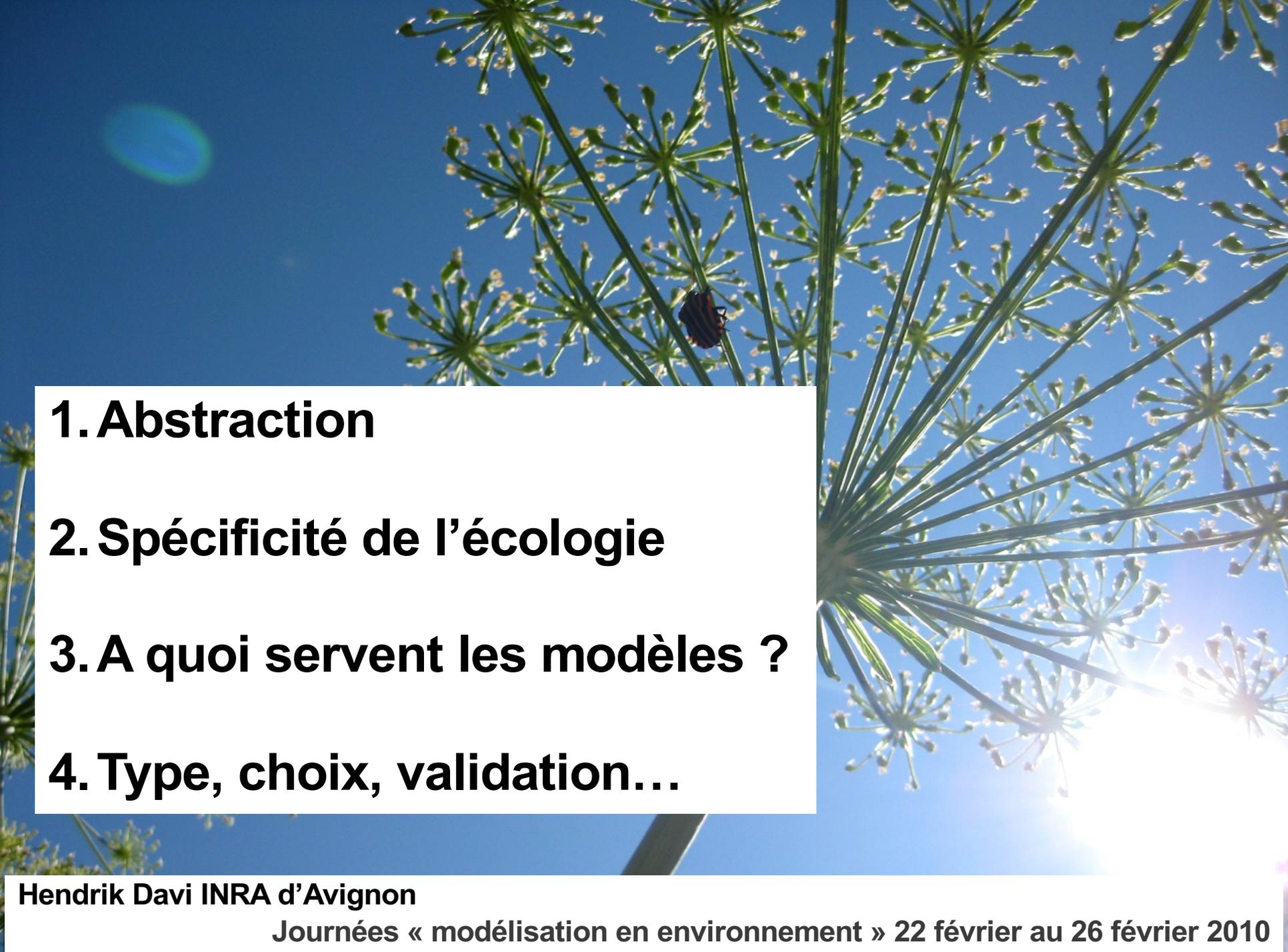
```

PROGRAM CASTANEA
IMPLICIT NONE
...
CALL intrandom()
...
! case_sensib est lu dans read_ini
! 0 pas d'étude de sensibilité
! 2 fait varier numend paramètres un par un
! 3 fait varier numend paramètres sur une gamme [0:2X]
! 4 fait n simulation sans bruit
! 5 pour simulations Fontainebleau GipEcofor
! 6 pour simulations en matrices CARBOFOR

!*****SIMULATION NORMALE*****
IF (case_sensib==0 .or. case_sensib==8 .or. case_sensib==9) THEN
  iii=1
  CALL boucle_annees
ENDIF

!*****BRUIT AN*****
IF (case_sensib==1) THEN
  numend=1
  kvar=999
  DO iii=1,1
    write(*,*) kvar
    CALL boucle_annees
  ENDDO
ENDIF
  
```

Modélisation ≠ informatique



1. Abstraction

2. Spécificité de l'écologie

3. A quoi servent les modèles ?

4. Type, choix, validation...

1. Abstraction?

Définir un système !!!!!!!!!!!

Champ de recherches scientifiques



Question(s)
Spécifique(s)



Réalité

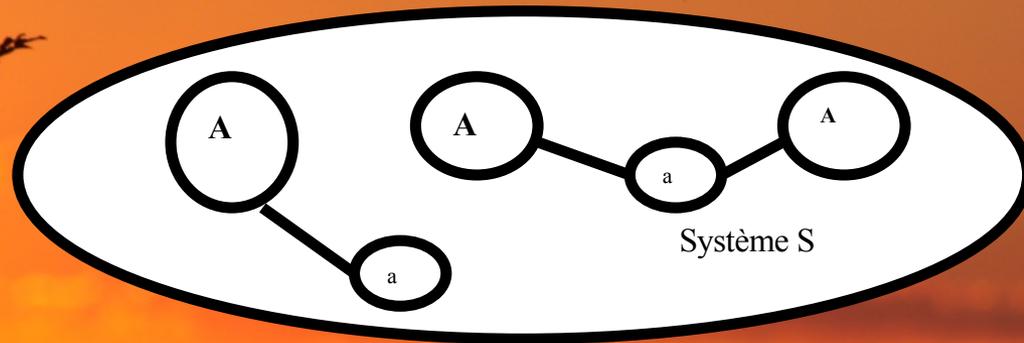


Modéliser

- 1. Construire une abstraction d'une réalité en définissant un système**

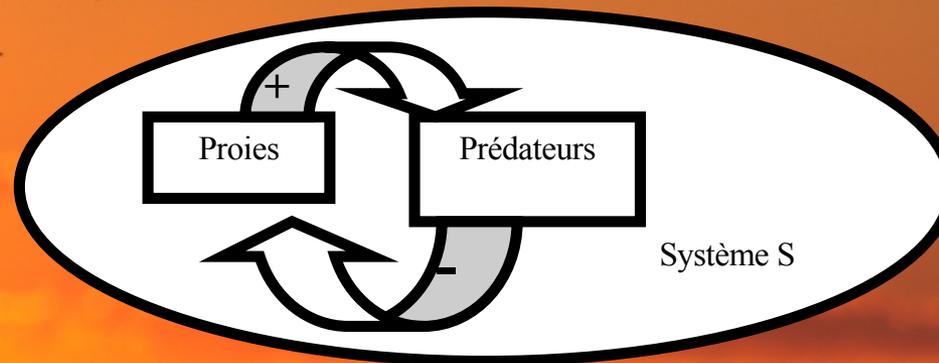
Notion de système

1. un système se définit comme une collection d'objets en interactions :



Notion de système

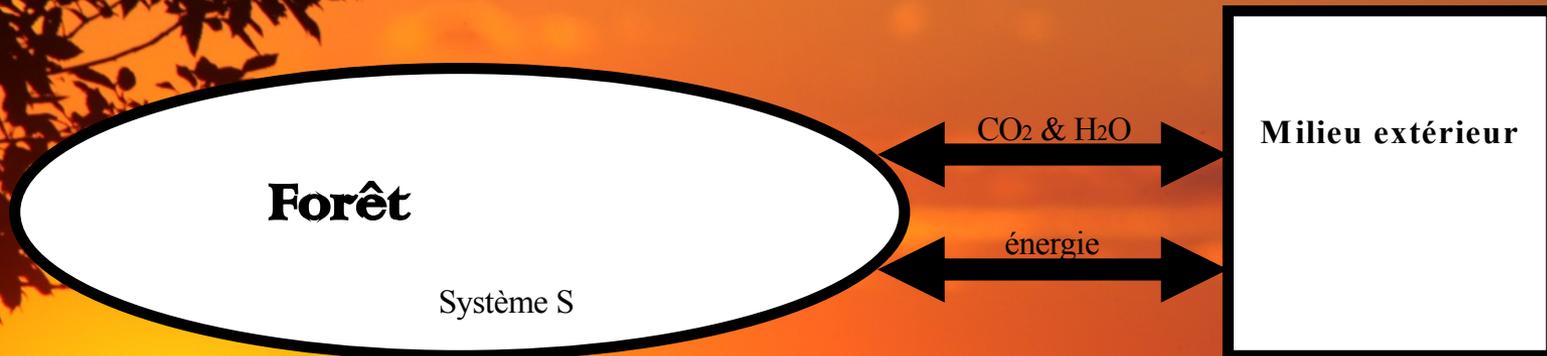
2. Un système est dynamique si les interactions modifient l'état du système



Existence de boucles de retro-actions négatives ou positives => cybernétique

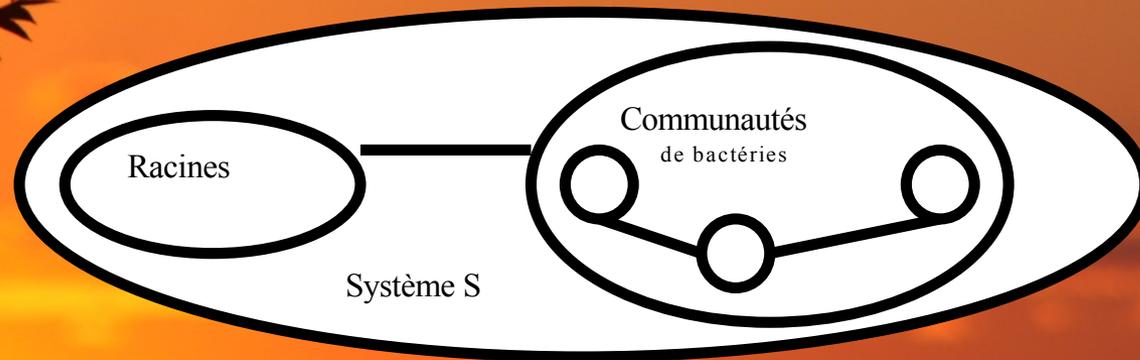
Notion de système

3. Les systèmes naturels sont en général non isolés (ils échangent de l'énergie) et ouverts (ils échangent de la matière).



Notion de système

4. Un système peut être constitué d'une collection de sous systèmes, ce qui pose des questions de **hiérarchisation** et de définition de limites de systèmes.



Notion de système

5. Entité, attribut, activité et état d'un système

Entités	Arbres Herbivores
Attributs	Biomasse Hauteur Effectifs
Activités	Photosynthèse Alimentation
État	Σ Entités attributs et activités

objet

variables

fonctions

Notion de système: CONCLUSION



Définir les contours du système (spatiaux et temporels), le choix des objets étudiés => 1^{ère} ETAPE

la mise en équations



Quelle équation pour représenter une fonction ou une interaction entre deux objets ?

Taux de pollinisation = $f(\text{variables})$



Fonction biologique

Choix du type d'équation dépend aussi de la question et du système....

Abstraction: conclusion

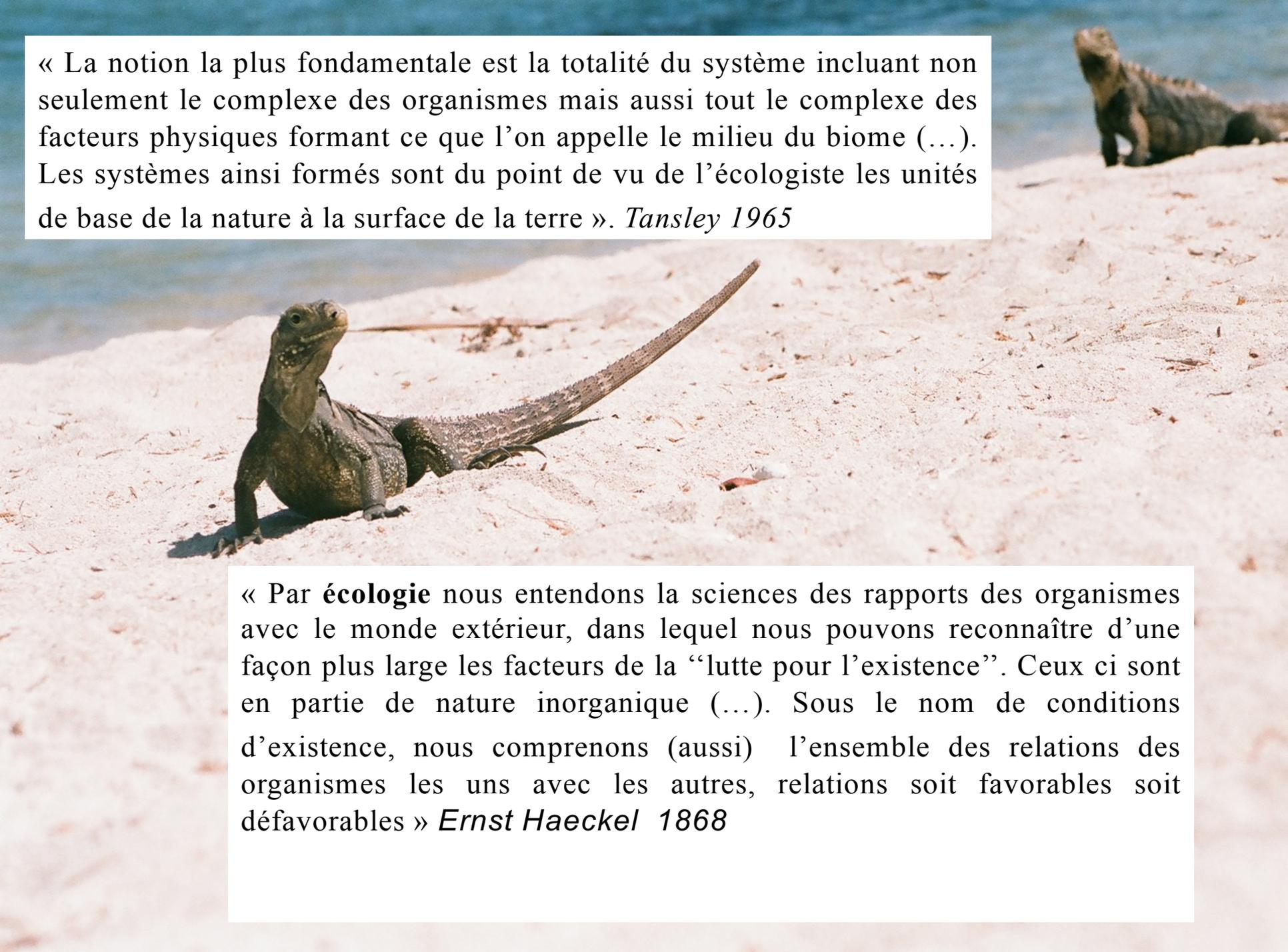
- 1. Ce n'est pas coder informatiquement des équations données**
- 2. C'est définir un système**
- 3. Et choisir les équations pour quantifier les interactions et les fonctions**
- 4. Le TOUT en fonction d'une question !!!!**



Spécificité de l'écologie

Hendrik Davi INRA d'Avignon

Journées « modélisation en environnement » 22 février au 26 février 2010

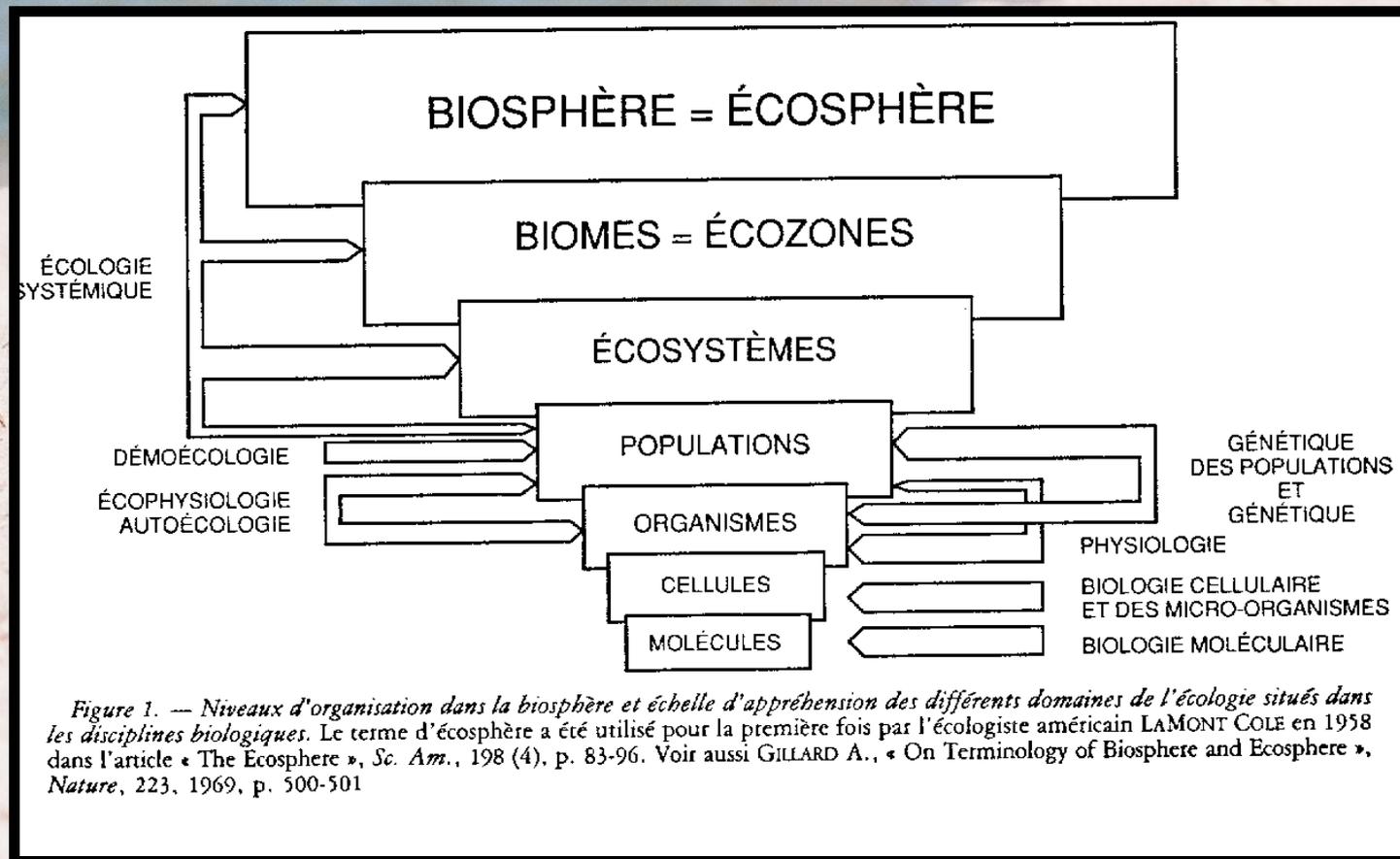


« La notion la plus fondamentale est la totalité du système incluant non seulement le complexe des organismes mais aussi tout le complexe des facteurs physiques formant ce que l'on appelle le milieu du biome (...). Les systèmes ainsi formés sont du point de vu de l'écologiste les unités de base de la nature à la surface de la terre ». *Tansley 1965*

« Par **écologie** nous entendons la sciences des rapports des organismes avec le monde extérieur, dans lequel nous pouvons reconnaître d'une façon plus large les facteurs de la "lutte pour l'existence". Ceux ci sont en partie de nature inorganique (...). Sous le nom de conditions d'existence, nous comprenons (aussi) l'ensemble des relations des organismes les uns avec les autres, relations soit favorables soit défavorables » *Ernst Haeckel 1868*

- 
- 1. Notion de système est fondamentale**
 - 2. Importance des interactions: systèmes dynamiques**
 - 3. Complexité des systèmes vivants**
 - 4. Hiérarchie d'échelles spatiale et temporelle**
 - 5. Composante stochastique / déterministe**

Échelle spatiale et temporelle

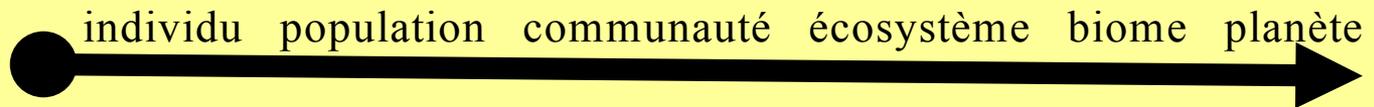


Échelle spatiale et temporelle

- Question méthodologique
- Question scientifique en soi
- Pressions sociétales: feuilles – région – globe
- Modèle : outil puissant

Échelle spatiale et temporelle

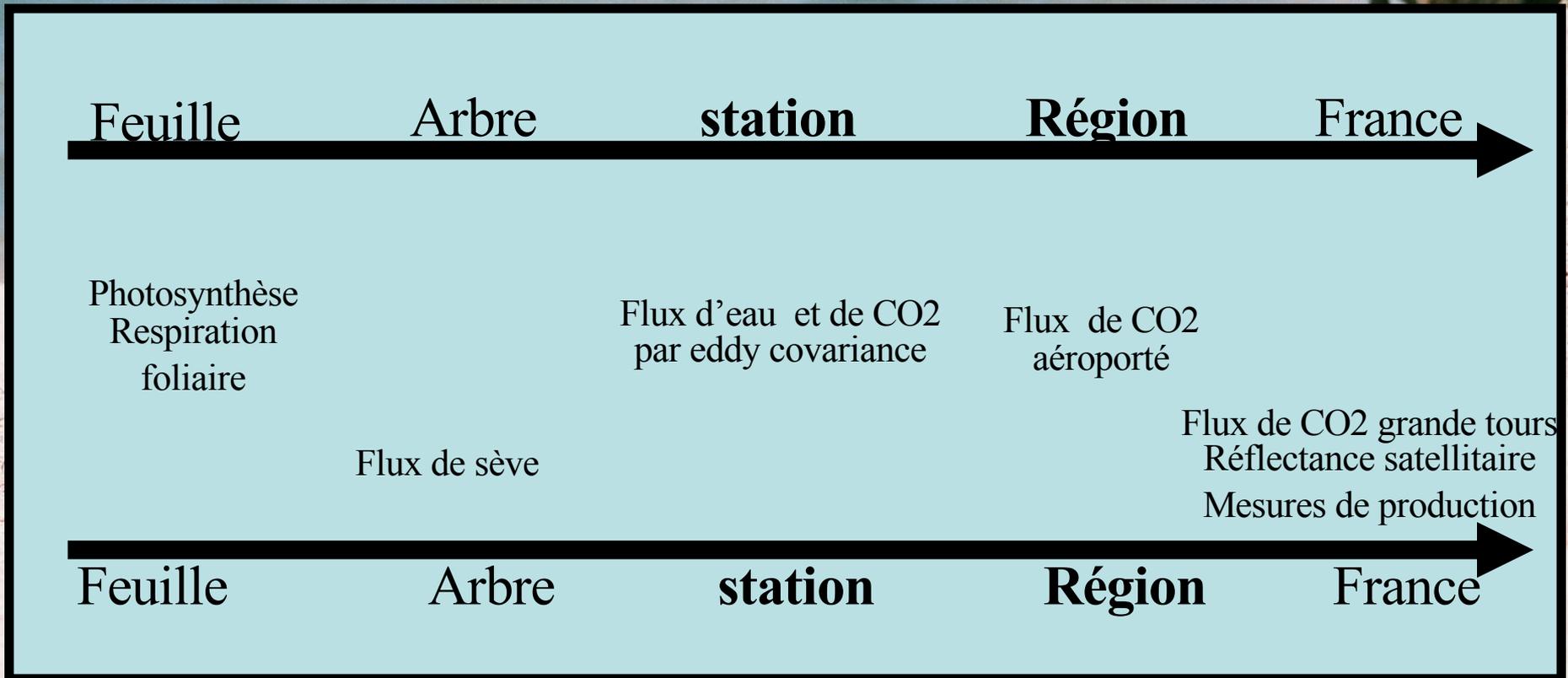
1. La dépendance d'échelle
2. Résolution / Niveau d'observation
3. Les organisations hiérarchiques



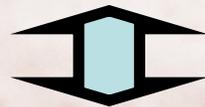
Les niveaux supérieures

1. ont une dynamique plus lente
2. constituent le cadre de fonctionnement des niveaux inférieurs
3. ont des liens entre éléments plus lâches
4. imposent des contraintes sur les éléments inférieurs

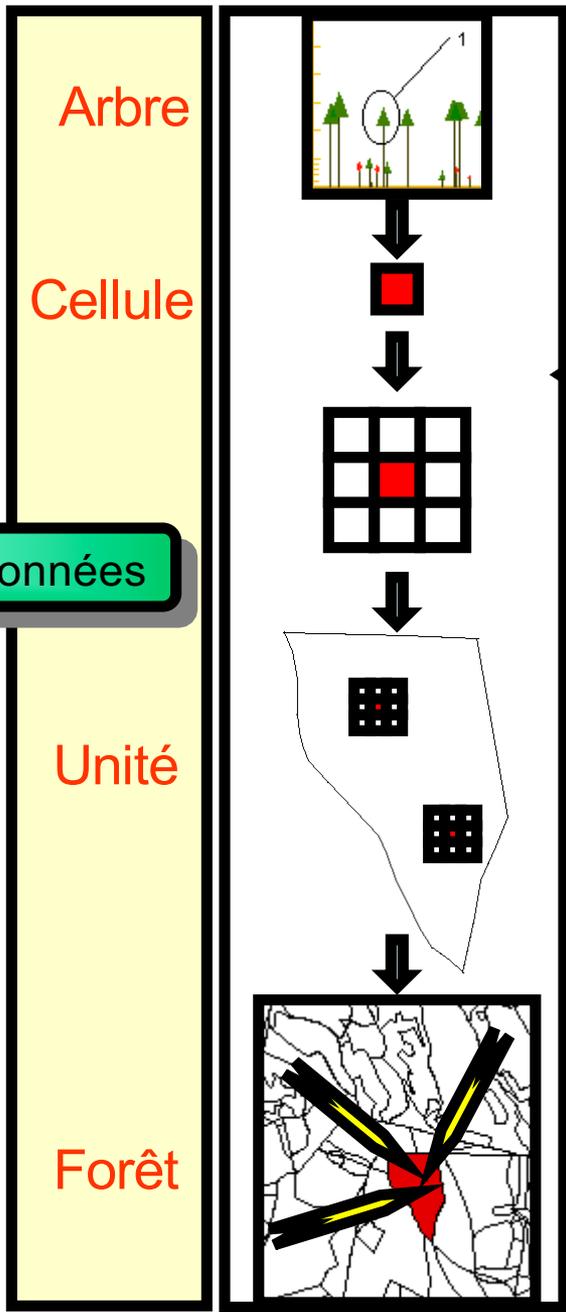
Échelle spatiale et temporelle



Processus fonctionnant à une échelle très fine



Questions scientifiques et sociétales une échelle très large



Structure de données

individu (semis ou arbre adulte)

interactions entre individus

cellule de 10 x 10 m²

interactions entre cellules

groupe de cellules

extension :
échantillon de groupes → UA

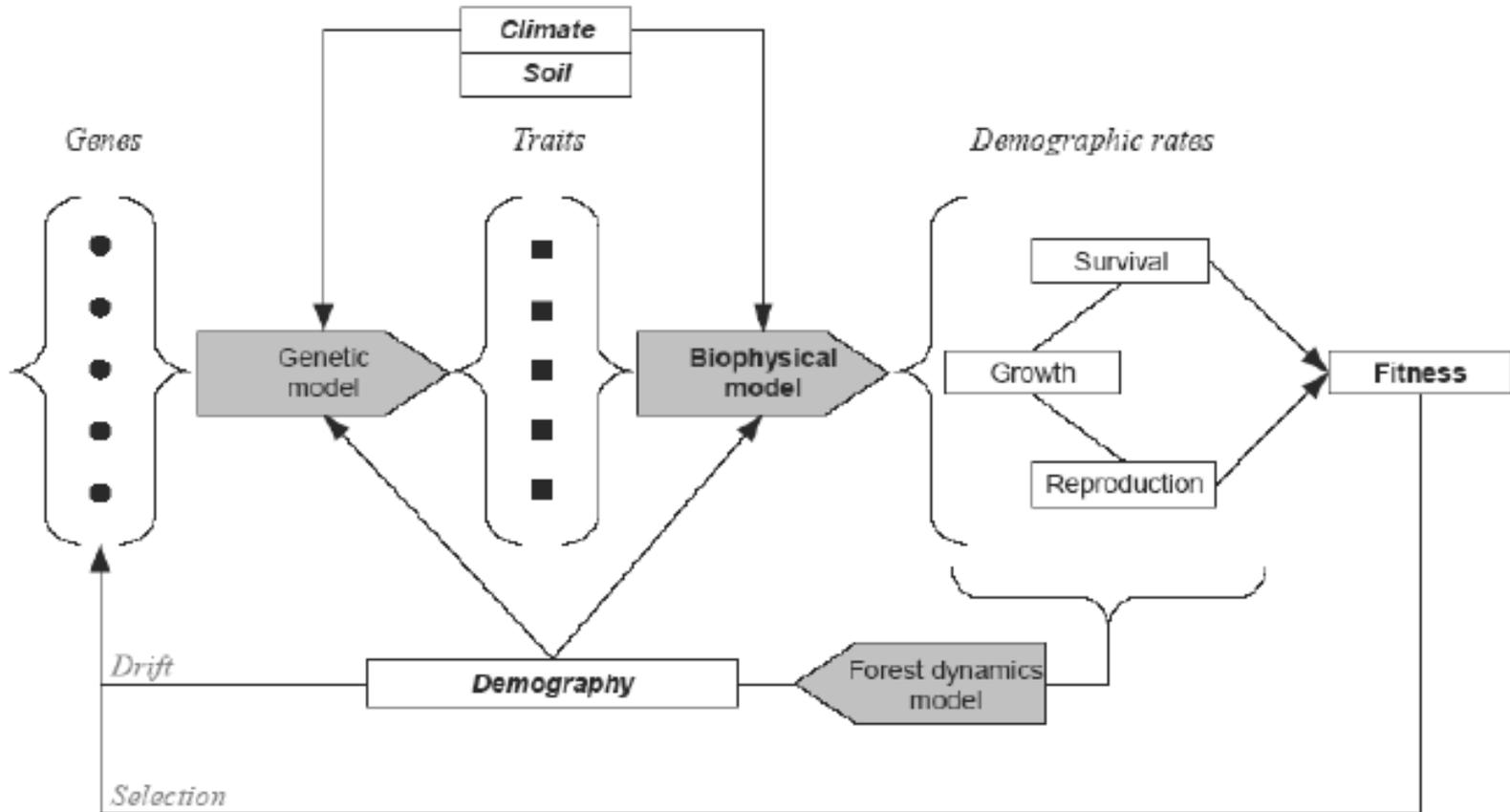
« **Unité d'Analyse** » homogène :
- station forestière / essences

interactions :
via les flux de graines

forêt (1 parcelle = N unités d'analyse)
massif = forêt + espaces naturels

Complexité des interactions

Modéliser réponse au climat d'une forêt



Que doit on laisser de côté ?

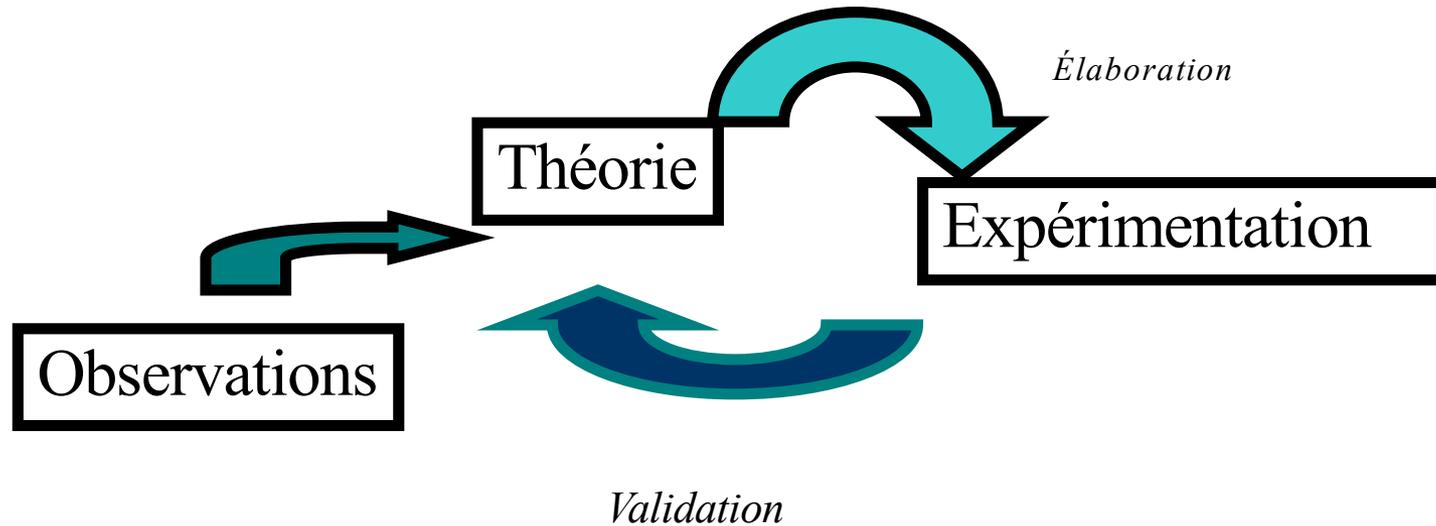


A quoi sert la modélisation?

Hendrik Davi INRA d'Avignon

Journées « modélisation en environnement » 22 février au 26 février 2010

1. Modèle comme analogue de la théorie



« Nous avons dit (...) qu'au point de vue du raisonnement expérimental les mots *observation* et *expérience* pris dans un sens abstrait signifient, le premier, la constatation pure et simple d'un fait, le second le contrôle d'une idée par un fait (...). La simple constatation des faits ne pourra jamais parvenir à constituer une science » *Claude Bernard*

1. Modèle comme analogue de la théorie

THE SCHISM BETWEEN THEORY AND ARDENT EMPIRICISM:
A REPLY TO SHIPLEY AND PETERS

Tilman 1991

Ecological research, like all science, is most effective if it is based on the continual interplay of observation, hypothesis generation (theory), and experimentation. Empiricism is clearly a part of this process, as is theory.

Shipley and Peters suggest that the falsification of one prediction of a mechanistic model indicates that the model is “wrong” and thus not useful in explaining other patterns. This is an extreme, absolute interpretation that sees a model as the mathematical embodiment of ecological truth. In contrast, mathematical ecologists view models as abstractions (e.g., Schaffer 1981)—simplifications that, in the words of May (1973, p. 12), are “caricatures of reality, and thus have both the truth and falsity of caricatures.” All models are caricatures

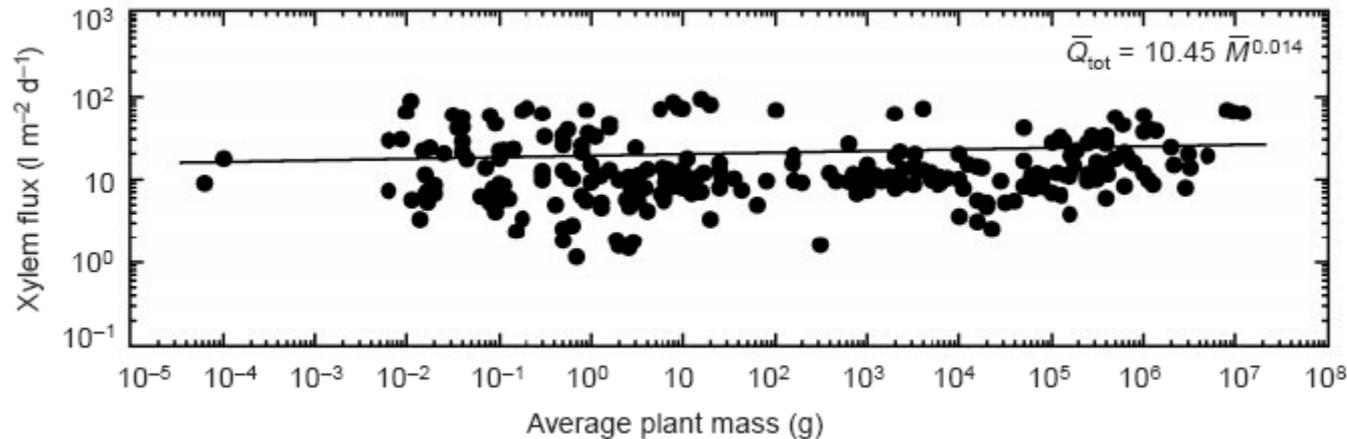
1. Modèle comme analogue de la théorie

Exemple I: Modèle d'Enquist (Nature 1998)

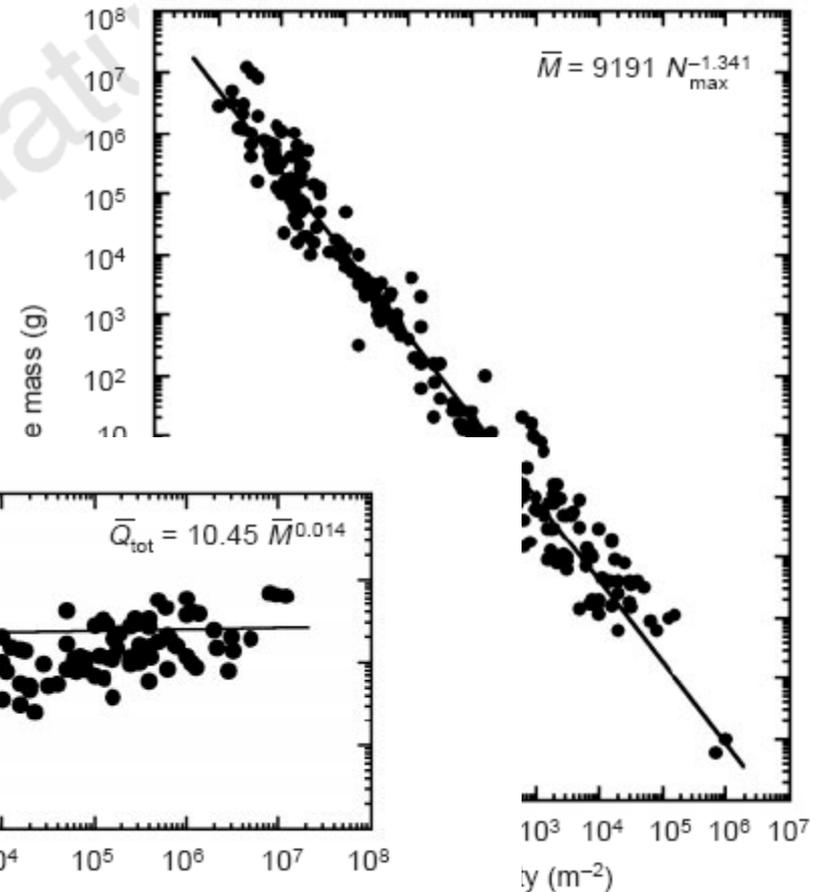
$$Q_{\text{tot}} = N_{\text{max}} \bar{Q} \propto \bar{M}^{-3/4} \bar{M}^{3/4} \propto \bar{M}^0.$$



Ressource totale utilisée

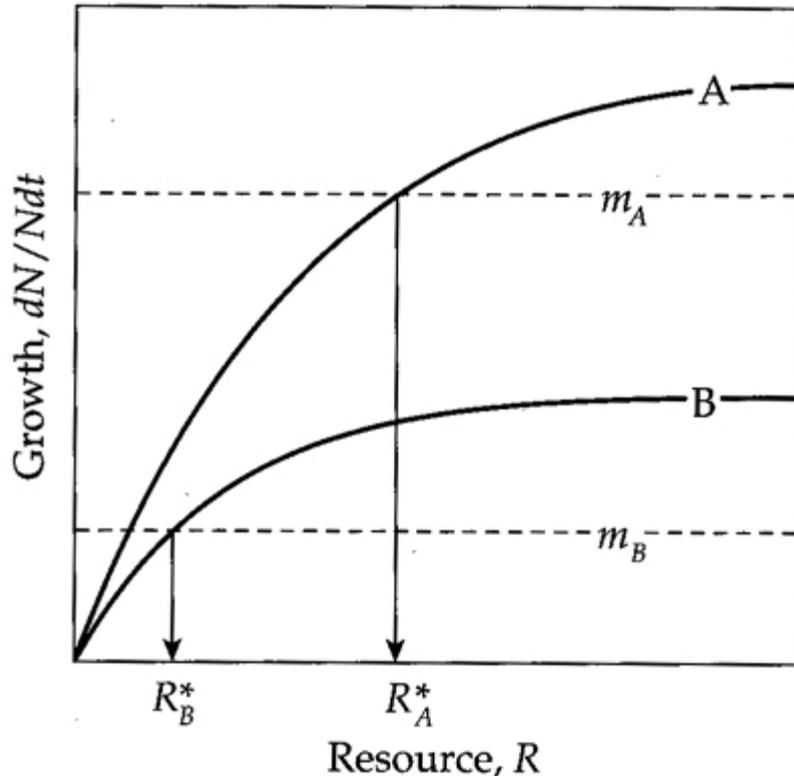


Relation entre masse et densité



1. Modèle comme analogue de la théorie

Exemple II: Modèle de Tilman (1985): Resource - Ratio Hypothesis



2 espèces en compétition, c'est l'espèce qui est capable de survivre au plus bas niveau de la ressource qui la contrôle

$$dW_i/W_i dt = \text{MIN}_{j=1,m} [r_i R_j / (R_j + K_{i,j})] - D_i W_i$$

$$dR_j/dt = a_j(S_j - R_j) - \sum_{i=1}^n Q_{i,j}(dW_i/dt)$$

2. Modèles pour décrire / simuler / prédire

Prédire l'évolution d'un écosystème, d'une population ou des flux de matière pour aider à la gestion

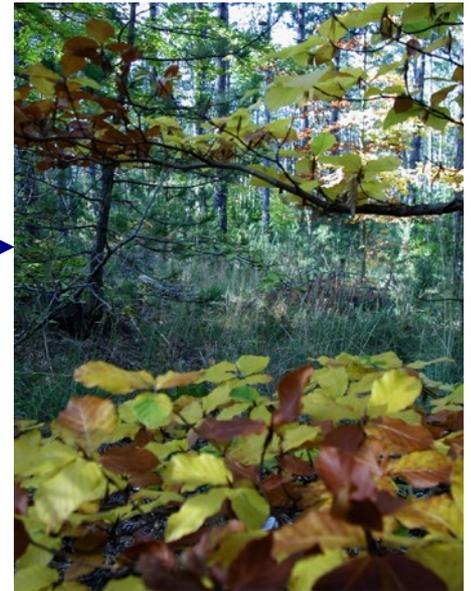
question

réalité



Modèles théoriques

Modèles « de simulation »



2. Modèles pour décrire / simuler / prédire

1. Modèles de régression statistiques

. Trouver des relation pour éviter de tout mesurer dans la nature

Le domaine de validité de la relation trouvée dépend de l'échantillon qui a permis son établissement.

Porte et al., 2002

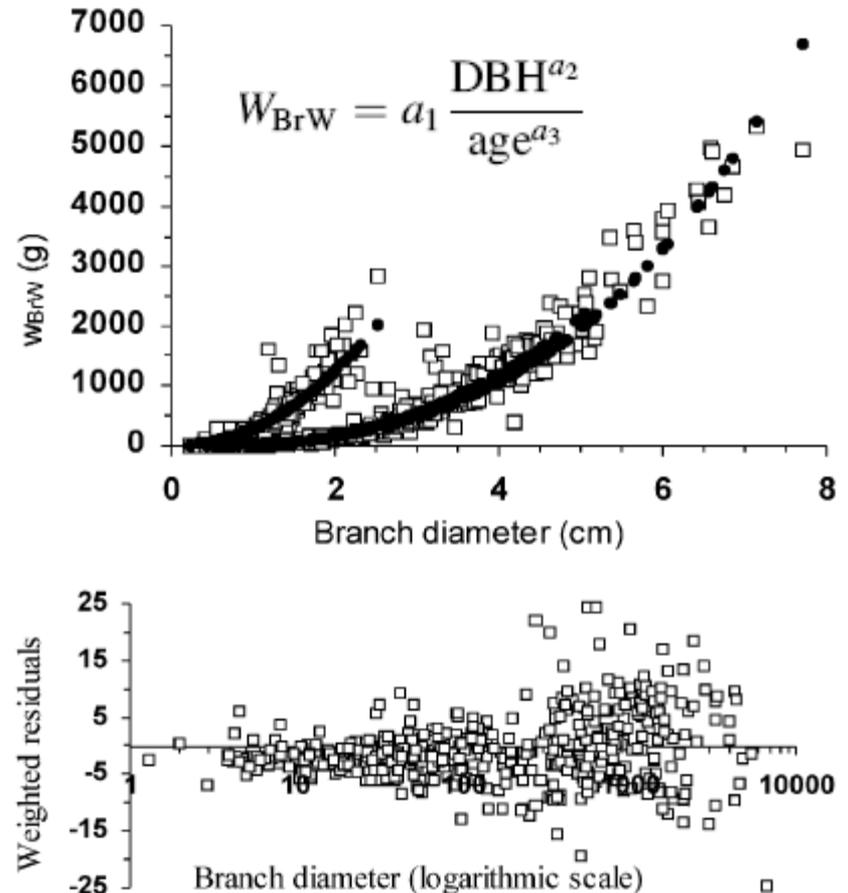
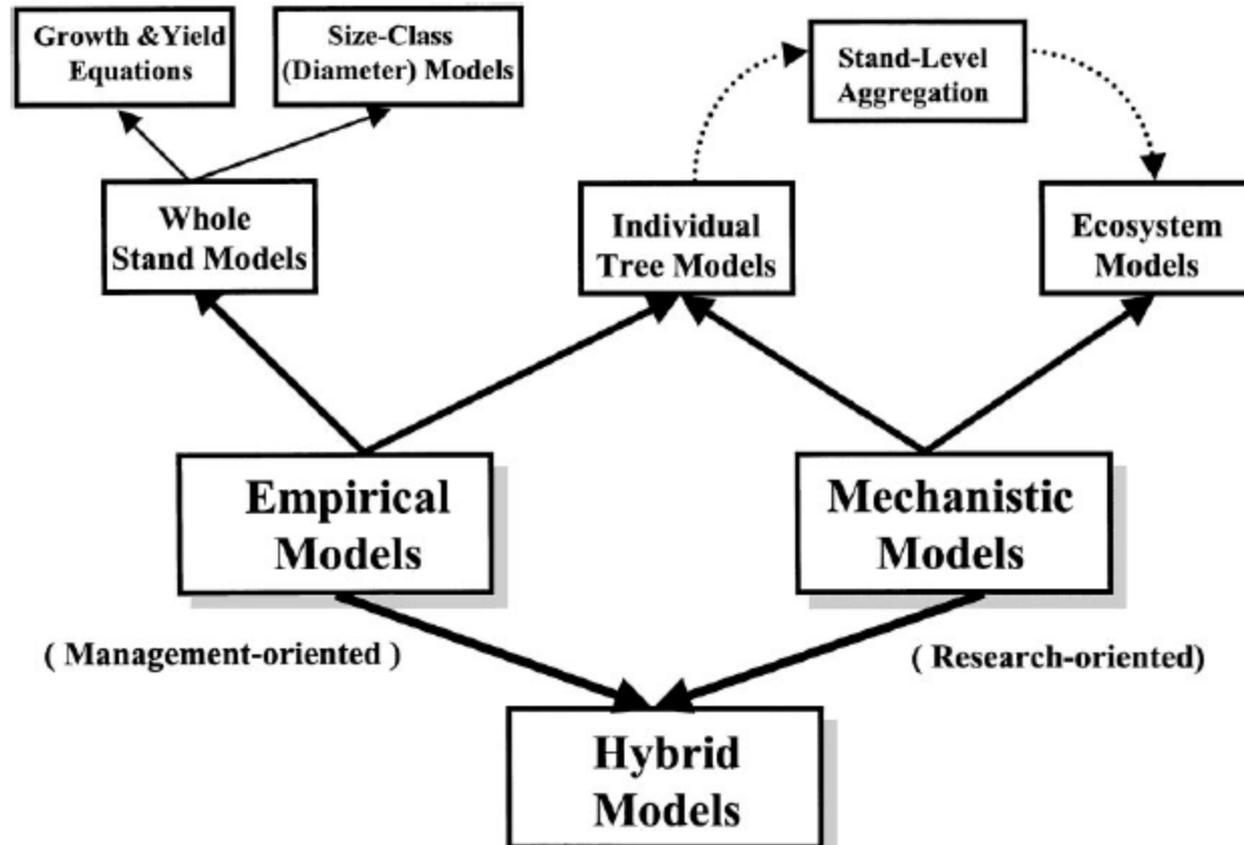


Fig. 1. Measured (\square) and estimated (\bullet) branch wood biomass (W_{BrW} , g) versus branch diameter (D10, cm), for the Hermitage,

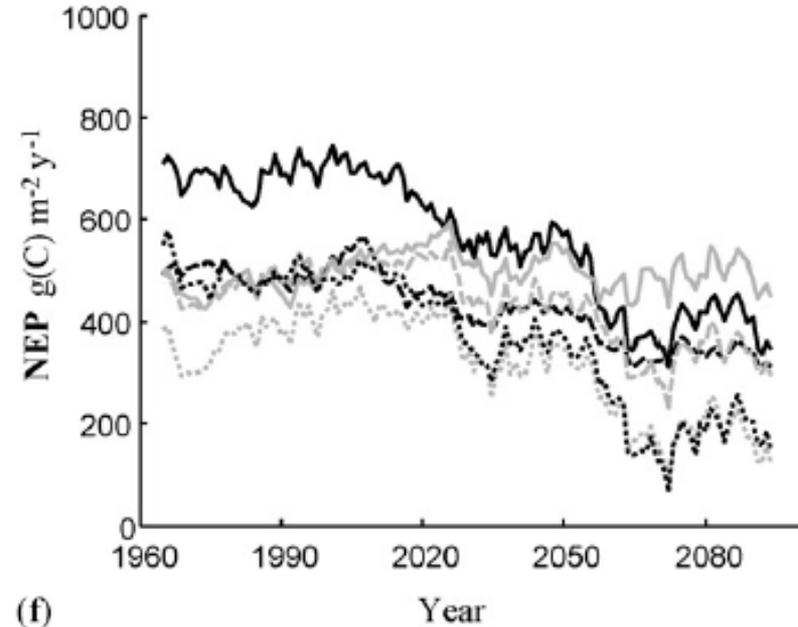
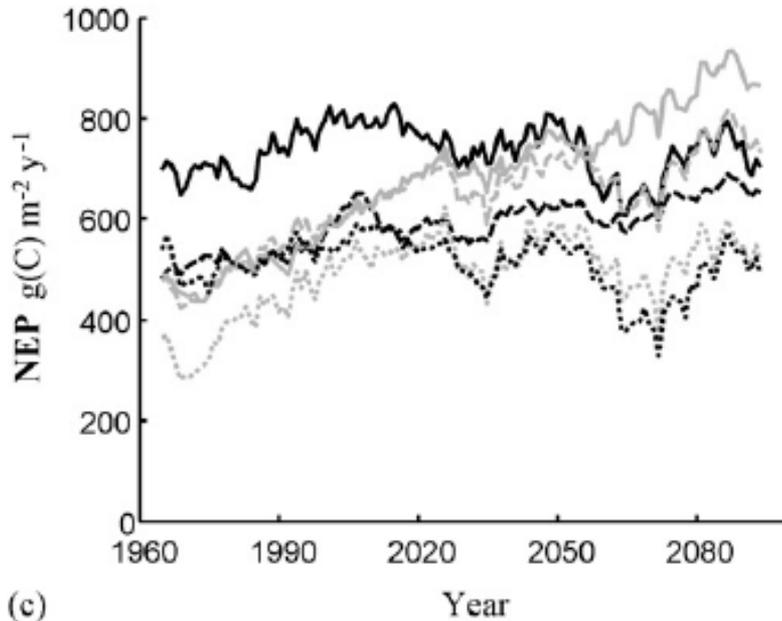
1. Modèles de simulation composés de plusieurs régressions statistiques



Peng et al., 2000 (Potential Approach for both Management and Research)

Fig. 1. Classification of forest growth and yield models for uneven-aged stands.

2. Modèles basés sur les processus physiques et physiologiques

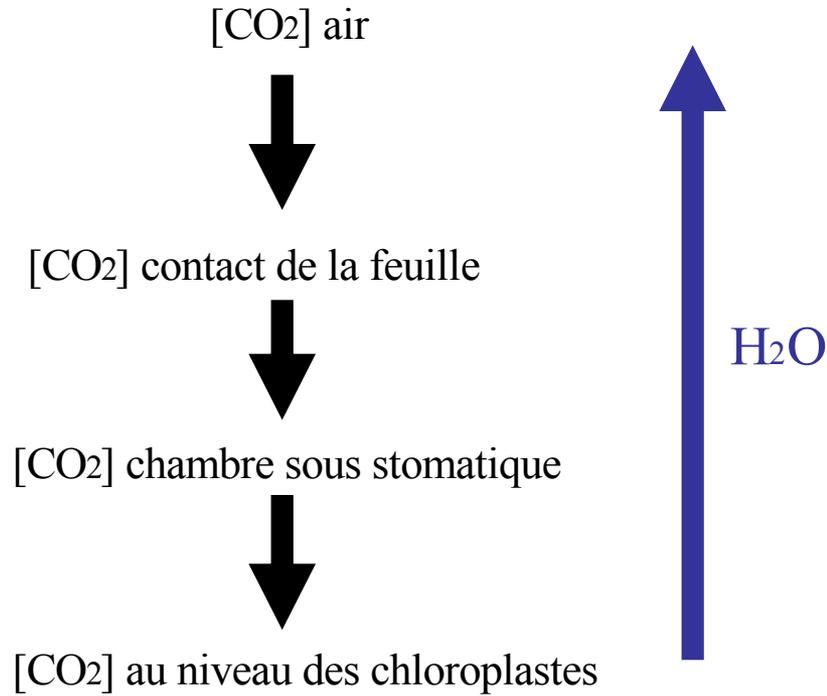


- Pinus pinaster (SW)
- - - Quercus ilex (SE)
- Fagus sylvatica (NE)
- Quercus petraea (N)
- - - Fagus sylvatica (N)
- Pinus sylvestris (N)

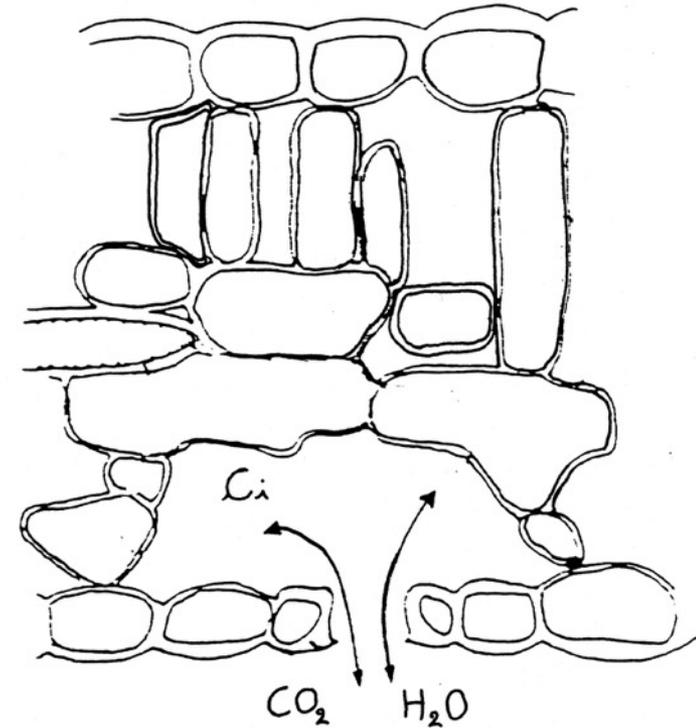
Davi et al., 2006

2. Modèles basés sur les processus physiques et physiologiques

A] Le trajet du CO_2 , l'ouverture stomatique



Ouverture stomatique dépend de la turgescence des cellules des gardes



Ex: CASTANEA (Dufrêne et al., 2005)

PROGRAM CASTANEA

```
IMPLICIT NONE
CHARACTER *80 bufferleg
INTEGER parcel, i1, i2, i3, i4, i5, i6, ss, nsim
INCLUDE 'common.f90'
INCLUDE 'common_rand.f90'
```

```
CALL initrandom()
```

```
CALL open_files
```

```
ini
de sensibilité
numend paramètr ensemble
numend param
numend param
ation sans b
ions Fontain
ions en matr
MULATION NOR
nsib==8 ,or
UIT AN*****
ENDDO
ENDIF
```

Bilan C foliaire

$$N_s = f(N_m) * LMA$$

Selon Ryan

$$R_f = f(N_s, T)$$

selon Farquhar

$$A = f(N_s, T, PAR)$$

selon Ball & al

$$G_s = f(A, HR)$$

Bilan C couvert

PAR (Verhoeff)

LMA

Gc

Bilan H₂O couvert

ETR
Penman
Monteith

Bilan C-H₂O-E écosystème

EP_{sol} (Penman)

C_{sol} (Parton)

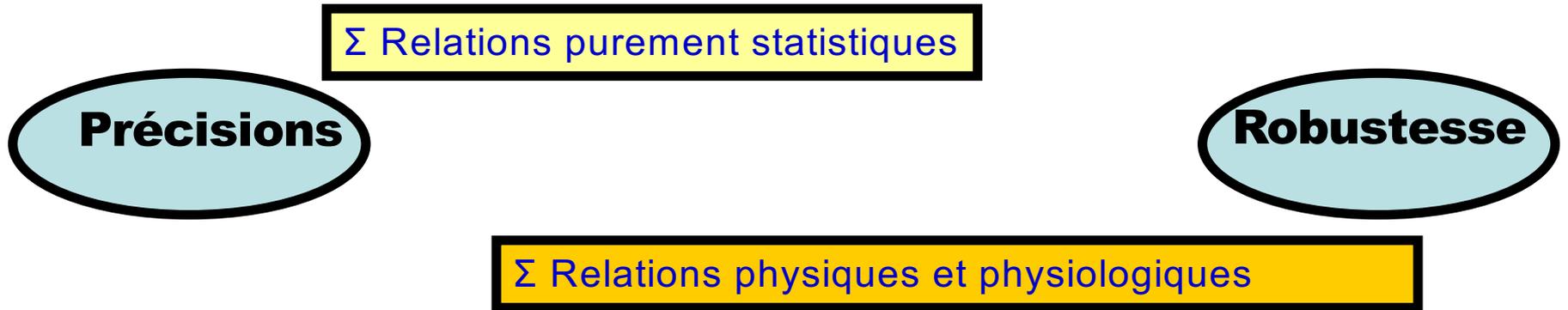
ΔB

Eau du sol

selon Sala & al

Modèle multicouche

2. Modèles pour décrire / simuler / prédire



Environnement / sites stables



Moins de paramètres



Grand nombre de données

Environnement changeant

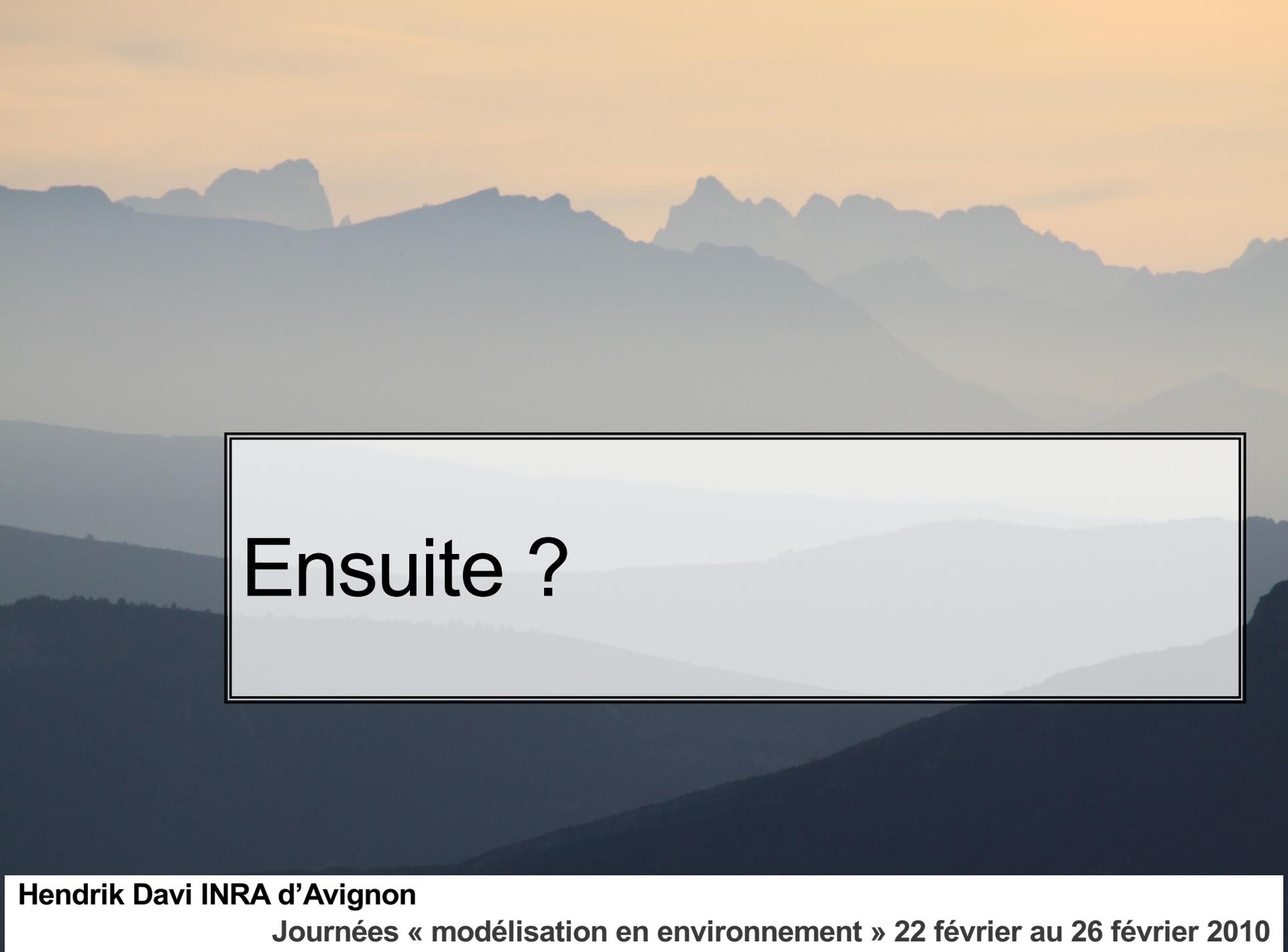


Beaucoup de paramètres



Moins de données





Ensuite ?

1. Différentes méthodes de modélisation

1. Analyses statistiques

- GLM
- ANOVA
- ACP
- séries temporelles

	Y qualitatif	Y quantitatif
X qualitatif	Test du χ^2	ANOVA
X quantitatif	Analyse discriminante	Régression linéaire
X qualitatif /quantitatif	Modèle linéaire généralisé	ANCOVA

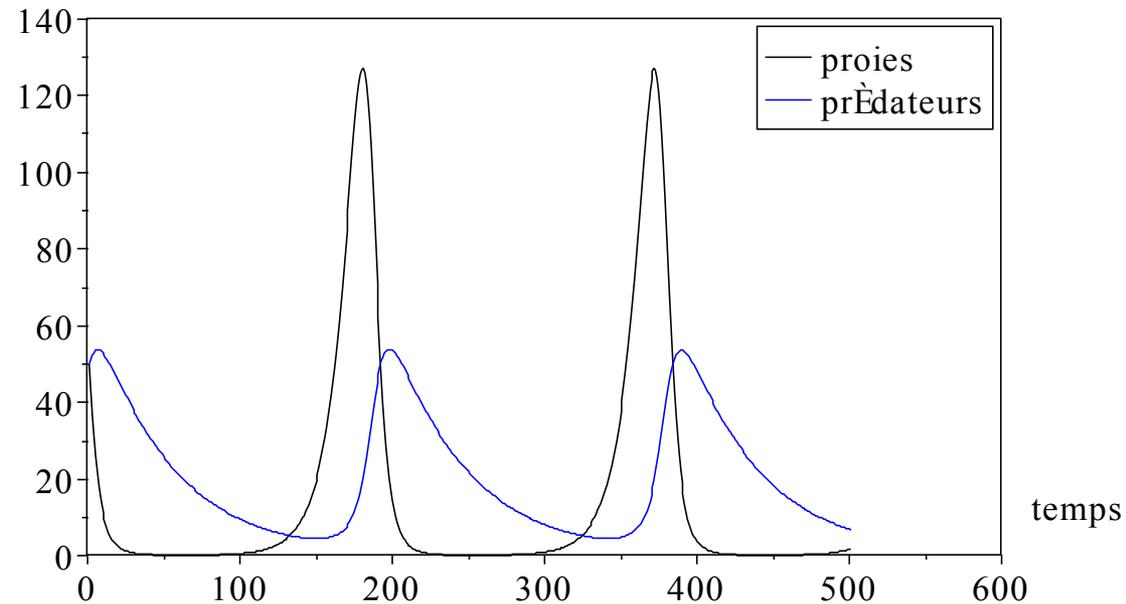
1. Différentes méthodes de modélisation

2. Modèles analytiques: Proies - prédateurs

$$\frac{dX}{dt} = r \times X - g \times X \times Y$$

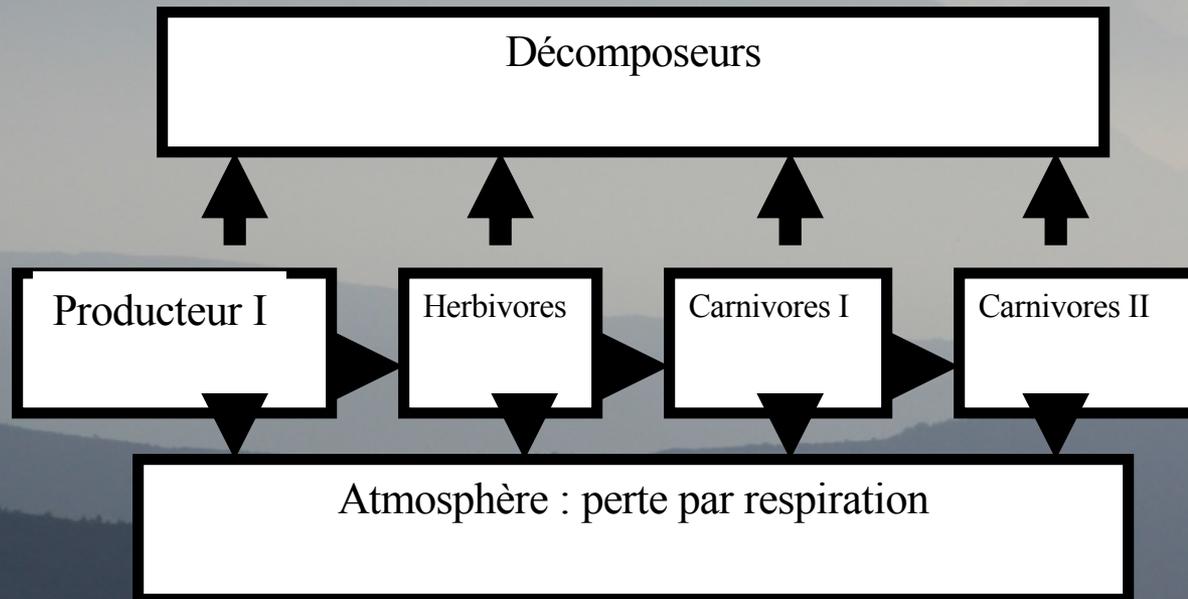
$$\frac{dY}{dt} = e \times g \times X \times Y - m \times Y$$

Évolution des populations de proies et de prédateurs



1. Différentes méthodes de modélisation

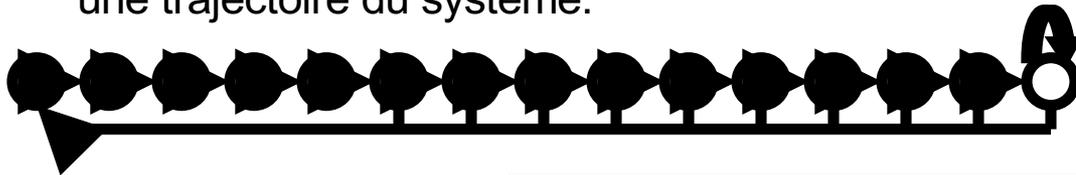
2. Modèles analytiques: Chaînes trophiques



$$\frac{dH}{dt} = \alpha \times P - \beta \times H - \varphi \times H - \lambda \times CI$$

3. Modèles stochastiques: Matrices de Leslie

Modèle probabiliste: évolution discrète du système: le passage d'un état à un autre se fait selon une probabilité donnée et fixe. La succession d'une série d'états correspond à une trajectoire du système.



15 classes d'âges



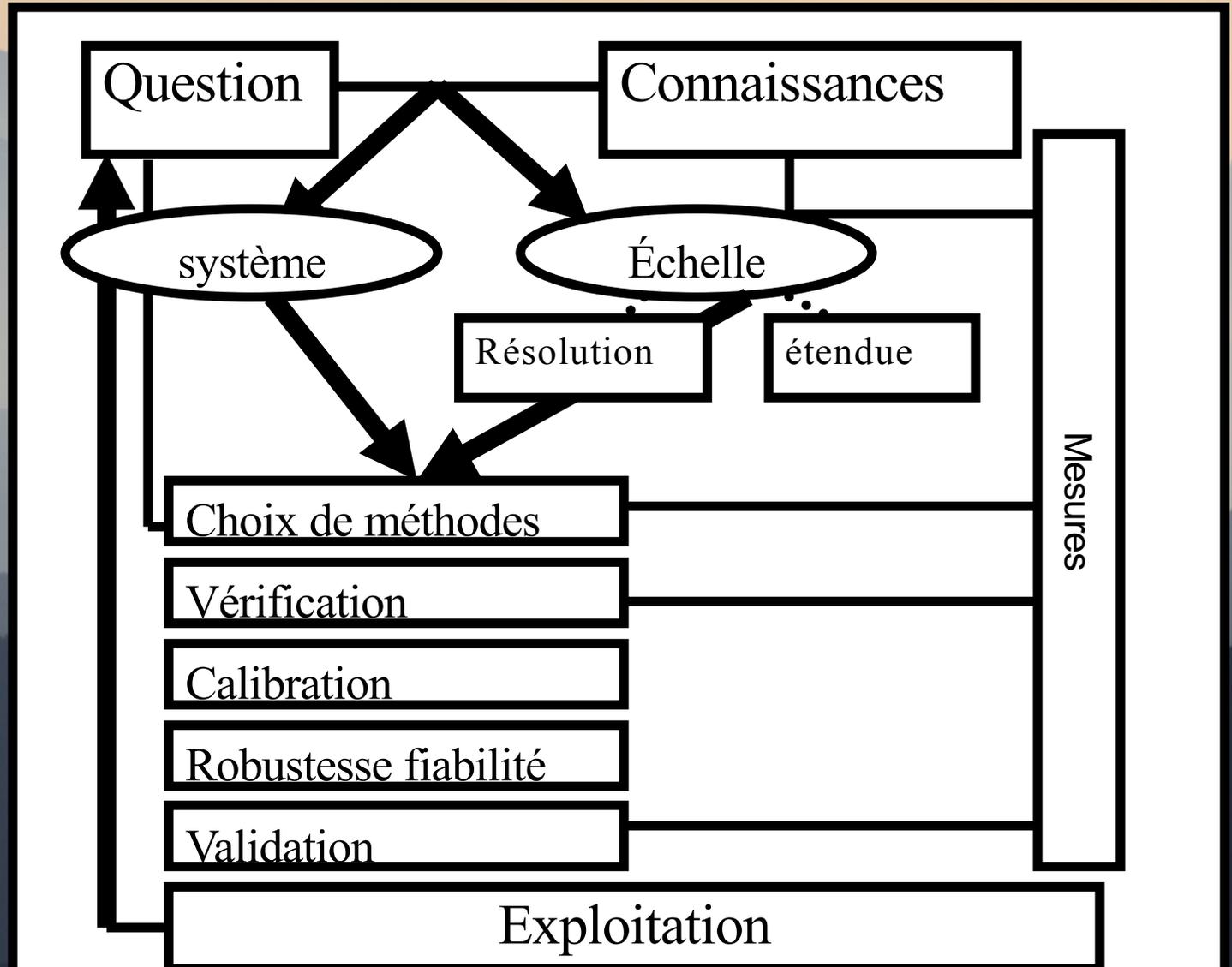
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0.008	0.023	0.036	0.042	0.054	0.061	0.072	0.077	0.082	0.094
2	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.923	0.923

4. Modèles de simulations

- Décrire les relations d'un système
- Préciser les boucles de temps
- Ordonner chronologiquement les relations

```
boucle années
for
  initialisation des nouvelles variables d'états
boucle journées
for
  boucle heures
for
  calcul de la photosynthèse horaire
end
calcul de l'entrée de carbone journalier
calcul de la respiration des organes
calcul des accroissements en biomasse
end
réalisation des bilans annuels
end
```

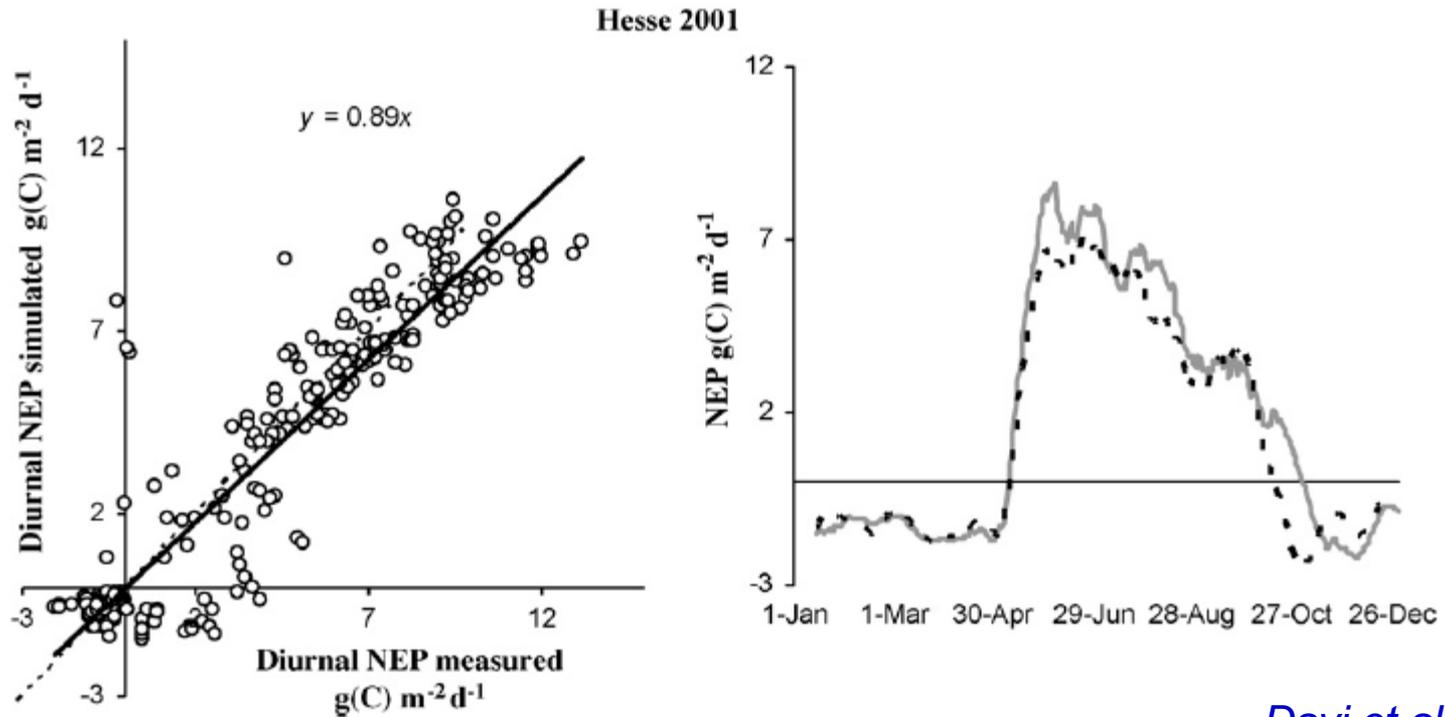
2. Différentes étapes



2. Différentes étapes: calibration / validation

Paramétrisation du modèle

- paramètres physiques ou physiologiques mesurées
- Calibration avec données indépendantes des données de validation



Davi et al., 2006

MERCI

