

Introduction à la modélisation en écologie



Modélisation $\neq$ informatique

Hendrik Davi INRA d'Avignon

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



1.Abstraction

2.Spécificité de l'écologie

3.A quoi servent les modèles ?

4.Type, choix, validation...

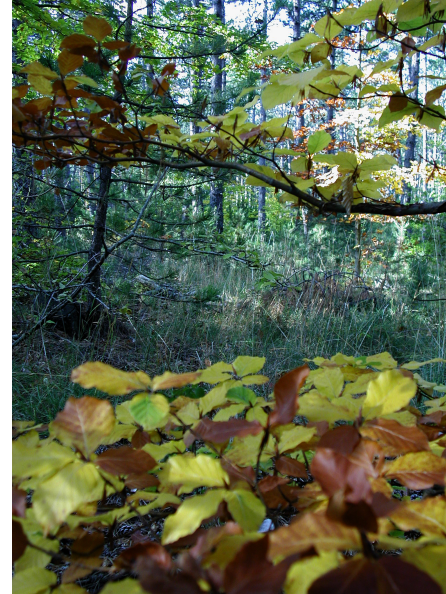
1. Abstraction?

Définir un système !!!!!!!!!!!

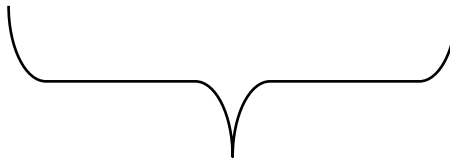


Champ de recherches scientifiques

Question(s)
Spécifique(s)



Réalité

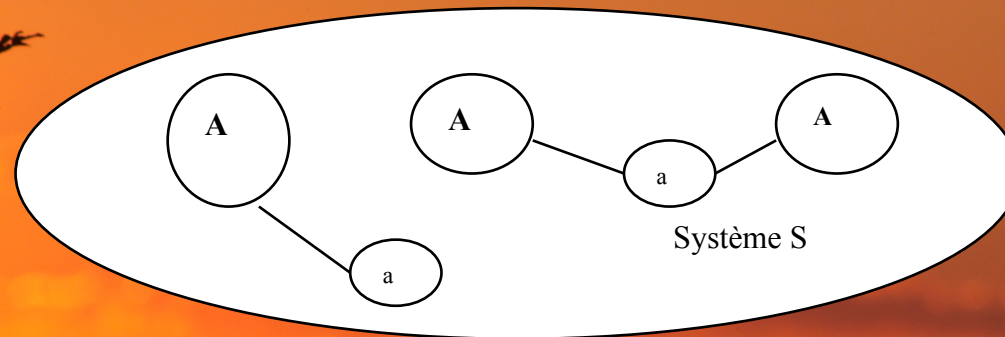


Modéliser

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

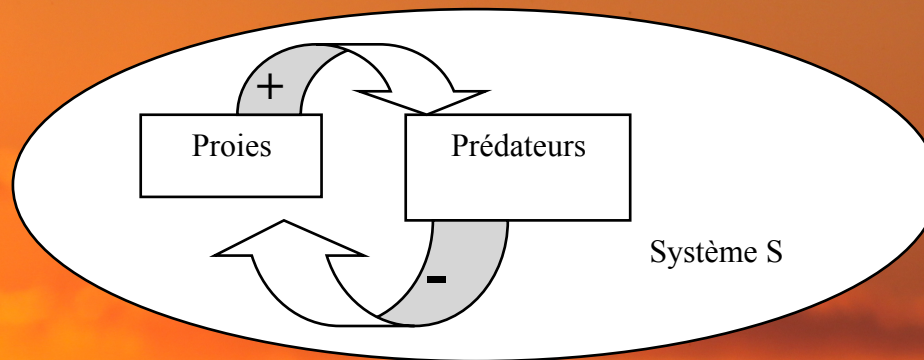
Notion de système

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



Notion de système

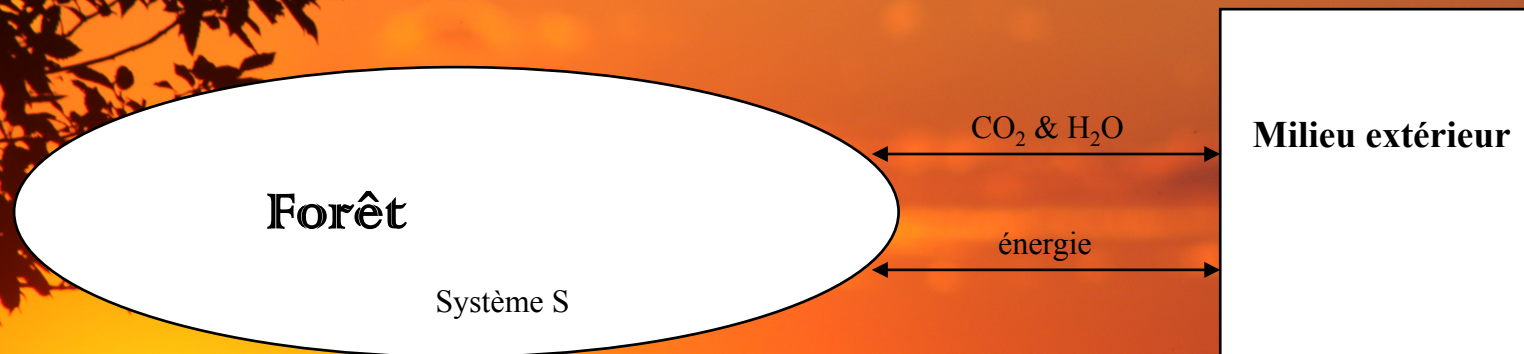
2. Un système est dynamique si les interactions modifient l'état du système



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

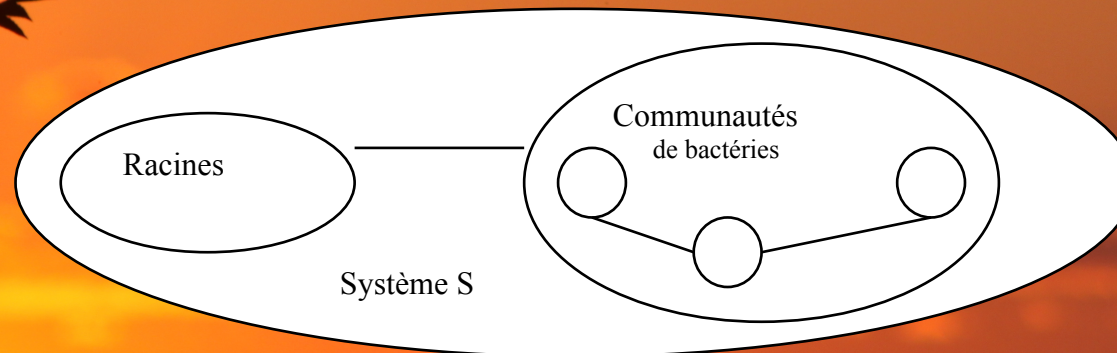
Notion de système

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

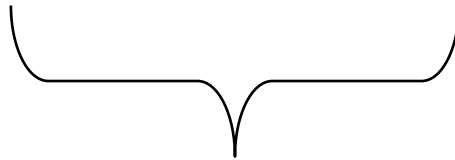
Entités	Arbres Herbivores
Attributs	Biomasse Hauteur Effectifs
Activités	Photosynthèse Alimentation
État	Σ Entités attributs et activités

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....

Hendrik Davi INRA d'Avignon

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

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 !!!!**

A photograph of two iguanas on a sandy beach. One iguana is in the foreground, facing left, with its long tail extending towards the right. Another iguana is in the background, further up the beach. The ocean is visible in the background under a clear sky.

Spécificité de l'écologie

Hendrik Davi INRA d'Avignon

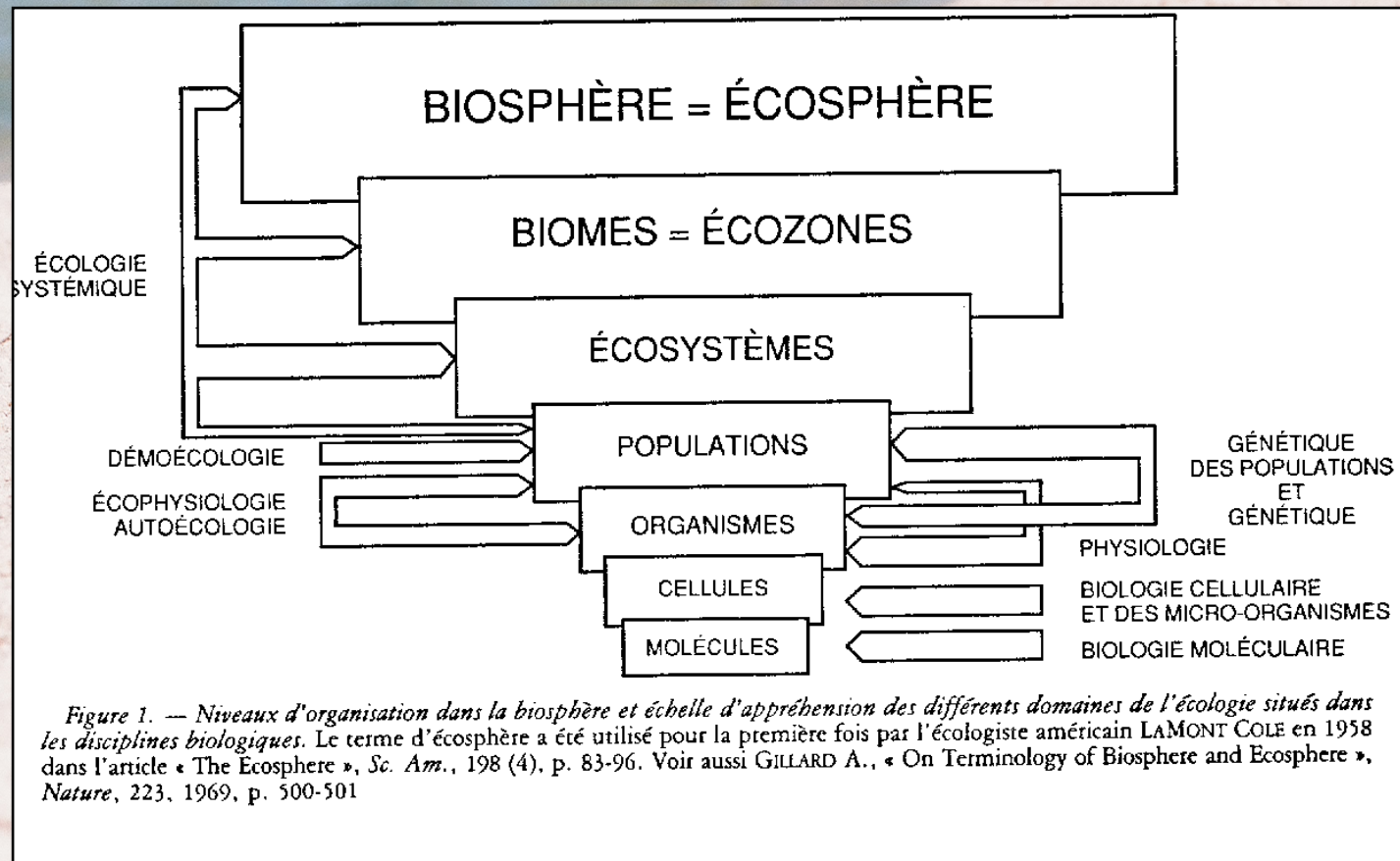
Journées « modélisation en environnement » 22 février au 26 février 2010

« 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**
 - 6. Variabilité= composante digne d'intérêt**

Échelle spatiale et temporelle



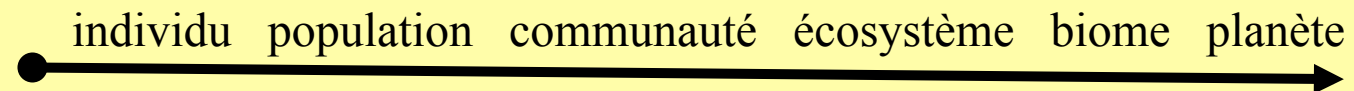
Échelle spatiale et temporelle



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

Échelle spatiale et temporelle

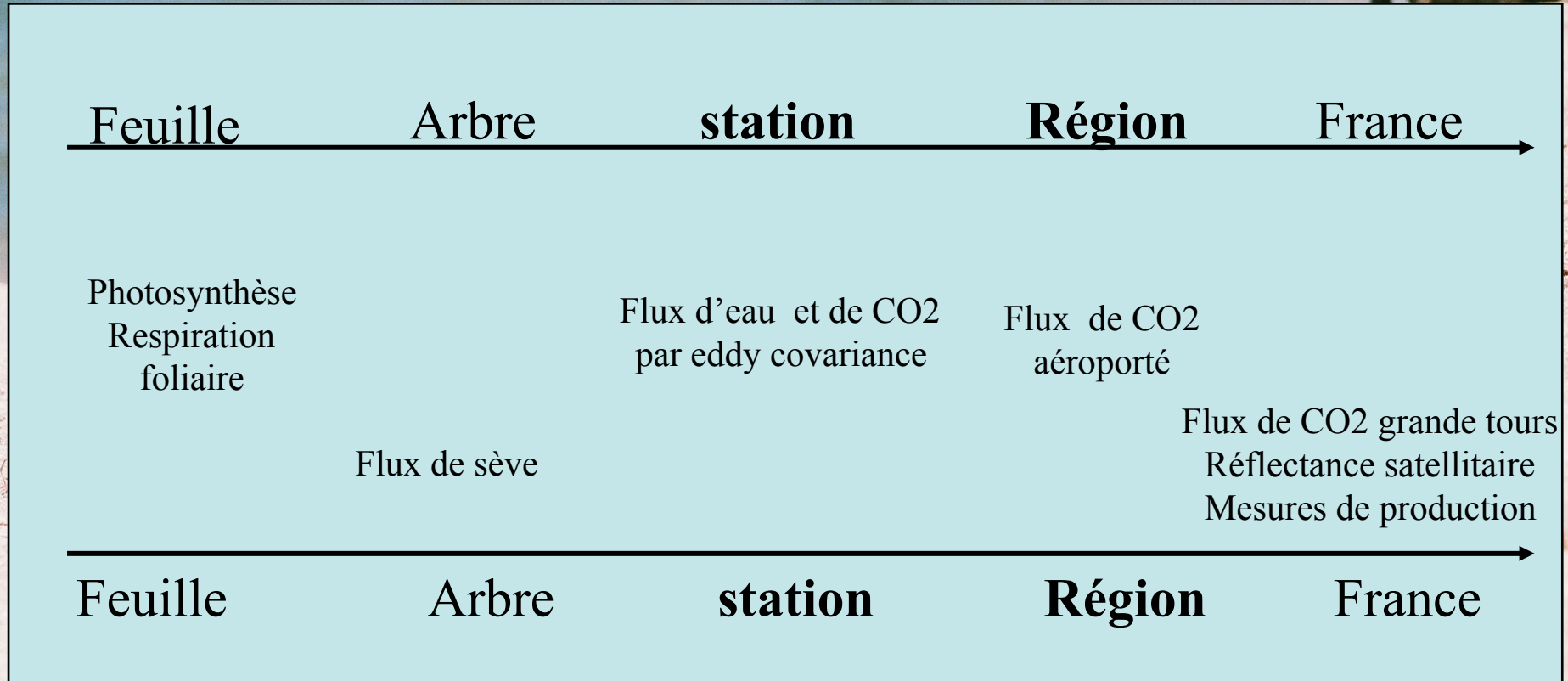
1. La dépendance d'échelle
2. Résolution / Niveau d'observation
3. Les organisations hiérarchiques



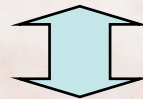
Les niveaux supérieures

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

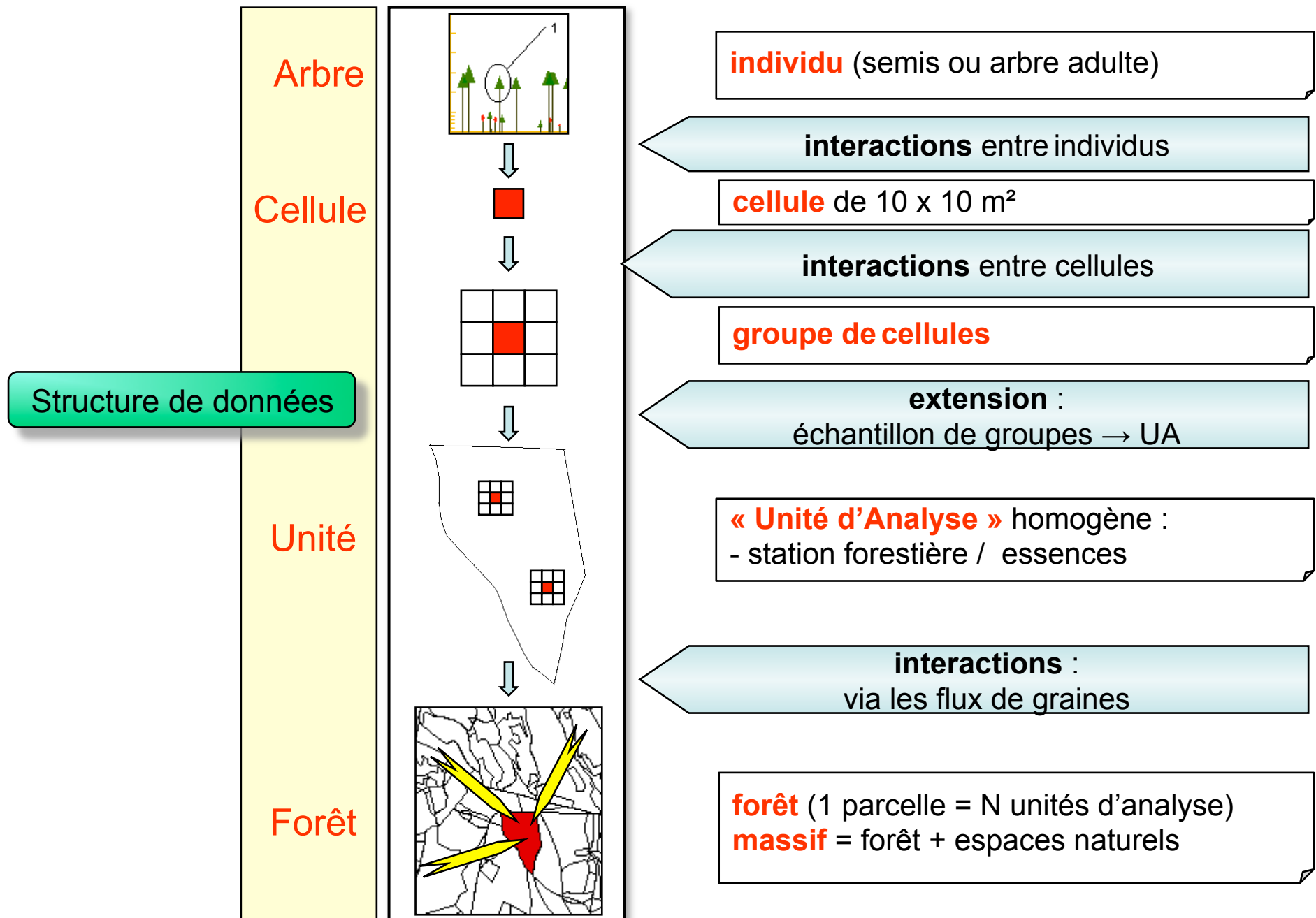
Échelle spatiale et temporelle



Processus fonctionnant à une échelle très fine

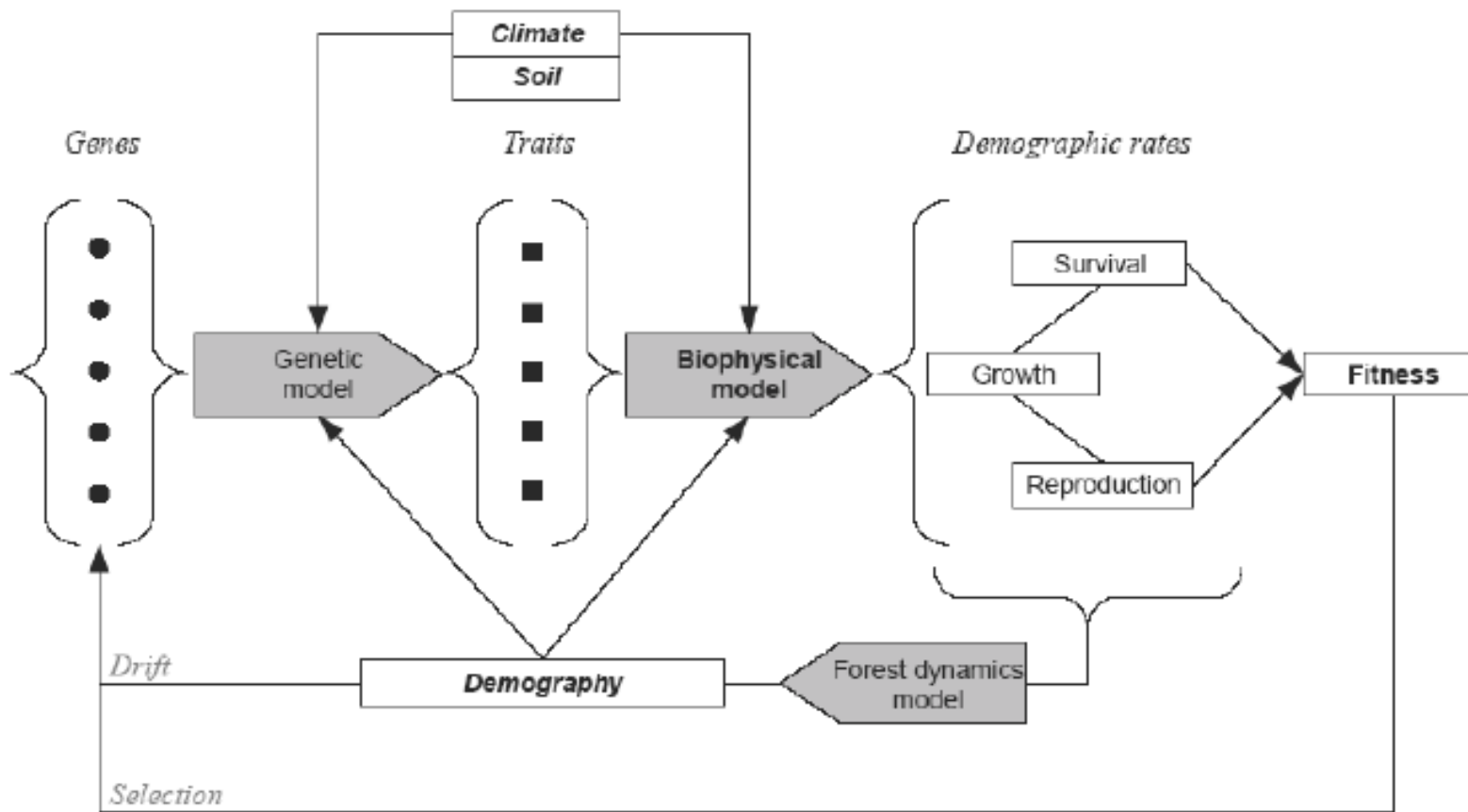


Questions scientifiques et sociétales une échelle très large



Complexité des interactions

Modéliser réponse au climat d'une forêt



Que doit on laisser de côté ?

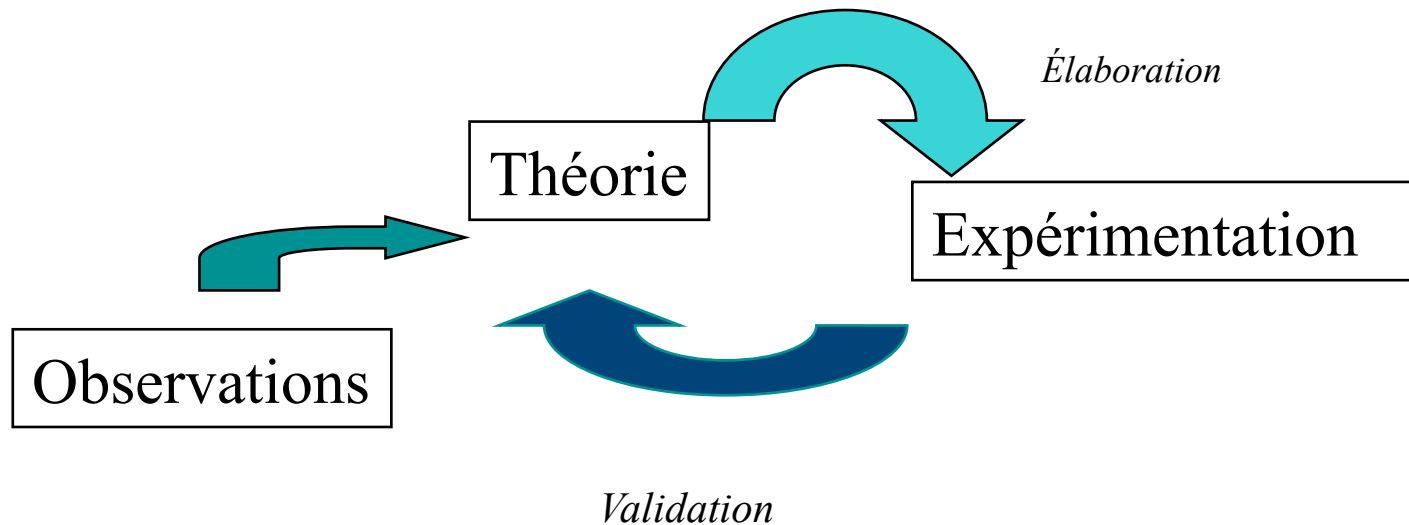


A quoi sert la modélisation?

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*

Hendrik Davi INRA d’Avignon

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

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

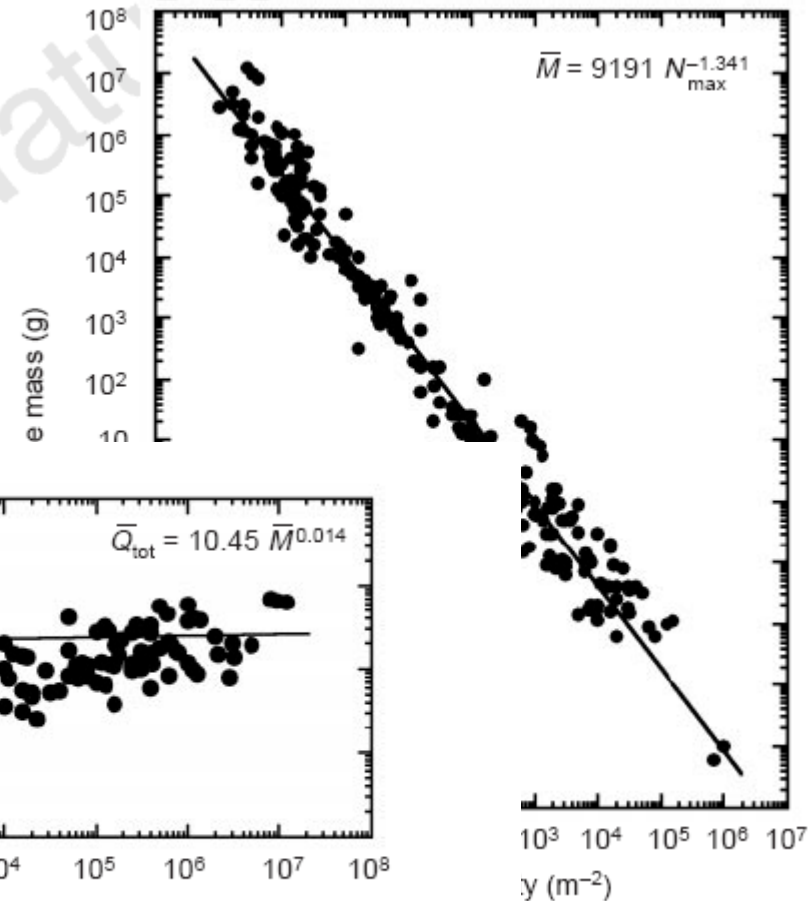
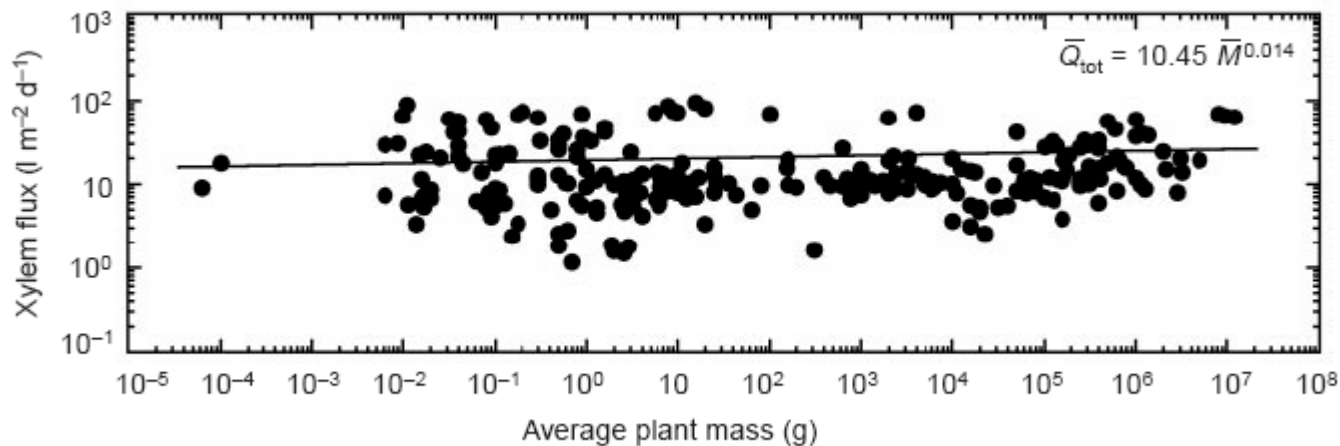
1. Modèle comme analogue de la théorie

Exemple I: Modèle d'Enquist (Nature 1998)

Relation entre masse et densité

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

Ressource totale utilisée

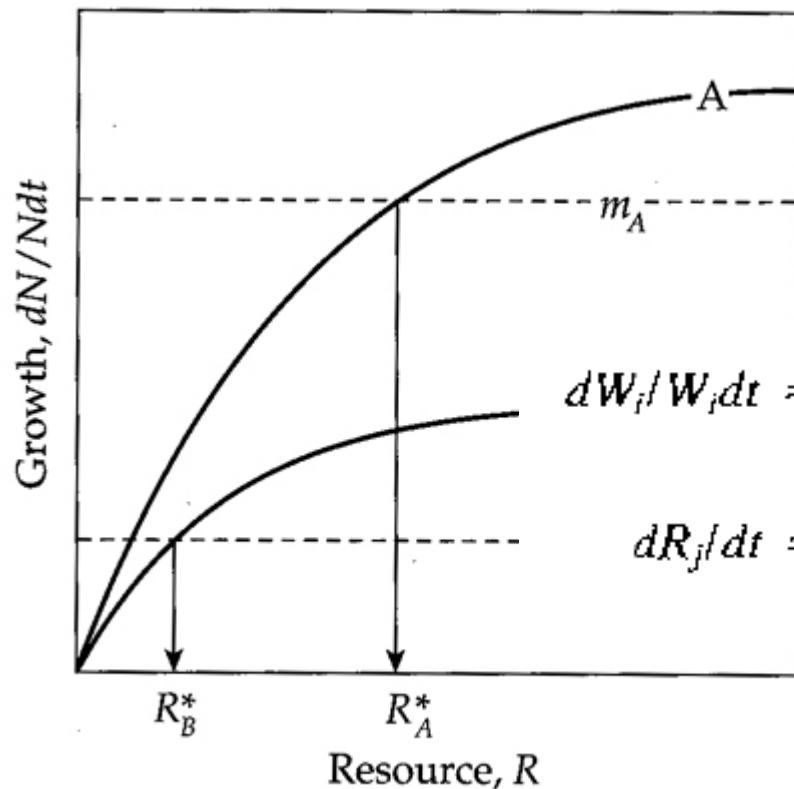


Hendrik Davi INRA d'Avignon

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

1. Modèle comme analogue de la théorie

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



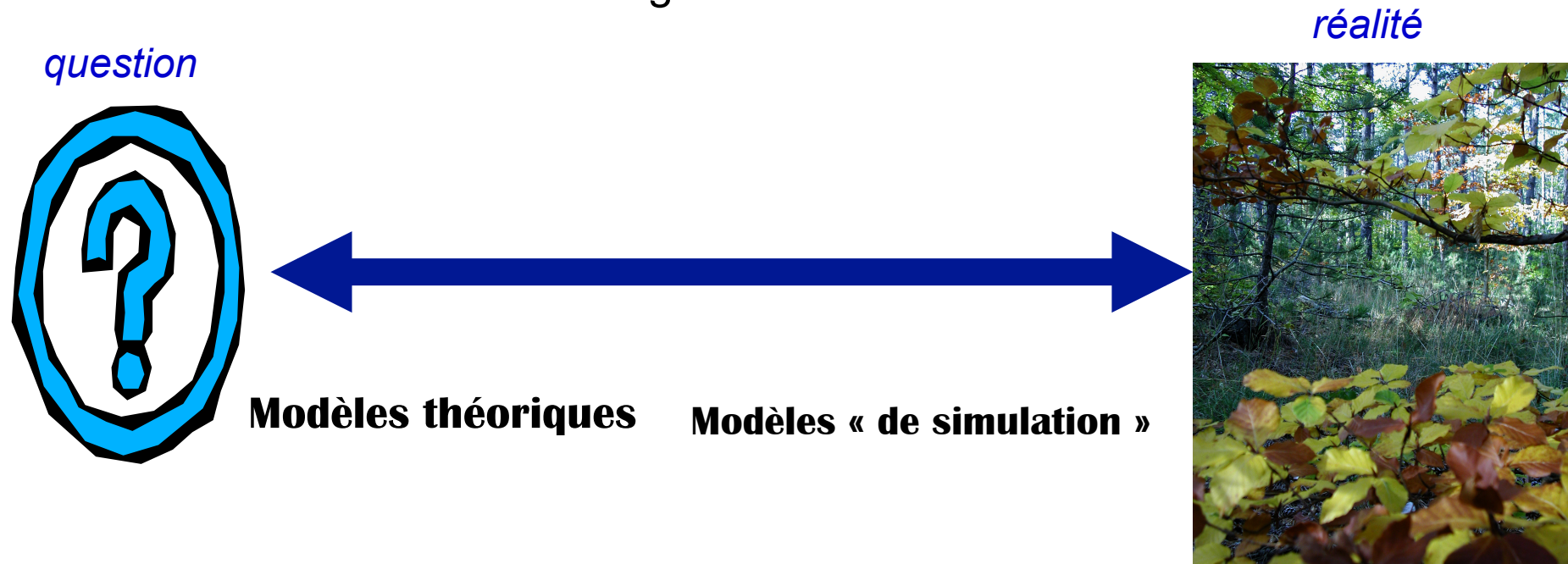
2 espèces en compétition, c'est l'espèce qui est capable de survivre au plus bas niveau de la ressource qui la contrôle

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

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

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



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

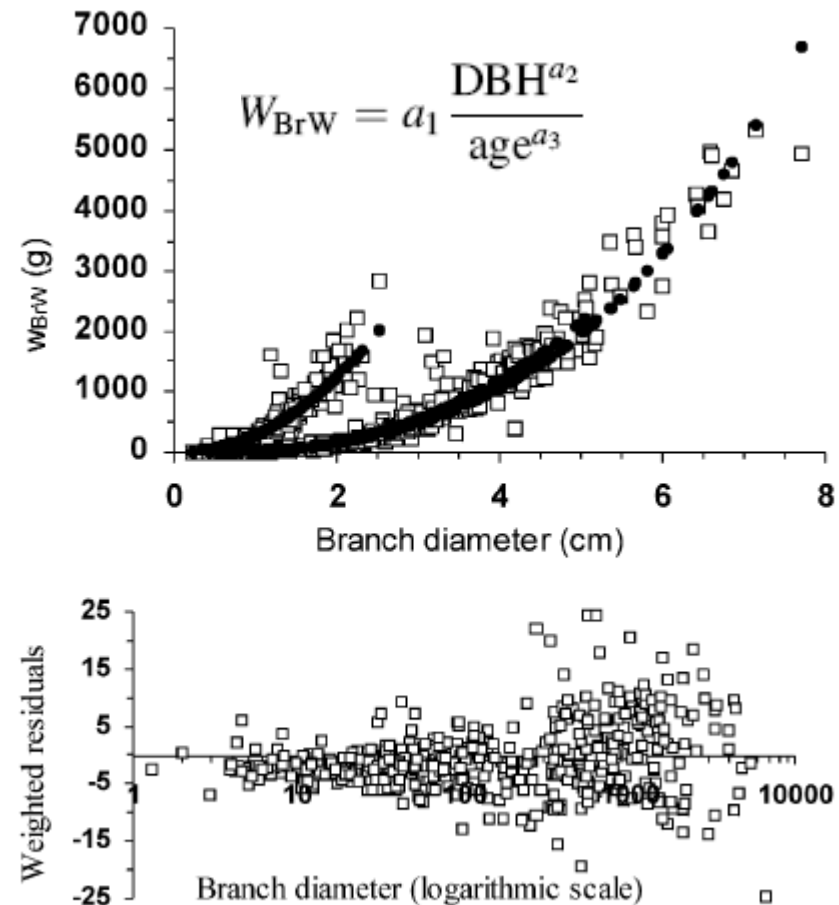
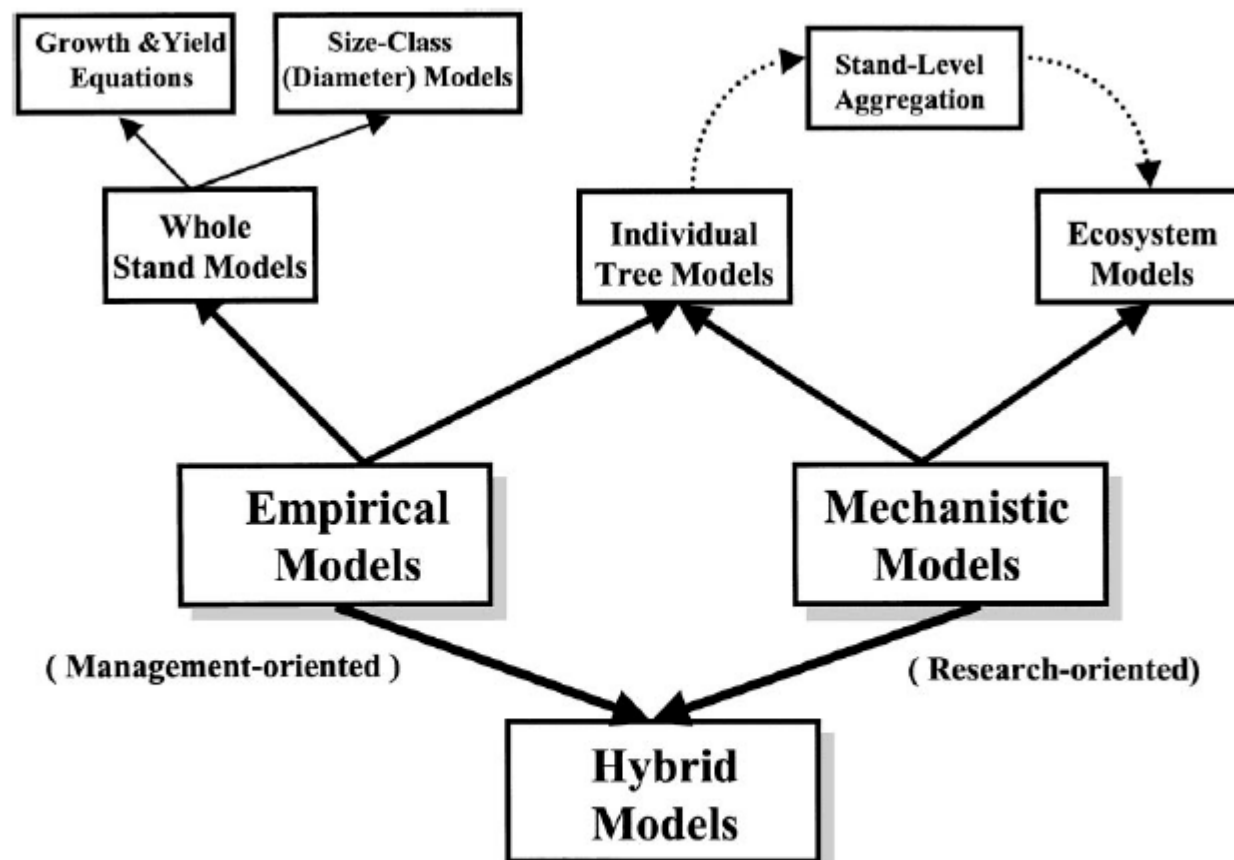


Fig. 1. Measured (□) and estimated (●) branch wood biomass (W_{BrW} , g) versus branch diameter (D10, cm), for the Hermitage,

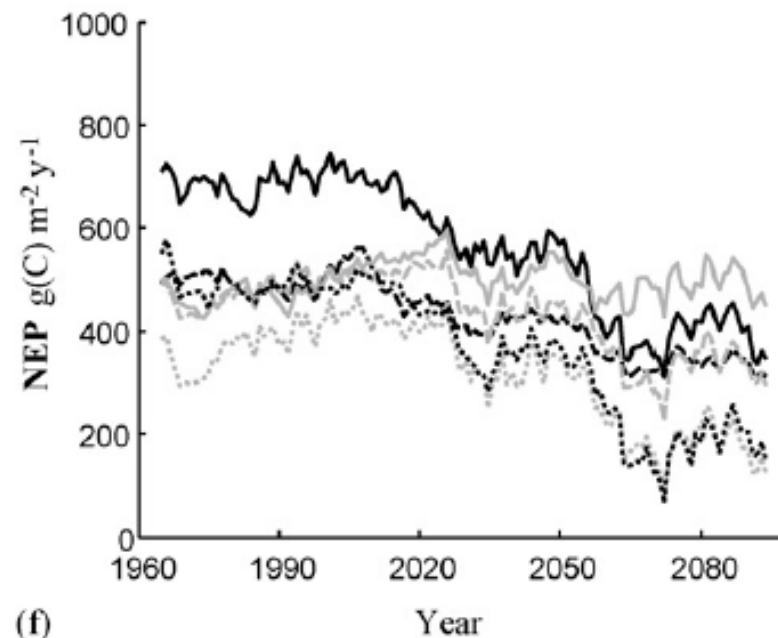
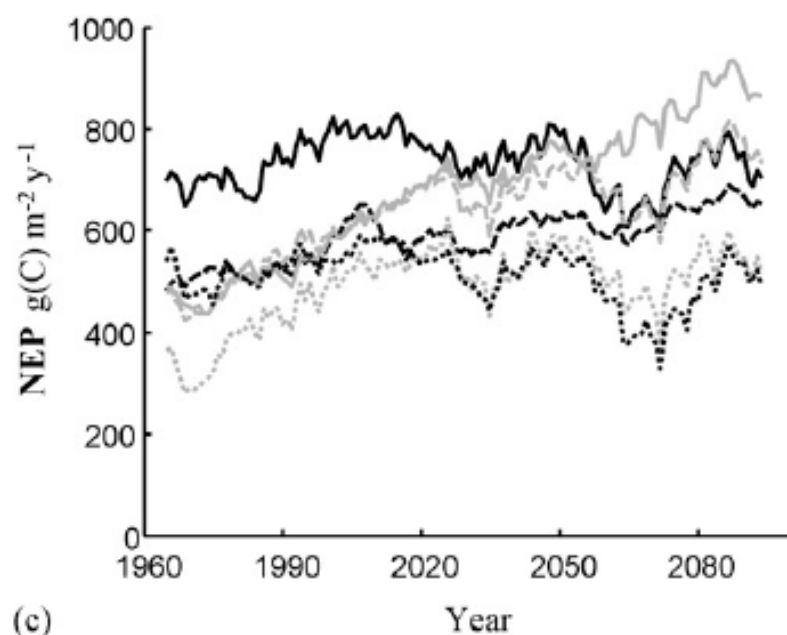
1. Modèles de simulation composés de plusieurs régressions statistiques



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 basées 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 basées sur les processus physiques et physiologiques

A] Le trajet du CO_2 , l'ouverture stomatique

$[\text{CO}_2]$ air

↓

$[\text{CO}_2]$ contact de la feuille

↓

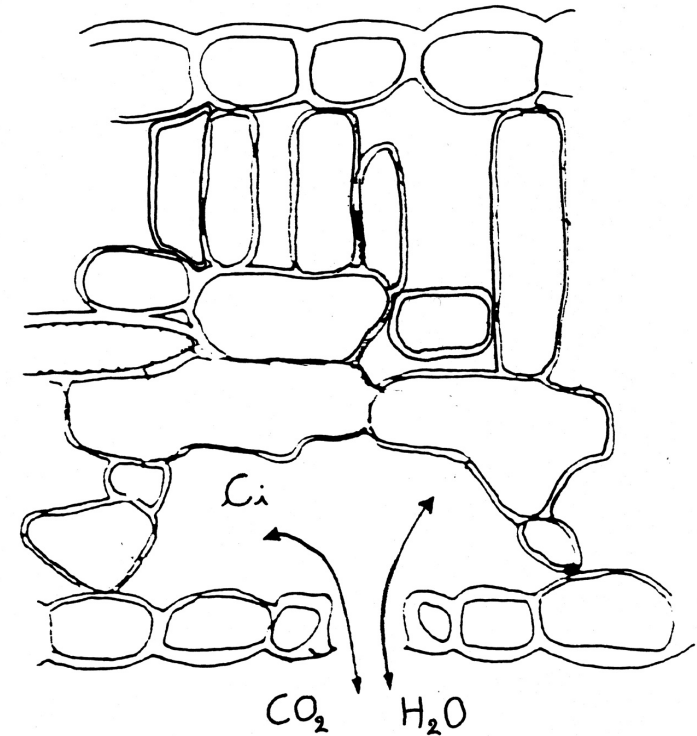
$[\text{CO}_2]$ chambre sous stomatique

↓

$[\text{CO}_2]$ au niveau des chloroplastes

H_2O

*Ouverture stomatique dépend de la turgescence
des cellules des gardes*



The screenshot displays the CASTANEA model interface. The top window shows the program code, which includes declarations for parameters like `bufferleg`, `parcL`, and `nsim`, and calls to `initrand()` and `open_files`. Below the code, a diagram illustrates the multilayer model structure. The diagram is divided into four main sections: **Bilan C foliaire** (Foliar Carbon Balance), **Bilan C couvert** (Canopy Carbon Balance), **Bilan H₂O couvert** (Canopy Water Balance), and **Bilan C-H₂O-E écosystème** (Ecosystem C-H₂O-E Balance). The **Bilan C foliaire** section includes the equation $N_s = f(N_m) * LMA$ and references to Ryan, Farquhar, and Ball & al. The **Bilan C couvert** section features a graph of PAR (Verhoef) vs. LMA, with a red curve and a black line. The **Bilan H₂O couvert** section includes the equation $ETR = Penman Monteith$. The **Bilan C-H₂O-E écosystème** section includes the equation $EP_{sol} = Penman$ and references to Parton and ΔB. A red arrow labeled **LAI** points from the **Bilan C foliaire** section to the **Bilan C couvert** section. A blue arrow labeled **Gc** points from the **Bilan C couvert** section to the **Bilan H₂O couvert** section. A blue arrow points from the **Bilan H₂O couvert** section to the **Bilan C-H₂O-E écosystème** section. A red arrow points from the **Bilan C-H₂O-E écosystème** section back to the **Bilan C foliaire** section, labeled **selon Sala & al**. The bottom of the screenshot shows the Windows taskbar with various open applications, including Eudora, Recherche Go..., fortran_castasol, and Présentation_t...

Ex: CASTANEA (Dufrêne et al., 2005)

Workspace 'castanea': 3 project(s)
castanea files
photo
init
write
read
ini
hydraulicpur.f90
interception.f90

PROGRAM CASTANEA
IMPLICIT NONE
CHARACTER *80 bufferleg
INTEGER parcL, i1, i2, i3, i4, i5, i6, ss, nsim
INCLUDE 'common.f90'
INCLUDE 'common_rand.f90'
CALL initrand()
CALL open_files

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 (Verhoef)
LMA
Gc
selon Sala & al

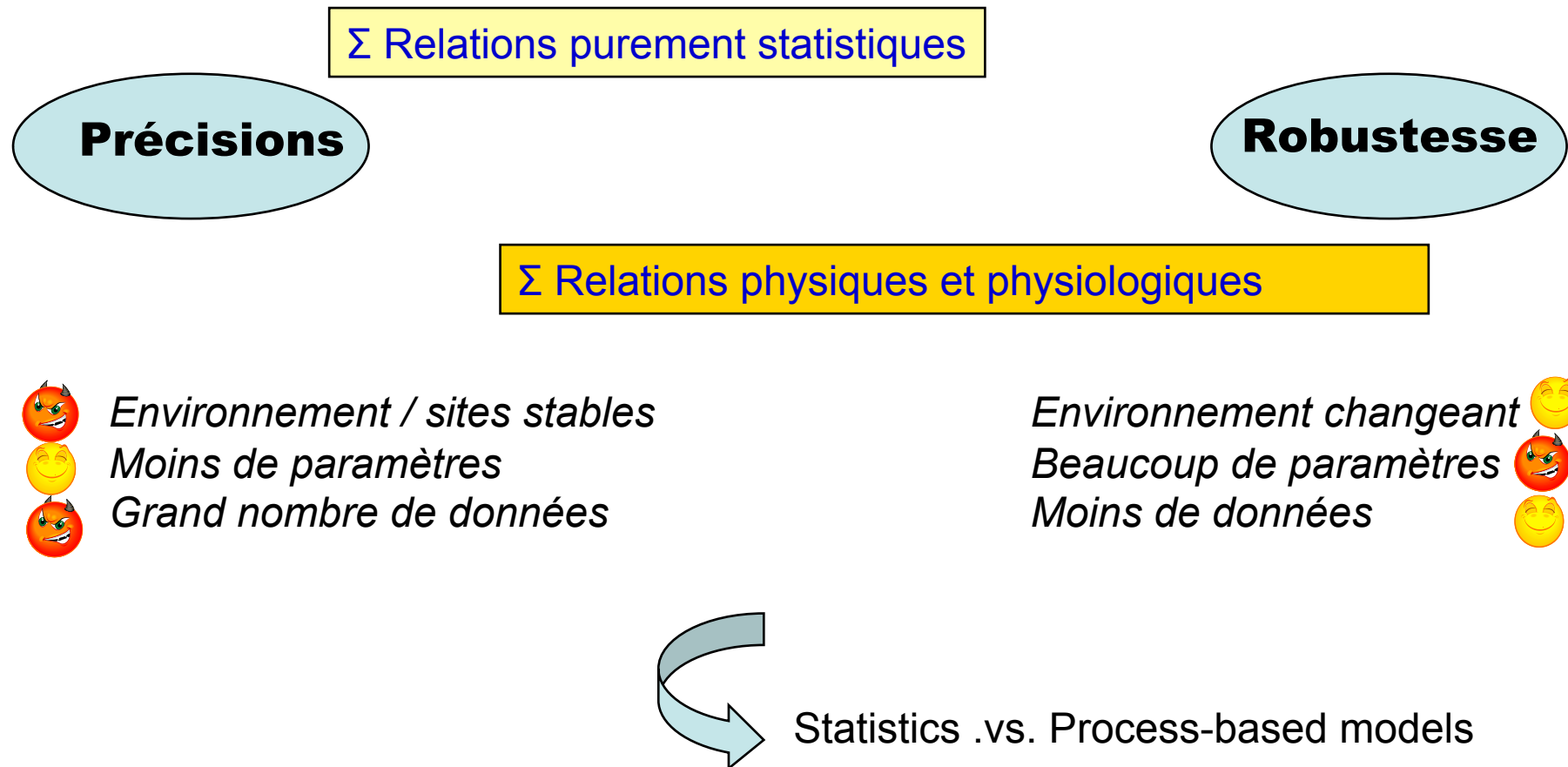
Bilan H₂O couvert
ETR
Penman
Monteith

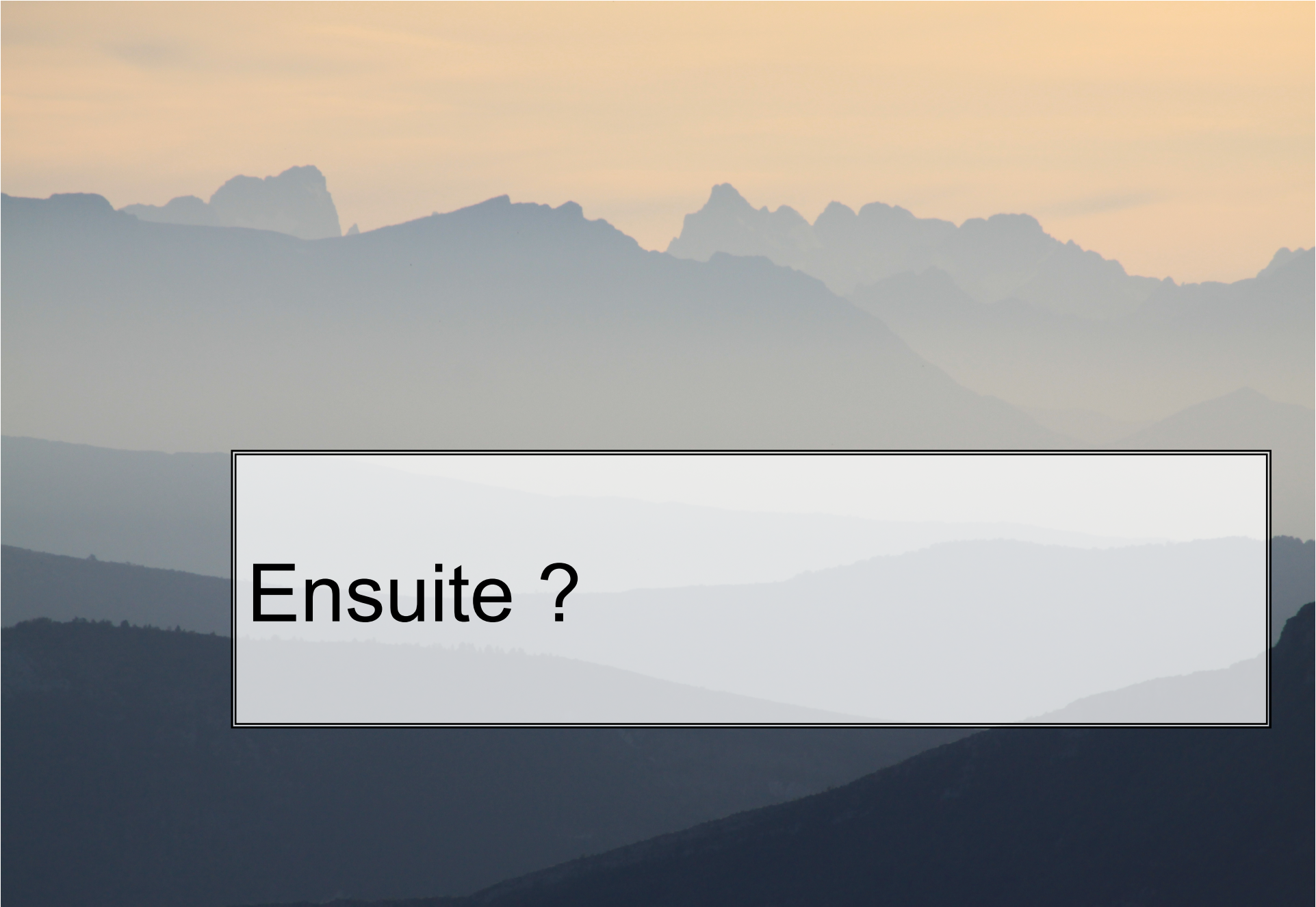
Bilan C-H₂O-E écosystème
 EP_{sol} (Penman)
 C_{sol} (Parton)
 ΔB
Eau du sol

Modèle multicouche

Modèle multicouche

2. Modèles pour décrire / simuler / prédire





Ensuite ?

Hendrik Davi INRA d'Avignon

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

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

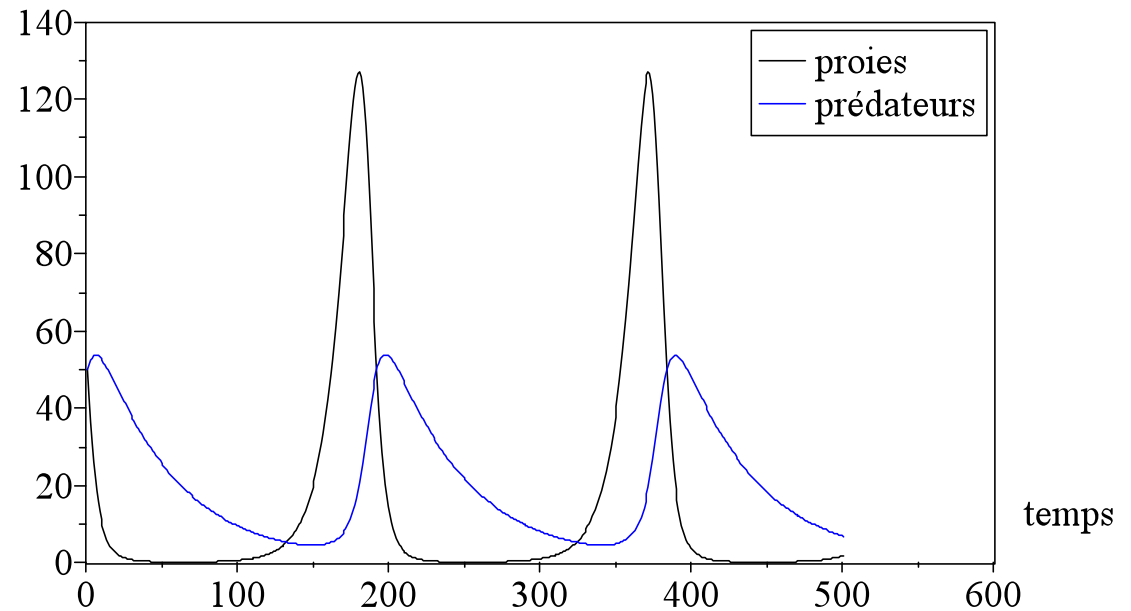
1. Différentes méthodes de modélisation

2. Modèles analytiques: Proies - prédateurs

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

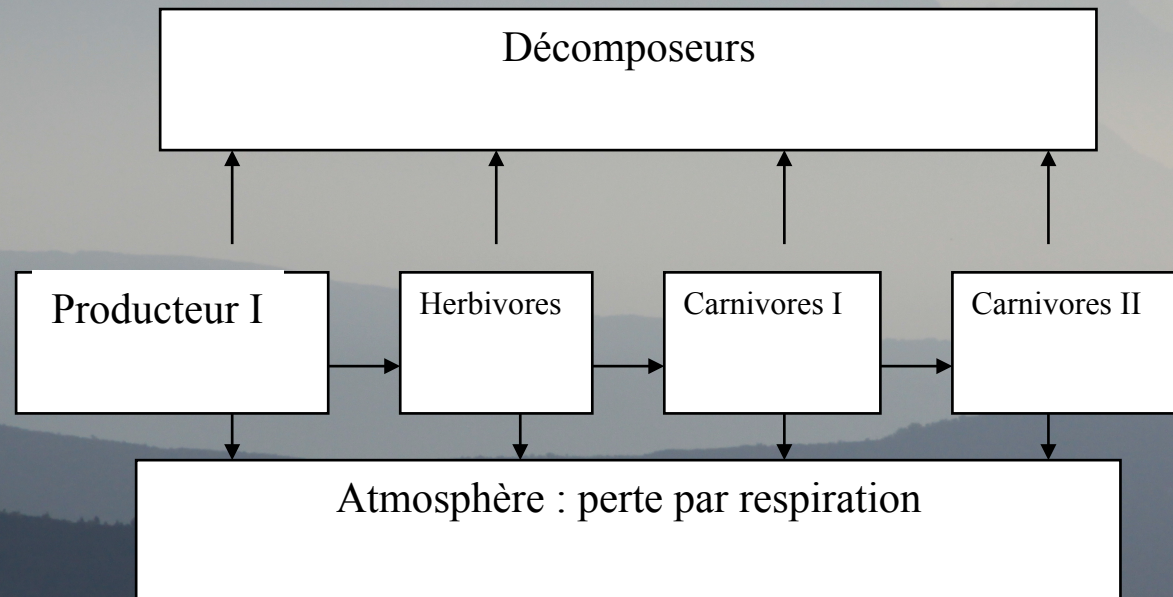
$$\frac{dY}{dt} = e \times g \times X \times Y - m \times Y$$

évolution des populations de proies et de prédateurs



1. Différentes méthodes de modélisation

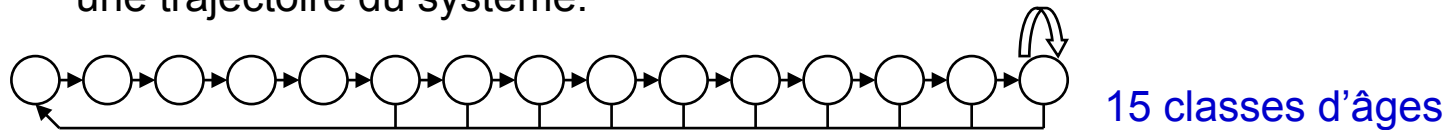
2. Modèles analytiques: Chaînes trophiques



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

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.



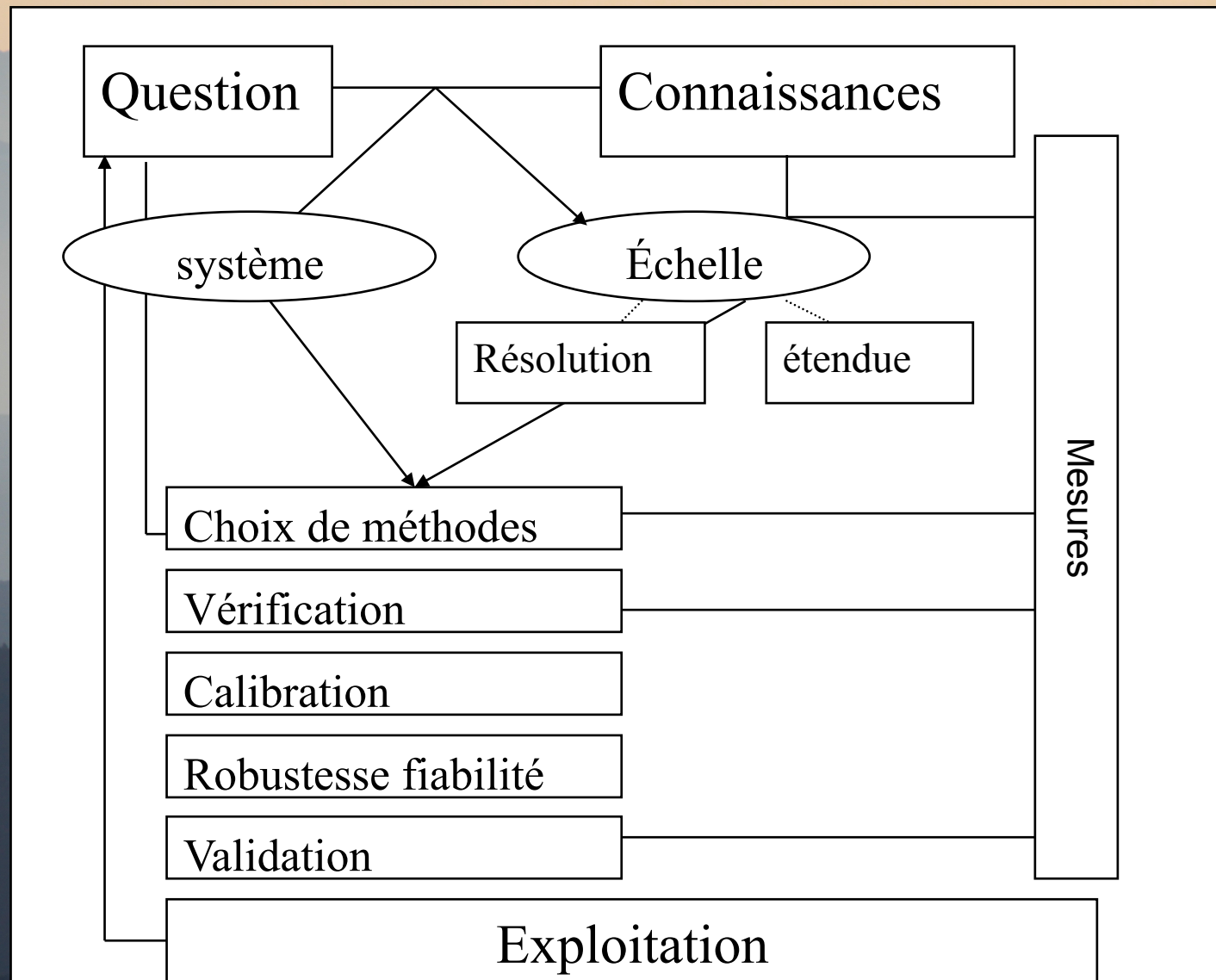
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0.008	0.023	0.036	0.042	0.054	0.061	0.072	0.077	0.082	0.094
2	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0.923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0.923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

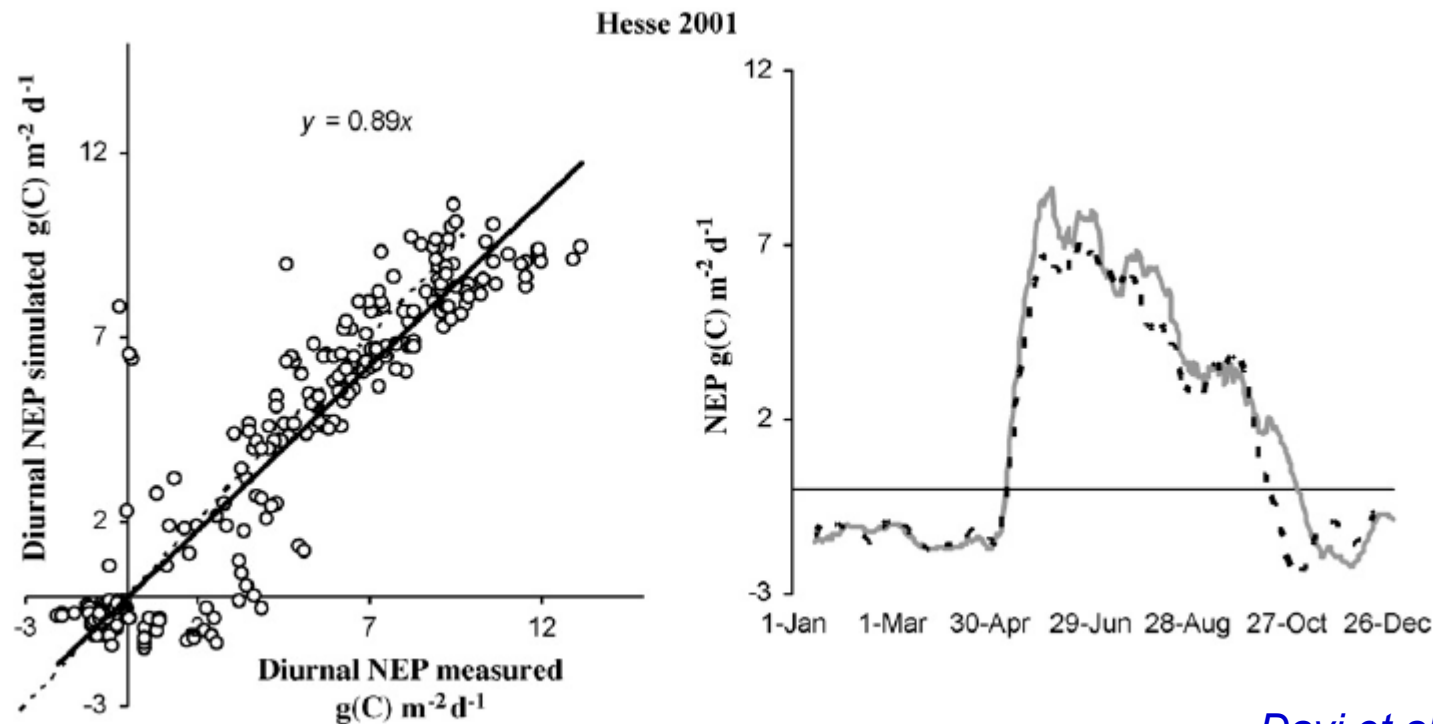

2. Différentes étapes



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

Hendrik Davi INRA d'Avignon

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

Point de vue (Leibniz)

Outils

- équations différentielles
- chaînes de Markov
- approche simulateur

structure

fonction

Interaction

holisme

réductionnisme

Réalité

Questions

Objectifs

- décrire
- comprendre
- prédire

Champ de recherches scientifiques

Hendrik Davi INRA d'Avignon

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

MERCI

