



SEFA - Lyon, 4 - 5 juillet 2012



Modélisation en écotoxicologie des sols cultivés

C. Pelosi, M. Bertrand, J. Roger-Estrade, C. Mougin



Physicochimie et Ecotoxicologie des Sols
d'Agrosystèmes Contaminés (Versailles)

Contexte général



- Perte **biodiversité** dans les sols agricoles
=> Fonctions remplies par les organismes du sol et services écosystémiques.
- **Agriculture durable** = assurer production en préservant les ressources naturelles et la fourniture de services écosystémiques.

Comprendre et pouvoir prédire

**l'impact des pratiques culturales (labour, application de pesticides)
sur les communautés vivantes du sol et leur dynamique.**

Intérêt des vers de terre



- Essentiel de la **biomasse vivante du sol**

- **Importance des fonctions agroécologiques** : rôle sur l'évolution :

→ de la structure du sol

→ de la matière organique (éléments assimilables par les plantes et les microorganismes)

- **Indicateur biologique de la qualité du sol** (Fragoso, 1997) et de l'**impact environnemental des systèmes de culture** (Paoletti, 1999).





De l'Agroécologie à l'Agroécotoxicologie

WORMDYN (Pelosi *et al.*, 2008, Ecol. Model.)



- **Modèle matriciel de dynamique d'une population** de vers de terre (*Lumbricus terrestris*) au champ, basé sur traits d'histoire de vie (reproduction, croissance, survie).

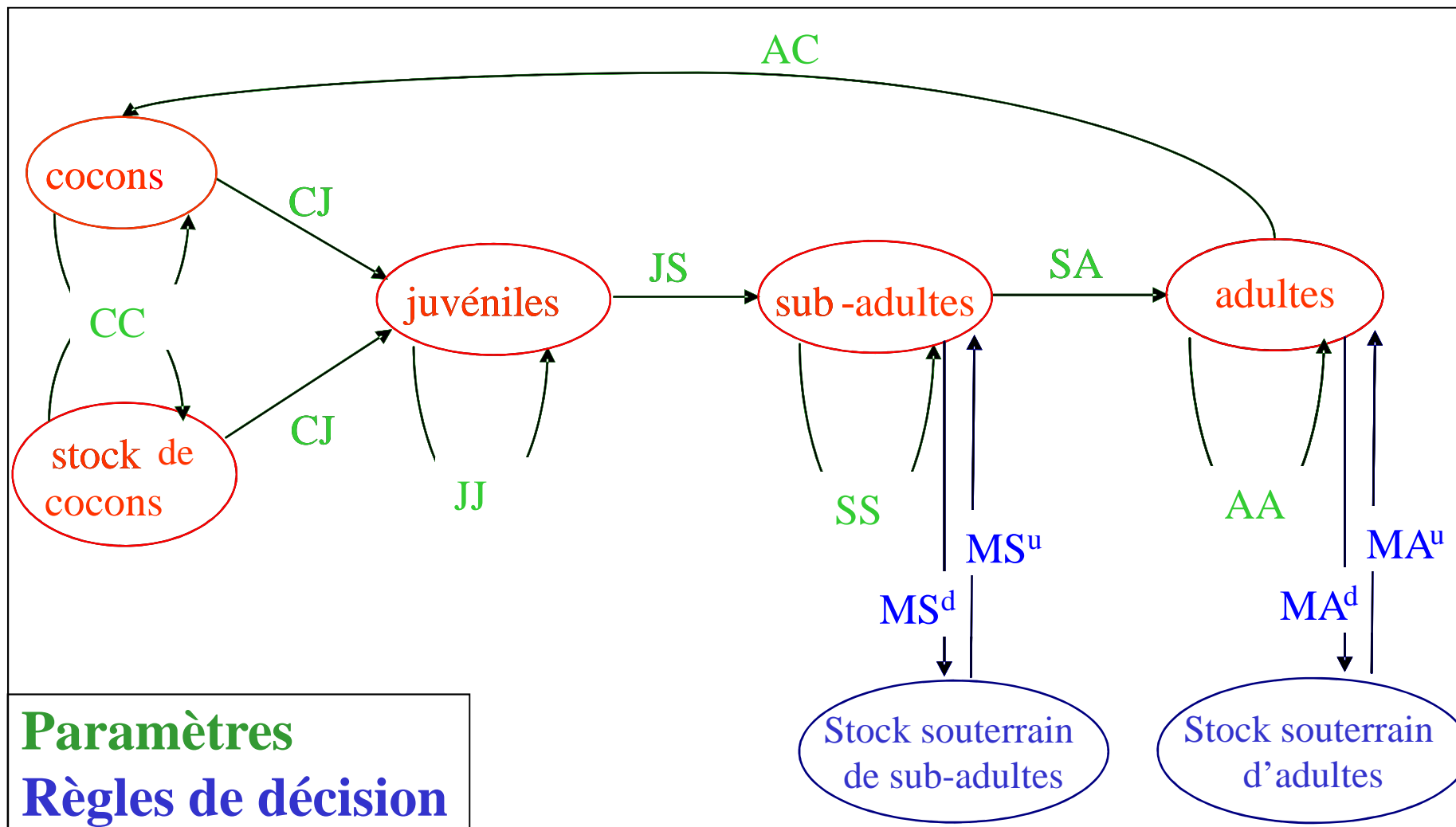


- **Entrées :**
 - Température et humidité du sol (fortes variations interannuelles densités population)
 - Densités dans chaque stade de développement des vers au début de chaque simulation
- **Sorties :** densité de population dans chaque stade de développement
- **Pas de temps :** 1 semaine.

WORMDYN

Modèle conceptuel

Population structurée en classes de stades de développement



WORMDYN

Modèle mathématique : modèle matriciel (matrices de Lefkovitch)

$$\begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t \times \begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_t - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^d \\ MA^d \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^u \\ MA^u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ CJ_i^{CS} \times CS \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_t$$

WORMDYN

Modèle mathématique : modèle matriciel (matrices de Lefkovitch)

$$\begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t \times \begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_t - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^d \\ MA^d \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^u \\ MA^u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ CJ_i^{CS} \times CS \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_t$$

Population à
t+1

WORMDYN

Modèle mathématique : modèle matriciel (matrices de Lefkovitch)

Paramètres = $f(T^\circ, \text{hum}) \rightarrow i$
Matrice de transition

$$\begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t \times \begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_t - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^d \\ MA^d \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^u \\ MA^u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ CJ_i^{CS} \times CS \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_t$$

Population à
t+1

WORMDYN

Modèle mathématique : modèle matriciel (matrices de Lefkovitch)

Paramètres = $f(T^\circ, \text{hum}) \rightarrow i$
Matrice de transition

$$\begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t \times \begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_t - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^d \\ MA^d \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^u \\ MA^u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ CJ_i^{CS} \times CS \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_t$$

Population à
t+1

Population à t

WORMDYN

Modèle mathématique : modèle matriciel (matrices de Lefkovitch)

Paramètres = $f(T^\circ, \text{hum}) \rightarrow i$
Matrice de transition

Modules liés à la biologie de
l'espèce considérée

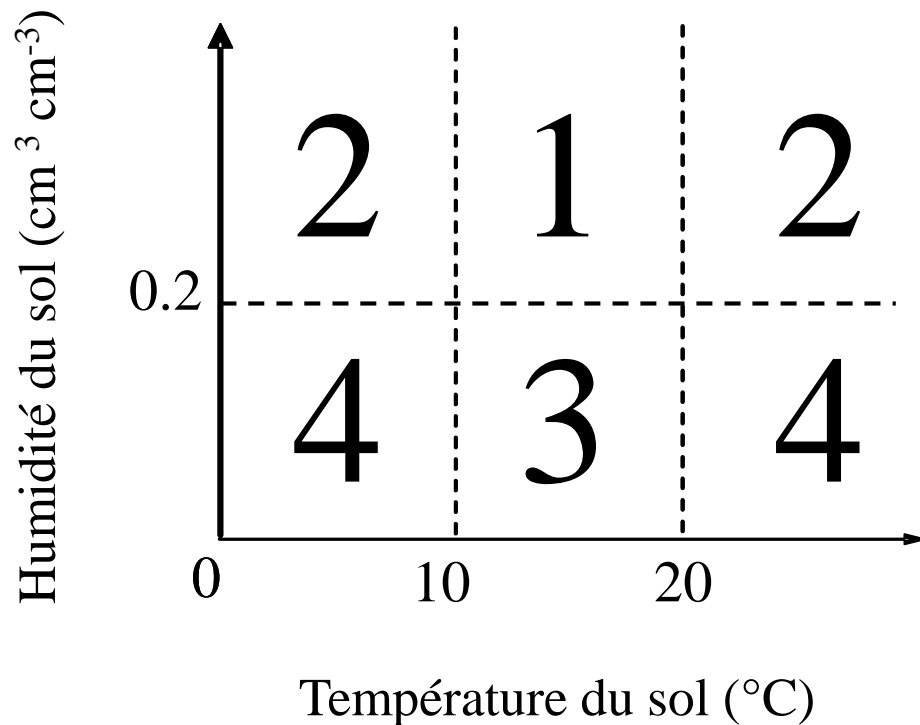
$$\begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_{t+1} = \begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t \times \begin{pmatrix} C \\ J \\ S \\ A \end{pmatrix}_t - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^d \\ MA^d \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ MS^u \\ MA^u \end{pmatrix}_t + \begin{pmatrix} 0 \\ CJ_i^{CS} \times CS \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_t$$

Population à
t+1

Population à t

WORMDYN

Paramétrisation (à partir de la littérature)

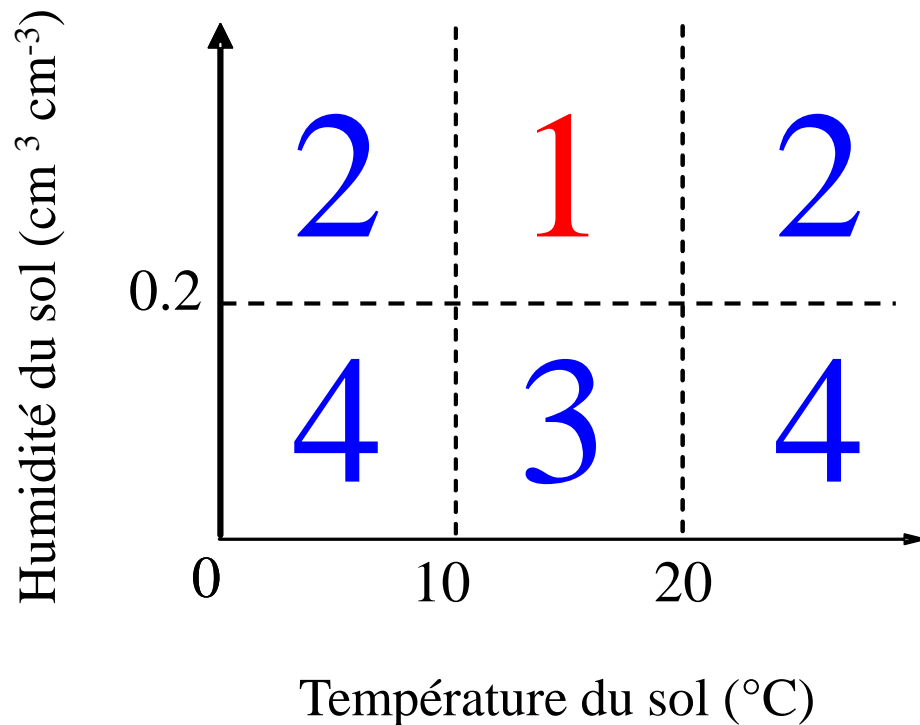


Classes de conditions

en fonction température et humidité
du sol optimales pour l'espèce
considérée

WORMDYN

Paramétrisation (à partir de la littérature)



Conditions optimales = données
acquises au laboratoire (littérature)

Conditions sub-optimales
($<$ conditions 1 et
conditions $2 < 3 < 4$)

WORMDYN

Paramétrisation (à partir de la littérature)

Pour la condition 1 (optimale): AC (fécondité)

Butt, 1991 (*L. terrestris*, humidité optimale):

- 25,3 cocons/ver/an à 15°C
- 10,1 entre 18 et 22°C
- 17,2 aux alentours de 20°C

Meinhardt, 1974 : 4-6 coc/ver/mois

WORMDYN

Paramétrisation (à partir de la littérature)

Pour la condition 1 (optimale): AC (fécondité)

Butt, 1991 (*L. terrestris*, humidité optimale):

- 25,3 cocons/ver/an à 15°C
- 10,1 entre 18 et 22°C
- 17,2 aux alentours de 20°C

Meinhardt, 1974 : 4-6 coc/ver/mois

Bornes min et max
en nombre cocons/semaine/ver

WORMDYN

Paramétrisation (à partir de la littérature)

Pour la condition 1 (optimale): **AC** (fécondité)

Butt, 1991 (*L. terrestris*, humidité optimale):

- 25,3 cocons/ver/an à 15°C

- 10,1 entre 18 et 22°C

- 17,2 aux alentours de 20°C

Meinhardt, 1974 : 4-6 coc/ver/mois

Bornes min et max
en nombre cocons/semaine/ver

Stochasticité : 10 000 tirages aléatoires des paramètres dans la gamme de valeurs donnée par la littérature.

Exemple :

Conditions $i=1$: **0,19** (Butt, 1991) < **AC** < **1,5** (Meinhardt, 1974)

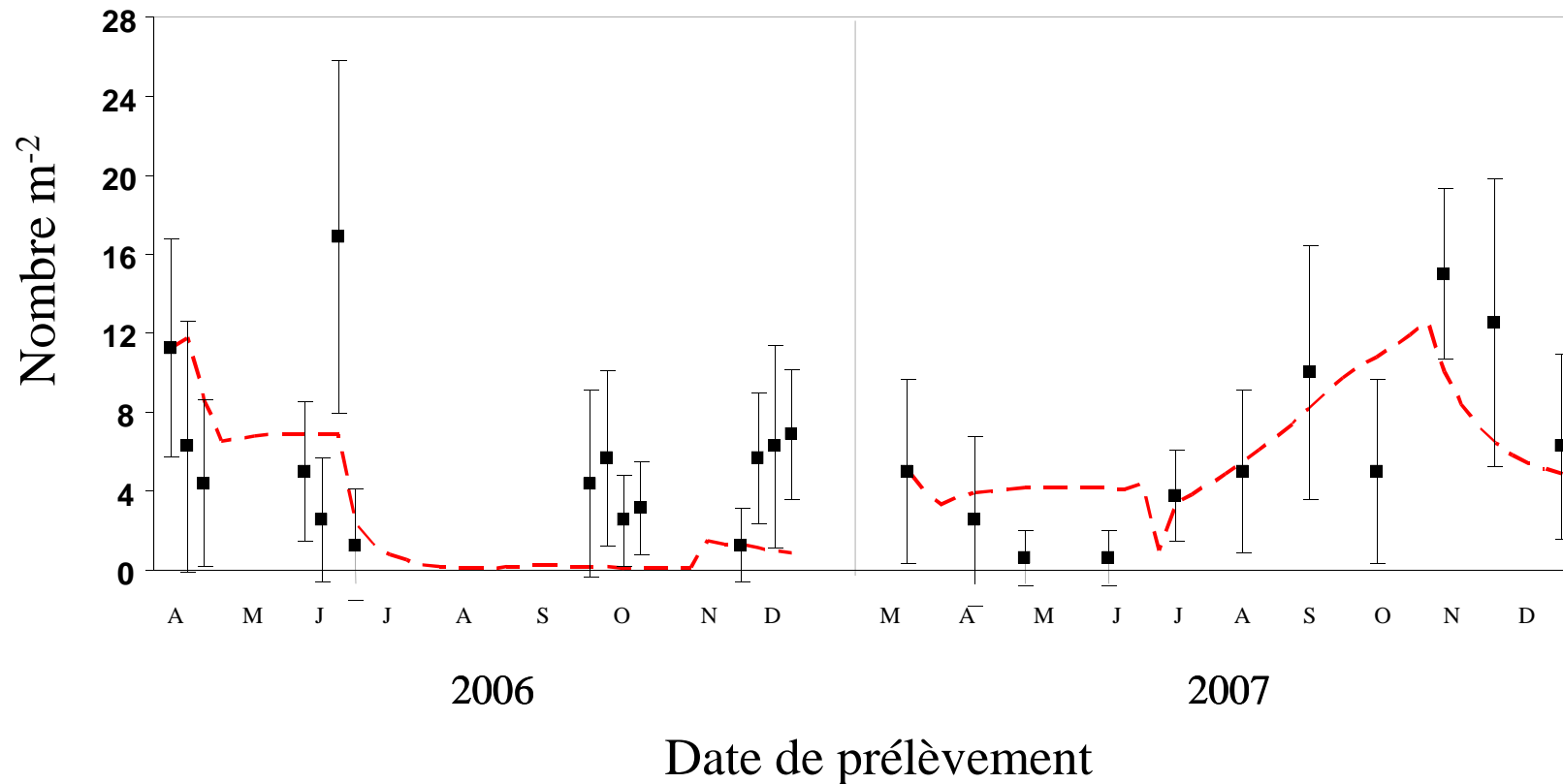
Conditions $i=2, 3, 4$: **0** < **AC** < **AC_(i-1)**

WORMDYN

Évaluation de la qualité prédictive

2 parcelles en labour (population totale)

■ Densités observées (+/- IC)
-- Moyenne 10 000 simulations

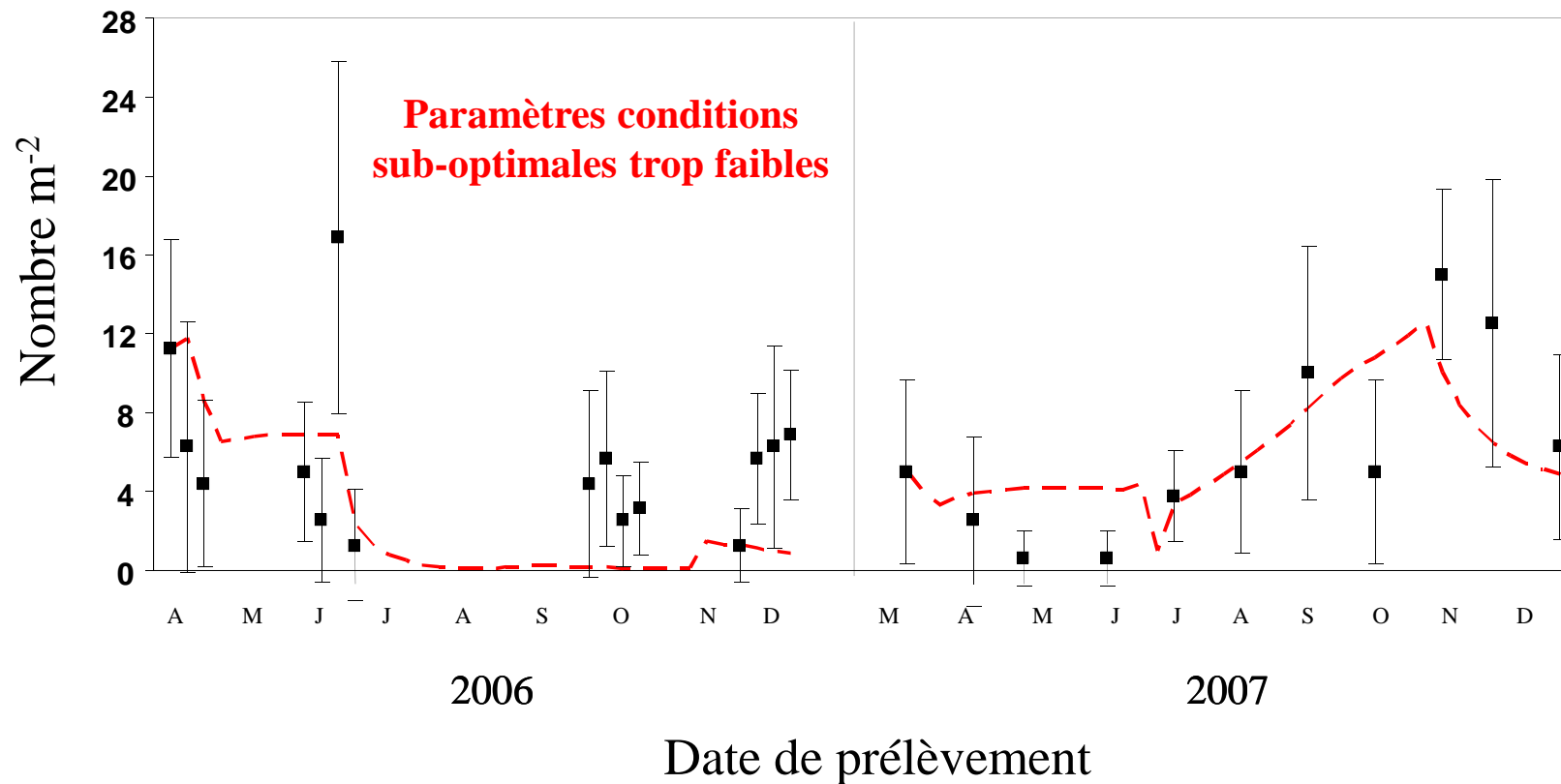


WORMDYN

Évaluation de la qualité prédictive

2 parcelles en labour (population totale)

■ Densités observées (+/- IC)
-- Moyenne 10 000 simulations



WORMDYN

Utilisations du modèle

Analyse de sensibilité :

- **Survie juvéniles** en conditions sub-optimales ($i = 2$ à 4)
- **Fécondité** (conditions 1 à 4)

$$\begin{pmatrix} CC_i & 0 & 0 & AC_i \\ CJ_i & JJ_i & 0 & 0 \\ 0 & JS_i & SS_i & 0 \\ 0 & 0 & SA_i & AA_i \end{pmatrix}_t$$

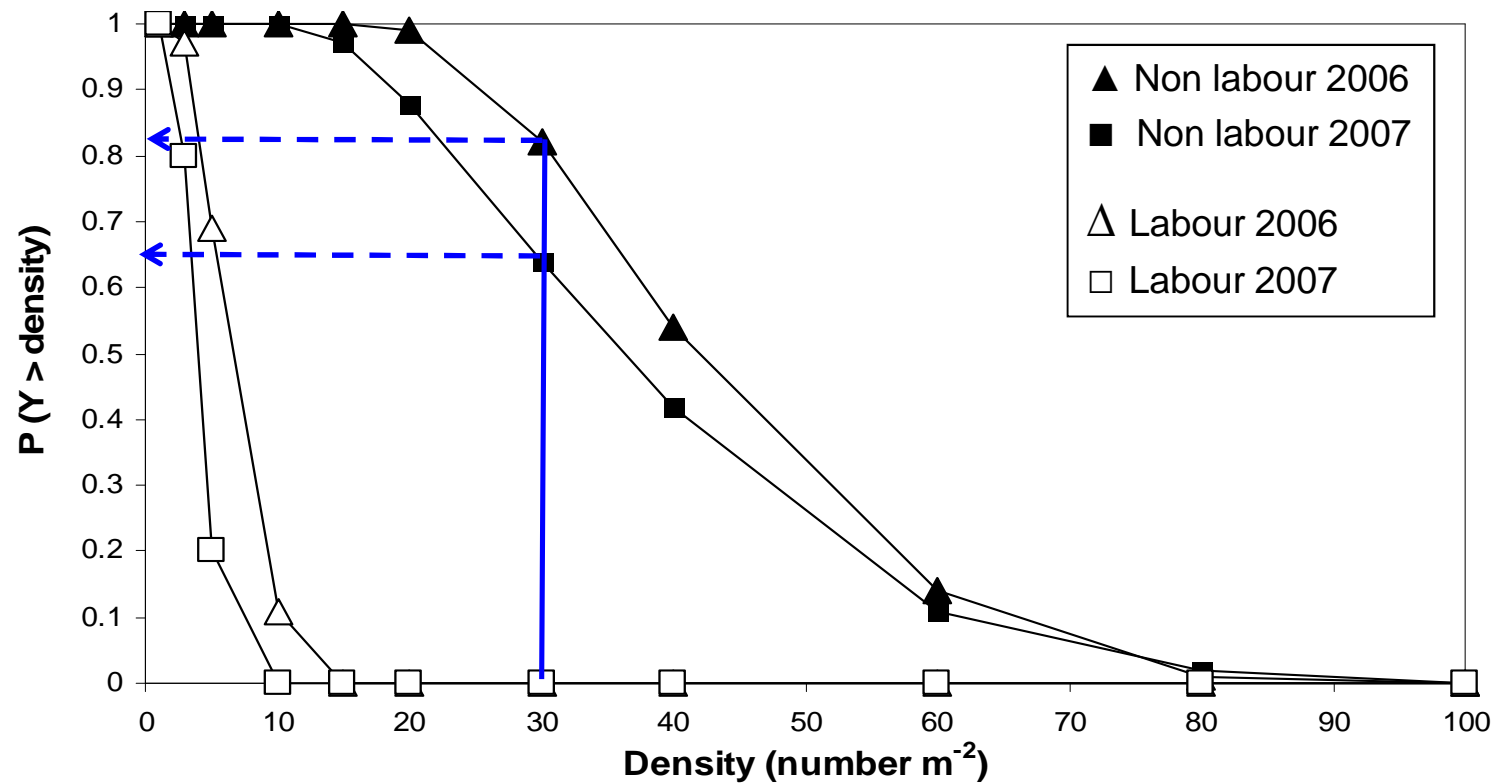
⇒ Faibles valeurs => effondrement densités population été

⇒ Paramètres à estimer plus finement

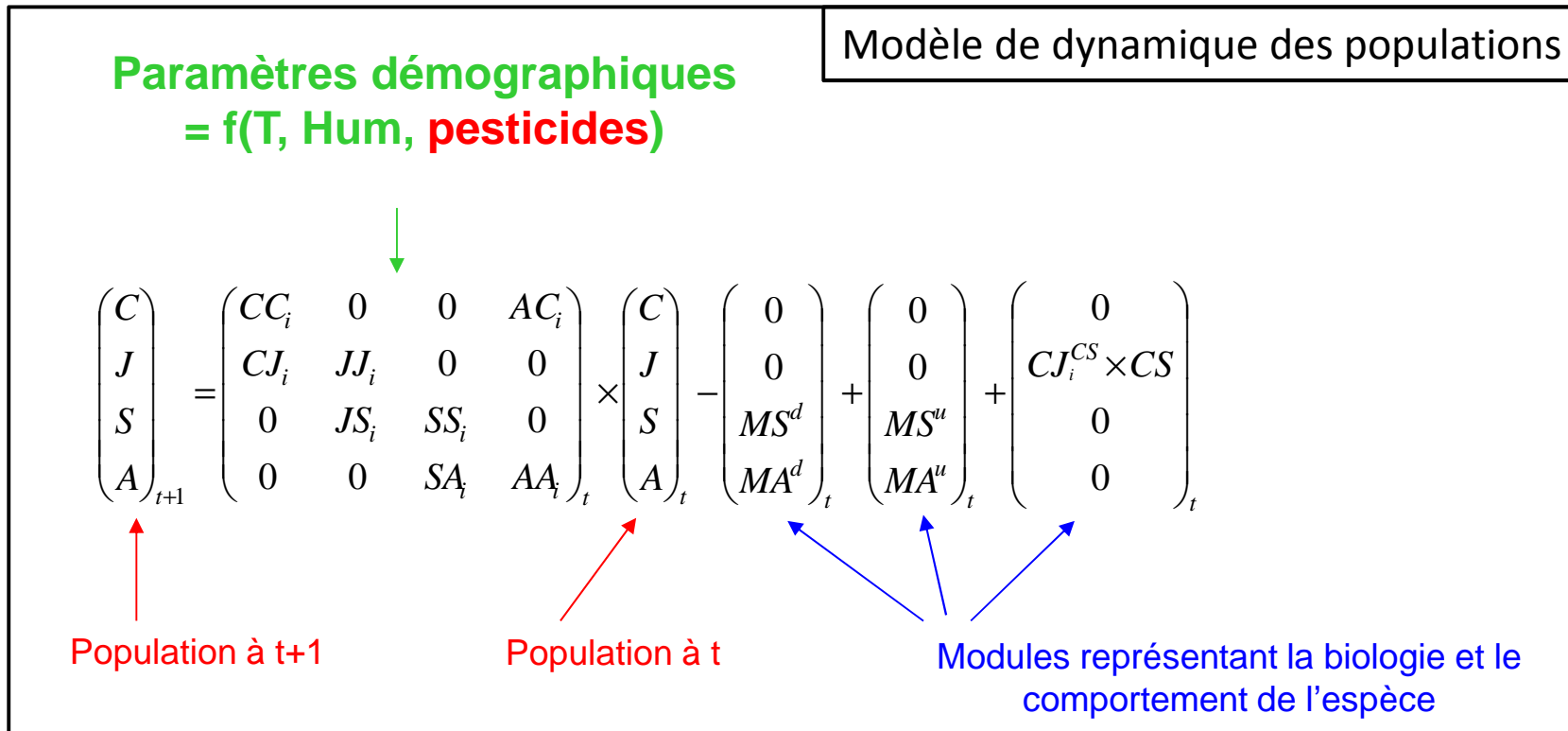
WORMDYN

Utilisations du modèle

Détermination de seuils critiques de densité

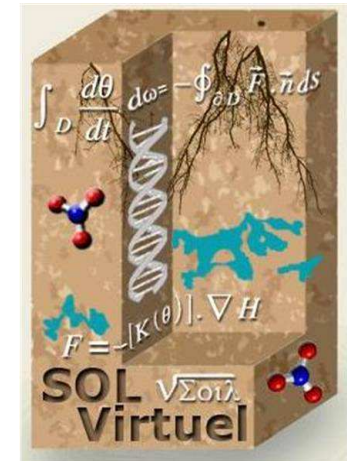


En cours : **adaptation** du modèle à la prise en compte de l'effet des pesticides.



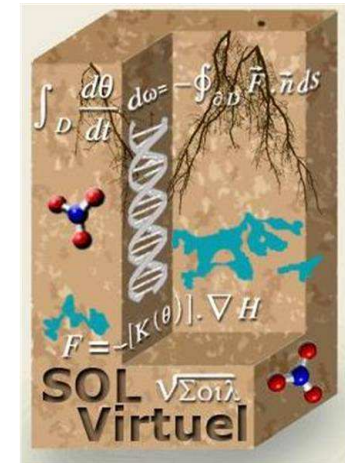
Plateforme de modélisation Sol Virtuel

- En développement depuis 2009 par l'équipe « Sol Virtuel » du centre INRA d'Avignon
- Objectif : coupler des modèles représentant des processus physiques, chimiques et biologiques des sols



Plateforme de modélisation Sol Virtuel

- En développement depuis 2009 par l'équipe « Sol Virtuel » du centre INRA d'Avignon
- Objectif : coupler des modèles représentant des processus physiques, chimiques et biologiques des sols



Virtual Soil global variables

Module global variables

Initialization

Compute

WORMDYN (logiciel R \rightarrow C++)

Validation

Prise en compte :

- Autres espèces
- Perturbation pendant Δt

Ex. **application d'un contaminant**

Internal functions

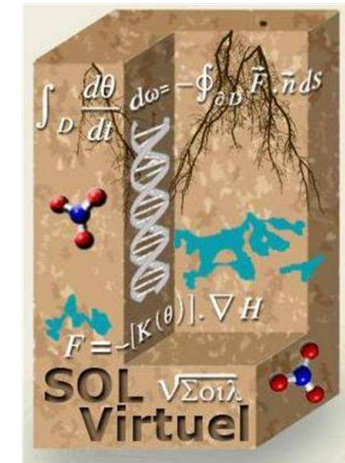
End

Validate

Step 7 : select the upstream modules

Plateforme de modélisation Sol Virtuel

- En développement depuis 2009 par l'équipe « Sol Virtuel » du centre INRA d'Avignon
- Objectif : coupler des modèles représentant des processus physiques, chimiques et biologiques des sols



Virtual Soil global variables

Module global variables

Initialization

Compute

WORMDYN (logiciel R \rightarrow C++)

Validation

Prise en compte :

- Autres espèces
- Perturbation pendant Δt

Ex. application d'un contaminant

Internal functions

End

Validate

Check code Save source codes Previous Next

Step 7 : select the upstream modules

Paramétrisation

Paramétrisation



- Littérature
- Mesure de THV au laboratoire (conditions 1) en présence et absence de pesticide (époxyconazole)

=> Paramètres en conditions « saines »

=> Estimation de la baisse de survie, croissance et fertilité liée à l'application du pesticide.



Conclusions et perspectives

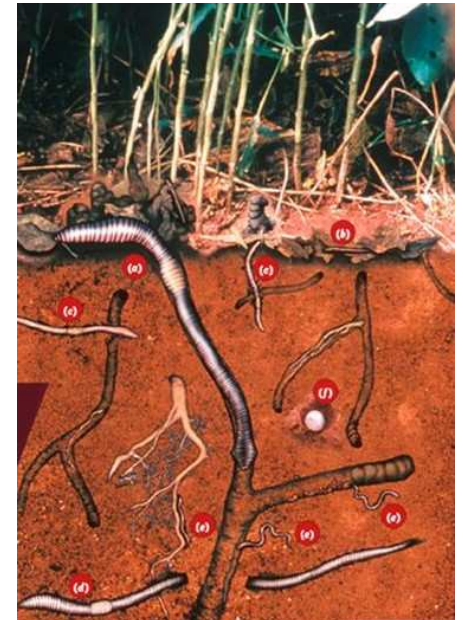
- Couplage d'approches de modélisation et d'expérimentations.
- Plateforme modélisation INRA Sol Virtuel :
 - Couplage avec modèles pour données d'entrées
 - Couplage avec modèles de devenir des contaminants dans les sols

Conclusions et perspectives

- Couplage d'approches de modélisation et d'expérimentations.
- Plateforme modélisation INRA Sol Virtuel :
 - Couplage avec modèles pour données d'entrées
 - Couplage avec modèles de devenir des contaminants dans les sols
- Paramétrisation (littérature et expérimentations)
 - Faibles doses (doses agronomiques)
 - Effets cocktails
 - Stress combinés : stressseurs naturels

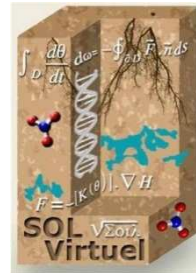
Conclusions et perspectives

- Couplage d'approches de **modélisation et d'expérimentations**.
- Plateforme modélisation **INRA Sol Virtuel** :
 - Couplage avec modèles pour données d'entrées
 - Couplage avec modèles de devenir des contaminants dans les sols
- **Paramétrisation** (littérature et expérimentations)
 - Faibles doses (doses agronomiques)
 - Effets cocktails
 - Stress combinés : stressseurs naturels
- Généralisation à la **communauté** (catégories écologiques, critères morphologiques et comportementaux, Bouché, 1972)
+ prise en compte de la **densité-dépendance**.





Merci à
Axelle Boyer
Mehdi Belkacem



Merci à
François Lafolie
Nicolas Moitrier
Nathalie Moitrier
Cédric Nouguier

Co-auteurs : Michel Bertrand, Jean
Roger-Estrade et Christian Mougin

Merci de votre attention