

# Modélisation pour la protection des cultures

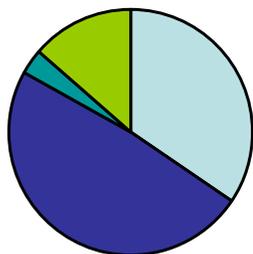
Jean-Noël Aubertot, UMR d'Agronomie INRA/INA PG  
Séminaire du club Modélisation INRA/ACTA/ICTA, Paris, 20 et 21 novembre 2006

# Plan de l'exposé

- 1) Introduction : éléments de contexte
- 2) Concepts pour la protection des cultures
- 3) Rôle des modèles dans la protection des cultures
- 4) Conclusion

# Eléments de contexte : usage des pesticides en France

- 78300 tonnes de matières actives vendues en France en 2005  
(source UIPP)



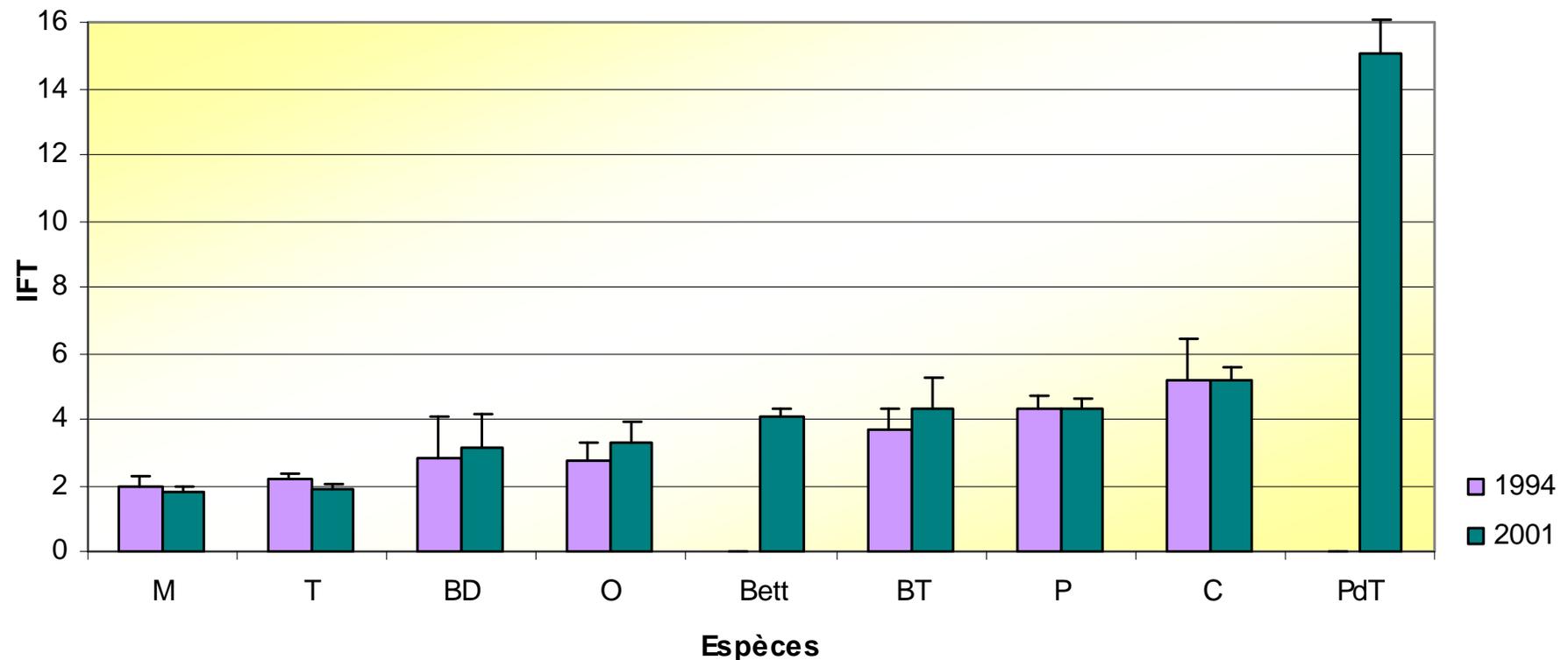
- 3<sup>ème</sup> consommateur mondial et 1<sup>er</sup> consommateur européen de pesticides en quantités totales
- 4<sup>ème</sup> consommateur européen en quantité par ha cultivé : 5,4 kg m.a /ha cultivé (hors prairies permanentes) en 2001

Évolution du tonnage de m.a. phytosanitaires vendues en France	2005	Évolution 1995/2005
Produits de synthèse	60600	-1%
Cuivre et Soufre	17700	-22%
<b>TOTAL</b>	<b>78300</b>	<b>-7%</b>

- Une baisse limitée malgré l'évolution des molécules et les restrictions / interdictions d'usage ...

# Éléments de contexte : usage des pesticides en France

IFT espèce national en 1994 et 2001, tous produits confondus



# Éléments de contexte : réglementations en vigueur...

- 1980 : directive CEE 80-778, qualité de l'eau potable
- 1993 : directive 91/414/CEE, AMM
- 2000 : directive 2000/60/CE, bon état écologique des eaux superficielles en 2015
- 2006 : projet de loi sur l'eau et les milieux aquatiques

# Eléments de contexte : les actions de recherche à l'INRA...

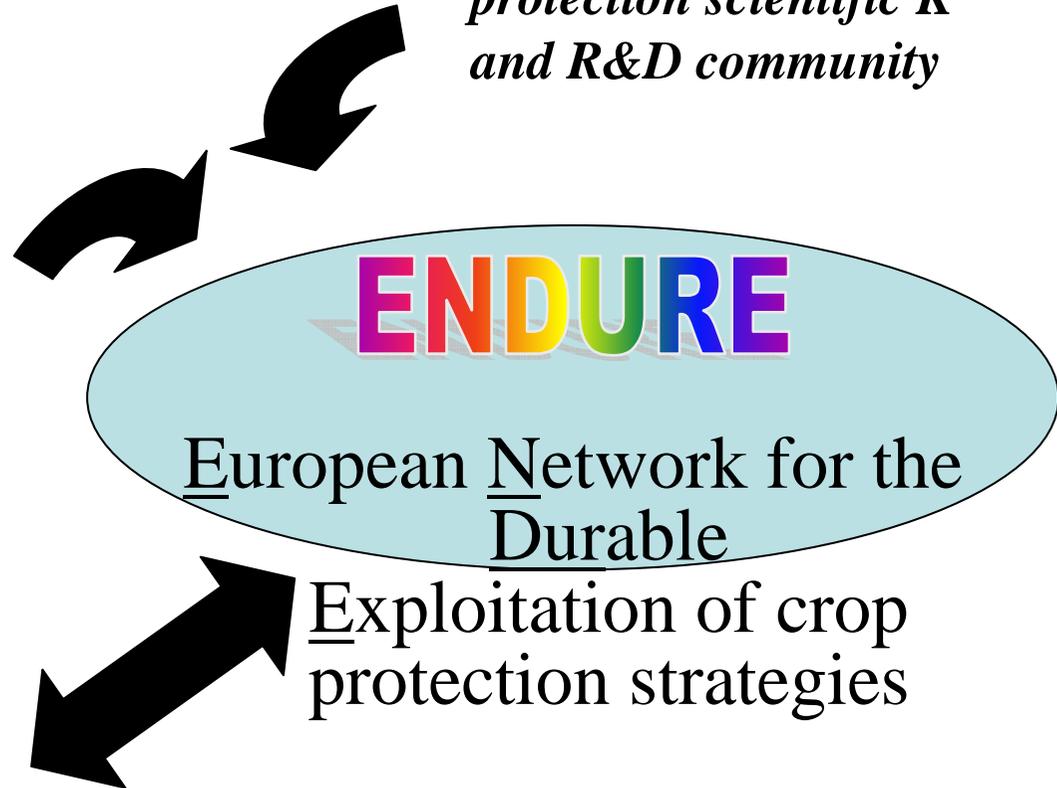
- ESC INRA/CEMAGREF Pesticides, Agriculture et Environnement
- AIP
- Projets ADD
- Réseaux d'animations thématiques
- Réseau d'EXcellence européen ENDURE

**ENDURE**

*Societal expectations for safe food and environmentally-friendly agriculture*

*Fragmented crop protection scientific K and R&D community*

*Area 5.4.6 - Safer and environmentally friendly production methods and technologies and healthier food stuffs.*  
*Topic 1 - Reducing the use of plant protection products.*



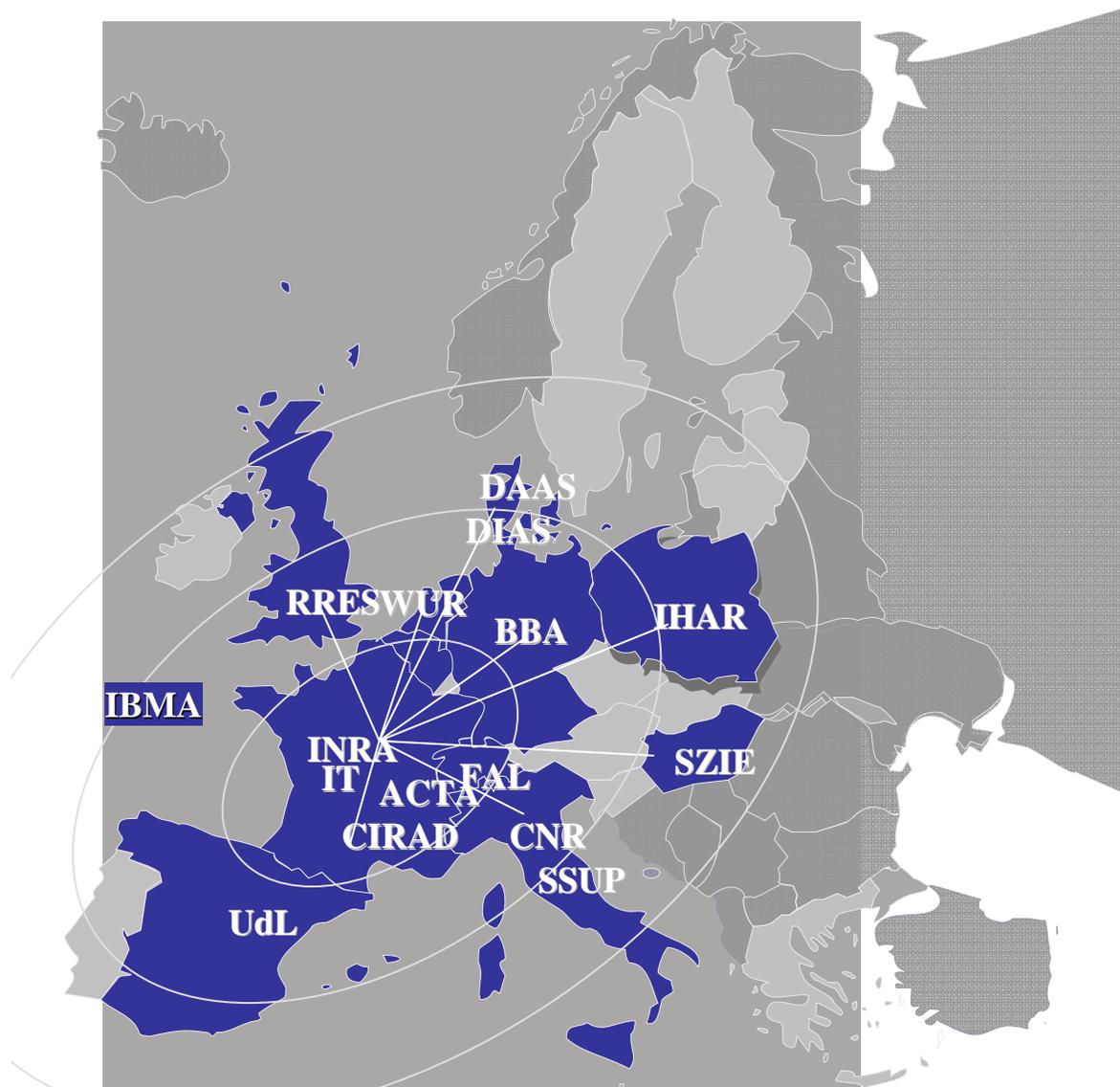
Exploitation of crop protection strategies

**End-users** (farmers, advisers), industry, policy-makers, Society at large...

Proposed EC Contribution

*11,2 M*

# Consortium composition



## Research

- INRA - FR
- BBA - DE
- RRES - UK
- CIRAD - FR
- CNR - IT
- DIAS - DK
- FAL - CH
- WUR - NL
- IHAR - PL

## Education & R

- SSSUP - IT
- SZIE - HU
- UdL - ES

## Extension

- DAAS - DK
- ACTA - FR

## Management

- IT - FR

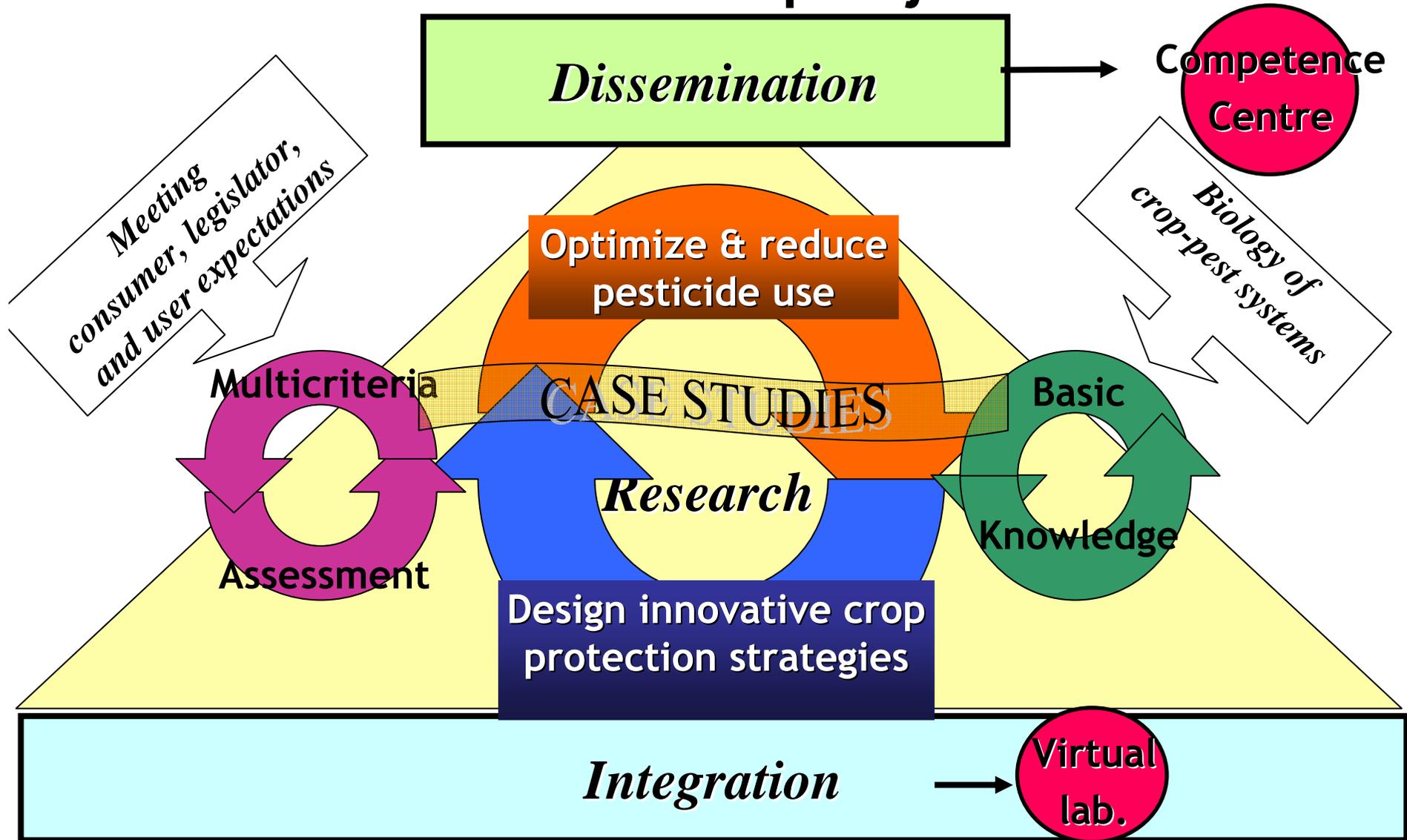
## Industry

- IBMA - Int.

## and...

- INCO countries

# project structure



# Modelling in ENDURE (1)

## Creation of a networked « virtual » laboratory in crop protection

Development of a modelling platform and integration of DSSs

- **Objective:**
  - provide a unified suite of modelling and decision support tools fully validated scientifically and matching end-user requirements
- **Tasks**
  - Collate information on models/support systems available
  - Analyse factors promoting/constraining take-up by end-users
  - Integrate platforms for specific applications
  - Promote the development of new systems
- **Product:**
  - an EU-wide platform supporting and promoting a new generation of DSSs developed in close liaison with end-users

# Modelling in ENDURE (2)

## Designing innovative crop protection strategies (cps)

Design cps through modelling and experimentation

- **Objective:**
  - Design a multi-criteria and dynamic ex-ante assessment framework and methods
- **Tasks**
  - Design a DSS for assessing the sustainability of cps
  - Elaborate innovative and sustainable cps
  - Test most promising cps
- **Products:**
  - DSSs for assessing sustainability
  - Recommendations for research priorities and regulation

# Participation INRA

5 Départements

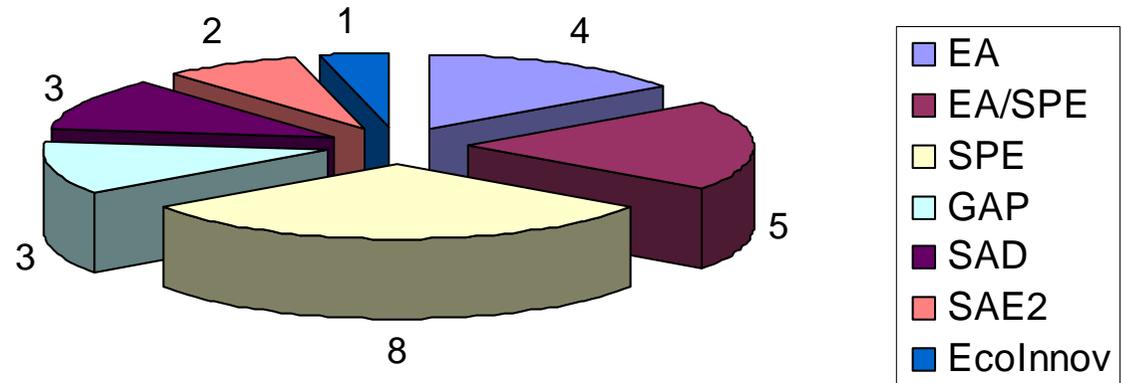
26 Unités

10 Centres

~4,2 ETP titulaires

~4,8 ETP CDD

26 Unités



Angers, Avignon, Bordeaux, Colmar, Dijon, Montpellier, Rennes, Sophia-Antipolis, Toulouse, Versailles-Grignon

*Coordination: P. Ricci*

*+ 20 correspondants principaux par activité*

~20% de l'ensemble d'ENDURE  
en moyens humains et financiers

# Schéma d'évolution des méthodes de protection des cultures (d'après Ferron, 1999)

*Réponse aux exigences  
économiques, écologiques et  
toxicologiques*

## Lutte chimique aveugle

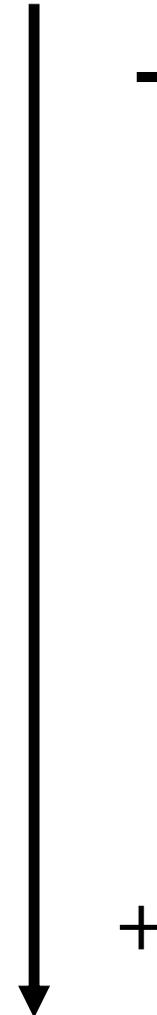
- Utilisation sans discrimination des pesticides les plus efficaces d'après un schéma fixe préétabli

## Lutte chimique conseillée

- Utilisation réfléchie de pesticides à large spectre d'action en relation avec un service d'avertissement

## Lutte raisonnée (ou dirigée)

- Introduction de la notion de « seuil de tolérance »
- Pesticides à faible répercussion écologique
- Sauvegarde des organismes auxiliaires existants



# Schéma d'évolution des méthodes de protection des cultures (d'après Ferron, 1999)

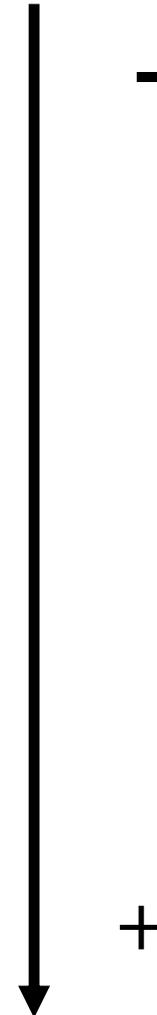
*Réponse aux exigences économiques, écologiques et toxicologiques*

## Protection intégrée

- Comme lutte raisonnée
- Intégration de moyens de lutte biologiques, physiques, biotechniques, de contrôle génétique ainsi que de moyens culturaux
- Limitation maximale de la lutte chimique

## Production agricole intégrée

- Comme protection intégrée
- Soucis d'un développement physiologique équilibré de la plante : application de techniques intégrées (ex : fumure raisonnée)
- Respect intégration et valorisation de tous les facteurs positifs de l'agrosystème



# Positionnement des méthodes de protection intégrée

(Lucas & Meynard, 2000)

	<i>Parcelle</i> (1 - 10 ha)	<i>Îlot de parcelles</i> (100 - 1000 ha)	<i>Région</i> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> ha)
<i>Ajustement tactique des traitements phytos et des biopesticides (opportunité, date, dose, choix m.a... )</i>			
<i>Stratégie de campagne (itinéraires techniques)</i>			
<i>Stratégie à long terme (Systèmes de culture)</i>			

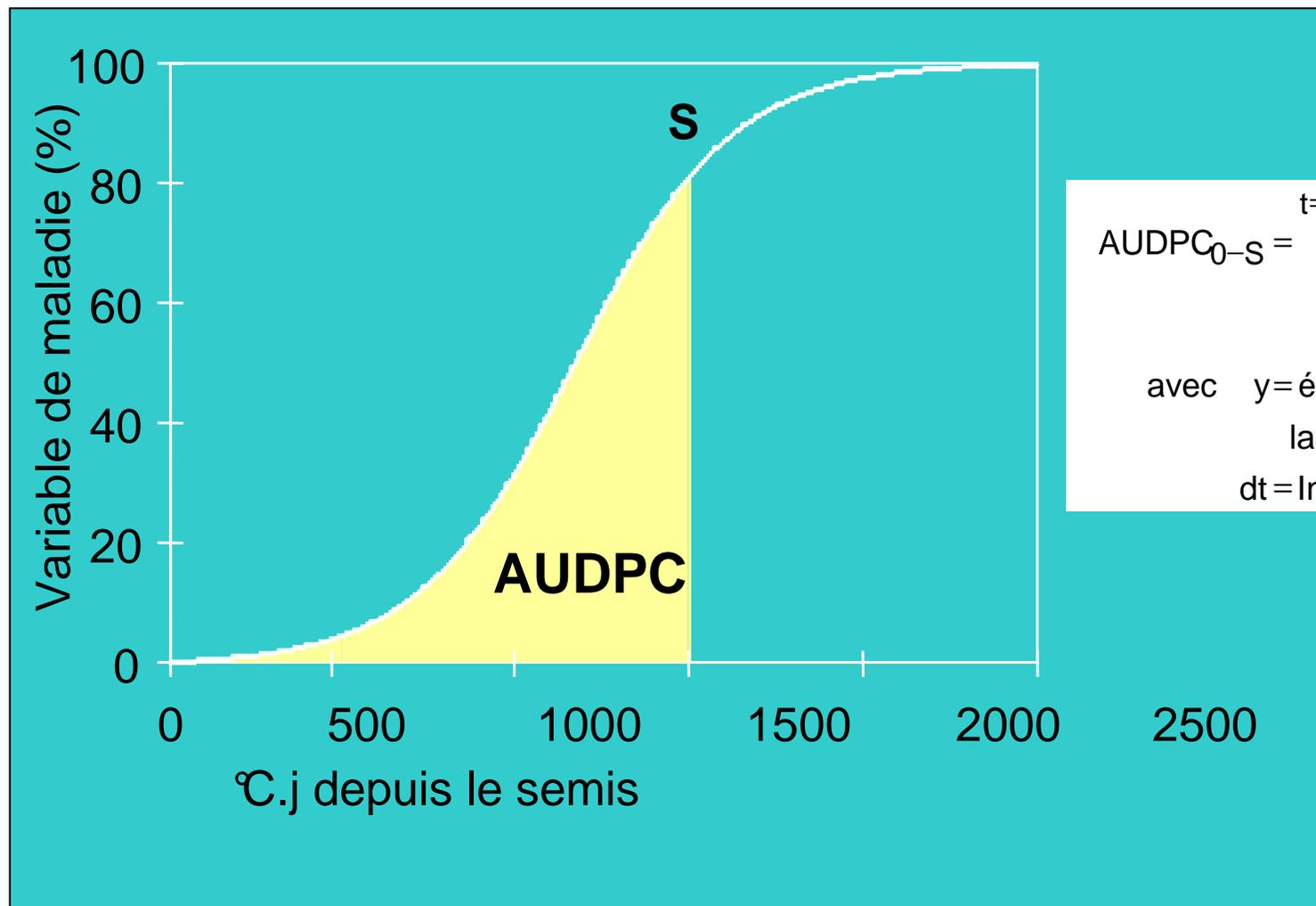
## Positionnement des méthodes de protection intégrée

<i>D'après Lucas &amp; Meynard 2000</i>	<b>Parcelle</b> (1 - 10 ha)	<b>Îlot de parcelles</b> (100 - 1000 ha)	<b>Région</b> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> ha)
<b>Ajustement tactique</b>		Choisir les « parcelles-guides » qui révéleront les risques parasites	
<b>Stratégie de campagne (itinéraires techniques)</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maîtriser les contaminations de proximité</li> <li>- Créer des zones refuges pour auxiliaires</li> </ul>	
<b>Stratégie long terme (Systèmes de culture)</b>		Entretien des zones refuges pour auxiliaires	

## Positionnement des méthodes de protection intégrée

<i>D'après Lucas &amp; Meynard 2000</i>	<b>Parcelle</b> (1 - 10 ha)	<b>Îlot de parcelles</b> (100 - 1000 ha)	<b>Région</b> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> ha)
<b>Ajustement tactique</b>	Ajuster les traitements en fonction de la nuisibilité prévue des ennemis et des effets non intentionnels	Choisir les « parcelles-guides » qui révéleront les risques parasites	Prévoir les risques parasites en fonction du climat de l'année
<b>Stratégie de campagne (itinéraires techniques)</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maîtriser les contaminations de proximité</li> <li>- Créer des zones refuges pour auxiliaires</li> </ul>	
<b>Stratégie long terme (Systèmes de culture)</b>		Entretien des zones refuges pour auxiliaires	

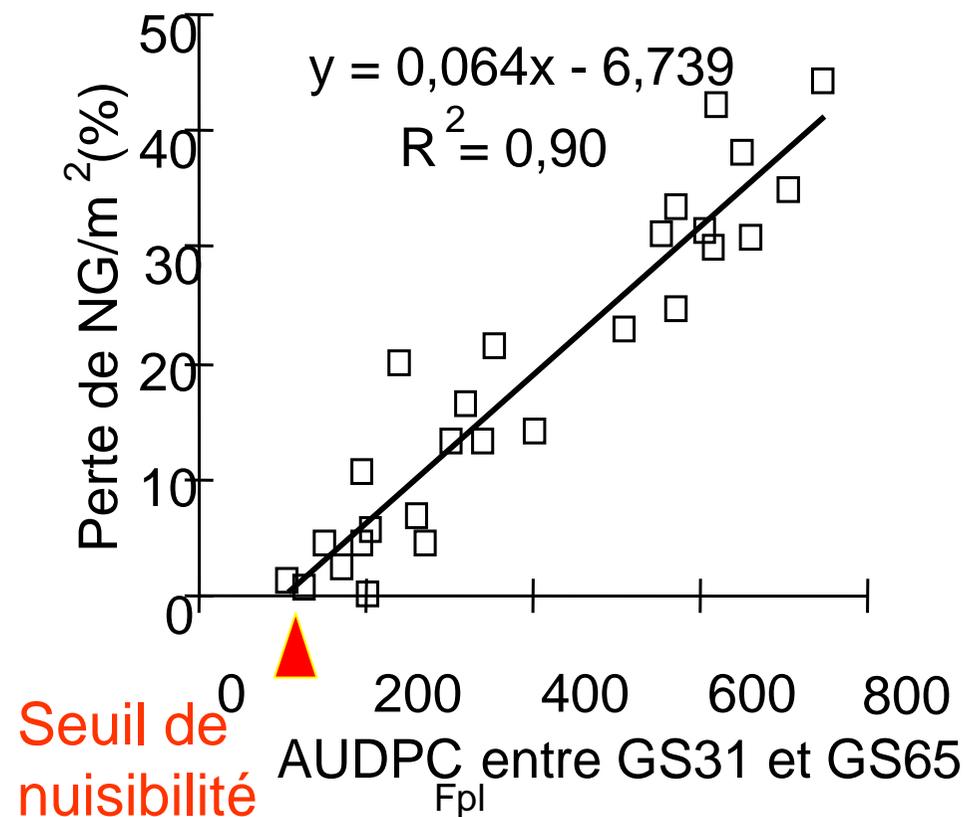
# Représentation schématique de l'aire sous la courbe de progression de la maladie (AUDPC)



$$AUDPC_{0-S} = \sum_{t=0}^{t=S-dt} \frac{[y(t) + y(t+dt)]dt}{2}$$

avec  $y$  = équation cinétique de la variable de maladie  
 $dt$  = Intervalle de Tps thermique

# Relations entre la perte de NG/m<sup>2</sup> et l'AUDPC<sub>Fpl</sub> entre le début de la montaison et la floraison pour le piétin-échaudage sur blé (Schoeny, 1999)



## Positionnement des méthodes de protection intégrée

<i>D'après Lucas &amp; Meynard 2000</i>	<b>Parcelle</b> (1 - 10 ha)	<b>Îlot de parcelles</b> (100 - 1000 ha)	<b>Région</b> (10 <sup>4</sup> - 10 <sup>5</sup> ha)
<b>Ajustement tactique</b>	Ajuster les traitements en fonction de la nuisibilité prévue des ennemis et des effets non intentionnels	Choisir les « parcelles-guides » qui révéleront les risques parasites	Prévoir les risques parasites en fonction du climat de l'année
<b>Stratégie de campagne (itinéraires techniques)</b>	Par des ITK appropriés, réduire le développement des populations de bioagresseurs, leur nuisibilité, et maximiser l'efficacité des méthodes de lutte non chimiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maîtriser les contaminations de proximité</li> <li>- Créer des zones refuges pour auxiliaires</li> </ul>	
<b>Stratégie long terme (Systèmes de culture)</b>	Réduire l'inoculum ou les stocks de semences dans la parcelle grâce au système de culture	Entretien des zones refuges pour auxiliaires	

## Positionnement des méthodes de protection intégrée

<p><i>D'après Lucas &amp; Meynard 2000</i></p>	<p><b>Parcelle</b> (1 - 10 ha)</p>	<p><b>Îlot de parcelles</b> (100 - 1000 ha)</p>	<p><b>Région</b> (10<sup>4</sup>- 10<sup>5</sup> ha)</p>
<p><b>Ajustement tactique</b></p>	<p>Ajuster les traitements en fonction de la nuisibilité prévue des ennemis et des effets non intentionnels</p>	<p>Choisir les « parcelles-guides » qui révéleront les risques parasites</p>	<p>Prévoir les risques parasites en fonction du climat de l'année</p>
<p><b>Stratégie de campagne (itinéraires techniques)</b></p>	<p>Par des ITK appropriés, réduire le développement des populations de bioagresseurs, leur nuisibilité, et maximiser l'efficacité des méthodes de lutte non chimiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maîtriser les contaminations de proximité</li> <li>- Créer des zones refuges pour auxiliaires</li> </ul>	<p>Diversifier les sources de résistance génétique</p>
<p><b>Stratégie long terme (Systèmes de culture)</b></p>	<p>Réduire l'inoculum ou les stocks de semences dans la parcelle grâce au système de culture</p>	<p>Entretien des zones refuges pour auxiliaires</p>	<p>Mise en œuvre coordonnée de moyens de lutte variés pour préserver la durabilité des résistances et l'efficacité des moyens peu néfastes</p>

# Typologie d'utilisation des modèles pour la protection des cultures

- 0) Modèles utilisés en amont (modèles de nuisibilité, modèles de microclimat, phytopathométrie, ...) ou en aval de la protection des cultures (modèles de diffusion des pesticides dans l'environnement, modèles socio-économiques, ...)
- 1) Modèles utilisés pour le raisonnement d'une méthode de lutte
- 2) Modèles utilisés pour la conception ou l'évaluation d'itinéraires techniques ou de systèmes de culture

# Modèles utilisés pour le raisonnement d'une méthode de lutte

- Exemples : Spirouille, Presept, TOP piétin (DRAF/SRPV), SimMat (INRA) ; Decid'Herb (INRA/Arvalis/CETIOM); CRITICOR (INRA); ...

# SimMat: modèle simulant la maturation des périthèces du complexe d'espèces *L maculans*/*L biglobosa*

Si  $\theta_{\min} < \theta < \theta_{\max}$  et  $r > r_{\min}$  sur les derniers  $n_j$  jours

$$JFM(j)=1$$

sinon

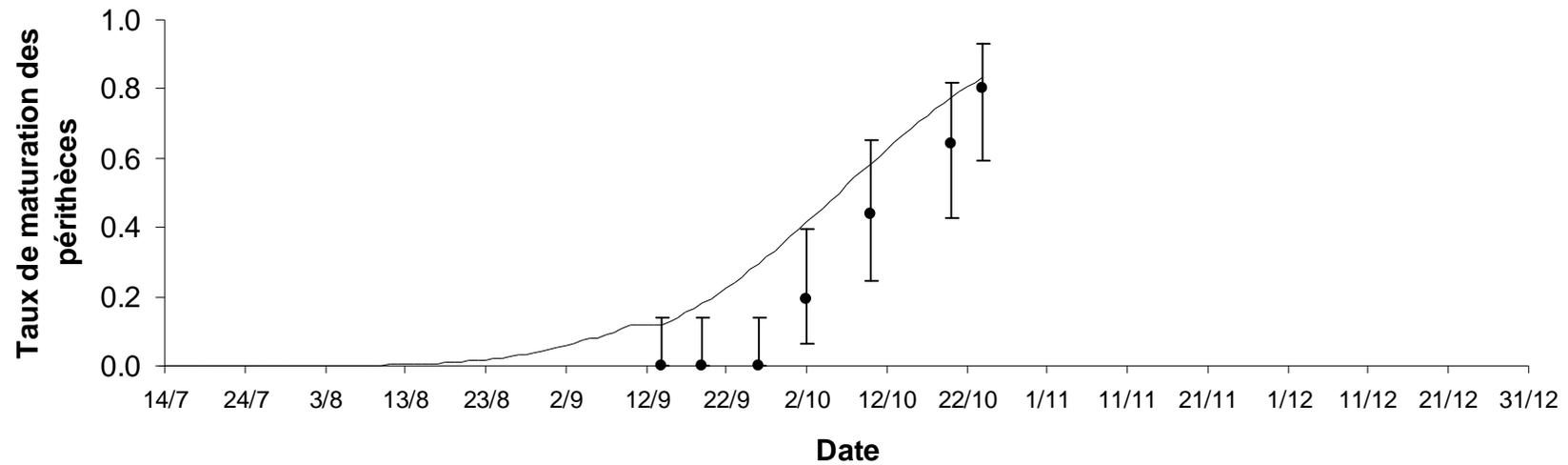
$$JFM(j)=0$$

$$JFMC(j) = \sum_{i=0}^j JFM(i)$$

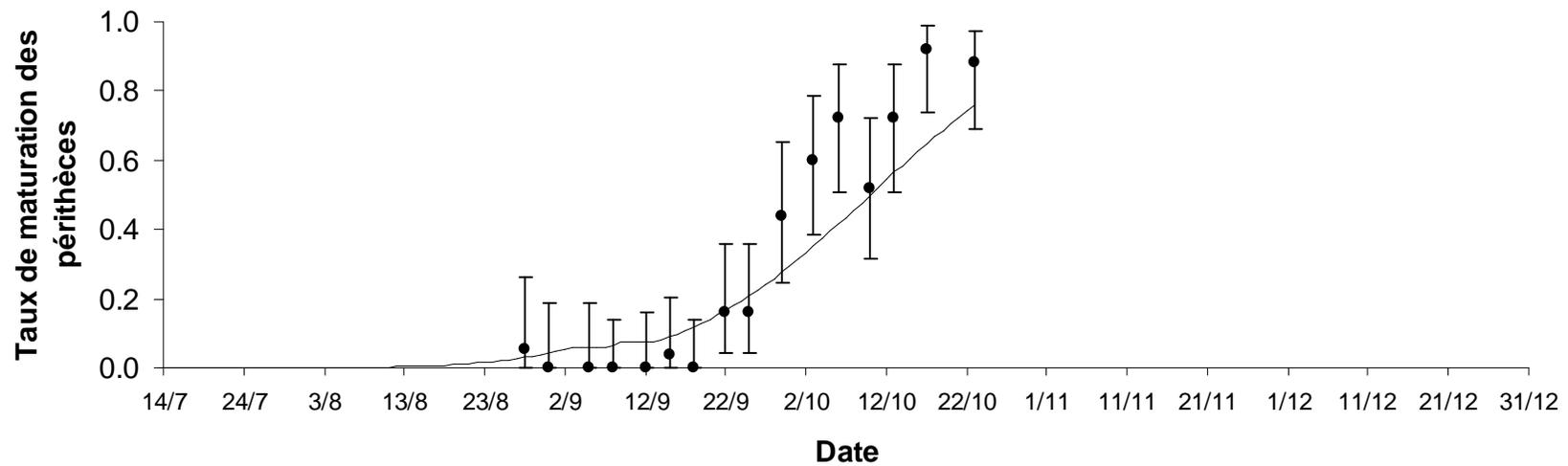
$$P_{PM}(j) \cong \frac{1}{\sigma_{JF} \sqrt{2\pi}} \int_0^{JFMC(j)} e^{-\frac{(x - N_{JF})^2}{2\sigma_{JF}^2}} dx$$

# Exemple d'évaluation de la qualité prédictive de SimMat (données SRPV)

## Fleury-les-Aubray, 2006



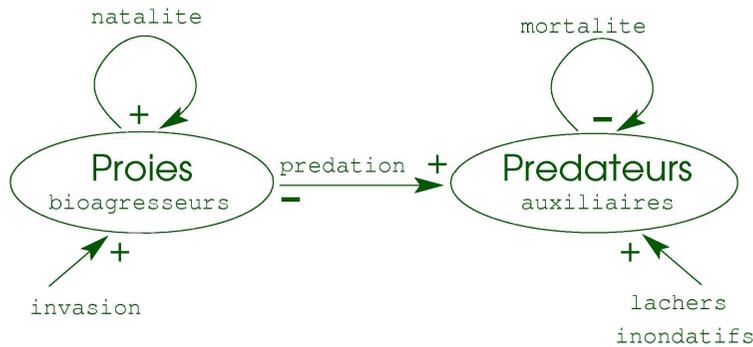
## Rosières, 2006



# Modèles utilisés pour le raisonnement d'une méthode de lutte

- Exemples : Spirouille, Presept, TOP piétin (DRAF/SRPV), SimMat (INRA) ; Decid'Herb (INRA/Arvalis/CETIOM); CRITICOR (INRA); ...
- Caractéristiques :
  - Déterministes
  - Prévisions =  $f(\text{climat}, \text{sdc})$
  - Echelle de temps : le cycle cultural
  - Echelle d'espace : la région (en général, parfois la parcelle)
- Evaluation : qualité d'ajustement, qualité de prédiction, qualité des décisions préconisées (courbes ROC)

# Optimisation de la lutte biologique (URIH, collaboration



## Modèle : système dynamique impulsif

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) - g(x)y & \text{Population de Bio-agresseurs} \\ \dot{y} = h(x)y - my & \text{Population d'Auxiliaires} \\ \forall n \in \mathbb{N}, y(nT^+) = y(nT) + \mu T & \text{lâcher d'Auxiliaires tous les } T \\ f(0) = g(0) = h(0) = 0; g'(0) > 0; \forall x > 0, g(x) > 0 \end{cases}$$

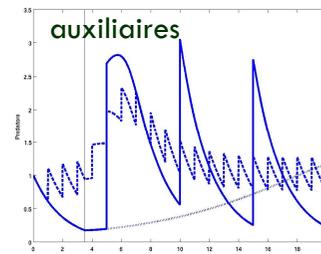
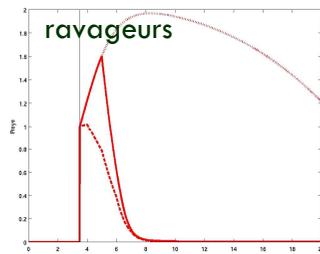
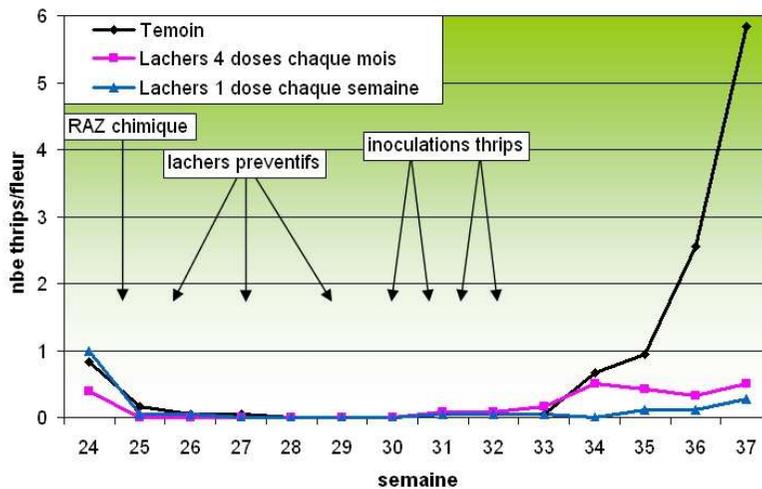
solution d'équilibre

$$(x_p(t), y_p(t)) = \left( 0, \frac{\mu T e^{-m(t[T])}}{1 - e^{-mT}} \right)$$

stable si :

$$\mu > S \triangleq \sup_{x \geq 0} \frac{mf(x)}{g(x)}$$

Variations dose/fréquence des lachers en lutte biologique inondative (*thrips*, *N. cucumeris* sur Roses)



## Problème d'optimisation

culture saine & auxiliaires installés

instant  $t_0$  : invasion par  $x_0$

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \gamma(\tau - t_0) d\tau, \quad x(t_f) \triangleq \text{EIL}, \quad \gamma(\cdot)$$

Chercher  $T$  minimisant  $J$ , pour le pire  $t_0$ , de façon robuste

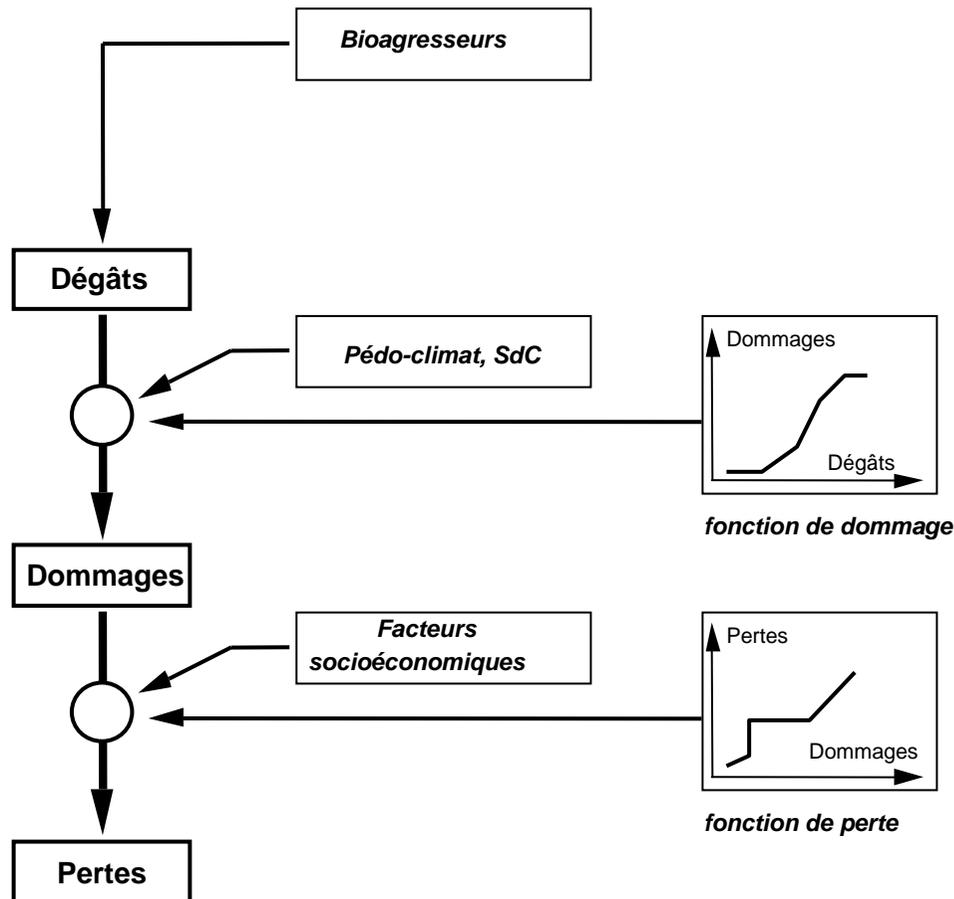
$$\hookrightarrow \max_{(x_0, S) \in \mathcal{B}} \left[ \max_{t_0} \left( J(T, x_0, S) \right) \right] \text{ croissante de } T$$

plus  $T$  petit, plus  $J$  faible (pire  $t_0$  & robuste)

# Pistes d'amélioration des modèles utilisés pour le raisonnement d'une méthode de lutte

- Meilleure intégration des fonctions de  
dommage et des fonctions de pertes

## Relations entre bioagresseurs (dynamiques de populations), et dégâts, dommages, et pertes



Une dynamique de bioagresseurs (une 'épidémie', au sens générique)

- peut, ou non, provoquer des dégâts dans un peuplement,
- qui peuvent, ou non, causer un dommage (des pertes de récolte),
- qui peuvent, ou non, causer une perte (des pertes économiques).

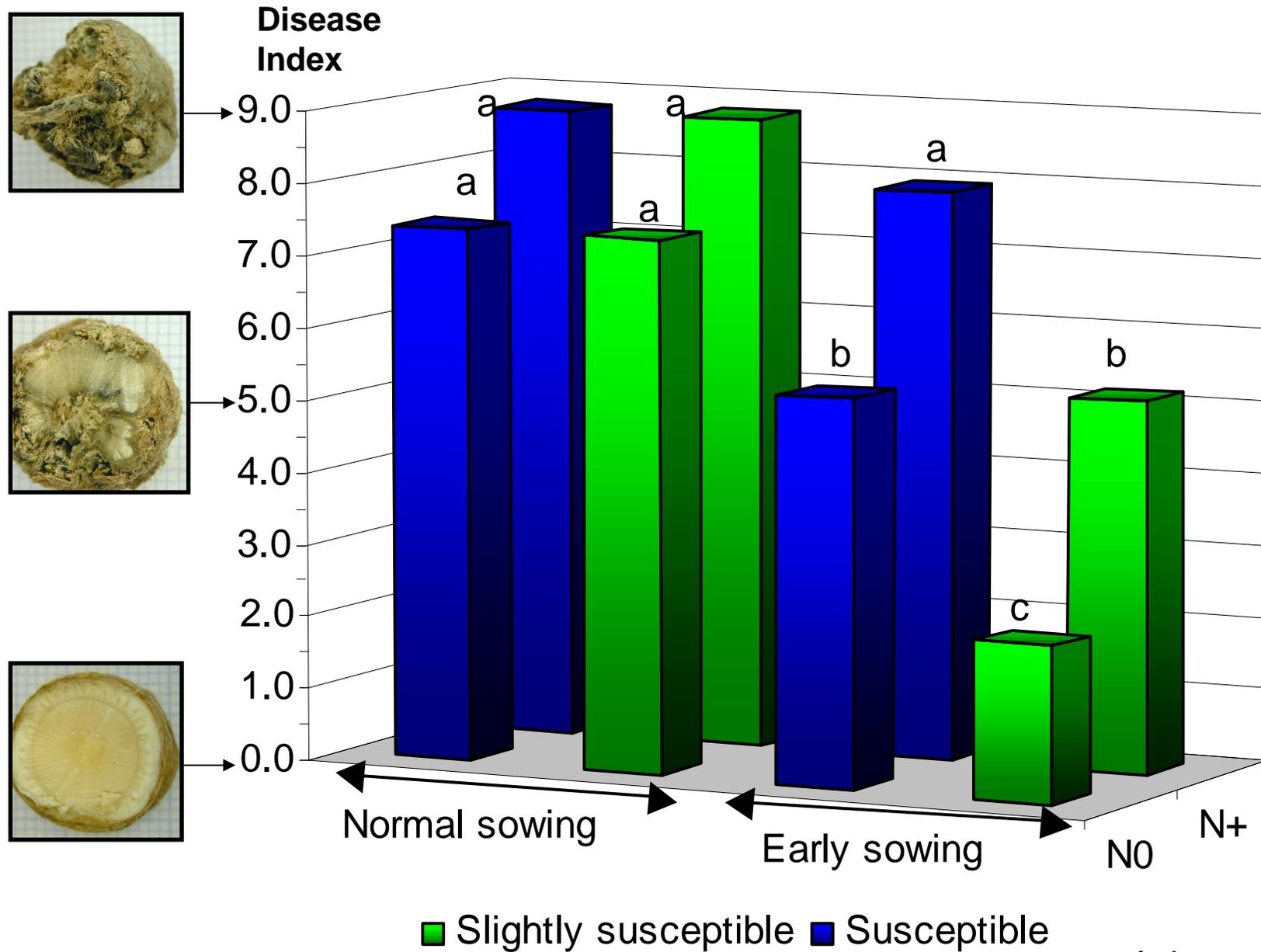
D'après Savary, 2005

# Pistes d'amélioration des modèles pour la protection raisonnée

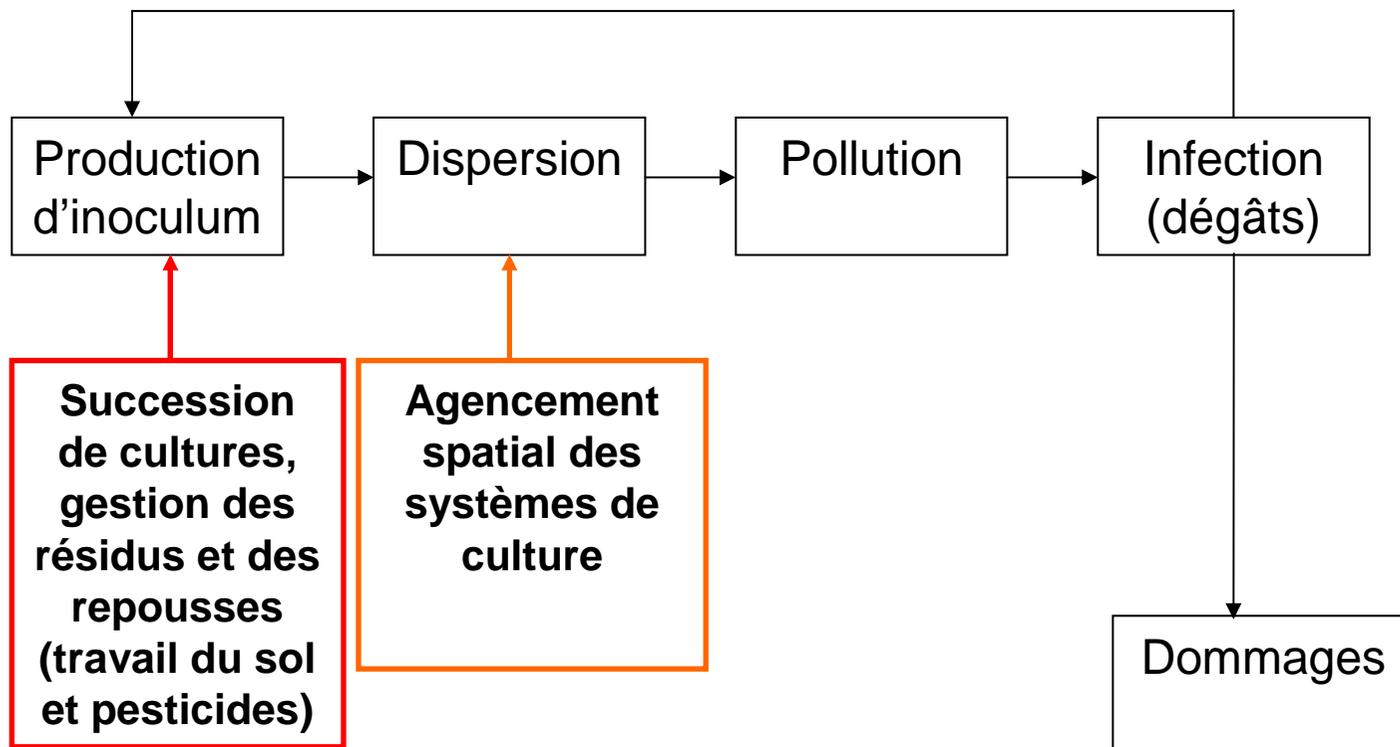
- Meilleure intégration des fonctions de dommage et des fonctions de pertes
- Prise en compte des pressions de sélection appliquées

... every decision has an effect on crop health (Zadoks, 1993).

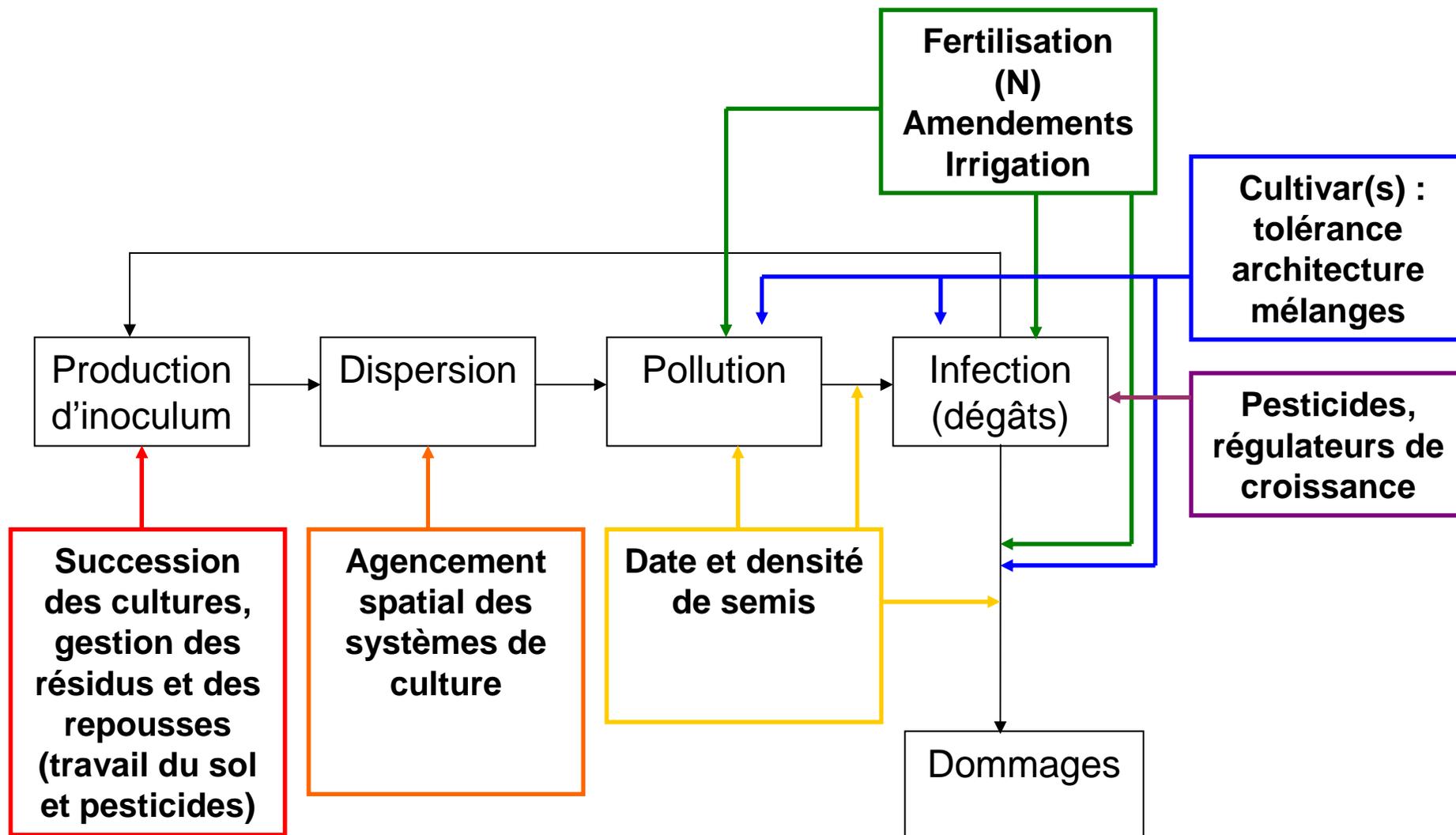
## Severity of crown canker of oilseed rape at maturity (*Leptosphaeria maculans*) as a function of crop management



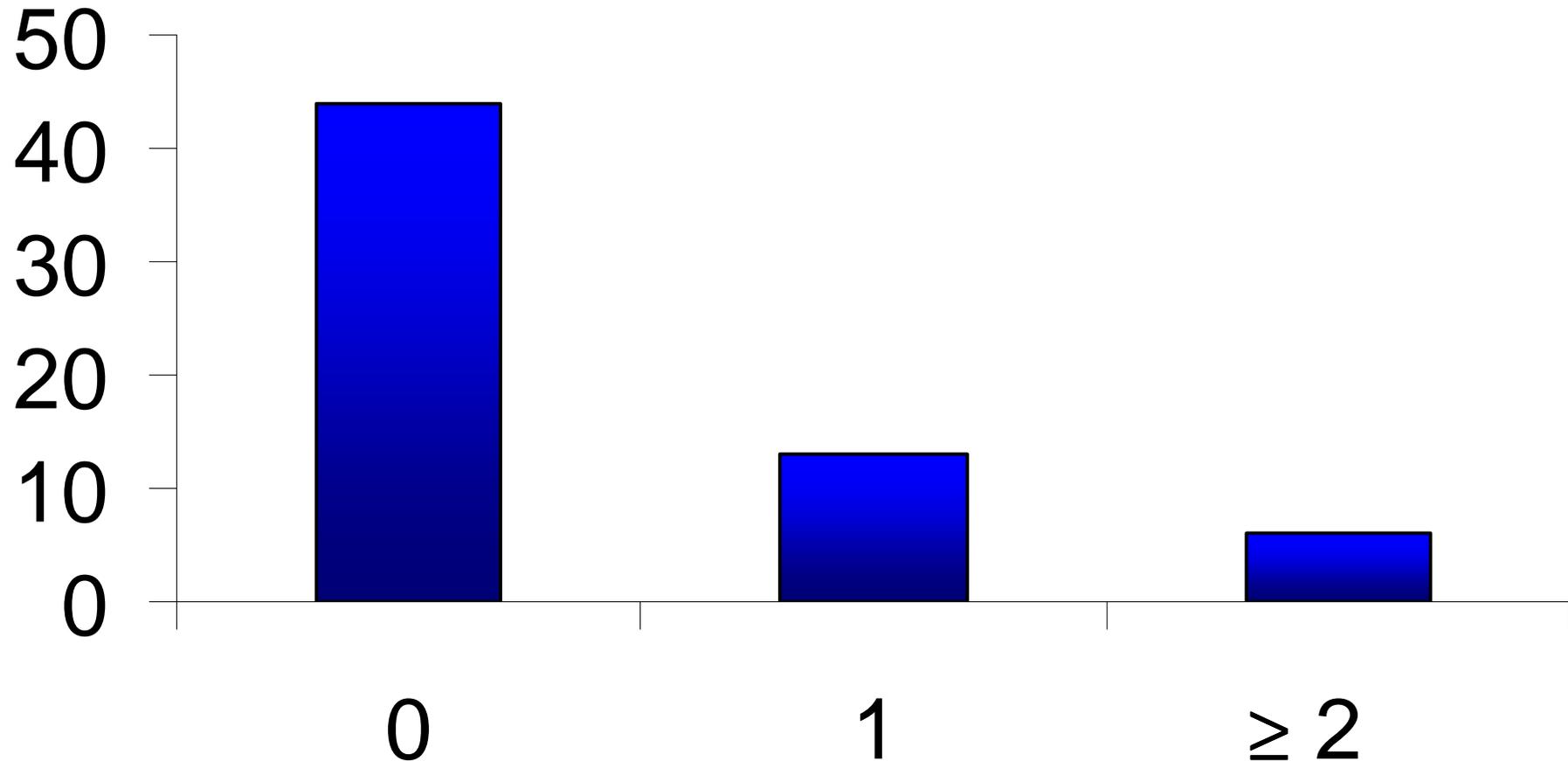
## Représentation générique du cycle d'une maladie et des interactions directes avec le(s) système(s) de culture



## Représentation générique du cycle d'une maladie et des interactions directes avec le(s) système(s) de culture



## Nombre de modèles épidémiologiques pour le blé en fonction du nombre d'éléments de l'itinéraire technique explicitement pris en compte



Sources: CAB abstracts (1973-2005); Key-words: epidemio\*+model\*+wheat

... every decision has an effect on crop health (Zadoks, 1993).

# Modèles utilisés pour la conception ou l'évaluation d'itinéraires techniques ou de systèmes de culture

- Exemples : EPIPPE (Zadoks, 1989), Modèles des maladies du pied du blé (Colbach et al., 1995), Déciblé (Chatelain et al., 2005), Betha (Loyce, 2002), RicePest (Willoquet et al., 2004), InfoCrop (Aggarwal, 2006), OMEGASYS (Morison et al., en cours), ...

## Formalisme mathématique proposé dans le cas des maladies du pied de blé (Gilligan, 1983; Colbach et al., 1995)

Sur une surface donnée, on a :

$n$  plantes et  $p$  unités élémentaires d'inoculum primaire

On note :

- $i$ , le nombre de plantes infectées
- $k_1$ , la probabilité qu'une plante saine soit infectée par une unité élémentaire d'inoculum primaire par unité de temps thermique  $dt$
- $k_2$ , la probabilité qu'une plante saine soit infectée par le cycle secondaire d'une plante malade par unité de temps thermique  $dt$

$$\frac{di}{dt} = k_1 p(n-i) + k_2 i(n-i)$$

On pose :

-  $y = \frac{\dot{i}}{n}$  , incidence de la maladie

-  $C_1 = k_1 p$ , taux d'infection d'une plante saine par l'inoculum primaire par unité de temps thermique

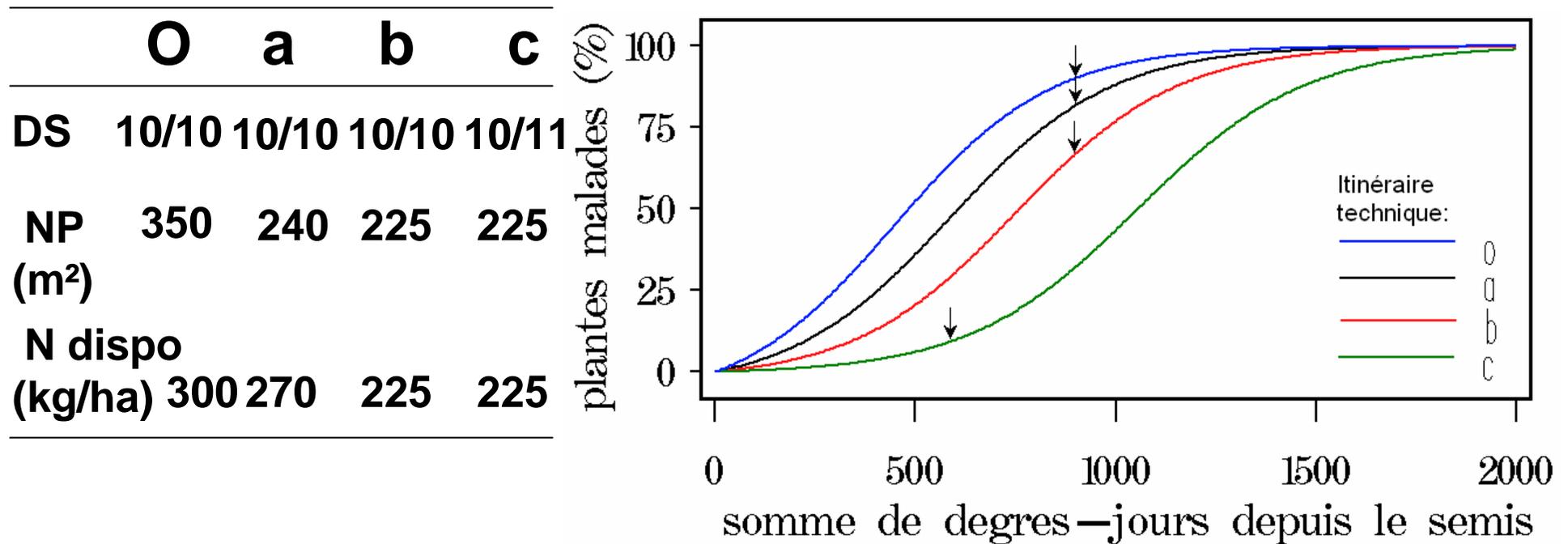
-  $C_2 = k_2 n$ , taux d'infection maximum d'une plante saine par les infections secondaires par unité de temps thermique

Après intégration :

$$y = \frac{1 - e^{-(c_1 + c_2)t}}{1 + \frac{c_2}{c_1} e^{-(c_1 + c_2)t}}$$

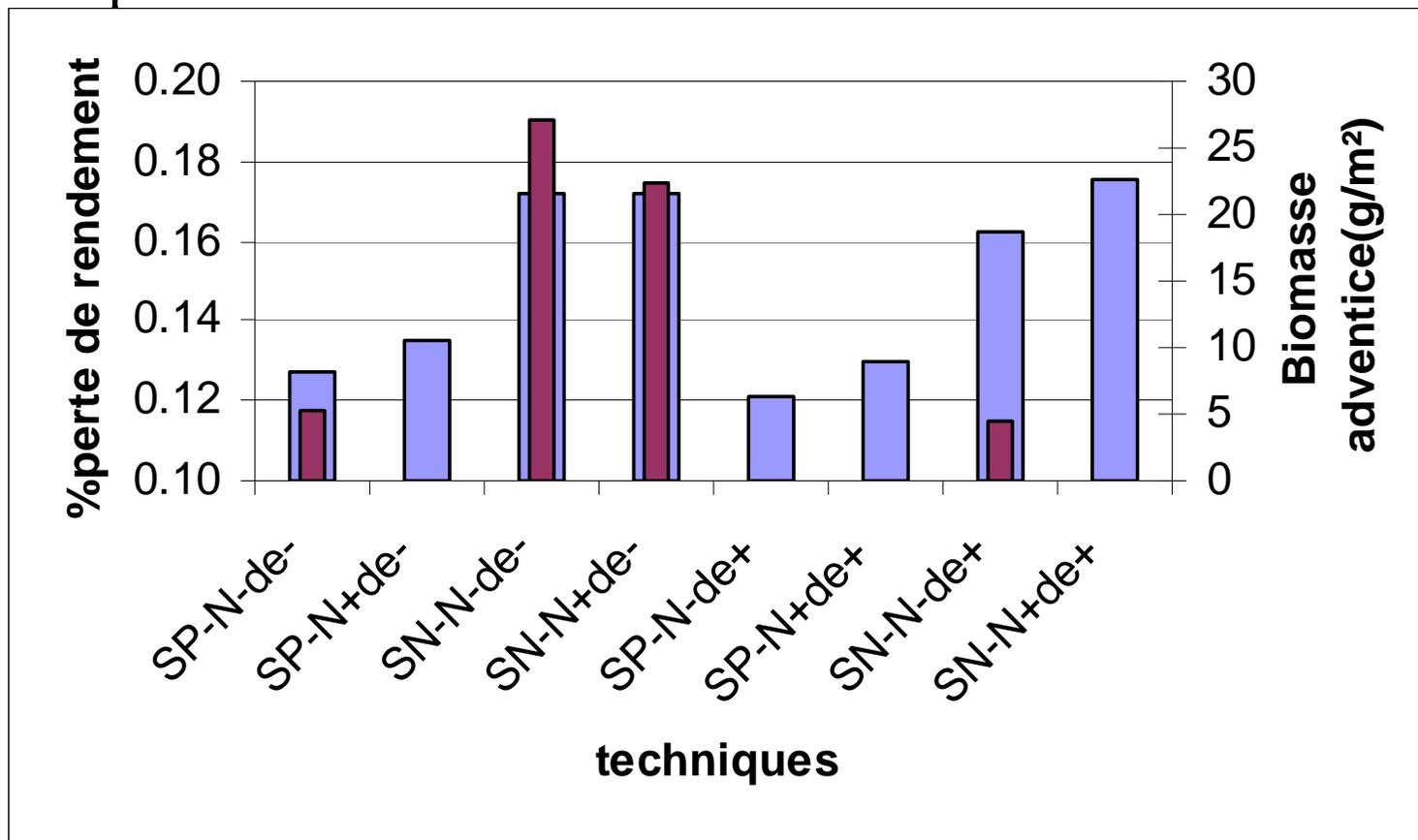
# L'intégration des effets de pratiques sur les coefficients $C_1$ et $C_2$ permet d'évaluer le risque de la maladie pour différents itinéraires techniques

Exemple : simulation itinéraires à fort et à faible niveau d'intrants



# Premières simulations OMEGASYS (Morison et al., en cours)

Géranium dissectum (50/m<sup>2</sup>) ; labour ; pression phoma forte (250 ascospores/m<sup>3</sup>) ; premières contaminations mi-septembre



■ Perte rendement phoma ■ adventices

# CONCLUSION

- Nécessité de prendre en compte des profils de bioagresseurs pour la mise au point de stratégies de protection ou de production intégrée
- Meilleure représentation des pertes de récolte
- Nécessité de mieux intégrer les différentes méthodes de contrôle des populations
- Représentation de variables de production, de variables économiques et environnementales

- Nécessité d'élargir les échelles d'espace et de temps considérées

- Peu de modèles disponibles pour la gestion collective de bioagresseurs, souvent pour traiter d'aspects liés à la durabilité (e.g. Kiyosawa, 1982; Gazzoni, 1998 ; van den Bosch and Gilligan, 2003)

- Pas(?) de modèle représentant les effets des systèmes de culture et de leur agencement spatial sur les bioagresseurs

- Prise en compte des effets du système de culture pour les bioagresseurs au degré de polyétisme élevé

- Prise en compte des structures génétiques des populations

- Peu important les techniques de modélisation utilisées (équations différentielles, régressions multiples, réseaux de neurones, ...), c'est le point de vue adopté qui prime : choix des VE et VS, de la structure du modèle et du type de décision à prendre
- Articulation modélisation/expérimentation/diagnostic
- Les simulations ou l'aide à la décision ne sont pas les seules "sorties" intéressantes d'un modèle !