



# Apports de l'agronomie à la gestion durable des bioagressions des cultures, Focus sur la gestion durable des résistances variétales



Jean-Noël Aubertot, UMR AGIR, Toulouse



Séminaire Groupe Céréales, Clermont-Ferrand

08/04/2015



Travaux sur  
la gestion  
durable des  
résistances

Ø

Travaux  
sur blé





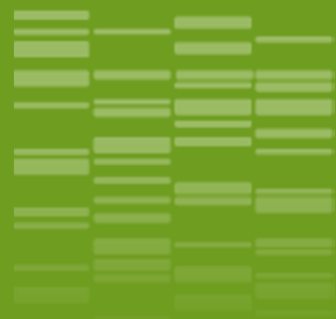
## PLAN

- 1) Présentation de la plateforme de modélisation SIPPOM
- 2) Présentation du cadre des PDMG
- 1) Présentation de la plateforme de modélisation qualitative IPSIM



## PLAN

- 1) Présentation de la plateforme de modélisation SIPPOM
- 2) Présentation du cadre des PDMG
- 1) Présentation de la plateforme de modélisation qualitative IPSIM



# Simulator for Integrated Pathogen Population Management

Plateforme de modélisation pour simuler les **effets des systèmes de culture** et de leur **agencement dans le territoire** sur **l'adaptation des populations pathogènes aux résistances** présentes dans les variétés

Thèses : Schneider (2005) ; Lô-Pelzer (2008) ; Rakotonindraina (2012) ; Hossard (2012) ;  
Herbez (à soutenir en 2016)




Le choix variétal est l'un des piliers de la production intégrée.

## Comment préserver l'efficacité des résistances variétales ?

“Integrated Avirulence Management involves a strategy to limit the selection pressure exerted on pathogen populations and, at the same time, reduce the size of pathogen populations by combining cultural, physical, biological or chemical methods of control”.

*Aubertot JN, West JS, Bousset-Vaslin L, Salam MU, Barbetti MJ, Diggle AJ, EJPP 2006.*



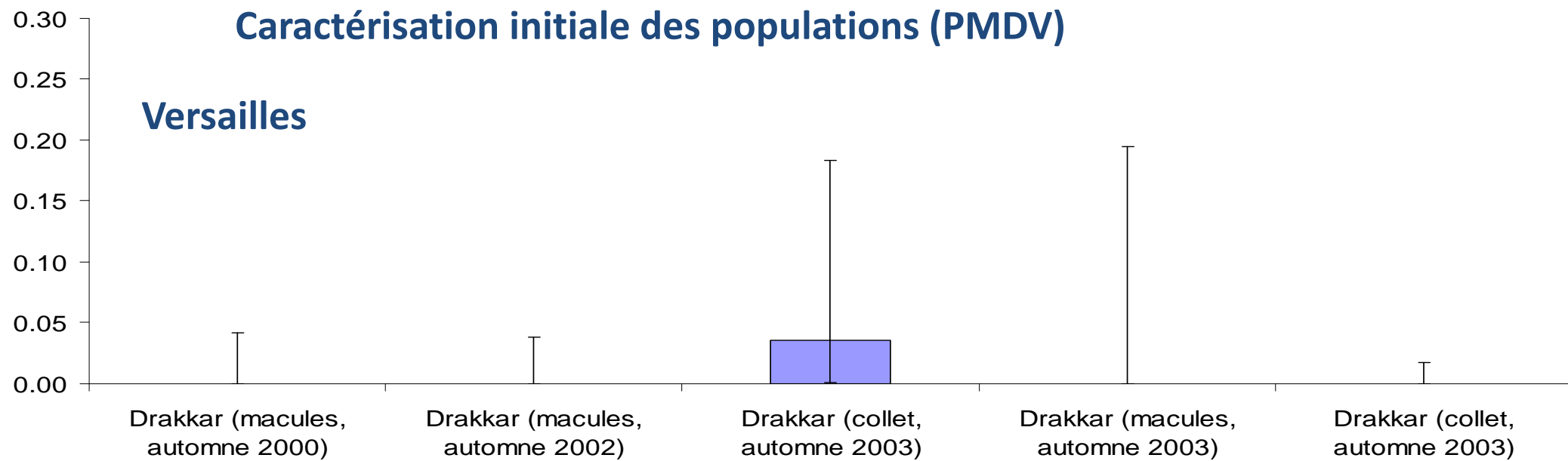
Existe-t-il une preuve expérimentale de l'effet du système de culture sur la vitesse d'adaptation d'une population pathogène à une résistance spécifique ?



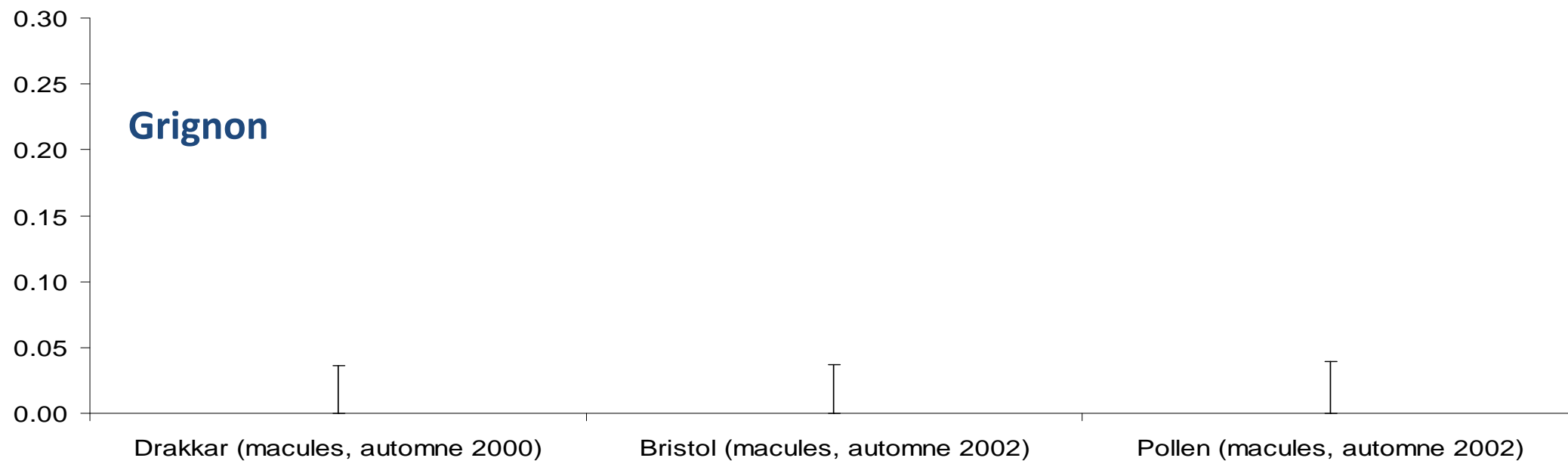
Mise en place d'une expérimentation pour tester l'hypothèse selon laquelle le système de culture influence la vitesse d'adaptation d'une population pathogène (collaboration PMDV et UMR d'Agronomie de Grignon).

## Caractérisation initiale des populations (PMDV)

### Versailles

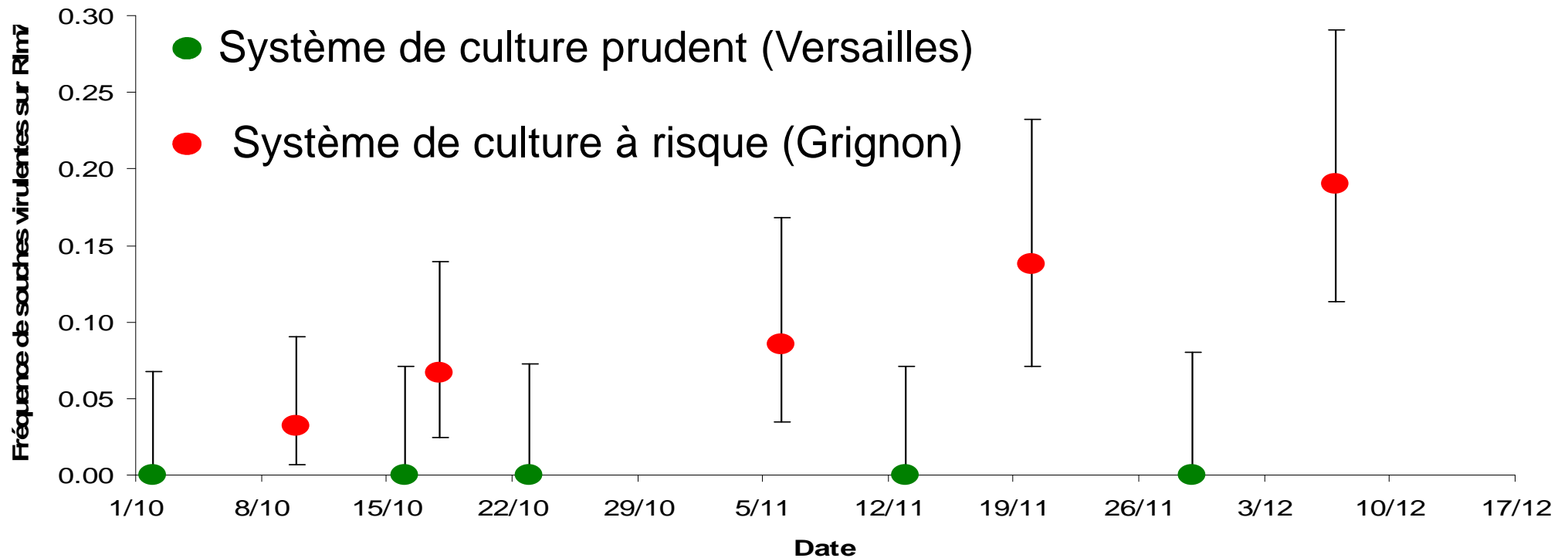


### Grignon



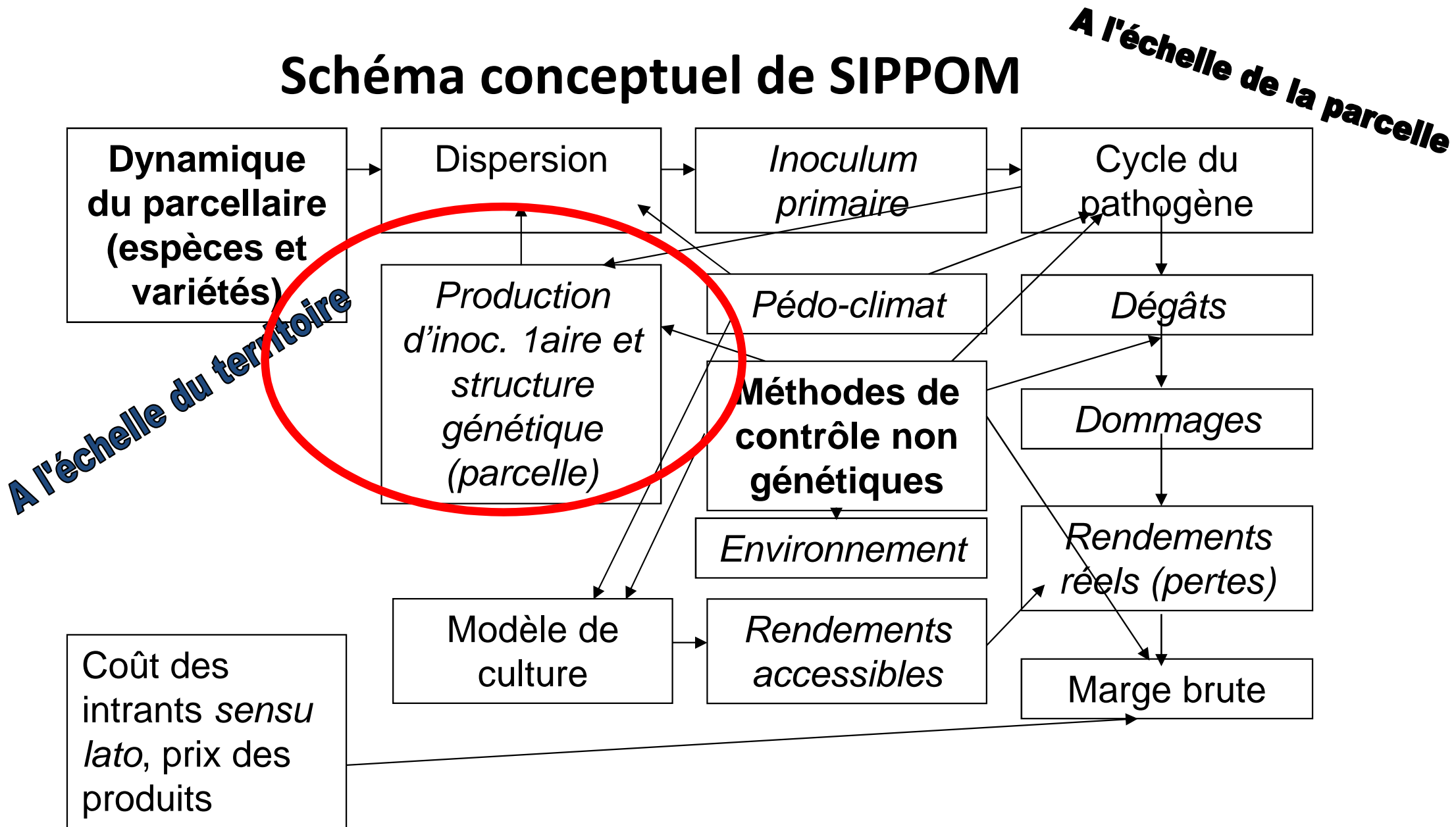


## Caractérisation de la virulence à l'automne 2006 (PMDV), après deux années de culture (premier semis à l'été 2004)



*Daverdin G, Rouxel T, Gout L, Aubertot JN, Fudal I, Meyer M, Carpezat J, Balesdent MH. 2012. Genome structure, reproductive behaviour and cultural practices impact the evolutionary potential of a fungal phytopathogen. Public Library of Science Pathogens.*

# Schéma conceptuel de SIPPOM



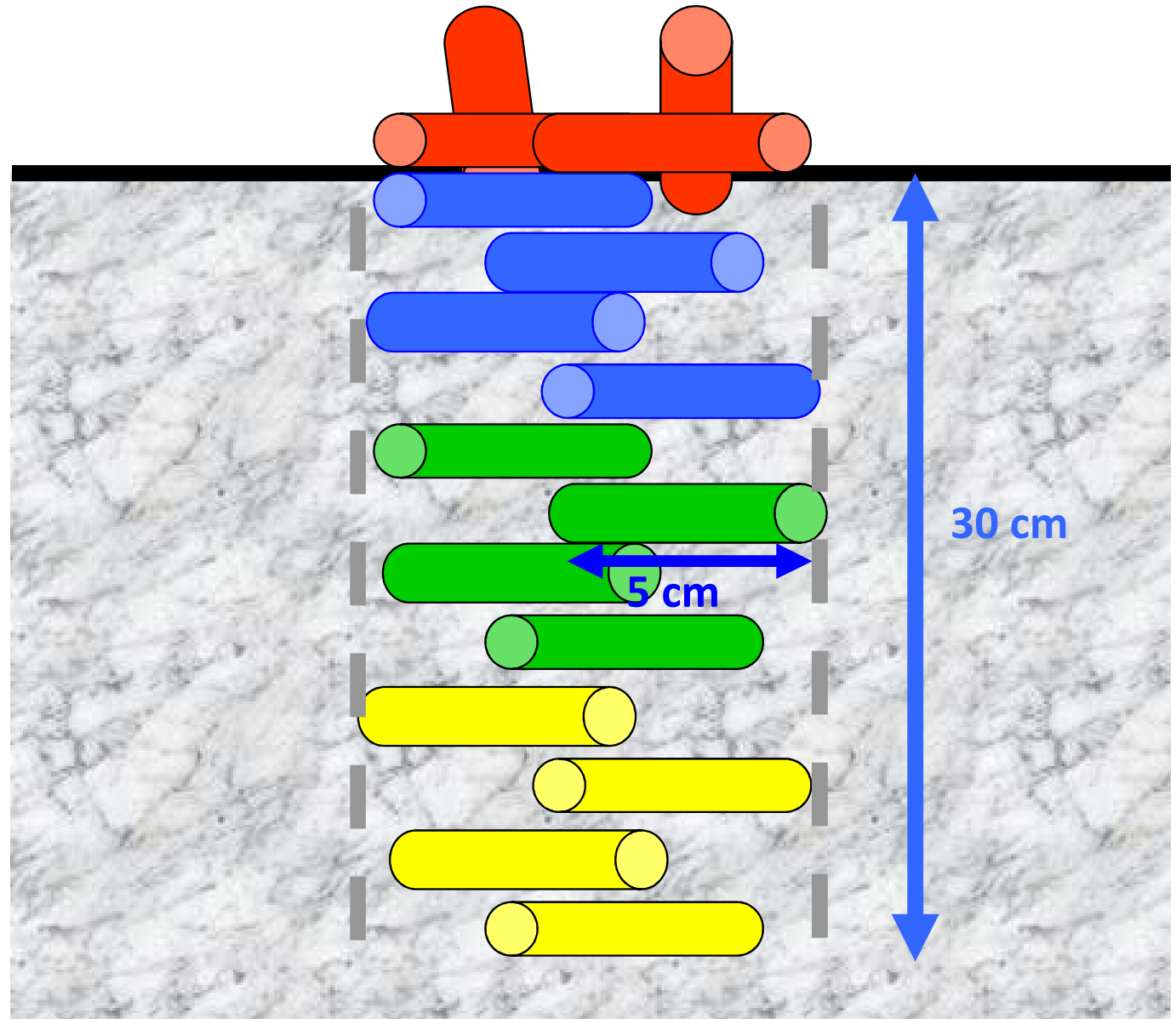
## Expérimentation (Thèse O. Schneider, 2005) :

Quantifier l'effet de différents types de travail du sol sur la localisation des résidus

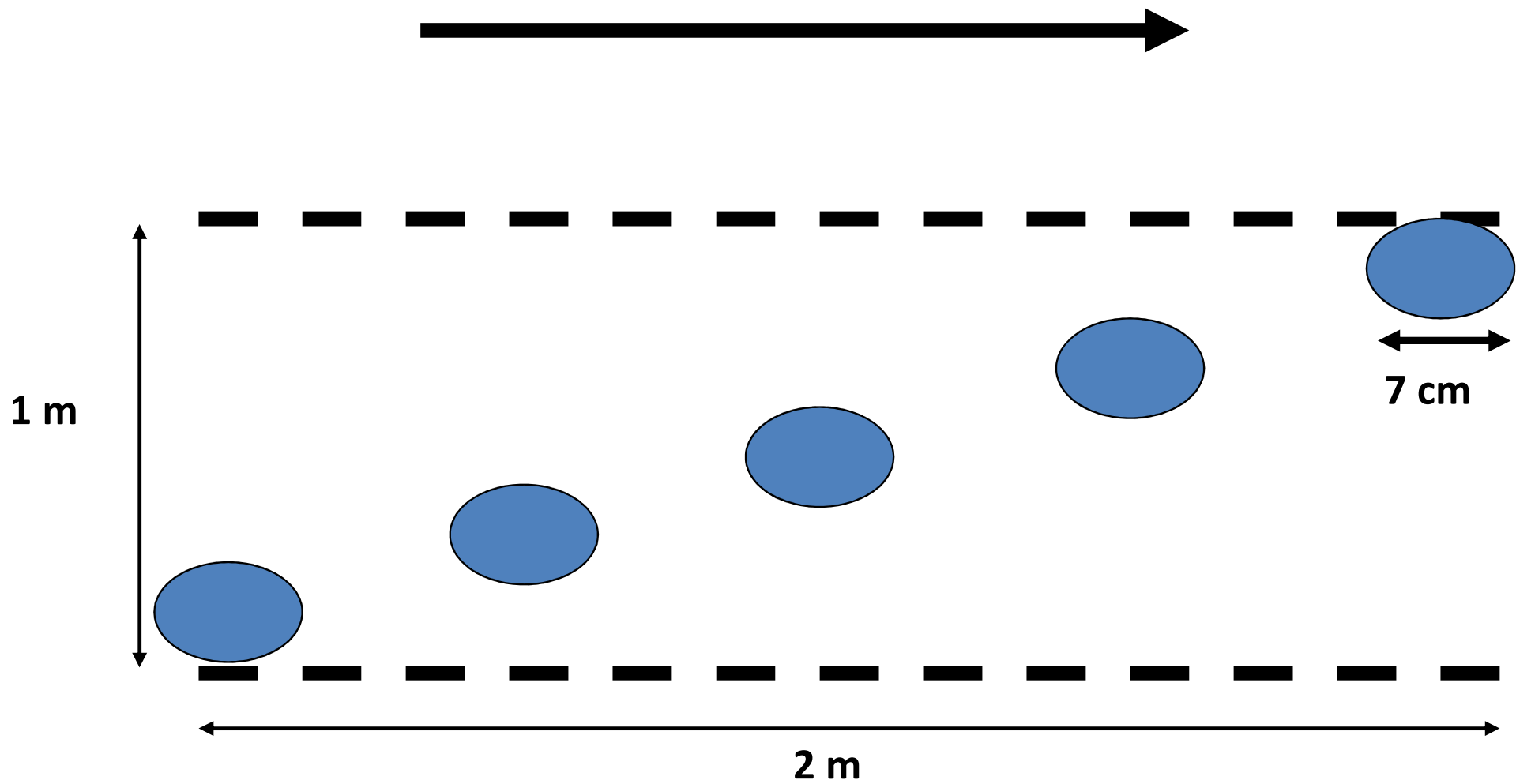
### Opérations étudiées:

- Labour
- Herse rotative
- Cover crop
- Chisel
- Semis

Méthode :



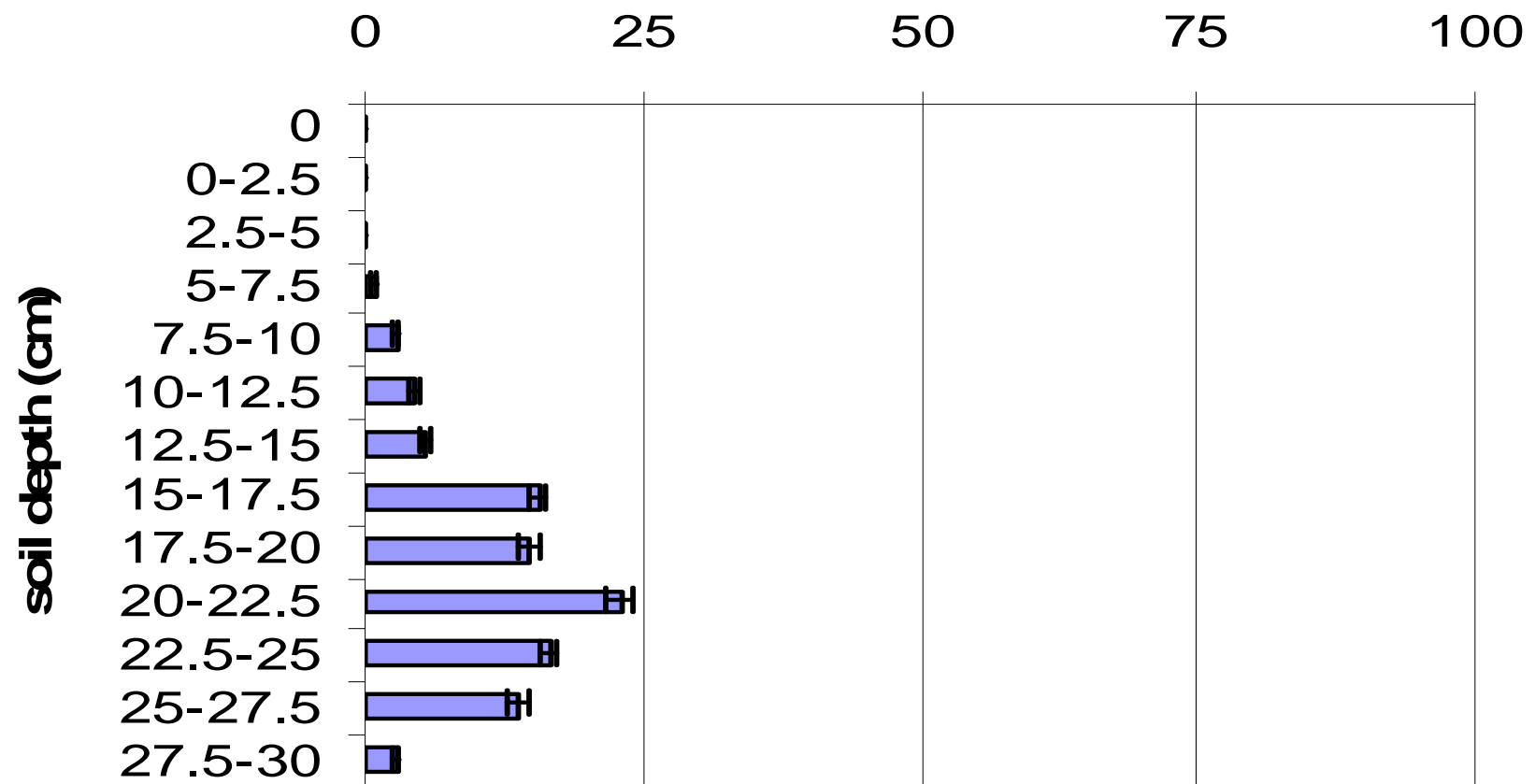






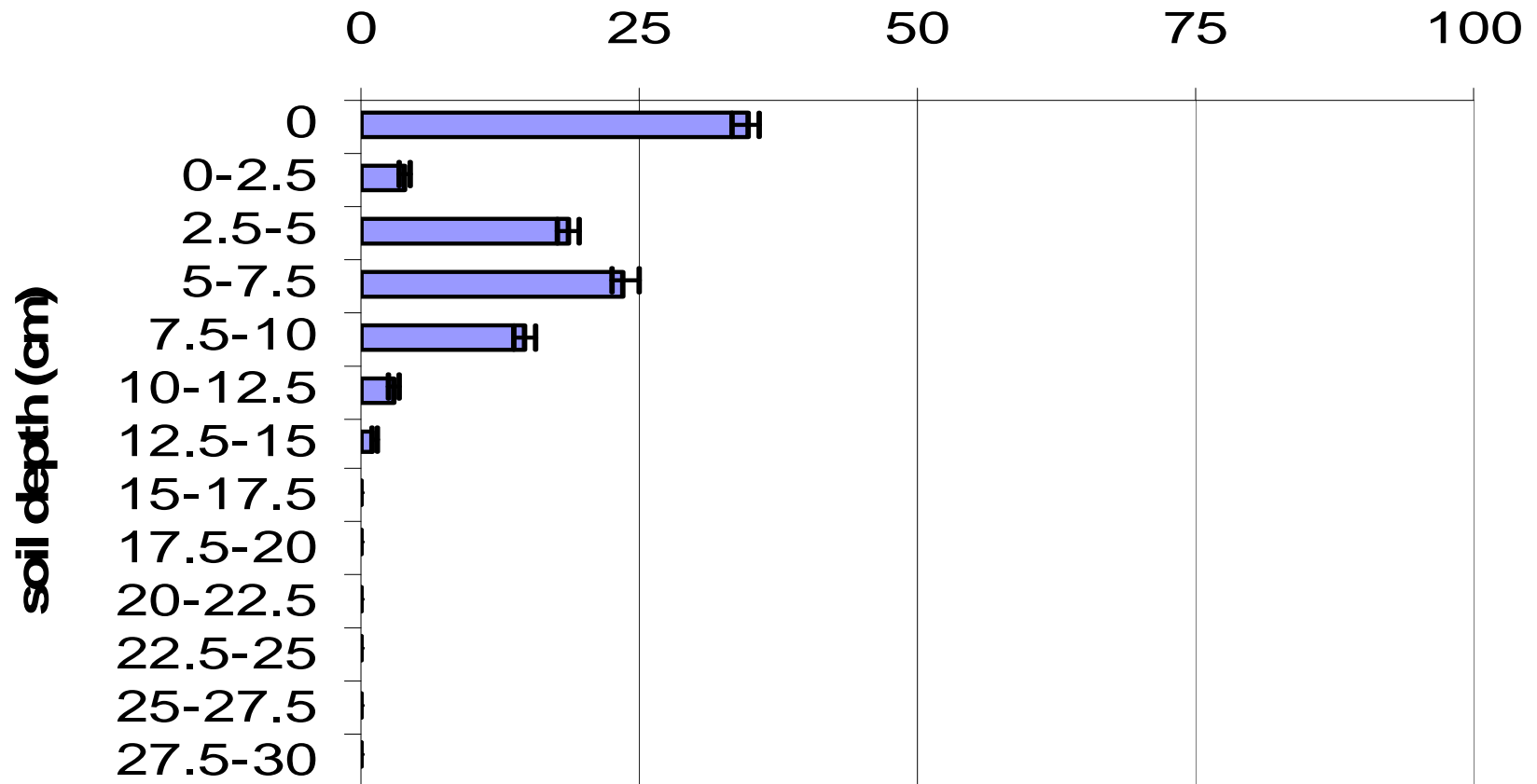


**% of total amount of surface residues after  
mouldboard ploughing**

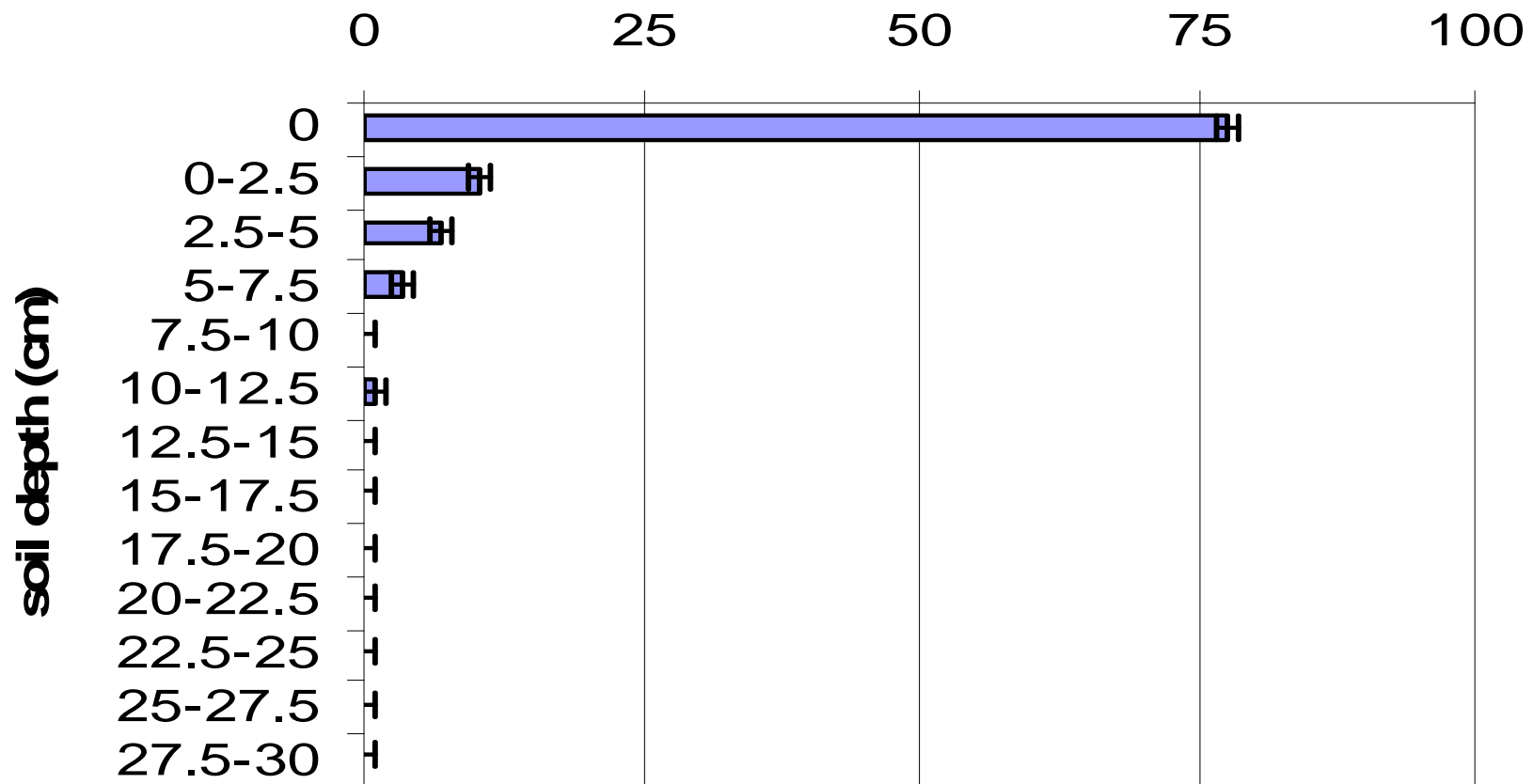




# **% of total amount of surface residues after stubble disking**



**% of total amount of surface residues after  
rotary harrowing**



$$\begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} n_{1i} \\ n_{2i} \\ n_{3i} \\ n_{4i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_{1f} \\ n_{2f} \\ n_{3f} \\ n_{4f} \end{pmatrix}$$

**Matrice de passage**
**Etat initial**
**Etat final**

# Simulations

		Vecteur d' état initial				Vecteur d' état final			
Labour		0	0.1	0.4	0.1	1	0	0	0
		0	0.3	0.3	0.1	0	0	0	0
		0.8	0.5	0.2	0.1	0	8	0	0
		0.2	0.1	0.1	0.7	0	2	0	0
Chisel		0.7	0.3	0	0	1	0	0	7
		0.3	0.5	0	0	0	3	0	3
		0	0.2	0.9	0.1	0	0	0	0
		0	0	0.1	0.9	0	0	0	0

# Schéma conceptuel de SIPPOM

A l'échelle de la parcelle

A l'échelle du territoire

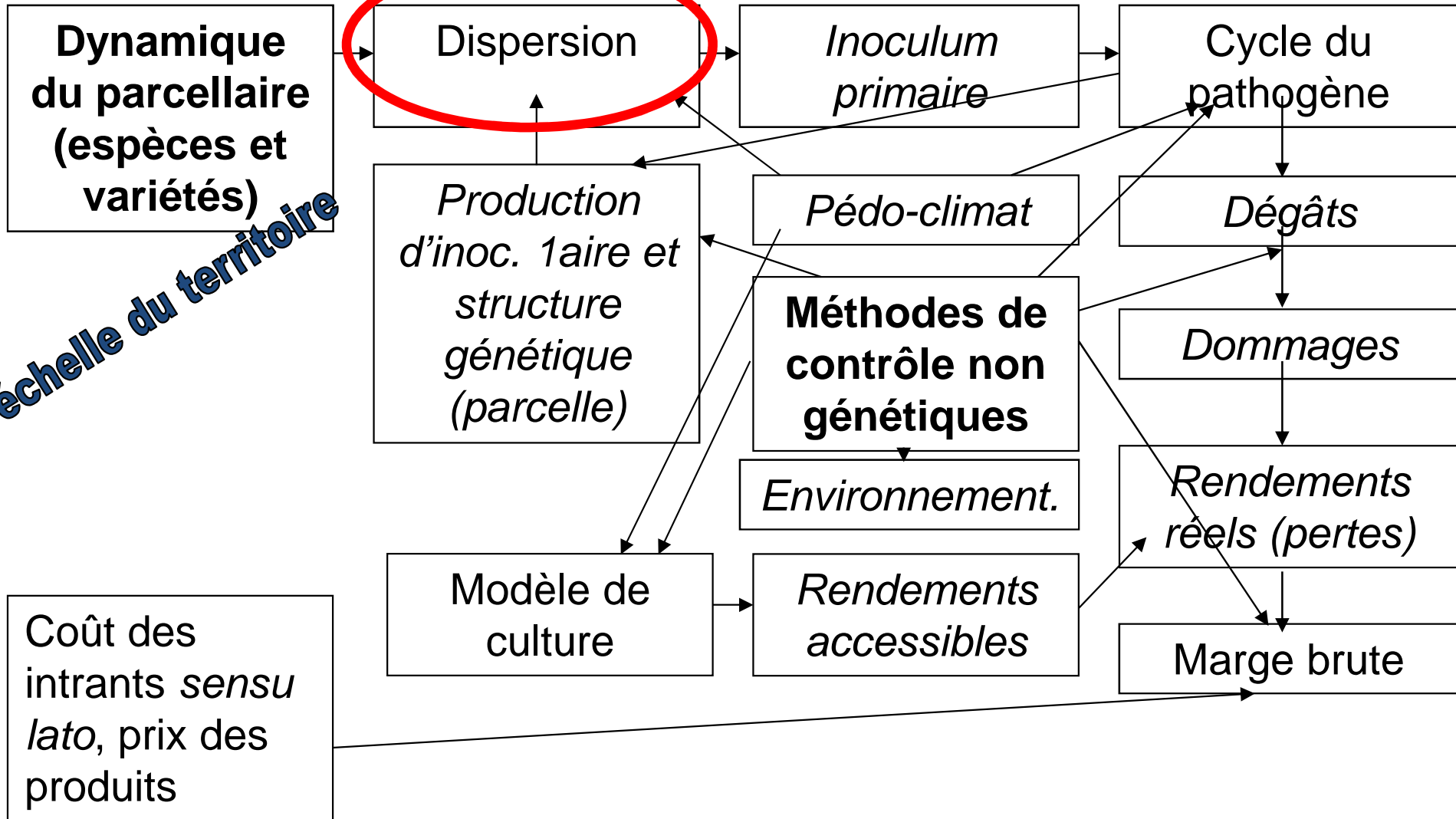
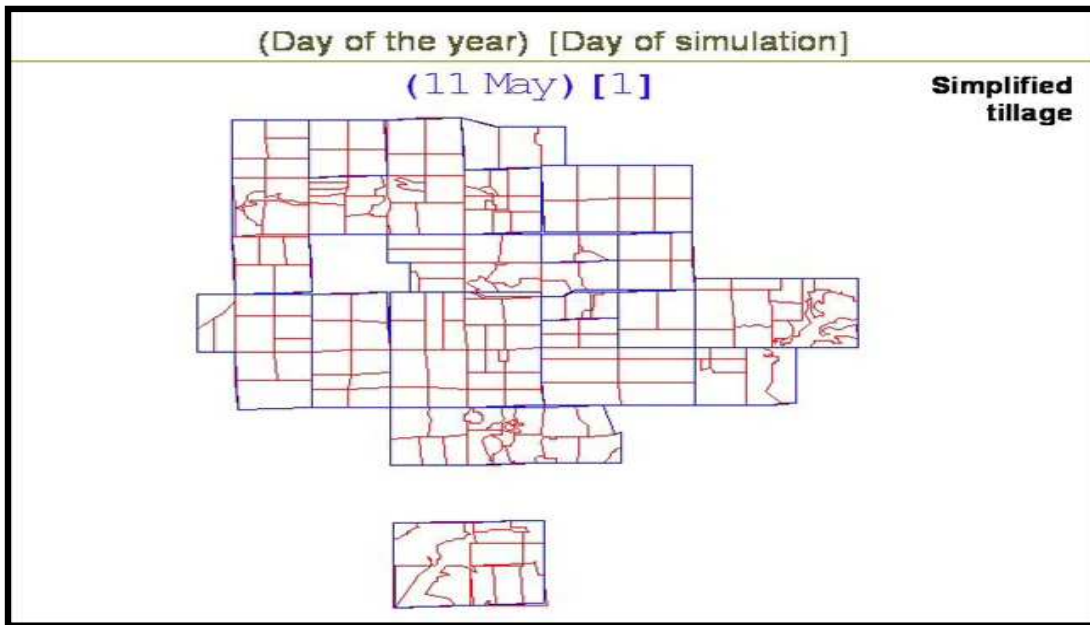
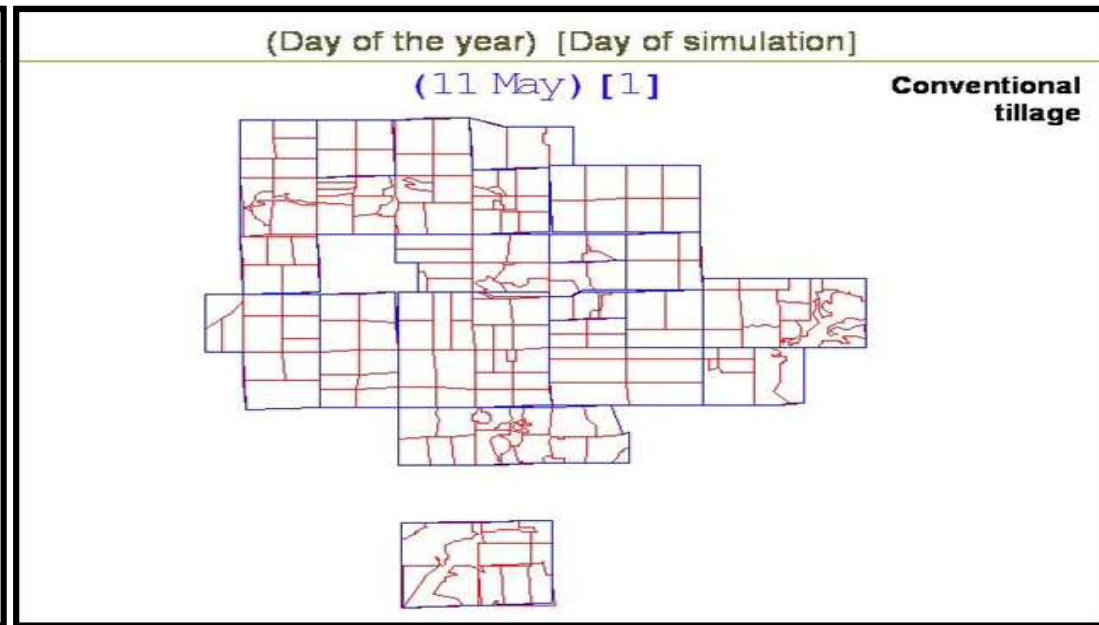


Illustration des effets du travail du sol sur l' inoculum à l' echelle  
du paysage (simulations réalisées à l' aide de SIPPOM)

Travail du sol simplifié



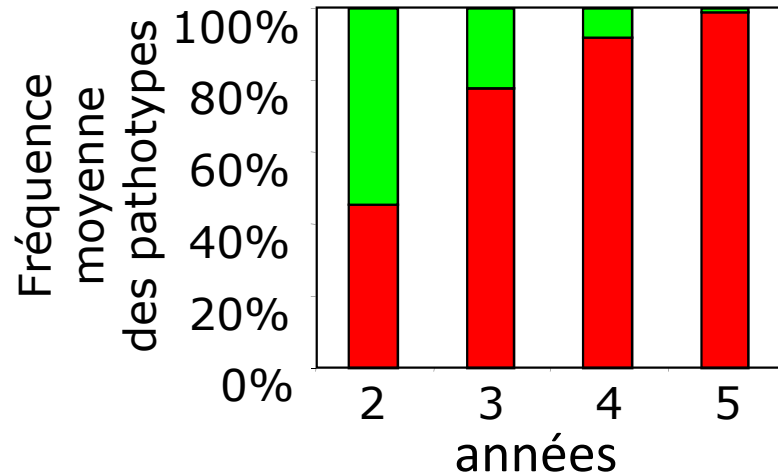
Travail du sol avec labour



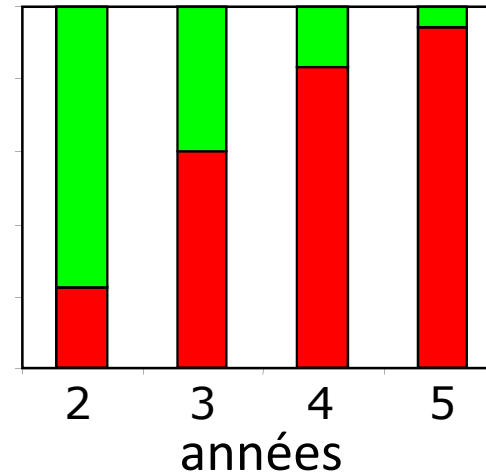
*Aubertot et al., numéro spécial EJPP, 2006  
collaboration Department Agriculture, Western Australia, Rothamsted Research, BIO3P*

# Sorties relatives à la durabilité de la résistance

50 % R. spécifique  
50 % Variété sensible  
ITK intensif avec  
travail du sol simplifié



50 % R. spécifique/ ITK  
intégré avec labour  
50 % Variété sensible/  
ITK intensif avec travail du  
sol simplifié



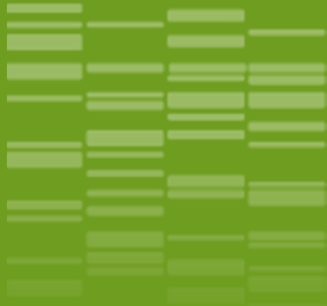
- Pathotype avirulent
- Pathotypes virulents correspondants au gène de résistance introduit



## PLAN

- 1) Présentation de la plateforme de modélisation SIPPOM
- 2) **Présentation du cadre des PDMG**
- 1) Présentation de la plateforme de modélisation qualitative IPSIM





Collaboration N Peyrard, R Sabaddin, MJ Cros MIAT (outil Matlab)

Un PDM est défini par un quadruplet  $\langle \chi, A, p, r \rangle$ :

- $\chi = \{x^1, \dots, x^n\}$ , états possibles du système
- $A = \{A^1, \dots, A^m\}$ , actions possibles
- $p(x' | x, a)$  : probabilités de transition
- $r(x, a)$  : fonction de récompense

Politique

$\delta: \chi \rightarrow \mathcal{A}$

Trajectoire

$\tau = \langle x_0, \delta(x_0), x_1, \delta(x_1), \dots, x_t, \delta(x_t) \rangle, t \in H \subseteq \{0, \dots, +\infty\}$

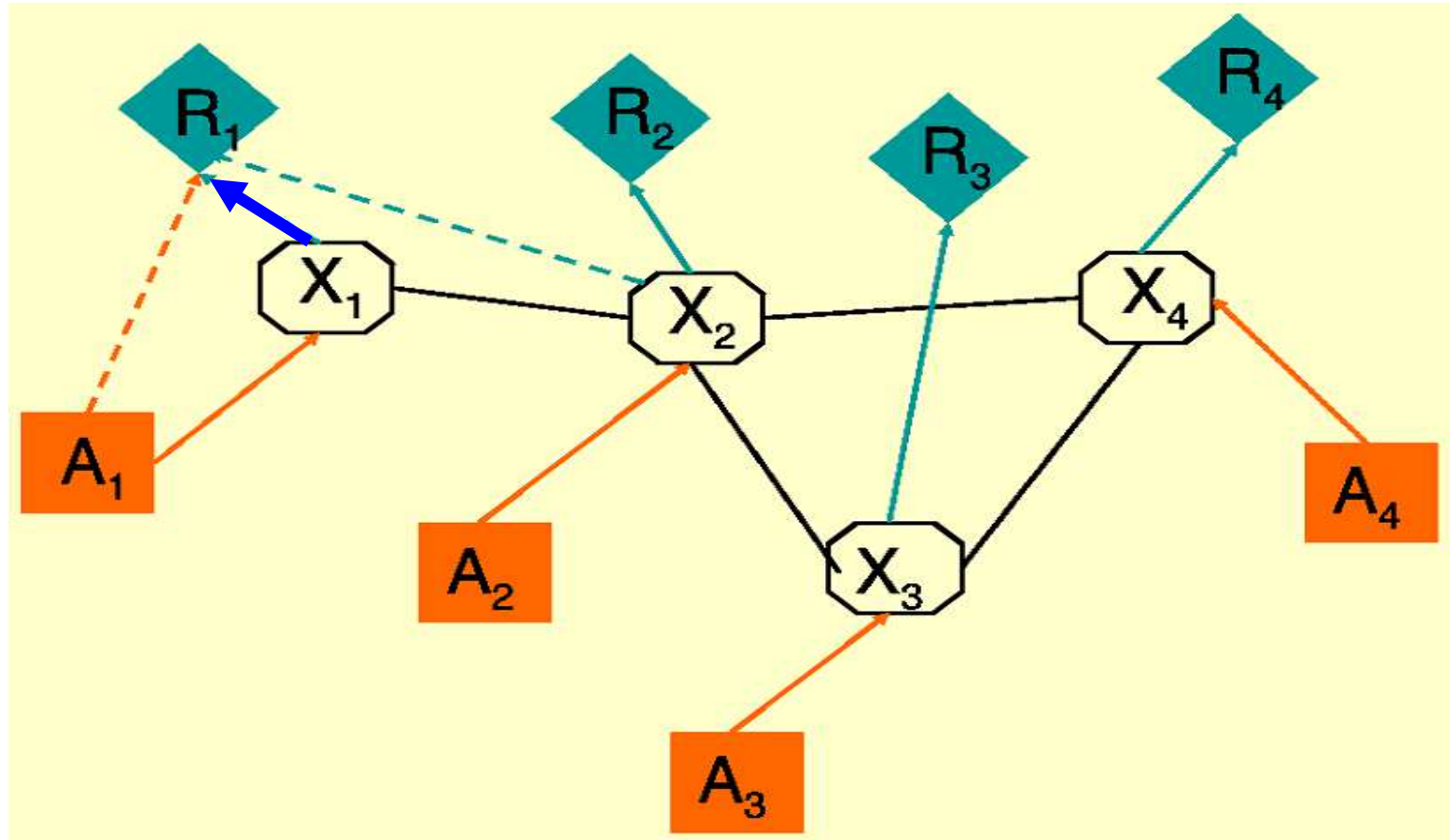
Fonction de valeur:

$$V_{\delta}(x_0) = E \left[ \sum_{t \in H} \gamma^t r_t(x_t, \delta(x_t)) \right], 0 \leq \gamma \leq 1$$

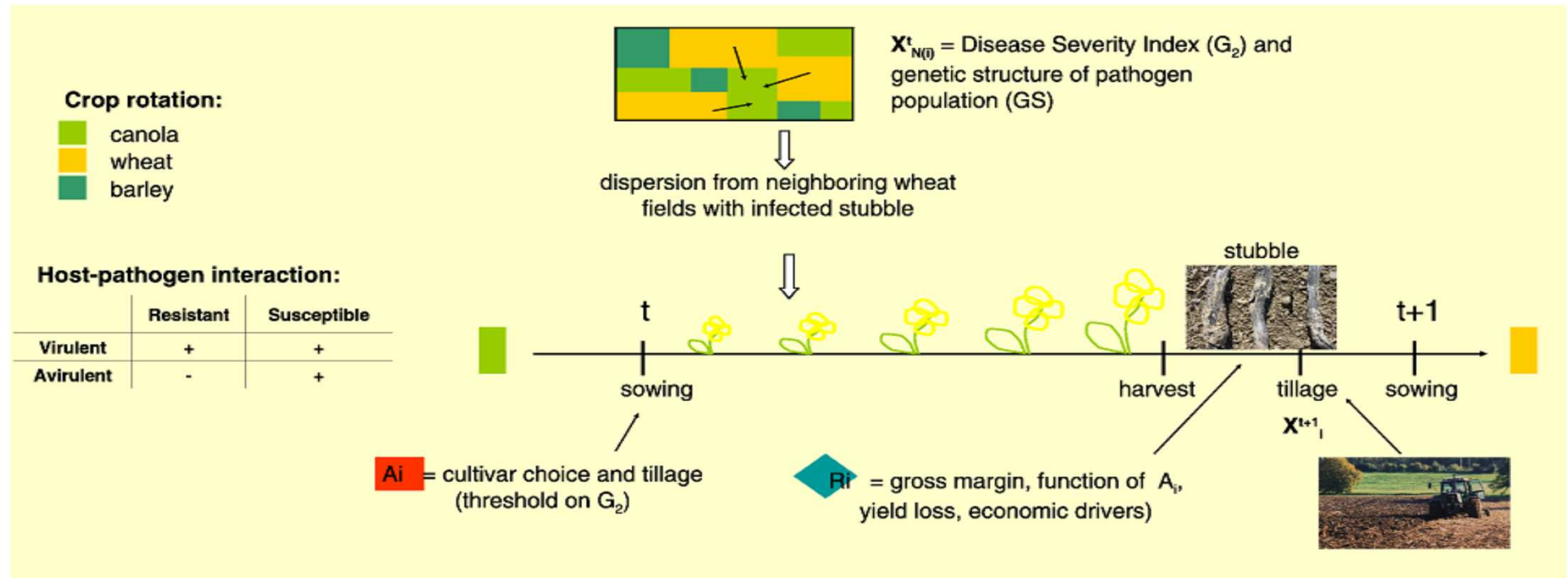
Trouver une politique optimale  $\delta^*$  tq  $V_{\delta^*}(x_0) \geq V_{\delta}(x_0) \forall x_0$

Qu' est-ce qu' un PDMG ?

# Exemple de représentation graphique d'un PDMG



# Modèle épidémiologique simplifié



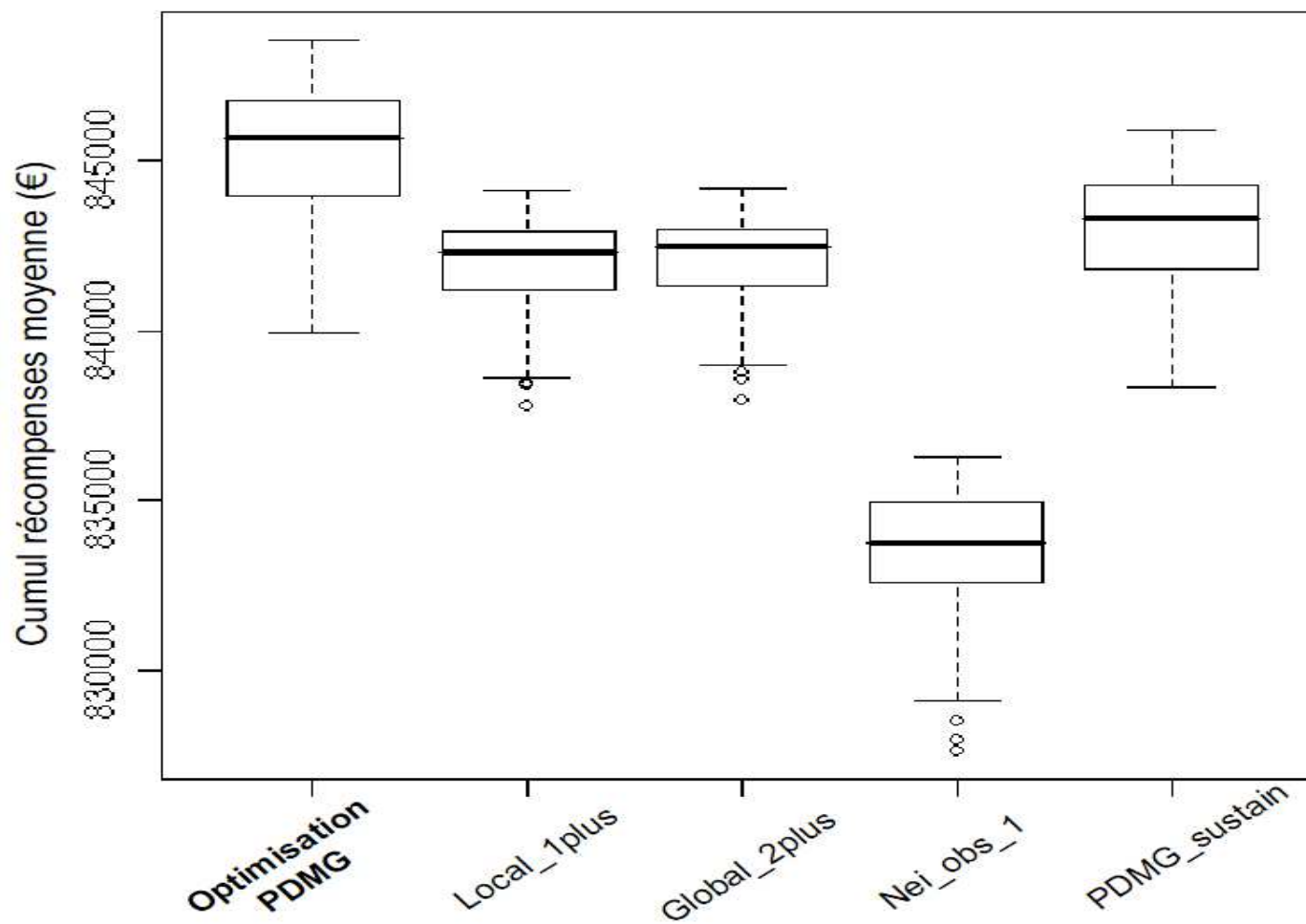
## State variables

- Current crop ( $C \rightarrow W \rightarrow B$ )
- Stubble infection severity ( $G_2$ )
- % of virulent spore ( $GS$ )

## Action variables

- Cultivar choice (resistant ?)
- Ploughing threshold  $\tau$  (ploughing if  $G_2 > \tau$ )

# Comparaison de stratégies



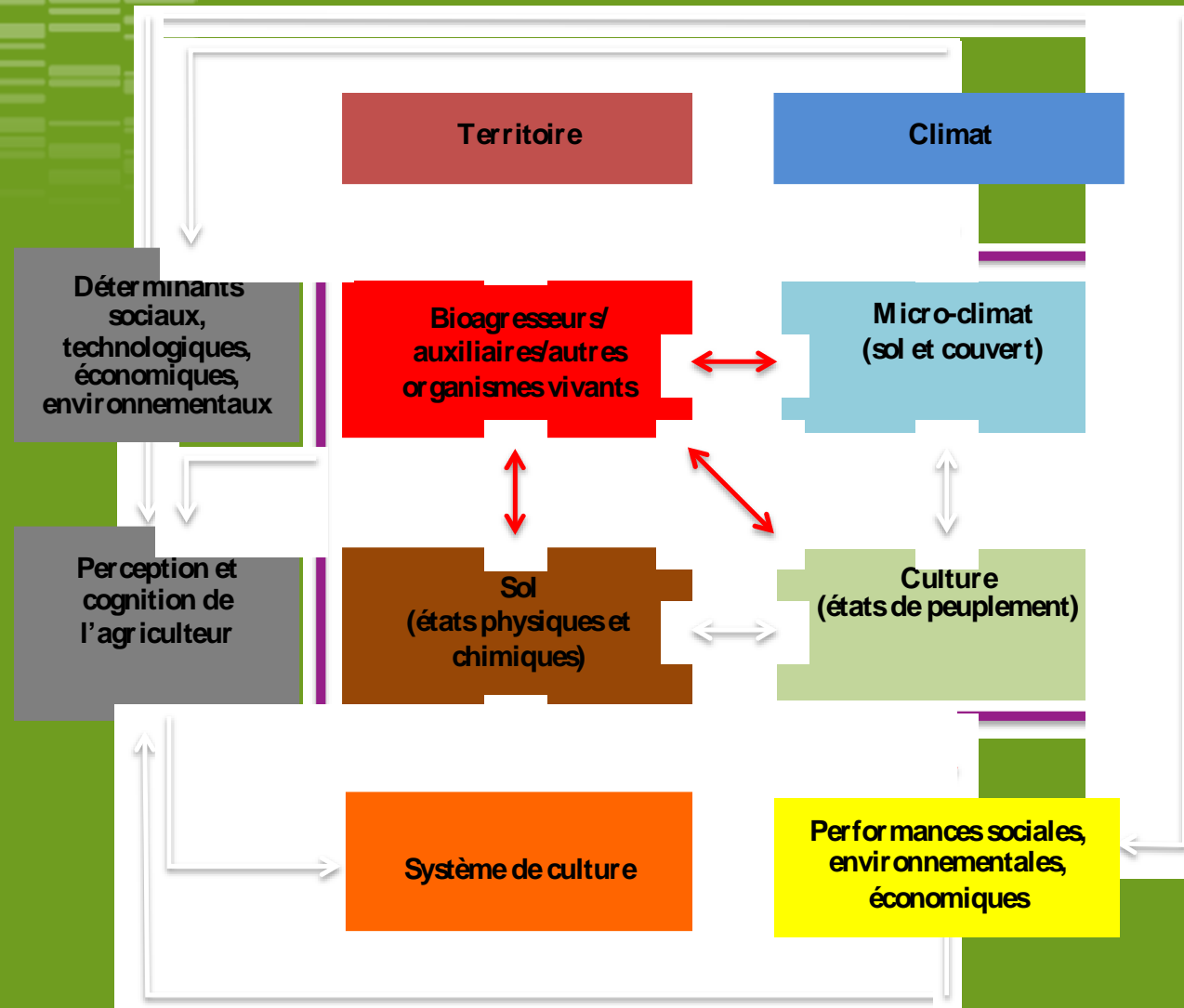
2 parcelles (10x10)  
50 états initiaux  
100 simulations  
Trajectoire: 30 ans



## PLAN

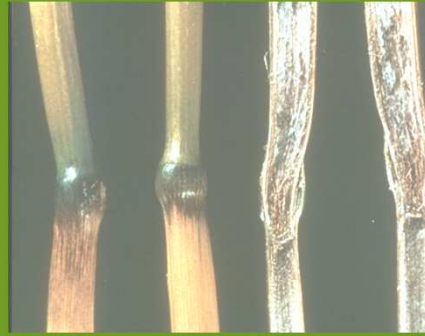
- 1) Présentation de la plateforme de modélisation SIPPOM
- 2) Présentation du cadre des PDMG
- 1) Présentation de la plateforme de modélisation qualitative IPSIM

# L'agroécosystème est un système complexe...



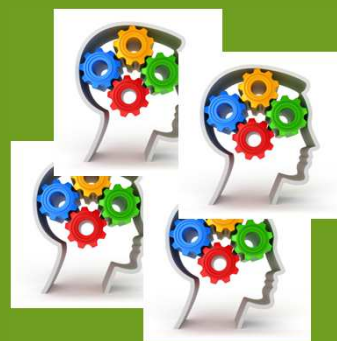


## Profil de dégâts du blé : de nombreux organismes sont impliqués !

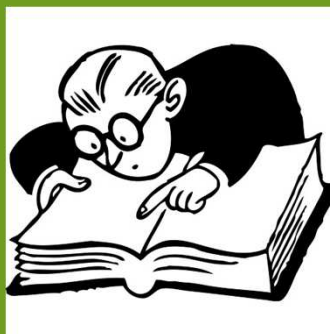


**Pas de jeux de données permettant de caractériser simultanément :**

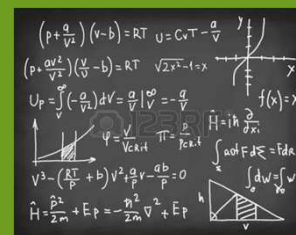
- La situation de production
- Les pratiques agricoles
- Les profils de dégâts



**Expertises**



**Analyses  
bibliographiques**



**Modèles existants**



**Diagnostics en  
parcelles agricoles**



**Expérimentations**



**IPSIM-WHEAT (Injury Profile SIMulator), a hierarchical , aggregative and qualitative model to predict wheat injury profile as a function of cropping practices, soil, climate and field environment. PhD thesis defended February 7 2014.**

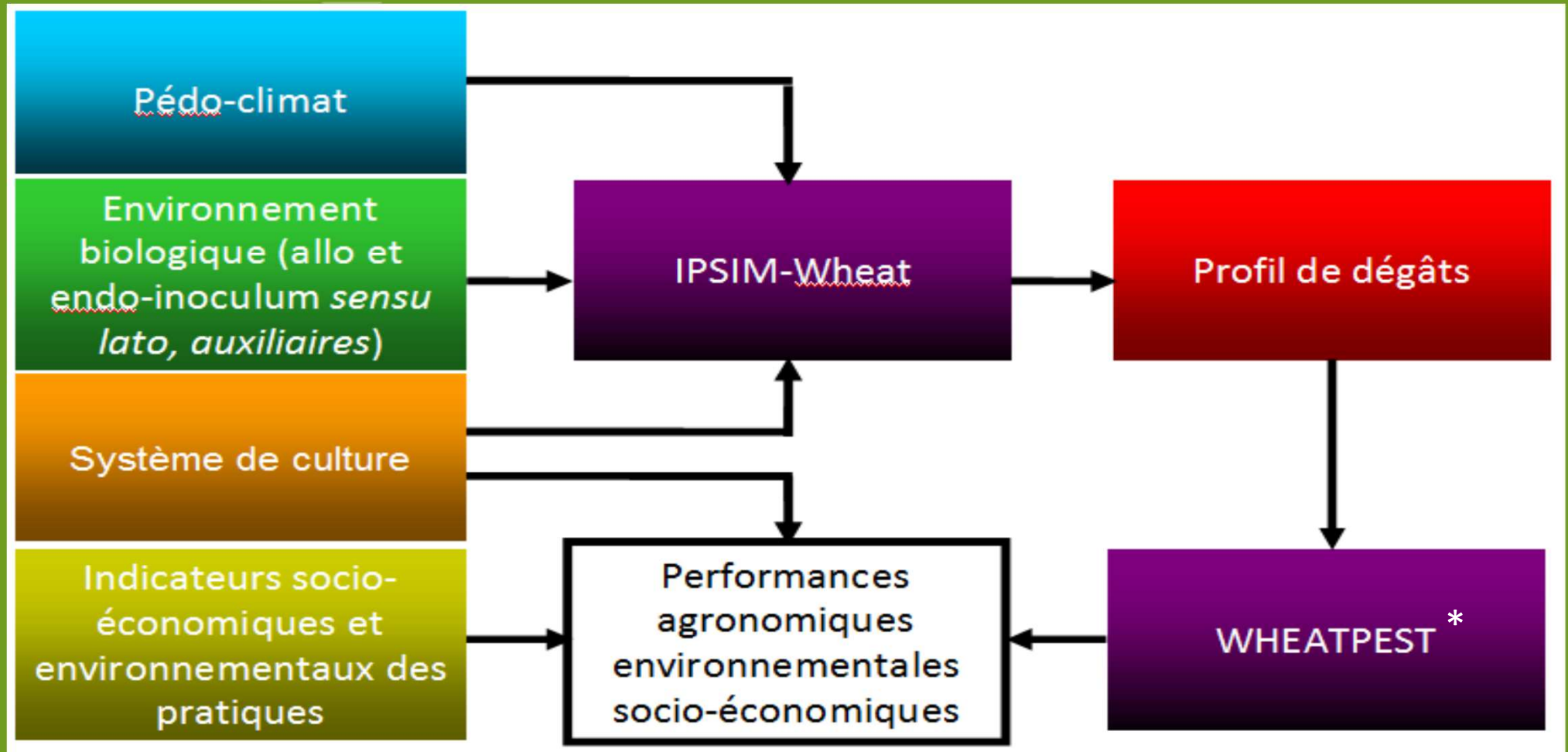


**Marie-Hélène ROBIN, El Purpan**

*Jean-Noël AUBERTOT, UMR AGIR, Philippe DEBAEKE, UMR AGIR*



# Stratégie de modélisation



BDD nationale essais blé : INRA, Arvalis, CA, GEVES, In Vivo, Bayer ; Cholez, 2011, Prix de la fondation Xavier Bernard de l'Académie d'Agriculture de France ; rés0Pest ; diagnostic en parcelles agricoles



# EXEMPLE de développement du modèle IPSIM-Wheat Eyespot à l'aide du logiciel DEXi (comme MASC; Sadok et al, 2009; et DEXiPM; Lô-Pelzer et al, 2012)

<http://www-ai.ijs.si/MarkoBohanec/dexi.html>

The screenshot displays the DEXi software interface, which is used for developing fuzzy logic models. The interface is divided into several sections:

- Model Structure (Left Panel):** A hierarchical tree view showing the model's components. The root node is "Final incidence of eyespot", which branches into "Effects of cropping practices", "Effects of soil and climate", and "Interactions with the territory". "Effects of cropping practices" further branches into "Primary inoculum management" and "Escape: effects of the sowing conditions". "Primary inoculum management" branches into "Preceding crop", "Pre-preceding crop", "Tillage after harvest of the preceding crop", and "Tillage after harvest of the pre-preceding crop". "Escape: effects of the sowing conditions" branches into "Mitigation through crop status" and "Chemical control: use of fungicides". "Mitigation through crop status" branches into "Cultivar choice", "Level of N fertilisation", and "Sowing rate". "Effects of soil and climate" branches into "Soil" and "Climate". "Climate" branches into "Autumn/winter" and "Spring". "Interactions with the territory" branches into "Beneficial sources" and "Primary inoculum sources".
- Attribute Details (Right Panel):** A form for defining the attributes of the model. The attribute "Final incidence of eyespot" is selected. The details include:
  - Name:** Final incidence of eyespot
  - Description:** Evolution de l'incidence (% de tiges infectées) en fonction des stades de développement du blé.
  - Scale:** A fuzzy scale defined by the values: + 100%(-);80-100 %(-);60-80 %;40-60 %;20-40 %;0-20 %(+);0%(+).
  - Utility function:** Rules: 18/18 (100,00%), determined: 100,00%.

## Application au cas du piétin-verse\* : structure du réseau

### Attribute

#### Final incidence of eyespot

##### Effects of cropping practices

##### Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage

- Preceding crop
- Pre-preceding crop
- Tillage after harvest of the previous crop
- Tillage after harvest of the pre-previous crop

##### Escape: effects of the sowing date

##### Mitigation through crop status

- Cultivar choice
- Level of N fertilisation
- Sowing rate

##### Chemical control: use of fungicide

##### Effects of soil and climate

##### Soil

##### Climate

- Autumn/winter
- Spring

##### Interactions with the territory

- Beneficial sources
- Primary inoculum sources



\*Robin, M. H., Colbach N., Lucas P., Monfort F., Cholez C., Debaeke P., Aubertot J.N. 2013. Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter wheat. PLOS ONE 8, Issue 10, e75829

## Application au cas du piétin-verse\* : exemple de table d'agrégation

	Cultivar choice	Level of N fertilisation	Sowing rate	Mitigation through crop status
1	Very susceptible to susceptible	Excess level	High	Favourable
2	Very susceptible to susceptible	Excess level	Normal	Favourable
3	Very susceptible to susceptible	Excess level	Low	Favourable
4	Very susceptible to susceptible	Balanced level	High	Favourable
5	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Normal	Favourable
6	Very susceptible to susceptible	Balanced level	Low	Favourable
7	Moderately susceptible	Excess level	High	Moderately favourable
8	Moderately susceptible	Excess level	Normal	Moderately favourable
9	Moderately susceptible	Excess level	Low	Moderately favourable
10	Moderately susceptible	Balanced level	High	Moderately favourable
11	Moderately susceptible	Balanced level	Normal	Moderately favourable
12	Moderately susceptible	Balanced level	Low	Moderately favourable
13	Quite to very resistant	Excess level	High	Unfavourable
14	Quite to very resistant	Excess level	Normal	Unfavourable
15	Quite to very resistant	Excess level	Low	Unfavourable
16	Quite to very resistant	Balanced level	High	Unfavourable
17	Quite to very resistant	Balanced level	Normal	Unfavourable
18	Quite to very resistant	Balanced level	Low	Unfavourable

\*Robin, M. H., Colbach N., Lucas P., Monfort F., Cholez C., Debaeke P., Aubertot J.N. 2013. Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter wheat. PLOS ONE 8, Issue 10, e75829



## Application au cas du piétin-verse\* : exemples de simulations

Option	Organic system	High input system
. Final incidence of eyespot	20-40 %	60-80 %
. . Effects of cropping practices	<b>Unfavourable</b>	<b>Moderately favourable</b>
. . . Primary inoculum management: interaction between crop sequence and tillage	<b>Unfavourable</b>	<b>Favourable</b>
. . . . Preceding crop	Non host	Host
. . . . Pre-preceding crop	Non host	Host
. . . . Tillage after harvest of the previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
. . . . Tillage after harvest of the pre-previous crop	Inversion tillage	Non-inversion tillage
. . . Escape: effects of the sowing date	Late sowing	Early sowing
. . . Mitigation through crop status	<b>Unfavourable</b>	<b>Favourable</b>
. . . . Cultivar choice	Quite to very resistant	Very susceptible to susceptible
. . . . Level of N fertilisation	Balanced level	Balanced level
. . . . Sowing rate	High	Normal
. . . Chemical control: use of fungicide	None	One
. . Effects of soil and climate	<b>Very favourable</b>	<b>Very favourable</b>
. . . Soil	Favourable	Favourable
. . . Climate	<b>Very favourable</b>	<b>Very favourable</b>
. . . . Autumn/winter	Very favourable	Very favourable
. . . . Spring	Very favourable	Very favourable
. . Interactions with the territory	<b>Neutral</b>	<b>Neutral</b>
. . . Beneficial sources	Normal	Normal
. . . Primary inoculum sources	Normal	Normal

\*Robin, M. H., Colbach N., Lucas P., Monfort F., Cholez C., Debaeke P., Aubertot J.N. 2013. Injury Profile SIMulator, a hierarchical aggregative modelling framework to predict an injury profile as a function of cropping practices, and abiotic and biotic environment. II. Proof of concept: design and evaluation of IPSIM-Wheat-Eyespot, a model that predicts eyespot injuries on winter wheat. PLOS ONE 8, Issue 10, e75829

Effects of crop management and cultivar on winter wheat diseases	Network of multifactorial field trials	1999-2013	13 locations	153 5	(Loyce et al., 2008; Loyce et al., 2012)
design innovative prototypes of low-input cropping systems (Mic-Mac design)	Multifactorial field trials	2010-2013	2 locations (Toulouse)	22	<a href="http://www4.inra.fr/micmac-design">http://www4.inra.fr/micmac-design</a>
Design and evaluation of arable crops systems (SGCI)	Multifactorial field trials	1995-2002	1 location (Toulouse)	76	(Nolot and Debaeke, 2003)
Design organic environmental friendly dairy systems	Multifactorial field trials	1997-2011	1 location (Mirecourt)	11	(Coquil et al., 2009)
Cropping year fungicides trials	Monofactorial field trials	2007-2012	Several French regions	10	(InVivo AgroSolutions 2013)
Effects of cultural practices and climate on winter wheat diseases	Survey in commercial fields	2011-2013	2 French regions of the south of France (44 fields)	86	Magnard, 2012

**Tableau 1** : Main features of the datasets used for the evaluation of the predictive quality of IPSIM-Wheat-Brown Rust.



Transformation des variables de sorties des modèles IPSIM en variables quantitatives

Avantage : on peut utiliser les méthodes classiques d'évaluation de la qualité prédictive des modèles (analyse des résidus et calcul de différents critères statistiques)

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})$$

$$RMSEP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2}$$

Bias = 0.84%

Efficiency = 0.41

RMSEP=11%,

1740 sites-années, 19 régions, 15 années



# Transformation des données observées sur les dégâts en variables ordinales

## matrice de confusion (code Mathematica)

Précision

$$Accuracy = \frac{1}{\sum_{i=1}^c n_{ii}}$$

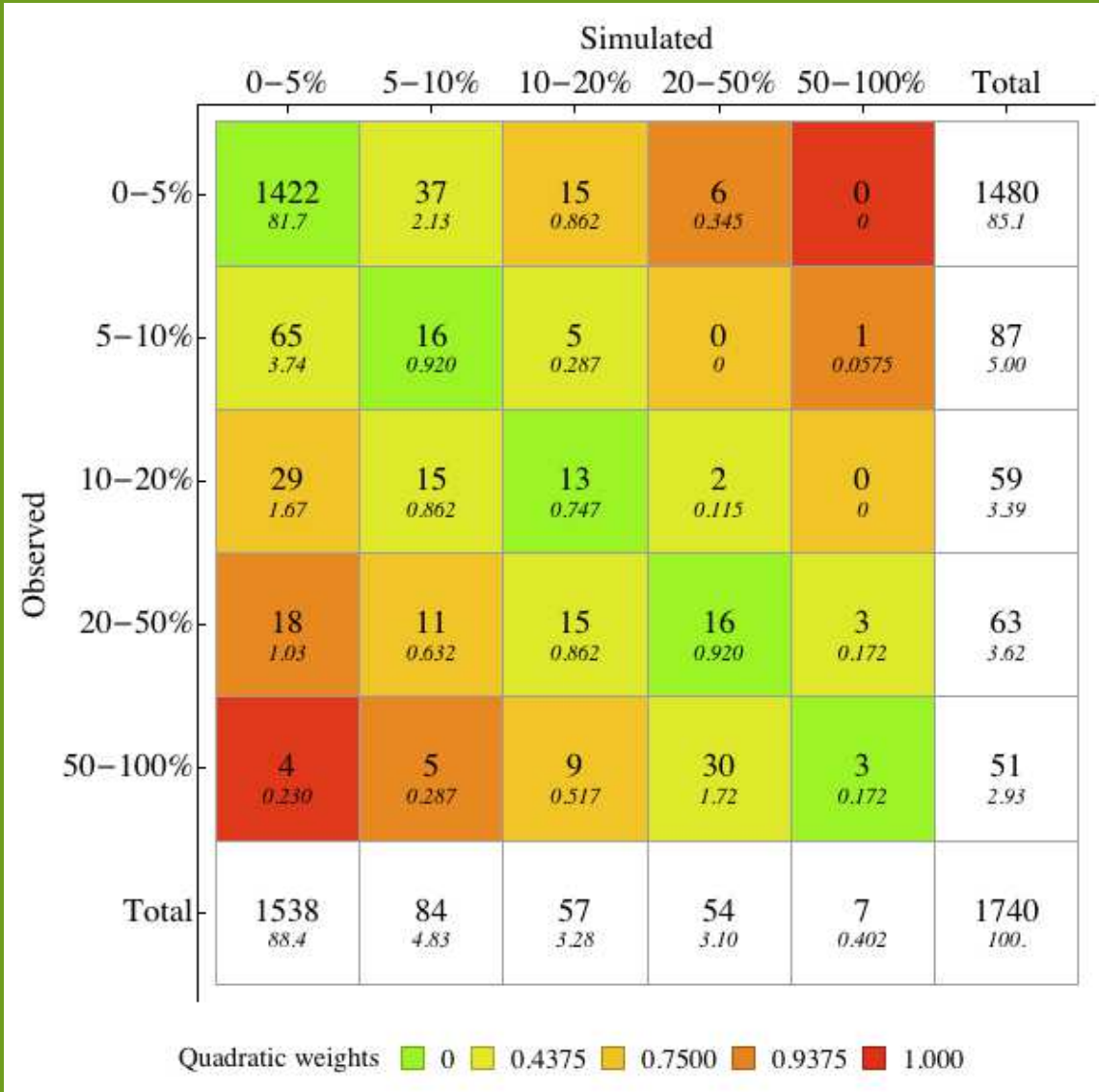
$\kappa_w$  pondérés  
de Cohen

$$\kappa_w = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} \pi_{ij} - \sum_i \sum_j w_{ij} \pi_{i+} \pi_{+j}}{1 - \sum_i \sum_j w_{ij} \pi_{i+} \pi_{+j}}$$

(Spitzer et al, 1967, à partir de Cohen, 1960)  
avec :

$$\left\{ w_{ij} = 1 - \frac{|i - j|}{c - 1} \right\} \quad \text{and} \quad \left\{ w_{ij} = 1 - \frac{(i - j)^2}{(c - 1)^2} \right\}$$

Fleiss et Cohen (1973) ont montré que ce critère pouvait être interprété comme la proportion de variabilité expliquée (pondération quadratique).



## En guise de conclusion partielle...



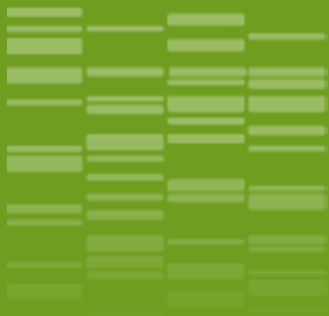
- Manque de précision
- Subjectivité dans la définition des tables d'agrégation
- Pas de représentation explicite des mécanismes sous-jacents
- Modèles statiques
- Effets de seuil quand on passe de variables quantitatives à des variables qualitatives



- Manque de précision
- Intégration d'expertiseS, de modèles, de données
- Qualités de prédiction satisfaisantes sans procédure d'ajustement (modèles blé) !
- Modèles transparents
- Facilement adaptables
- Facilement appropriables
- Modèles très simples à développer et à présenter
- Facilite la communication et l'enseignement
- Meilleures intégrations verticale et horizontale pour la Protection Intégrée des Cultures







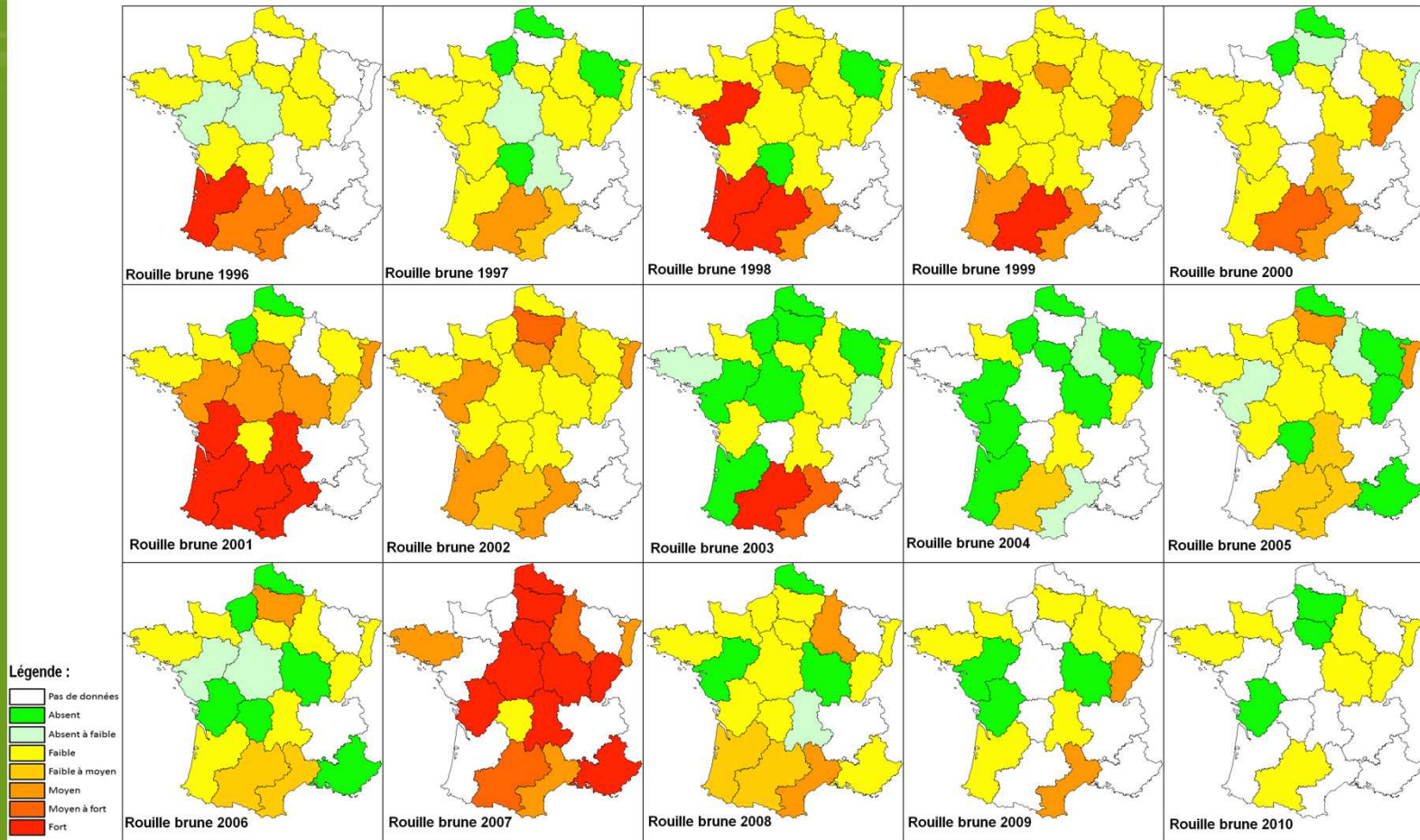
## Conclusion

- Rôle central de la modélisation dans l'intégration des connaissances et les interactions interdisciplinaires
- Evolution de nos représentations conceptuelles pour contribuer à la nécessaire transition agroécologique
- Passage à des représentations qualitatives pour résoudre certaines questions intégratives
- Meilleure valorisation des différentes sources de connaissance



# Utilisation de données historiques : modélisation des effets du climat (projets HISTOPEST, SMACH ; VESPA, PSPE)

Niveau d'attaque régional pour la rouille brune de 1996 à 2010 (source : bilans nationaux des services de la protection des végétaux)



Sévérité potentielle de la rouille brune du blé (DGAL, 1996-2010)