

# Modélisation spatio-temporelle de la dispersion d'un virus de plantes pour :

- estimer des paramètres
- hiérarchiser leur influence
- optimiser la gestion de l'épidémie

**Gaël Thébaud**

INRA, Montpellier

UMR BGPI (Biologie et Génétique des Interactions Plante-Parasite)

Equipe Epi2V (Epidémiologie Végétale et Vection)



# Introduction

---

- Agro-écosystèmes
  - Nombreuses interactions biologiques
  - Nombreuses interventions humaines
- Stratégies de gestion
  - Modèles implicites/conceptuels
  - Peu/pas expérimentables
    - ➔ Opinions d'experts
- Stratégie optimale
  - Pas intuitive
    - ➔ Identification par un modèle suffisamment réaliste

# Introduction

- *Plum pox virus (Potyvirus)* :
  - un pathogène de quarantaine



- *Prunus* hôtes :
  - Pas de gamme variétale résistante



Pêche/nectarine



Abricot



Prune

- Vection
  - Pucerons (> 20 espèces)
  - Transmission non persistante
    - insecticides inefficaces

# Introduction

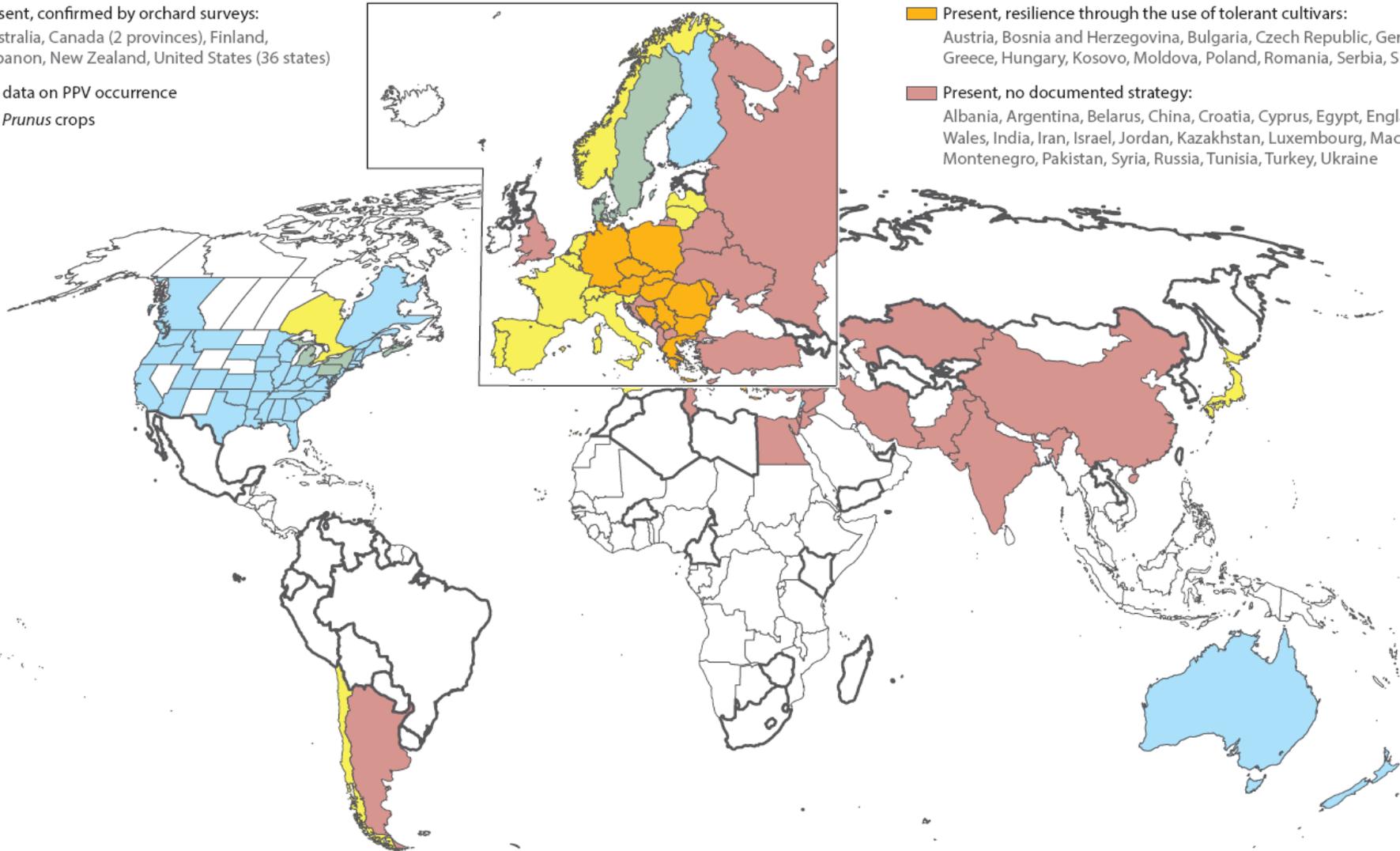


## No detected PPV

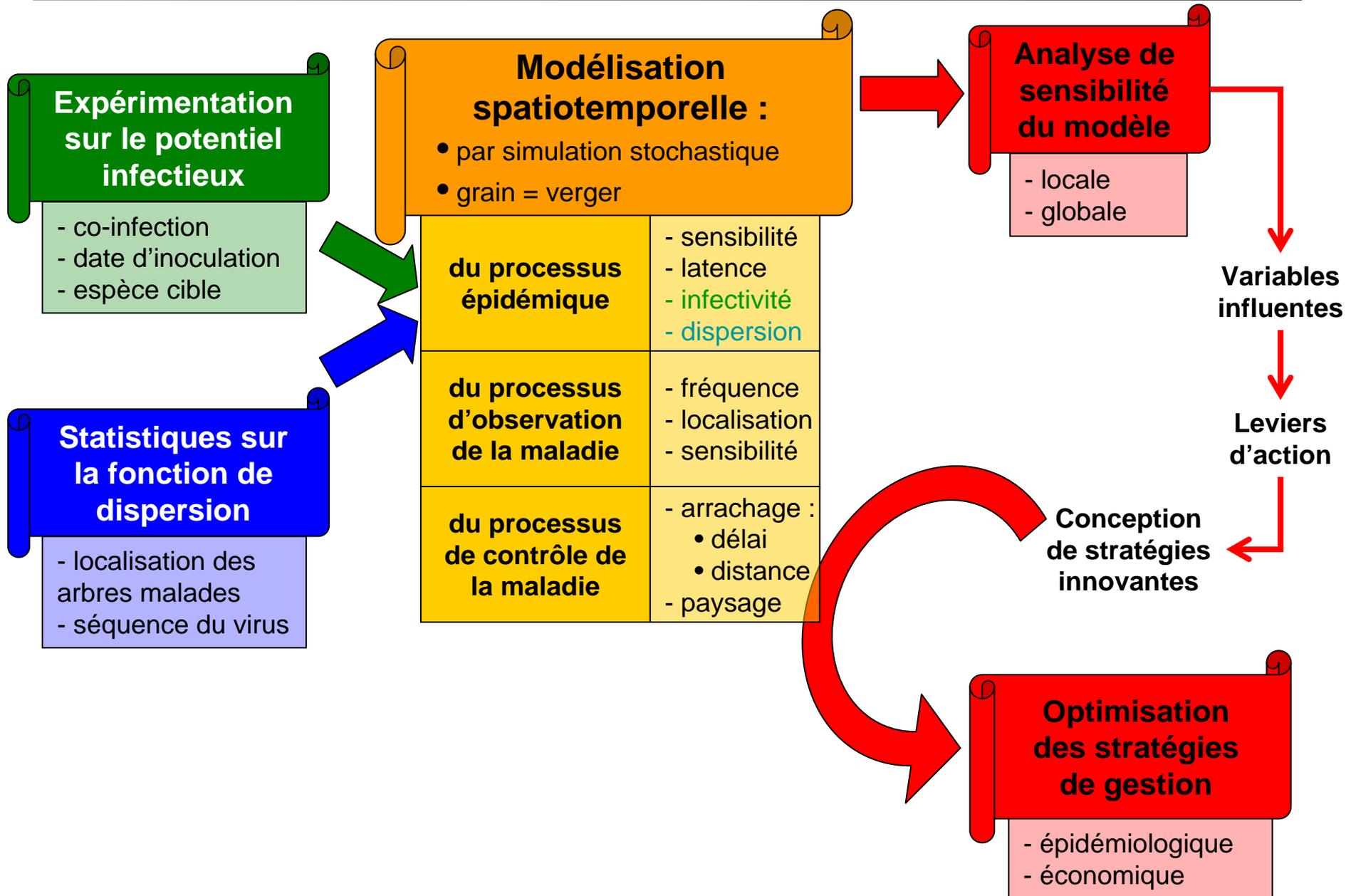
-  Presently eradicated:  
Canada (Nova Scotia), Denmark, Sweden, United States (Michigan, New York, Pennsylvania)
-  Absent, confirmed by orchard surveys:  
Australia, Canada (2 provinces), Finland, Lebanon, New Zealand, United States (36 states)
-  No data on PPV occurrence
-  No *Prunus* crops

## PPV present

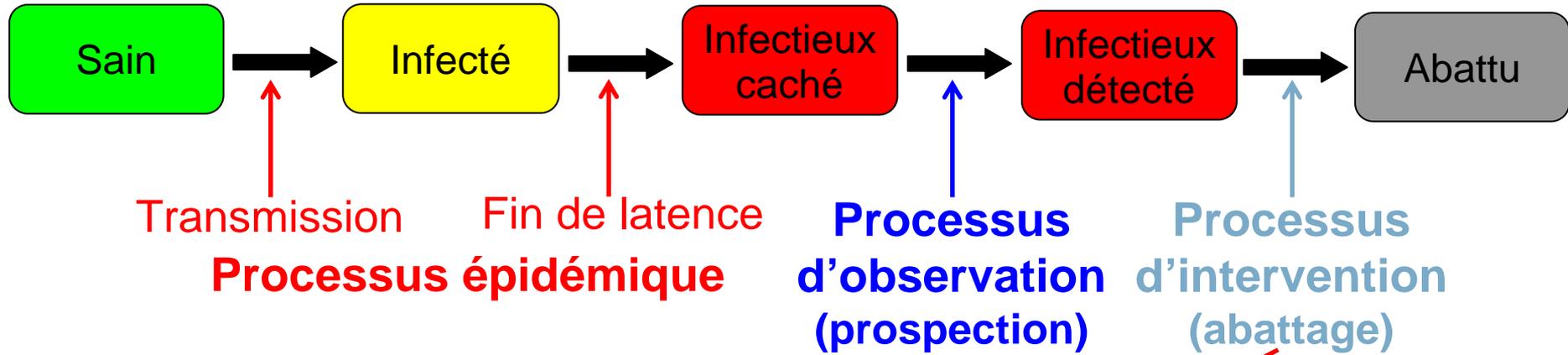
-  Present, active control through orchard surveillance and tree removal:  
Belgium, Canada (Ontario), Chile, France, Italy, Japan, Latvia, Lithuania, Netherlands, Norway, Portugal, Slovenia, Spain, Switzerland
-  Present, resilience through the use of tolerant cultivars:  
Austria, Bosnia and Herzegovina, Bulgaria, Czech Republic, Germany, Greece, Hungary, Kosovo, Moldova, Poland, Romania, Serbia, Slovakia
-  Present, no documented strategy:  
Albania, Argentina, Belarus, China, Croatia, Cyprus, Egypt, England and Wales, India, Iran, Israel, Jordan, Kazakhstan, Luxembourg, Macedonia, Montenegro, Pakistan, Syria, Russia, Tunisia, Turkey, Ukraine



# Introduction

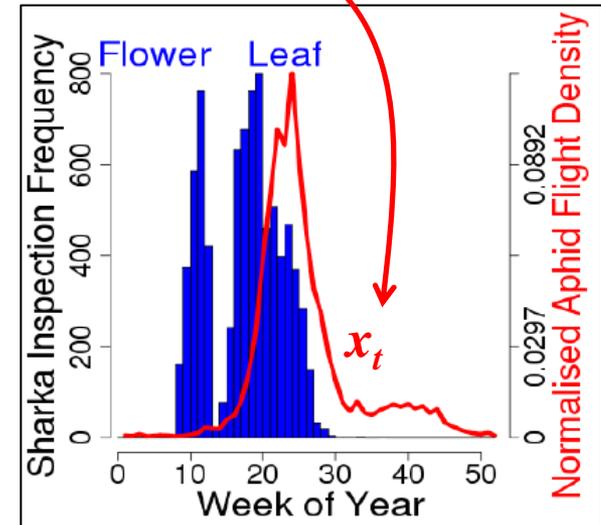
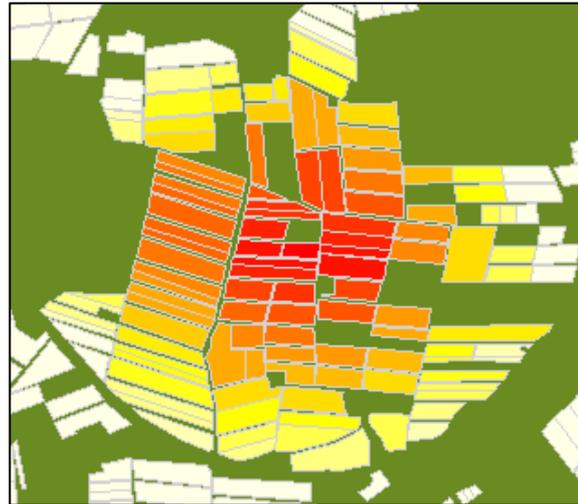
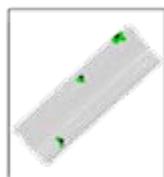
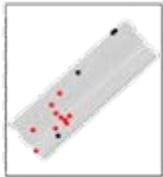
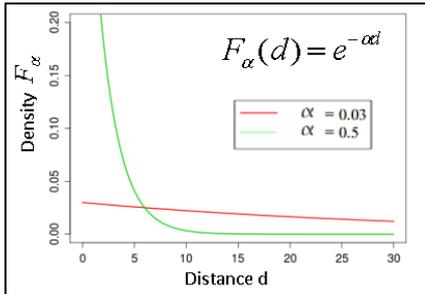


# Modélisation de l'épidémie



$$\lambda_{i,t} \propto x_t \sum_{i'} (M_{i' \rightarrow i} I_{i',t})$$

**Couplage entre processus**



# Modélisation de l'épidémie

Susceptible  
e



Exposed



Hidden



Detected



Removed

Infectious

**Notations:**

- $i \in \{1, \dots, I\}$  Index of the orchard
- $t \in \{1, \dots, T\}$  Index of the time-step (1 week)
- S, E, I, H, D, R Number of trees at each state
- $\forall 1 \leq t \leq T, N_{i,t} = S_{i,t} + E_{i,t} + H_{i,t} + D_{i,t} + R_{i,t}$

$$[S_{i,t} \rightarrow E_{i,t+1}] \sim B(S_{i,t}, 1 - e^{-\lambda_{i,t}})$$

Infectious potential:

$$\lambda_{i,t} = f(\alpha_t, \beta, W_{\text{exp}}, I_{i,t})$$

Aphid density      Transmission coefficient      Nb of infectious trees

$$(EH) \sim \Gamma(\theta_1, \theta_2)$$

Latency duration

$$\theta_{\text{exp}} = \theta_1 \cdot \theta_2$$

$$\theta_{\text{var}} = \theta_1 \cdot \theta_2^2$$

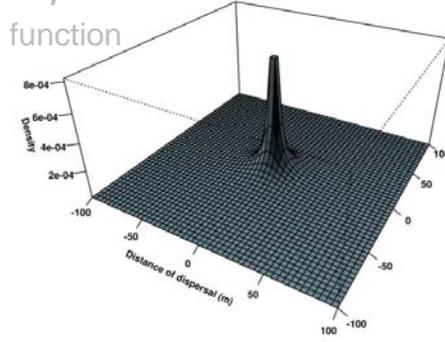
$$[H_{i,t} \rightarrow D_{i,t+1}] \sim B(H_{i,t}, \rho)$$

Detection probability

$$(DR) \sim \text{Geom}\left(\frac{1}{\delta}\right)$$

Delay before removal

Dispersal function



Introduction parameters

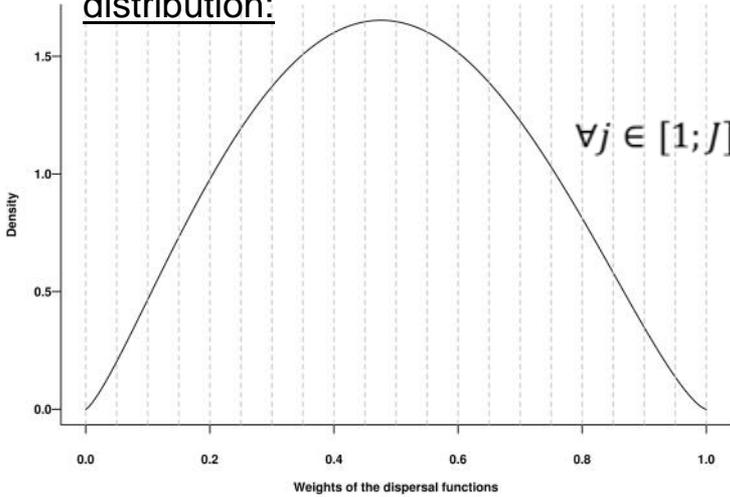
- $q_k$  1<sup>st</sup> intro. connectivity quantile
- $\phi$  Prob. of introduction
- $p_{SI}$  Prob. of small introduction

**Output:** Mean equivalent number of fully productive trees per ha per year

# Modélisation de l'épidémie

## Fonction de dispersion

- 20 weights defined by a beta distribution:



$\forall j \in [1; J],$

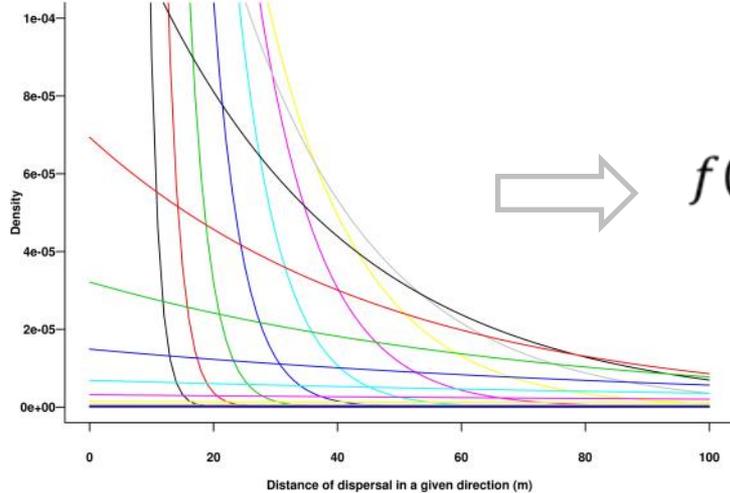
$$W \sim \beta(s_1, s_2)$$

$$w_j = \int_{(j-1)/J}^{j/J} g(x; \beta_1, \beta_2). dx$$

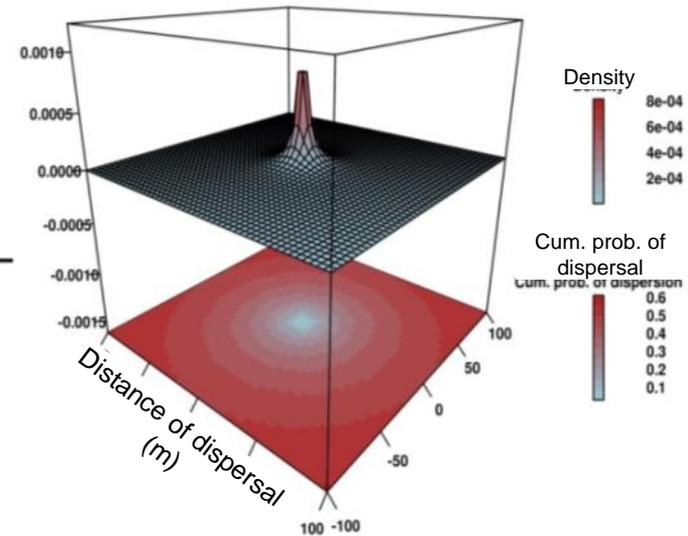
$$\left\{ \begin{array}{l} W_{exp} = \frac{s_1}{s_1 + s_2} \\ W_{var} = \frac{s_1 \cdot s_1}{(s_1 + s_2)^2 \cdot (1 + s_1 + s_2)} \end{array} \right.$$

## Mixture of weighted exponential distributions

- 20 exponential dispersal functions:

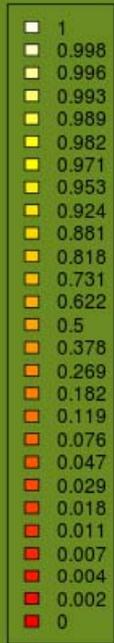


$$f(d) = \sum_{j=1}^J w_j \cdot \frac{e^{-\left(\frac{d}{h_j}\right)}}{2 \cdot \pi \cdot h_j^2}$$



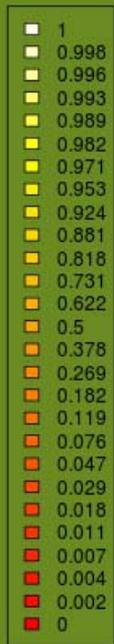
$t = -1$

$P(S)$



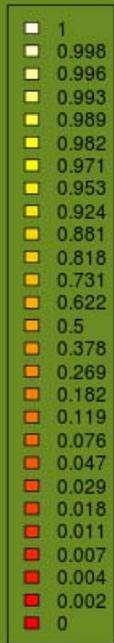
$t = 0$

$P(S)$



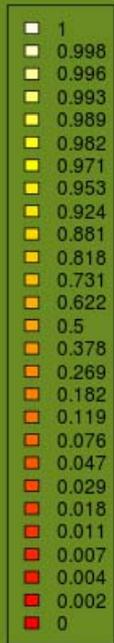
$t = 5$

$P(S)$



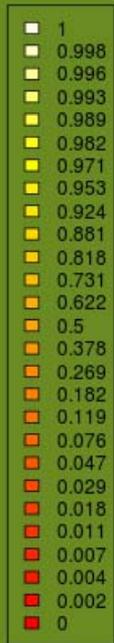
$t = 10$

$P(S)$



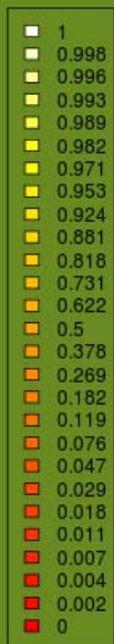
$t = 15$

$P(S)$



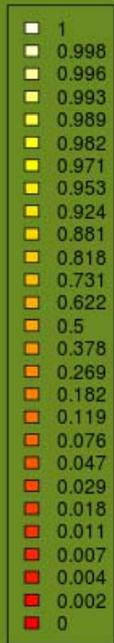
$t = 20$

$P(S)$



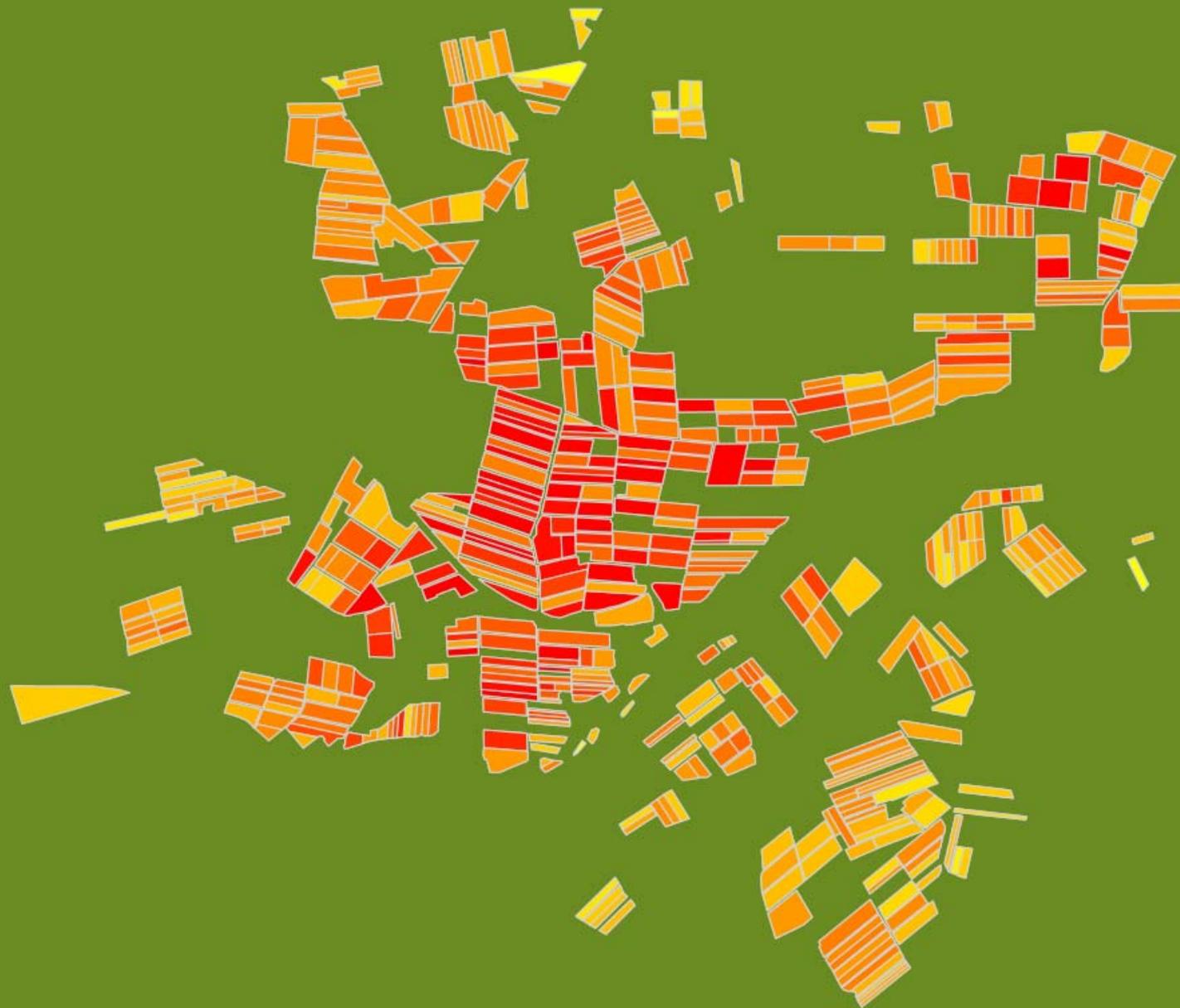
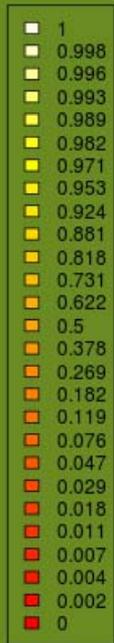
$t = 25$

$P(S)$

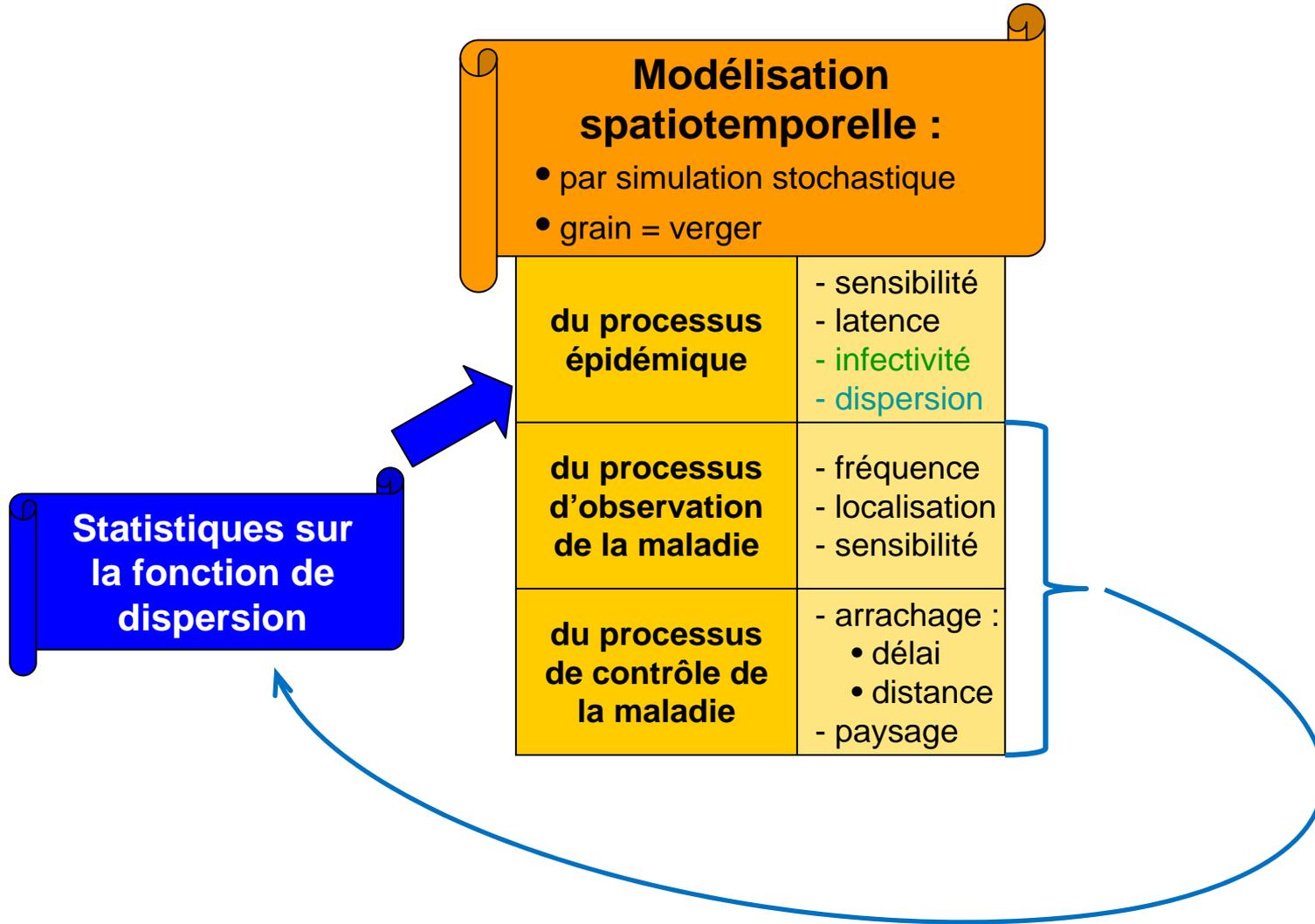


$t = 30$

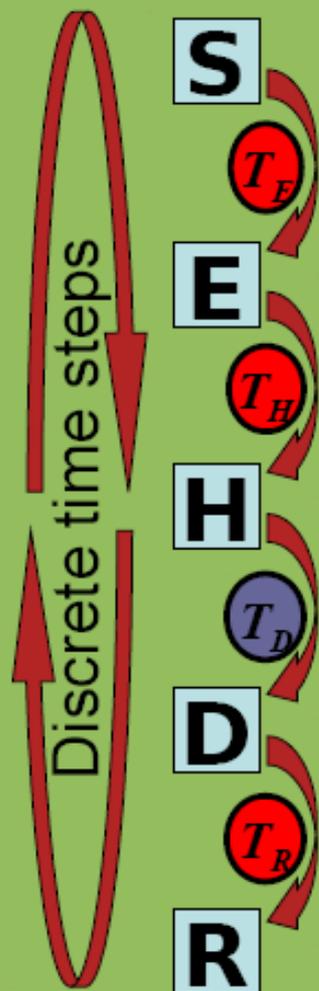
$P(S)$



# Estimation de paramètres épidémiologiques



# Uncertainty Integrated Likelihood



$$\lambda_i = \frac{\alpha\beta}{N_i - E(R_i)} \sum_{i' \in \mathfrak{N}_i} m_{ii'} E(I'_i)$$

$$p(S_{ir-1}) = p(S_{i0}) \prod_{r'=1}^{r-1} p(S_{ir'} | S_{ir'-1})$$

$$p(E_r) = \sum_{r'=0}^r p(E_r | E_{r'}) p(S \xrightarrow{r'} E)$$

$$p(D_k) = \rho_k \left( p(\mathcal{S}_k | \mathcal{E}_k) - \sum_{k'=0}^{k-1} p(D_{k'}) \right)$$

$$p(R_r) = \sum_{k \in \mathbf{k}_i}^{t_k \leq t_r} p(R_r | D_k) p(D_k)$$

$$L(\theta | Y) = \prod_{i=1}^{N_{\text{orchards}}} \left( \left( \prod_{k=1}^{K_i} p(T_{Di} = t_k)^{D_{ik}^+} \right) \times \left( 1 - \sum_{k \in \mathbf{k}_i} p(T_{Di} = t_k) \right)^{N_{it_0} - \sum_{k \in \mathbf{k}_i} D_{ik}^+} \right)$$

# Simulation Study : Outline

**Aim** : Test accuracy ,

## 3 Kernel Scenarios

$$\alpha_1 = (12727, 29264) \iff n = 1, \{E[d_I|h_I]\} = 25$$

$$\alpha_2 = (9.3, 18.1) \iff n = 2, \{E[d_I|h_I]\} = \{25, 100\}, \omega = \left\{\frac{2}{3}, \frac{1}{3}\right\}$$

$$\alpha_3 = (5.5, 8.4) \iff n = 3, \{E[d_I|h_I]\} = \{25, 100, 300\}, \omega = \left\{\frac{3}{6}, \frac{2}{6}, \frac{1}{6}\right\}$$

## 7 Introduction Scenarios

Initial Prevalence	25%	10%	5%	2%	1%	1%	1%
Number of Patches	1	5	10	15	20	25	30

## 4 Estimation Scenarios

$$f(\alpha, \beta, p_{H_0}, Z|Y)$$

$$f(\alpha, \beta, p_{H_0}, Z, \rho, |Y)$$

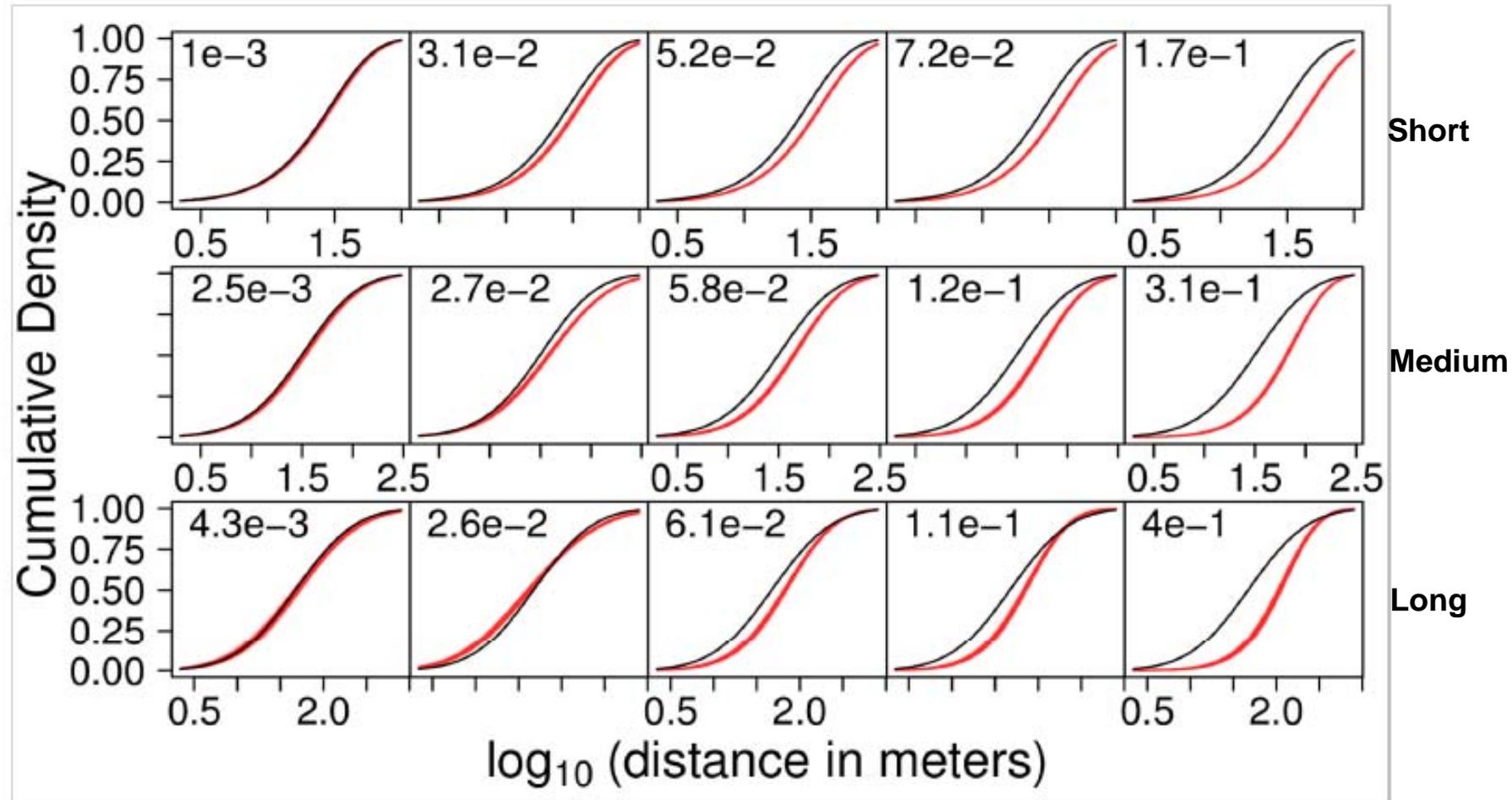
$$f(\alpha, \beta, p_{H_0}, Z, \theta_{lat}|Y)$$

$$f(\alpha, \beta, p_{H_0}, Z, \rho, \theta_{lat}|Y)$$

10 epidemics / kernel x introduction scenario = 210 simulated epidemics

# Simulation Study : True vs. Fitted Kernels

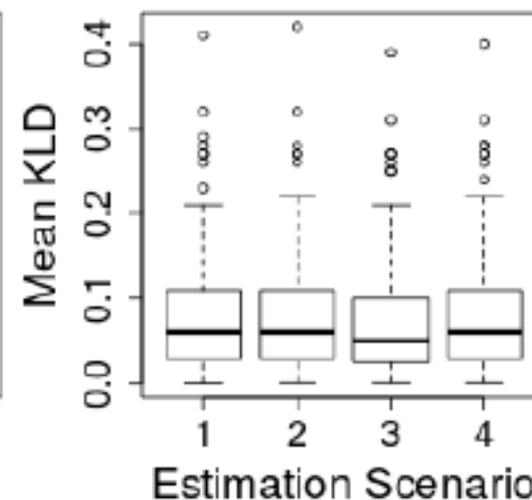
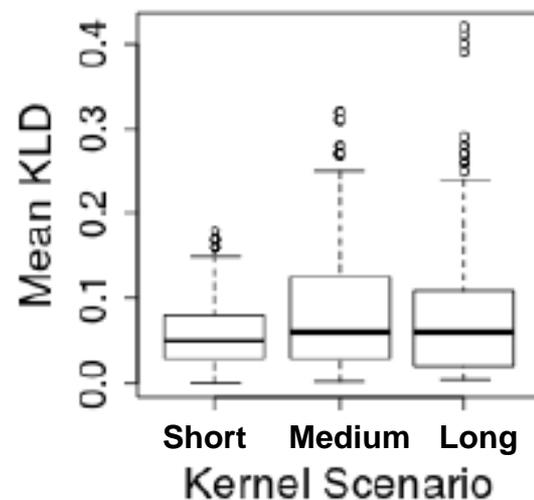
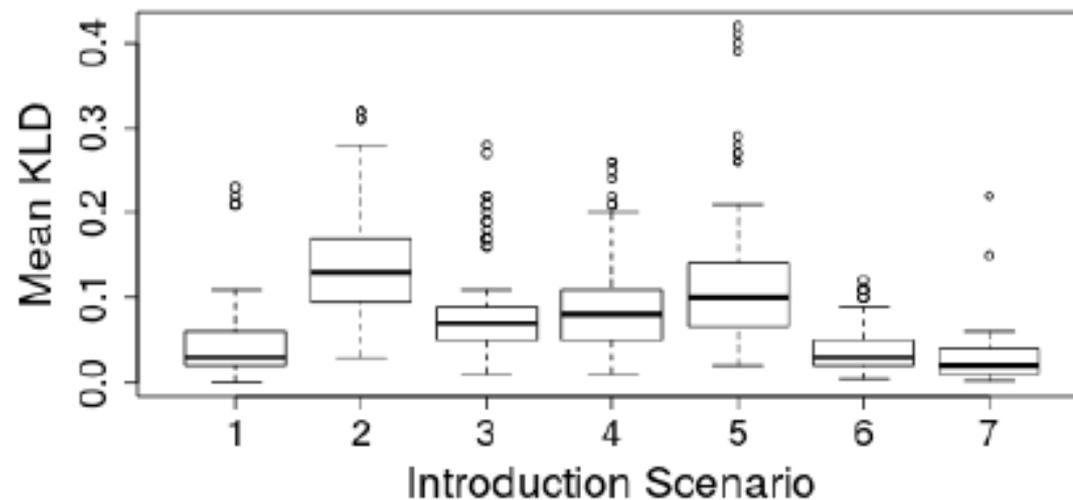
Five-figure statistics for the 3 kernel scenarios  
(marginal over introduction scenario, estimation scenario 4)



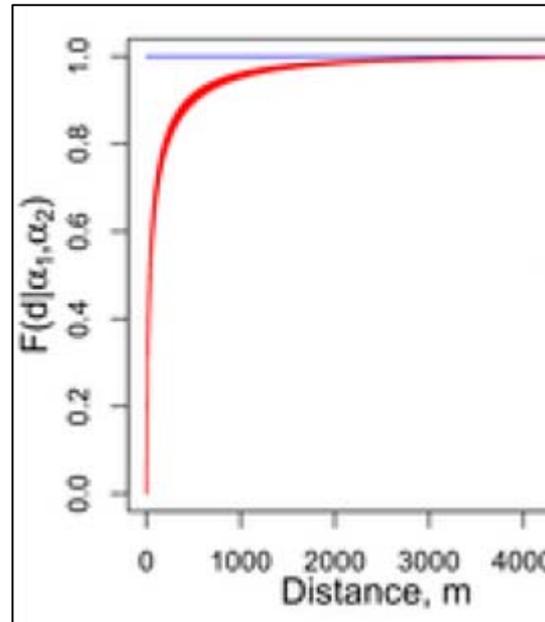
# Simulation Study Results : Kullback-Leibler Distance

**Accuracy**

**Mean Posterior KLD**

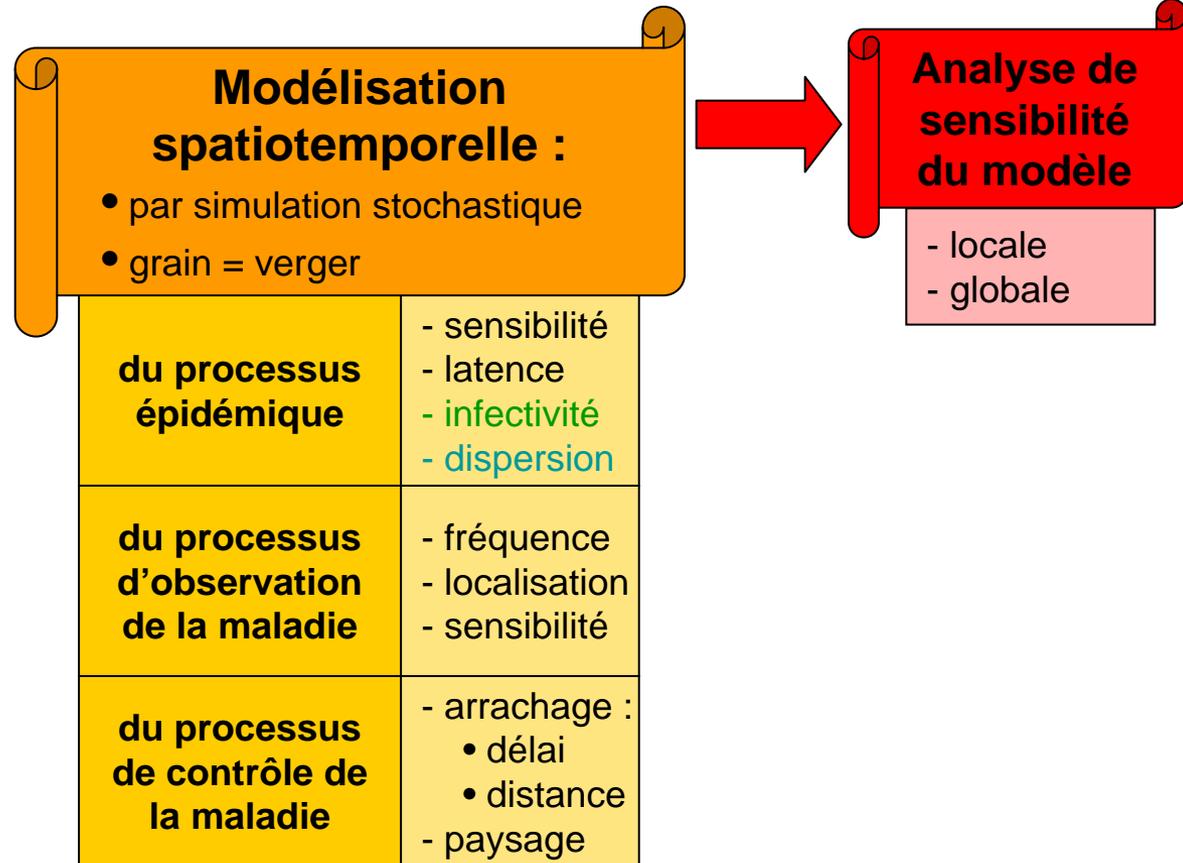


## Fitted BWME Kernel



- ▶ Kernels *extremely* long tailed
- ▶ 50% flights < 60-90m
- ▶ 1% flights > 3500m
- ▶ First estimates of between-patch dispersal at landscape scale

# Influence relative des paramètres du modèle



# Influence relative des paramètres du modèle

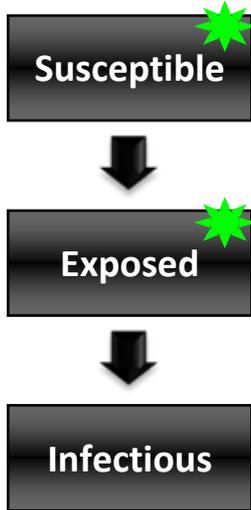
Spatial scale: orchard  
Time step: 1 week  
Run: 30 years

Parameters targeted in the SA

★ Productive trees

## Notations:

$i \in \{1, \dots, I\}$  Index of the orchard  
 $t \in \{1, \dots, T\}$  Index of the time-step (1 week)  
 $S, E, I, H, D, R$  Number of trees at each state  
 $\forall 1 \leq t \leq T, N_{i,t} = S_{i,t} + E_{i,t} + H_{i,t} + D_{i,t} + R_{i,t}$



$$[S_{i,t} \rightarrow E_{i,t+1}] \sim B(S_{i,t}, 1 - e^{-\lambda_{i,t}})$$

$$(EH) \sim \Gamma(\theta_1, \theta_2)$$

↑ Latency duration

Infectious potential:

$$\theta_{\text{exp}} = \theta_1 \cdot \theta_2$$

$$\theta_{\text{var}} = \theta_1 \cdot \theta_2^2$$

$$\theta_{\text{var}} = (0.35 \times \theta_{\text{exp}})^2$$

Transmission coefficient  $\beta$  and Aphid density  $\alpha_t$  are highlighted in blue circles in the original image.

$$\lambda_{i,t} = \frac{\beta \cdot \alpha_t}{N_{i,0} - R_{i,t}} \cdot \sum_{i'=1}^I m_{i'i} \cdot I_{i',t}$$

Orchard connectivity

Dispersal function

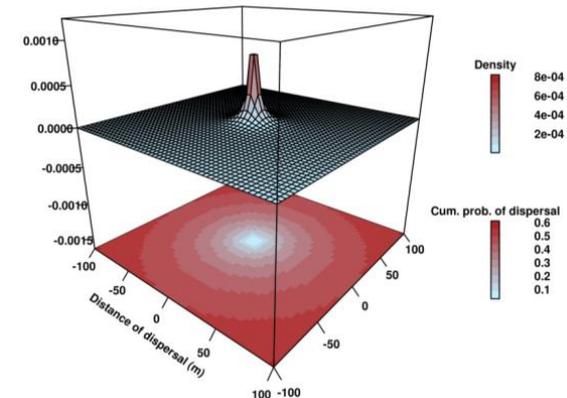
$W_{\text{exp}}$   
 $W_{\text{var}}$

Explicit landscape



## Introduction parameters

- $q_k$  1<sup>st</sup> intro. connectivity quantile
- $\phi$  Prob. of introduction
- $p_{MI}$  Prob. of massive introduction



# Influence relative des paramètres du modèle

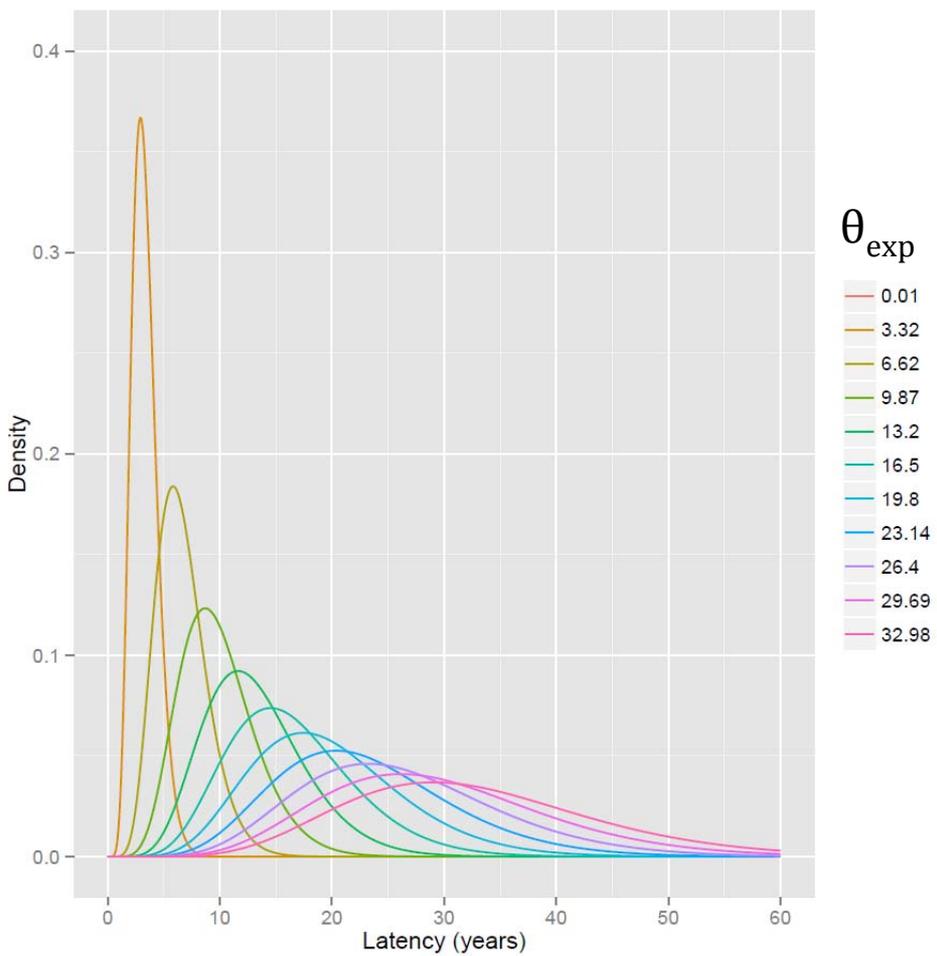
Uncertain factor	Domain of definition	Variation range
$\beta$ Transmission coefficient	$[0; +\infty[$	$[0.08 ; 80]$
$q_k$ 1 <sup>st</sup> intro. connectivity quantile	$[0; 1]$	$]0; 1[$
$\Phi$ Prob. of introduction	$[0; 1]$	$]0; 1[$
$W_{exp}$ Expected value of W	$[0,05; 0,95]$	$[0.14 ; 0.86]$
$\theta_{exp}$ Expected value of the latency	$]0; +\infty[$	$\left[ \frac{1}{365}; 33 \right]$
$p_{SI}$ Prob. of small introduction	$[0; 1]$	$]0; 1[$

Result in variations of whole distributions

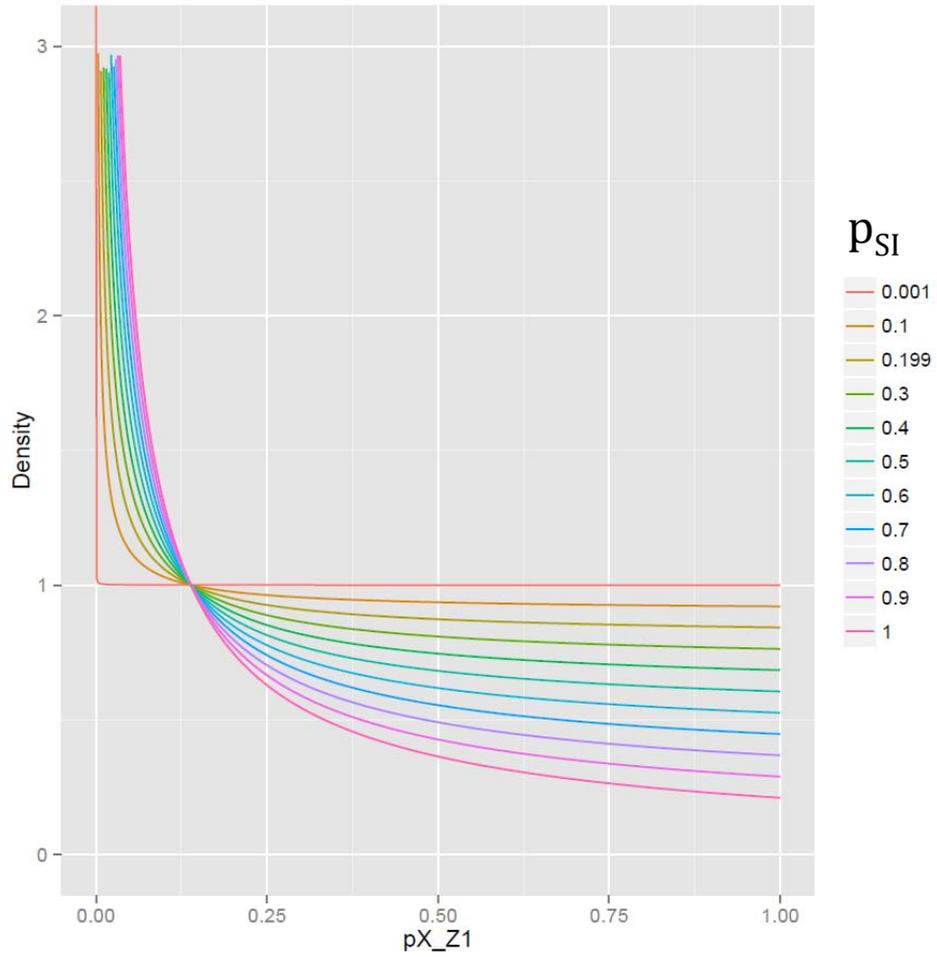
# Influence relative des paramètres du modèle

## Variations of whole distributions

**Latency duration**  
Gamma distributions



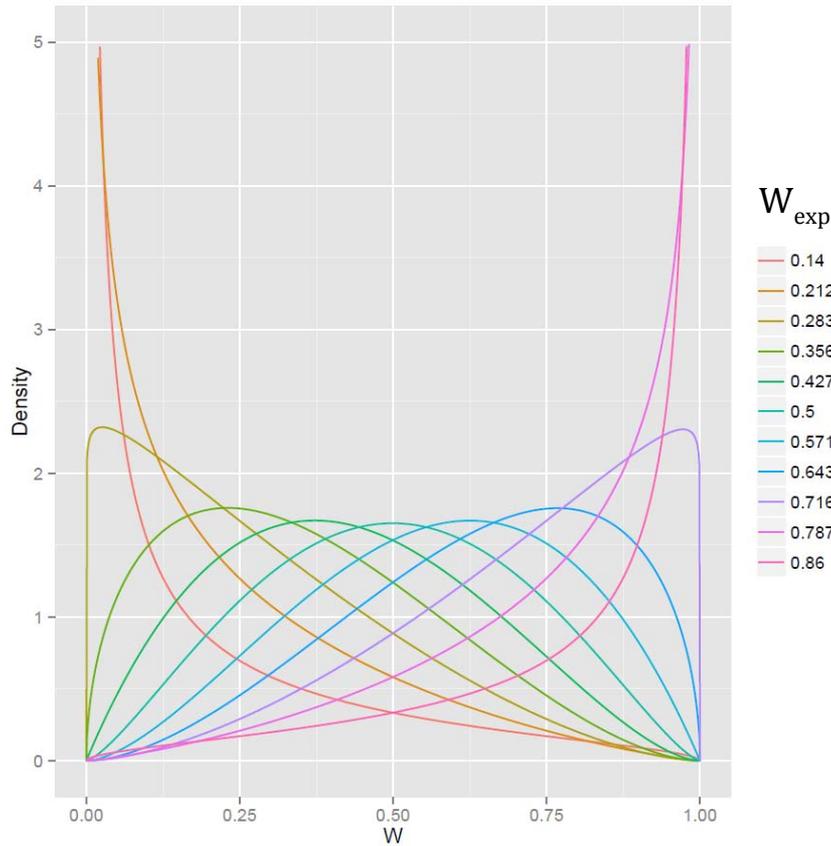
**Prevalence at introduction**  
Weighted mixture of a beta and a uniform



# Influence relative des paramètres du modèle

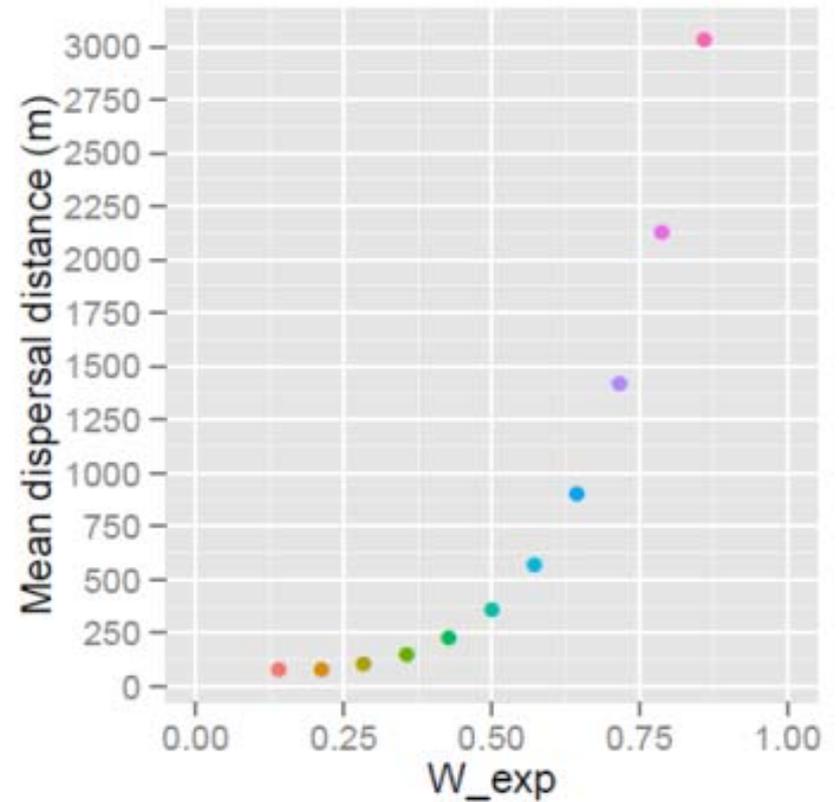
## Variations of whole distributions

### Weights of exponential dispersal functions



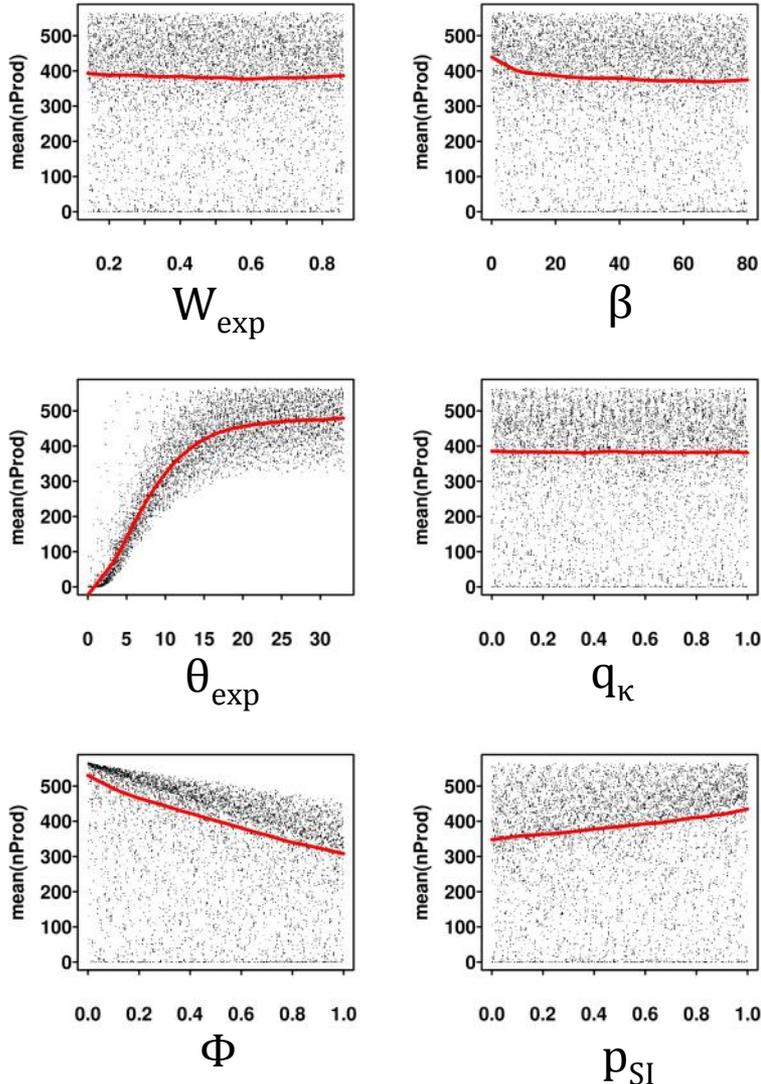
### Dispersal function

Weighted mixture of 20 exponential functions



# Influence relative des paramètres du modèle

## Effet des paramètres individuels



Uncertain factor	Conclusion
$\theta_{exp}$ Expected value of the latency	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very strong impact</li> <li>• Saturation after 15 years</li> </ul>
$\beta$ Transmission coefficient	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low visible impact (due to latency saturation)</li> </ul>
$W_{exp}$ Expected value of $W$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Almost flat</li> </ul>
$\Phi$ Prob. of introduction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High impact</li> </ul>
$p_{SI}$ Prob. of small introduction	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High impact</li> </ul>
$q_k$ 1 <sup>st</sup> intro. connectivity quantile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No impact</li> </ul>

# Influence relative des paramètres du modèle

## Indices de sensibilité – Modèle générique

### Uncertain factors ranked by influence:

1. Expected value of the latency  $\theta_{\text{exp}}$

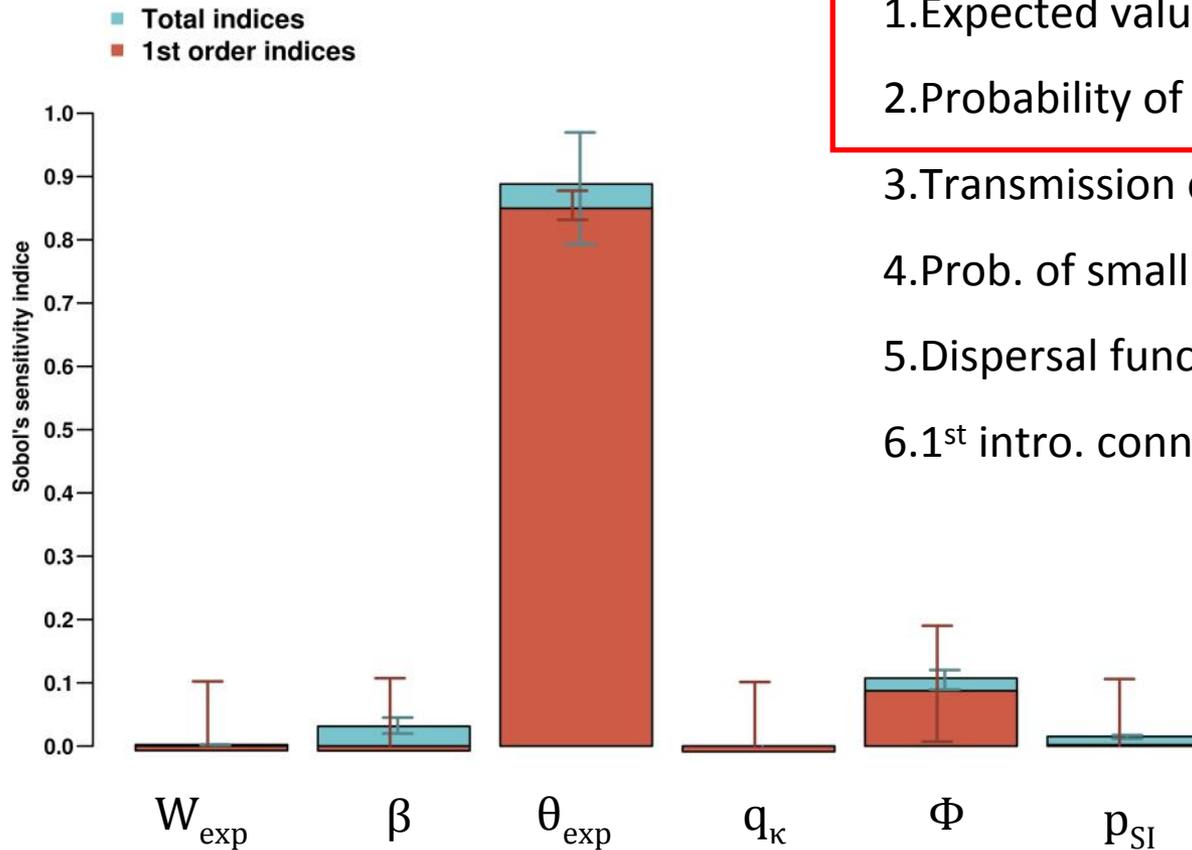
2. Probability of introduction  $\Phi$

3. Transmission coefficient  $\beta$

4. Prob. of small introduction  $p_{\text{SI}}$

5. Dispersal function  $W_{\text{exp}}$

6. 1<sup>st</sup> intro. connectivity quantile  $q_{\text{k}}$



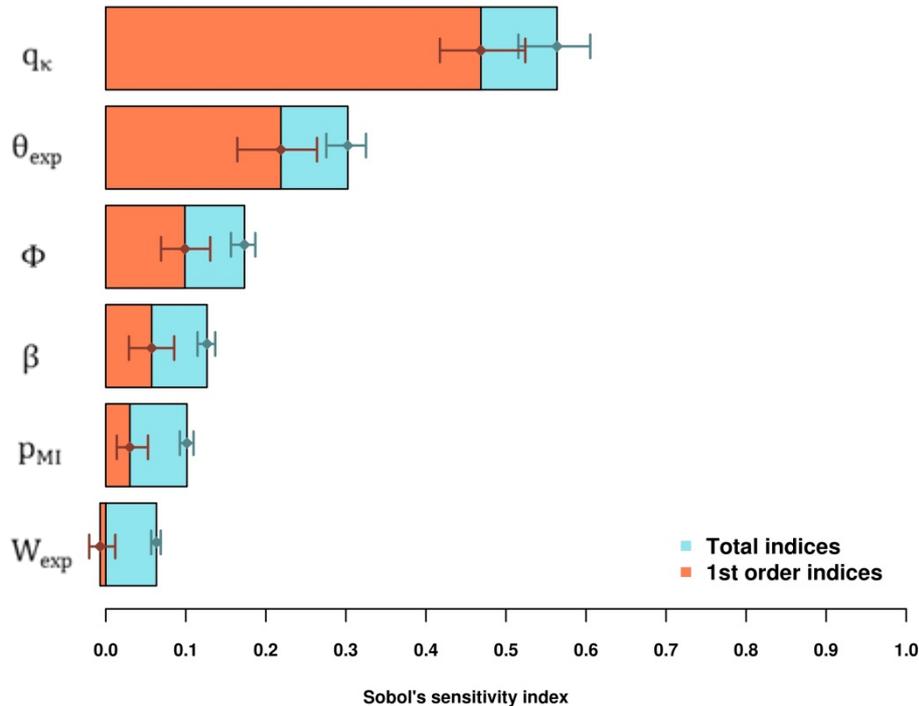
# Influence relative des paramètres du modèle

Exploration of variation ranges through low-discrepancy sequences: scrambled Sobol's sequences

Uncertain factor	Domain of definition	Global variation range	Local variation range
$\beta$ Transmission coefficient	$[0; +\infty[$	$[0.08; 12.8]$	$[1.25; 1.39]$
$q_k$ 1 <sup>st</sup> intro. connectivity quantile	$[0; 1]$	$[0; 1]$	$[0; 1]$
$\Phi$ Prob. of introduction	$[0; 1]$	$[0; 1]$	$[0.0046; 0.0107]$
$W_{\text{exp}}$ Expected value of W	$[0.05; 0.95]$	$[0.14 ; 0.86]$	$[0.469; 0.504]$
$\theta_{\text{exp}}$ Expected value of the latency	$]0; +\infty[$	$\left[\frac{1}{365}; 33\right]$	$[1.71; 2.14]$
$p_{\text{MI}}$ Rel. prob. of massive introduction	$[0; 1]$	$[0; 1]$	$[0; 0.1]$

# Influence relative des paramètres du modèle

## Indices de sensibilité – Modèle spécifique PPV



### Uncertain factors ranked by influence:

1<sup>st</sup> intro. connectivity quantile  $q_k$

Expected value of the latency  $\theta_{exp}$

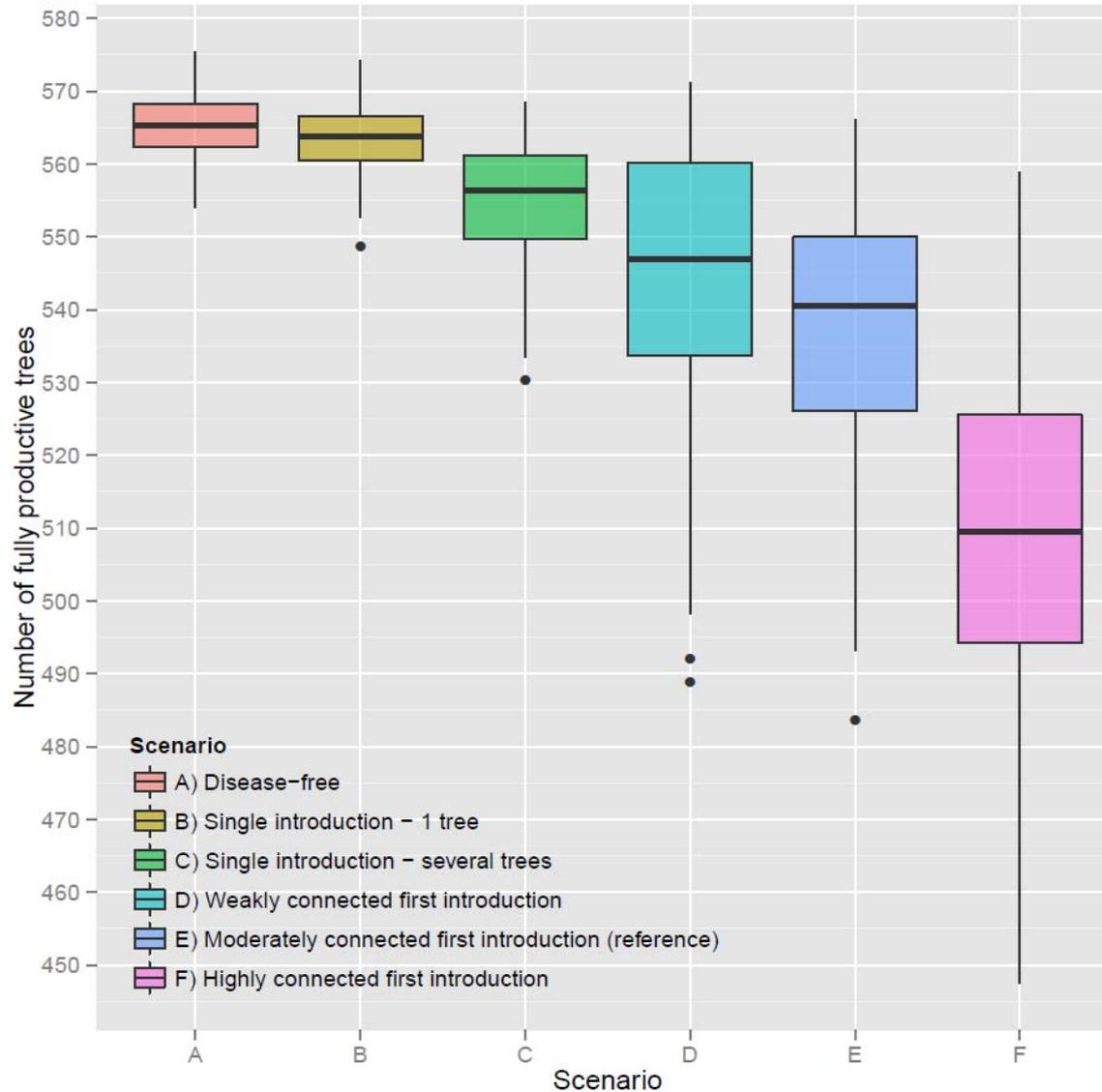
Probability of introduction  $\Phi$

Transmission coefficient  $\beta$

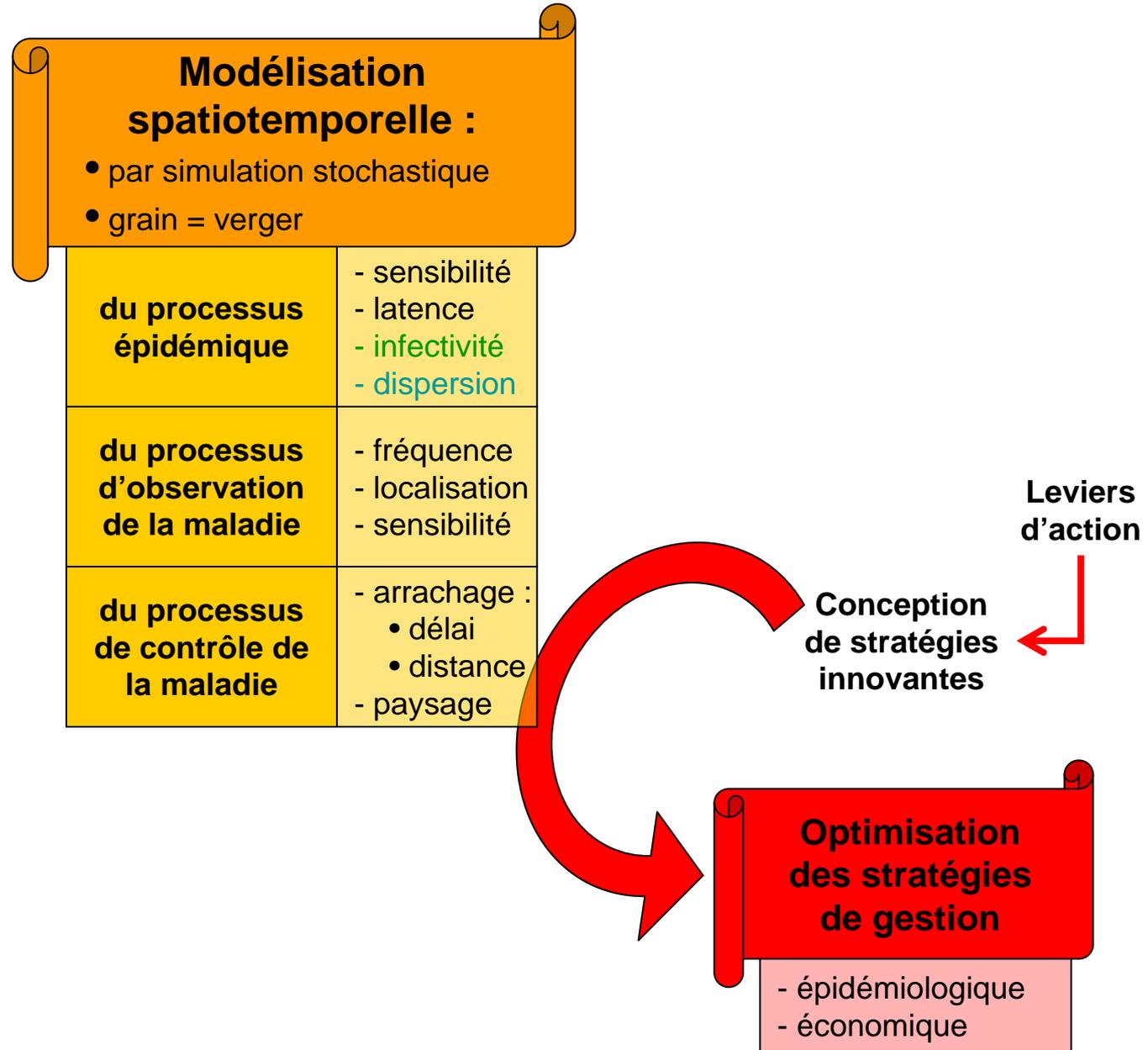
Prob. of small introduction  $p_{SI}$

Dispersal function  $W_{exp}$

# Influence relative des paramètres du modèle



# Introduction



# Optimiser *in silico* la gestion de la sharka

ARRETE

**Arrêté du 17 mars 2011 relatif à la lutte contre le Plum Pox Virus, agent causal de la maladie de la Sharka, sur les végétaux sensibles du genre Prunus**

NOR: AGRG1105295A

Le ministre de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire,  
Vu le code rural et de la pêche maritime, notamment les chapitres Ier et II du titre V et le chapitre Ier du titre préliminaire de son livre II ;  
Vu l'arrêté du 31 juillet 2000 modifié établissant la liste des organismes nuisibles aux végétaux, produits végétaux et autres objets soumis à des mesures de lutte obligatoire ;  
Vu l'arrêté du 24 mai 2006 modifié relatif aux exigences sanitaires des végétaux, produits végétaux et autres objets,  
Arrête :

## ▶ CHAPITRE IER : DEFINITIONS

### ▶ SECTION 1 : DISPOSITIONS GENERALES

#### Article 1 En savoir plus sur cet article...

La lutte contre le Plum Pox Virus, agent causal de la Sharka des végétaux du genre Prunus, est obligatoire en tous lieux et de façon permanente sur tout le territoire national.

#### Article 2 En savoir plus sur cet article...

Au sens du présent arrêté, on entend par :

- végétal : tout végétal du genre Prunus sensible au Plum Pox Virus tel que défini à l'annexe I ;
- parcelle : unité agronomique homogène définie par une variété donnée, plantée une année donnée avec une distance de plantation identique ;
- lieu de production : tout lieu ou ensemble de parcelles comportant du matériel de propagation ou de multiplication de végétaux du genre Prunus et exploités comme une seule unité de production agricole. Lorsqu'un même établissement comporte différents ensembles de parcelles de matériel de propagation ou de multiplication séparés d'une distance de mille mètres au moins, chaque ensemble constitue un lieu ;
- matériel de propagation : matériel de propagation de végétal du genre Prunus, sensible au Plum Pox Virus, à savoir les arbres mères donneurs de greffons et de boutures, y compris les arbres mères producteurs accélérés de greffons ;
- matériel de multiplication : matériel de multiplication de végétal du genre Prunus, sensible au Plum Pox Virus, à savoir les scions d'un an et arbres de plus d'un an destinés à la plantation, le matériel greffé à œil dormant, les porte-greffe (boutures, plants issus de semis ou de culture in vitro), les greffons ;
- abri « insect proof » : tout abri répondant aux conditions fixées en annexe II ;
- taux moyen de contamination de l'année n : nombre d'arbres détectés contaminés en année n — 1 divisé par le nombre d'arbres initial à la plantation des parcelles, sur une surface d'environ un kilomètre carré centrée sur l'arbre ou la parcelle considérée ;
- jeune vergier : toute parcelle dont la plantation a eu lieu au cours des trois dernières années, c'est-à-dire jusqu'à l'année de la troisième feuille comprise ;
- parcelle non entretenue : parcelle qui n'est plus récoltée et dont les végétaux ne font l'objet d'aucune action de taille. Le constat d'absence d'entretien est réalisé par le service régional chargé de la protection des végétaux.

#### Article 3 En savoir plus sur cet article...

Toute personne est tenue d'assurer une surveillance générale du fonds lui appartenant ou cultivé par elle, et de déclarer immédiatement la présence de symptômes du Plum Pox Virus soit directement au service régional chargé de la protection des végétaux dont elle dépend, soit au maire de la commune de sa résidence qui en avise alors ce service.

### ▶ SECTION 2 : DEFINITIONS DES ZONES DELIMITEES

#### Article 4 En savoir plus sur cet article...

Dès confirmation officielle d'un foyer par les services régionaux chargés de la protection des végétaux, deux zones sont délimitées :  
— une zone focale, d'un rayon minimal de 1,5 kilomètres autour du végétal isolé contaminé ou de la parcelle au sein de laquelle la présence du virus a été détectée, et comprenant le végétal ou la parcelle contaminée ;  
— une zone de sécurité, d'une distance minimale de 1 kilomètre au-delà du périmètre de la zone focale.

En cas de découverte du virus sur un autre arbre isolé ou sur une autre parcelle, les délimitations de la zone focale et de la zone de sécurité sont revues en conséquence.

Lorsque plusieurs zones délimitées se chevauchent ou sont géographiquement proches les unes des autres, la zone délimitée est étendue afin d'inclure les zones délimitées concernées et les zones qui les séparent.

#### Article 5 En savoir plus sur cet article...

Un arrêté préfectoral précise le nom des communes couvertes, en tout ou parties de zones focales ou de zones de sécurité définies à l'article 4.

Les zones délimitées mentionnées à l'article 4 sont déclarées indemnes du Plum Pox Virus si, pendant trois années consécutives, la surveillance mise en place conformément aux dispositions listées au chapitre II n'a pas mis en évidence la présence du virus.

### ▶ CHAPITRE II : DISPOSITIF GENERAL DE SURVEILLANCE ET DE LUTTE

- Lutte obligatoire (indemnisée)
- Arrêté national (2011)
- SRAL / DRAAF / FREDON / FEDON
- Basée sur des dires d'experts

# Optimiser *in silico* la gestion de la sharka

## Surveillance

Après détection d'un arbre infecté l'année  $n$ , établissement des zones l'année  $n+1$  pendant 3 ans :

**A) Epicentre** : disque de  $1 \text{ km}^2$  (rayon 564 m)

**B) Zone focale** (rayon 1500 m)

Minimum 3 prospections/an si zone A  $\geq 2\%$

Minimum 2 prospections/an sinon

**C) Zone de sécurité** (rayon 2500 m)

Minimum 1 prospection/an

**D) Zone extérieure**

Minimum 1 prospection/6 ans

**Cas des jeunes vergers** (jusqu'à 3 ans inclus)

Minimum 2 prospections/an

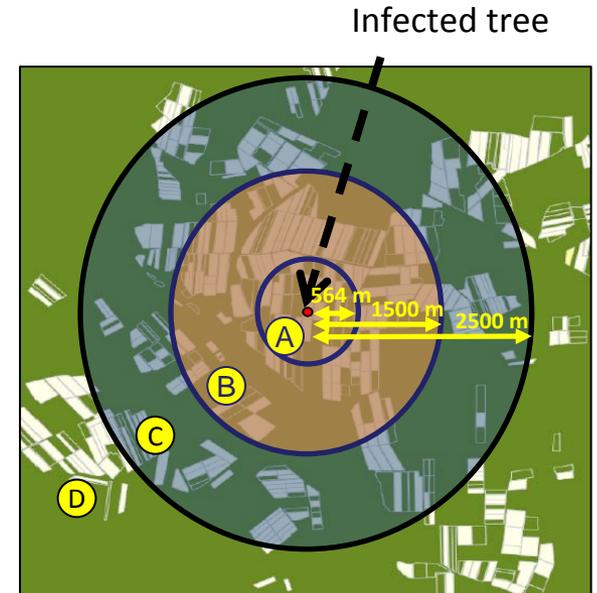
Minimum 3 prospections/an si planté dans environnement ( $1 \text{ km}^2$ )  $\geq 1\%$

## Arrachages

- Arbres individuels dans un délai max de 10 jours
- Verger entier si contamination  $\geq 10\%$  (arrachage 10 jours après la récolte)

## Plantations

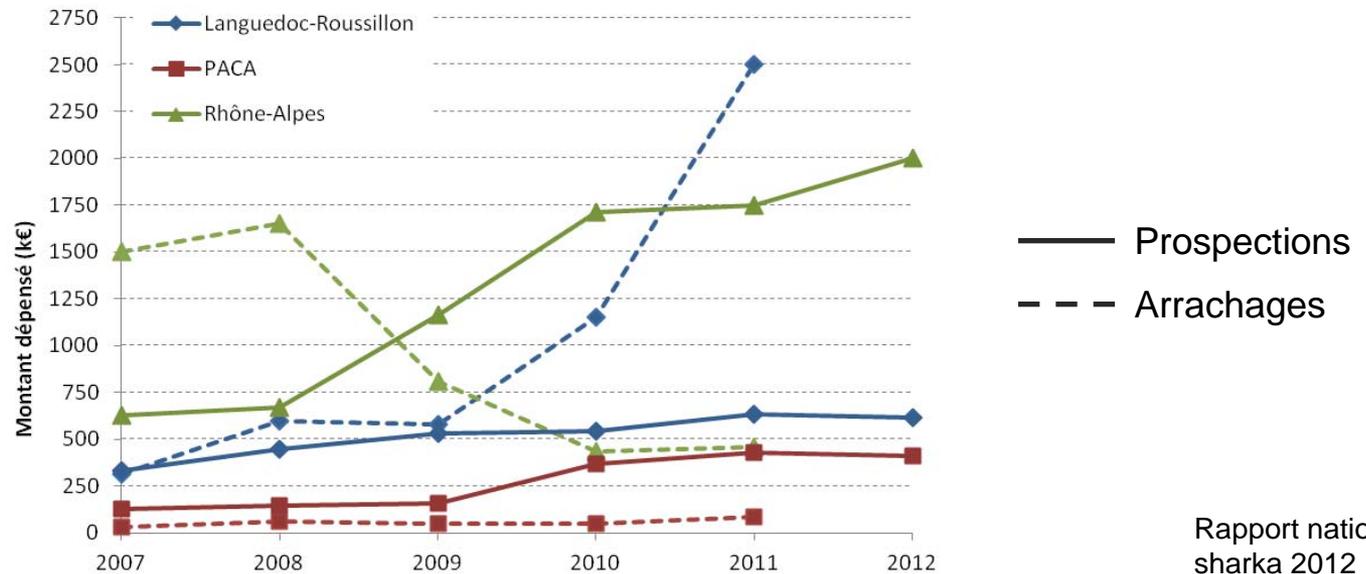
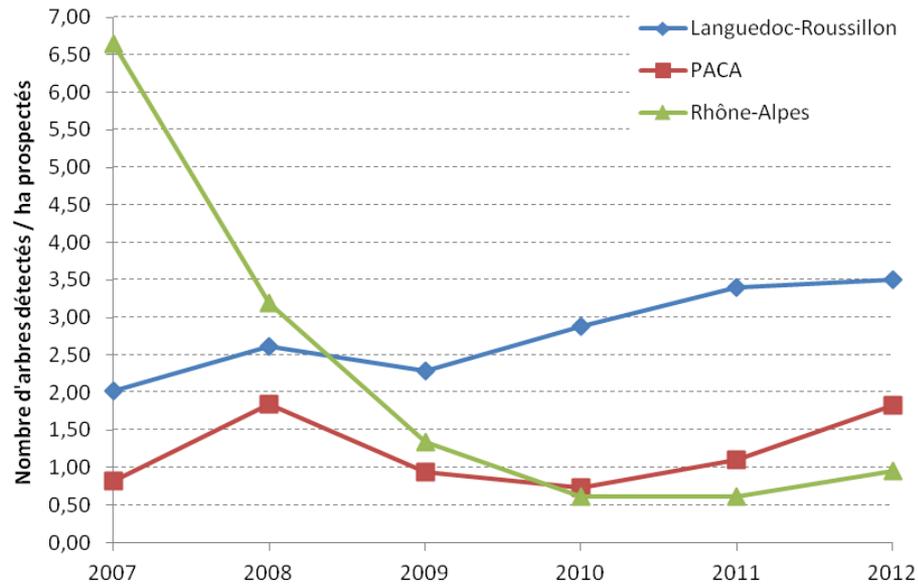
- Pas de replantation d'arbres individuels
- Pas de délai avant replantation de vergers
- Plantation interdite en zone focale si environnement  $\geq 2\%$  ou si verger  $\geq 5\%$  à moins de 200 m



**Calcul de la contamination de l'année  $n$**   
**(d'un verger ou d'une zone)**

$$\frac{\text{Nbre d'arbres infectés l'année } n}{\text{Nbre initial d'arbres plantés}}$$

# Optimiser *in silico* la gestion de la sharka



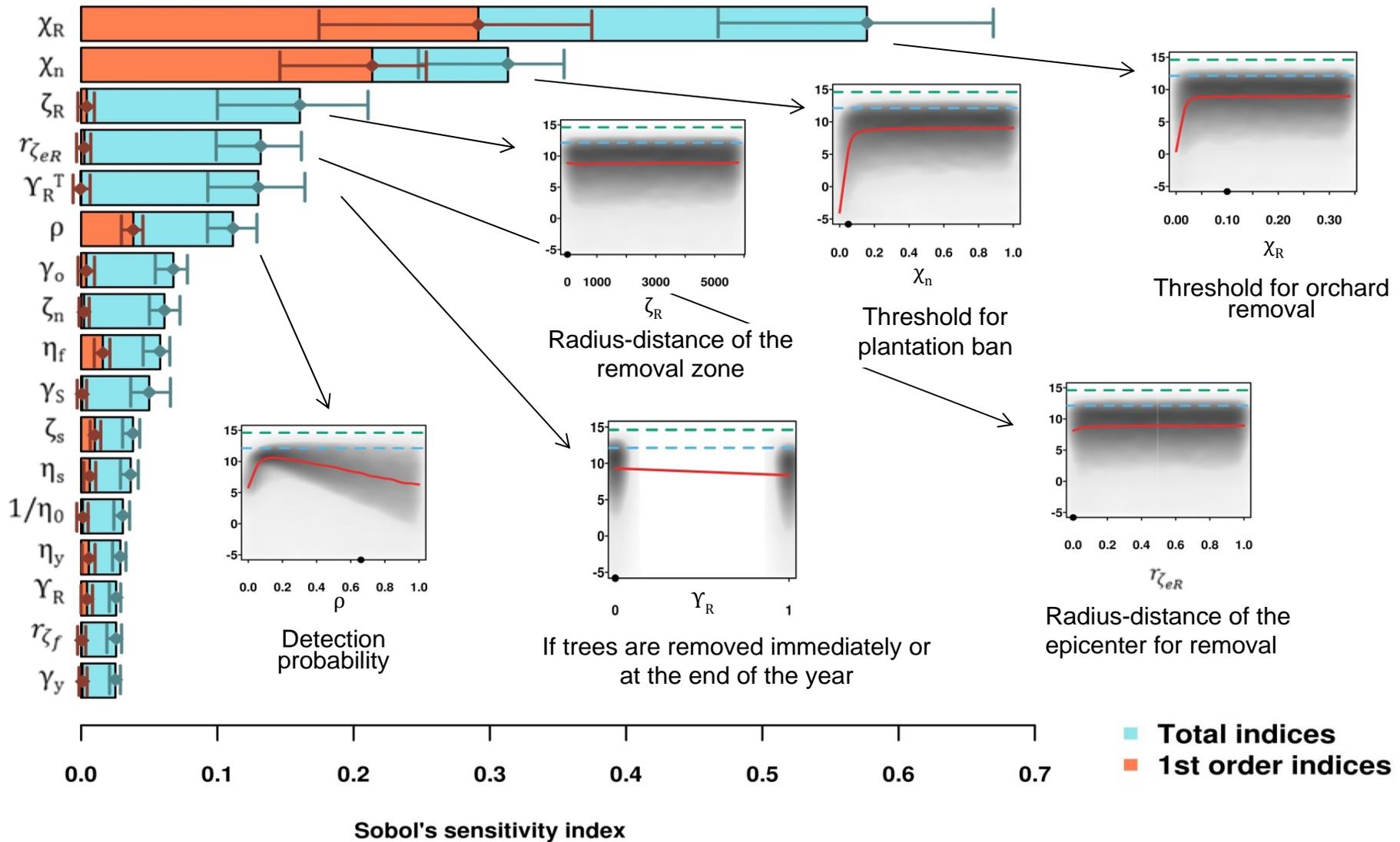
# Optimiser *in silico* la gestion de la sharka

---

- Processus d'observation
  - Optimiser la répartition spatiale
  - Optimiser la répartition temporelle
  - Jouer sur l'équilibre vitesse vs. sensibilité
- Processus d'intervention
  - Optimiser les seuils d'arrachage
  - Tester l'effet d'arrachages partiels
- Zones délimitées
  - Optimiser leur taille

# Optimiser *in silico* la gestion de la sharka

## Analyse de sensibilité préalable



# Résumé des principaux résultats

---

- Une méthode bayésienne permettant d'estimer des paramètres épidémiologiques à partir de données d'épidémiosurveillance
- Première estimation de la fonction de dispersion des pucerons
- Prépondérance de la durée de latence dans l'hôte
- Rôle capital de la connectivité de la parcelle d'introduction du PPV

# Perspectives

---

- Améliorer les connaissances sur la durée de latence
- Améliorer l'estimation de la fonction de dispersion grâce à l'information portée par les génomes viraux géolocalisés
- Proposer des stratégies de surveillance basées sur le risque :
  - de contamination entrante
  - de contamination sortante
- Evaluation et optimisation économique de la politique publique de lutte :
  - stratégies variables dans le temps et l'espace
  - incitations adaptées à l'hétérogénéité des situations épidémiques
- Analyse (voire optimisation théorique) de la répartition du financement entre arboriculteurs, fédérations professionnelles, Etat, Europe, etc.
- Optimiser l'introduction de variétés résistantes

# Remerciements



## BGPI (Montpellier)

- Loup Rimbaud
- David Pleydell
- Sylvie Dallot
- Gérard Labonne
- François Bonnot
- Emmanuel Jacquot



## BioSP (Avignon)

- Samuel Soubeyrand
- Claude Bruchou
- Joël Chadœuf

## LAMETA (Montpellier)

- Sophie Thoyer
- Pierre Courtois

# Financements

