Modélisation et optimisation de la gestion d'une épidémie : quel impact du paysage ?

Coralie Picard

UMR BGPI, Montpellier

Encadrants

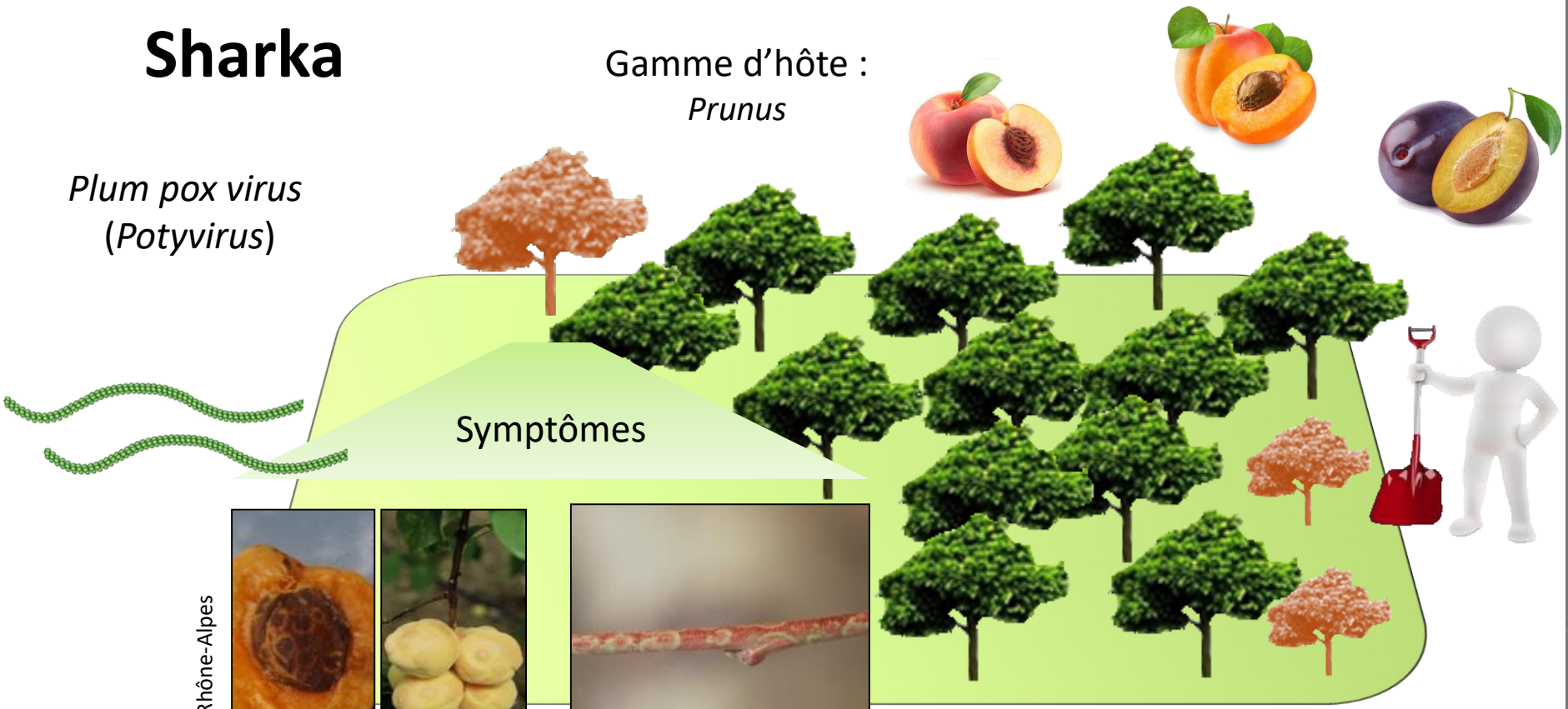
Gaël Thébaud — **Samuel Soubeyrand**

Emmanuel Jacquot — **Pascal Hendrikx**

Sharka

Plum pox virus
(*Potyvirus*)

Gamme d'hôte :
Prunus



Symptômes

© INRA Montpellier, Fredon Rhône-Alpes

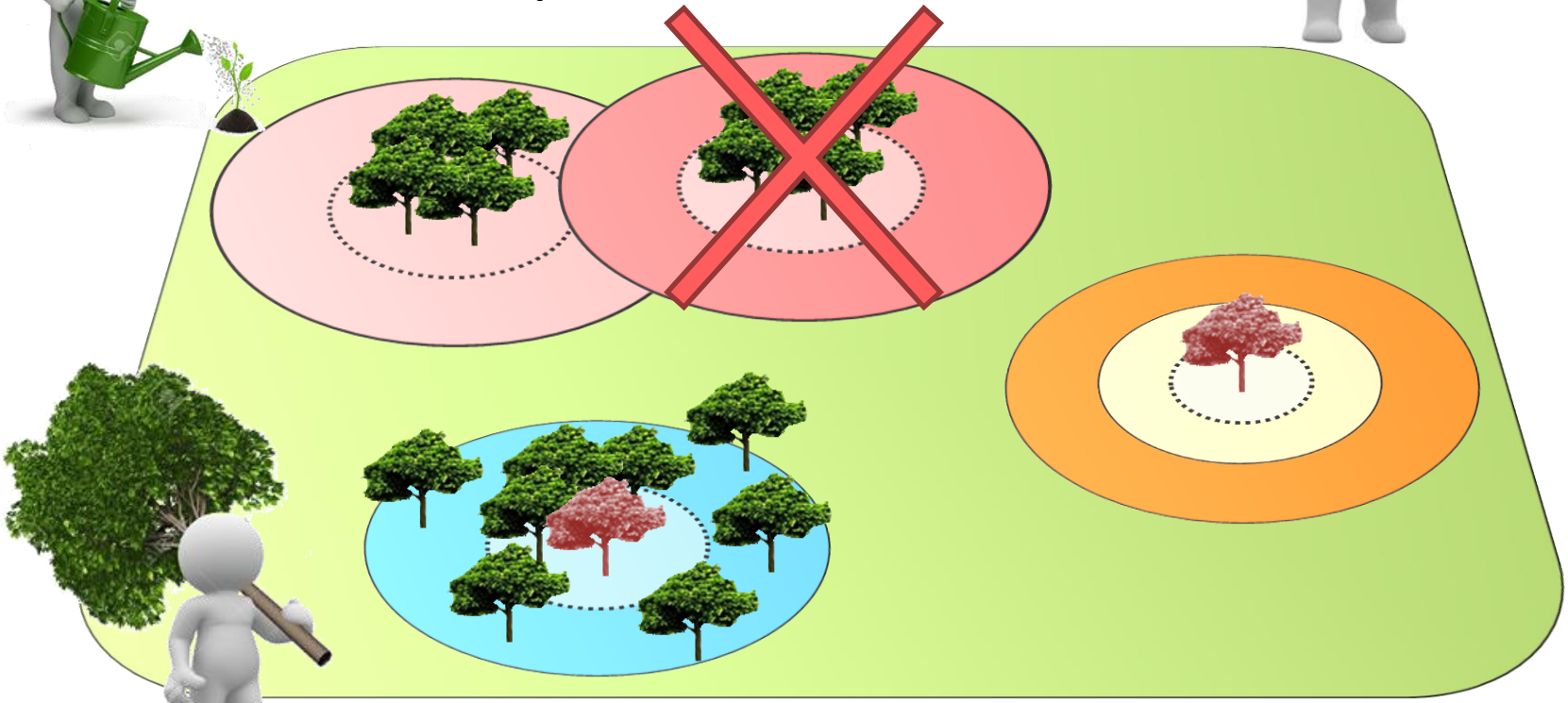
Sharka

- 10 milliards d'Euros de pertes économiques dans le monde en 30 ans *(Cambra et al., 2006)*
- 2008 : Stratégie de gestion française *(JORF, 2011)*

Gestion française

Contraintes de plantation

Surveillance



Arrachages

Gestion française

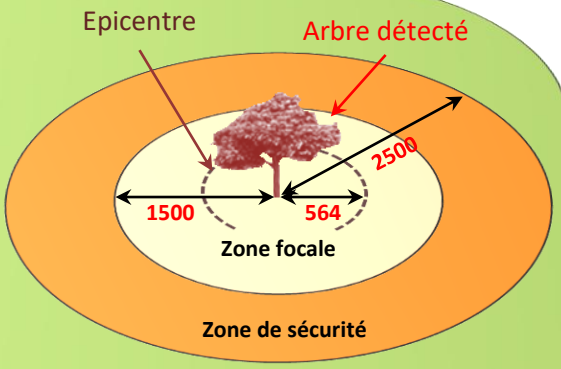
Surveillance

1 prospection/**6** ans

1 prospection/an

Taux de contamination de l'environnement :
> 1% et <2% : **3** prospections/an
≤ 1% : **2** prospections/an

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ 2% : **2** prospections/an
> 2% : **3** prospections/an

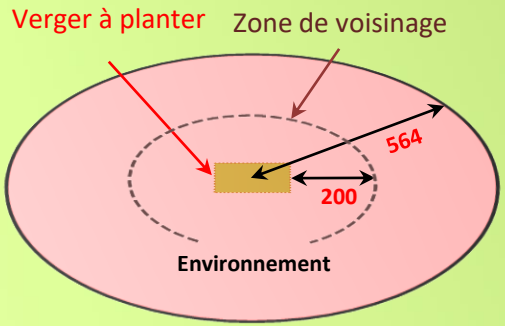


Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Interdictions de plantation

Plantation interdite si :

- Taux de contamination de l'environnement **≥ 2%**
- Au moins un verger avec un taux de contamination **> 5%** dans la zone de voisinage



Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Arrachages

Taux de contamination du verger :
≤ 10% : arrachage des arbres symptomatiques
> 10% : arrachage du verger

Verger infecté

Objectif :

Optimiser la gestion de la sharka

- ✓ Gestion plus simple
- ✓ Gestion moins couteuse

Comment ?

Utilisation d’un modèle de simulation

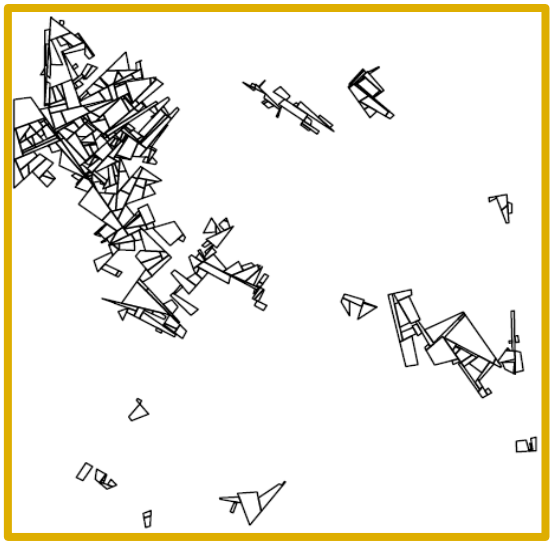
1

Simulation de paysages

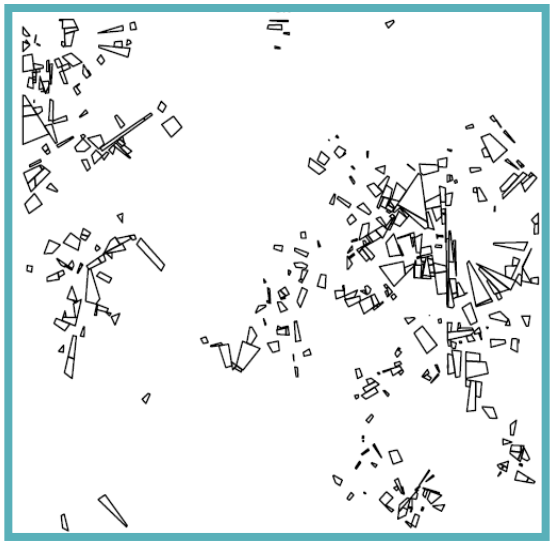
Simulation de paysages réalistes

Agrégation

Forte



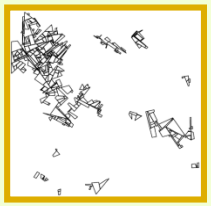
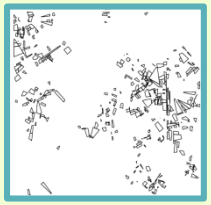
Moyenne



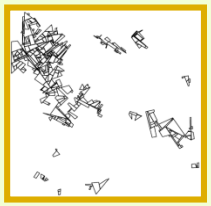
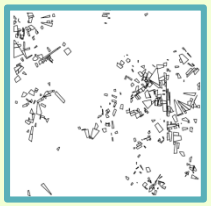
Faible

1

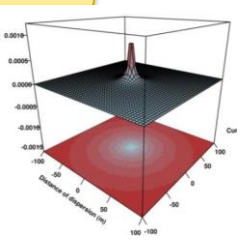
Simulation de paysages

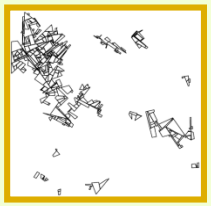
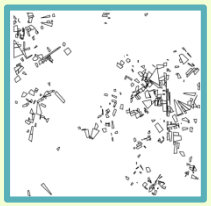
1 **Simulation de paysages**

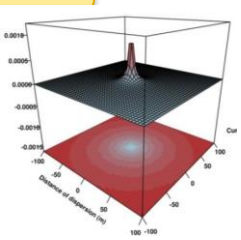
2 **Introduction et dispersion du pathogène**



1 **Simulation de paysages**

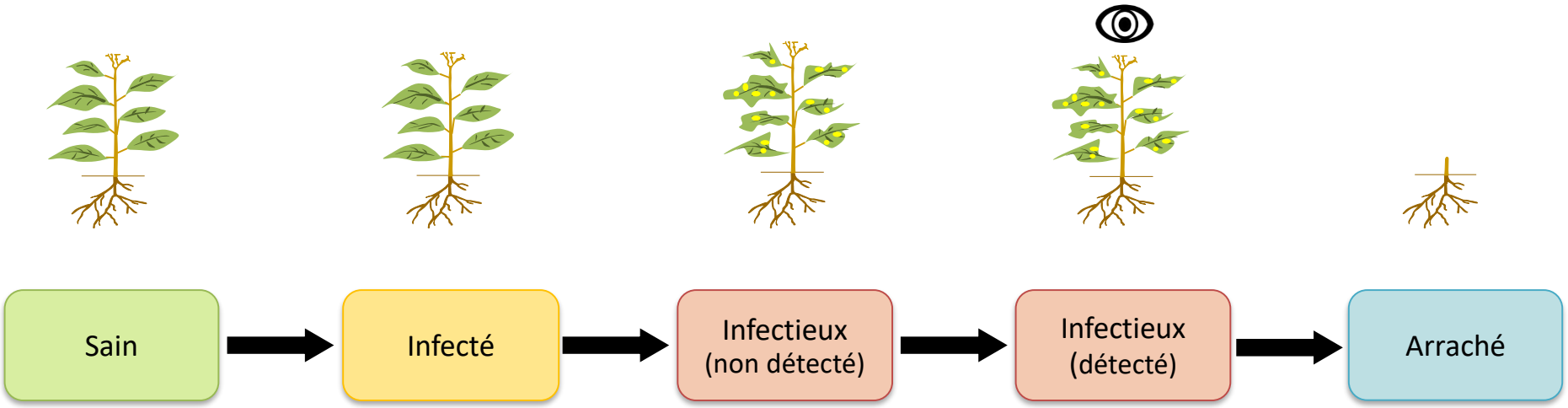



2 **Introduction et dispersion du pathogène**

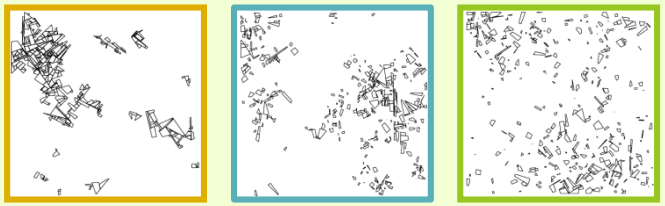


3 **Changement du statut des arbres**

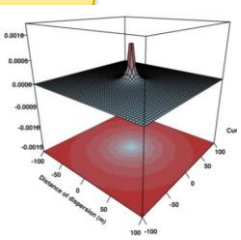
Changement du statut des arbres



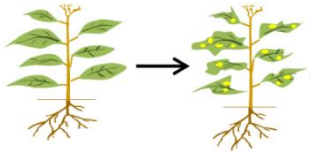
1 **Simulation de paysages**



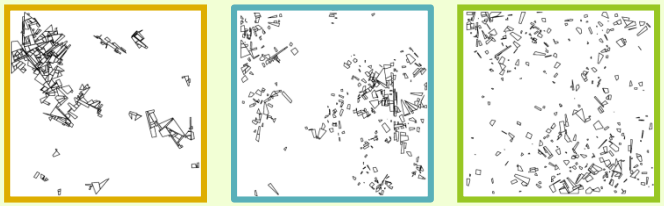
2 **Introduction et dispersion du pathogène**



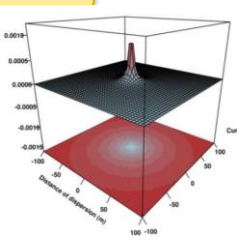
3 **Changement du statut des arbres**



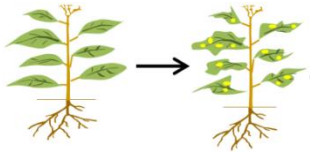
1 Simulation de paysages



2 Introduction et dispersion du pathogène



3 Changement du statut des arbres



4 Gestion du pathogène

Gestion française

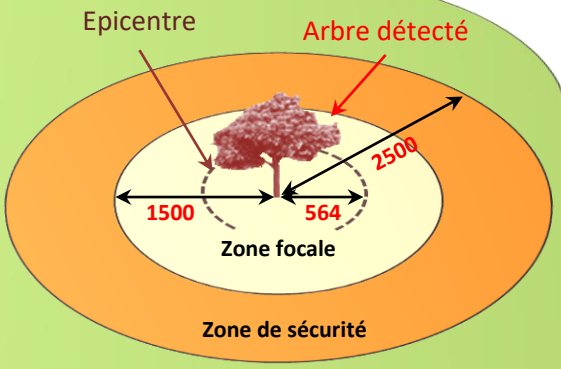
Surveillance

1 prospection/**6** ans

1 prospection/an

Taux de contamination de l'environnement :
> 1% et <2% : **3** prospections/an
≤ 1% : **2** prospections/an

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ 2% : **2** prospections/an
> 2% : **3** prospections/an

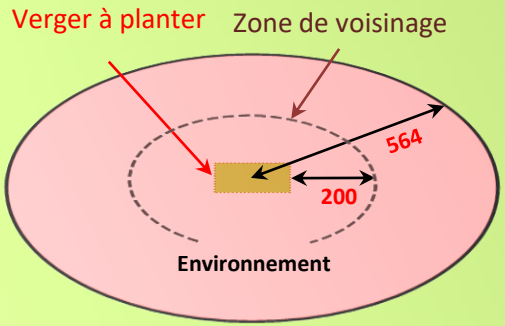


Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Interdictions de plantation

Plantation interdite si :

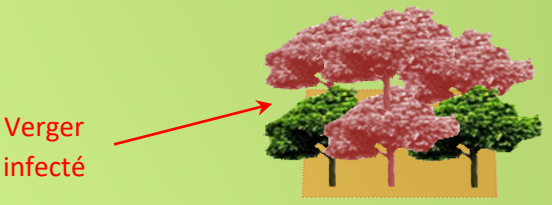
- Taux de contamination de l'environnement **≥ 2%**
- Au moins un verger avec un taux de contamination **> 5%** dans la zone de voisinage



Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Arrachages

Taux de contamination du verger :
≤ 10% : arrachage des arbres symptomatiques
> 10% : arrachage du verger



Gestion implémentée dans le modèle

Surveillance

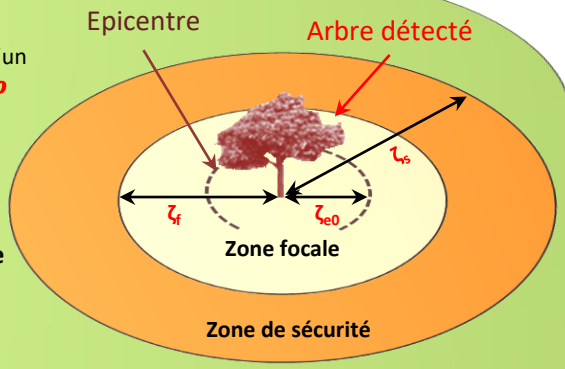
Probabilité de détection d'un arbre symptomatique : ρ

1 prospection/η_0 ans

η_s prospection/an

Taux de contamination de l'environnement :
> χ_{y^*} et < χ_y : η_{y^*} : prospections/an
≤ χ_{y^*} : η_y prospections/an

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ χ_0 : η_f prospections/an
> χ_0 : η_{f^*} prospections/an

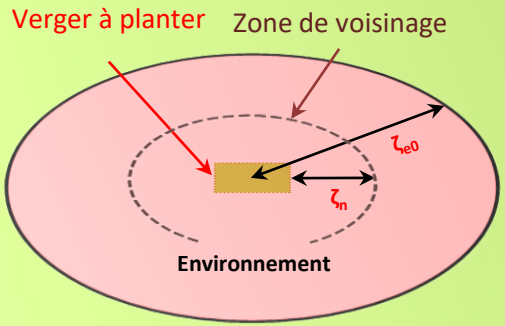


Zones de surveillance mises en place pour γ_o ans

Interdictions de plantation

Plantation interdite si :

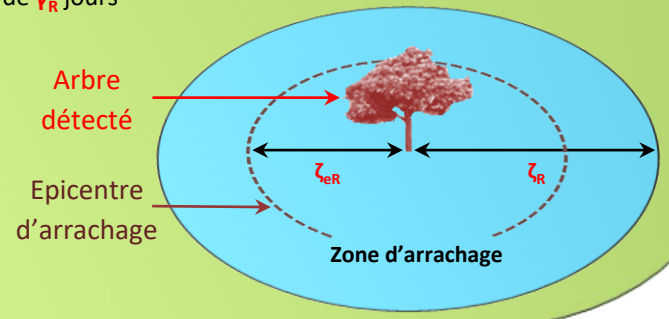
- Taux de contamination de l'environnement ≥ χ_y
- Au moins un verger avec un taux de contamination > χ_n dans la zone de voisinage
- Le verger précédent a été arraché à cause de la sharka les γ_S dernières années



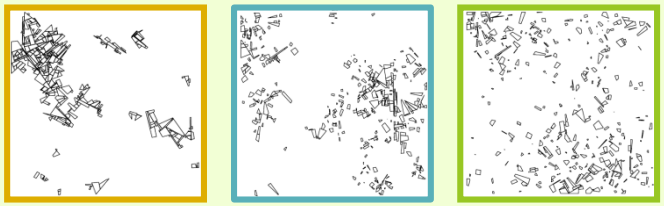
Zones de surveillance mises en place pour γ_y ans

Arrachages

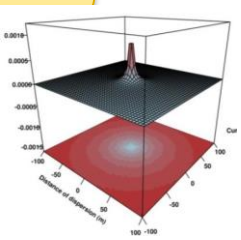
Taux de contamination de l'épicentre d'arrachage :
≤ χ_R : arrachage des arbres symptomatiques
> χ_R : arrachage de la zone d'arrachage après un délai de γ_R jours



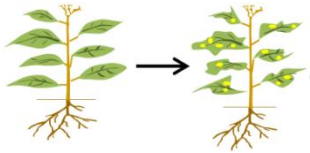
1 Simulation de paysages



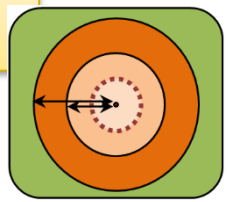
2 Introduction et dispersion du pathogène



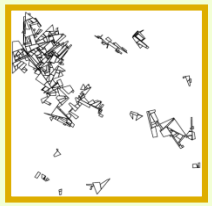
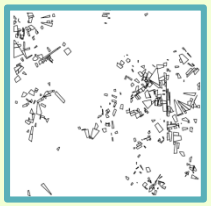
3 Changement du statut des arbres



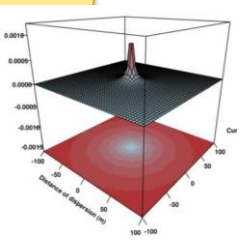
4 Gestion du pathogène



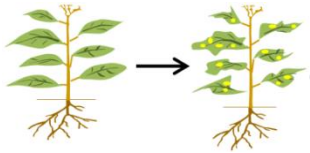
1 **Simulation de paysages**

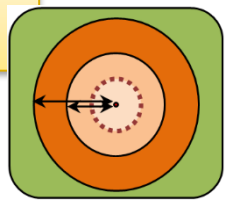
2 **Introduction et dispersion du pathogène**



3 **Changement du statut des arbres**



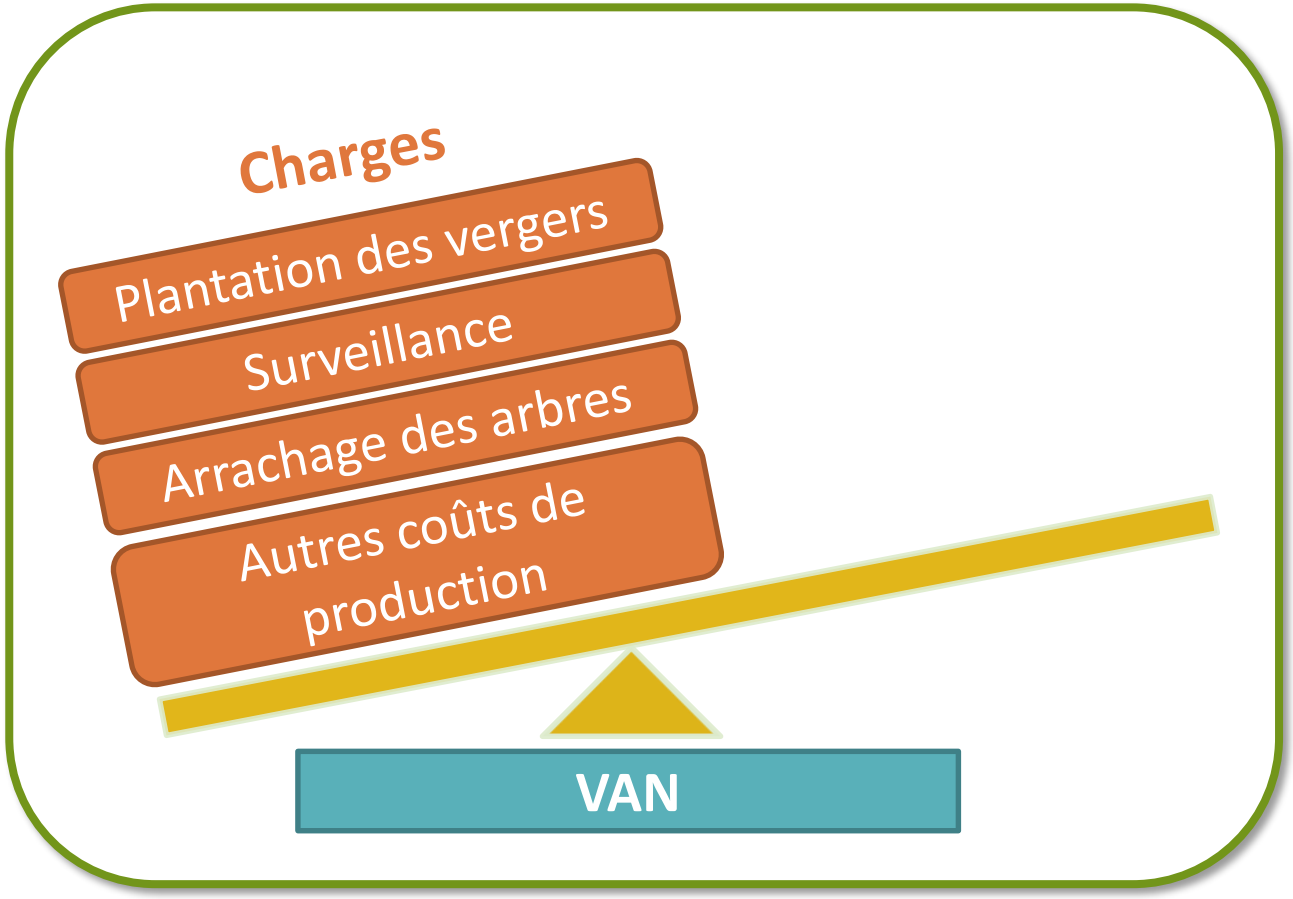
4 **Gestion du pathogène**



Sortie du modèle

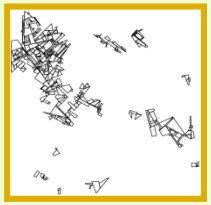
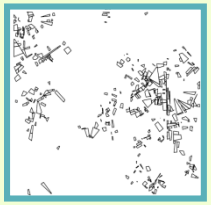
- Critère économique

Critère économique : Valeur actuelle nette (VAN)

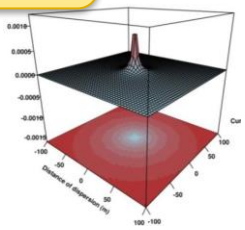


Calculé sur une période de 30 ans

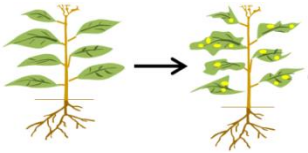
1 **Simulation de paysages**

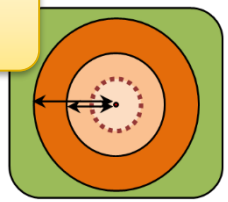
2 **Introduction et dispersion du pathogène**

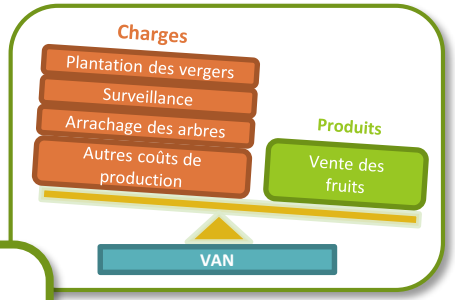


3 **Changement du statut des arbres**



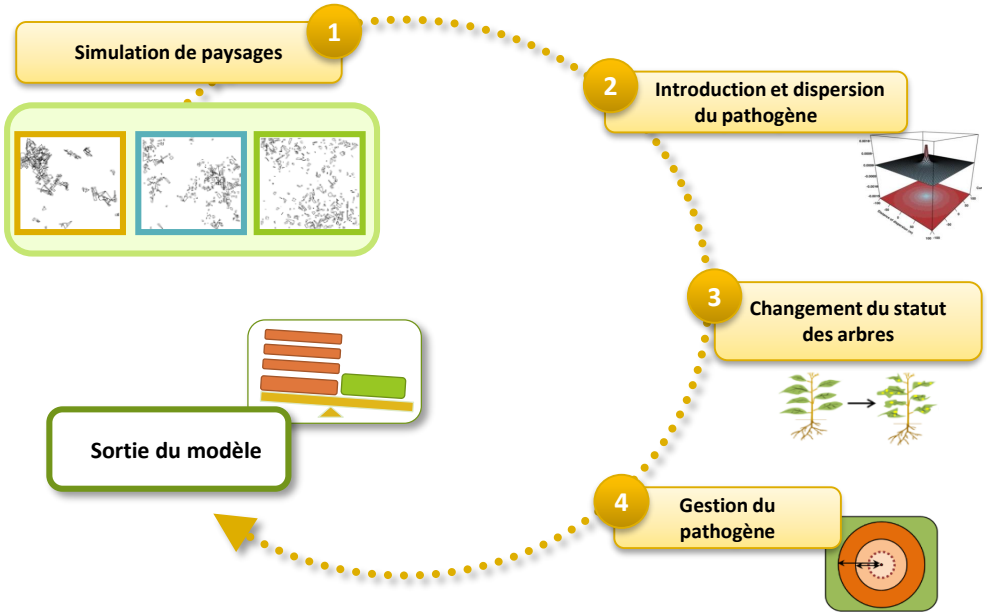
4 **Gestion du pathogène**





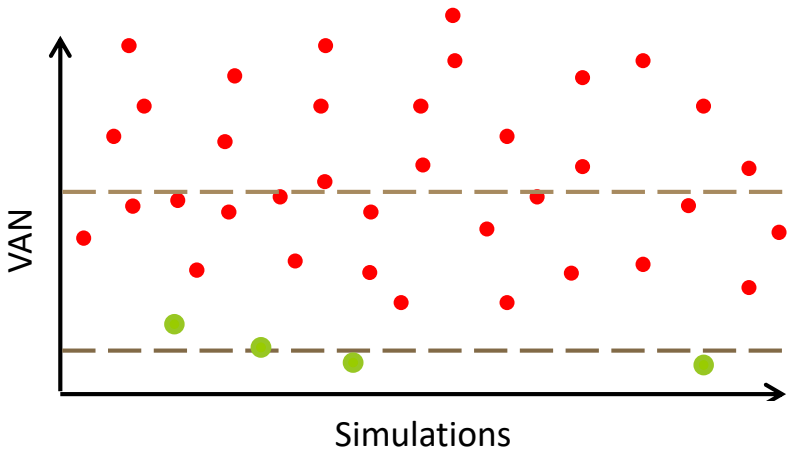
Sortie du modèle

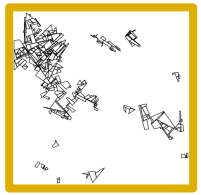
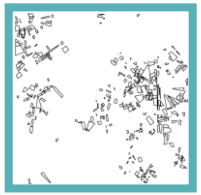
- Critère économique

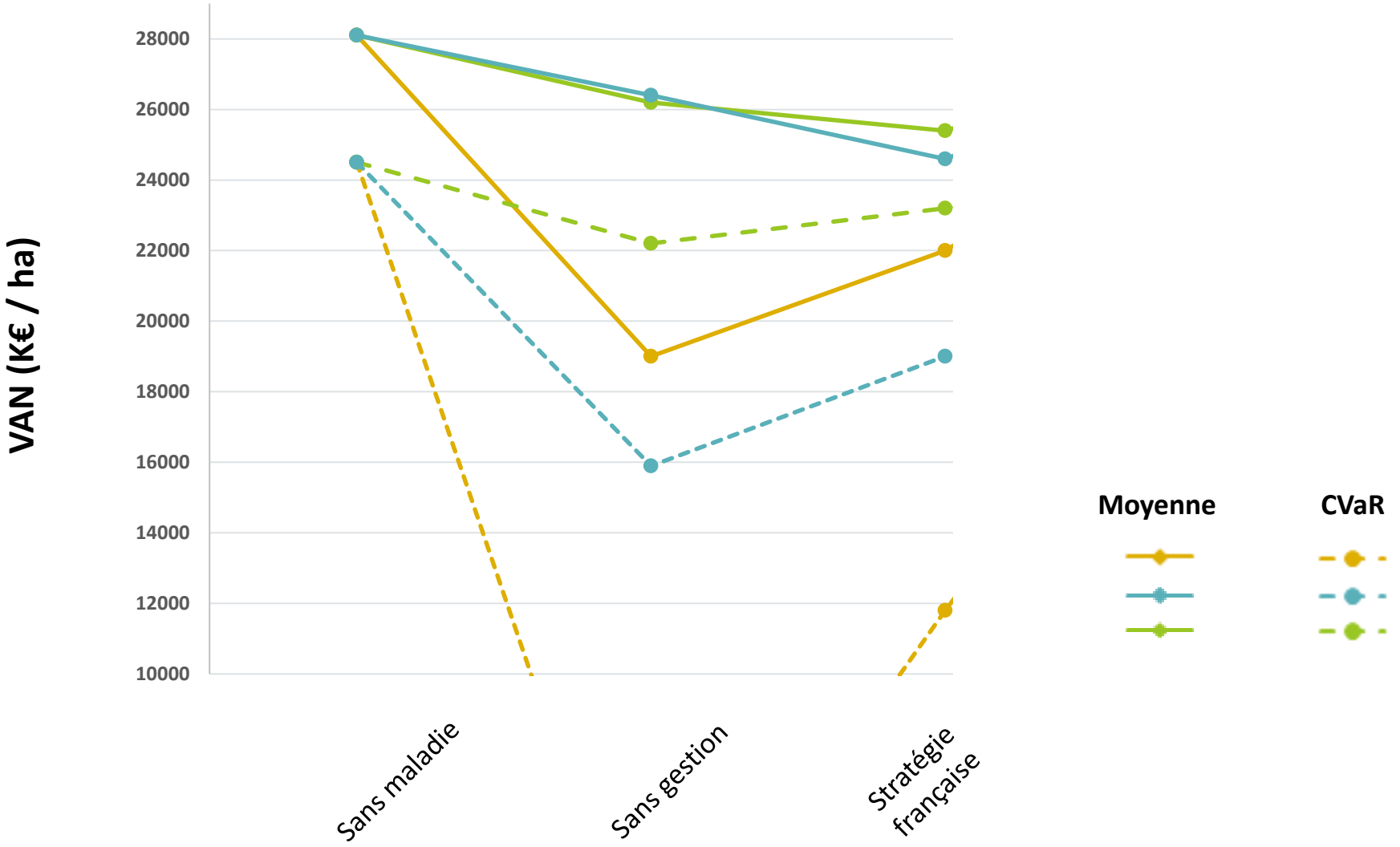


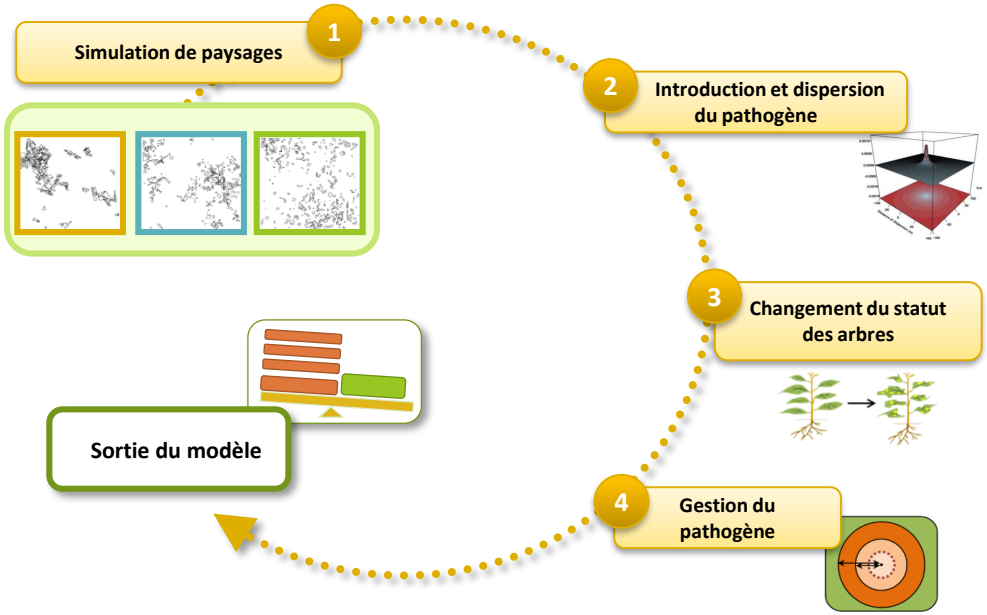
1. **Simulations sans gestion**
2. **Simulations avec la gestion française**

- **Moyenne**
- **CVaR : moyenne des 10% « pires » résultats**



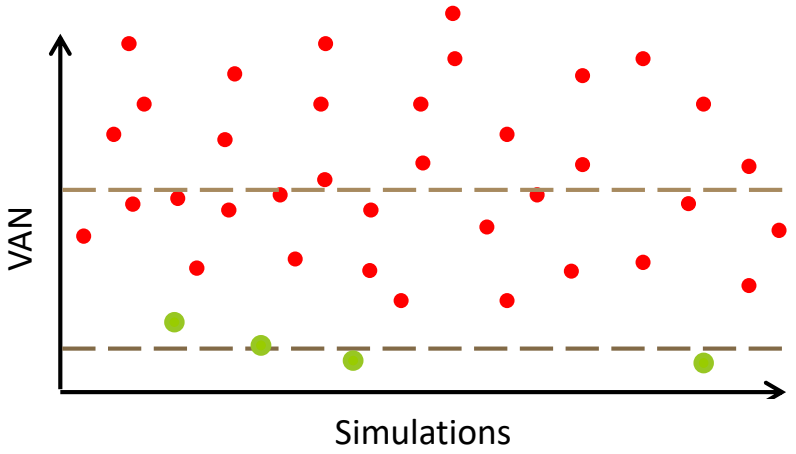



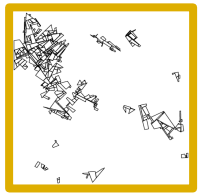
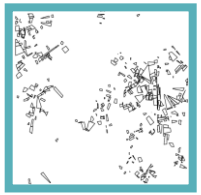

VAN (K€ / ha)
28000
26000
24000
22000
20000
18000
16000
14000
12000
10000
Sans maladie
Sans gestion
Stratégie française
Moyenne
CVaR

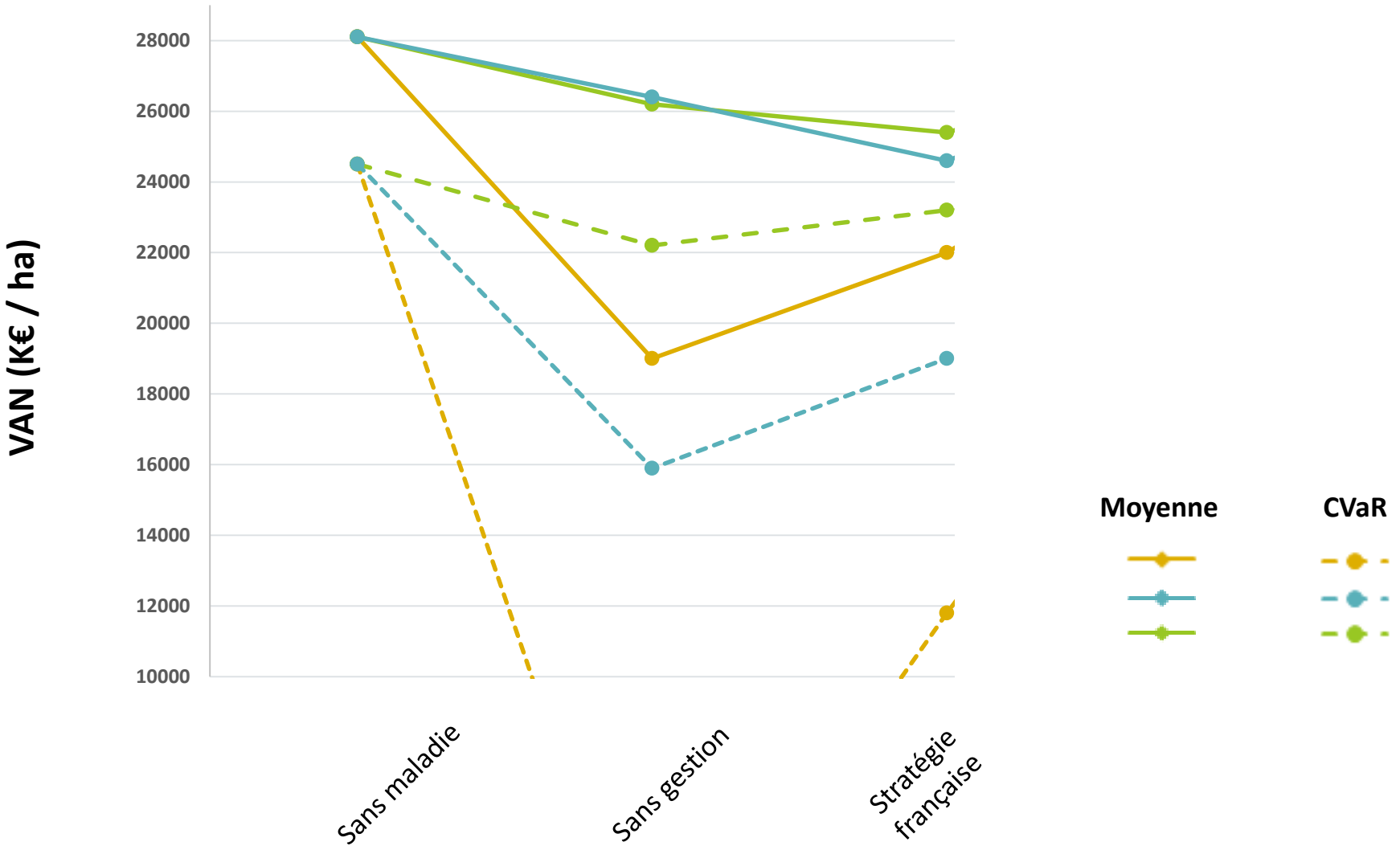


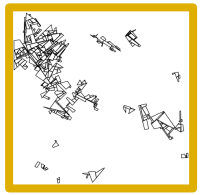
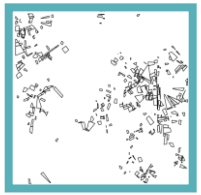
1. **Simulations sans gestion**
2. **Simulations avec la gestion française**
3. **Simulations pour optimiser ➔ algorithme d'optimisation**

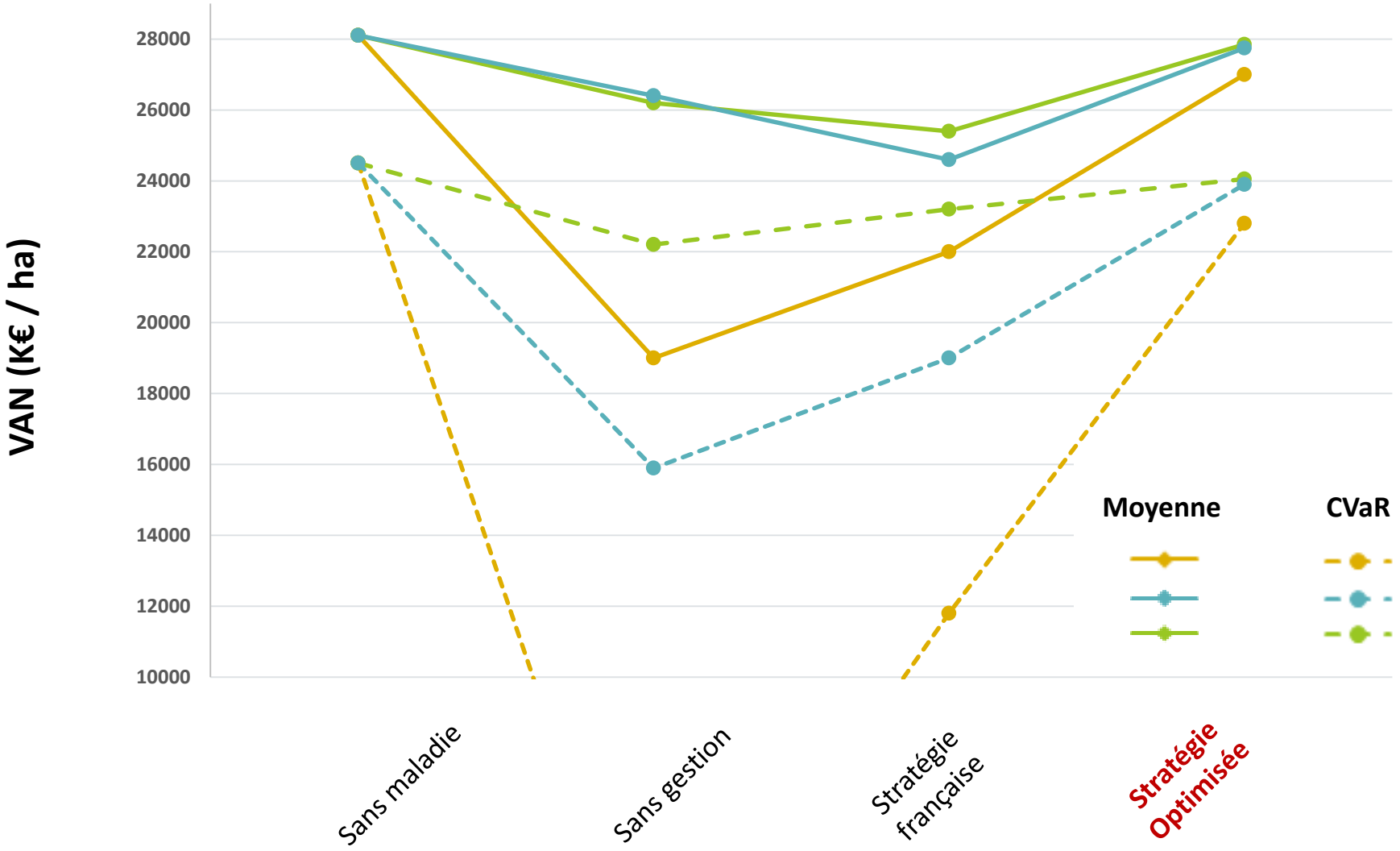
- **Moyenne**
- **CVaR : moyenne des 10% « pires » résultats**




VAN (K€ / ha)
28000
26000
24000
22000
20000
18000
16000
14000
12000
10000
Sans maladie
Sans gestion
Stratégie française
Moyenne
CVaR


VAN (K€ / ha)
28000
26000
24000
22000
20000
18000
16000
14000
12000
10000
Moyenne
CVaR
Sans maladie
Sans gestion
Stratégie française
Stratégie Optimisée

Gestion française

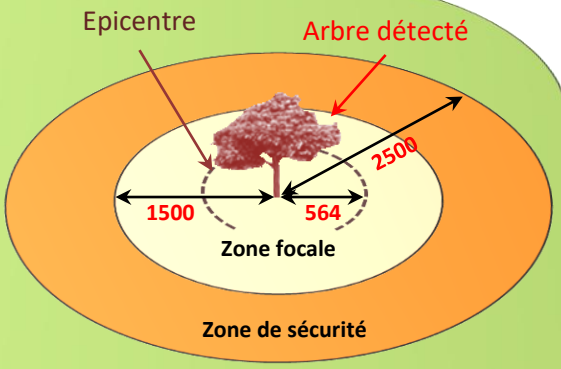
Surveillance

1 prospection/**6** ans

1 prospection/an

Taux de contamination de l'environnement :
> 1% et <2% : **3** prospections/an
≤ 1% : **2** prospections/an

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ 2% : **2** prospections/an
> 2% : **3** prospections/an

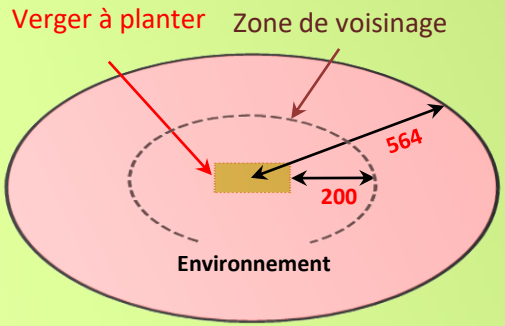


Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Interdictions de plantation

Plantation interdite si :

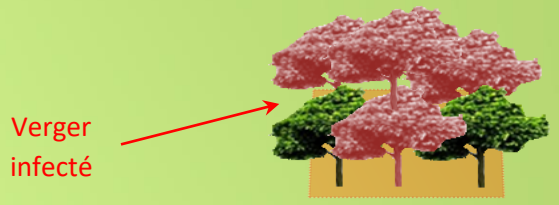
- Taux de contamination de l'environnement **≥ 2%**
- Au moins un verger avec un taux de contamination **> 5%** dans la zone de voisinage



Zones de surveillance mises en place pour 3 ans

Arrachages

Taux de contamination du verger :
≤ 10% : arrachage des arbres symptomatiques
> 10% : arrachage du verger

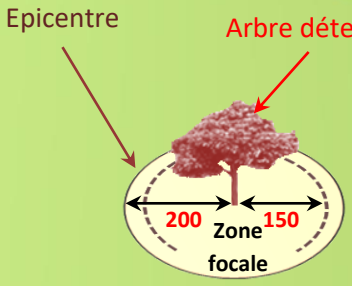


Gestion optimisée

Surveillance

1 prospection/**8** ans

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ 1% : **1** prospection/an
> 1% : **5** prospections/an



Zones de surveillance mises en place pour 4 ans

Interdictions de plantation

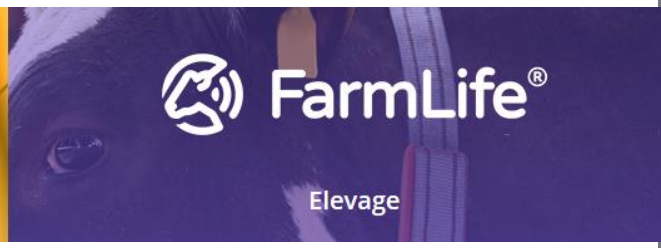
Arrachages

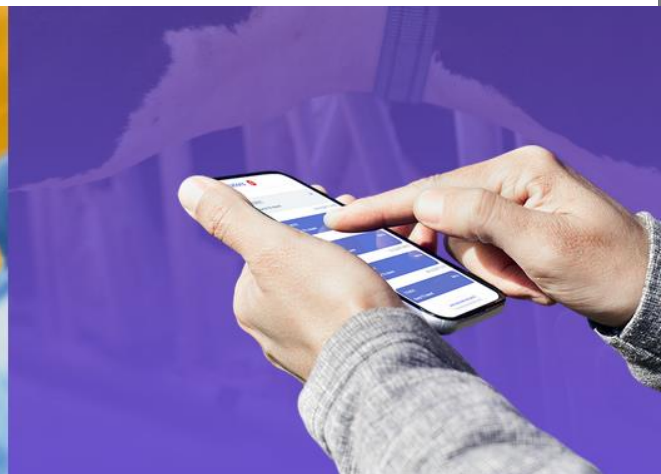
Arrachage des arbres infectés

- ✓ Gestion plus simple
- ✓ Gestion moins couteuse
- ✓ Adaptée à tous les paysages

Outils d'Aide à la Décision (OAD) pour l'agriculture :

- Optimisation du rendement et de la qualité des cultures
- Meilleure gestion des intrants (irrigation, engrais, produits phytosanitaires).





Remerciements

UMR BGPI (INRA Montpellier)

- Loup Rimbaud
- François Bonnot
- Sylvie Dallot
- Sébastien Ravel

Unité BioSP (INRA Avignon)

- Julien Papaïx
- Claude Bruchou
- Jean-François Rey

Unité MIAT (INRA Toulouse)

- Victor Picheny

Financeurs

- INRA
- ANSES

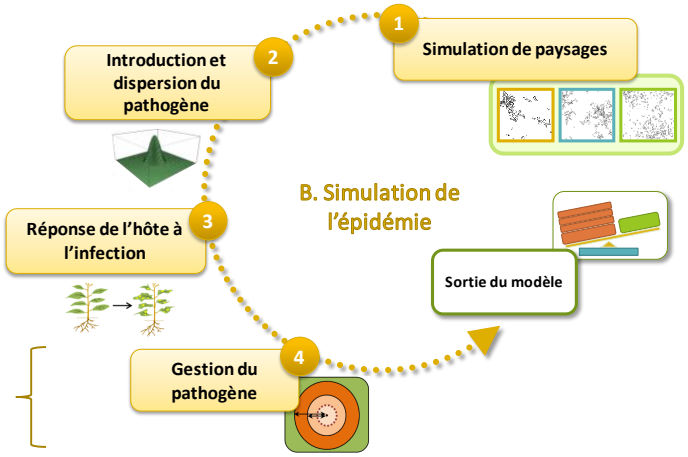
Mes encadrants

- **Gaël Thébaud**
- **Emmanuel Jacquot**
- **Samuel Soubeyrand**
- **Pascal Hendrikx**

BONUS

6 paramètres épidémiologiques

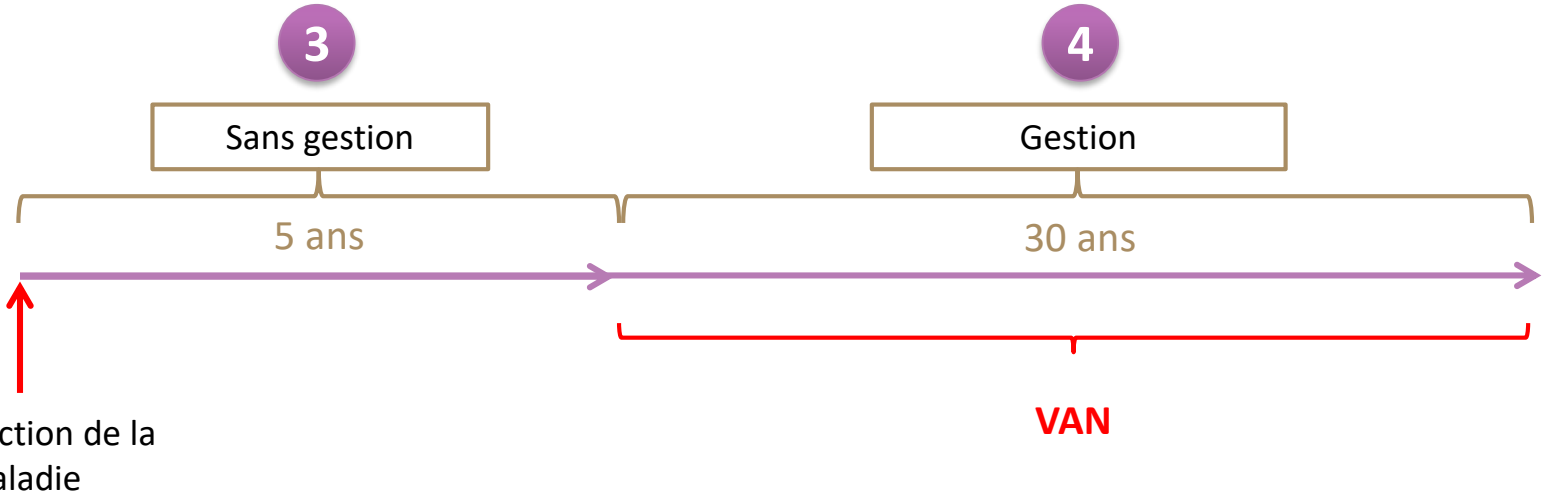
21 paramètres de gestion



Simulation d'une épidémie

1 **Sélection du paysage**

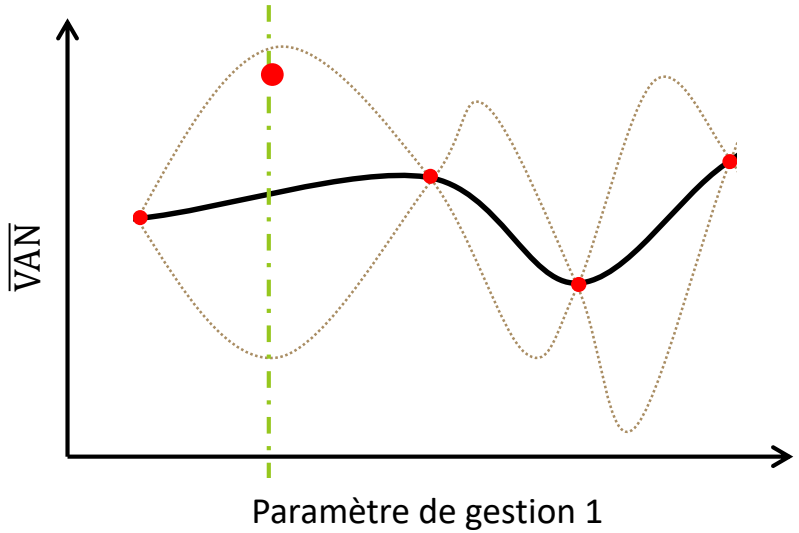
2 **Définition des paramètres épidémiologiques**

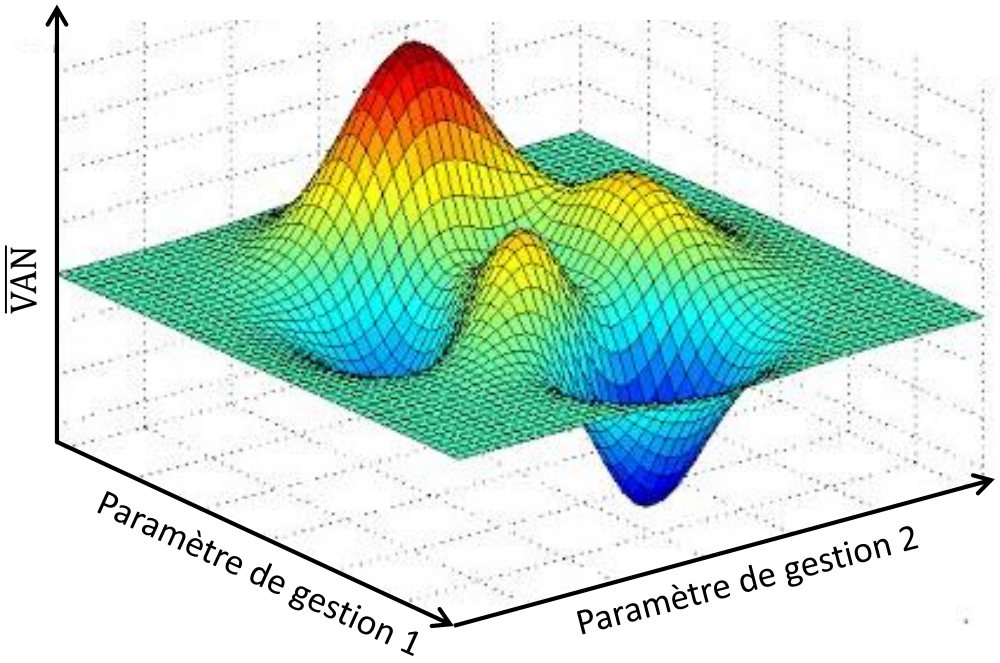


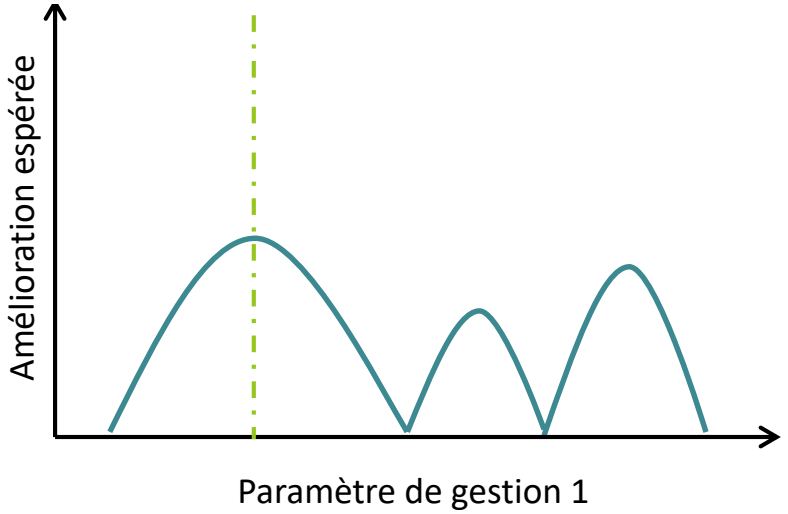
1. **Plan d'échantillonnage**

2. **Métamodèle de krigeage (ex. avec 1 paramètre)**

3. **Amélioration espérée**

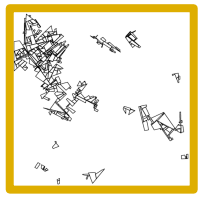






Picheny et al. (2014)

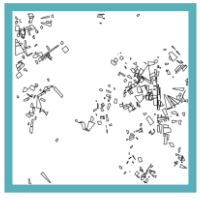
1. **Plan d'échantillonnage**
2. **Métamodèle de krigeage (ex. avec 1 paramètre)**
3. **Amélioration espérée**



Strat. $\overline{\mathbf{VAN}}$

Strat. $\mathbf{VAN}_{\overline{10\%}}$

$\overline{\mathbf{VAN}}$



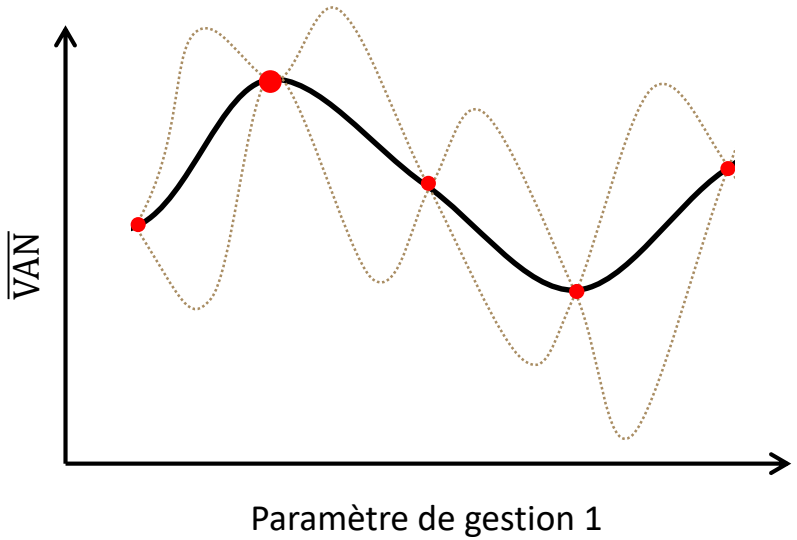
Strat. $\overline{\mathbf{VAN}}$

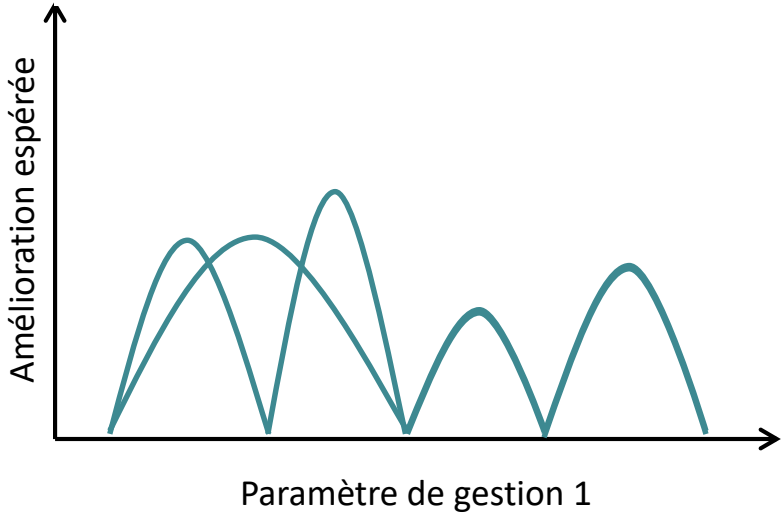
Strat. $\mathbf{VAN}_{\overline{10\%}}$

$\mathbf{VAN}_{\overline{10\%}}$

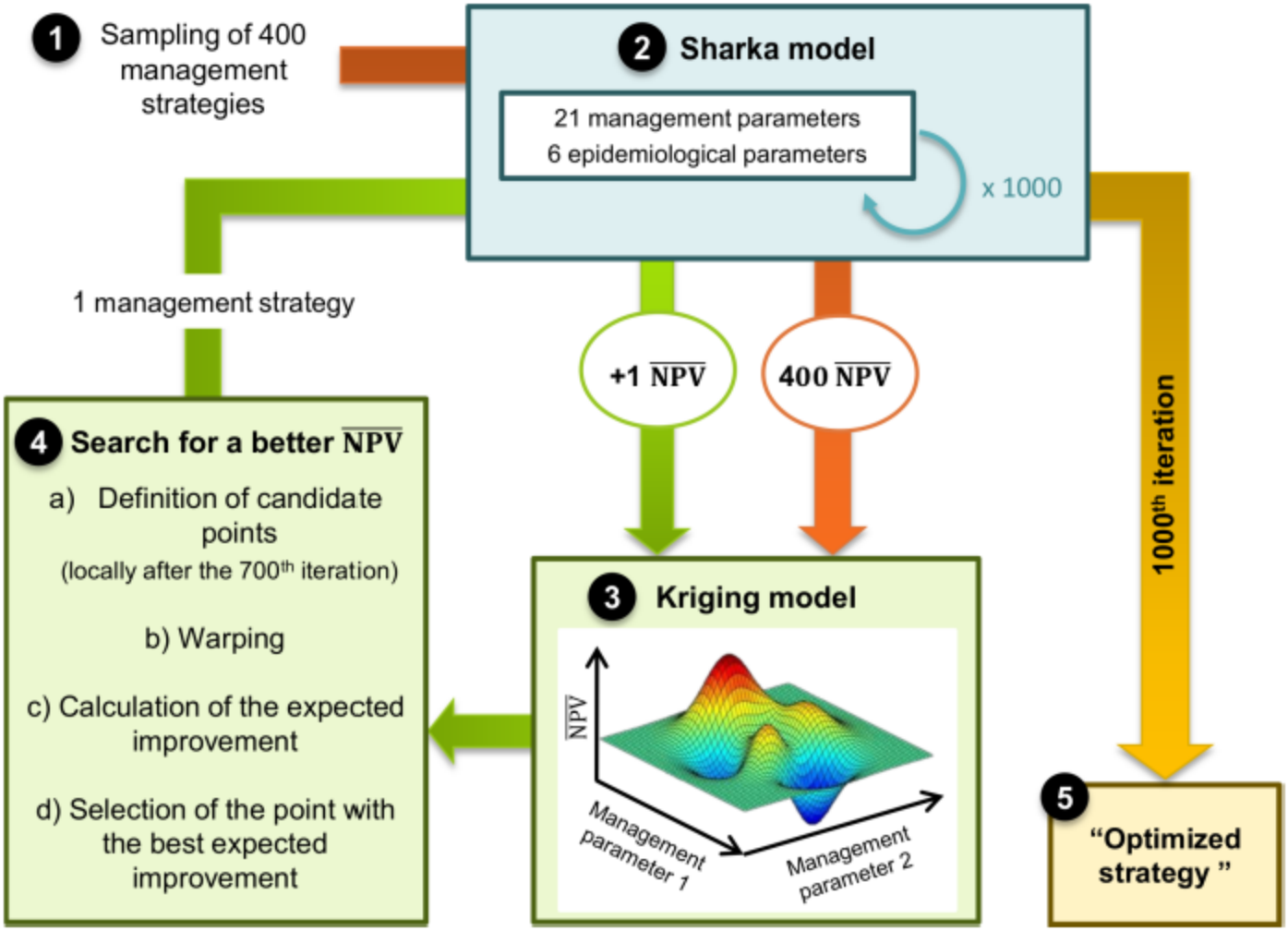
Strat. $\overline{\mathbf{VAN}}$

Strat. $\mathbf{VAN}_{\overline{10\%}}$





Picheny et al. (2014)


1 Sampling of 400 management strategies
2 Sharka model
21 management parameters
6 epidemiological parameters
x 1000
1 management strategy
+1 $\overline{NPV}$
400 $\overline{NPV}$
1000th iteration
4 Search for a better $\overline{NPV}$
a) Definition of candidate points
(locally after the 700th iteration)
b) Warping
c) Calculation of the expected improvement
d) Selection of the point with the best expected improvement
3 Kriging model
$\overline{NPV}$
Management parameter 1
Management parameter 2
5 "Optimized strategy "

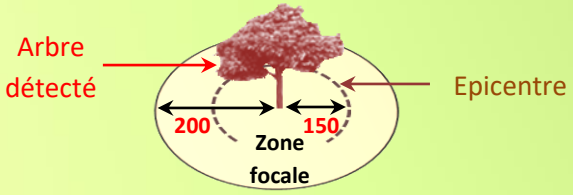
Stratégies de gestion optimisées

Surveillance

Epidémies émergentes

Probabilité de détection d'un arbre symptomatique : **0,66**

- 1 prospection / **8** ans
- **Taux de contamination de l'épicentre :**
  < 1% : 1 prospection / an
  > 1% : 5 prospections / an

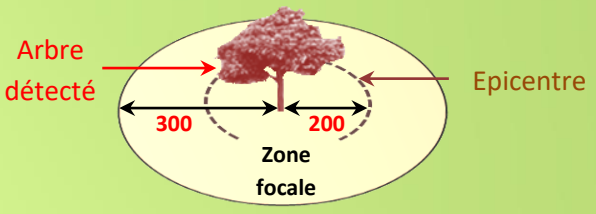


Zones de surveillance mises en place pour 4 ans

Epidémies installées

Probabilité de détection d'un arbre symptomatique : **0,66**

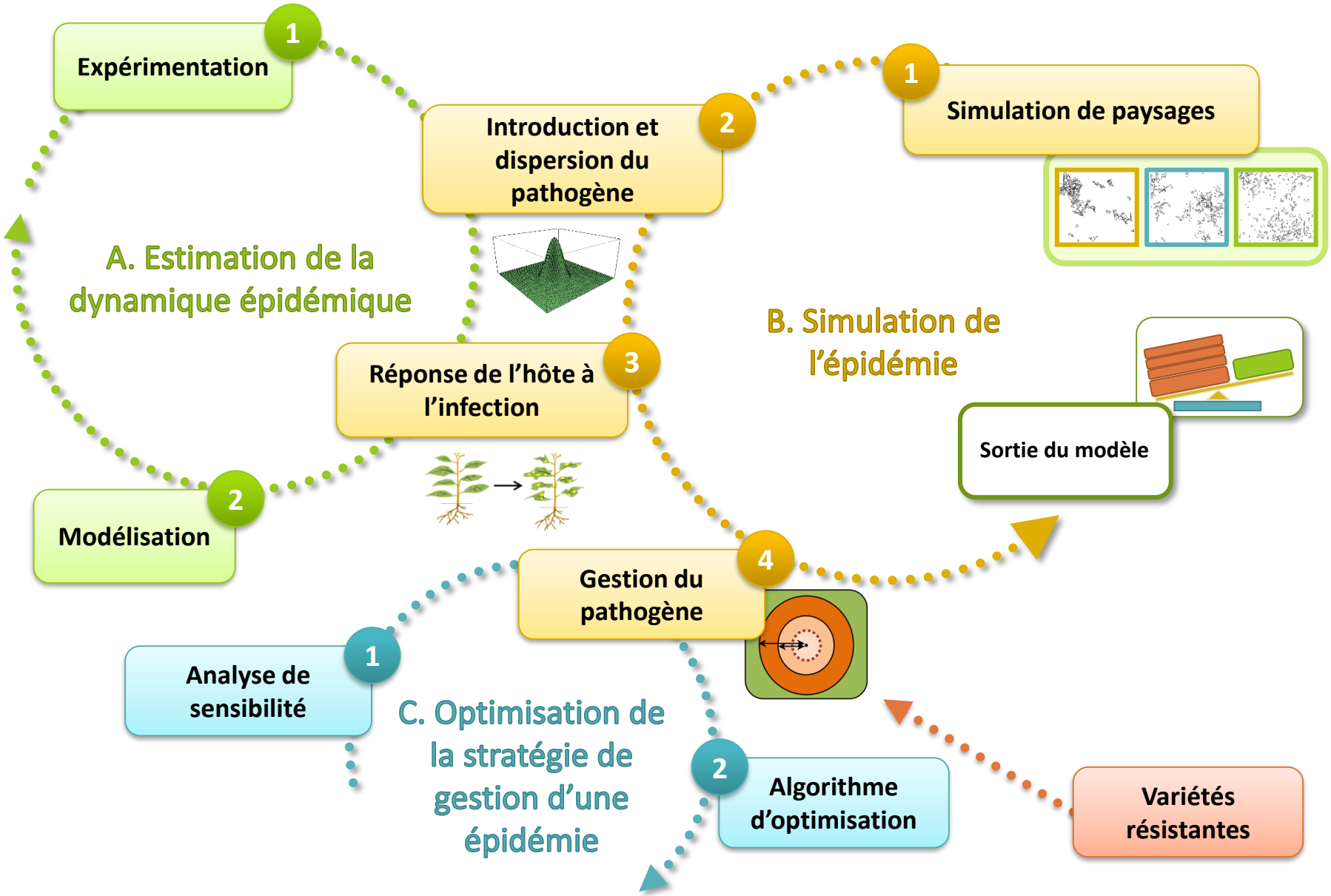
- 1 prospection / an
- **Taux de contamination de l'épicentre :**
  < 1% : 1 prospection / an
  > 1% : 3 prospections / an



Zones de surveillance mises en place pour 6 ans

Arrachages

Arrachage des arbres symptomatiques

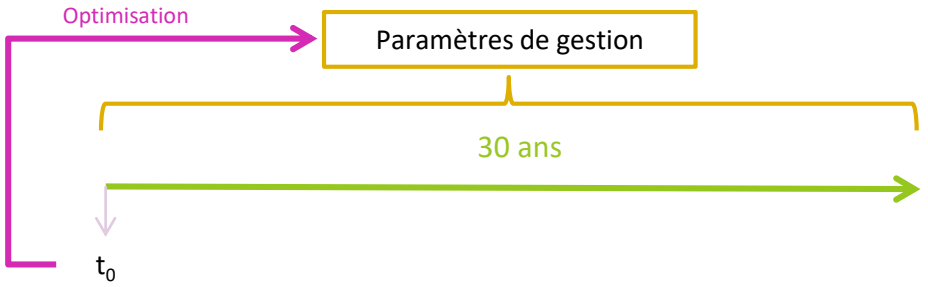


Picard et al. (2017) EPPO Bull.

- **Objectif** : développer une approche de surveillance variable qui permettrait de modifier les paramètres de gestion au cours du temps

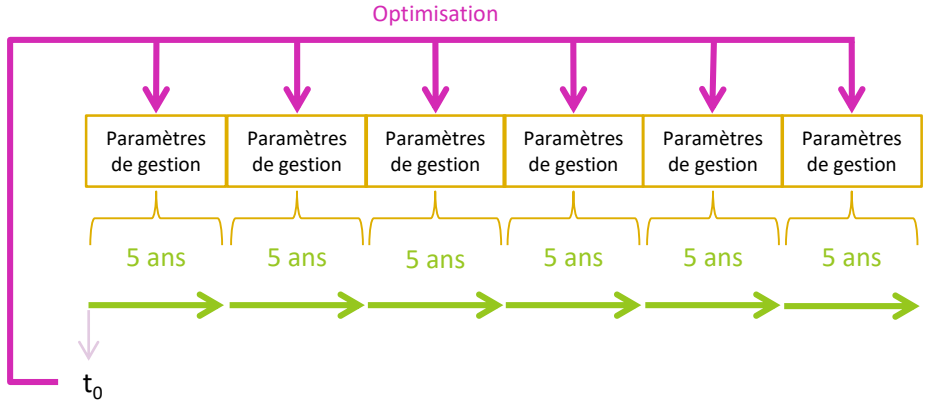
A

Les paramètres optimaux n'ont qu'une seule valeur au cours du temps



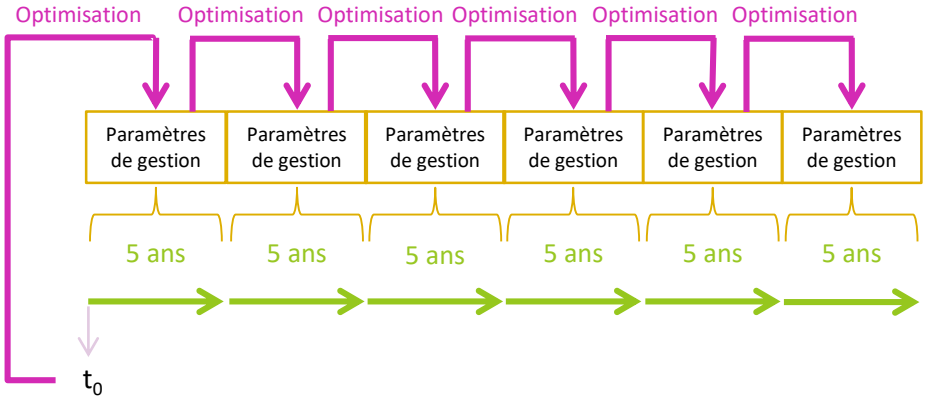
B

Les paramètres optimaux varient tous les 5 ans mais sont optimisés à t_0



C

Les paramètres optimaux sont optimisés tous les 5 ans en fonction des informations acquises lors de chaque campagne de surveillance



Publications

Publiées

Picard C.*, Dallot S.*, Brunker K., Berthier K., Roumagnac P., Soubeyrand S., Jacquot E. and Thébaud G. (2017) Exploiting genetic information to trace plant virus dispersal in landscapes. *Annual Review of Phytopathology* 55:139-160.

Picard C., Rimbaud L., Hendrikx P., Soubeyrand S., Jacquot E. and Thébaud G. (2017) PESO: a modelling framework to help improve management strategies for epidemics – application to sharka. *EPPO Bulletin*. 47(2), 231-236.

Acceptées

Picard C., Soubeyrand S., Jacquot E. and Thébaud G. Analyzing the influence of landscape aggregation on disease spread to improve management strategies. (En révision, *Phytopathology*).

En préparation

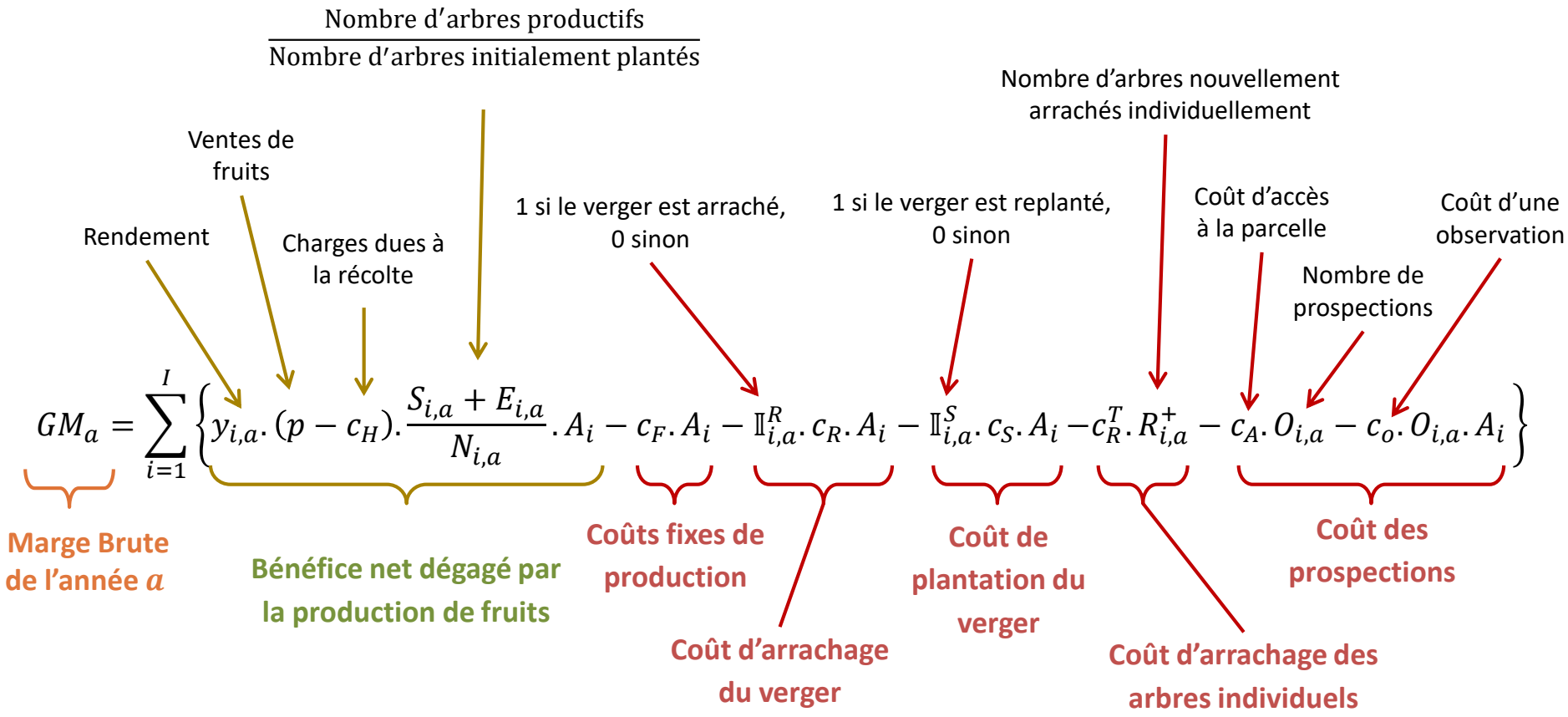
Picheny V., Picard C. and Thébaud G. Impact of input warping on the Bayesian optimisation of the management of a plant disease using a complex epidemiological model.

Picard C., Picheny V., Bonnot F., Soubeyrand S. and Thébaud G. In silico optimization of a strategy for landscape-wide plant disease management.

Picard C., Picheny V., Soubeyrand S. and Thébaud G. Optimization of the spatio-temporal deployment of resistant cultivars and disease control options.

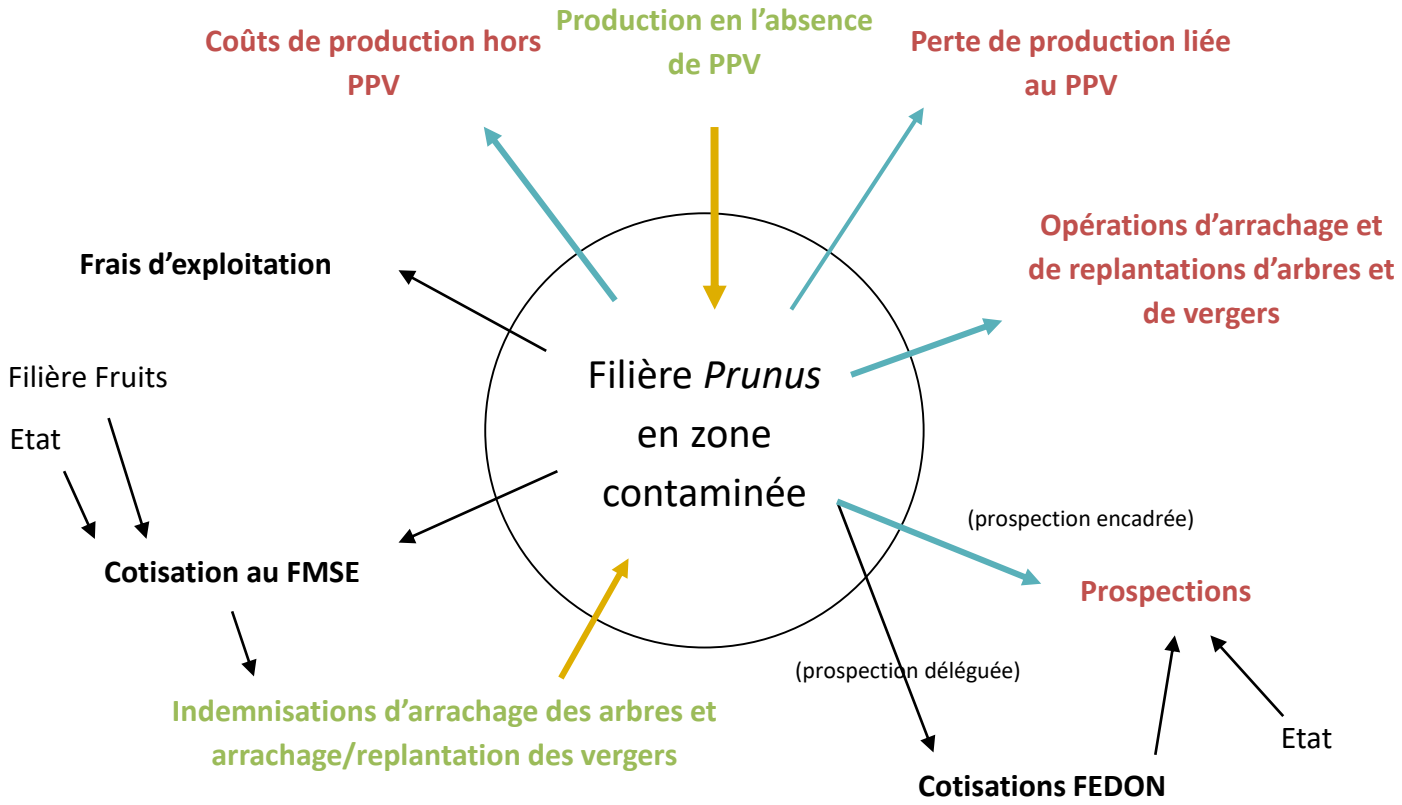
Picard C., Dallot S., Jacquot E., Thébaud G. and Soubeyrand S. Accounting for uninfected hosts in transmission tree reconstruction.

Critère économique



Avec un taux d'actualisation τ_A = 4%, **la valeur actuelle nette (*VAN*)** pendant toute la période de gestion de la maladie (entre a_m et a_f) est :

$$VAN = \sum_{a=a_m}^{a_f} \frac{GM_a}{(1+\tau_A)^{(a-a_m)}}$$



Bilan des charges (fixes en noir, proportionnelles en rouge) et des produits (en vert) associés à la filière *Prunus* en zone contaminée. FMSE : Fonds national agricole de Mutualisation Sanitaire et Environnementale.

Stratégie implémentée dans le modèle

Surveillance

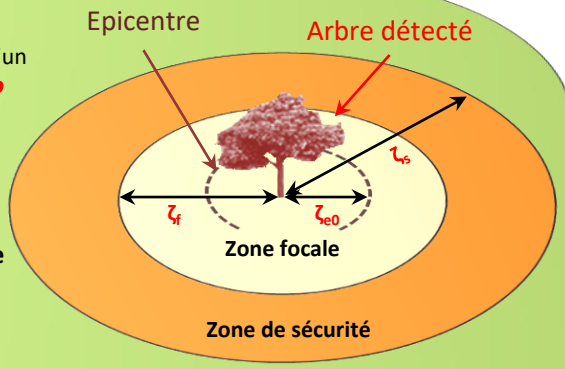
Probabilité de détection d'un arbre symptomatique: ρ

1 prospection/η_0 ans

η_s prospection/an

Taux de contamination de l'environnement :
> χ_{y^*} et < χ_y: η_{y^*} : prospections/an
≤ χ_{y^*}: η_y prospections/an

Taux de contamination de l'épicentre :
≤ χ_0: η_f prospections/an
> χ_0: η_{f^*} prospections/an

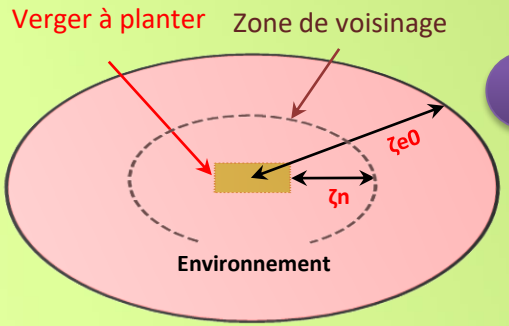


Zones de surveillance mises en place pour γ_o ans

Interdictions de plantation

Plantations interdites si :

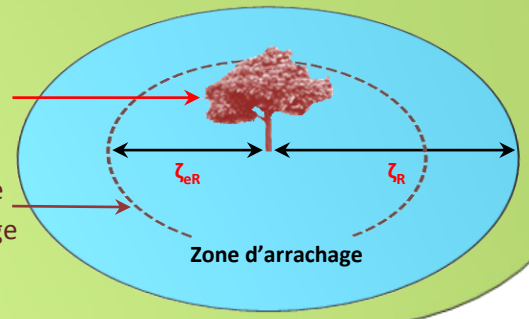
- Taux de contamination de l'environnement ≥ χ_y
- Au moins un verger avec un taux de contamination > χ_n dans la zone de voisinage
- Le verger précédent a été arraché à cause de la sharka les γ_S dernières années

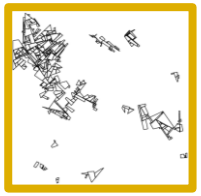


Zones de surveillance mises en place pour γ_y ans

Arrachages

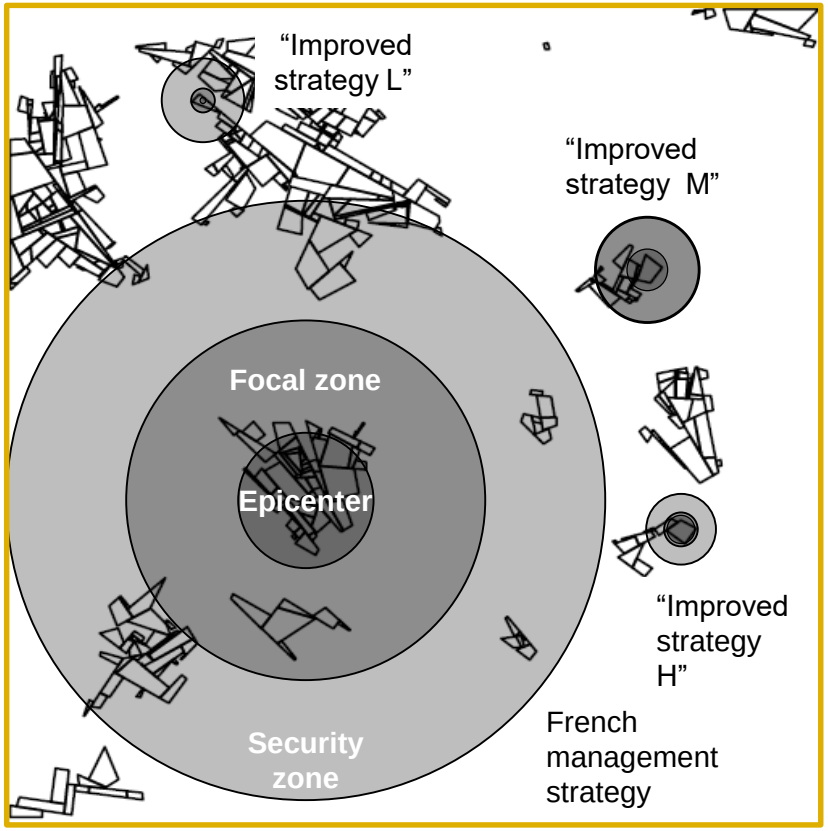
Taux de contamination de l'épicentre d'arrachage :
≤ χ_R : arrachages des arbres symptomatiques
> χ_R : arrachage de la zone d'arrachage après un délai de γ_R jours

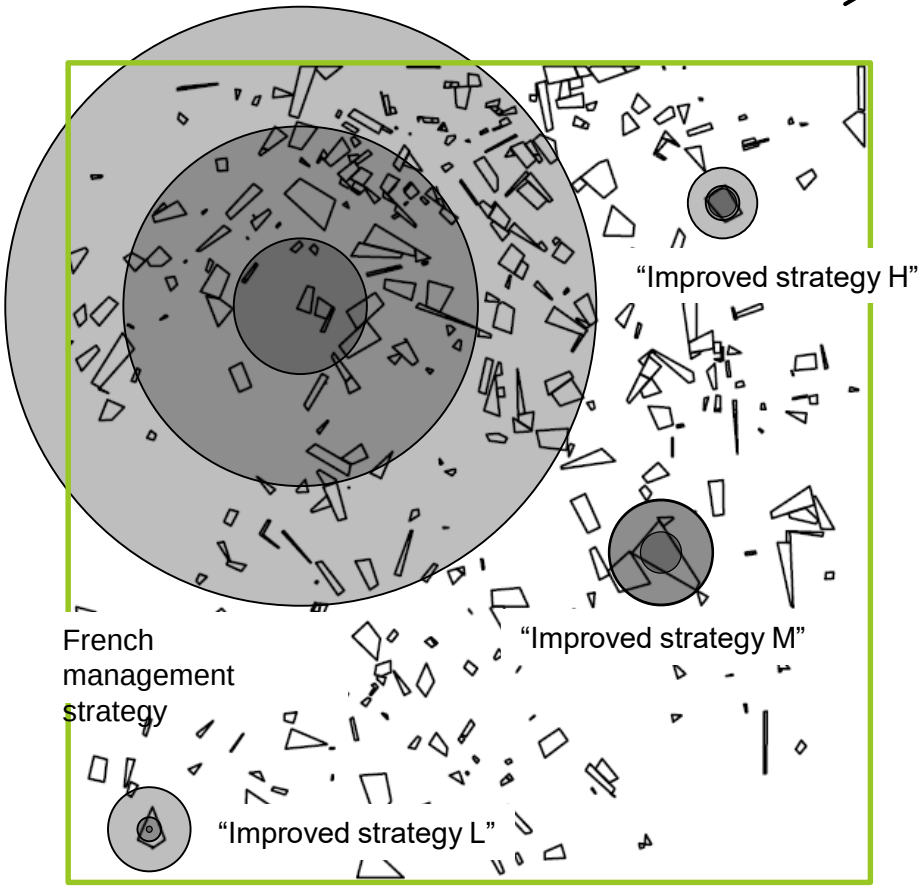




Landscape H

6.8 km



Landscape L

6.8 km