

École doctorale : STIC - Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication

THÈSE DE DOCTORAT

Samuel Nilusmas

10 décembre 2020

Gestion durable des nématodes à galles en culture maraîchère par la modélisation et l'optimisation du déploiement de variétés résistantes

dirigée par S. Touzeau, C. Djian Caporalino, V. Calcagno, L. Mailleret

Jury :

M. Ivan Sache,	Professeur, AgroParisTech	Rapporteur
M. Gaël Thébaud,	Chargé de Recherche, INRAE	Rapporteur
M. Pierre Abad ,	Directeur de recherche, INRAE	Examinateur
Mme Florence Carpentier,	Maître de conférence, AgroParisTech	Examinateuse
Mme Suzanne Touzeau,	Chargée de recherche, INRAE	Co-Directrice
M. Ludovic Mailleret,	Directeur de recherche, INRAE	Co-Encadrant

La sécurité alimentaire

- ▶ Plan de développement durable de l'ONU et ses objectifs principaux :



<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

- Éliminer la faim dans le monde (Faim zéro)
- Nourrir une population croissante
- Préserver l'environnement



La sécurité alimentaire

- ▶ Plan de développement durable de l'ONU et ses objectifs principaux :



<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

- Éliminer la faim dans le monde (Faim zéro)
 - Nourrir une population croissante
 - Préserver l'environnement
-
- ▶ Pour assurer la demande alimentaire plusieurs solutions :
 - Limiter le gaspillage alimentaire
 - Limiter les pertes de rendements



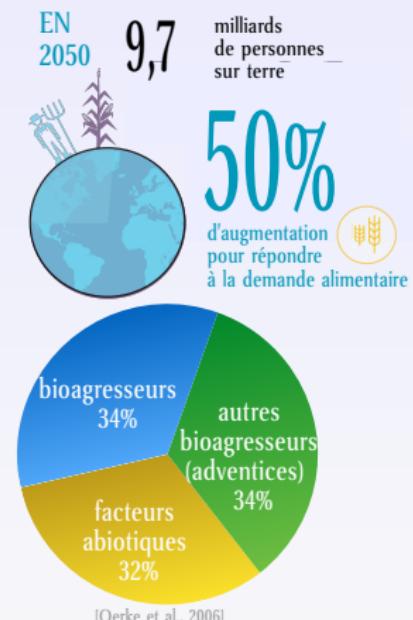
La sécurité alimentaire

- ▶ Plan de développement durable de l'ONU et ses objectifs principaux :



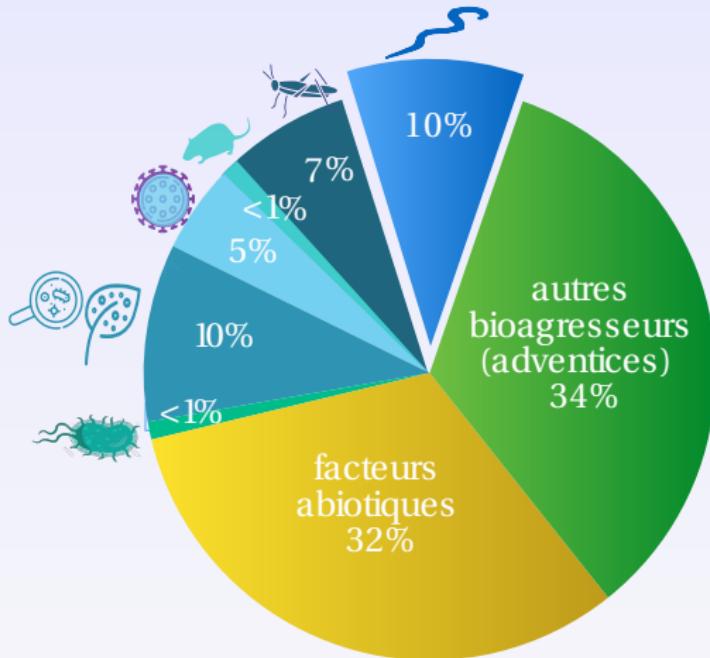
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

- Éliminer la faim dans le monde (Faim zéro)
 - Nourrir une population croissante
 - Préserver l'environnement
- ▶ Pour assurer la demande alimentaire plusieurs solutions :
 - Limiter le gaspillage alimentaire
 - Limiter les pertes de rendements



Impacts des bioagresseurs

- ▶ Jusqu'à 68 % de pertes de rendement à l'échelle mondiale [Oerke *et al.*, 2006]



- ▶ Nématodes phytoparasites : 10 % de pertes de rendements à l'échelle mondiale, > 100 milliards d'€/an [Chitwood *et al.*, 2003]

Les nématodes phytoparasites



- ▶ Vers microscopiques
- ▶ Plus de 4 000 espèces parmi 25 000 décrites
[Decraemer & Hunt, 1986]



Ubiquistes et ravageurs :

- ▶ Les plus nuisibles ⇒ les nématodes à galles (*Meloidogyne spp.*)
[Jones et al., 2013]
- ▶ Parasites racinaires obligatoires

Les nématodes phytoparasites



- ▶ Vers microscopiques
- ▶ Plus de 4 000 espèces parmi 25 000 décrites
[Decraemer & Hunt, 1986]



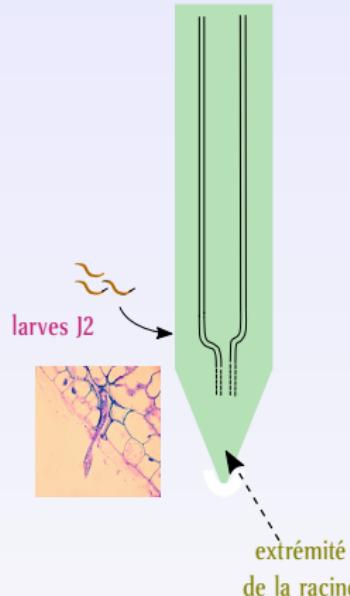
Ubiquistes et ravageurs :

- ▶ Les plus nuisibles ⇒ les nématodes à galles (*Meloidogyne spp.*)
[Jones et al., 2013]
- ▶ Parasites racinaires obligatoires
- ▶ Extrêmement polyphages : plus de 5500 espèces de plantes [Blok et al., 2008]
- ▶ Plus de 40 % des exploitations en culture maraîchère touchées en région PACA [Djian-Caporalino et al., 2012]
- ▶ *M. incognita* l'espèce la plus répandue dans le monde et dans le Sud de la France [Djian-Caporalino et al., 2012]



Cycle de vie de *M. incognita*

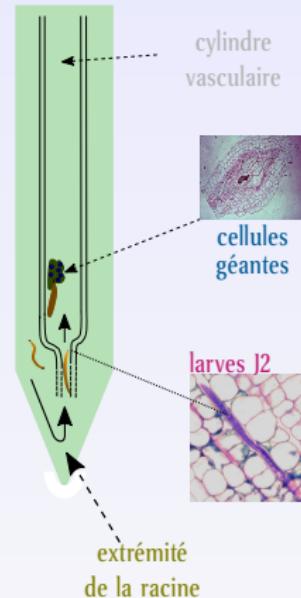
- ▶ 4 stades de développement de l'œuf à l'adulte



[D'après Abad *et al.*, 2008]

Cycle de vie de *M. incognita*

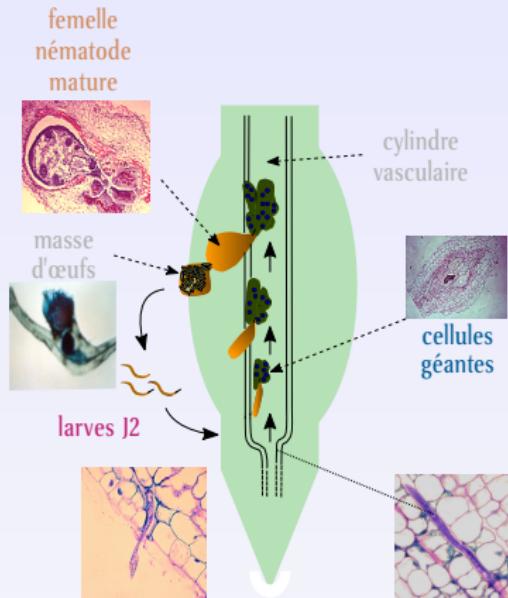
- ▶ 4 stades de développement de l'œuf à l'adulte
- ▶ Pénétration et migration
- ▶ Induction site nourricier et sédentarisation



[D'après Abad *et al.*, 2008]

Cycle de vie de *M. incognita*

- ▶ 4 stades de développement de l'œuf à l'adulte
- ▶ Pénétration et migration
- ▶ Induction site nourricier et sédentarisation
- ▶ Reproduction parthénogénétique
- ▶ Éclosion
- ▶ Durée cycle : 4 semaines à 3 mois selon la température



[D'après Abad *et al.*, 2008]

Symptômes

Principaux symptômes de l'infection :

- ▶ Apparition de galles



tomates



carottes



melons

Symptômes

Principaux symptômes de l'infection :

- ▶ Apparition de galles



tomates



carottes



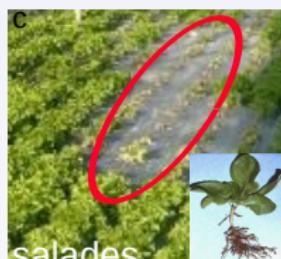
melons

- ▶ Dépérissement des parties aériennes
- ▶ Mort de la plante (en cas de fortes infestations)



B

aubergines



C

salades

Méthodes de lutte

Lutte chimique :

- ▶ Contrôle longtemps basé sur l'usage des pesticides
- ▶ La plupart de ces produits ont été bannis ou restreints
(Directive UE 2007 & Plan Ecophyto 2025)

Pesticides



ÉCOPHYTO
RÉDUIRE ET AMÉLIORER
L'UTILISATION DES PHYTOS



Méthodes de lutte

Lutte chimique :

- ▶ Contrôle longtemps basé sur l'usage des pesticides
- ▶ La plupart de ces produits ont été bannis ou restreints
(Directive UE 2007 & Plan Ecophyto 2025)



Pesticides

Lutte physique : solarisation, désinfection vapeur

- ▶ Efficacité assez variable



Solarisation

Méthodes de lutte

Lutte chimique :

- ▶ Contrôle longtemps basé sur l'usage des pesticides
- ▶ La plupart de ces produits ont été bannis ou restreints
(Directive UE 2007 & Plan Ecophyto 2025)



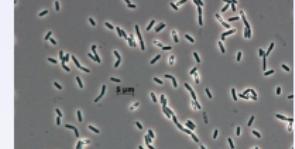
Lutte physique : solarisation, désinfection vapeur

- ▶ Efficacité assez variable



Lutte biologique : bactéries (Flocter® Bayer), biopesticides issus de champignons

- ▶ Peu efficace



Méthodes de lutte

Lutte chimique :

- ▶ Contrôle longtemps basé sur l'usage des pesticides
- ▶ La plupart de ces produits ont été bannis ou restreints (Directive UE 2007 & Plan Ecophyto 2025)



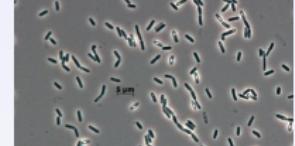
Lutte physique : solarisation, désinfection vapeur

- ▶ Efficacité assez variable



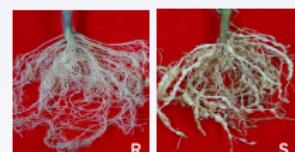
Lutte biologique : bactéries (Flocter® Bayer), biopesticides issus de champignons

- ▶ Peu efficace



Résistance variétale :

- ▶ Efficace et respectueux de l'environnement
- ▶ Peu de gènes majeurs (R) (exemple *Mi-1*)



La résistance qualitative

- résistance totale ⇒ engendre une absence de maladie
- modèle gène pour gène (implication d'un gène R) [Flor, 1971]

	Plante résistante (R)	Plante sensible (S)
Pathogène avirulent (<i>Avr</i>)	 saine	 infestation
Pathogène virulent (<i>Vir</i>)	 infestation	 infestation

Contournement

⚠ Déploiement des résistances ⇒ sélection de génotypes virulents

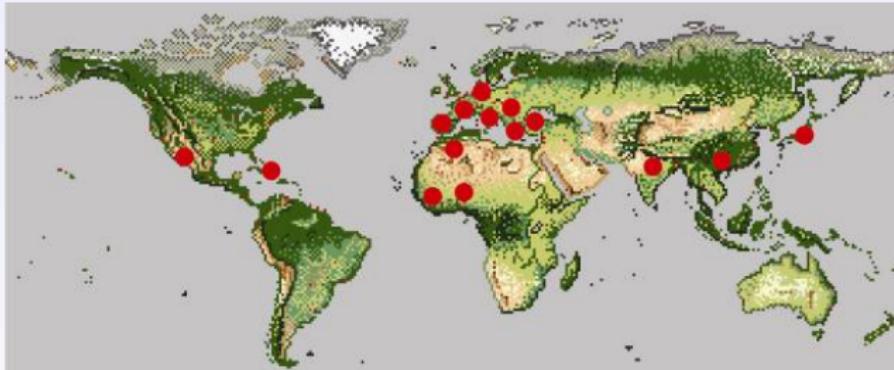


Tomates : *Mi-1*



Piments : *Me(s)* et *N*

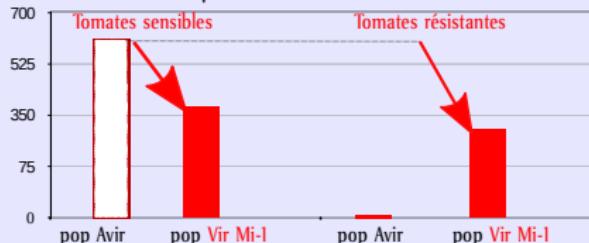
- Exemple, le contournement du gène *Mi* de la tomate [Castagnone *et al.*, 2002]



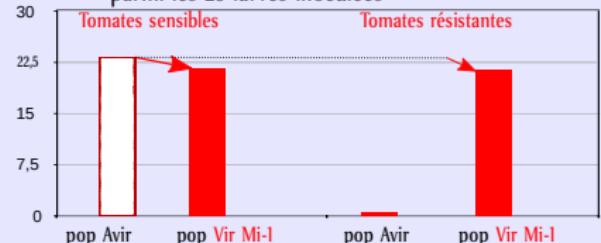
- races de *meloidogyne* virulentes vis à vis du gène *Mi*

Coûts de virulence

Potentiel reproducteur (PR)= nombre d'œufs viables par larve inoculée



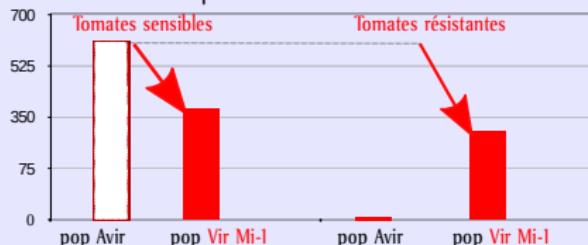
Infectivité du nématode = le nombre de femelles ayant produit une ponte parmi les 25 larves inoculées



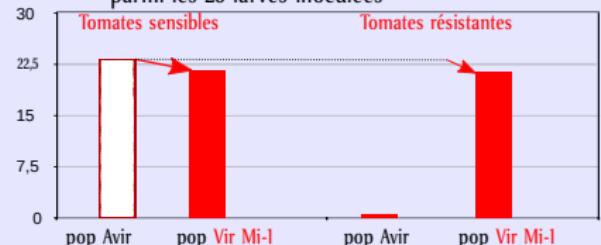
[Castagnone-sereno *et al.*, 2007]

Coûts de virulence

Potentiel reproducteur (PR)= nombre d'œufs viables par larve inoculée



Infectivité du nématode = le nombre de femelles ayant produit une ponte parmi les 25 larves inoculées



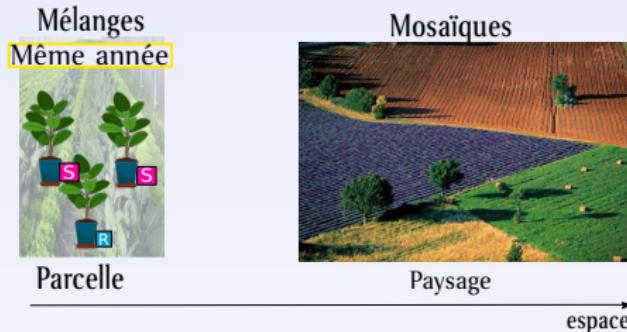
[Castagnone-sereno *et al.*, 2007]

- ▶ Plantes résistantes diminuent la population d'avirulents
- ▶ Virulents sélectionnés sur plantes résistantes, mais contre-sélectionnés sur sensibles
- ▶ Combiner plantes résistantes & sensibles pour diminuer la montée en fréquence des virulents

La stratégie de déploiement à l'étude

- ▶ Stratégies entre plantes résistantes et sensibles existantes :

Hétérogénéité : Spatiale



La stratégie de déploiement à l'étude

- ▶ Stratégies entre plantes résistantes et sensibles existantes :

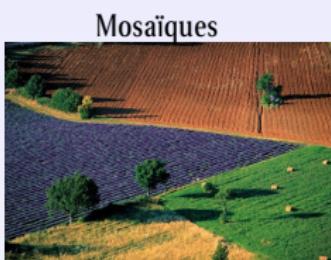
Hétérogénéité :

Spatiale

Temporelle



Parcelle



espace



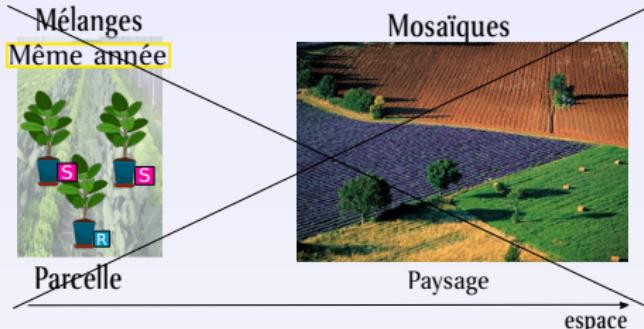
temps

La stratégie de déploiement à l'étude

- ▶ Stratégies entre plantes résistantes et sensibles existantes :

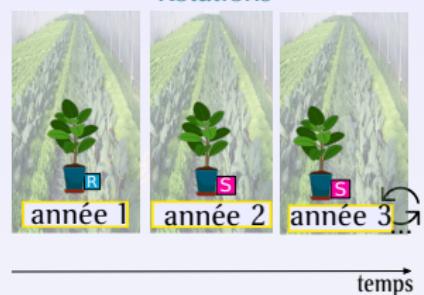
Hétérogénéité :

Spatiale



Temporelle

Rotations



- ▶ Nématodes à galles peu mobiles ⇒ rotations

Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est

d'identifier des stratégies de déploiement de gènes R efficaces et durables pour lutter contre les NG en culture maraîchère.

Objectifs

L'objectif principal de cette thèse est

d'identifier des stratégies de déploiement de gènes R efficaces et durables pour lutter contre les NG en culture maraîchère.

pour ce faire

1. la construction d'un modèle multi-saison
2. la calibration du modèle sur des données de la littérature et nos données expérimentales
3. la recherche de stratégies optimales de déploiement en terme d'efficacité d'un gène R
4. l'évaluation de la robustesse de ces stratégies

Plan

Notre approche de modélisation

Cadre : modèles épidémiologiques type SIR [Kermack & McKendrick (1927)]

Nos hypothèses

- ▶ Échelle → une plante
- ▶ Prise en compte de certaines particularités liées à la biologie du nématode
 - Latence
 - Forme libre
 - Saisonnalité des systèmes de cultures : temps continu (phase épidémique) et phénomènes discrets (survie) [Mailleret et al., 2012]
- ▶ Introduction résistance et virulents

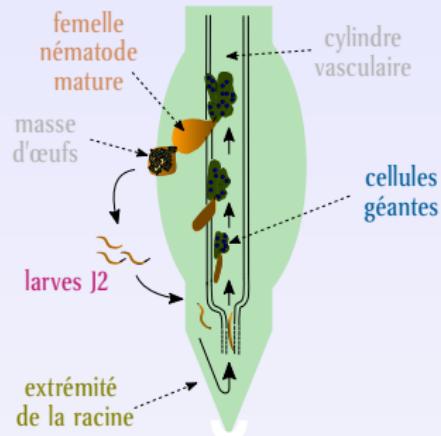
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



P

H

E

I

$$\begin{cases} \dot{P} = \\ \dot{H} = \\ \dot{E} = \\ \dot{i} = \end{cases}$$

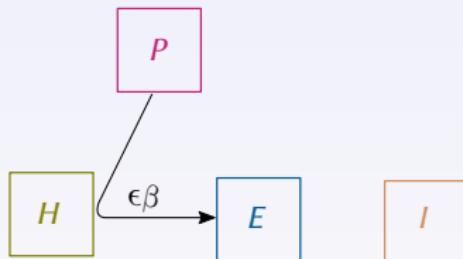
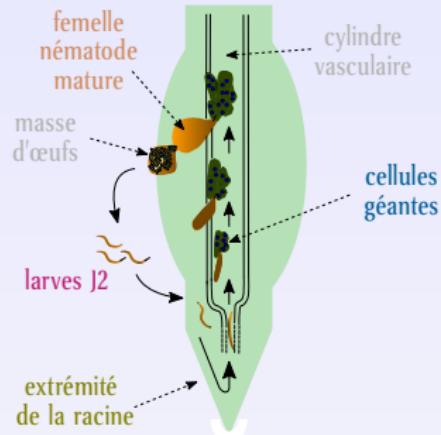
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH \\ \dot{H} = -\epsilon\beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon\beta PH \\ \dot{I} = \end{cases}$$

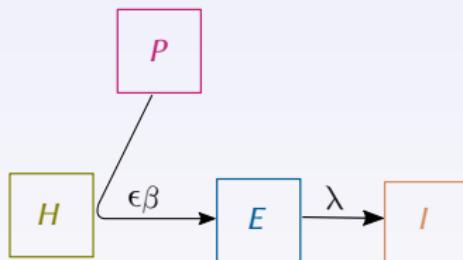
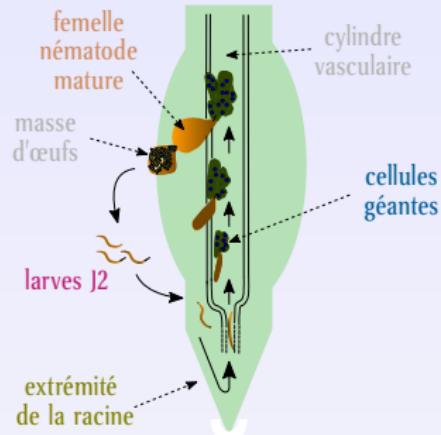
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH \\ \dot{H} = -\epsilon\beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon\beta PH - \lambda E, \\ \dot{I} = \lambda E \end{cases}$$

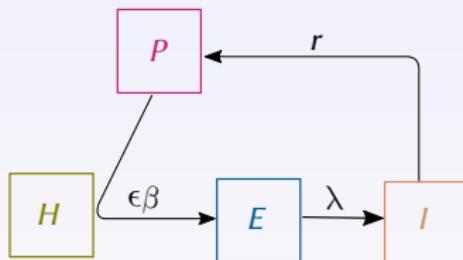
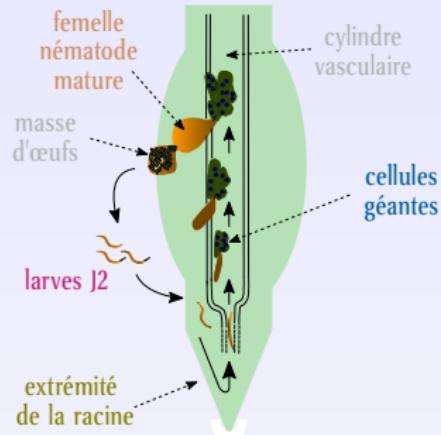
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH + rI \\ \dot{H} = -\epsilon\beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon\beta PH - \lambda E, \\ \dot{I} = \lambda E \end{cases}$$

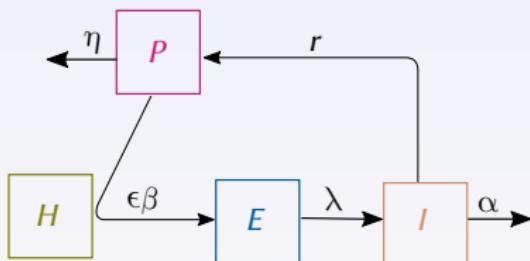
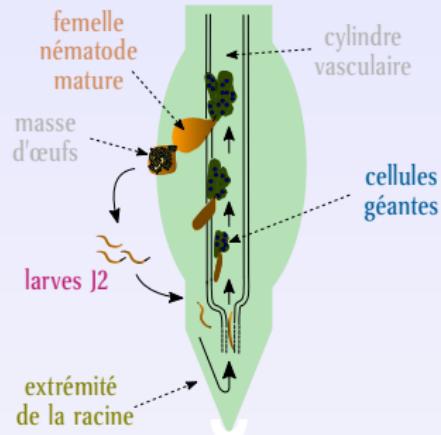
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH + rI - \eta P, \\ \dot{H} = -\epsilon\beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon\beta PH - \lambda E, \\ \dot{I} = \lambda E - \alpha I. \end{cases}$$

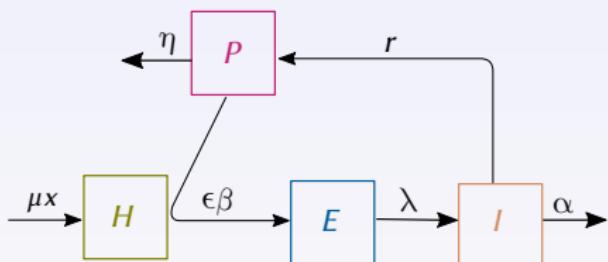
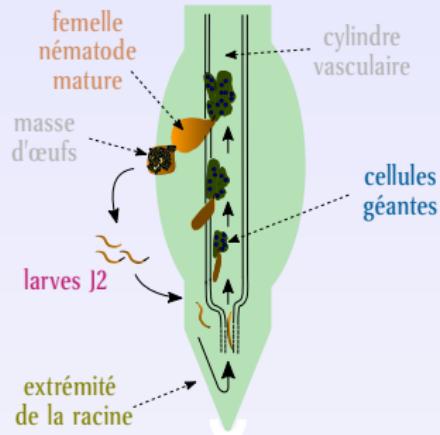
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH + rI - \eta P, \\ \dot{H} = \mu x - \epsilon \beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon \beta PH - \lambda E, \\ \dot{I} = \lambda E - \alpha I. \end{cases}$$

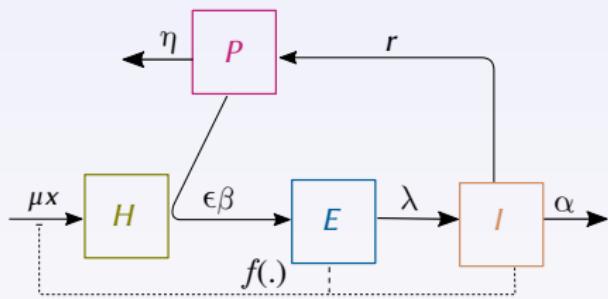
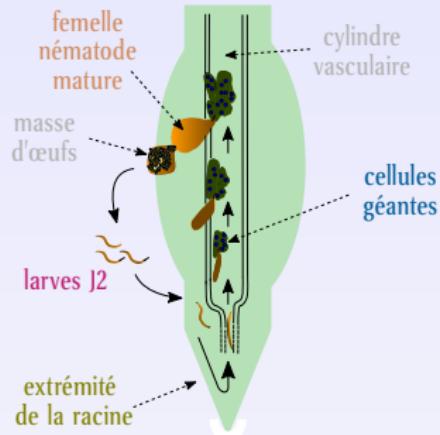
Modèle interaction plante / nématode

P: nématodes libres dans le sol

H: racines saines

E: stade infecté latent

I: stade infecté mature



$$\begin{cases} \dot{P} = -\beta PH + rI - \eta P, \\ \dot{H} = \mu x f(\cdot) - \epsilon \beta PH, \\ \dot{E} = \epsilon \beta PH - \lambda E, \\ \dot{I} = \lambda E - \alpha I. \end{cases}$$

avec $f(\cdot) = e^{-k\pi}$, $\pi = \frac{I}{H+E+I}$



Interaction plante R / nématode \curvearrowright avir

$$P_v$$

$$H^R$$

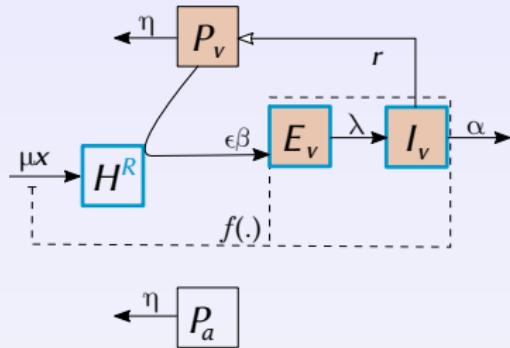
$$P_a$$

- Hôte R, nématodes avirulents (indice a) et virulents (indice v)



Interaction plante R / nématode

\circlearrowleft
avir



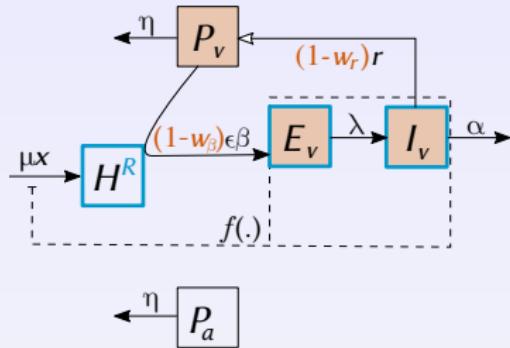
$$\begin{cases} \dot{P}_a = -\beta P_a H^R - \eta P_a, \\ \dot{P}_v = -\beta P_v H^R - \eta P_v + r l_v, \\ \dot{H}^R = \mu x f(\cdot) - \epsilon_v^R \beta P_v H^R, \\ \dot{E}_v = \epsilon_v^R \beta P_v H^R - \lambda E_v, \\ \dot{I}_v = \lambda E_v - \alpha I_v. \end{cases}$$

- Hôte R, nématodes avirulents (indice a) et virulents (indice v)
- Avirulents incapables d'infecter la plante R



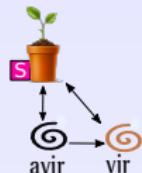
Interaction plante R / nématode

\circlearrowleft
avir

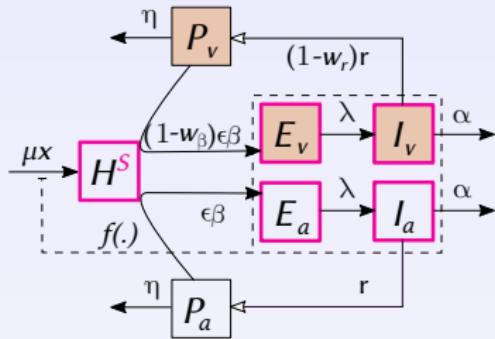


$$\begin{cases} \dot{P}_a = -\beta P_a H^R - \eta P_a, \\ \dot{P}_v = -\beta P_v H^R - \eta P_v + (1 - w_r) r l_v, \\ \dot{H}^R = \mu x f(.) - (1 - w_\beta) \epsilon_v^R \beta P_v H^R, \\ \dot{E}_v = (1 - w_\beta) \epsilon_v^R \beta P_v H^R - \lambda E_v, \\ \dot{I}_v = \lambda E_v - \alpha I_v. \end{cases}$$

- ▶ Hôte R, nématodes avirulents (indice a) et virulents (indice v)
- ▶ Avirulents incapables d'infecter la plante R
- ▶ Coût de virulence sur l'infectivité (w_β) et la reproduction (w_r)

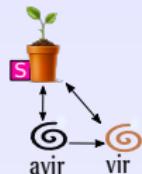


Interaction plante S / nématode

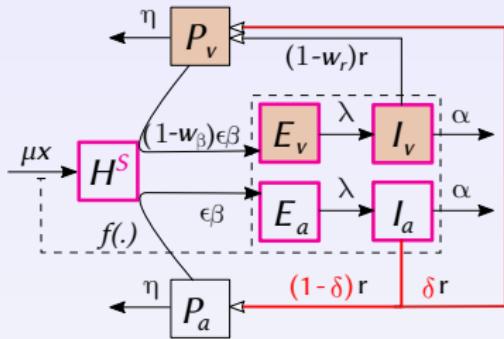


$$\begin{cases} \dot{P}_a = -\beta P_a H^S - \eta P_a + r l_a, \\ \dot{P}_v = -\beta P_v H^S - \eta P_v + (1 - w_r) r l_v + r l_a \\ \dot{H}^S = \mu x f(.) - \epsilon_a^S \beta P_a H^S - (1 - w_\beta) \epsilon_v^S \beta P_v H^S, \\ \dot{E}_a = \epsilon_a^S \beta P_a H^S - \lambda E_a, \\ \dot{E}_v = (1 - w_\beta) \epsilon_v^S \beta P_v H^S - \lambda E_v, \\ \dot{l}_a = \lambda E_a - \alpha l_a, \\ \dot{l}_v = \lambda E_v - \alpha l_v. \end{cases}$$

- Avirulents et virulents peuvent infecter Hôte S
- Coût de virulence sur l'infectivité (w_β) et la reproduction (w_r)



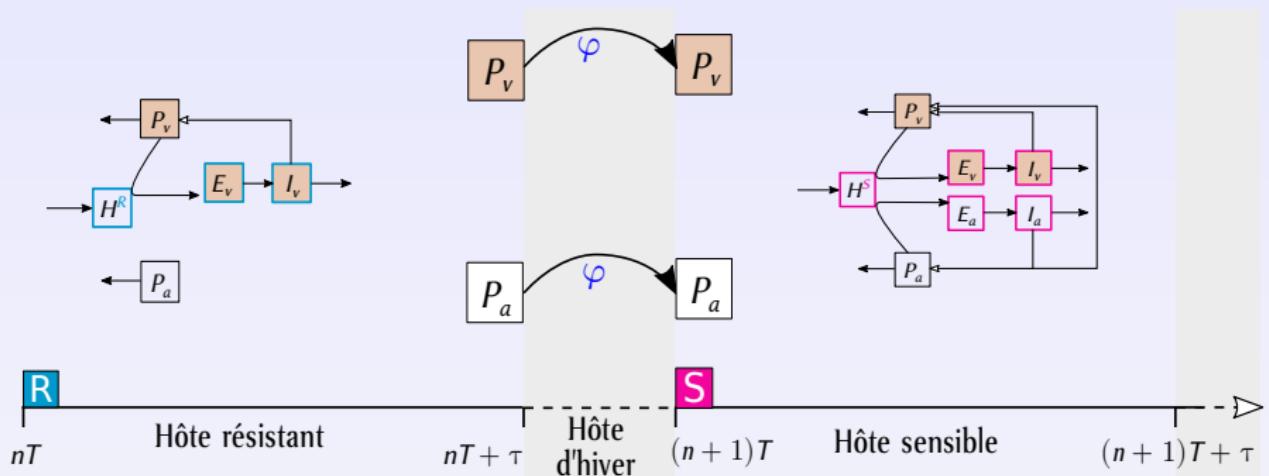
Interaction plante S / nématode



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{P}_a = -\beta P_a H^S - \eta P_a + (1-\delta) r l_a, \\ \dot{P}_v = -\beta P_v H^S - \eta P_v + (1-w_r) r l_v + \delta r l_a \\ \dot{H}^S = \mu x f(.) - \epsilon_a^S \beta P_a H^S - (1-w_\beta) \epsilon_v^S \beta P_v H^S, \\ \dot{E}_a = \epsilon_a^S \beta P_a H^S - \lambda E_a, \\ \dot{E}_v = (1-w_\beta) \epsilon_v^S \beta P_v H^S - \lambda E_v, \\ \dot{l}_a = \lambda E_a - \alpha l_a, \\ \dot{l}_v = \lambda E_v - \alpha l_v. \end{array} \right.$$

- ▶ Avirulents et virulents peuvent infecter Hôte S
- ▶ Coût de virulence sur l'infectivité (w_β) et la reproduction (w_r)
- ▶ Fraction δ d'avirulents → virulents

Modèle multi-saison



Survie inter-saison des nématodes en présence de culture d'hiver :

$$\begin{cases} P_v((n+1)T) = \varphi P_v(nT + \tau) \\ P_a((n+1)T) = \varphi P_a(nT + \tau) \end{cases}$$

Plan

Données

- ▶ Toutes les valeurs de paramètres sont issues de la littérature sauf 3 :
 - β taux d'infection
 - k facteur de modulation de la croissance
 - x facteur de conversion

Données

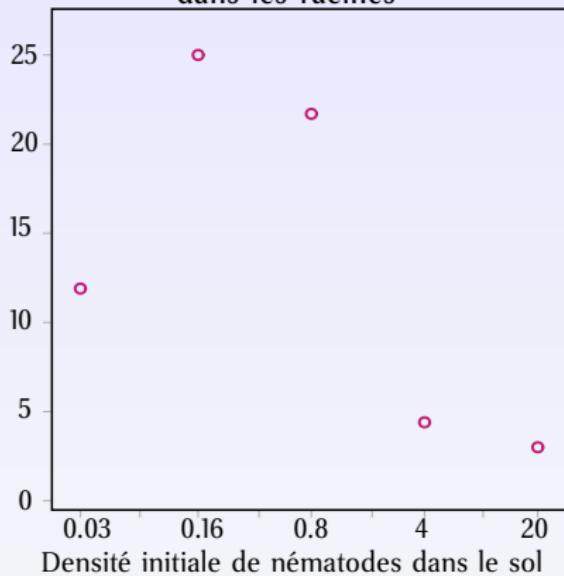
- ▶ Toutes les valeurs de paramètres sont issues de la littérature sauf 3 :
 - β taux d'infection
 - k facteur de modulation de la croissance
 - x facteur de conversion
- ▶ 1 expérience, 5 valeurs de densités initiales [Ehwaeti *et al.*, 1998] :
 - Densité finale de nématodes dans la plante à 42 et 135 jours
 - Biomasse racinaire à 42 et 135 jours
- ▶ 1 nouvelle expérience (ISA 2018), 3 valeurs de densités initiales :

- Densité finale de nématodes dans la plante à 35 jours
- Biomasse racinaire à 35 jours

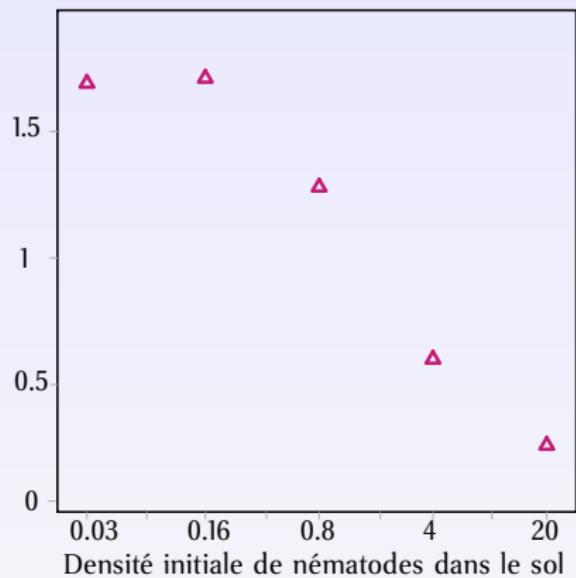


Calibration (Ehwaeti *et al.*, (1998))

Densité finale de nématodes
dans les racines

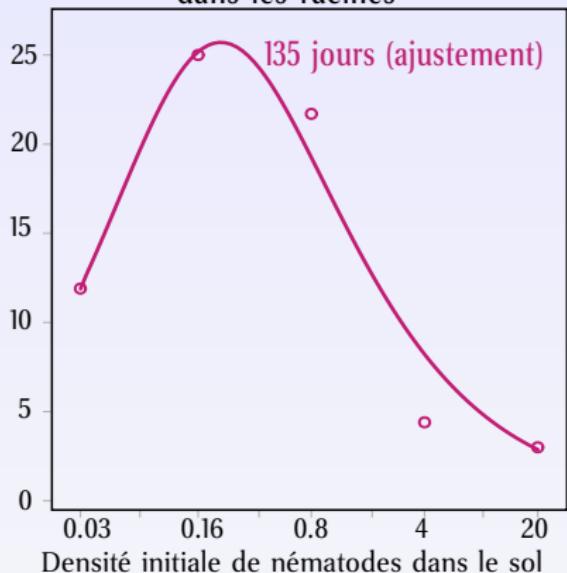


Biomasse racinaire relative

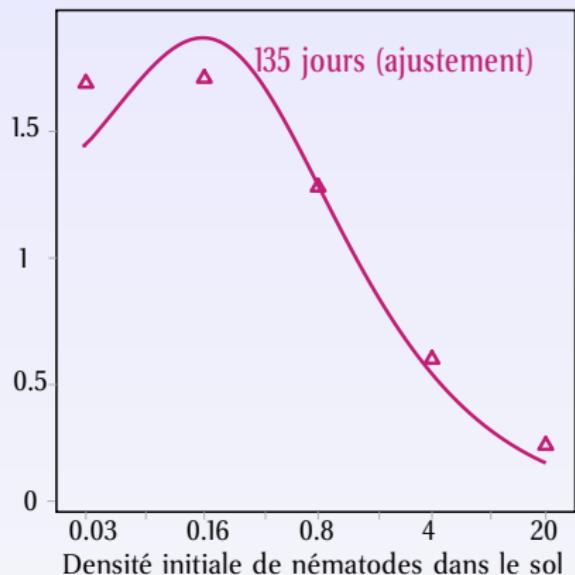


Calibration (Ehwaeti *et al.*, (1998))

Densité finale de nématodes
dans les racines



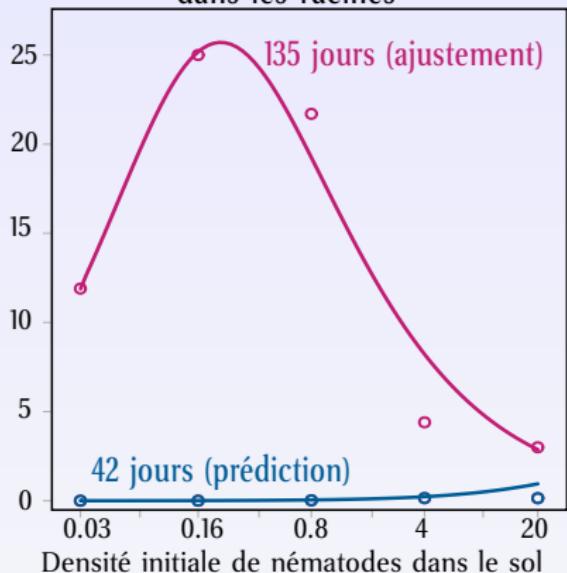
Biomasse racinaire relative



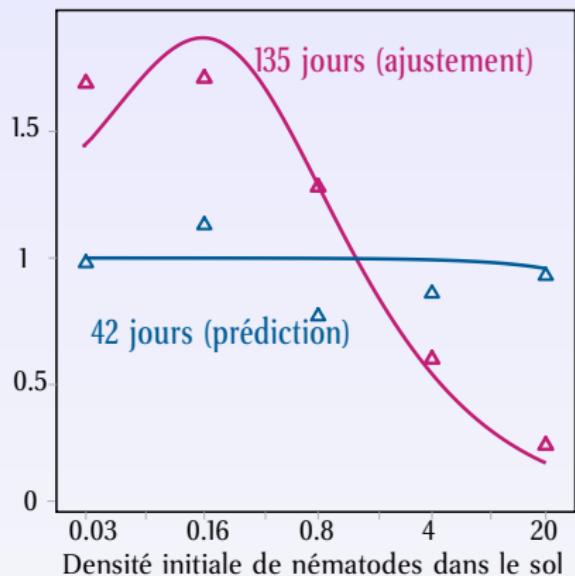
➡ Bon ajustement du modèle

Calibration (Ehwaeti *et al.*, (1998))

Densité finale de nématodes
dans les racines

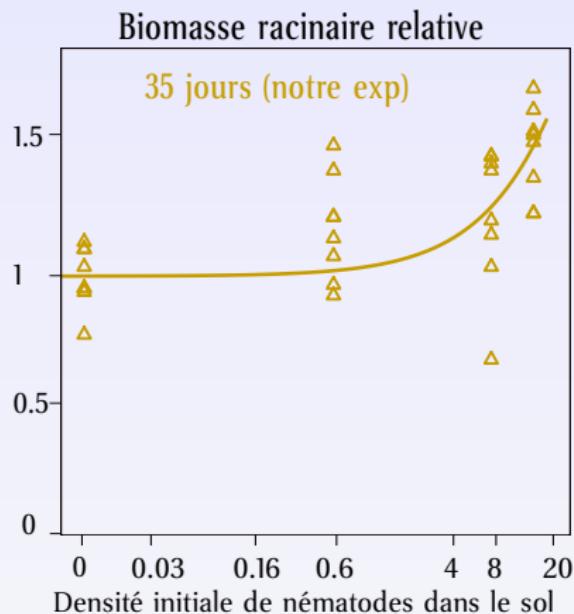
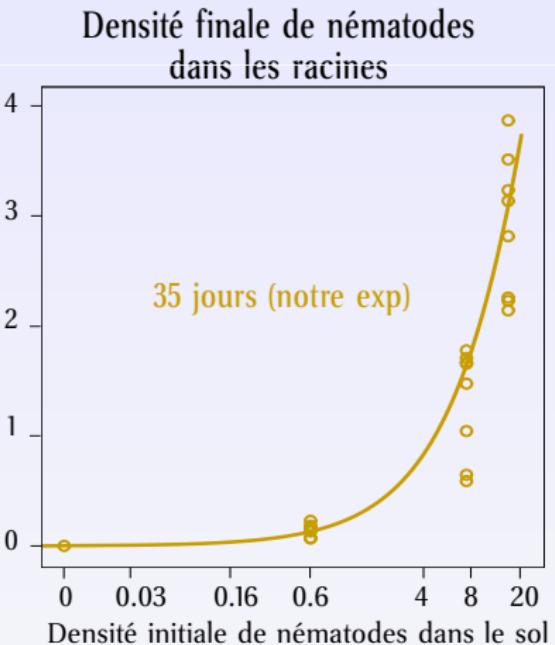


Biomasse racinaire relative



- ➡ Bon ajustement du modèle
- ➡ Validation du modèle

Calibration (nos données)



→ Bon ajustement du modèle à nos données

Conclusions

- ▶ Bon ajustement du modèle à des jeux de données issues d'expériences différentes ⇒ modèle très adaptable
- ▶ Paramètres ajustés très similaires entre les deux ajustements ⇒ bonne confiance en les valeurs de paramètres estimés (non présenté)

Plan

Définition des stratégies

Stratégies pures

plantes résistantes ...

plantes sensibles ...

Rotations périodiques

y saisons  & x saisons ...

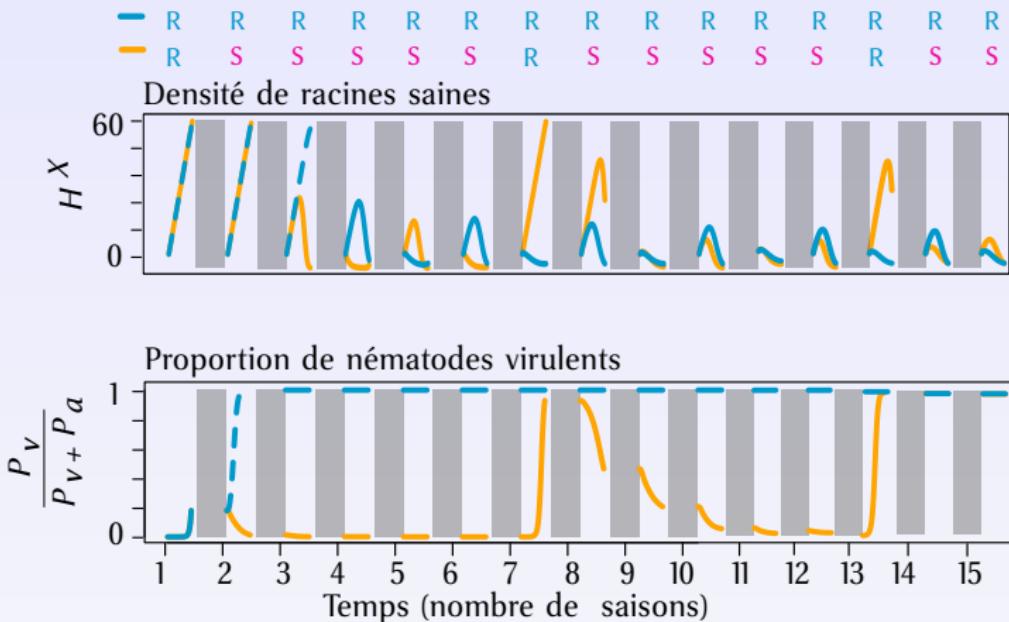
Exemple : $y = 1$ & $x = 2$

...

Rotations sans contraintes

...

Simulations



- Fixation rapide des virulents (dès la deuxième année)
- En alternant la résistance par la stratégie 1R+5S → alternance des pressions sélectives

Optimisation

Critère à maximiser

- ▶ Proxy de rendement

→ « Rendement » saisonnier moyen (aire sous la courbe de densité des racines saines pour un nombre donné de saisons n) :

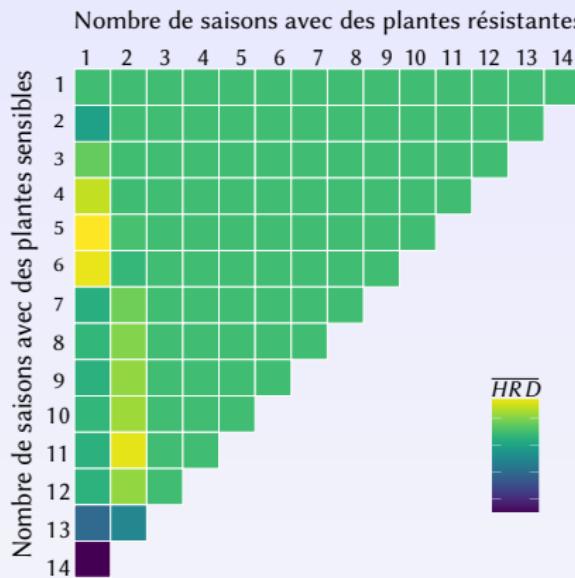
$$\overline{HRD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{i^{\text{ème}} \text{ saison}} H^X(t) dt$$

- ▶ Similaire à la durée de la surface foliaire saine (HAD) [Van den Bosch & Gilligan, 2003; Papaïx et al., 2018]
- ▶ Stratégie optimale = maximisation de l' \overline{HRD}

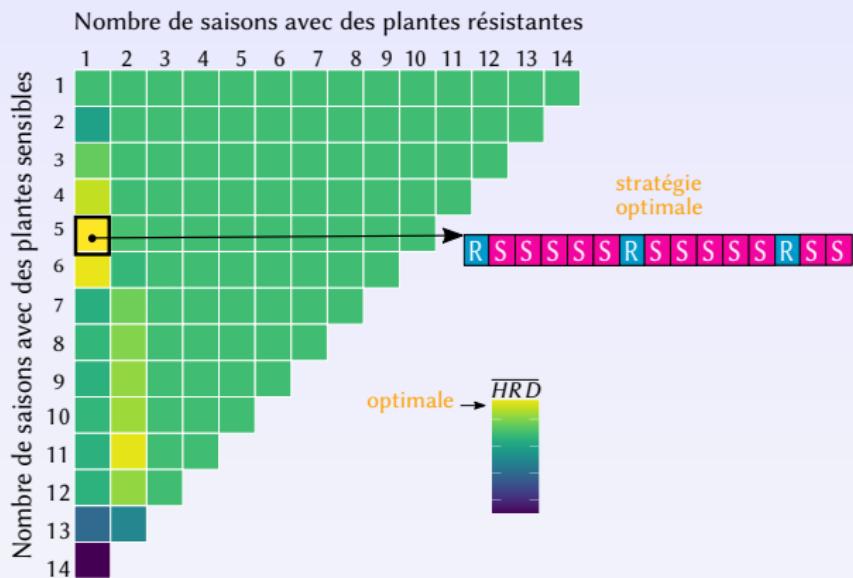
Méthode

- ▶ Horizon temporel 2 à 30 ans
- ▶ Rotation sans contrainte optimale : algorithme génétique
- ▶ Rotation périodique optimale : méthode exhaustive

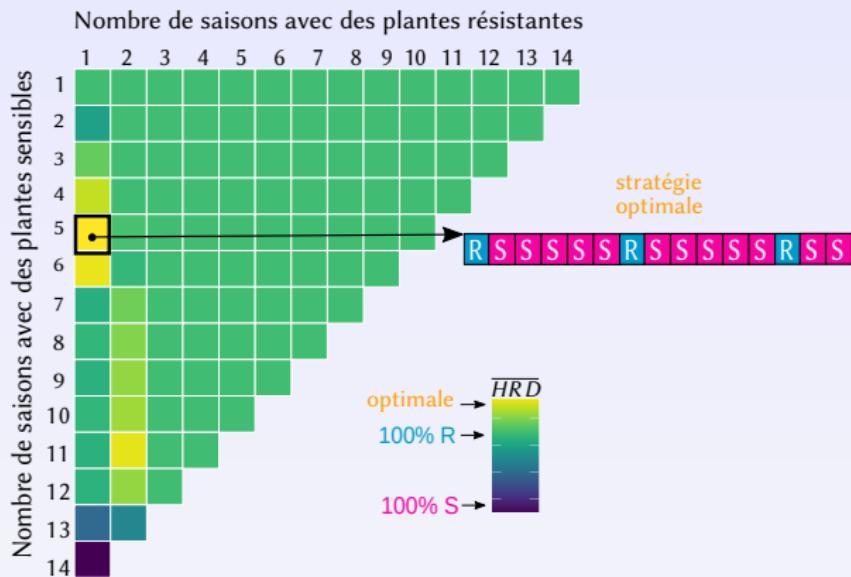
Recherche de la stratégie périodique optimale



Recherche de la stratégie périodique optimale

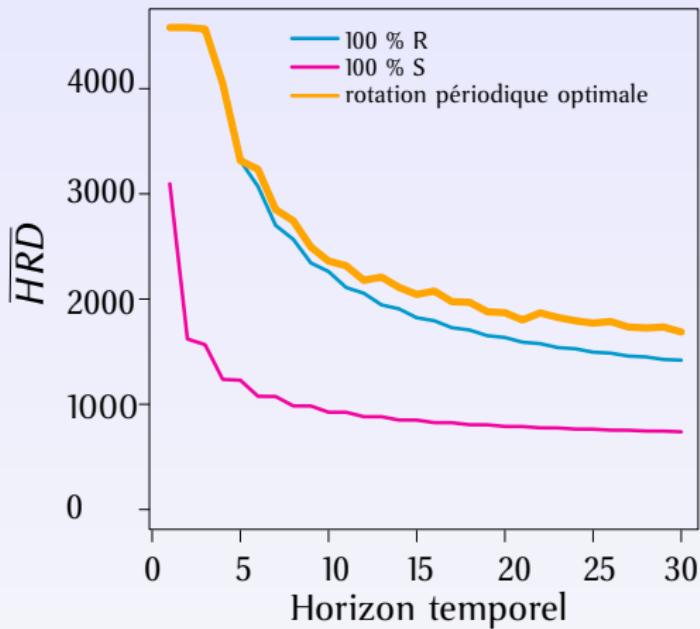


Recherche de la stratégie périodique optimale



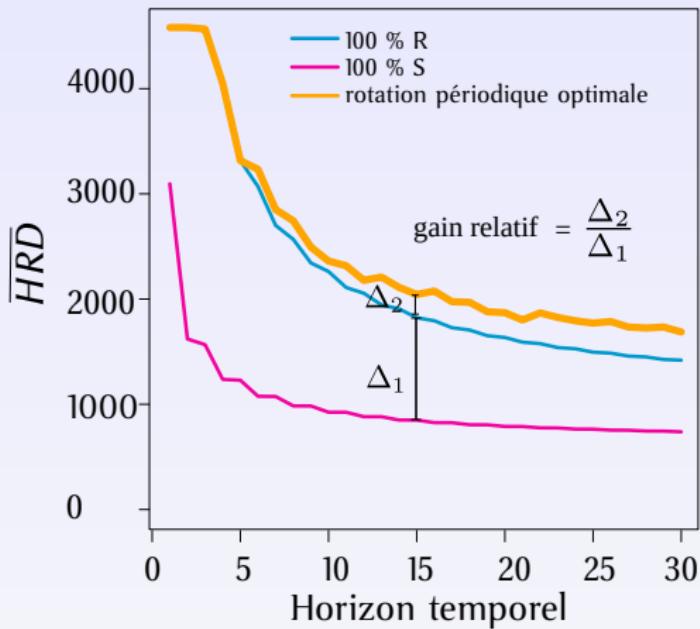
➡ Rotation périodique optimale > stratégie 100 % R et 100 % S

Stratégies de rotation périodique optimale



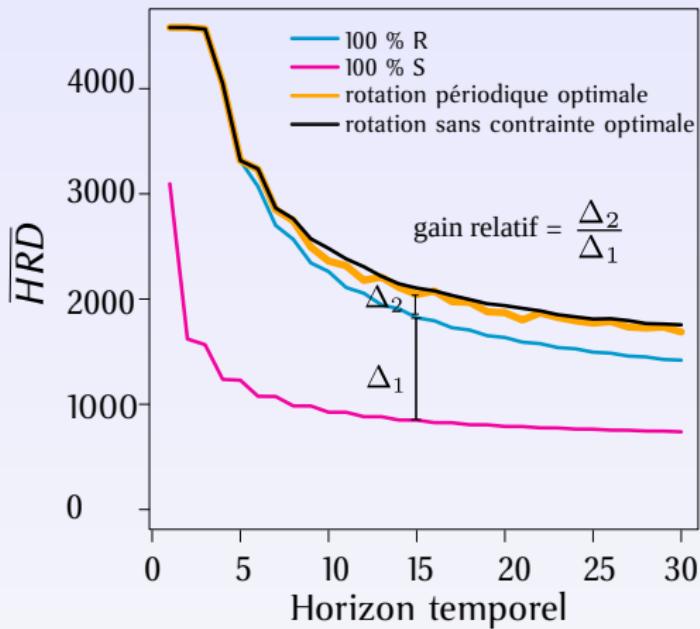
► Efficacité des stratégies chute rapidement avec horizon temporel

Stratégies de rotation périodique optimale



- ➡ Efficacité des stratégies chute rapidement avec horizon temporel
- ➡ Gain relatif ↗ avec horizon temporel

Stratégies de rotation périodique optimale



- ➡ Efficacité des stratégies chute rapidement avec horizon temporel
- ➡ Gain relatif ↗ avec horizon temporel

Conclusions

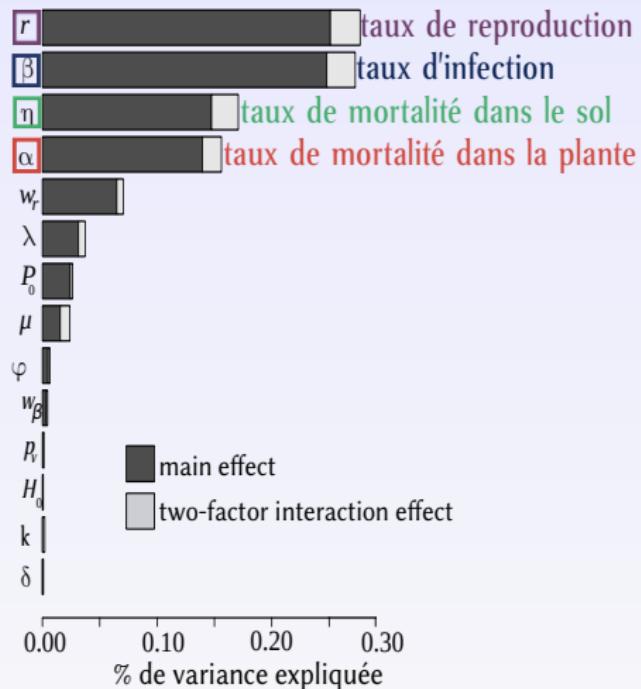
- ▶ Stratégies de rotations périodiques > stratégie pures résistantes
- ▶ Quand la résistance est contournée la stratégie optimale est caractérisée par de faibles ratios de plantes résistantes (non présenté)
- ▶ Rotation périodique optimale quasiment l'optimum pour assurer les meilleurs rendements

Plan

Analyse de sensibilité

Objectif et méthode

- ▶ Trouver les paramètres les plus influents sur le \overline{HRD} (stratégie optimale 1R+5S sur 15 saisons)
- ▶ Paramètres : $\pm 30\%$ de la valeur de référence
(plan factoriel fractionnaire)
- ▶ Indices de sensibilité (Anova)



Scénarios épidémiologiques

Définition des scénarios

- ▶ À partir des 4 paramètres épidémiologiques les plus influents, 3 scénarios épidémiologiques :
 - Référence
 - Élevé (taux de reproduction et d'infection plus élevés)
 - Extrême (taux de mortalité plus faibles)

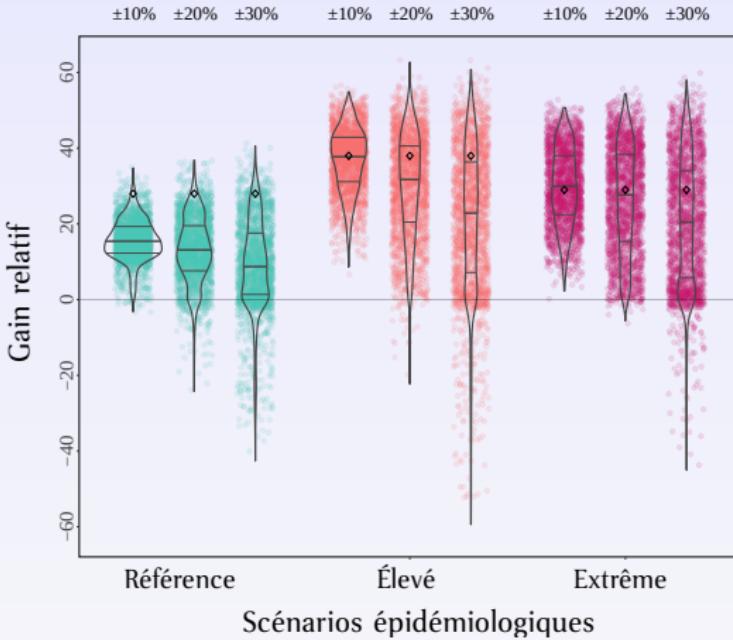
Robustesse

Pour chaque scénario :

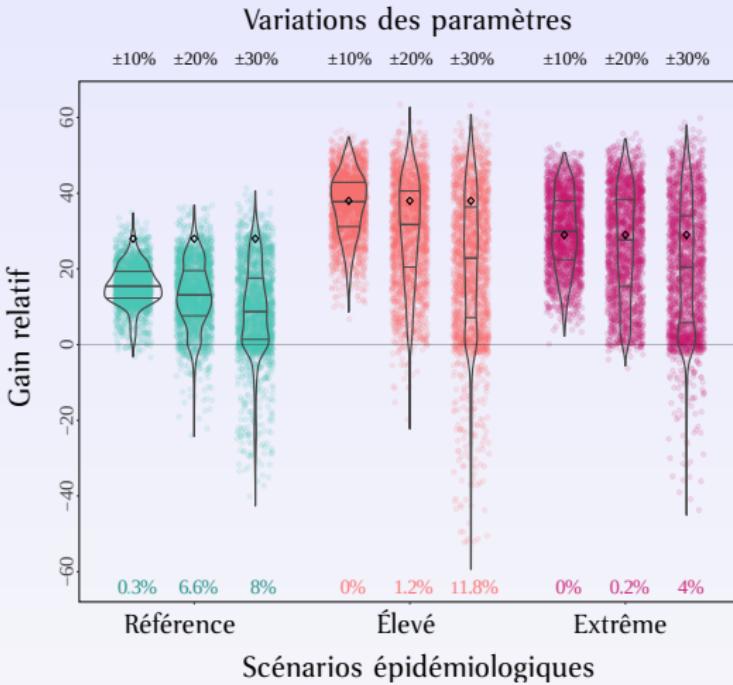
- ▶ Déterminer la rotation périodique optimale
- ▶ En appliquant cette rotation, déterminer si le gain relatif se maintient face à des variations de paramètres

Robustesse

Variations des paramètres



Robustesse



➡ Rotation périodique optimale presque toujours plus efficace que 100%R

Conclusions

- ▶ Paramètres épidémiologiques : les plus influents, valeurs souvent incertaines
→ scénarios
- ▶ Efficacité de la rotation optimale même avec incertitude sur valeur des paramètres, surtout pour des situations épidémiologiques élevées et extrêmes

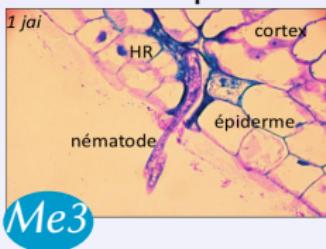
Plan

Caractéristiques de la résistance

1. Coûts de virulence
2. Mode d'action de la réponse de la plante résistante (précoce/tardive)

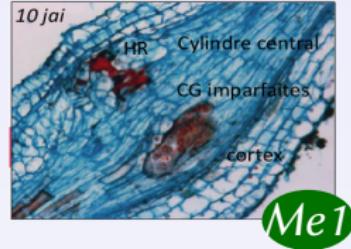
Exemple chez le piment :

Résistance précoce



↓
facilement contournable

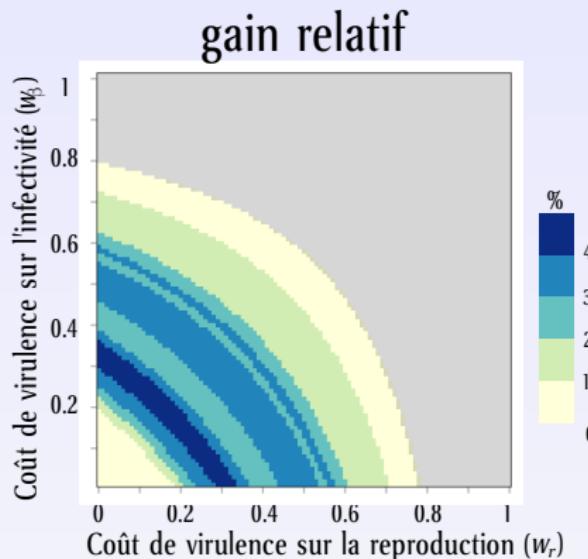
Résistance tardive



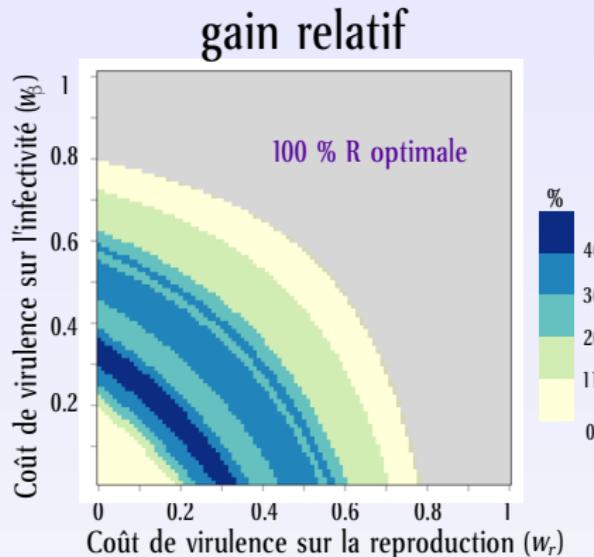
↓
difficilement contournable

Comment expliquer ces différences ?

Influence des coûts de virulence

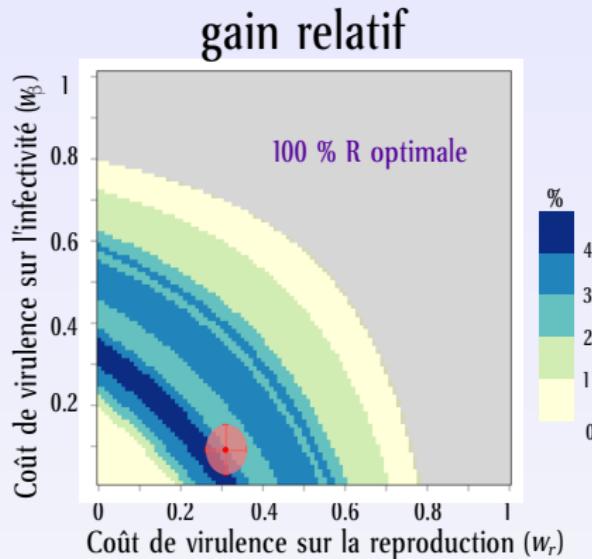


Influence des coûts de virulence



- ➡ Coûts élevés : pas de contournement
- ➡ Coûts faibles : peu de contre-sélection des virulents sur plante sensible

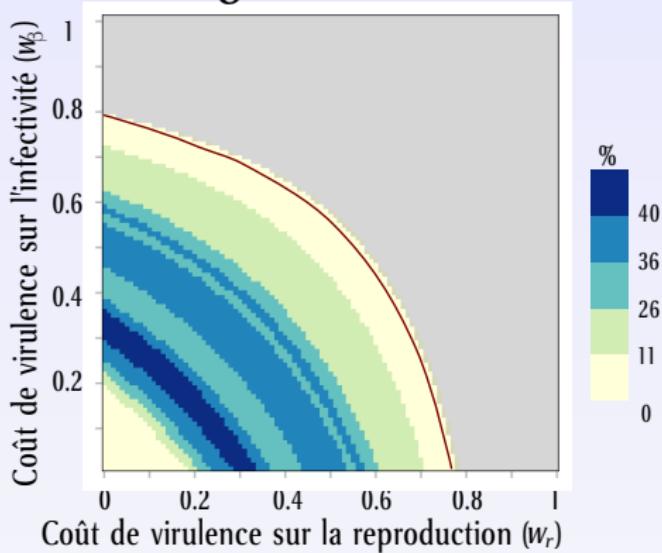
Influence des coûts de virulence



- Coûts élevés : pas de contournement
- Coûts faibles : peu de contre-sélection des virulents sur plante sensible
- **Données tomate *Mi*** [Castagnone *et al.*, 2002] : gain relatif >30 %

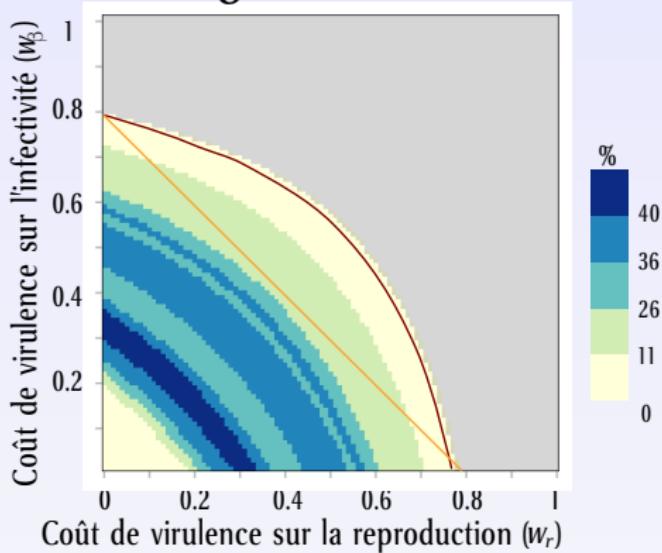
Influence des coûts de virulence

gain relatif



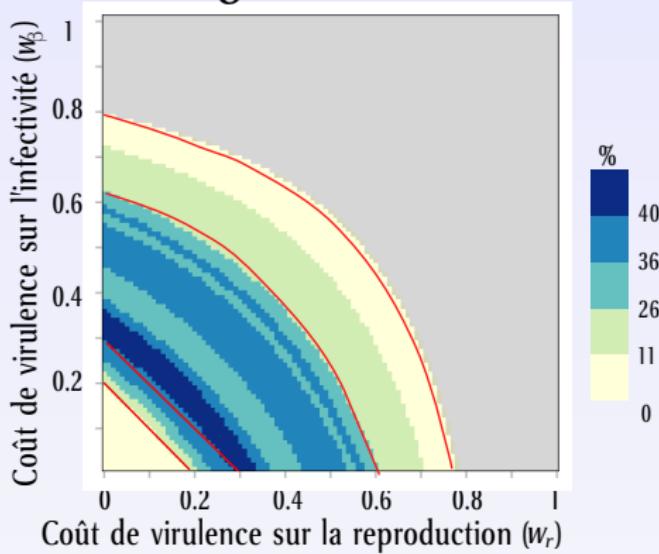
Influence des coûts de virulence

gain relatif



Influence des coûts de virulence

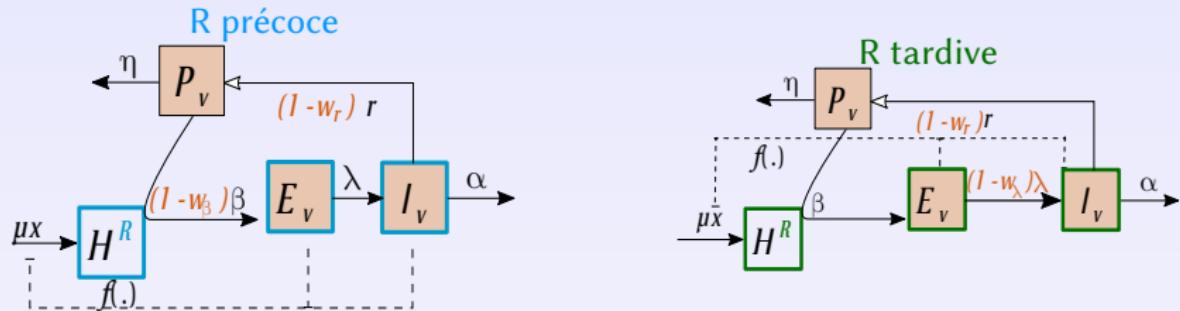
gain relatif



$$R_{0,v} = \varphi \exp \left(\beta \left(\frac{(1 - (w_\beta + w_r - w_\beta w_r))\epsilon_v r}{\alpha} - 1 \right) \left(H_0 \tau + \frac{\mu x \tau^2}{2} \right) - \eta \tau \right).$$

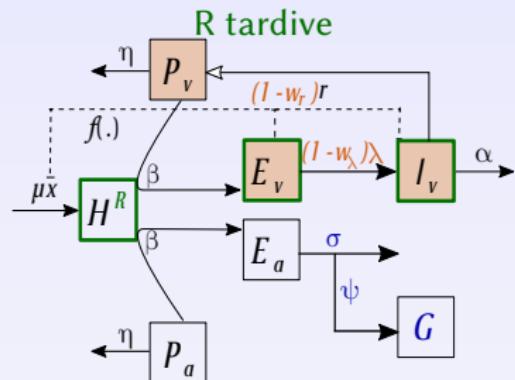
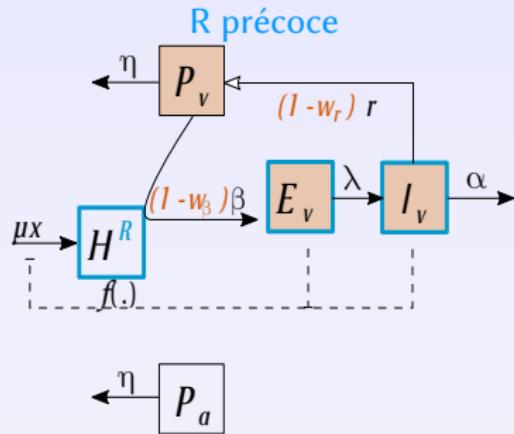
► Mieux vaut un fort coût de virulence que deux coûts de virulence intermédiaires

2. Comparaison gènes tardifs et précoces



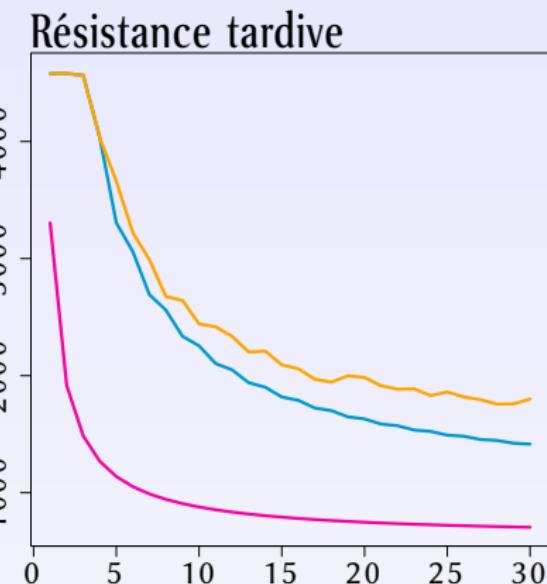
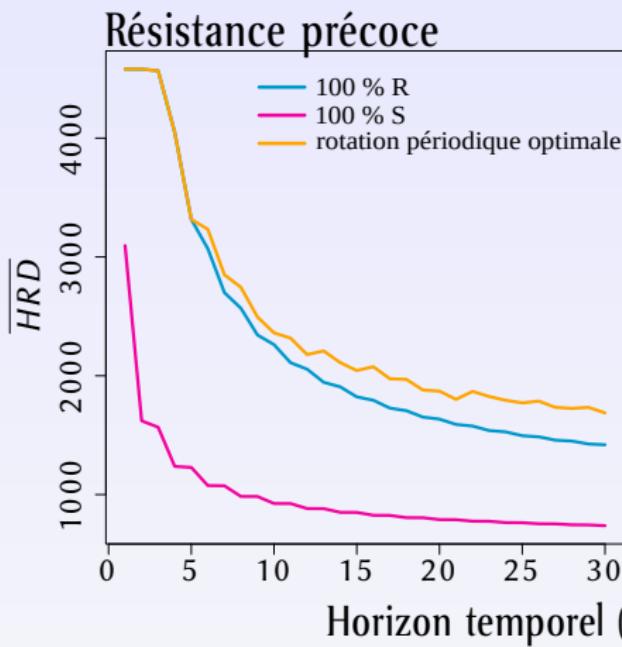
- R tardive : nématodes avirulents bloqués au bout d'un temps $\frac{1}{\sigma}$ → fraction ψ de racines infestées alors immunisées G

2. Comparaison gènes tardifs et précoces



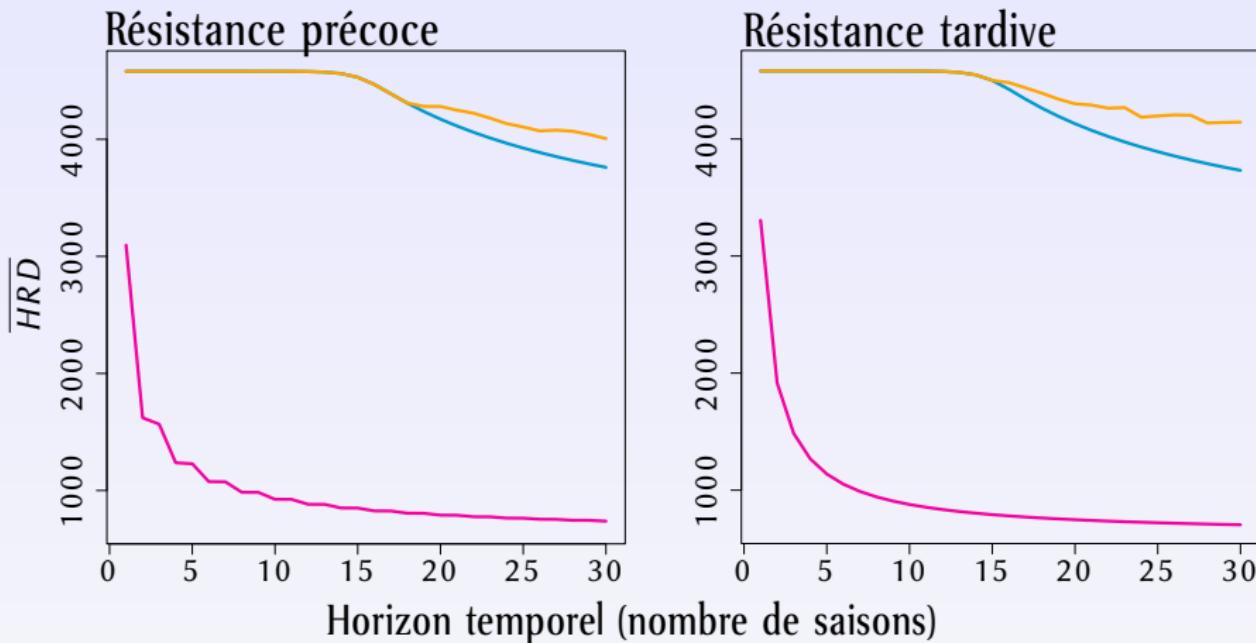
- **R tardive** : nématodes avirulents bloqués au bout d'un temps $\frac{1}{\sigma}$ → fraction ψ de racines infestées alors immunisées G

2. Comparaison gènes R précoce et tardif



➡ Mêmes efficacités, mêmes rotations périodiques optimales (non montrées)

2. Comparaison gènes R précoce et tardif



- Mêmes efficacités, mêmes rotations périodiques optimales (non montrées)
- Résultats identiques pour des coûts de virulence élevés

Conclusions

- ▶ Pas d'impact des mécanismes seuls tardifs et précoce, mieux vaut des coûts de virulence élevés pour éviter le contournement

Plan

Conclusions

- ▶ Modèle générique pouvant s'adapter à différentes interactions plantes nématodes

Conclusions

- ▶ Modèle générique pouvant s'adapter à différentes interactions plantes nématodes
- ▶ Rotations entre plantes résistantes et sensibles plus efficaces que l'approche conventionnelle 100% R, surtout quand :
 - ▶ Horizons longs
 - ▶ Coûts de virulence intermédiaires
 - ▶ Niveaux épidémiologiques élevés et extrêmes

Conclusions

- ▶ Modèle générique pouvant s'adapter à différentes interactions plantes nématodes
- ▶ Rotations entre plantes résistantes et sensibles plus efficaces que l'approche conventionnelle 100% R, surtout quand :
 - ▶ Horizons longs
 - ▶ Coûts de virulence intermédiaires
 - ▶ Niveaux épidémiologiques élevés et extrêmes
- ▶ Efficacité de la rotation optimale maintenue même avec incertitude sur les valeurs des paramètres du modèle

Conclusions

- ▶ Modèle générique pouvant s'adapter à différentes interactions plantes nématodes
- ▶ Rotations entre plantes résistantes et sensibles plus efficaces que l'approche conventionnelle 100% R, surtout quand :
 - ▶ Horizons longs
 - ▶ Coûts de virulence intermédiaires
 - ▶ Niveaux épidémiologiques élevés et extrêmes
- ▶ Efficacité de la rotation optimale maintenue même avec incertitude sur les valeurs des paramètres du modèle
- ▶ Favoriser les variétés résistantes sur la base des coûts de virulence induits, plus que sur leur mode d'action (mais lien possible entre mode d'action et coûts)

Publication et conférences

Publication :



- ▶ Nilusmas *et al.*, 2020, *Evolutionary Applications* (volume 13, pages 2206-2221)

Conférences :

- ▶ HORTIMODEL 2016, Avignon
- ▶ Ecology and Agriculture Summit for Young scientists 2017, CEBC Chizé
- ▶ ECMTB 2018, Lisbonne

Perspectives

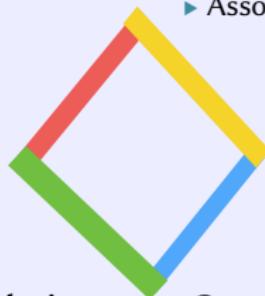
Expérimentations

- ▶ Obtenir davantage de données de **suivis temporels**



Rotations

- ▶ Tester des alternances avec **plusieurs gènes R**, pyramidés ou non
- ▶ Prendre en compte une **résistance partielle**



Critère d'optimisation

- ▶ **Mieux approximer le rendement**
- ▶ **Pénaliser** les saisons à faibles rendements
- ▶ Associer critère de rendement et **durabilité**

Acceptabilité

- ▶ Garantir des **revenus saisonniers acceptables** à l'échelle de l'exploitation (rotations asynchrones)
- ▶ Introduire **différentes espèces maraîchères**





M2P2



IPN



BIOCORE

Merci de votre attention!