

➤ Comment utiliser les variétés R dans l'espace et dans le temps

Frédéric Fabre – Chercheur – INRAE



➤ Plan de l'exposé



1

Déployer les variétés R : de quoi parle-t-on ?

Leviers et stratégies aux mains des sélectionneurs et des agriculteurs.

2

Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances

Ce que la théorie et la modélisation nous apprennent du pyramidage, des mélanges et mosaïques, et des rotations.

3

Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires

Le cas de la coopérative « Nous, les vignerons de Buzet » : co-construire et évaluer des stratégies avec le modèle landsepi.

4

Usages et mésusages des modèles pour l'aide au déploiement

Ce que nos modèles peuvent, et ne peuvent pas, dire à ceux qui décident.

➤ Déployer les variétés R : de quoi parle-t-on ?

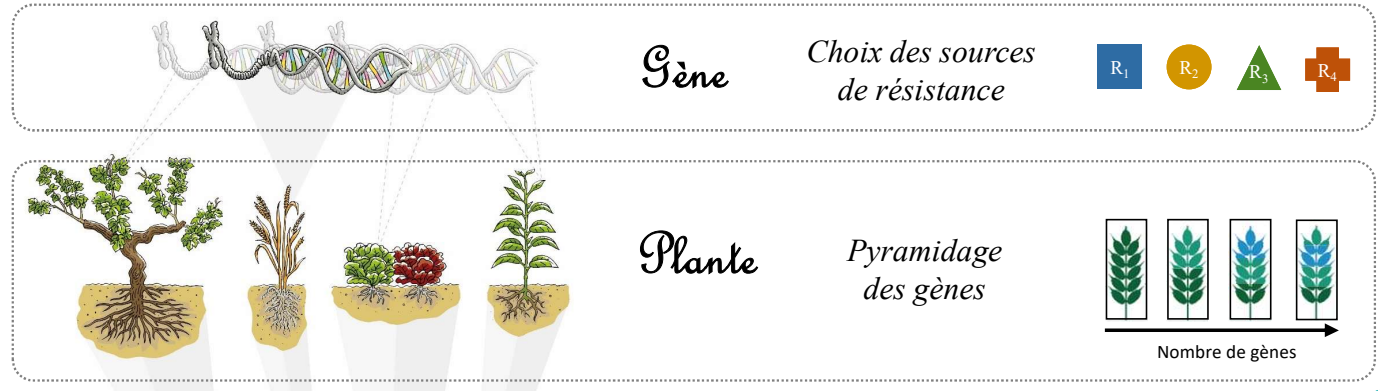


➤ Des leviers

Dans les mains des sélectionneurs

[Rimbaud et al. 2021]

- 1 Gènes de résistance
- 2 Fonds génétiques
- 3 Pyramidage



➤ Déployer les variétés R : de quoi parle-t-on ?

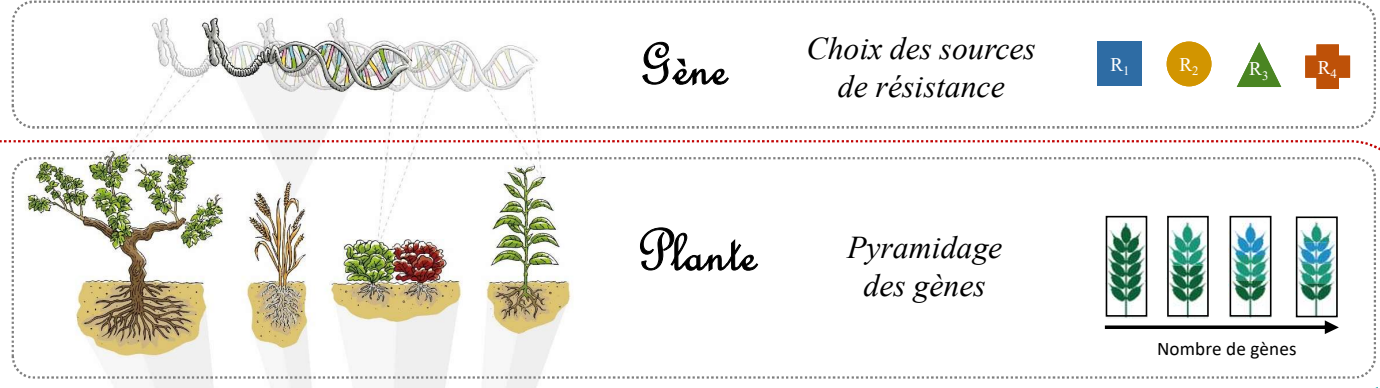


➤ Des leviers

Dans les mains des sélectionneurs

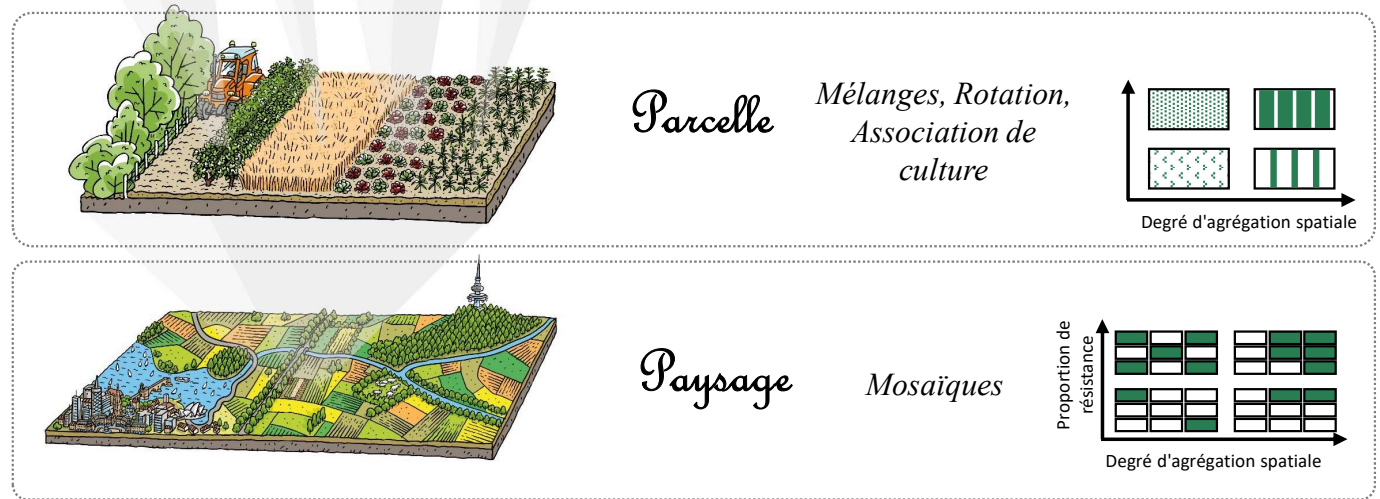
[Rimbaud et al. 2021]

- 1 Gènes de résistance
- 2 Fonds génétiques
- 3 Pyramidage



Dans les mains des agriculteurs

- 1 Choix des variétés
- 2 Mode d'association
(mélange, mosaïque)
- 3 Proportions relatives
- 4 Dispositions spatiales
- 5 Successions temporelles
- 6 Traitements



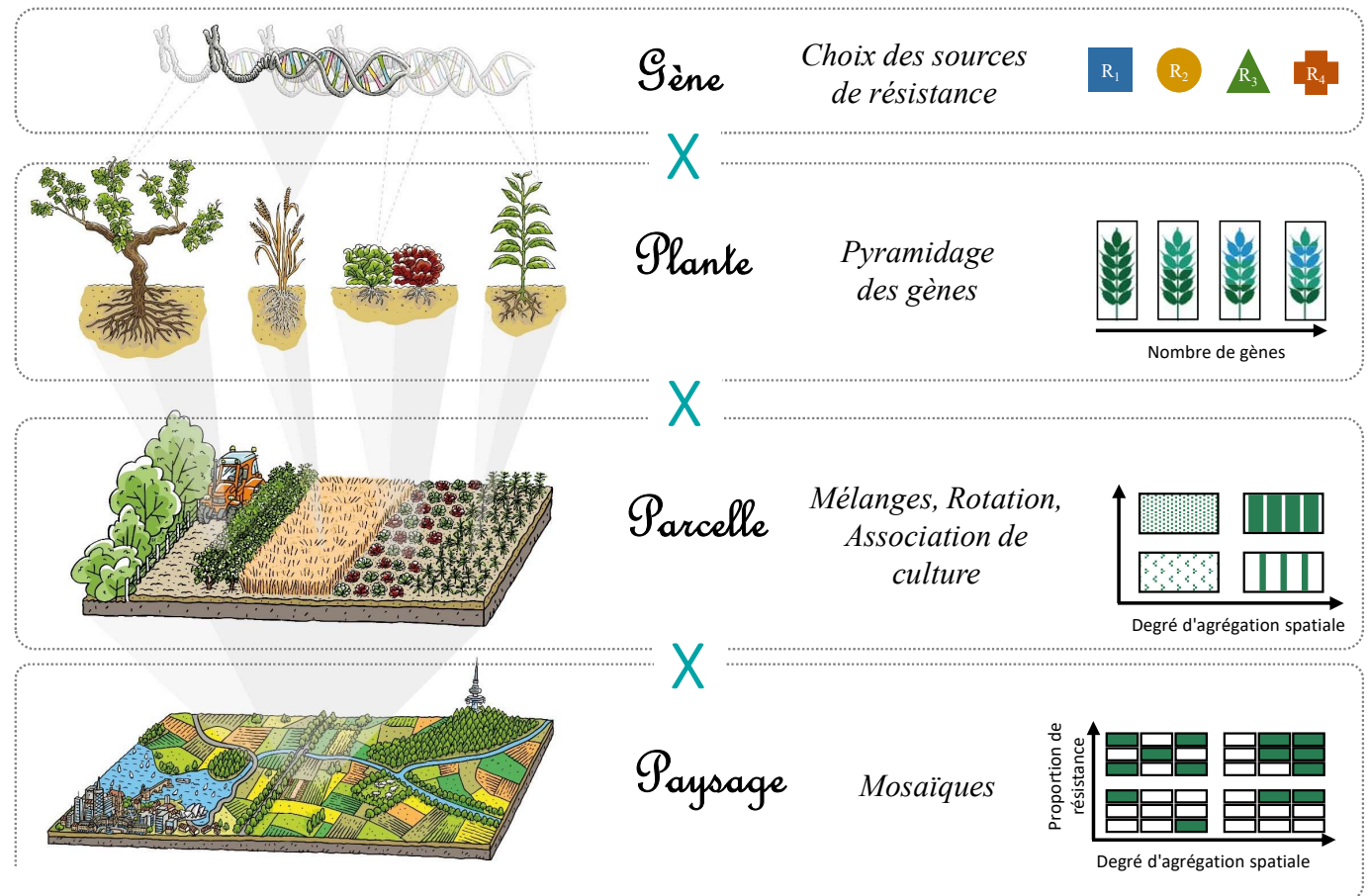
➤ Déployer les variétés R : de quoi parle-t-on ?

➤ Des leviers qui se combinent en stratégie



- Trop de stratégies possibles pour les comparer par l'expérimentation.
- Deux recours : les observations de terrain et la modélisation.
- Problème d'autant plus complexe que les stratégies agissent à la fois sur la propagation de l'épidémie et sur l'évolution du pathogène.

[Rimbaud et al. 2021]



➤ Déployer les variétés R : de quoi parle-t-on ?



➤ Des leviers qui agissent à la fois sur l'épidémiologie et l'évolution

Pyramidage

Associations variétales

Apparition des virulents

La probabilité d'apparition des virulents chute de plusieurs ordres de grandeur avec chaque nouvelle mutation
→ *réduit l'apparition des souches virulentes*

Effet dilution

En association, chaque variété est plus éloignée et moins dense : moins de transmissions, moins d'inoculum.
→ *ralentit la propagation de l'épidémie*

Sélection disruptive

En association, une souche virulente sur R1 est peu adaptée à R2 : aucun génotype n'est favorisé partout.
→ *freine la sélection des virulences*



(Mais) **l'improbable devient possible** dans les très grandes populations (10^{12} – 10^{13} spores / ha) ou si le pathogène recombine.
[McDonald et al. 2022]



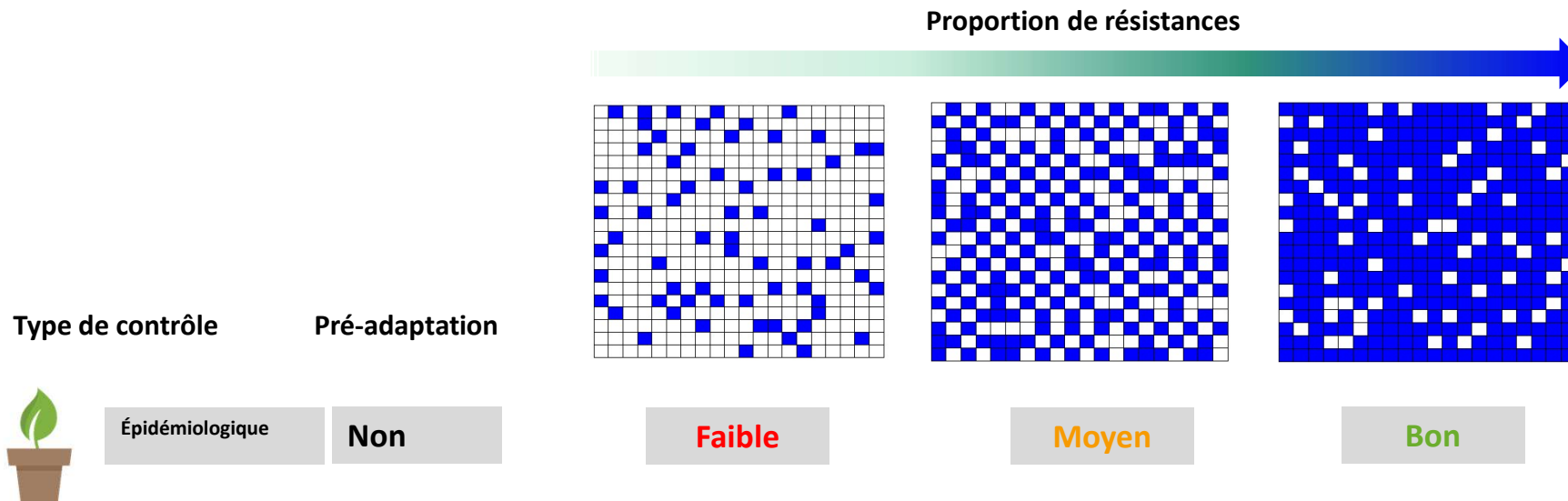
Requiert une **spécificité souche–variété**.
(Mais) **s'effondre si l'autoinfection domine** (dispersion très locale). [Mundt 2002]



(Mais) **des souches spécialistes coexistent** ; sans coût de virulence, une souche multi-virulente peut gagner la partie.

Le pyramidage limite **l'apparition des virulences** ; les associations variétales freinent **la propagation de l'épidémie et la sélection des virulences**.

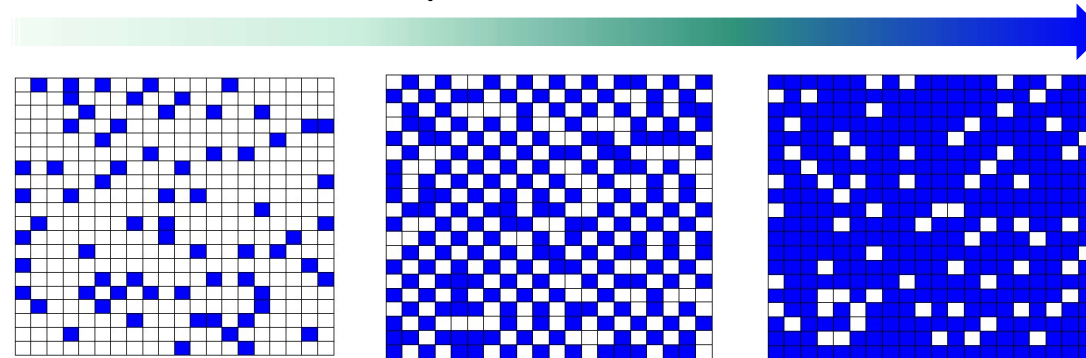
- Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances
- Pas de stratégie universelle efficace et durable



- Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances
- Pas de stratégie universelle efficace et durable



Proportion de résistances



Type de contrôle	Pré-adaptation
 Épidémiologique	Non
Épidémiologique	Oui

Faible

Moyen

Bon

Faible

Bon

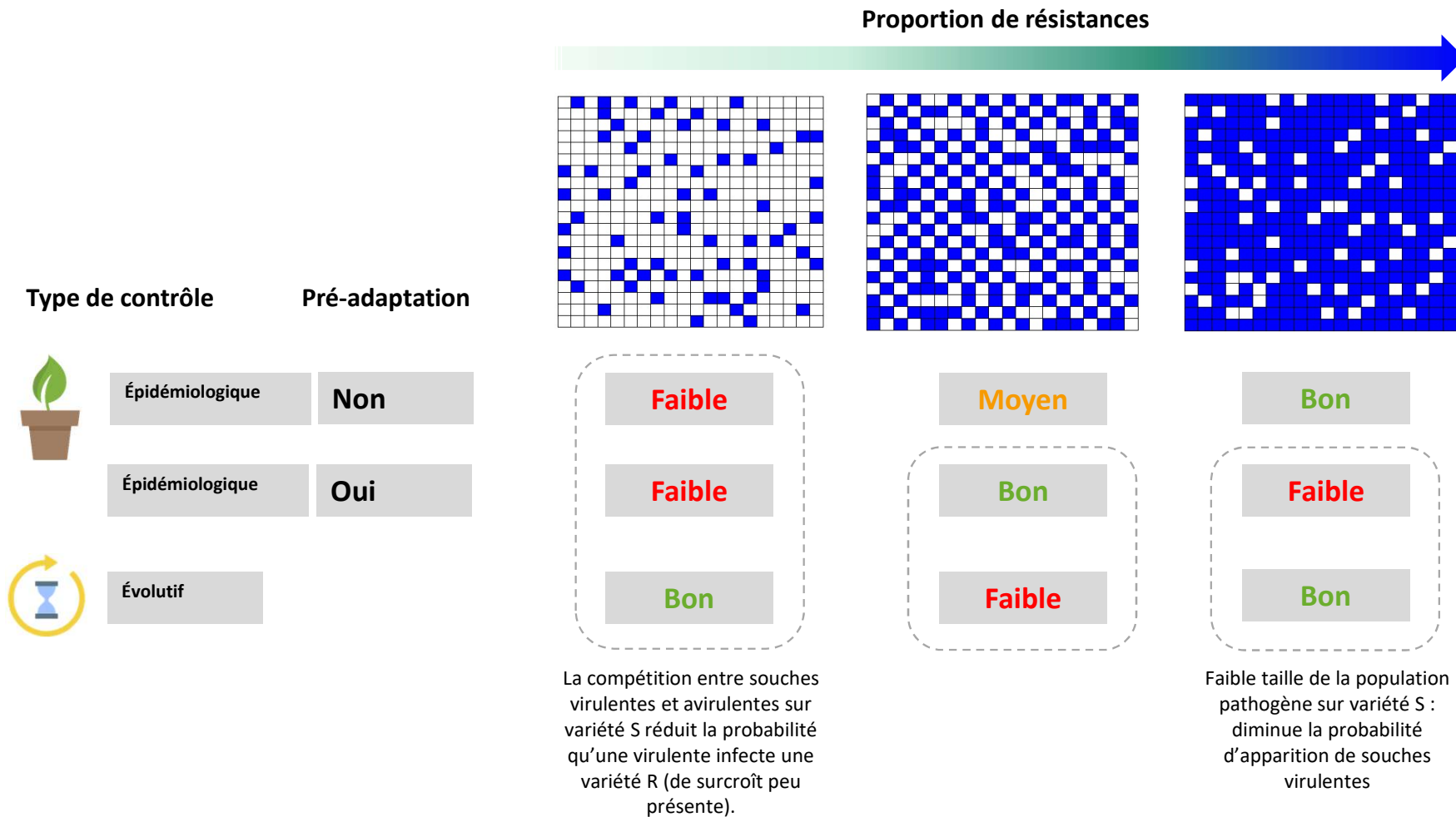
Faible

Compromis entre le temps d'invasion des souches virulentes (diminue avec la proportion de R) et effet de dilution (augmente avec la proportion de R)

➤ Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances



➤ Pas de stratégie universelle efficace et durable



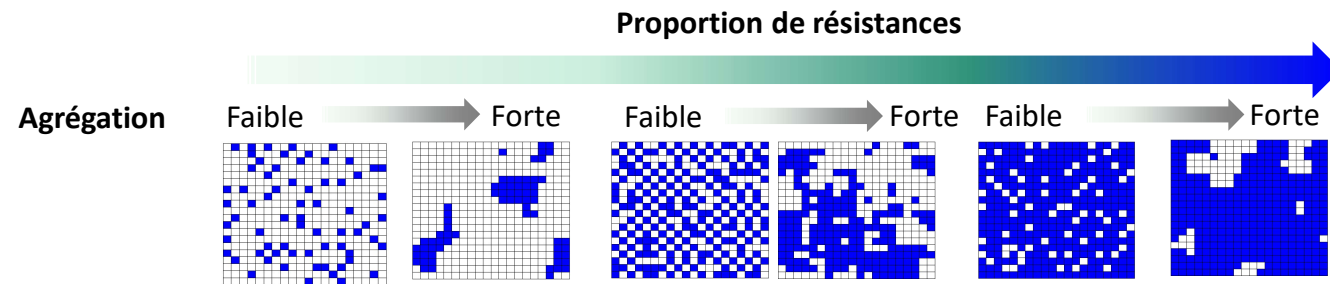
**Des compromis
efficacité –
durabilité se
dessinent**



➤ Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances



➤ Pas de stratégie universelle efficace et durable



Type de contrôle

Pré-adaptation



Épidémiologique

Non

Faible

Mauvais

Moyen

Faible

Bon

Moyen

Épidémiologique

Oui

Faible

Mauvais

Bon

Moyen

Faible

Mauvais



Évolutif

Bon

Très bon

Faible

Moyen

Bon

Très bon

L'agrégation dégrade le contrôle épidémiologique car la variété R protège moins efficacement la variété S par effet dilution

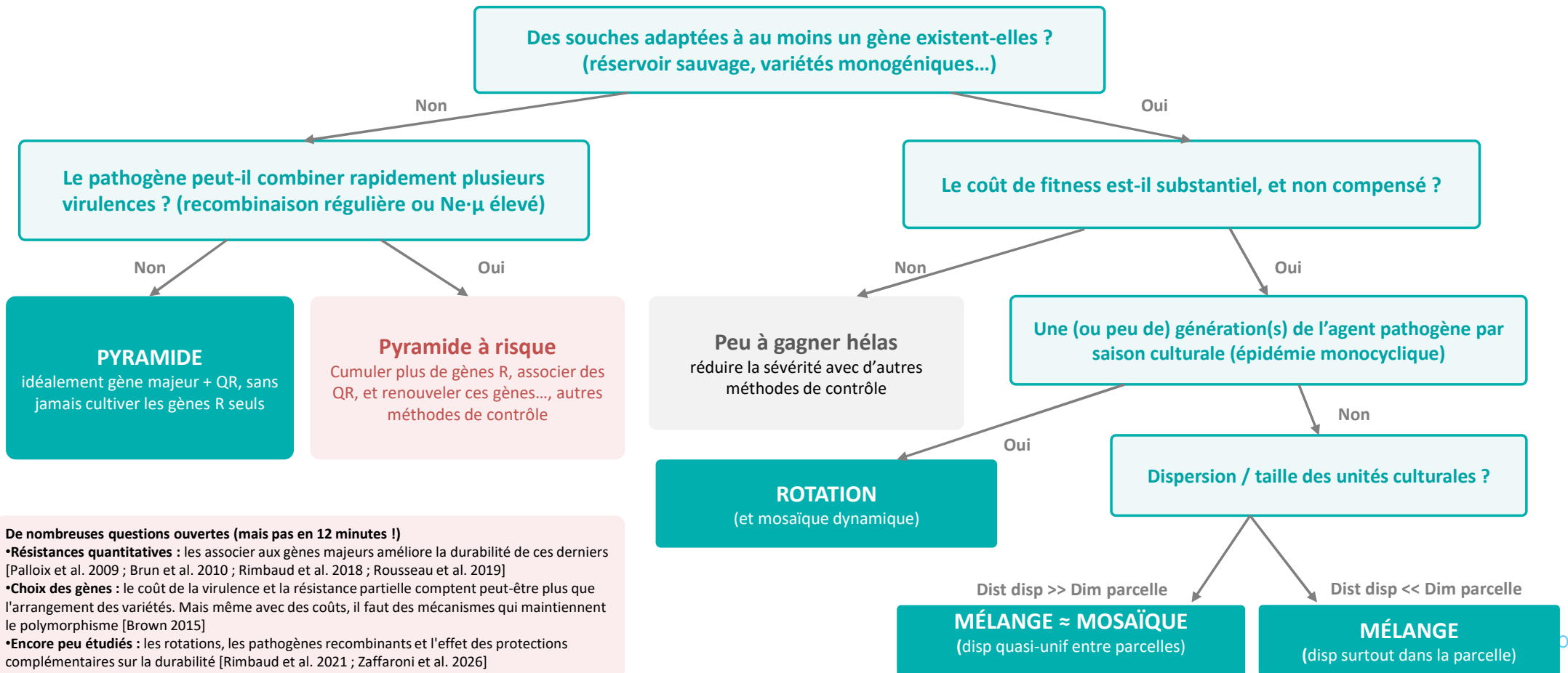
L'agrégation améliore le contrôle évolutif car les plantes R sont moins exposées aux souches mutantes qui émergent sur les plantes S

Des compromis efficacité – durabilité qui s'exacerbent



➤ Attendus des stratégies sur la gestion durable des résistances

➤ Quelques conclusions...et un arbre de décision *pour la durabilité*



De nombreuses questions ouvertes (mais pas en 12 minutes !)

- **Résistances quantitatives** : les associer aux gènes majeurs améliore la durabilité de ces derniers [Palloix et al. 2009 ; Brun et al. 2010 ; Rimbaud et al. 2018 ; Rousseau et al. 2019]
- **Choix des gènes** : le coût de la virulence et la résistance partielle comptent peut-être plus que l'arrangement des variétés. Mais même avec des coûts, il faut des mécanismes qui maintiennent le polymorphisme [Brown 2015]
- **Encore peu étudiés** : les rotations, les pathogènes recombinants et l'effet des protections complémentaires sur la durabilité [Rimbaud et al. 2021 ; Zaffaroni et al. 2026]

➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?



- **Sortie épidémiologique : Contrôle de la maladie**

capacité à réduire l'impact de la maladie



- **Sortie évolutive : Durabilité de la résistance**

capacité à retarder les contournements de résistances

Apport des
travaux
théoriques



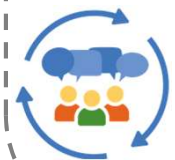
- **Sortie environnementale : Indice de fréquence de traitements (IFT)**

capacité à réduire les traitements



- **Sortie économique : Analyse coûts-bénéfices**

capacité des stratégies à réduire les charges d'exploitation



- **Sortie socio-économique : Intégrer les motivations et décisions des acteurs**

capacité des stratégies à prendre en compte les contraintes des acteurs

Pas toujours
suffisant sur le
terrain

➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?

➤ Le modèle *landsepi*

Diffusion et évolution
d'un agent pathogène

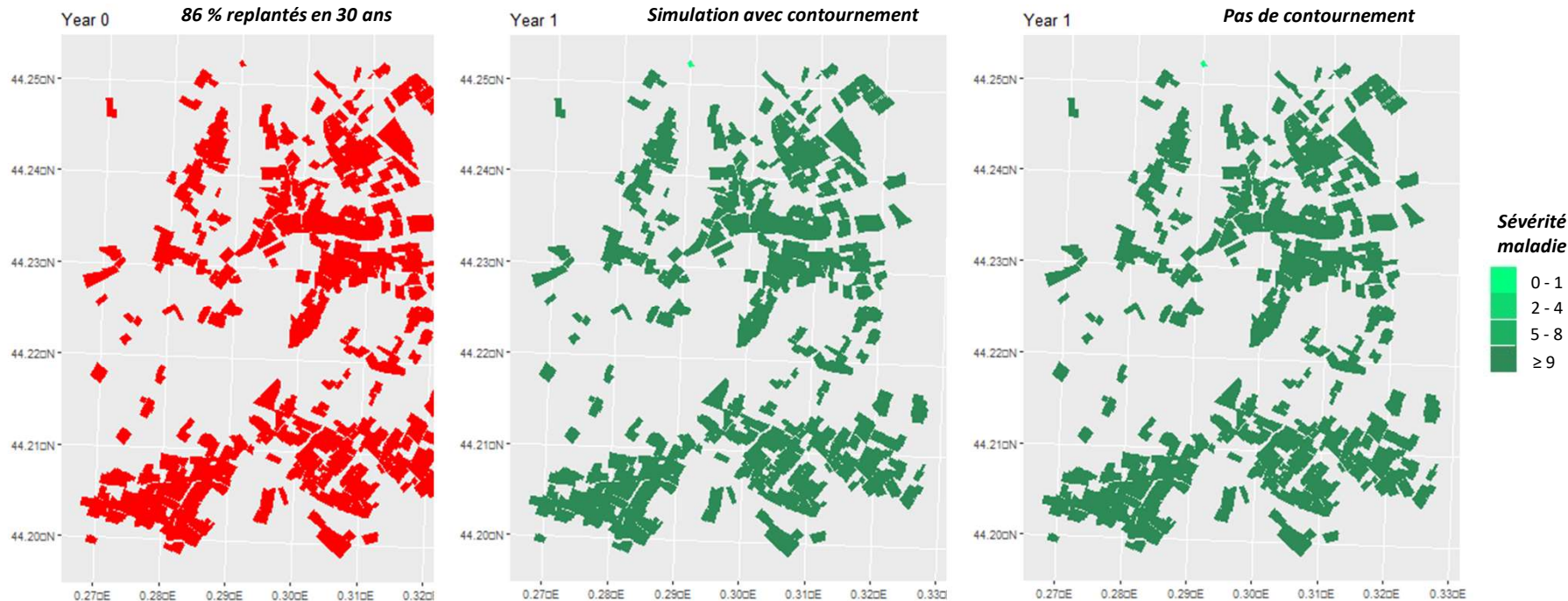
dans les paysages
agricoles

durant plusieurs
saisons de culture

intégrant la
variabilité

Un modèle démo-génétique spatialement explicite, temporel et stochastique...

...pour évaluer les stratégies de déploiement des résistances

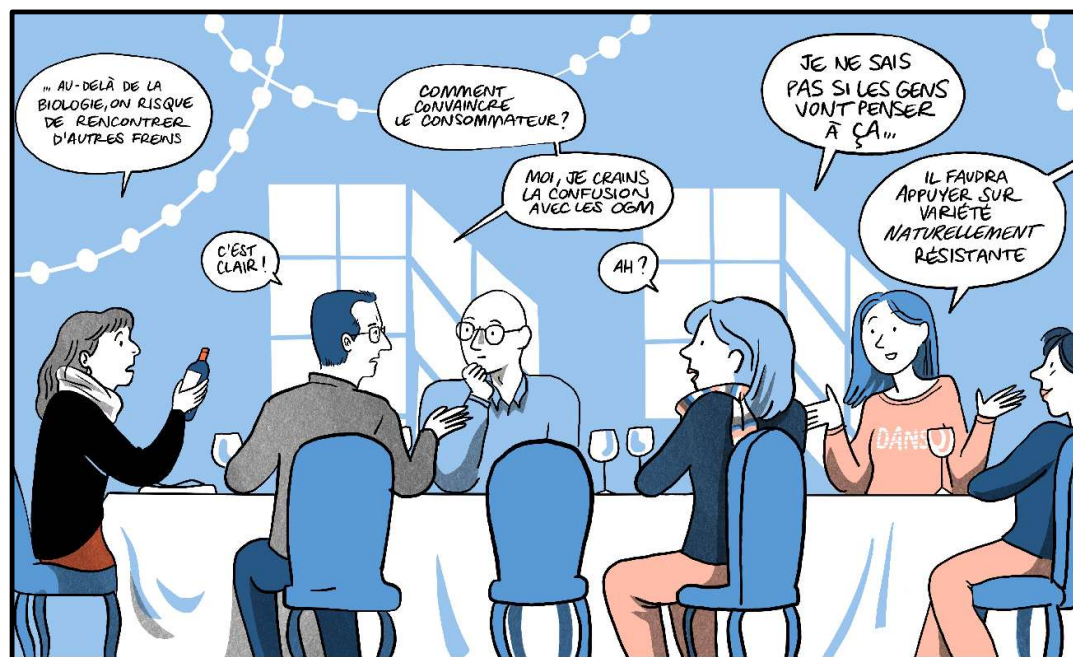
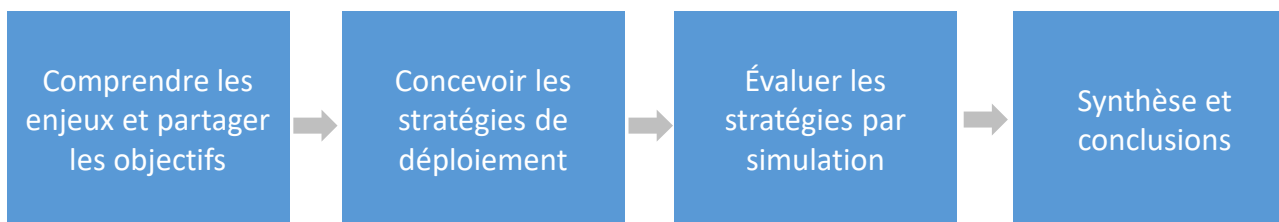


R package
(2018)

➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?



- Une série de 4 ateliers au printemps 2023 pour co-construire et tester des stratégies de déploiement de variétés de vigne résistantes au mildiou

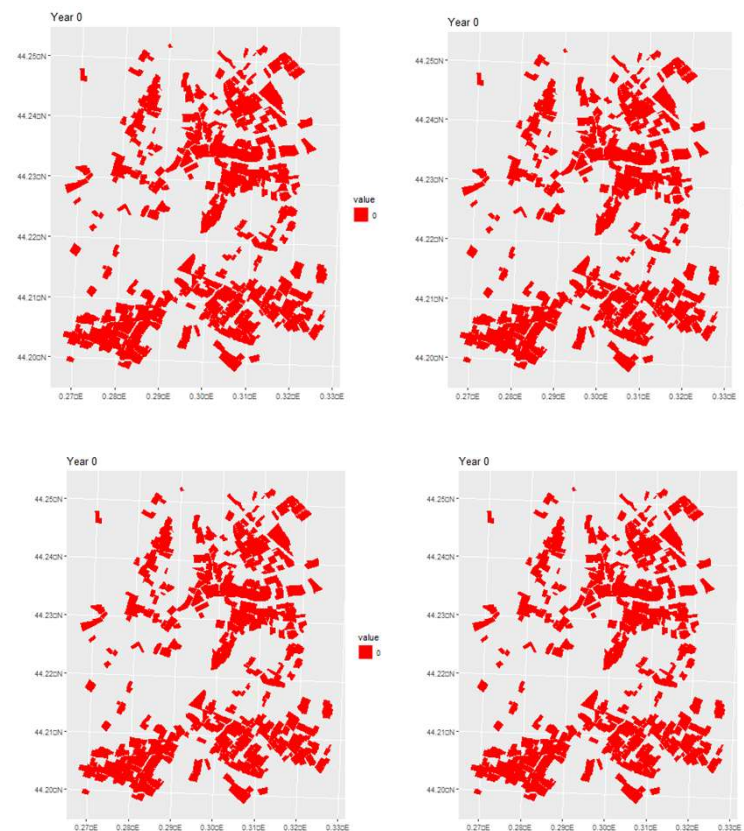


➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?



- Douze scénarios testés sur le vrai parcellaire de Buzet puis six dans un second temps, et deux favoris au final (S5 et S6)

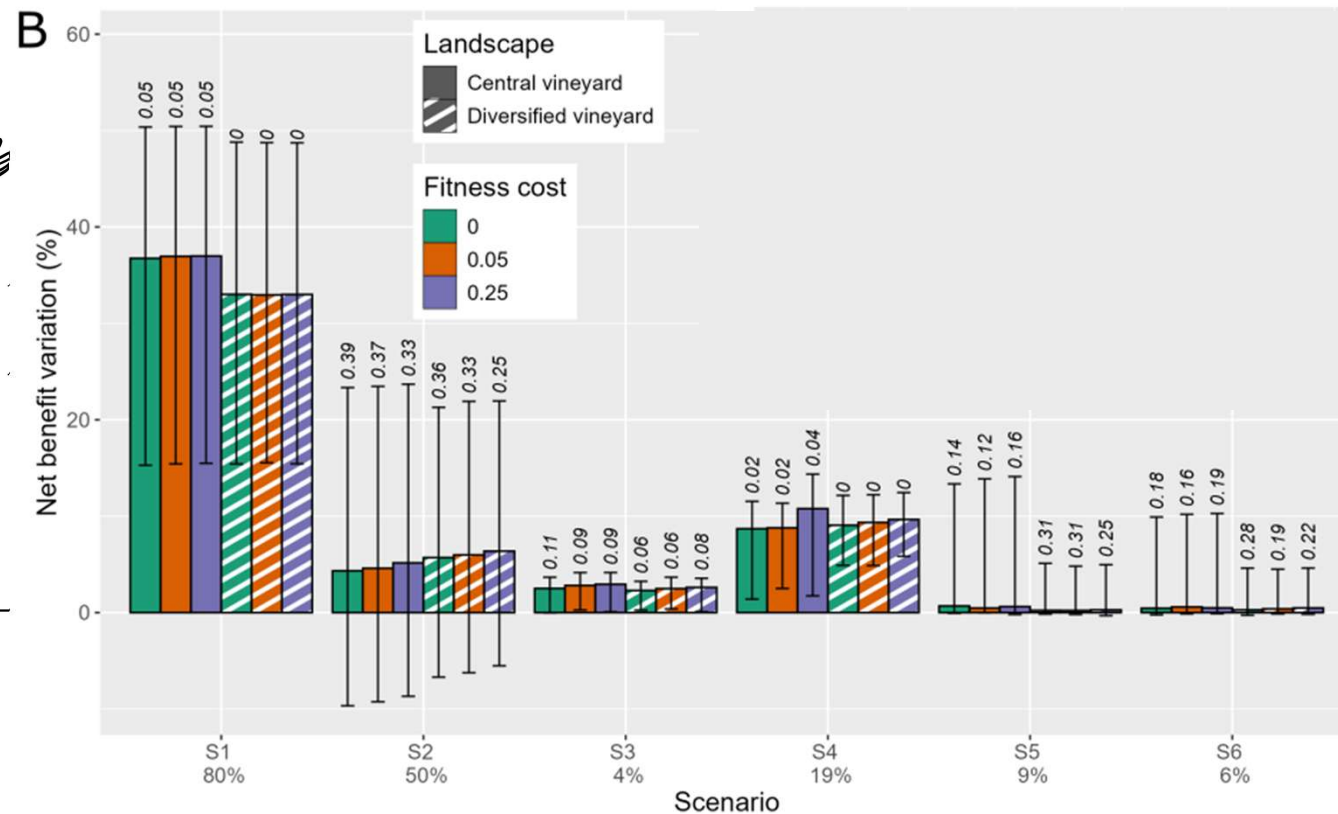
Scénario	Modalité de replantation	% var R en année 30
S0	Replanter variété S les parcelles ≥ 30 ans	0%
S1	Replanter variété R les parcelles ≥ 30 ans	100%
S2	Replanter chaque année variété R dans 3,3% des parcelles les plus âgées	98%
S3	Replanter variété R les parcelles ≥ 30 ans jusqu'à 5% par domaine	5%
S4	Replanter variété R les parcelles ≥ 30 ans jusqu'à 20% par domaine	19%
S5	Replanter variété R les parcelles situées dans des ZNT aquatiques	9%
S6	Replanter variété R les parcelles situées dans des ZNT riverains	6%



➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?



- Variation du bénéfice net (%) des exploitations selon le scénario
 - Bénéfice net = chiffre d'affaires – coût opérationnel (traitements) – coût de plantation
 - À l'échelle de la coopérative, le déploiement est très souvent favorable...
 - ... mais certaines exploitations sont perdantes : jusqu'à 39 % d'entre elles sous le scénario S2.



➤ Vers des stratégies de déploiement ancrées dans les territoires ?



- Concevoir des **incitations financières pour préserver les intérêts de chaque agriculteur** en faveur du bien collectif, sur la base d'un objectif territorial partagé



- **Fin de l'histoire, vraiment ? Que valent ces classements de stratégies ?** L'histoire des modèles d'aide à la décision est aussi **une histoire d'avertissements** [fièvre aphteuse (Royaume-Uni, 2001), COVID-19].



➤ Usages et mésusages des modèles pour l'aide au déploiement

➤ Prévoir ou projeter : deux usages bien différents, source d'un décalage avec les attentes des praticiens

- **Prévoir** : sur quelques semaines, l'inertie épidémique rend la prévision possible, et les observations viennent vite la confirmer ou l'infirmer [Sofonea et al. 2022 ; Nixon et al. 2022]
- **Projeter** : sur le long terme, le modèle explore des futurs possibles, qui ne valent que sous des hypothèses largement incertaines
- Juger de la **durabilité** d'une résistance sur plusieurs années **relève de la projection** : aucune observation ne viendra la valider, faute de monde parallèle sans déploiement
- **La question posée au modèle change donc :**
 - non plus « dans combien d'années la résistance sera-t-elle contournée ? »
 - mais « quel classement conditionnel (aux hypothèses) pour les stratégies testées, et pourquoi ? »
- La confiance repose sur la plausibilité des mécanismes et l'exploration systématique des hypothèses [Sofonea et al. 2022 ; James et al. 2021]

➤ Usages et mésusages des modèles pour l'aide au déploiement



➤ Trois pièges connus, et nos parades

Prédire dans l'urgence

Le modèle se substitue au jugement d'expert et conduit à des actions drastiques et irréversibles.

(Kitching et al. 2006 ; James et al. 2021)



Hors contexte de crise, le choix est réversible ; **la décision revient à la coopérative**, qui pèse aussi ce que le modèle ignore.

Complexité sans ancrage

On détaille à l'excès certains processus alors que des paramètres clés restent incertains de plusieurs ordres de grandeur.

(May 2004 ; Ezanno et al. 2022)



Les paramètres mal connus (coût de virulence, taux de mutation) sont **explorés sur une gamme plausible** plutôt que fixés « arbitrairement ».

Fausse précision

Un chiffre rassure et semble étendre la maîtrise au-delà de ce que le modèle peut réellement dire.

(Kitching et al. 2006 ; Pearce 2020)



Les résultats sont présentés comme des **classements conditionnels, avec leur variabilité** : selon les simulations, la résistance tient ou elle est contournée.

Associer la **cave coopérative** à l'explicitation de la démarche puis à l'élaboration des scénarios et des critères de comparaison **permet d'éviter certains écueils**.

Ne pas céder à l'illusion de la fausse précision, mais **rendre l'incertitude visible et la discuter**.

➤ Usages et mésusages des modèles pour l'aide au déploiement



➤ Ce que notre approche participative ne règle pas

Un seul modèle

Nous bornons l'incertitude sur les paramètres, pas celle qui tient à la structure du modèle : seule la confrontation à des modèles indépendants le permettrait.

[James et al. 2021 ; Ezanno et al. 2022]

Une confiance partagée excessive

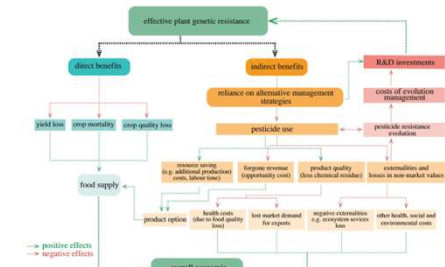
À force de co-construire, modélisateurs et praticiens peuvent s'auto-convaincre de la robustesse de leur approche et sous-estimer l'incertitude. [Pearce 2020]

Un cadrage disciplinaire

landsepi a été conçu par des épidémiologistes et biologistes de l'évolution ; il ne suit qu'une maladie et **ignore les effets de la météo, du changement climatique, les marchés, la charge de travail ou la biodiversité**. Ce qui est exclu du modèle par construction n'est pas pour autant sans importance.

[Kitching et al. 2006 ; Brown 2015]

Bénéfices économiques directs et indirects de la mise en œuvre de stratégies durables de déploiement des variétés résistantes



[Geffers et al. 2023]

Perspectives

Confronter nos classements à des modèles indépendants et mieux connaître les paramètres clés, comme le taux de mutation.

Faire du suivi de terrain (Oscar !)

[Pélissier et al., 2026]



Conclusion : pas de stratégie universelle, et sur le terrain l'économie et les acteurs comptent autant que la durabilité. Les modèles ne prédisent pas : ils éclairent des compromis, sous hypothèses, et aident à décider en rendant l'incertitude visible.

➤ Remerciements



Adeline Alonso-Ugaglia
Laurent Deliere
Isabelle Demeaux
Frédéric Fabre
Anne-Sophie Miclot
Julien Papaix
Loup Rimbaud
Jean-François Rey
Marta Zaffaroni



Sébastien Bourguignon
Carine Galante
Carine Magot
Pierre Philippe



Vincent Collet
Hélène Lovato

Louise Plantin, Illustratrice
Gautier Sabrià, Sociologue



Projet MEDEE



Projet COMBINE

