

INRAE

**Résistance aux fongicides chez les
champignons phytopathogènes:**

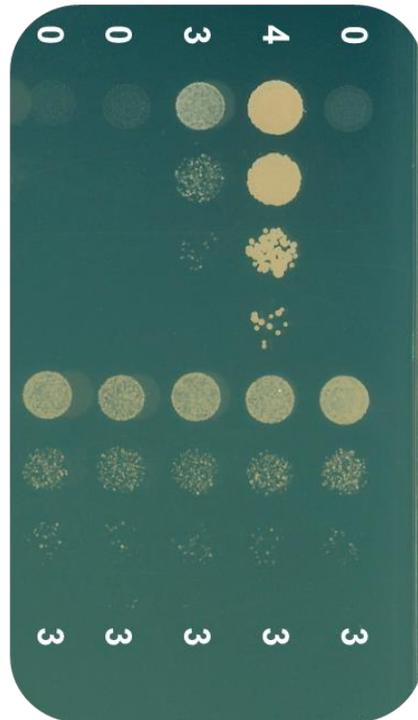
> De quoi parle-t-on et comment la gérer?

Anne-Sophie Walker
INRAE BIOGER
Anne-sophie.walker@inrae.fr



Qu'est ce que la résistance des champignons phytopathogènes aux fongicides?

Résistance biologique (au laboratoire)



Croissance sur milieu de culture amendé avec une dose de fongicide létale pour les souches de référence

Résistance en pratique (au champ)



Population sensible au fongicide



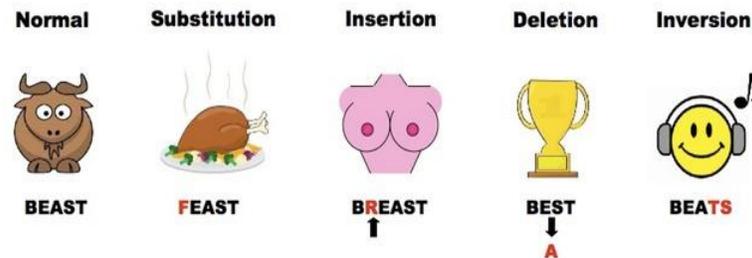
Population résistante au fongicide

D'où vient la résistance?

Les génomes sont sujets à des modifications **naturelles** (= mutations)



Ces **mutations** sont dues à des erreurs des enzymes recopiant ou réparant l'ADN dans les cellules.

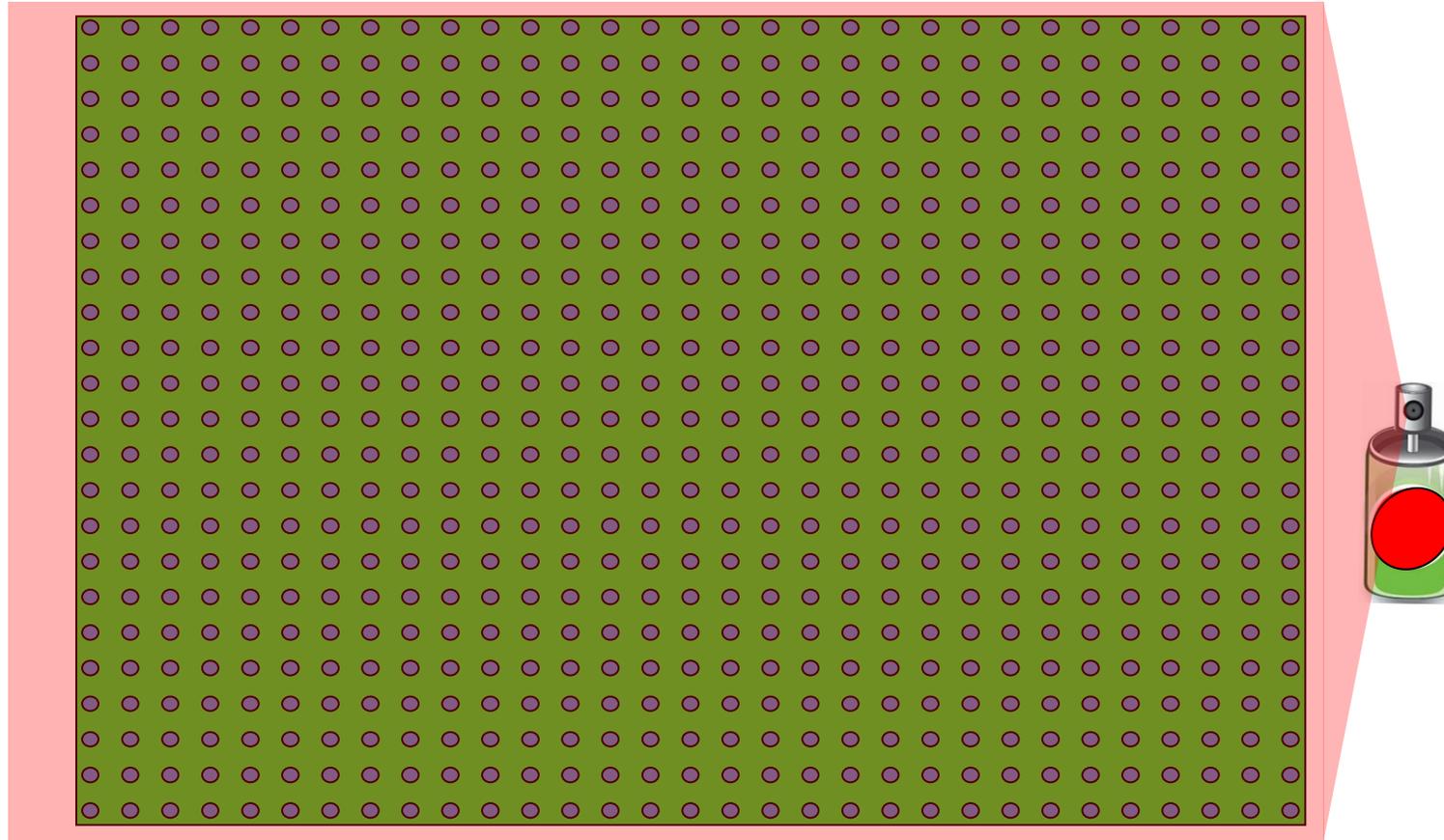


Des mutations surviennent chez **tous** les êtres vivants

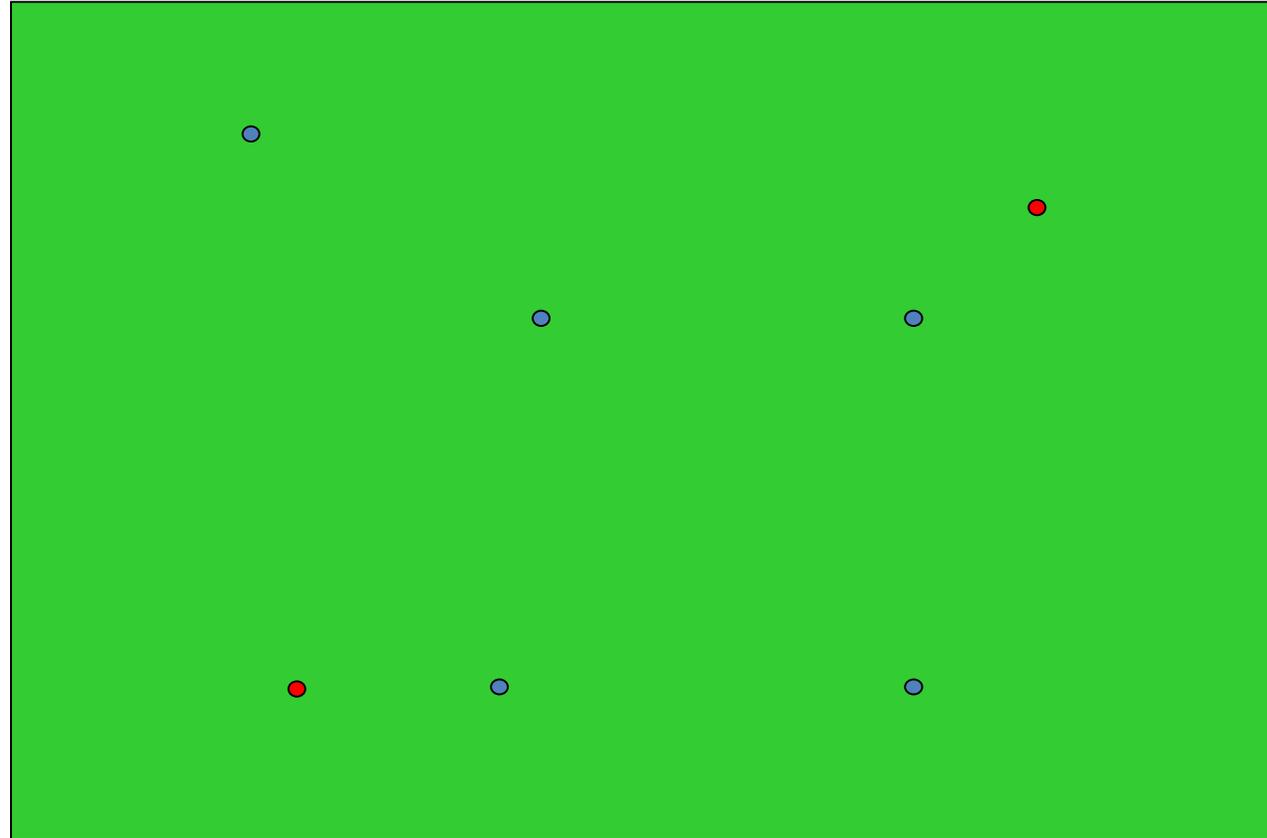


Les individus résistants sont des mutants spontanés (**naturels**)

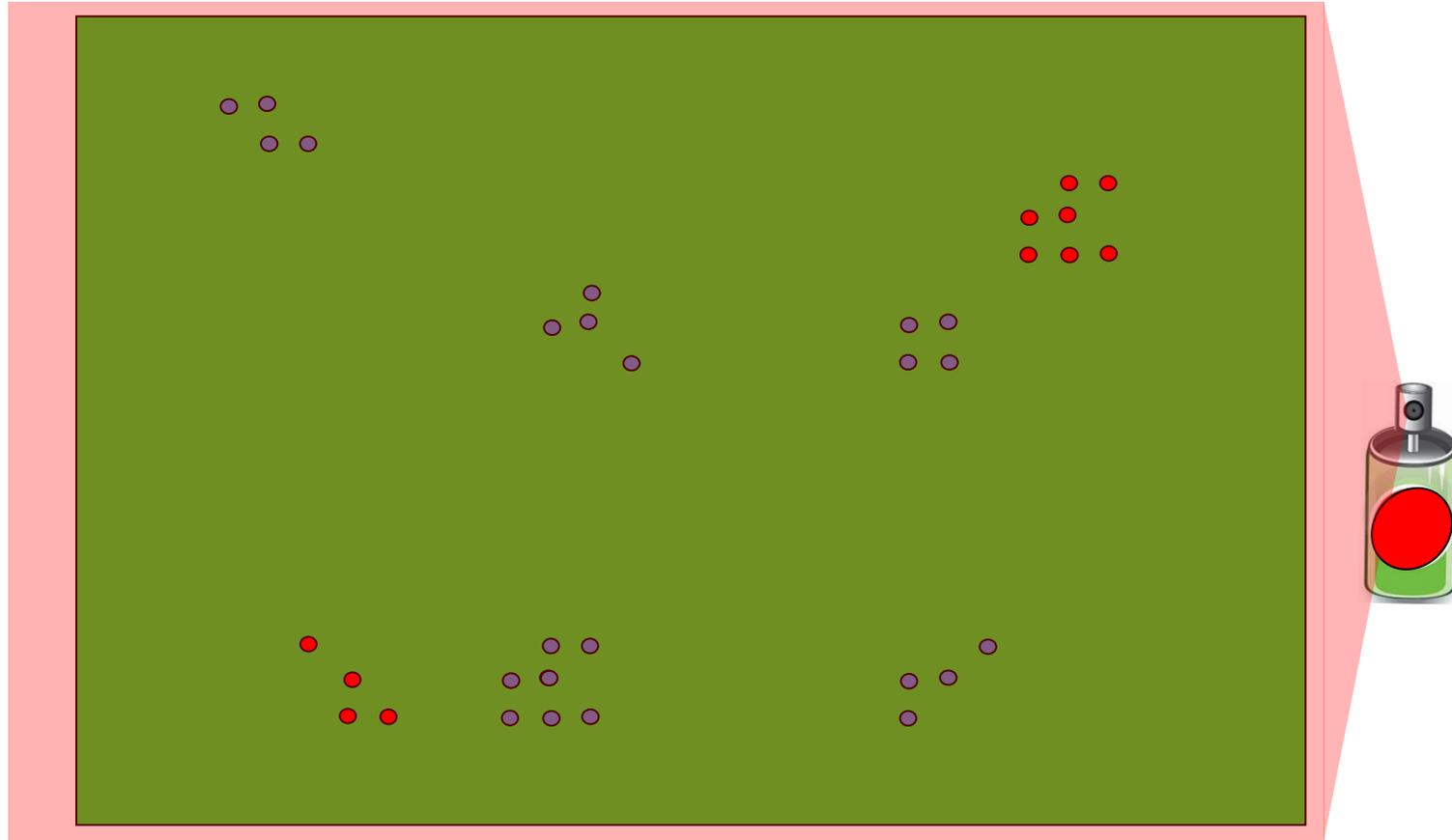
Appliquer un fongicide = sélectionner la résistance



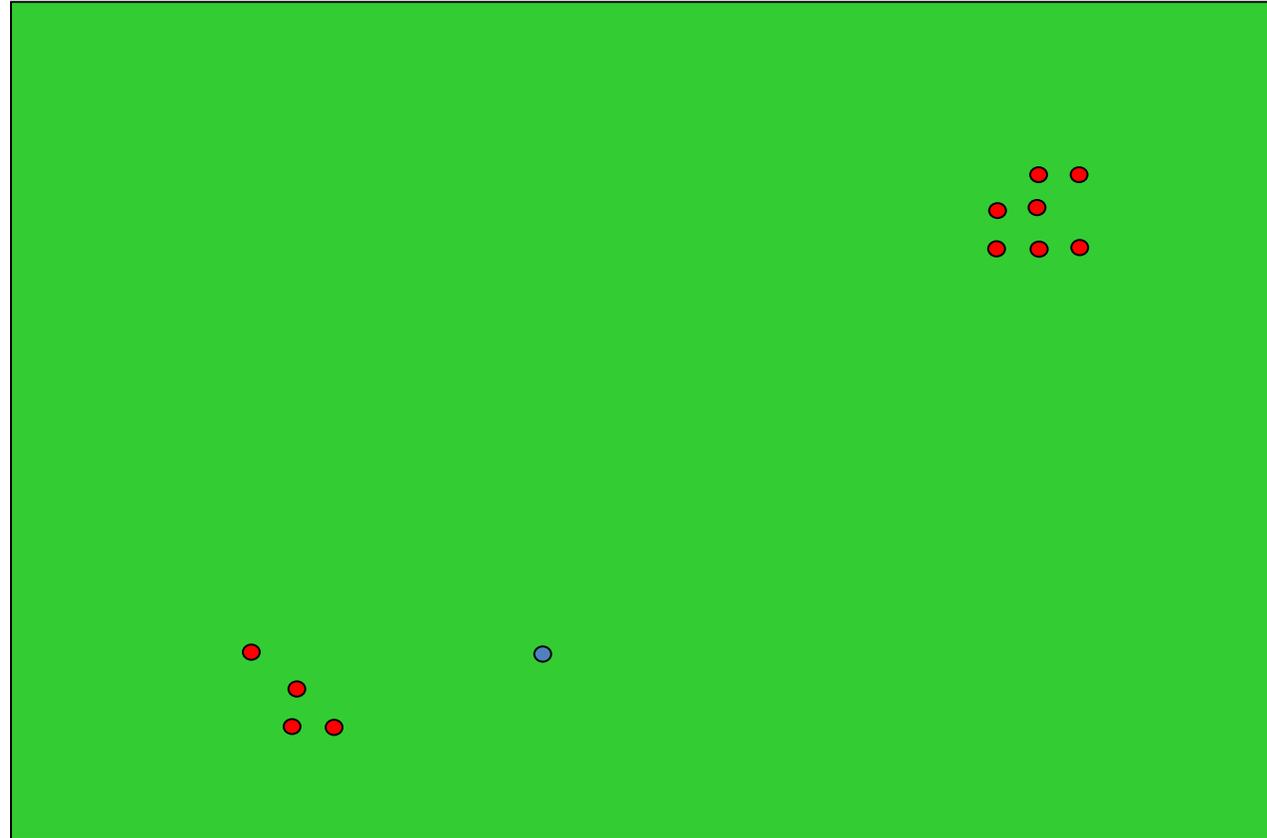
Appliquer un fongicide = sélectionner la résistance



Appliquer un fongicide = sélectionner la résistance



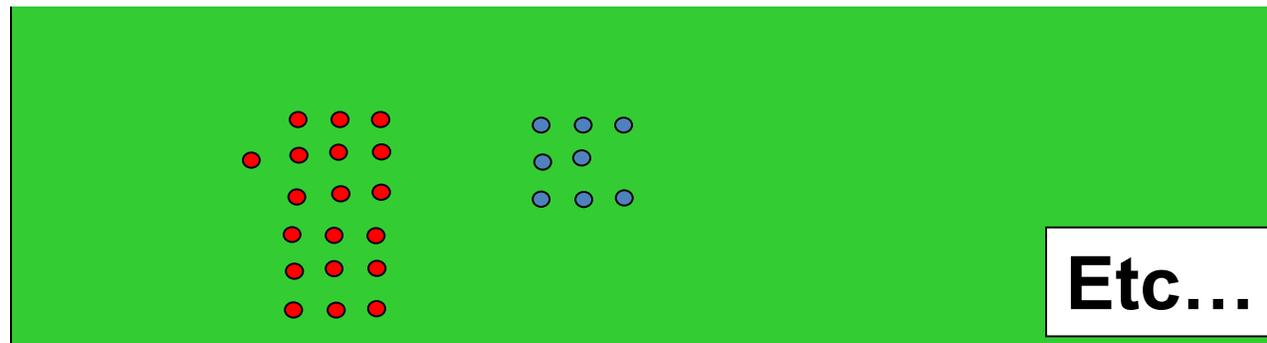
Appliquer un fongicide = sélectionner la résistance



Appliquer un fongicide = sélectionner la résistance

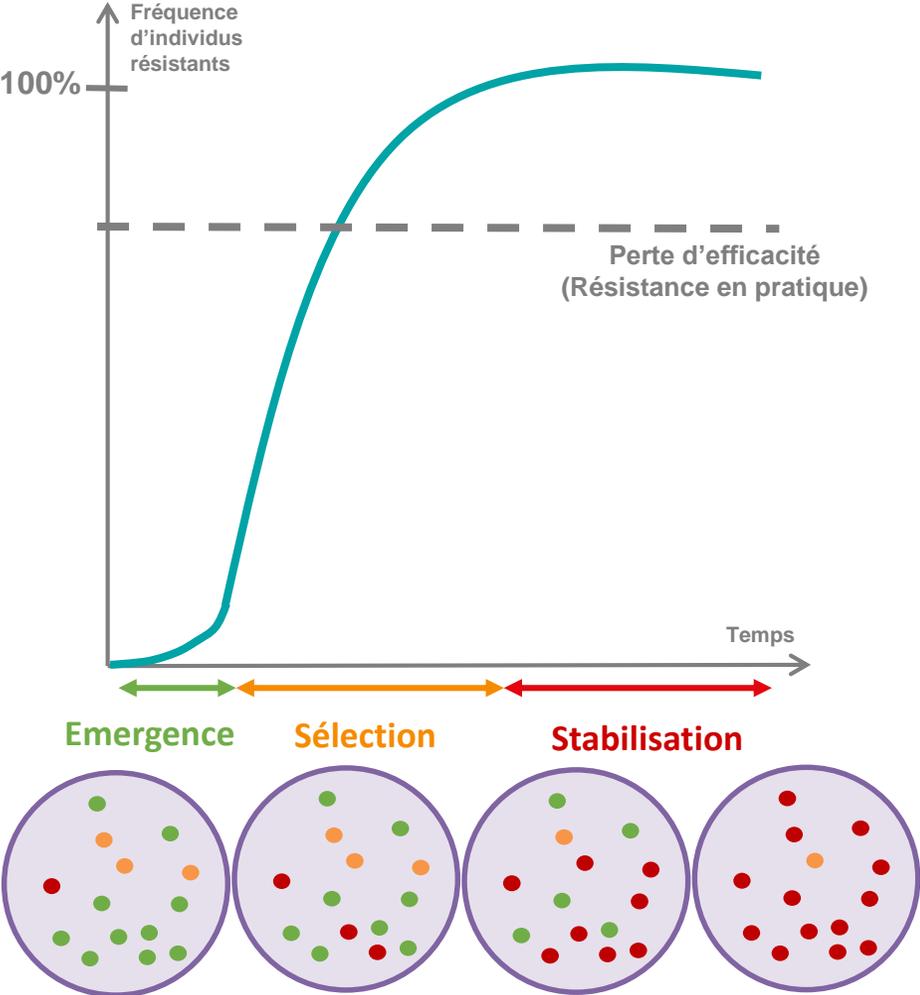


↑ fréquence des résistants à chaque cycle de sélection
(plus ou moins rapide en fonction du coût éventuel de la résistance)

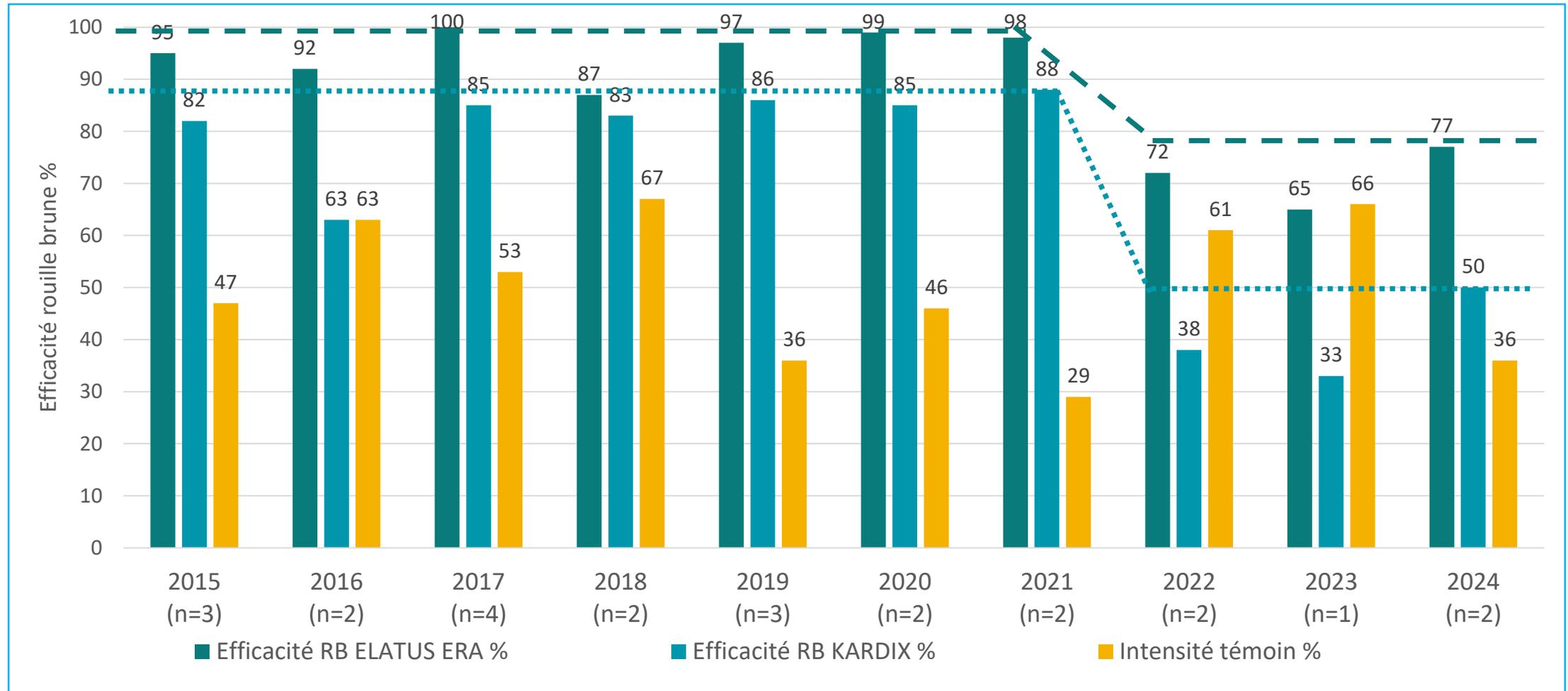


Pression de sélection **monotone** et **récurrente** =
optimal pour la sélection de résistances

Sélection de résistance et résistance en pratique



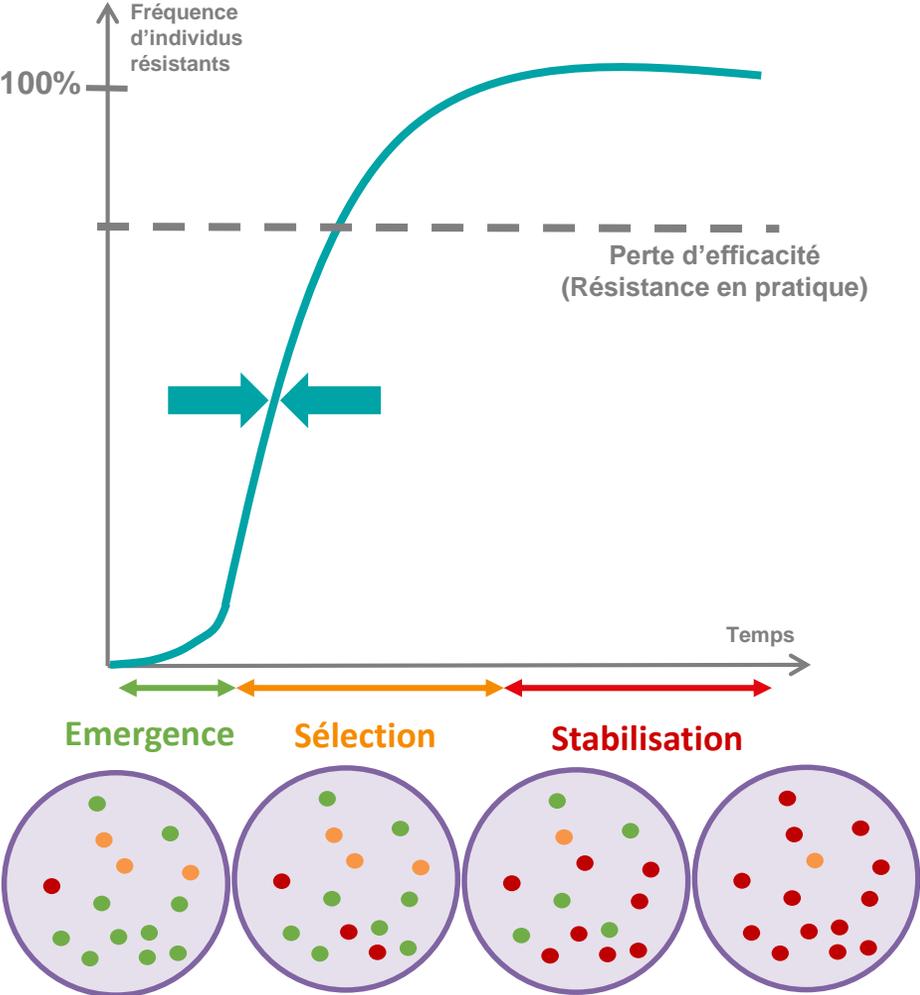
Évolution de l'efficacité de l'ELATUS ERA 0.7-0.75 l/ha et du KARDIX 0.75-0.9 l/ha sur rouille brune de 2015 à 2024



ELATUS ERA 0.7 l/ha 2017 to 2019
 ELATUS ERA 0.75 l/ha 2015 to 2016 & 2020 to 2024
 KARDIX 0.9 l/ha 2015 to 2021
 KARDIX 0.75 l/ha 2022 to 2024



Sélection de résistance et résistance en pratique



Facteurs influençant la sélection

Facteurs biologiques et écologiques

- Nombre de générations
- Fécondité / reproduction sexuée
- Capacité de dissémination, mobilité
- Nombre de cultures hôtes
- Présence de « réservoirs » d'individus sensibles



Bio-agresseur

Facteurs inhérents au PPP:

- Mode d'action
- Persistance
- Appartenance à une famille « à risque »
- Type de résistance possible (RLC/RNLC)



PPP

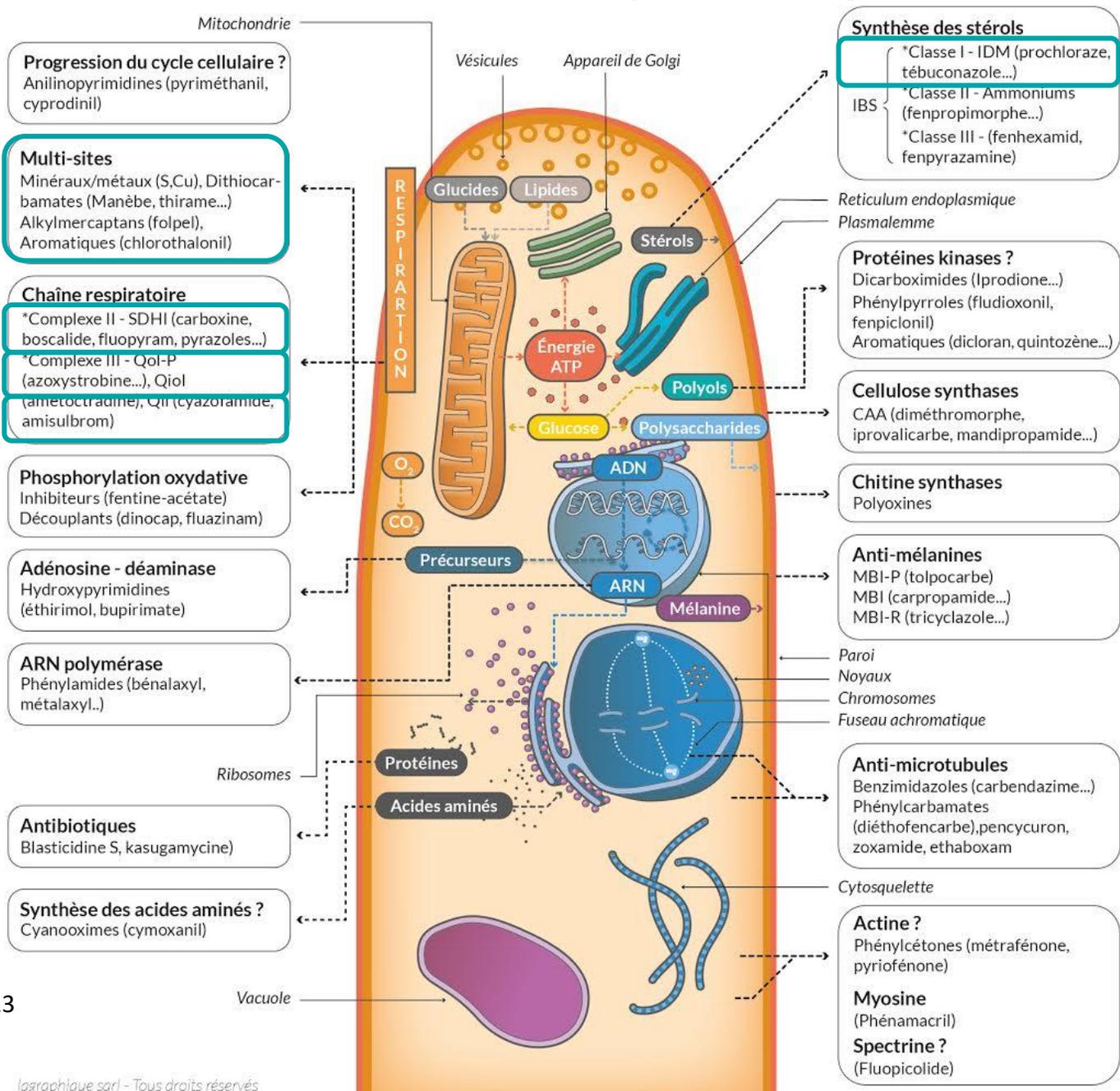
Facteurs génétiques de la résistance

- Mutations conférant une résistance: nombre, niveau de dominance
- Évolution « directe » / par accumulation de gènes ou de mutations
- Fréquence des individus porteurs
- Effets pléiotropes (« fitness » des résistants)

Facteurs opérationnels :

- Position du traitement
- Surfaces traitées
- Qualité de l'application / Efficacité
- Nombre de générations traitées
- Nombre d'applications par saison
- Diversité de la rotation

Mode d'action des fongicides agricoles

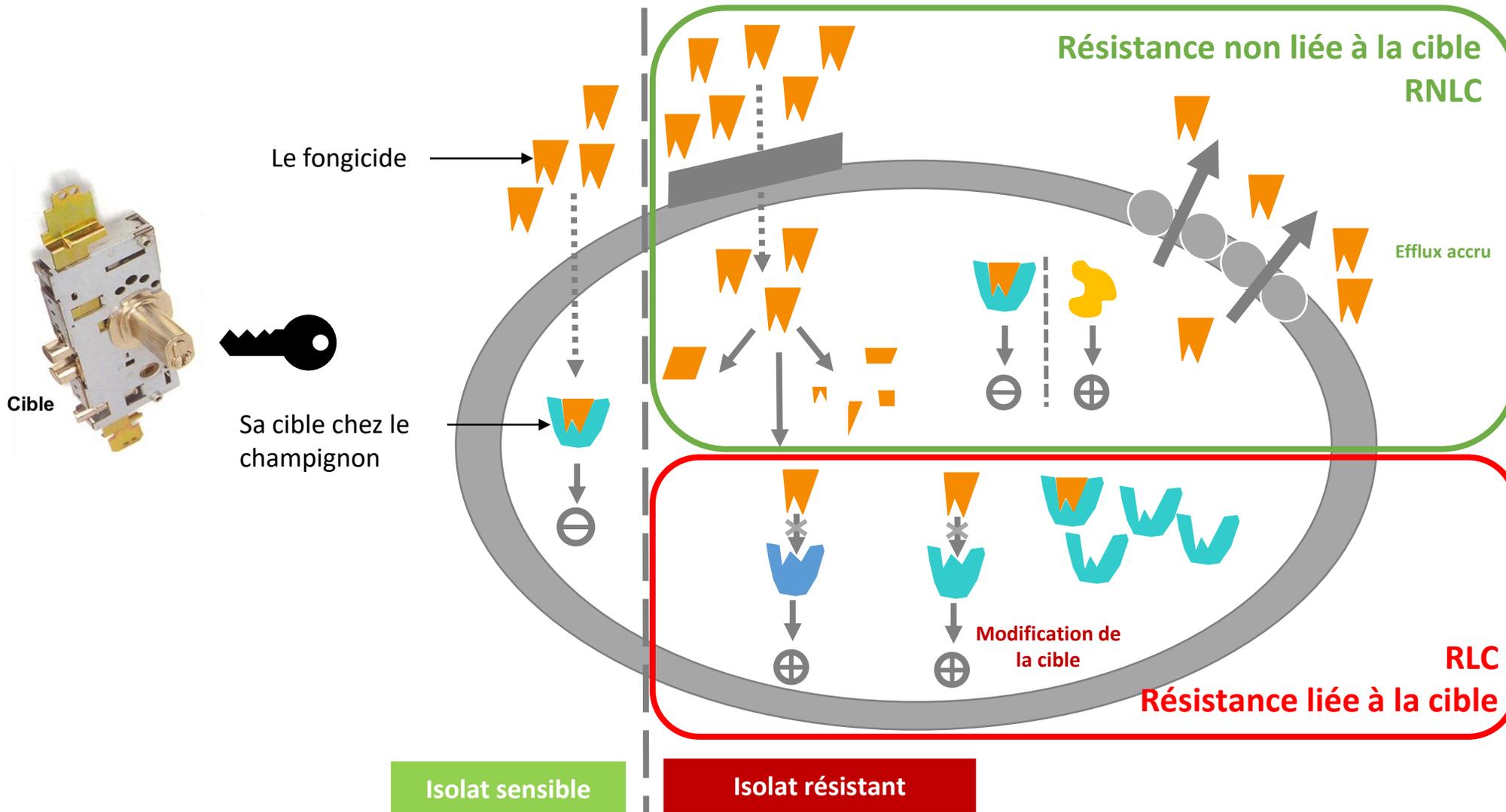


-Triazoles: méfentrifluconazole (=revysol), prothioconazole, metconazole, tébuconazole

- Multisites:**
Soufre, folpel
- SDHI:** boscalide, fluxapyroxade, bixafène, benzovindiflupyr (=solatenol)
- Strobilurines:** azoxystrobine, pyraclostrobine
- Qil:** fenpicoxamide

Walker et Leroux, 2023

Mécanismes de résistance chez les champignons



Souvent:

- Résistance faible
- Affecte des fongicides de modes d'action différents

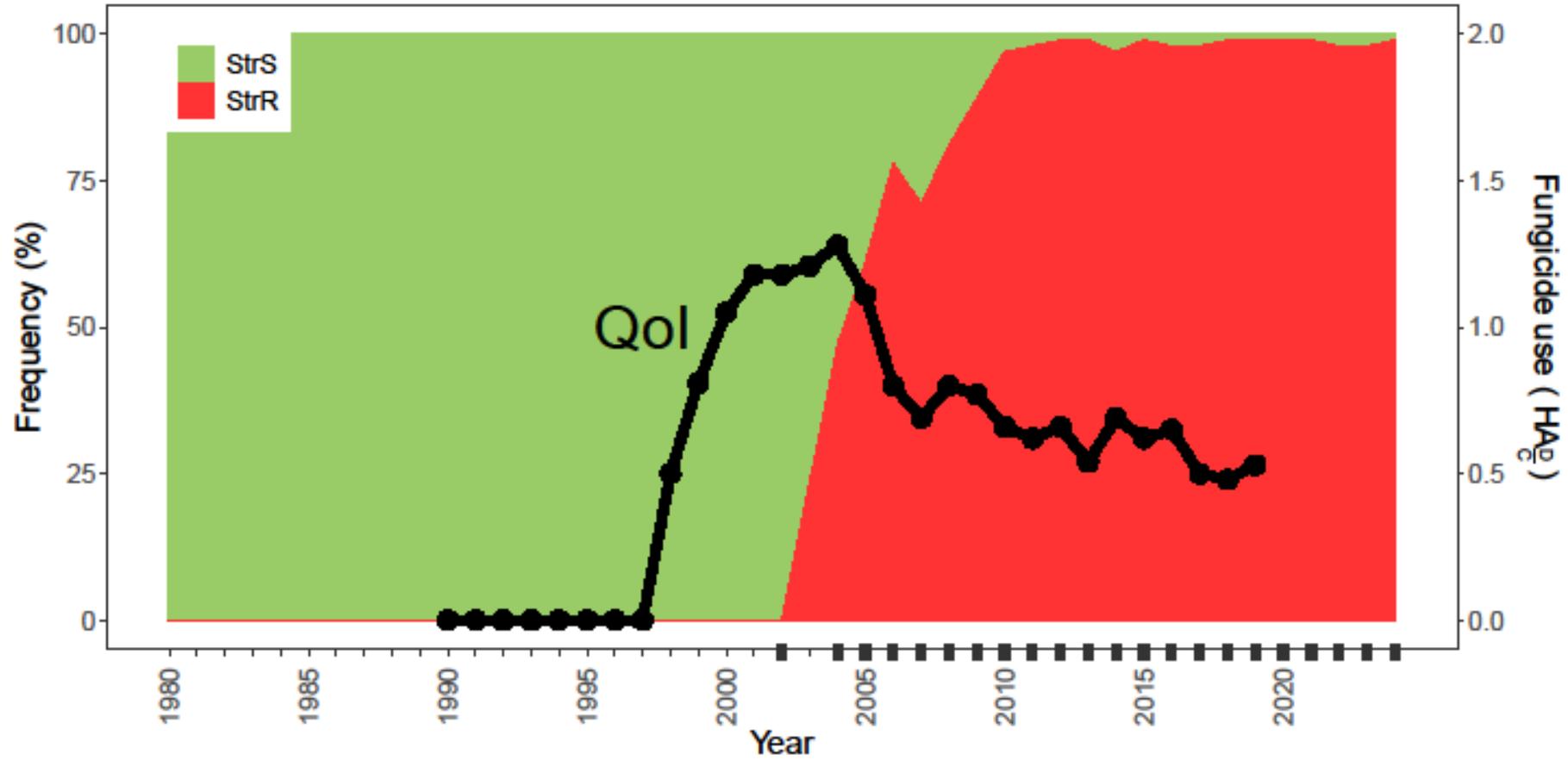
Souvent:

- Résistance forte
- Affecte tous les fongicides du même mode d'action

Etat des lieux des résistances en grandes cultures

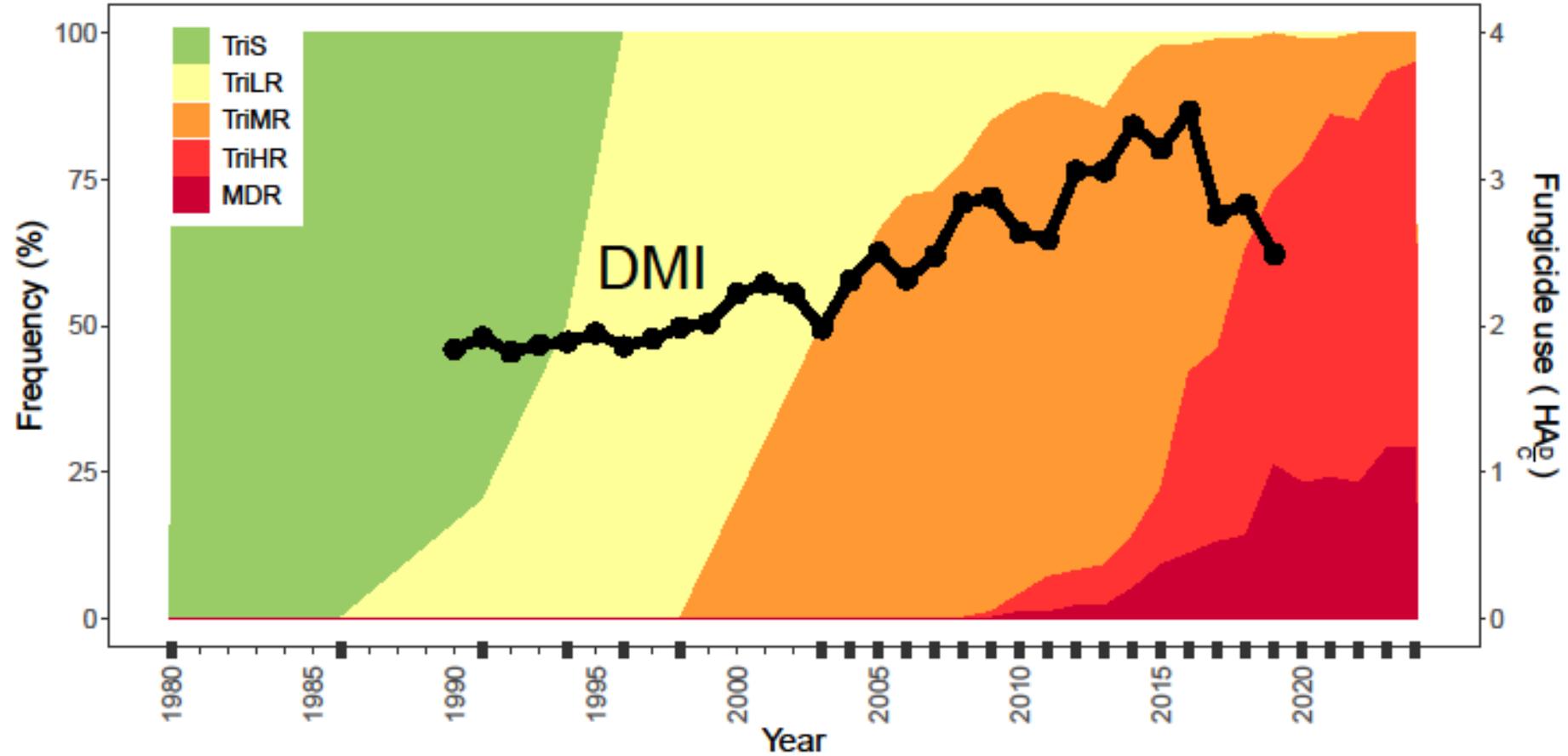
	Septoriose 	Rouille jaune 	Rouille brune 	Fusarioses 	Helmintho-sporiose 	Ramulariose 	Sclerotinia 	Cercosporiose 
SDHI								
QoI (strob)				 				
Qil								
IDM (triazoles)								
Multisites								
Bicontrol								

Evolution de la résistance aux QoI (septoriose)



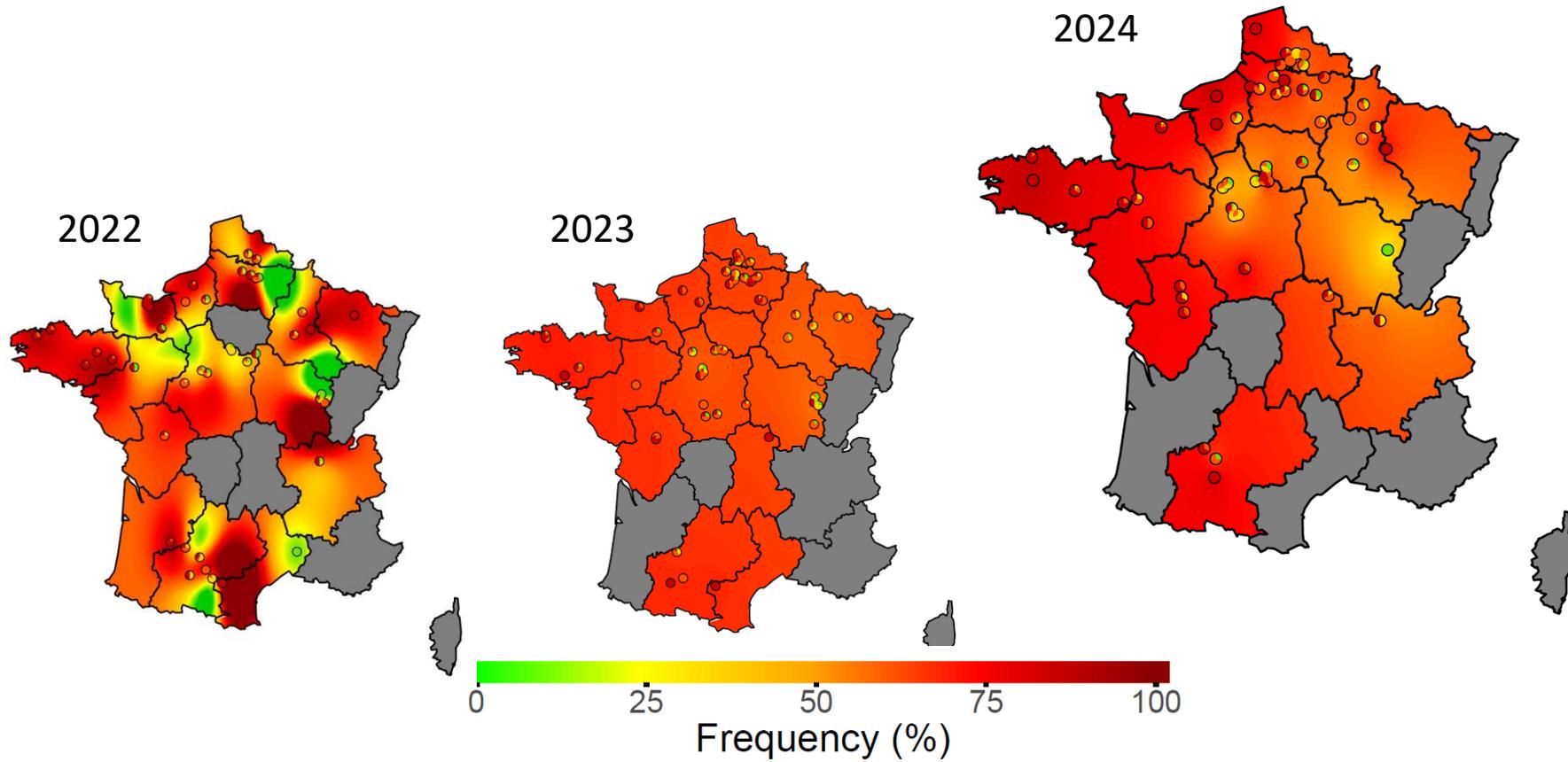


Evolution de la résistance aux IDM (septoriose)



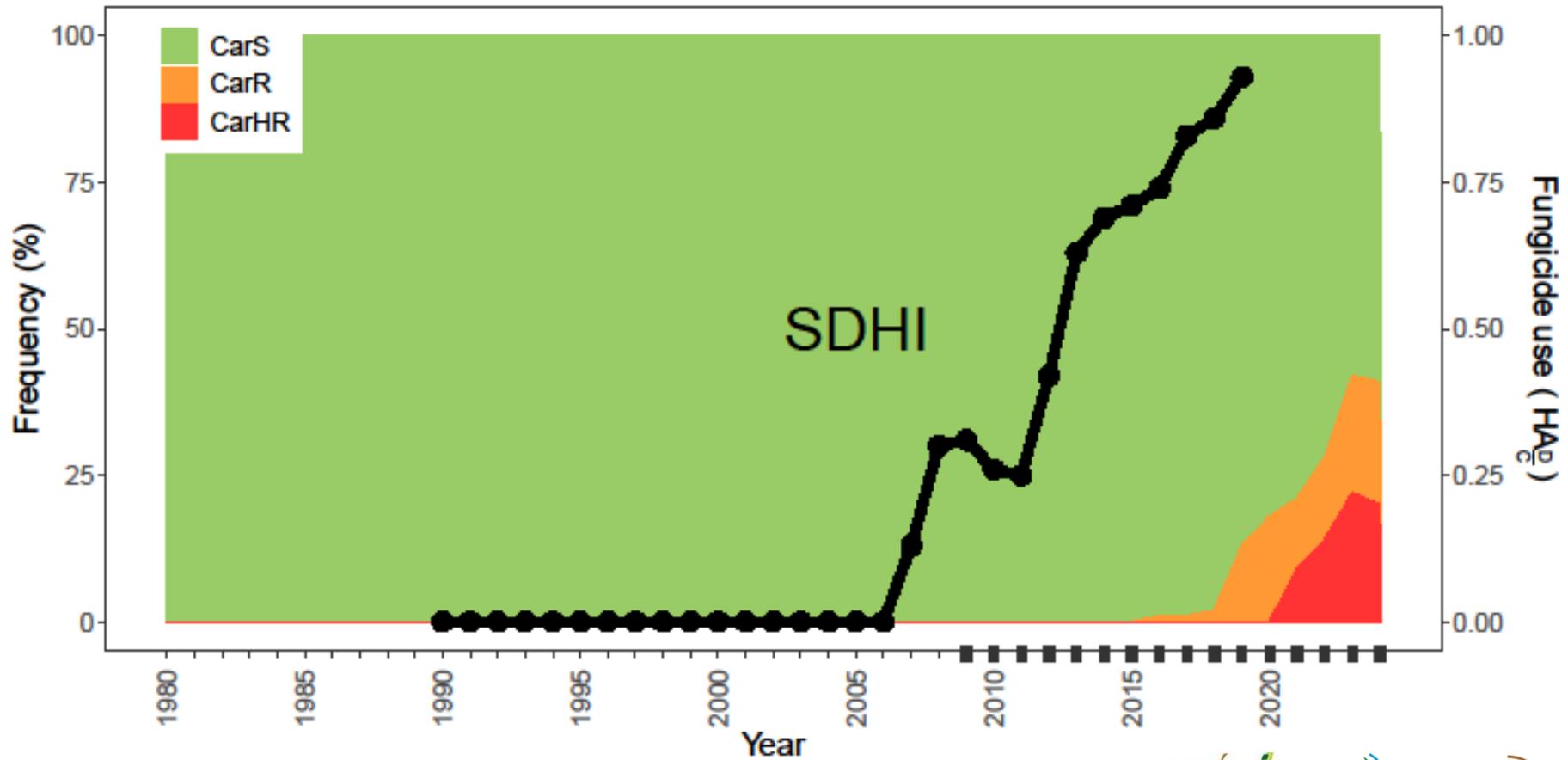


Evolution de la résistance aux IDM (TriHR)



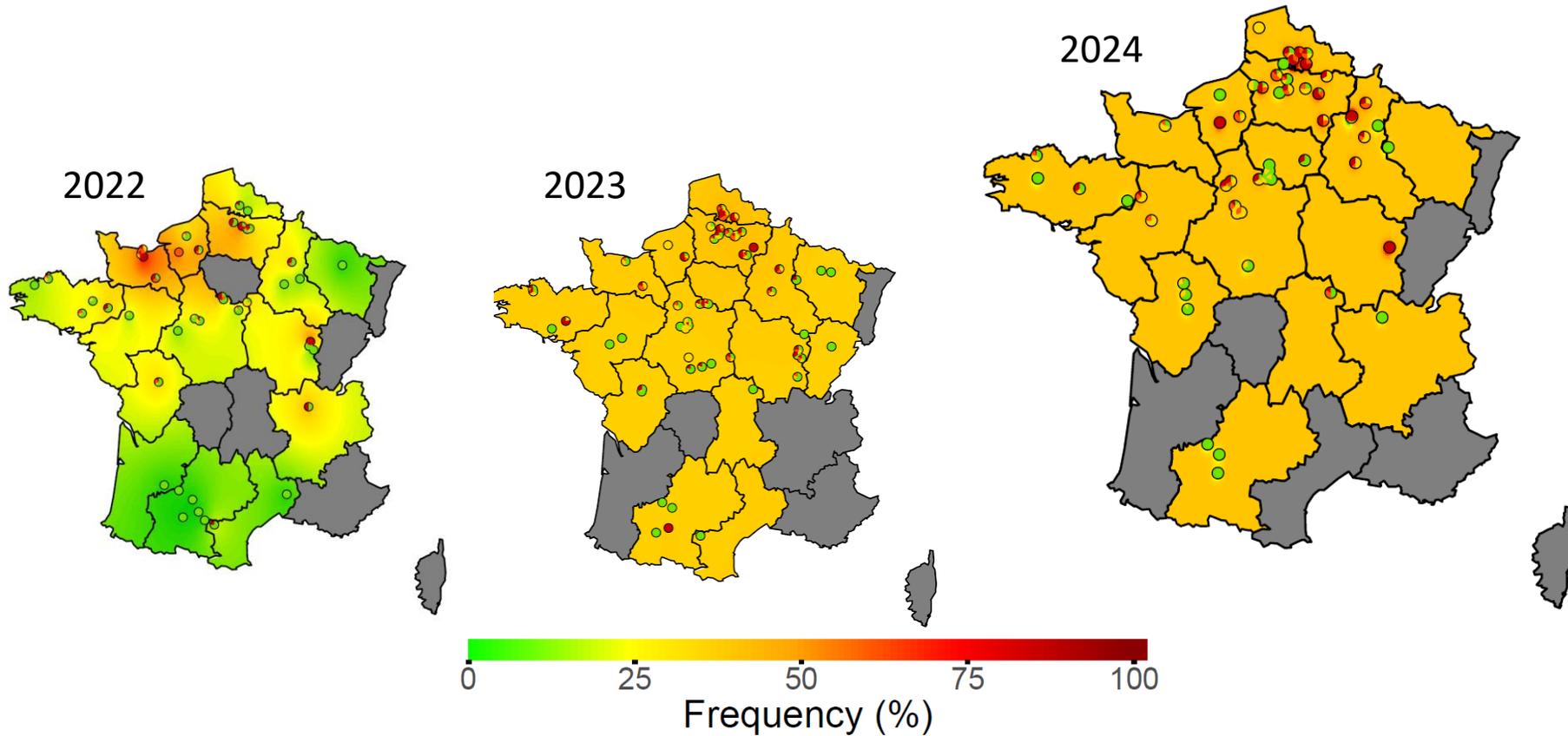


Evolution de la résistance aux SDHI (septoriose)





Evolution de la résistance aux SDHI (septoriose)



INRAE

Colloque Lycée agricole de Venours
AS Walker 14 février 2025

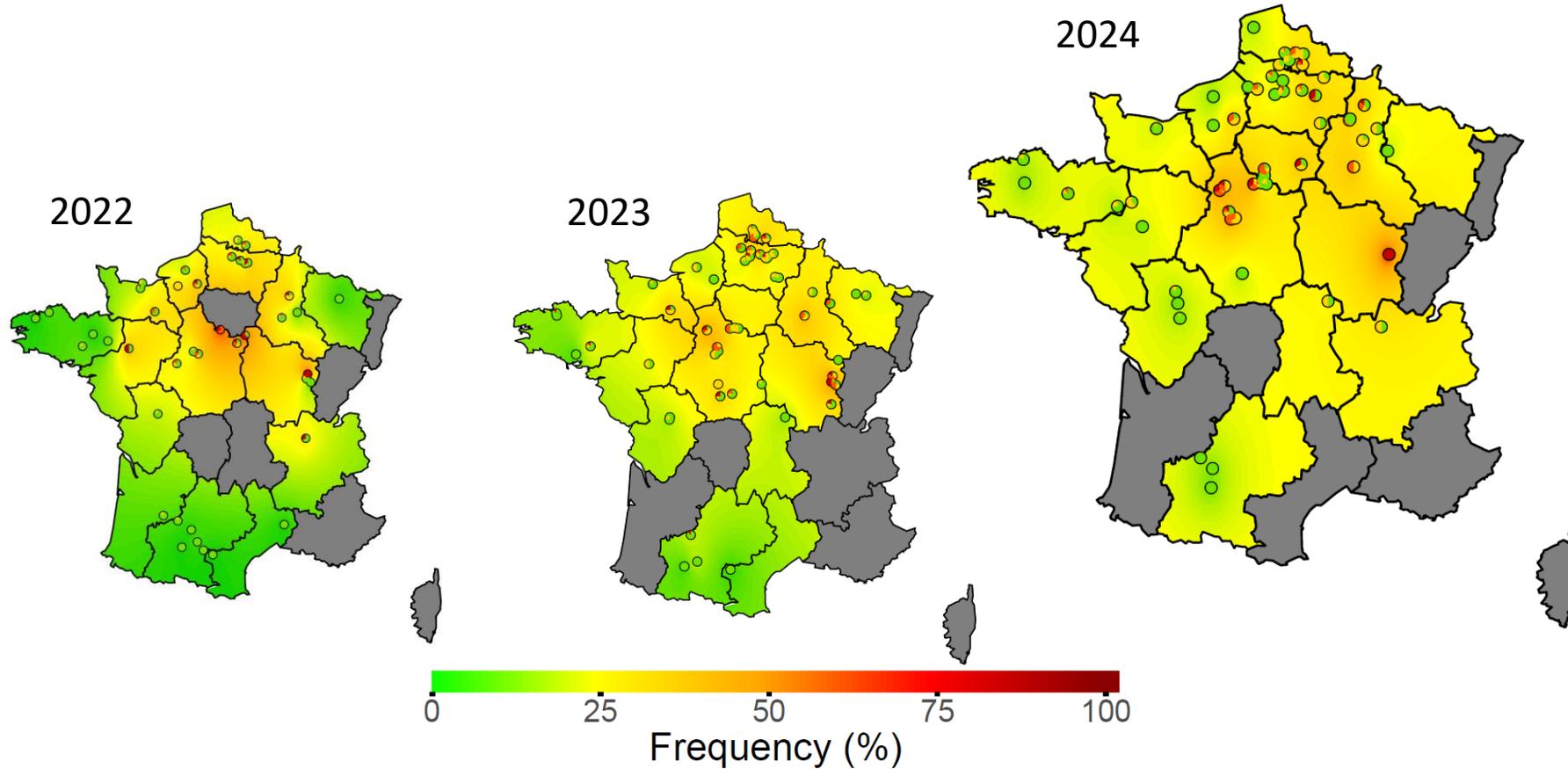
ARVALIS
Institut du végétal

Et autres sources





Evolution de la résistance non liée à la cible MDR (septoriose)



INRAE

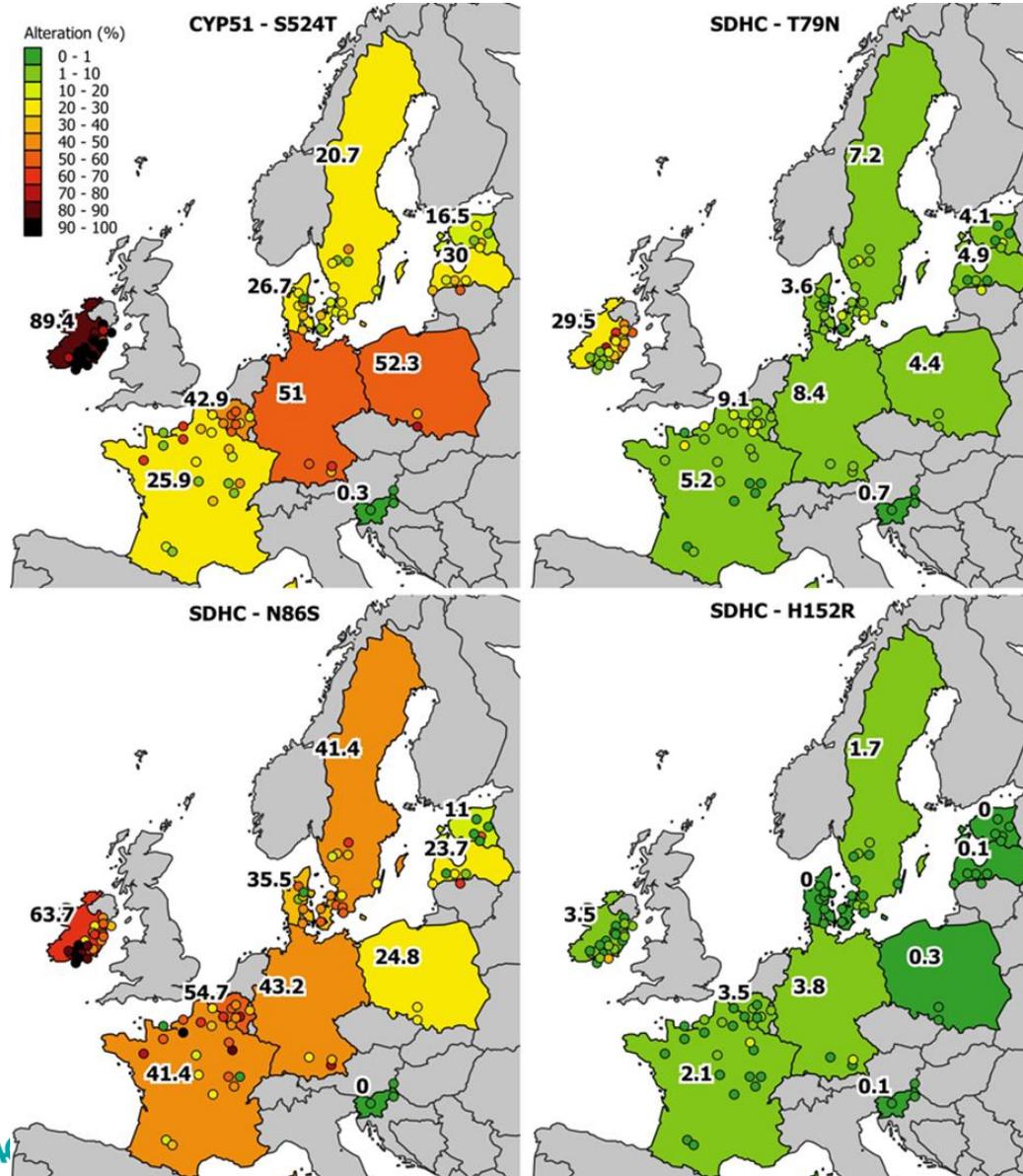
Colloque Lycée agricole de Venours
AS Walker 14 février 2025

ARVALIS
Institut du végétal

and other sources



Evolution des résistances IDM et SDHI en Europe



J Plant Dis Prot (2025) 132:58
<https://doi.org/10.1007/s41348-024-01049-y>



SHORT COMMUNICATION



Prevalence of key resistance alleles associated with DMI and SDHI fungicide resistance in European *Zymoseptoria tritici* populations in 2022

S. Kildea¹ · T. Heick² · F. Hutton¹ · C. Batalle³ · L. Aldén⁴ · J. Kaneps⁵ · A. Mäe⁶ · S. Weigand⁷ · J. Zajc⁸ · A. S. Walker⁹ · P. Hellin³

5 situations avec dans les témoins **CarR < 35% et CarHR < 10%**

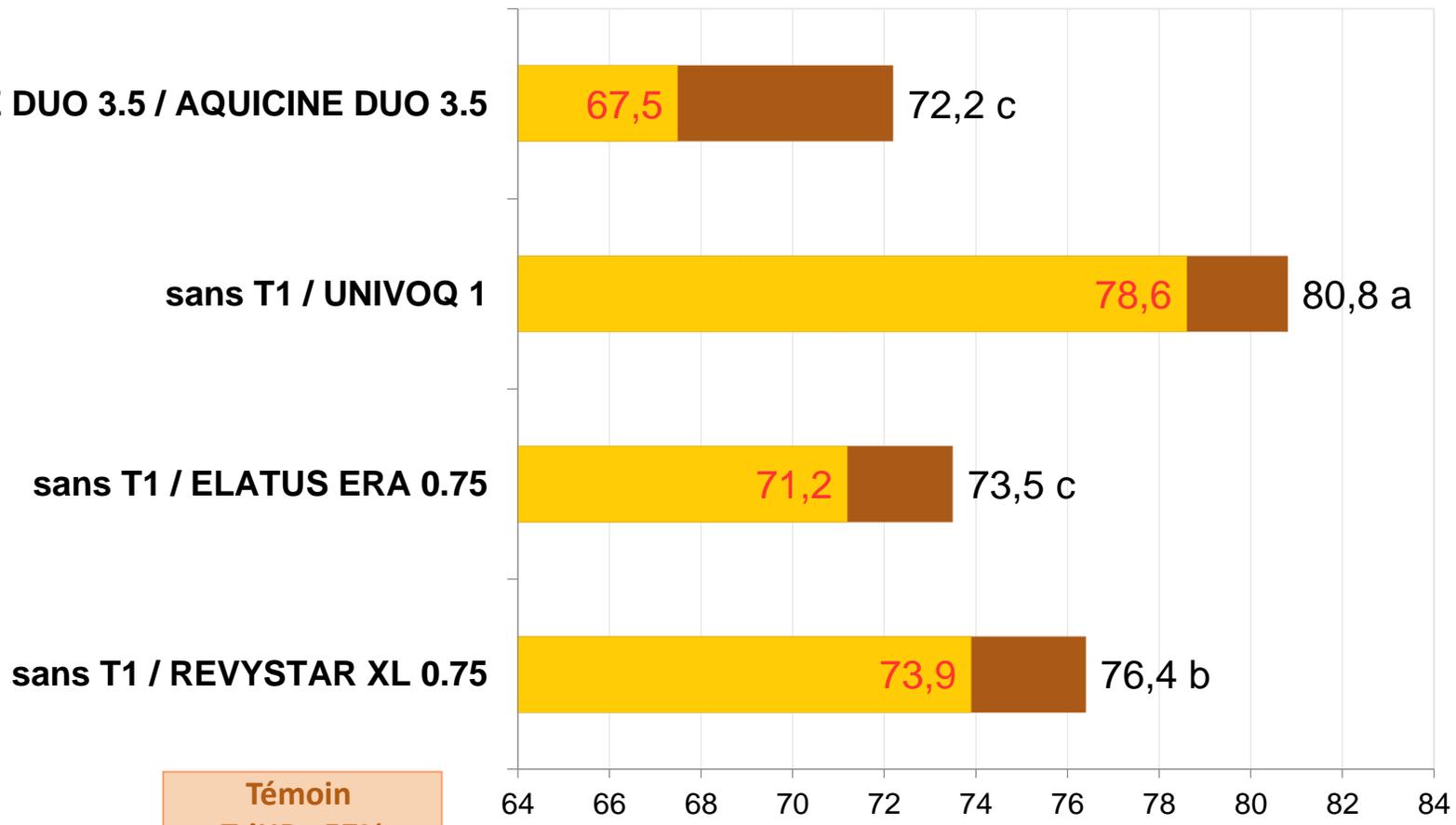
EFFICACITE %



Intensité Septoriose Témoin : 38.5%

$R^2 = 0.87$ Effi/ Rdt

RENDEMENT brut et net q/ha



Témoin
 TriHR : 57%
 MDR : 26%
 CarR : 12%
 CarHR : 3%
 Rmefen : 31%

Rendement Témoin : 61.5 q/ha

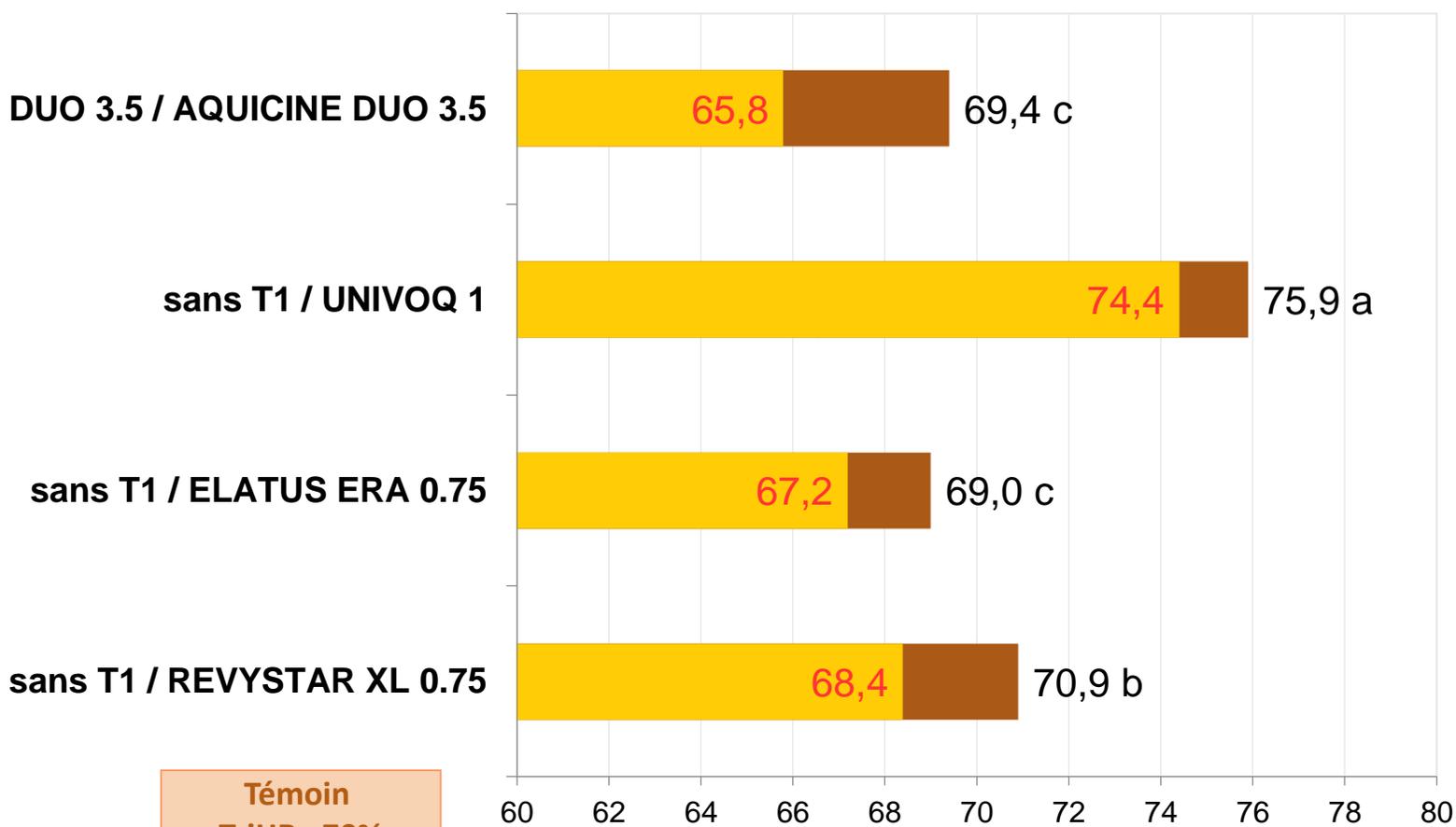
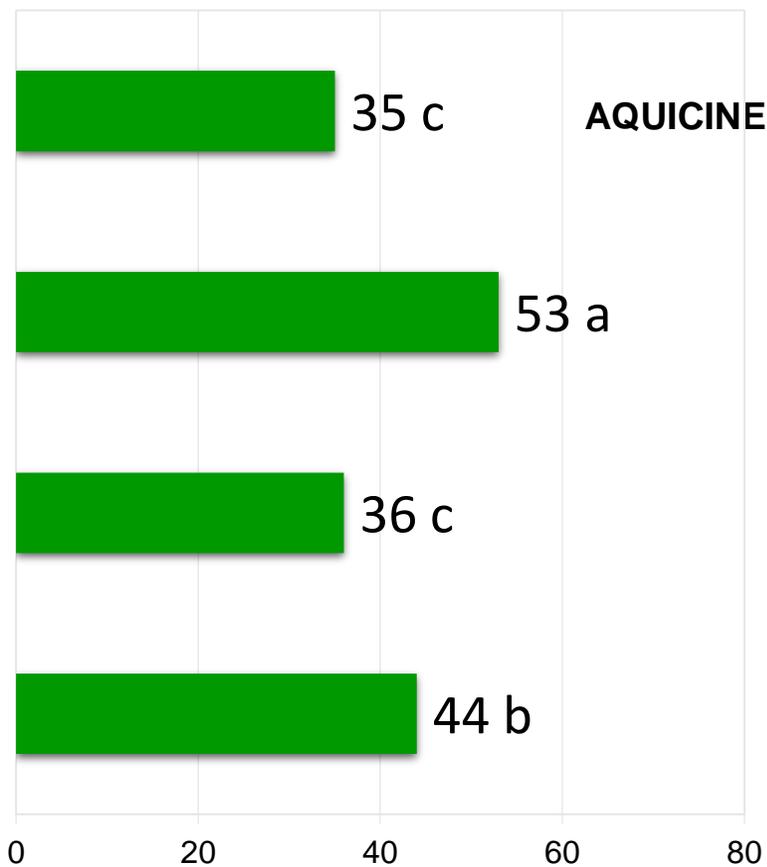
Nuisibilité : 19.3 q/ha

12 situations avec dans les témoins **CarR >= 35% et CarHR >=10%**

(62, 62, 62, 02, 80, 80, 80, 80, 80, 80, 28, 86)

EFFICACITE %

RENDEMENT brut et net q/ha



Intensité Septoriose Témoin : 58.3%

R² = 0.93 Effi/ Rdt

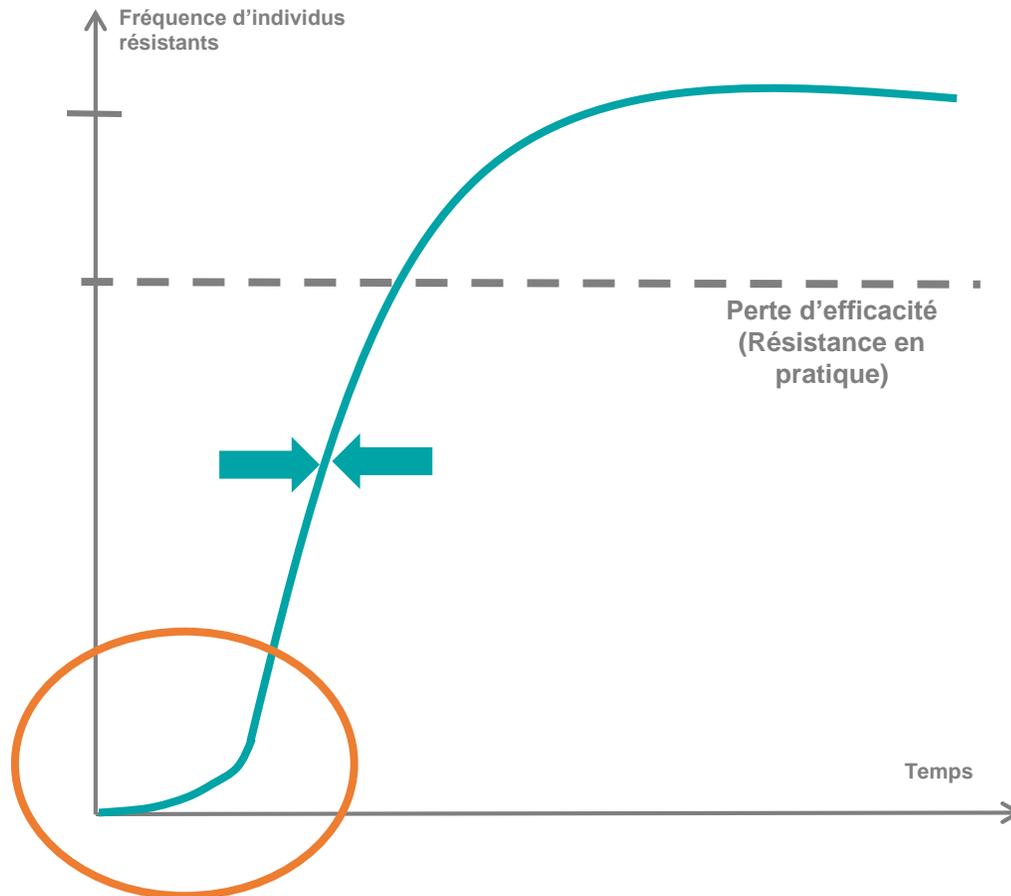
AS Walker 14 février 2025

Témoin
 TriHR : 70%
 MDR : 25%
 CarR : 55%
 CarHR : 33%
 Rmefen : 41%

Rendement Témoin : 59 q/ha

Nuisibilité : 16.9 q/ha

Comment ralentir la sélection de la résistance?

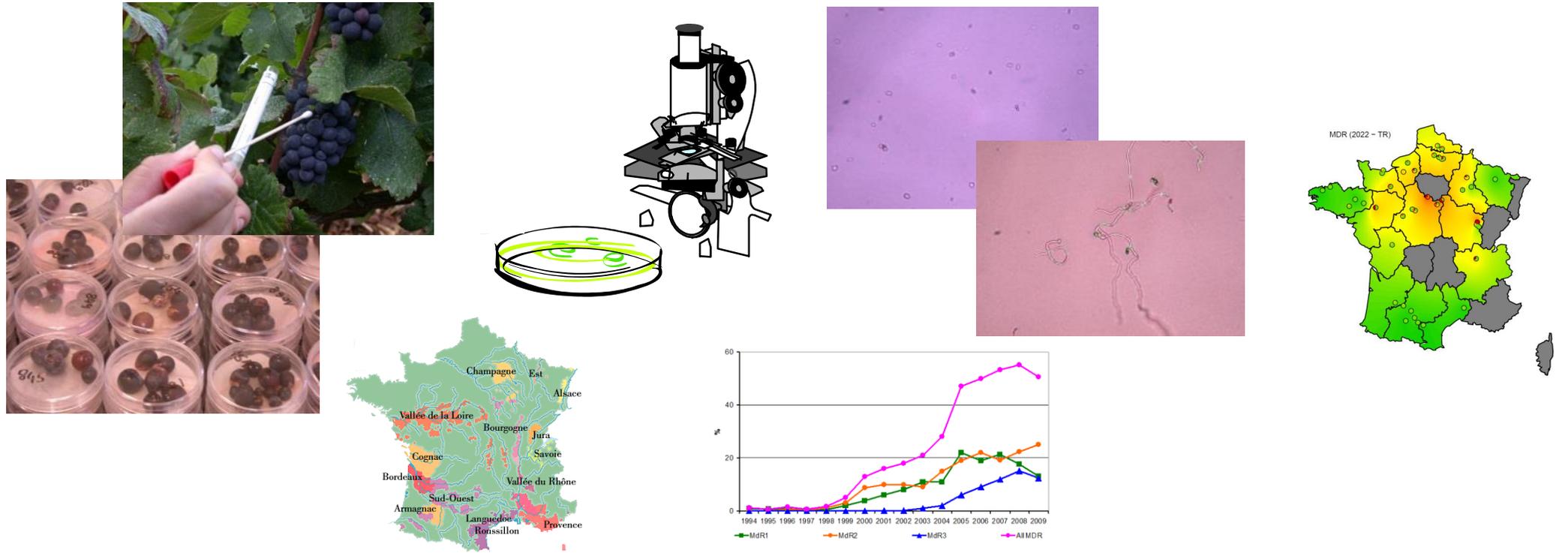


Principe n°1

Anticiper, mettre en œuvre des pratiques de gestion avant qu'il ne soit trop tard

→ Intérêt de la surveillance précoce, organisée, transparente

La surveillance des résistances comme pré-requis à leur gestion



- Echantillonnage adapté
- Méthode pertinente
- Précoce

Trends in Plant Science

CellPress

Feature Review

Trends and Challenges in Pesticide Resistance Detection

R4P Network^{1,†,*}

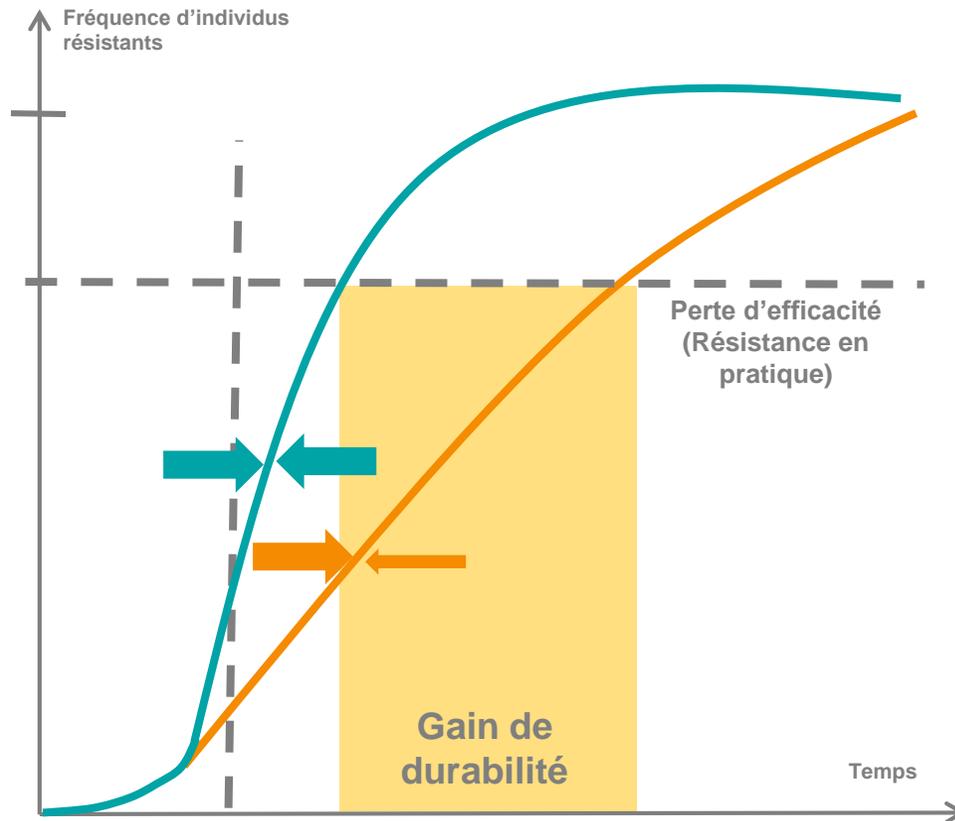


INRAE

Colloque Lycée agricole de Venours
AS Walker 14 février 2025

2016

Comment ralentir la sélection de la résistance?



Principe n°2

Favoriser les pratiques :

- qui limitent la sélection, en intensité, en récurrence,
- et/ou la diversifient

→ Intérêt des méthodes alternatives et des stratégies de gestion

Limiter la sélection par la valorisation des méthodes alternatives



Biocontrôle, SDP



Fongicides (en dernier recours)



Pratiques non chimiques



Prophylaxie

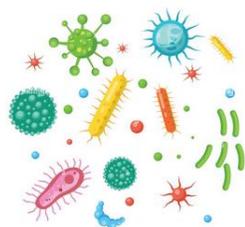


Rotation des cultures



Variétés résistantes/tolérantes

→ **Rendre le contrôle imprédictible pour le pathogène**

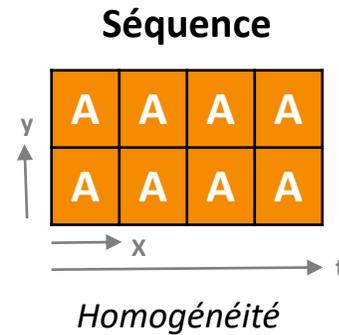


Régulations naturelles



Paysage

Limiter la sélection par les fongicides en les diversifiant



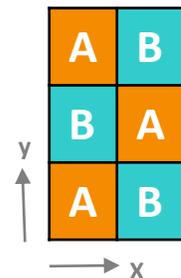
Maximiser l'hétérogénéité des pressions de sélection (nécessite de disposer de MoA différents)

Alternance



Hétérogénéité temporelle

Mosaïque



Hétérogénéité spatiale

Mélanges



Hétérogénéité directe

Modulation de dose



Hétérogénéité de l'intensité de la sélection

Pressions différentes sur des générations différentes

Pression diversifiée sur la même génération

Pour bien gérer les résistance

Diversité
des pratiques de
contrôle

1. Précoce; Intra et inter-annuelle
2. Sur le parcellaire
3. Dans les pratiques de contrôle
4. Dans les MoA et les molécules
5. Faire exprimer le coût des résistances, si possible

Intensité
du contrôle

- Ne pas exercer de sélection: revenir à l'agronomie, limiter les applications
- Ne pas appliquer de mélanges « cosmétiques » ou non adapté à la gestion de la résistance
- Adapter la dose au mécanisme de résistance décrit / attendu
- Réfléchir la stratégie en fonction de la composition locale des populations

Forte sélection = **RLC** favorisée → très courant

Faible sélection = **R polygénique** favorisée → observable

Note commune céréales 2025

> Résistances aux fongicides Céréales à paille

Note commune 2025 **INRAE, ANSES, ARVALIS**

Observer la résistance et formuler des recommandations adaptées pour en retarder l'émergence et la progression contribuent positivement à une agriculture durable et moins dépendante des produits phytopharmaceutiques.



Où trouver les notes communes (et plus encore):
www.r4p-inra.fr

Les méthodes alternatives exercent aussi des pressions de sélection!



Biocontrôle, SDP



Fongicides (en dernier recours)



Pratiques non chimiques



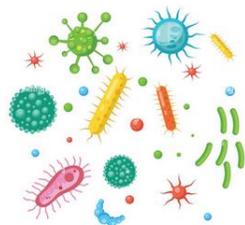
Prophylaxie



Rotation des cultures



Variétés résistantes/tolérantes

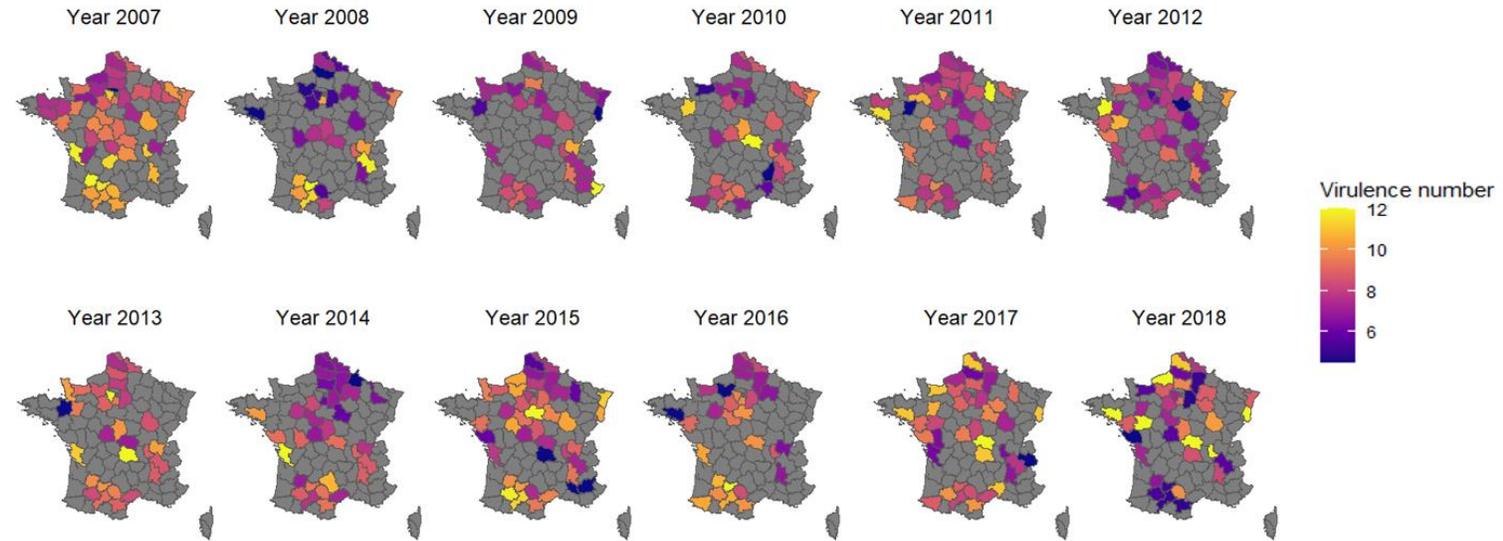
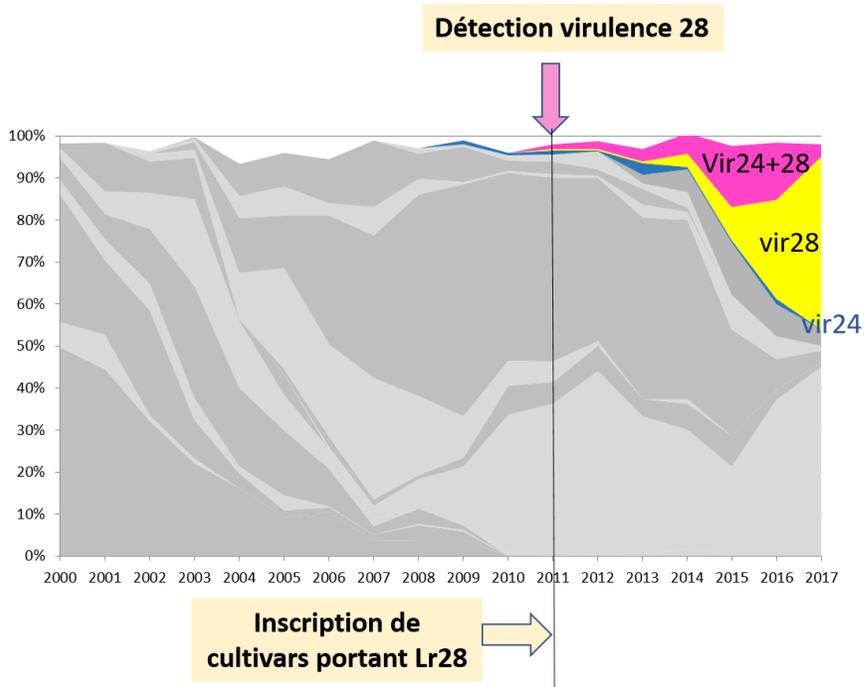


Régulations naturelles



Paysage

Un exemple d'adaptation des champignons pathogènes aux résistances des plantes

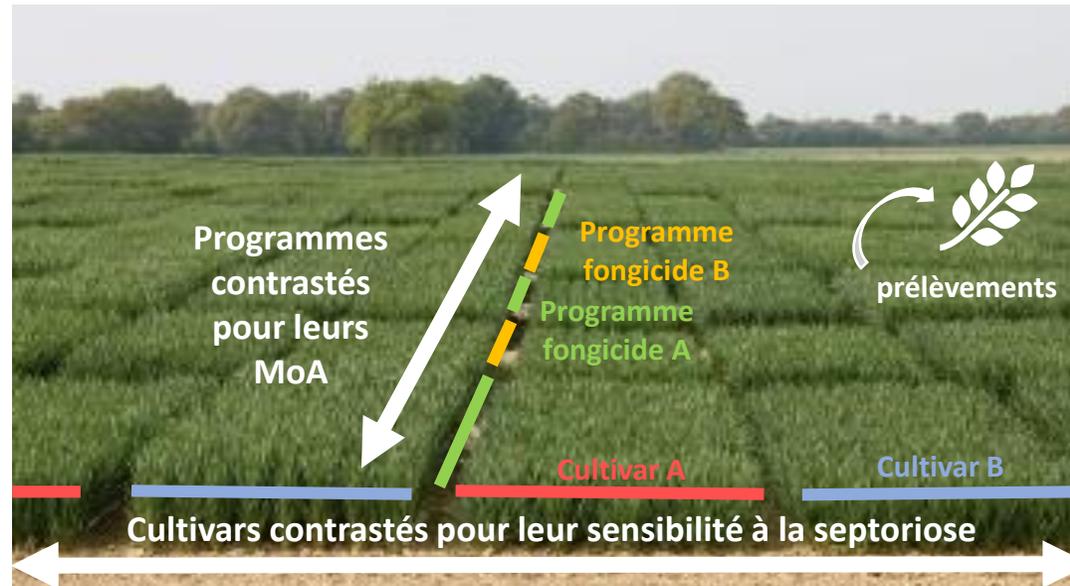
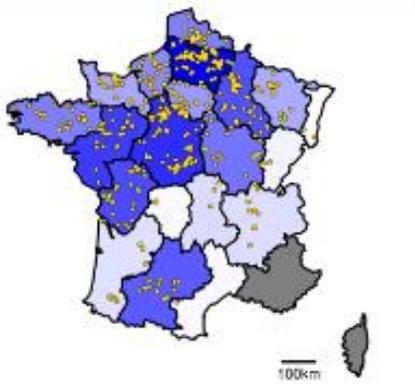


Evolution des résistances variétales chez la rouille jaune



Double Performance: comprendre les compromis adaptatifs

Réseau Performance (fongicides) → Réseau Double Performance network (fongicides x cultivars)



➤ Compromis entre durabilité et efficacité

- Depuis 2004
- Réseau d'essais
- Nombreux partenaires filière
- Coordination INRAE/Arvalis

Pour chaque interaction:

- Mesure de l'efficacité
- Mesure de la fréquence des variants adaptés aux fongicides et aux cultivars



INRAE

Colloque Lycée agricole de Venours
AS Walker 14 février 2025

ARVALIS



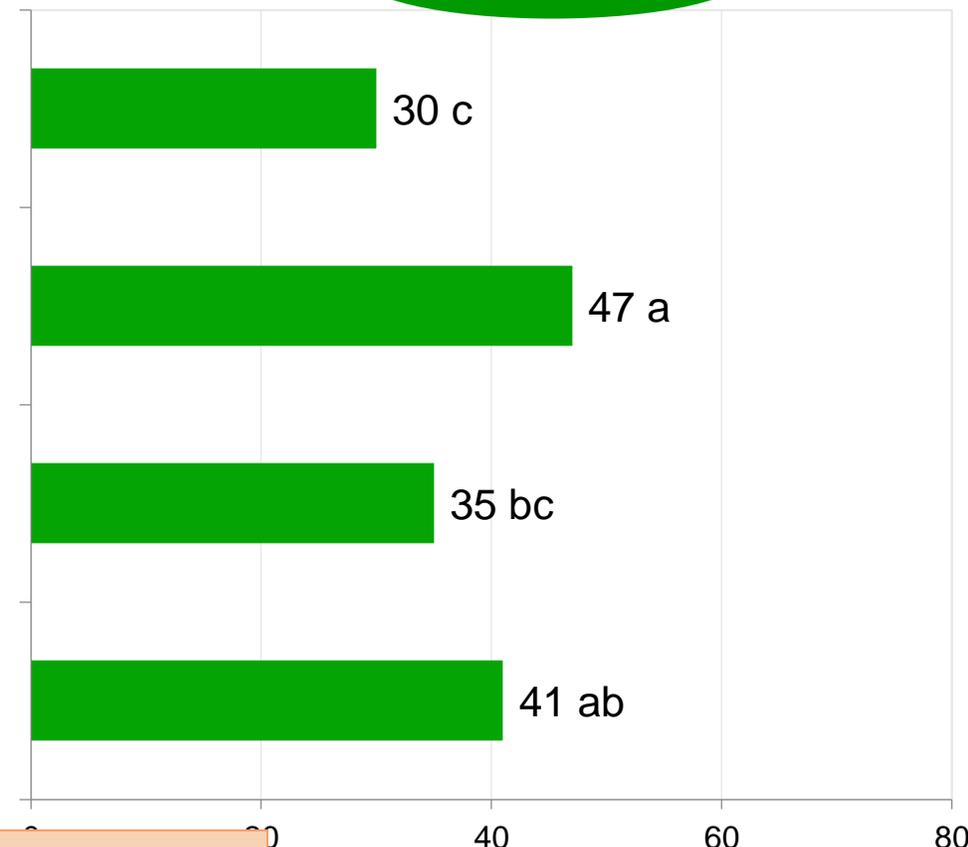
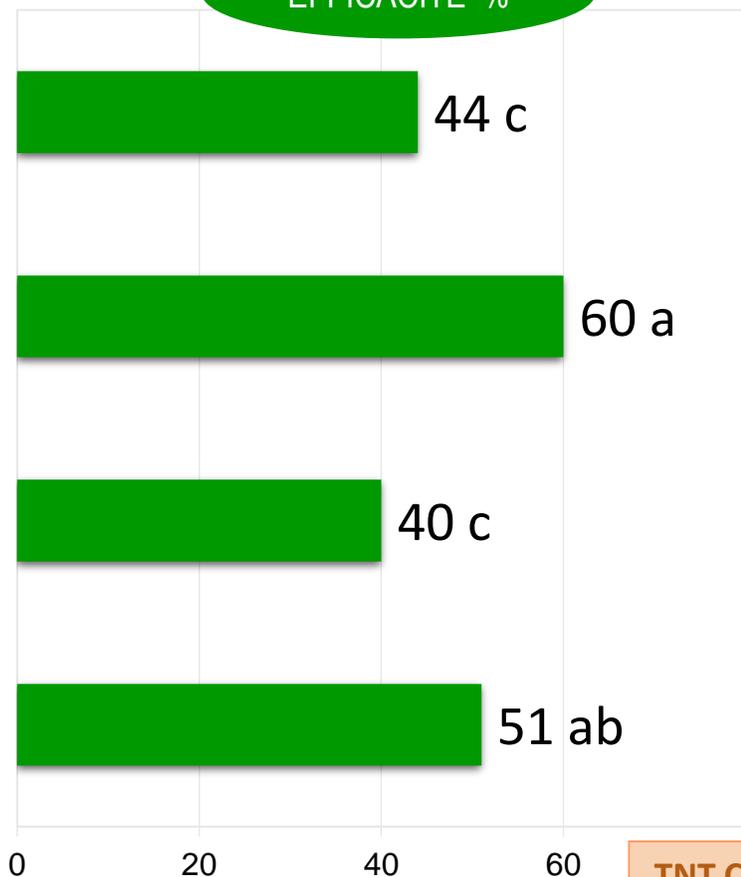
Impact de la sensibilité variétale et de la résistance en 2024

14 essais **CHEVIGNON**

14 essais **SY ADMIRATION**

EFFICACITE %

EFFICACITE %



TNT Chevignon
 TriHR : 67%
 MDR : 29%
 CarR : 35%
 CarHR : 23%
 Rmefen : 35%

TNT Sy Admiration
 TriHR : 71%
 MDR : 22%
 CarR : 42%
 CarHR : 16%
 Rmefen : 35%

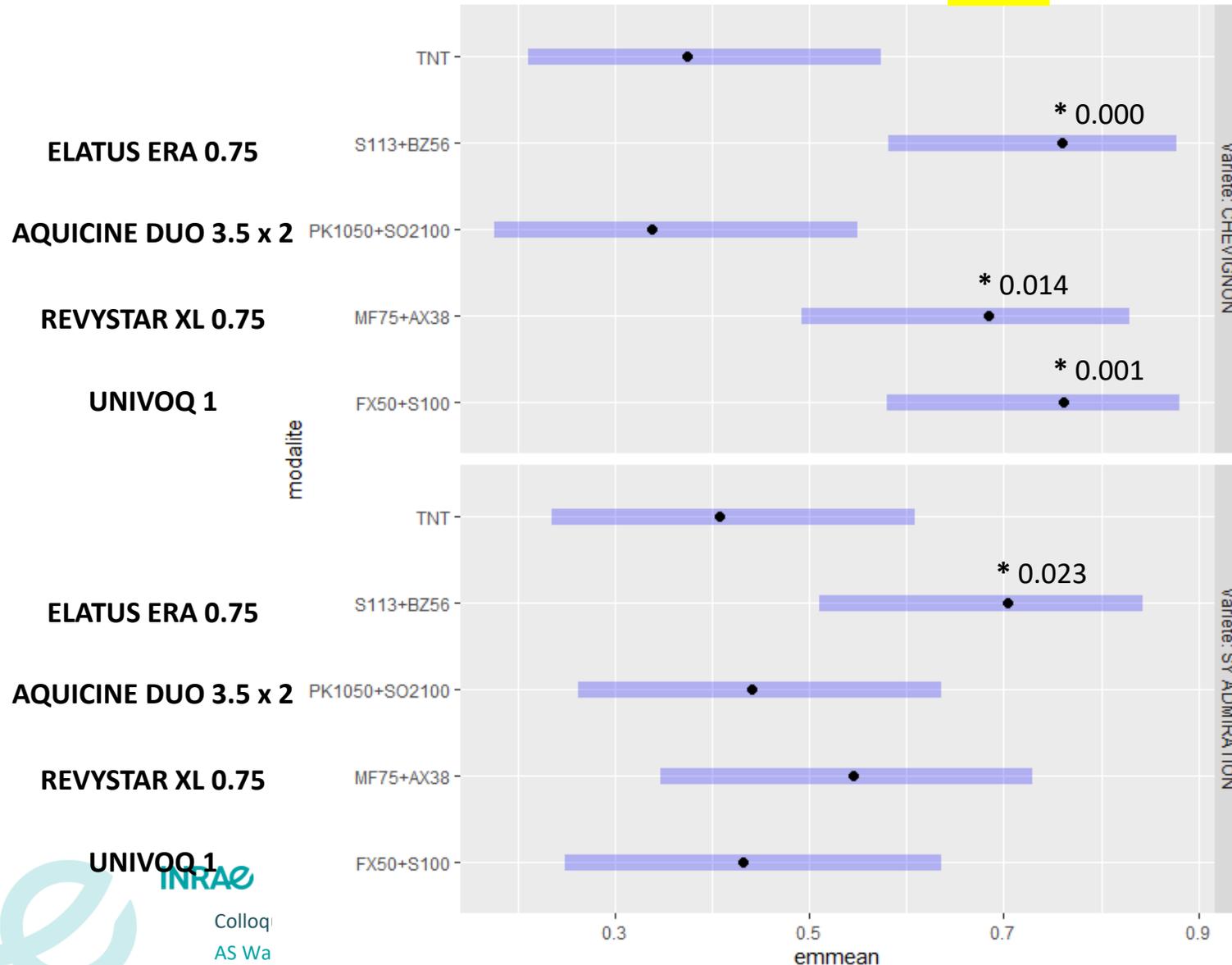
Intensité Septoriose Témoin : 44.5%
 $R^2 = 0.92$ Effi/ Rdt

Intensité Septoriose Témoin : 71.3%
 $R^2 = 0.95$ Effi/ Rdt

10 essais Double Performance complet avec analyses pour toutes les modalités

(41, 86, 91, 80, 80, 08, 80, 80, 28, 62) Moyenne ajustées de chaque fongicide, par essai et par variété avec Intervalle de Confiance

CarR



4 écarts **significatifs** par rapport au TNT *

Interaction variétés x fongicides **significatives** :
1 écart significatif pour UNIVOQ 1

PARSADA: de nouveaux challenges pour gérer les résistances et les adaptations des bioagresseurs au sens large...

Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures

L'objectif est d'appréhender, face aux risques d'impasse techniques, l'éventail des solutions disponibles en s'attachant à identifier les facteurs clés de leur déploiement. Il s'agit également de traiter de toutes les questions intéressant la protection des cultures, filière par filière, sur le court, moyen et long termes.

<https://agriculture.gouv.fr/plan-daction-strategique-pour-lanticipation-du-potentiel-retrait-europeen-des-substances-actives-et>

75 SA
dont 26 fongicides
appartenant à 11 modes d'action différents

Azoxystrobine	Dithianon
Benthiavalicarbe	Fludioxonil
Benzovindiflupyr	Fluopicolide
Boscalide	Fluopyram
Bromuconazole	Fluxapyroxade
Captane	Folpel
Chlormequat	Metconazole
Composés du cuivre	Metirame
Cymoxanil	Prothioconazole
Cyprodinil	Pyraclostrobin
Difenoconazole	Spiroxamine
Dimethomorphe	Tebuconazole
Dimoxystrobine	Zirame

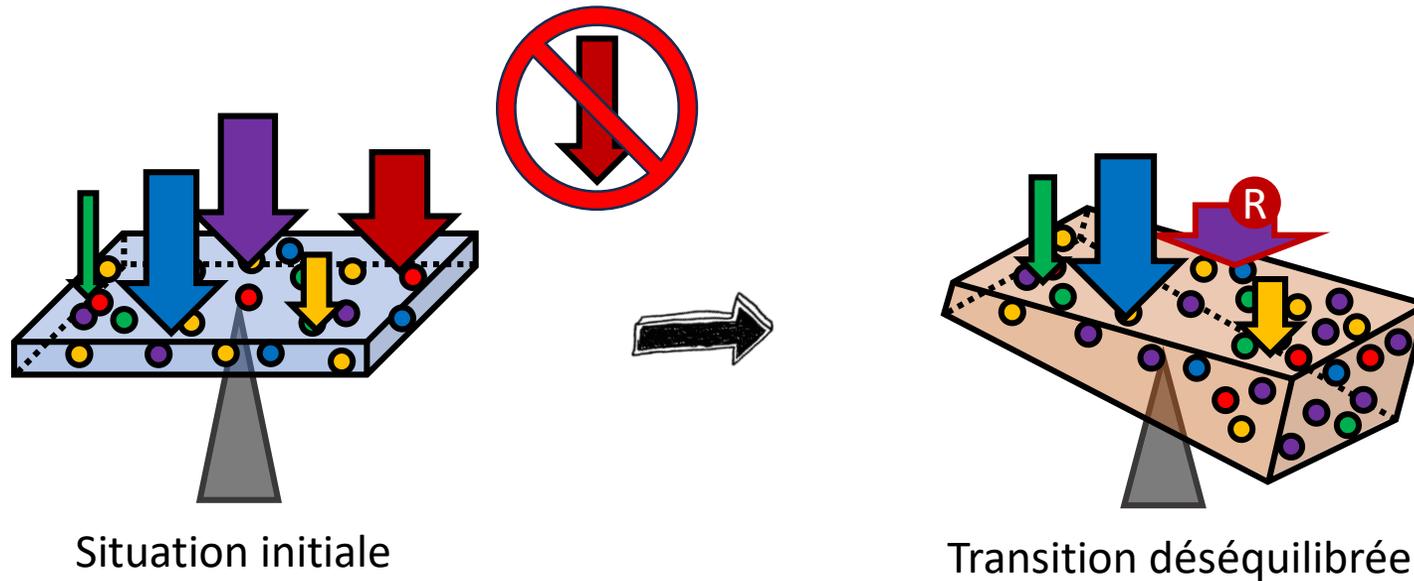


INRAE

Colloque Lycée agricole de Venours
AS Walker 14 février 2025

Etudier l'évolution des résistances est essentiel pour la transition agroécologique

Le retrait de SA aboutit à un report de sélection et accroît le risque d'évolution de résistance vis-à-vis des solutions restantes, dont les méthodes alternatives.



- ➔ Anticiper des impasses « fantômes »
- ➔ Mieux utiliser pour moins utiliser
- ➔ Ne pas rester sans option de protection

Comment préserver la durabilité des méthodes de lutte dans le contexte PARSADA ?

Un partenariat riche et complémentaire



9 laboratoires
de recherche publics



INRAE

anses

7 UR/UMR

2 unités

5 unités R4P



**PARSADA
PROJET ASAP**



12 filières
agricoles

ARVALiS

IFV

ITB
Institut Technique
de la Betterave

Terres
Inovia
l'agronomie en mouvement

G.R.C.E.T.A.
de Basse Durance



Les Producteurs
d'endives
de France

PAM
DE FRANCE
L'ENGAGEMENT
D'UNE FILIERE

uniLet
Interprofession
des légumes
en CONSERVE
& surgelés

IT2
INSTITUT
TECHNIQUE
D'UNION
PROFESIONNELLE

itab
l'Institut de l'agriculture
et de l'alimentation biologiques

FNAMS

- Mécanismes, dynamique et gestion des résistances
- Outils d'épidémiosurveillance
- Expertise scientifique
- Communication, vulgarisation

- Connaissance des bioagresseurs
- Réseaux d'essais et de préleveurs
- Expertise technico-économique
- Validation terrain, implémentation, dissémination

Organisation générale du projet ASAP

Action 0 Coordination

Coordinatrice
Myriam Siegwart

COFIL 

INRAE

anses

ARVALiS

GRCETA

IT2

Les Producteurs
d'endives
de France

Terres
Inovia
l'agronomie en mouvement

itab
l'Institut de l'Agriculture
et de l'Élevage biologiques

unilet
Interprofession
des légumes
en conserve
et surgelés

ITB
Institut Technique
de la Betterave

IFV

PAM
DE FRANCE
L'ENGAGEMENT
D'UNE PALETTE

FNAMS

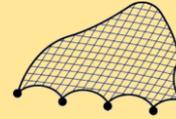
INRAE

Colloque
AS Walk

Action 1 : Anticiper



PRÉVISION
démogénétique



ADAPTATION
méthodes alternatives



NON-CIBLE
sélection croisée

Action 2 : Surveiller



IDENTIFIER
analyses
multicritères



SURVEILLER
méthodes, phénotypage,
génotypage



EXPLIQUER
inférence, génétique
du paysage

Action 3 : Recommander



AGRÉGER
BDD,
cartographie



DIFFUSER
journées scientifiques et
techniques, publications



CONSEILLER
notes communes,
jeu sérieux

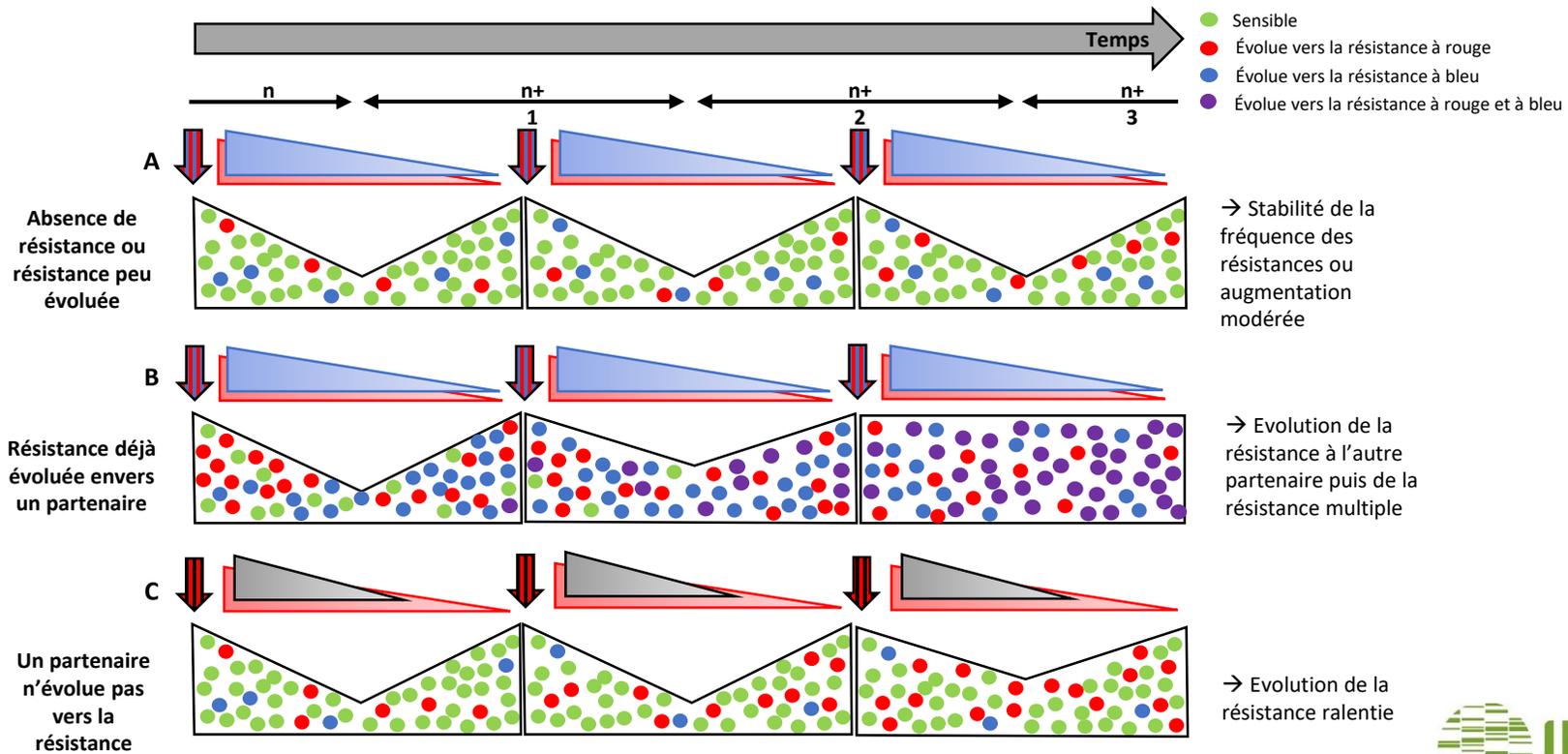
INRAE



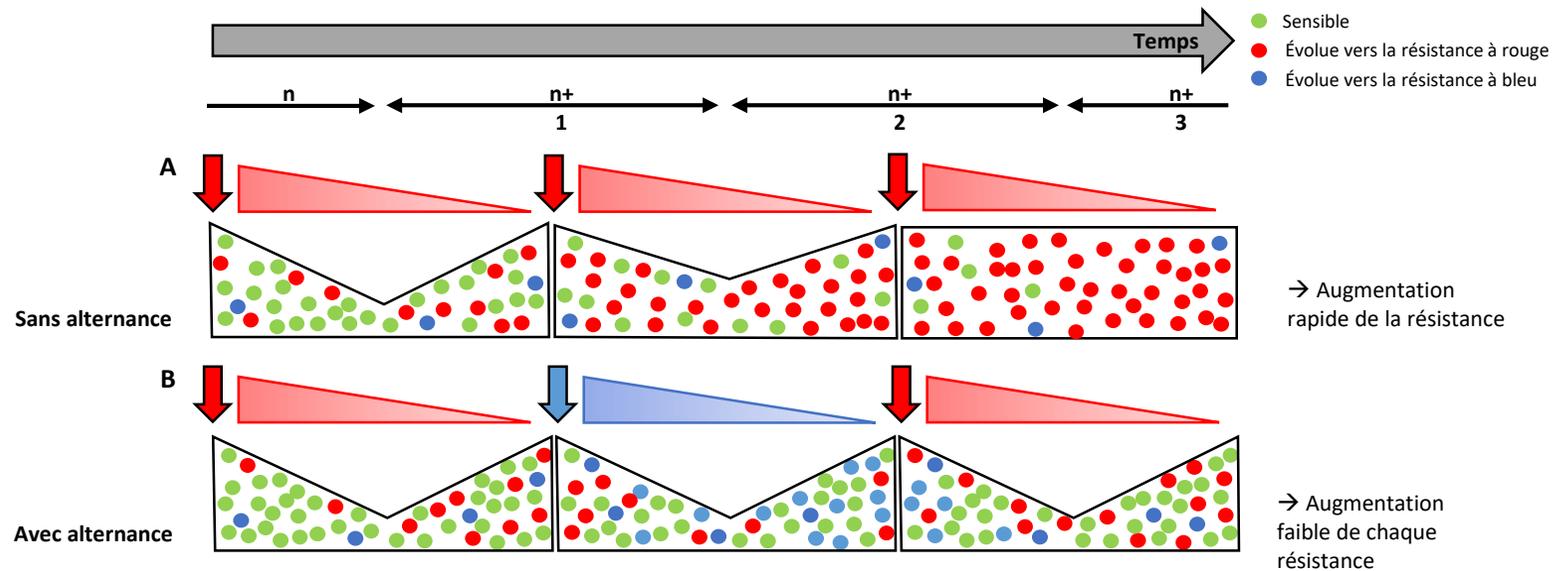
Pour aller plus loin



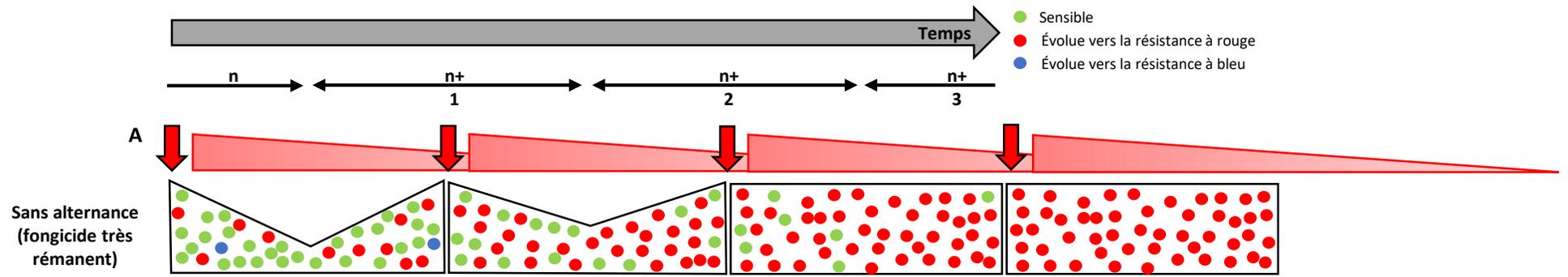
Principe de la stratégie de mélange



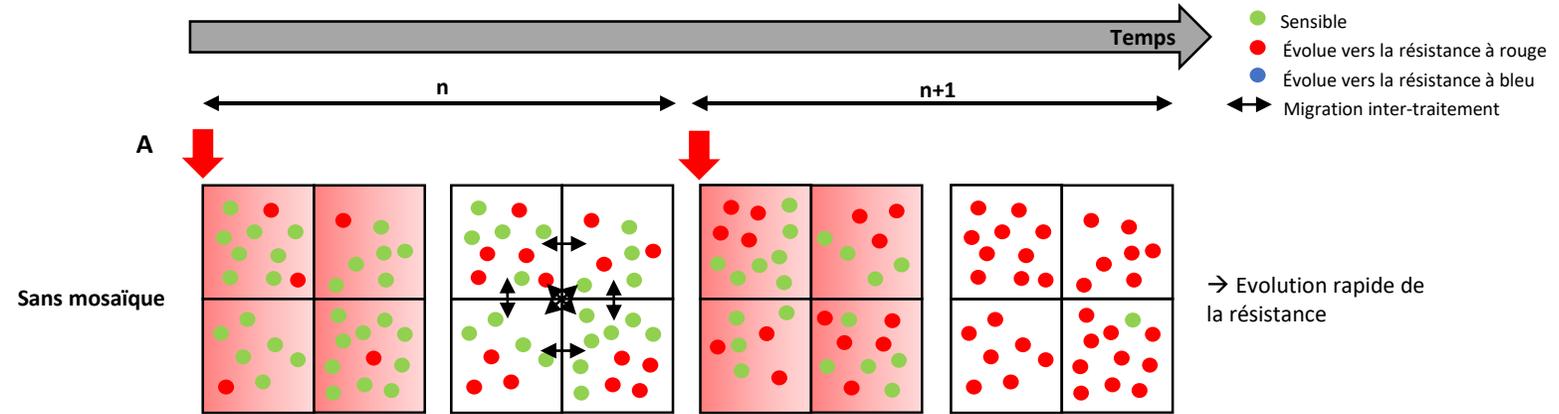
Principe de la stratégie d'alternance



Stratégie d'alternance : impact de la rémanence

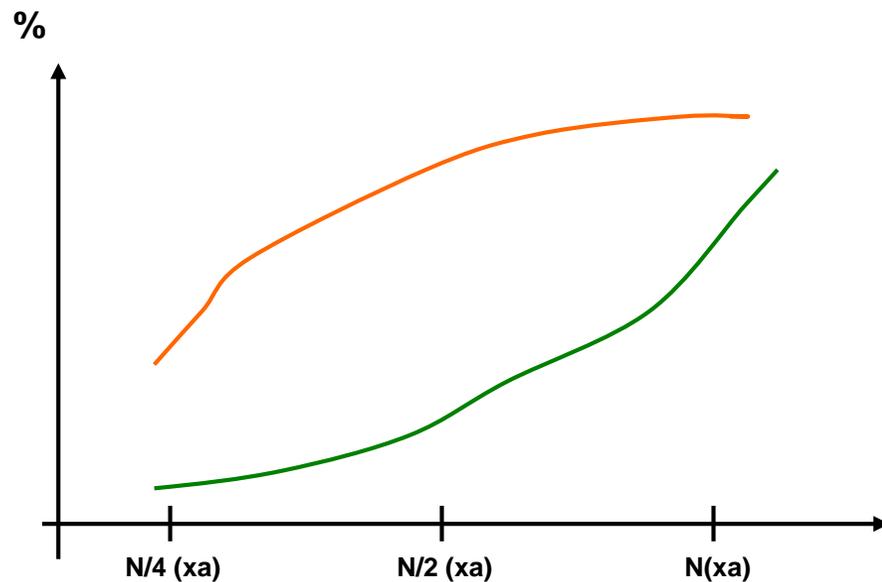


Stratégie de mosaïque

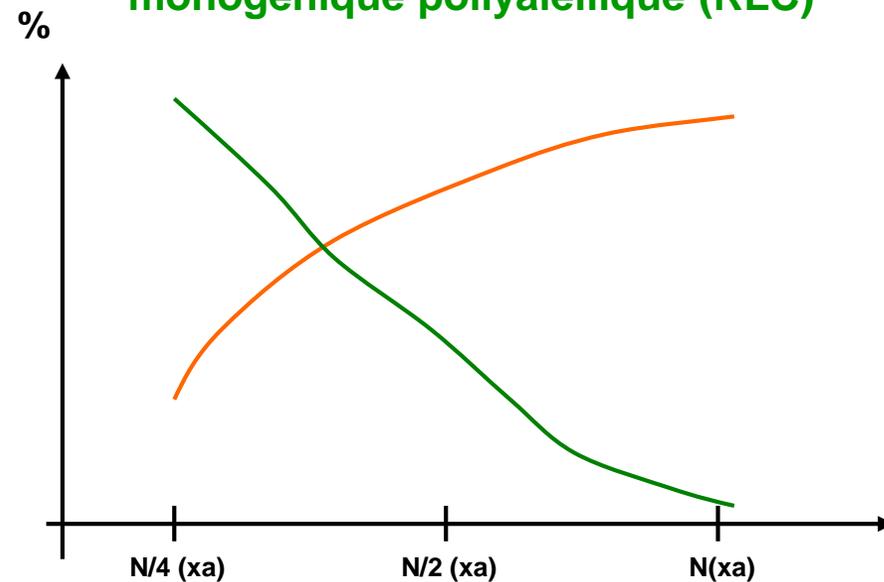


Relation dose, efficacité pratique et résistance

Résistance monogénique (essentiellement RLC)



Résistance polygénique (essentiellement RNLC) ou monogénique polyaléllique (RLC)



- Risque de Résistance
- Efficacité pratique

Prédire le risque de résistance chez les champignons

Matrice de risque combiné

Risque fongicide		Risque combiné			Risque agronomique
Benzimidazoles Dicarboximides Phenylamides QoI	Fort=3	3 1.5 0.75	6 3 1.5	9 4.5 2.25	Fort=1 Moyen=0.5 Faible=0.25
SDHIs SBI Anilinopyrimidines Phenylpyrroles	Moyen=2	2 1 0.5	4 2 1	6 3 1.5	Fort=1 Moyen=0.5 Faible=0.25
Multisite MBI-R inhibitors SAR inducers	Faible=0.5	0.5 0.25 0.125	1 0.5 0.25	1.5 0.75 0.3	Fort=1 Moyen=0.5 Faible=0.25
		Faible=1	Moyen=2	Fort=3	Risque pathogène
		Seed borne Soil borne Rust fungi	Eyespot <i>Rhynchosporium</i> <i>Septoria</i>	<i>Blumeria</i> <i>Botrytis</i> <i>Plasmopara</i> <i>Magnaporthe</i> <i>Venturia</i>	

- ✓ Renseigner chaque type de risque
- ✓ Pas très fiable pour unisites
- ✓ Un modèle récent plus fiable

D'après Kuck K, Russell PE (2006) FRAC: Combined resistance risk assessment. *Aspects of Applied Biology* 78:3-10

Niveaux de résistance et fréquences des individus résistants ¹

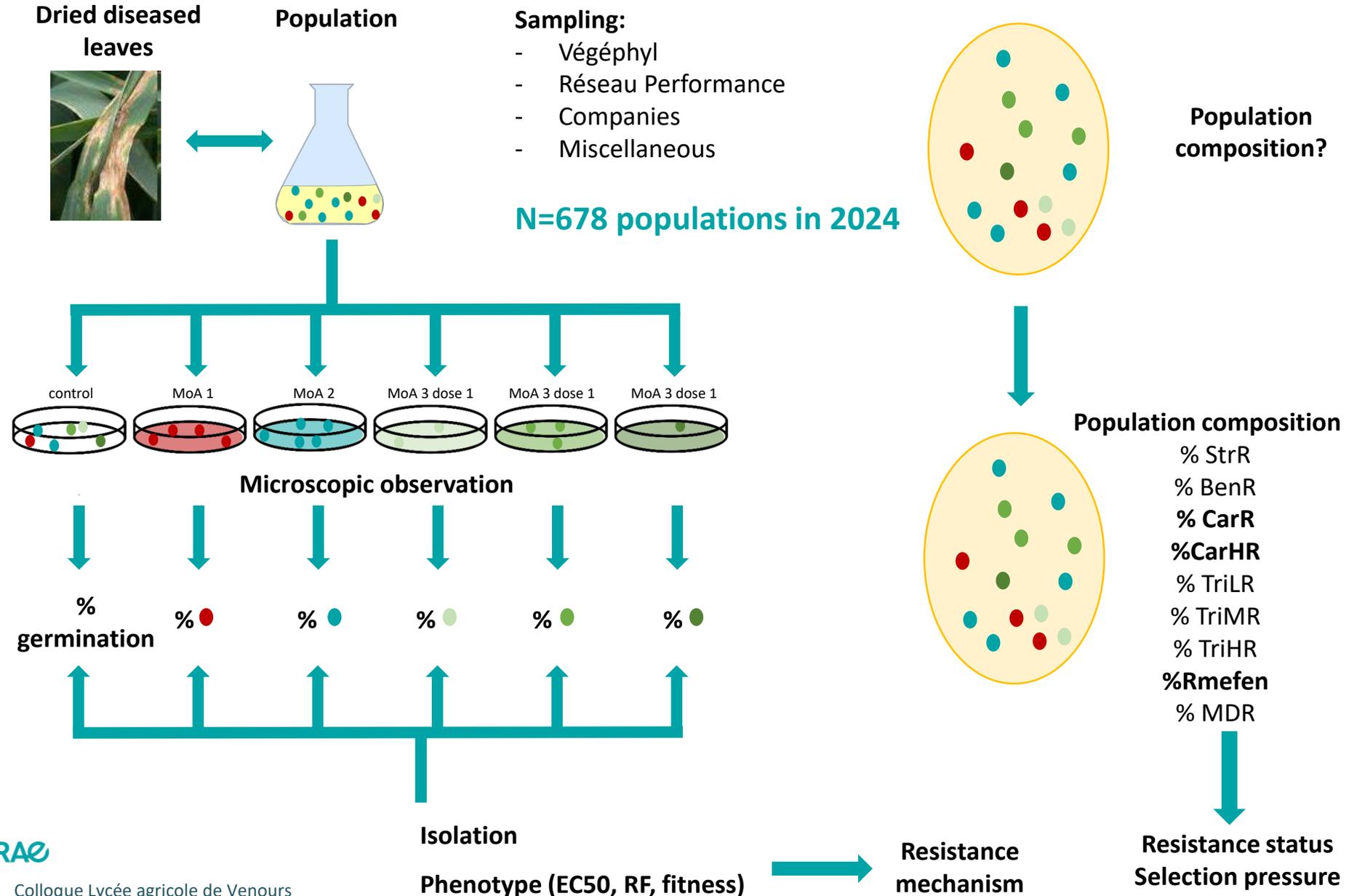
Conséquences pratiques ²

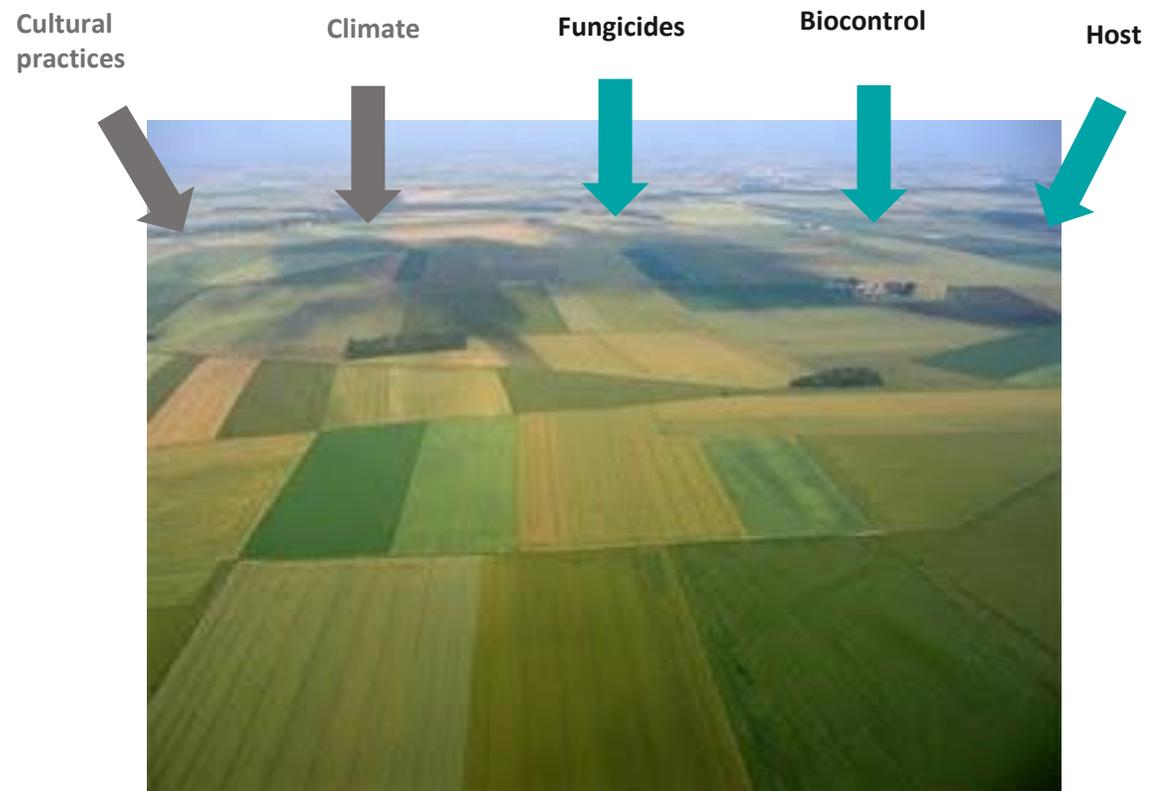
Niveau de résistance	Fréquence des individus résistants	
	Faible [< 0.1 ou 10 %]	Fort [> 0.5 ou 50 %]
Faible [5 – 15]	++	+ / ++
Fort [> 100]	+ / ++	-

¹ Niveaux (syn. Facteurs, Coefficients) de résistance et Fréquences (syn. Pourcentages) de souches résistantes → définition dans *Bulletin OEPP 18, 569-574 (1988)*

² Efficacité pratique → ++ : bonne, + : correcte, - : réduite

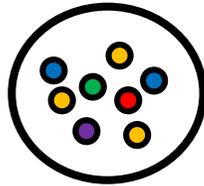
➤ Resistance frequency-based approach as routine monitoring for *Z. tritici*





Que se passe-t-il lorsqu'on retire un/des levier(s) de protection des cultures ?

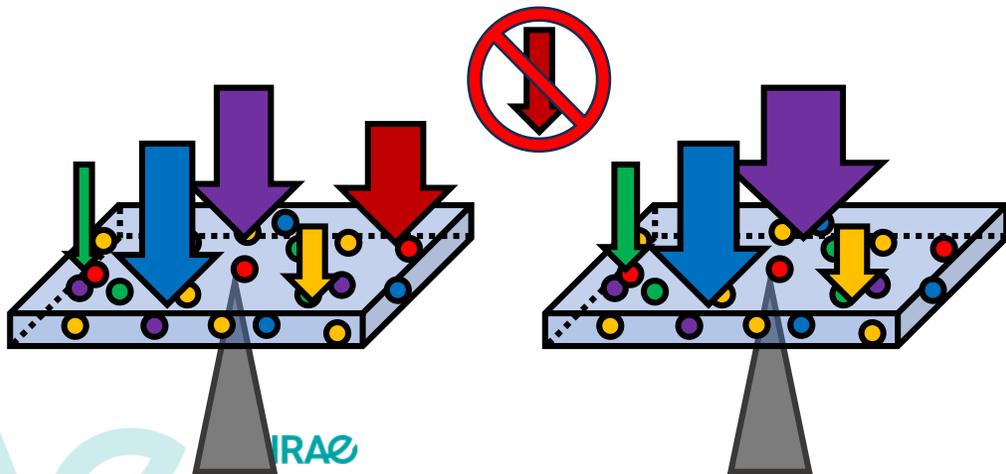
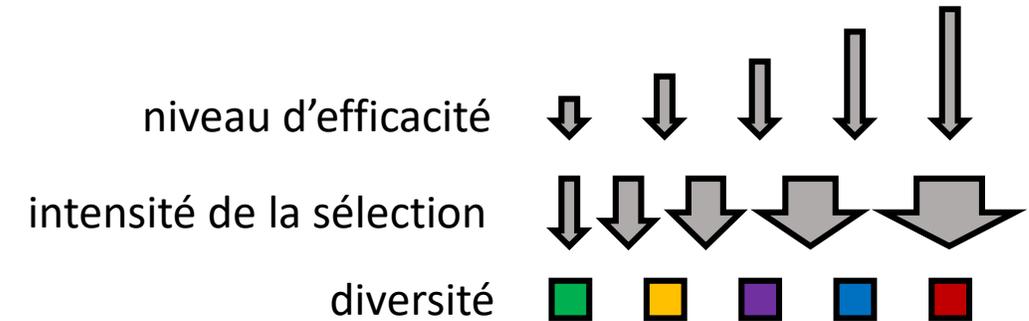
population d'un bioagresseur avec diversité génétique



Intensité attaque croissante

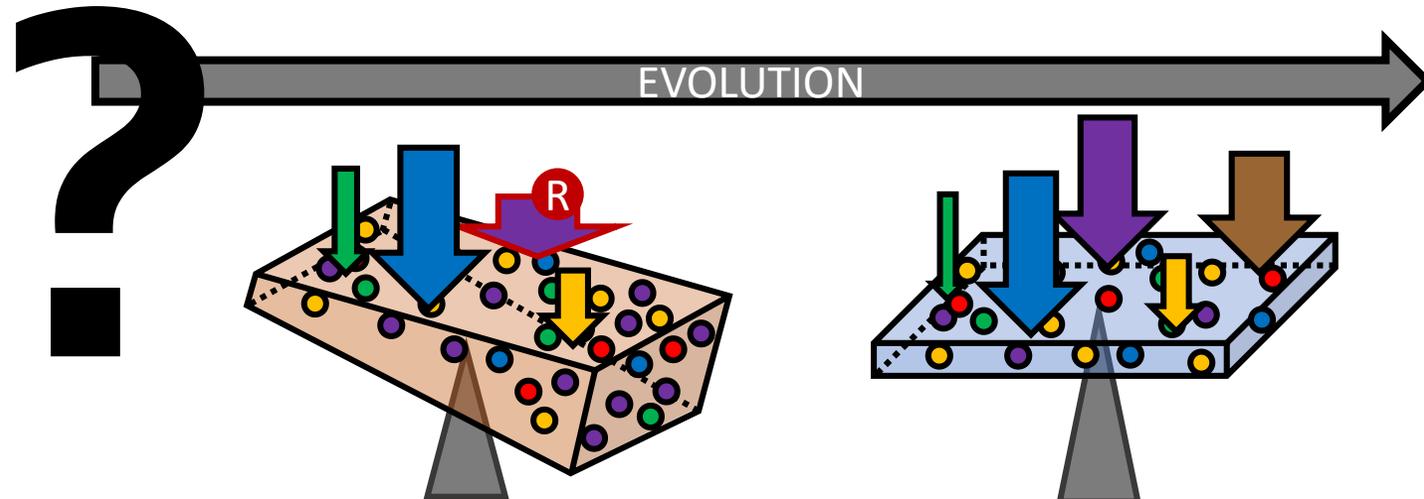


METHODES DE LUTTE



Situation initiale

Report après retrait



Transition déséquilibrée

Situation idéale à terme

Impact de la sensibilité variétale et de la résistance en 2024

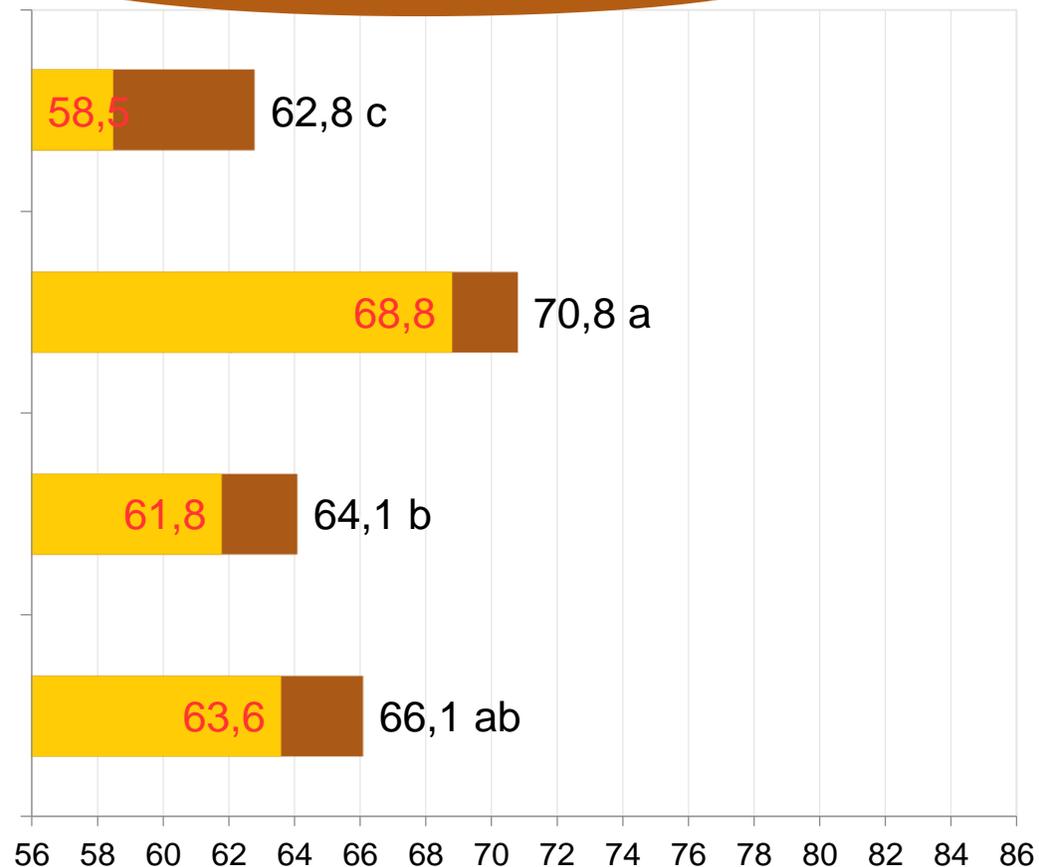
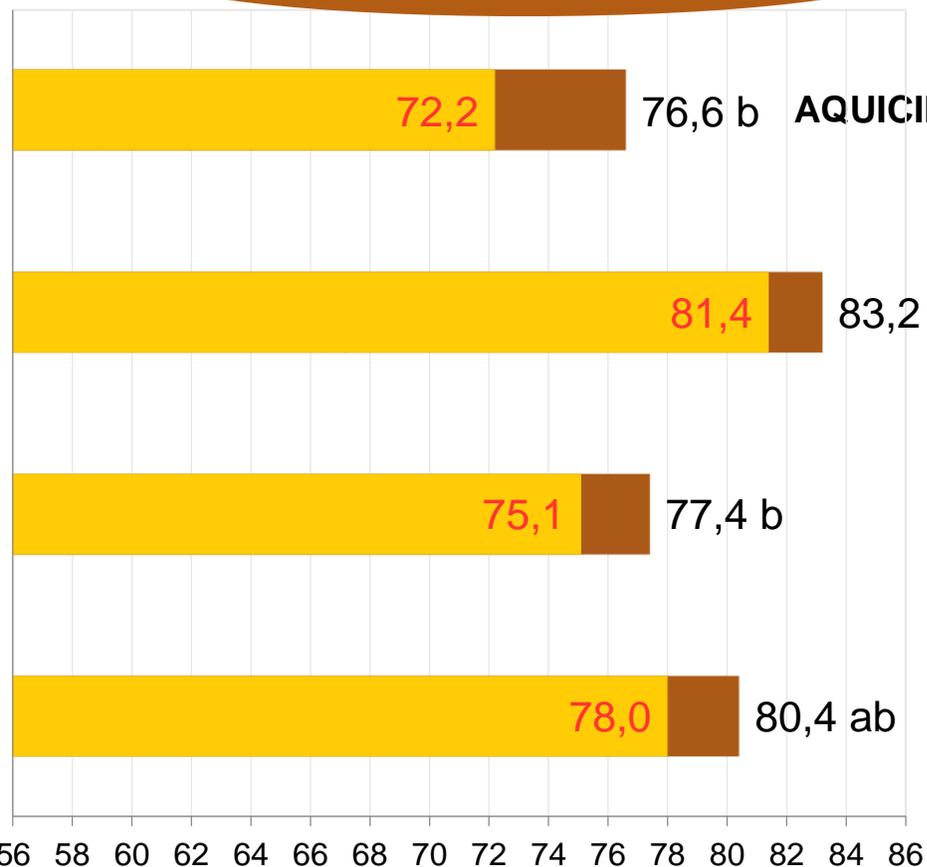
14 essais **CHEVIGNON**

14 essais **SY ADMIRATION**

Prix du blé 19 €/q

RENDEMENT brut et net q/ha

RENDEMENT brut et net q/ha



Rendement Témoin : 68.1 q/ha

Nuisibilité : 15.1 q/ha

TNT Chevignon

TriHR : 67%

MDR : 29%

CarR : 35%

CarHR : 23%

TNT Sy Admiration

TriHR : 71%

MDR : 22%

CarR : 42%

CarHR : 16%

Rendement Témoin : 53.3 q/ha

Nuisibilité : 17.5 q/ha