

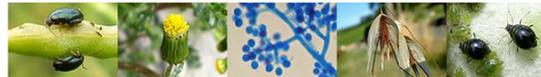
# Prévenir et réduire les risques de sélection de résistances: de la théorie à la pratique, des pistes pour améliorer la durabilité des PPP

C. Délye – A.S. Walker – M. Siegwart

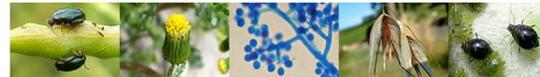
[contact-r4p@inra.fr](mailto:contact-r4p@inra.fr)

[www.inra-r4p.fr](http://www.inra-r4p.fr)

 R4P\_network



# Pourquoi s'embêter à tenter de limiter le risque de résistances aux PPP?



## Rappel - pourquoi les PPP sont-ils tant utilisés?

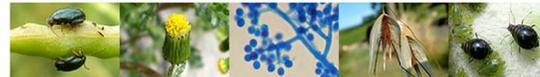
**Facile** (un p'tit passage de pulvé, et c'est plié!)

**Pas / peu cher** (généralement)

**Efficace et constant** (tuent jusqu'à 95 à 99% des individus sensibles)

**Sélectif** (tuent les bio-agresseurs, pas les cultures)

**Rapide** (surtout pour une très grande exploitation)



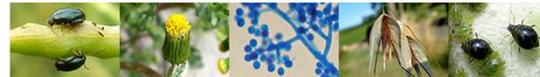
# Rappel - pourquoi les PPP sont-ils tant utilisés?

Les techniques de contrôle alternatives aux PPP sont *en général* moins efficaces et plus contraignantes

Contrôle efficace des bioagresseurs



Préserver l'efficacité des PPP dans la durée



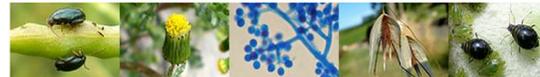
# Deux idées reçues sur la résistance et les PPP

## Idée reçue numéro 1:

« Il y aura toujours de nouveaux modes d'action pour remplacer ceux perdus »

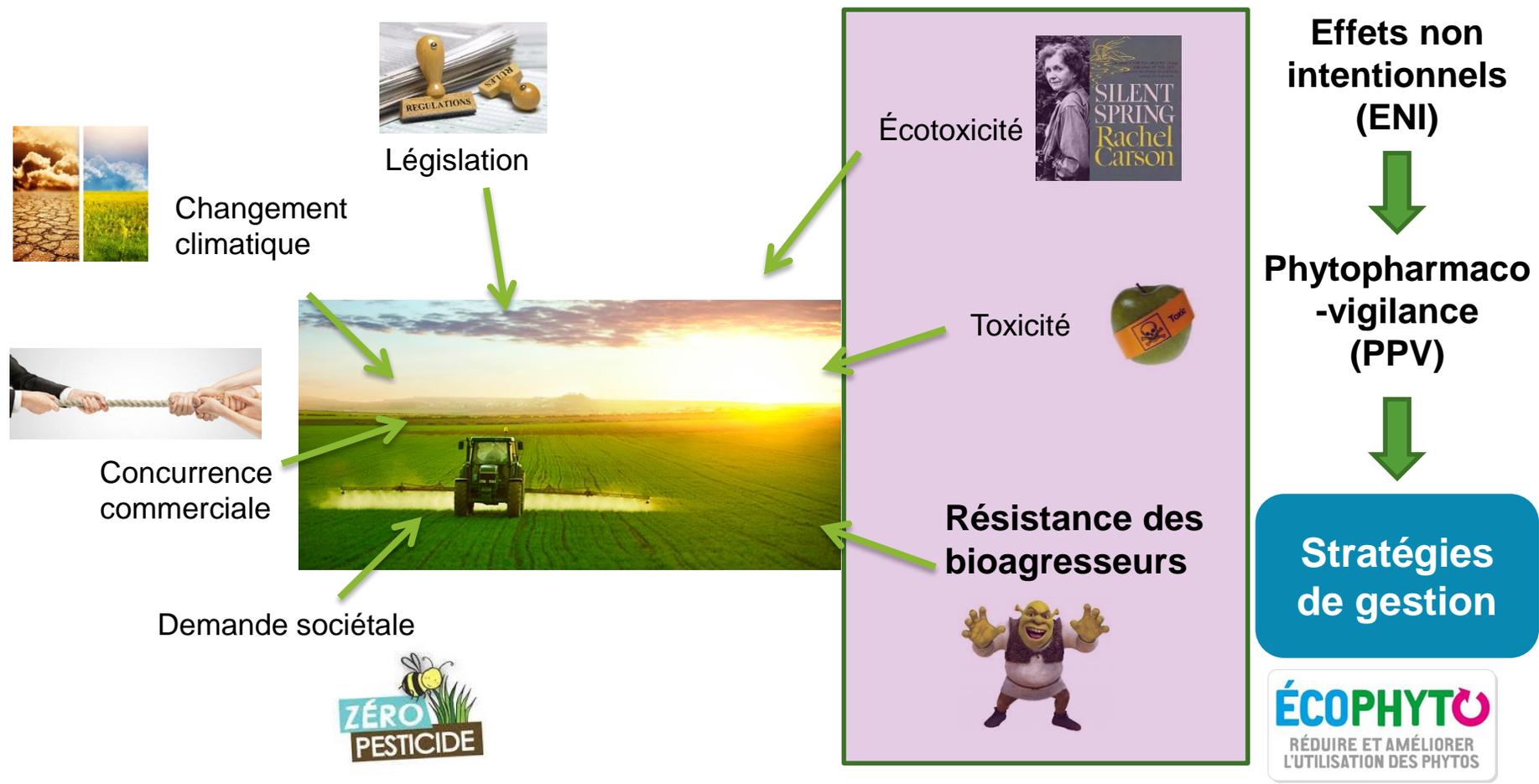
## Idée reçue numéro 2:

« La résistance disparaît quand on arrête de traiter avec le produit qui l'a sélectionnée »



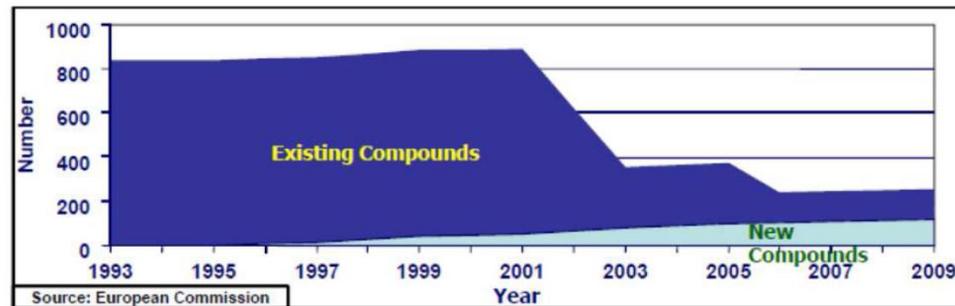
# Idée reçue numéro 1: « Il y aura toujours de nouveaux modes d'action pour remplacer ceux perdus »

## Contexte d'utilisation des PPP



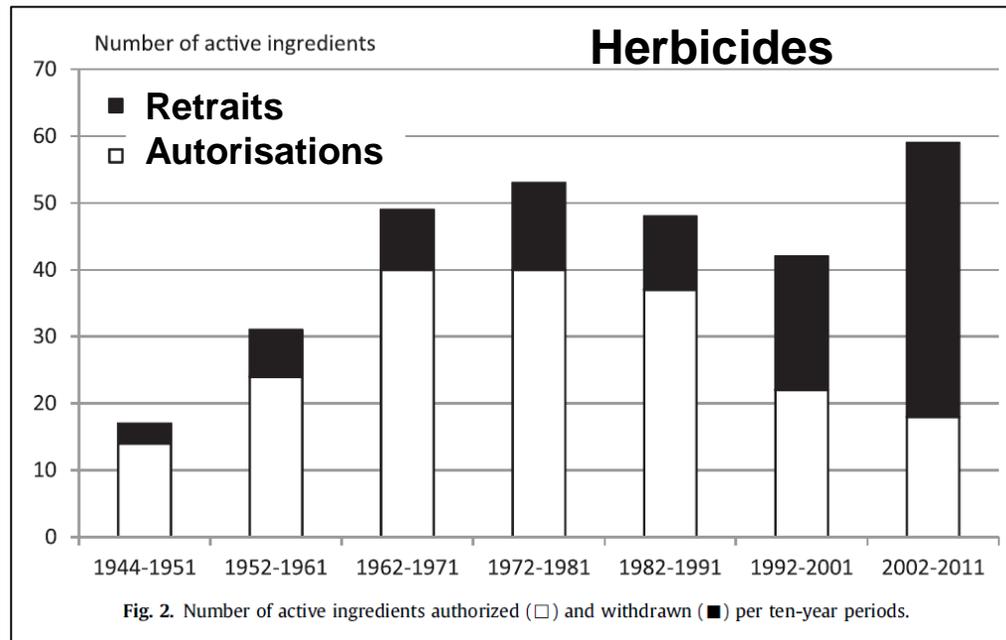
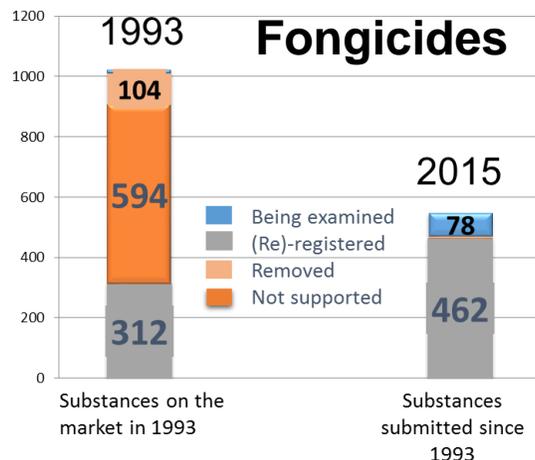
# Disponibilité des PPP

Le nombre de pesticides autorisés en UE 1993-2009 sur la base de la directive 91/414/CEE

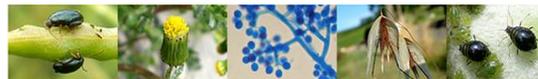


Réduction de 60% du nombre de substances en Europe sur 1993-2015  
Quid de la diversité des modes d'action??

Evolution of fungicide registration in Europe



Chauvel et al, 2012

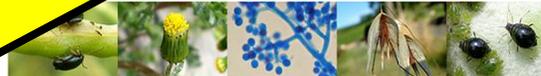


# Deux idées reçues sur la résistance et les PPP

Idée reçue

« Il y aura toujours des résistances d'action pour les PPP dans 5 à 10 ans »

**FAUX**  
**RIEN** avant 5 à 10 ans au mieux  
(2-3 ans en fongicides)

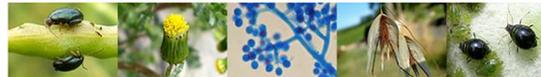


COLLOQUE RÉSISTANCE AUX PESTICIDES 14 ET 15 FÉVRIER 2019 À MONTRÉAL

# Deux idées reçues sur la résistance et les PPP

## Idée reçue numéro 2:

« La résistance disparaît quand on arrête de traiter avec le produit qui l'a sélectionnée »



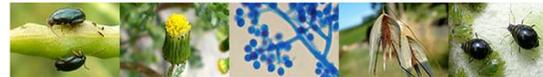
Une population de bio-agresseurs contient des individus résistants à X.

Si l'on arrête X, peut-on revenir à 100% d'individus sensibles à X?

Non si l'on continue à utiliser des PPP concernés par la résistance croisée au PPP initial

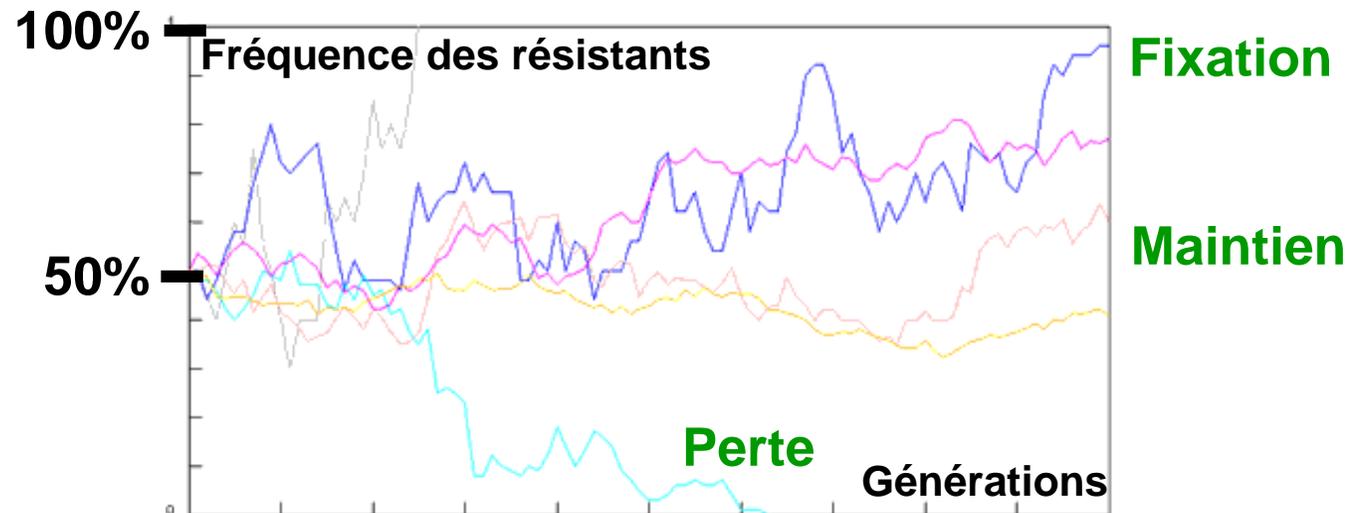


Spectre de résistance croisée

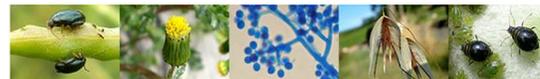


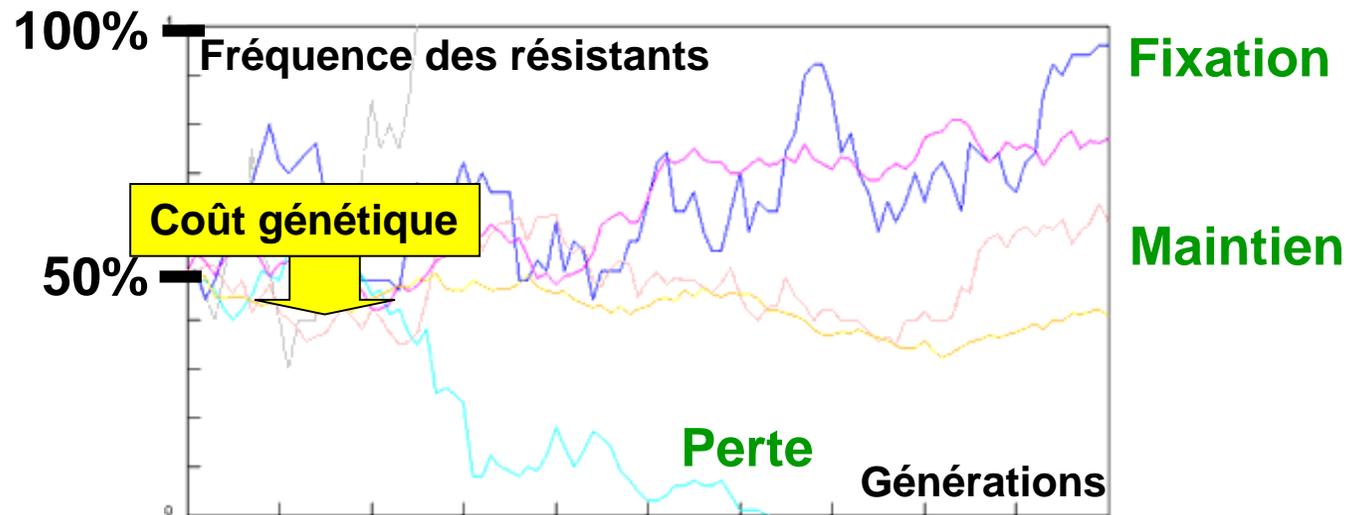
## Notions de population, de dérive et de coût génétique

- **Population:** ensemble d'individus échangeant des gènes  
Individus avec génomes différents → allèles de résistance différents
- **Dérive génétique:** variation aléatoire de la fréquence d'un allèle dans une population



**La probabilité de maintien d'un allèle dans une population en l'absence de sélection est lié à sa fréquence**



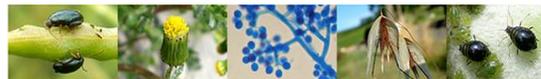


La probabilité de « perdre » un allèle résistant en l'absence de X est liée à :

- La fréquence de l'allèle  
*Moins la fréquence est élevée, plus il est facile de perdre un allèle*
- Le coût génétique éventuel associé  
*Un allèle « coûteux » est plus facile à perdre*
- La démographie de l'espèce  
*Une petite population perd plus facilement un allèle par dérive*

Plus on arrête X tôt au départ de la résistance (**très faibles fréquences de résistants**), plus on a une chance de se débarrasser des résistants par dérive

Disposer de tests de résistance **SENSIBLES** et **FIABLES**



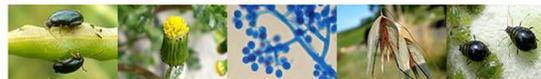
# Deux idées reçues sur la résistance et les PPP

Idée reçue

« La résistance apparaît quand on arrête de traiter avec le produit qui l'a sélectionnée »

**FAUX la plupart du temps**

**Il ne faut pas rêver**  
Tout PPP « perdu » pour cause de résistance l'est généralement **pour longtemps / pour de bon**



# Pourquoi s'embêter à tenter de limiter le risque de résistances aux PPP?

Parce que les PPP sont une ressource finie

- Pas de nouveau MoA dans le court terme

↻ **Faire avec ce qu'on a et faire durer ce qu'on a**

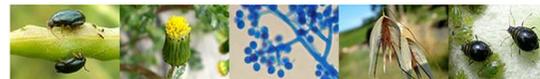
Parce que la sensibilité aux PPP devrait être considérée comme un « bien commun »

- Gestion concertée entre tous les acteurs

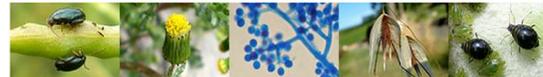
Parce que prévenir vaut en général mieux que tenter de guérir

- Privilégier une vision à long terme

↻ « Perdre » **un peu** régulièrement pour gagner **beaucoup** sur le long terme



# La mécanique de la sélection des résistances



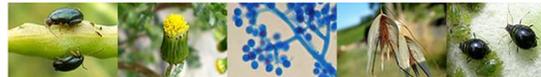
## Avertissement

L'adaptation par évolution est la base de la persistance de la vie sur Terre.

La résistance aux PPP est une adaptation par évolution.

Il est donc illusoire d'imaginer **prévenir** les résistances.

Par contre, on peut envisager de **retarder** leur évolution.

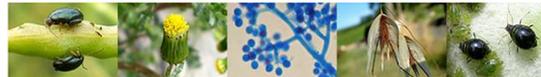


Appliquer un PPP tue les individus sensibles dans les populations de bio-agresseurs  
**MAIS** favorise les individus résistants

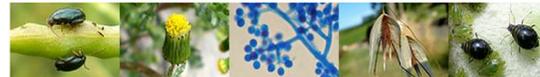
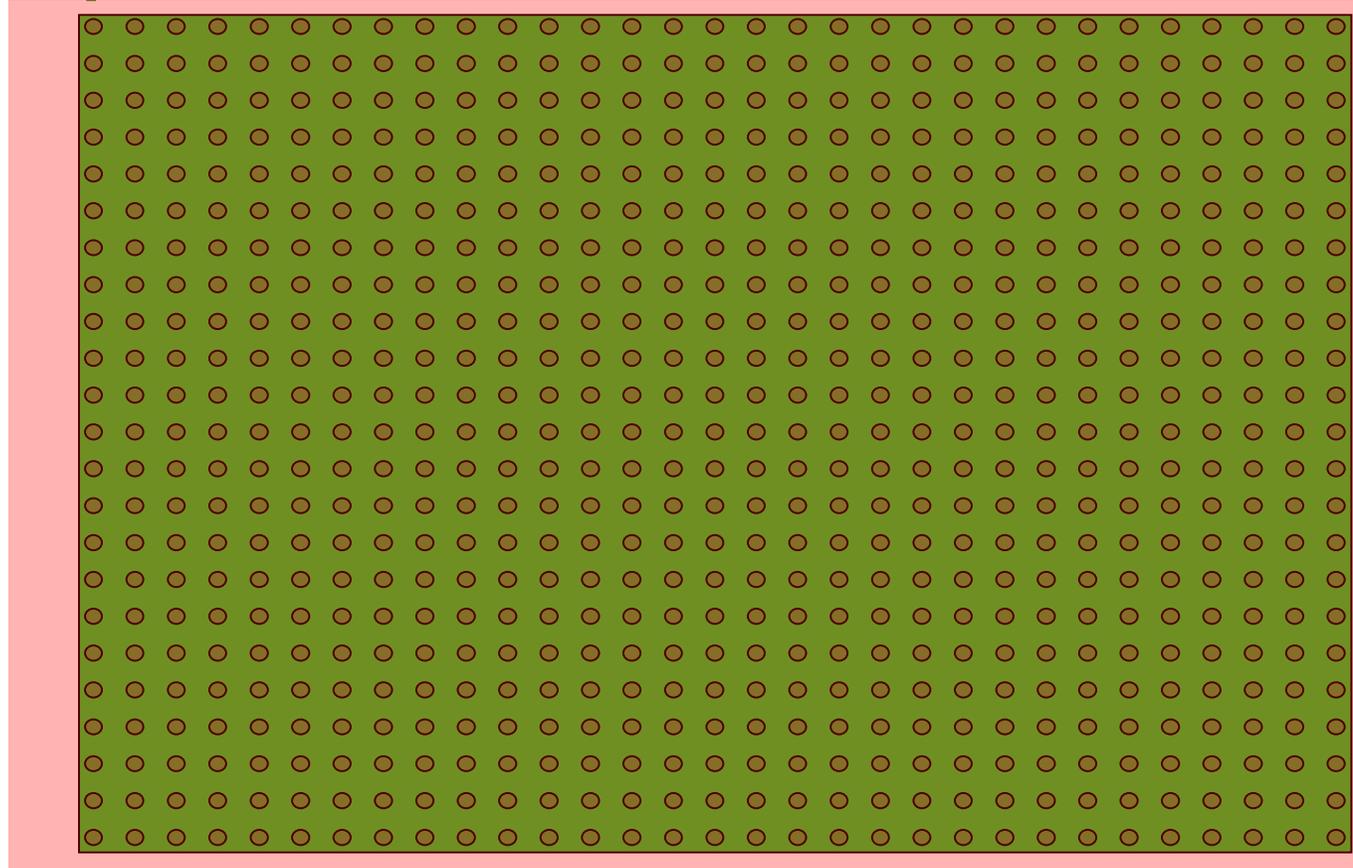
Appliquer un PPP exerce une pression de sélection sur les populations de bio-agresseurs

La résistance est la réponse évolutive des populations de bio-agresseurs à la pression de sélection des PPP

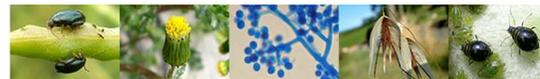
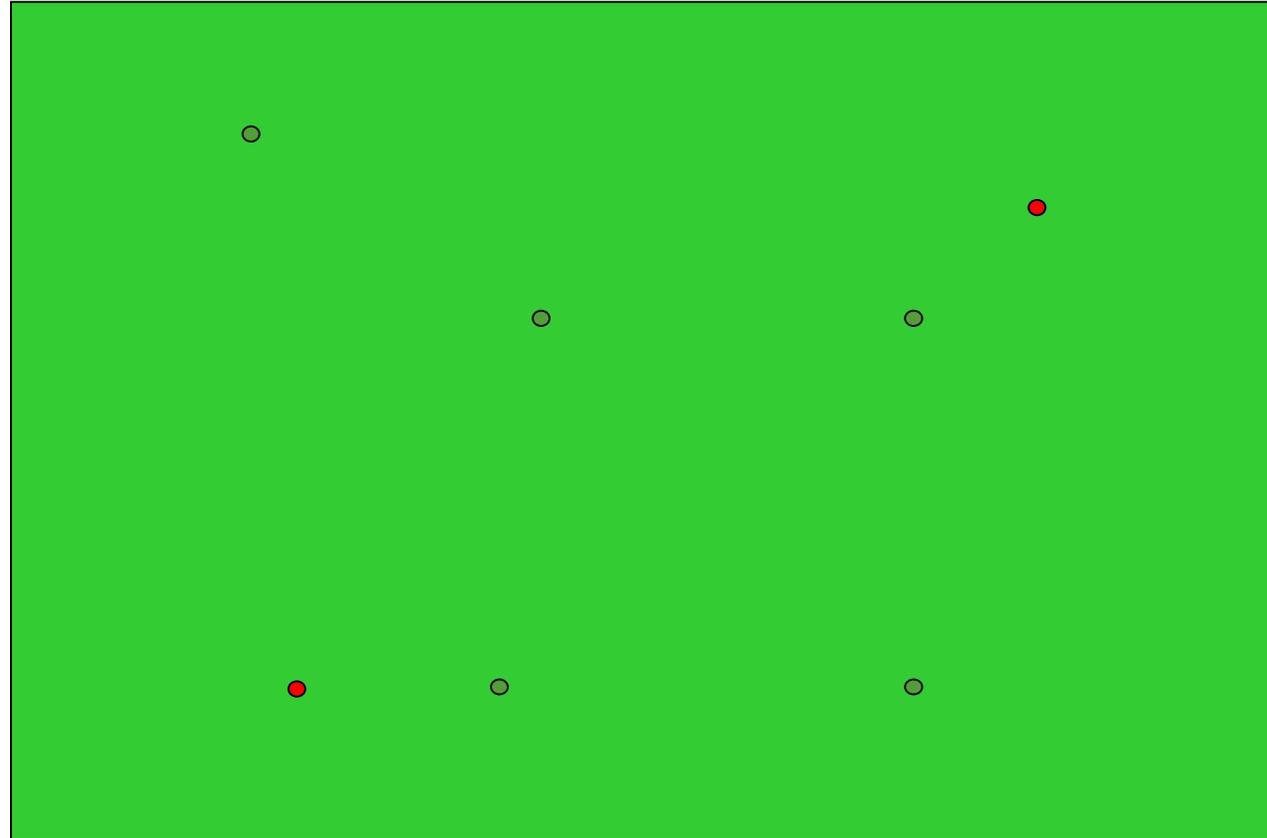
**Appliquer un PPP = sélectionner la résistance**



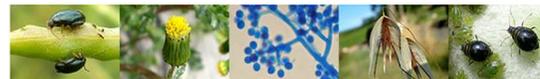
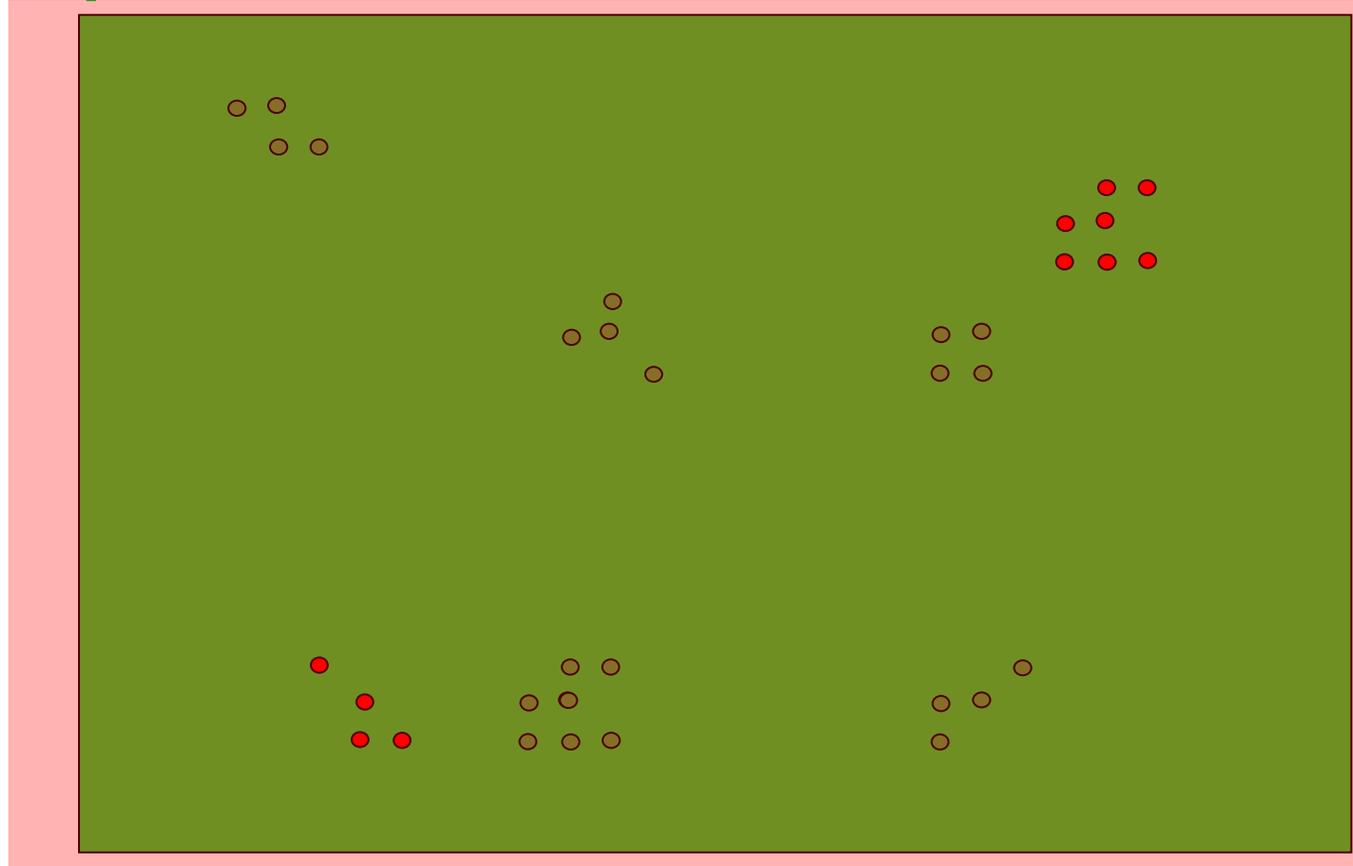
# Appliquer un PPP = sélectionner la résistance



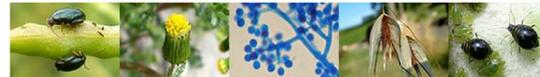
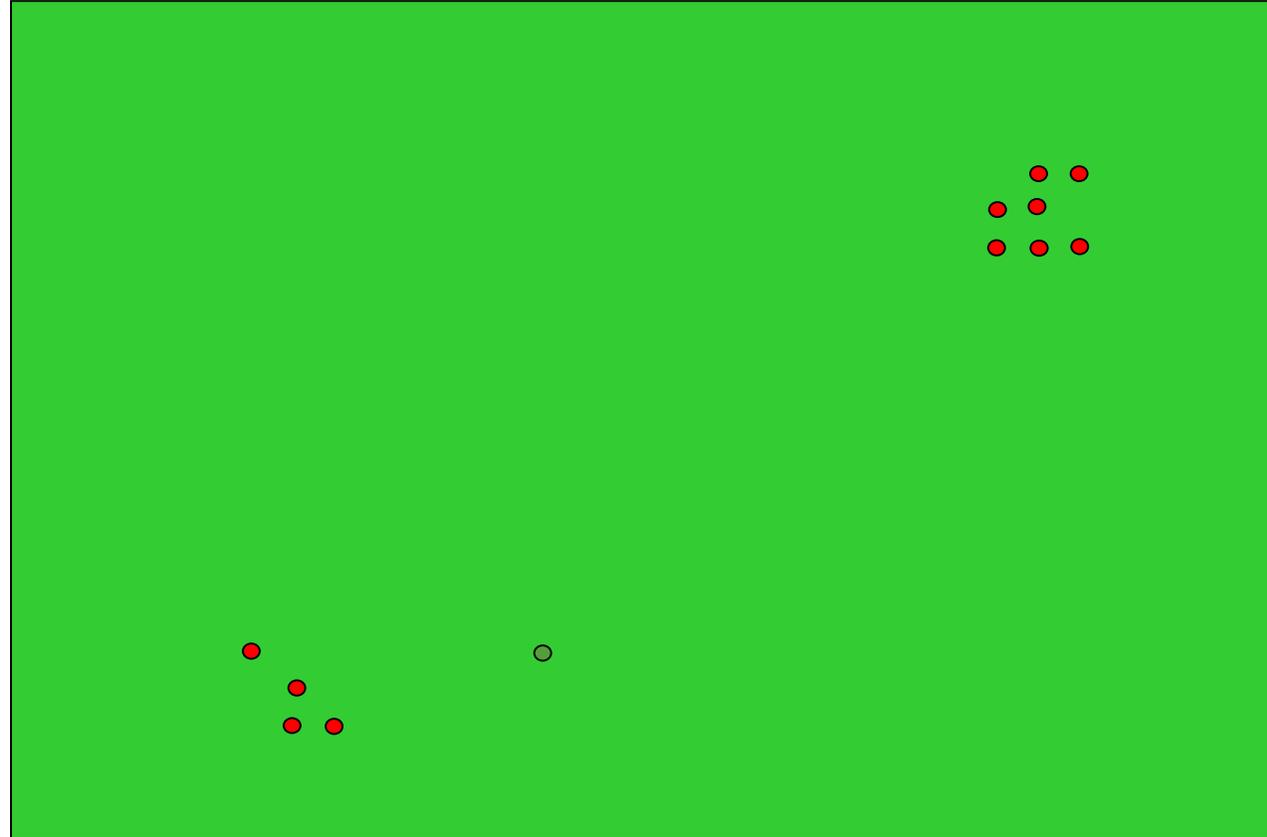
# Appliquer un PPP = sélectionner la résistance



# Appliquer un PPP = sélectionner la résistance



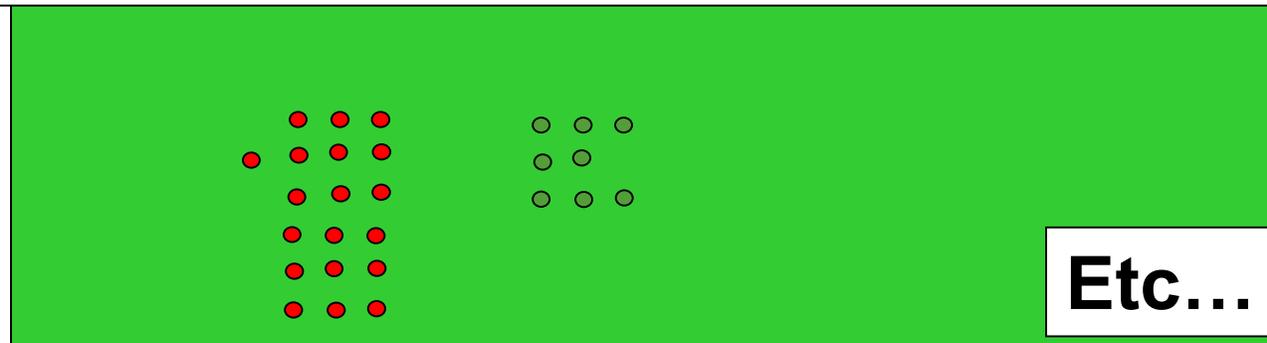
# Appliquer un PPP = sélectionner la résistance



# Appliquer un PPP = sélectionner la résistance



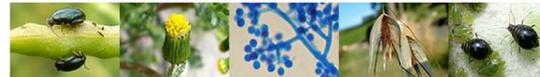
↑ fréquence des résistants à chaque cycle de sélection  
(plus ou moins rapide en fonction du coût éventuel de la résistance)



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

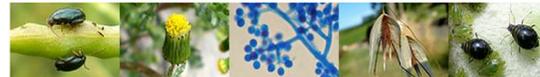
## Sélection des résistances:

« Si tu ne changes jamais de direction, tu finiras par arriver là où tu allais »  
(proverbe chinois)



# Comment **maximiser** le risque de résistance aux PPP?

Attention: mauvaises pratiques!



## Comment maximiser le risque de résistance aux PPP?

### Faire du contrôle:

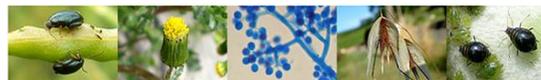
- Uniquement chimique
- Avec un seul PPP / un seul mode d'action
- Utiliser ce PPP / ce mode d'action le plus fréquemment possible

Ça peut marcher à court terme...



### Astuces pour que la résistance arrive encore plus vite:

- Travailler en monoculture
- Traiter tardivement (pourquoi se presser?)
- Traiter sur de fortes infestations (en curatif)
- Traiter avec une efficacité « limite » (réduire les doses...)



## Comment maximiser le risque de résistance aux PPP?

### Faire du contrôle:

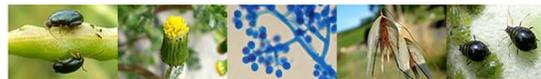
- Uniquement chimique
- Avec un seul PPP / un seul mode d'action
- Utiliser ce PPP / ce mode d'action le plus fréquemment possible

Pas de nouveaux modes d'action  
PPP avant  
**longtemps**

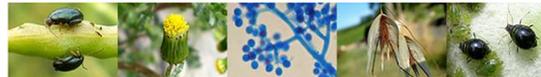


### Astuces pour que la résistance arrive encore plus vite:

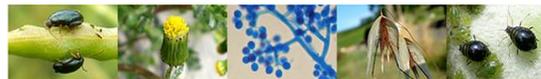
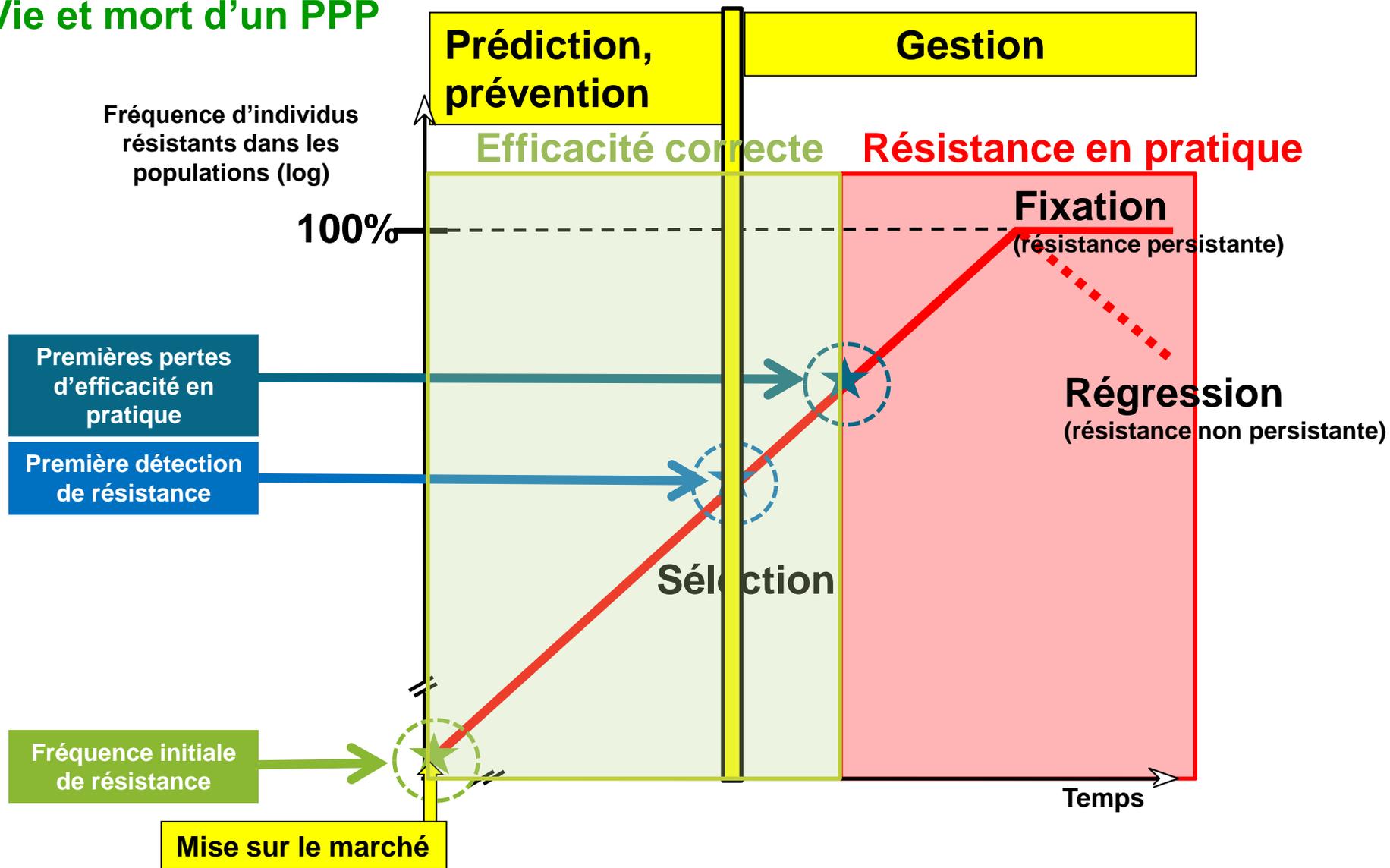
- Travailler en monoculture
- Traiter tardivement (pourquoi se presser?)
- Traiter sur de fortes infestations (en curatif)
- Traiter avec une efficacité « limite » (réduire les doses...)



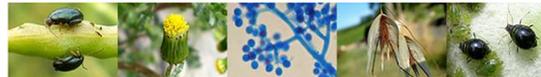
# Vie et mort d'un PPP: les grandes étapes de la sélection d'une résistance



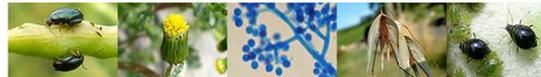
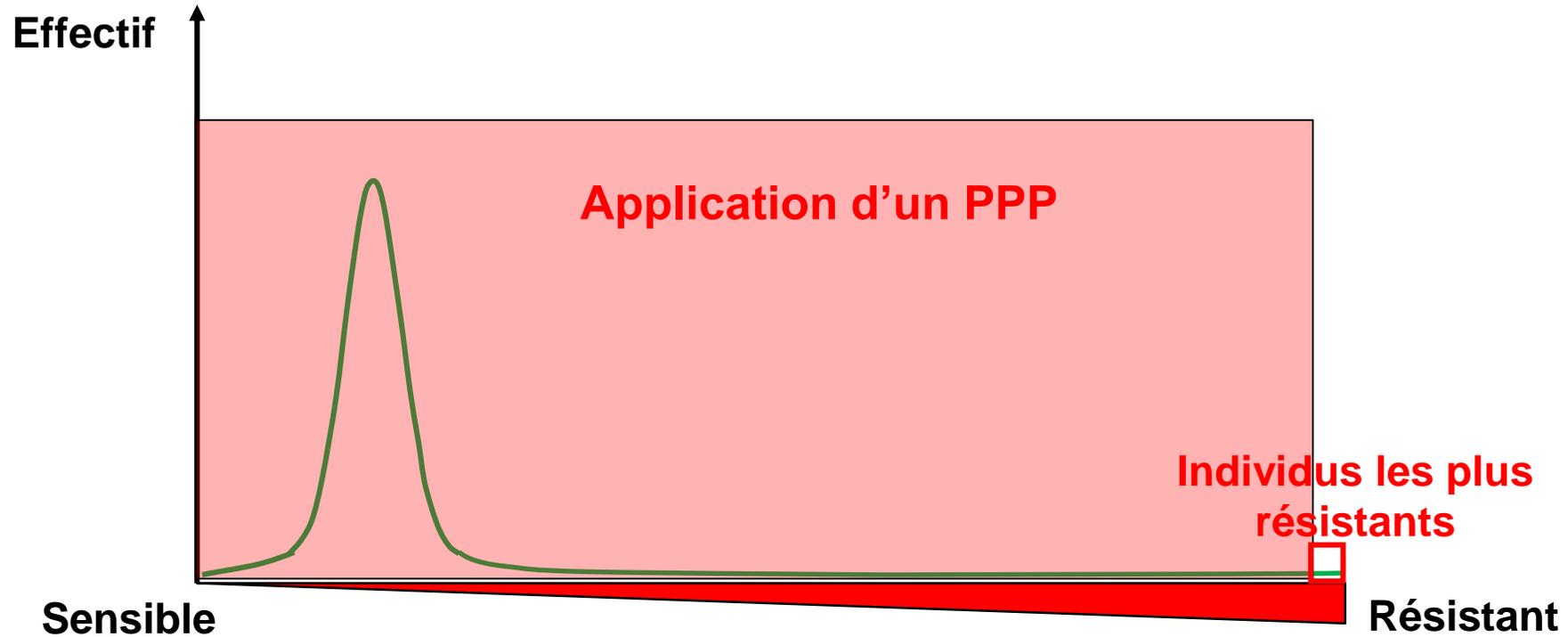
# Vie et mort d'un PPP



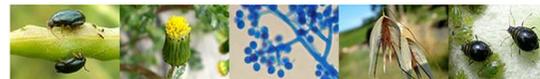
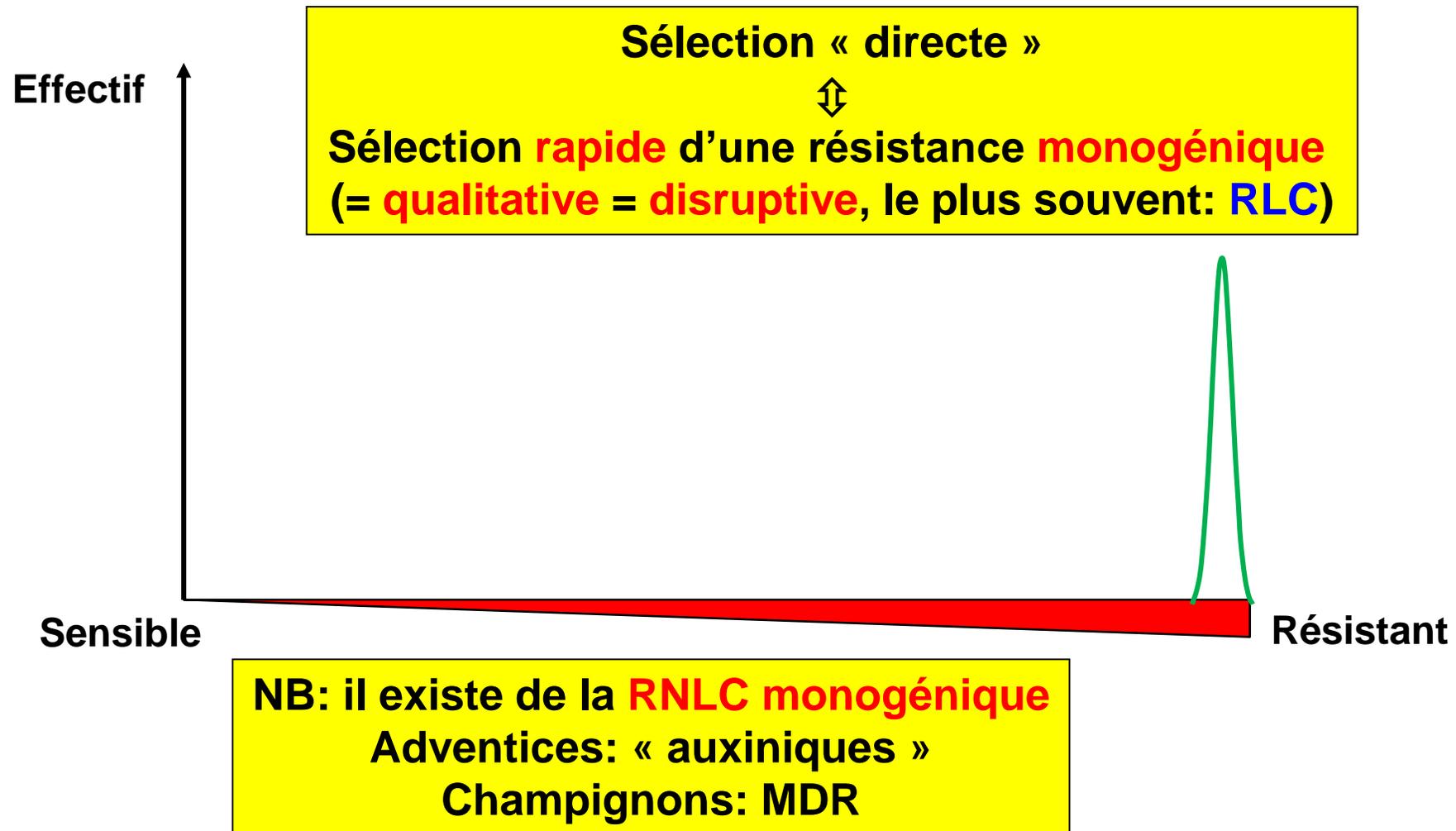
# Les deux types de sélection d'une résistance



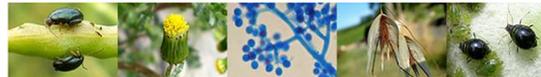
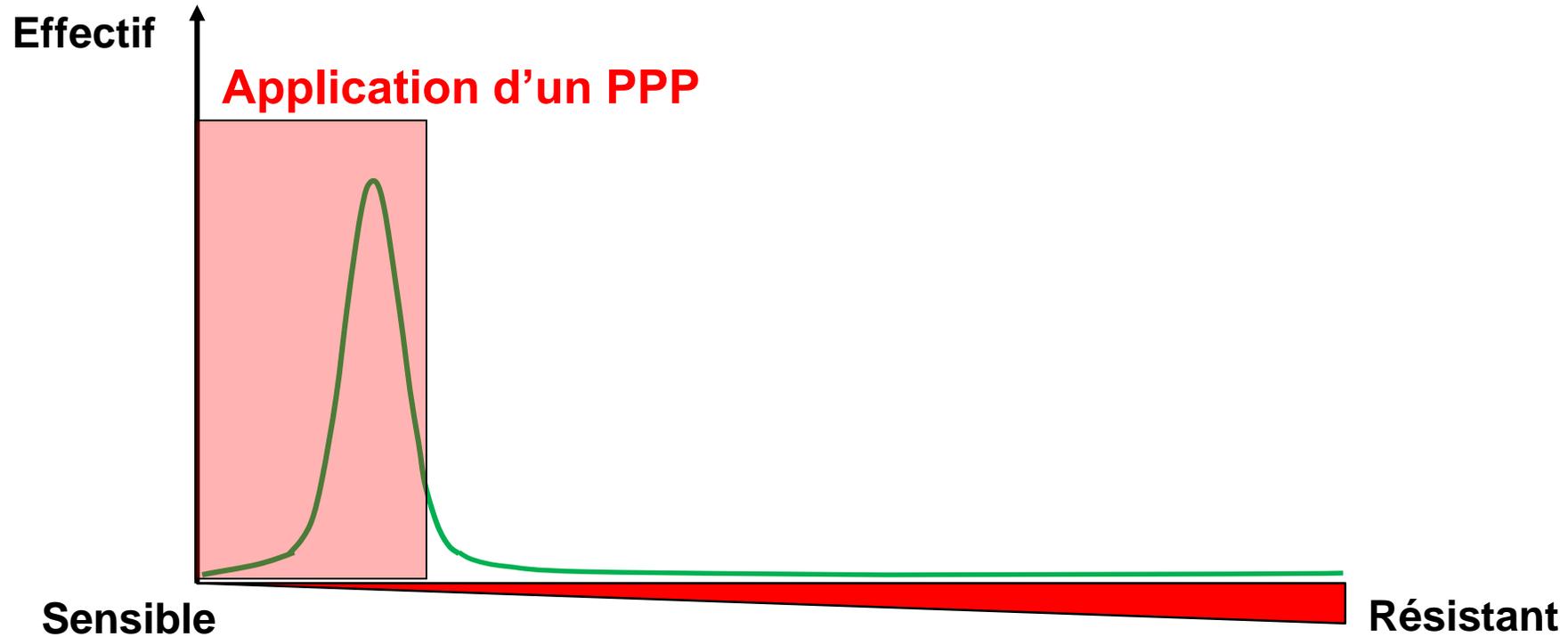
## Sélection « directe » d'une résistance



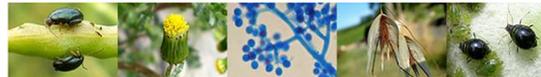
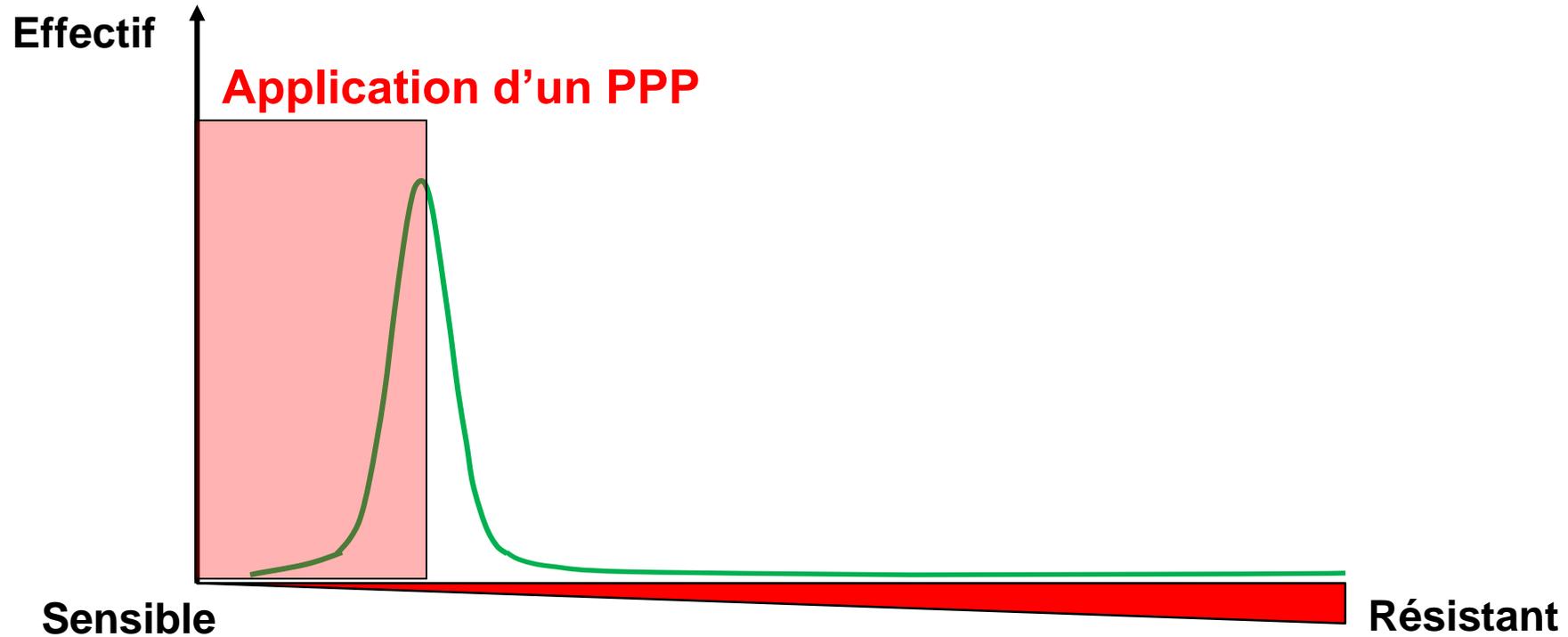
## Sélection « directe » d'une résistance



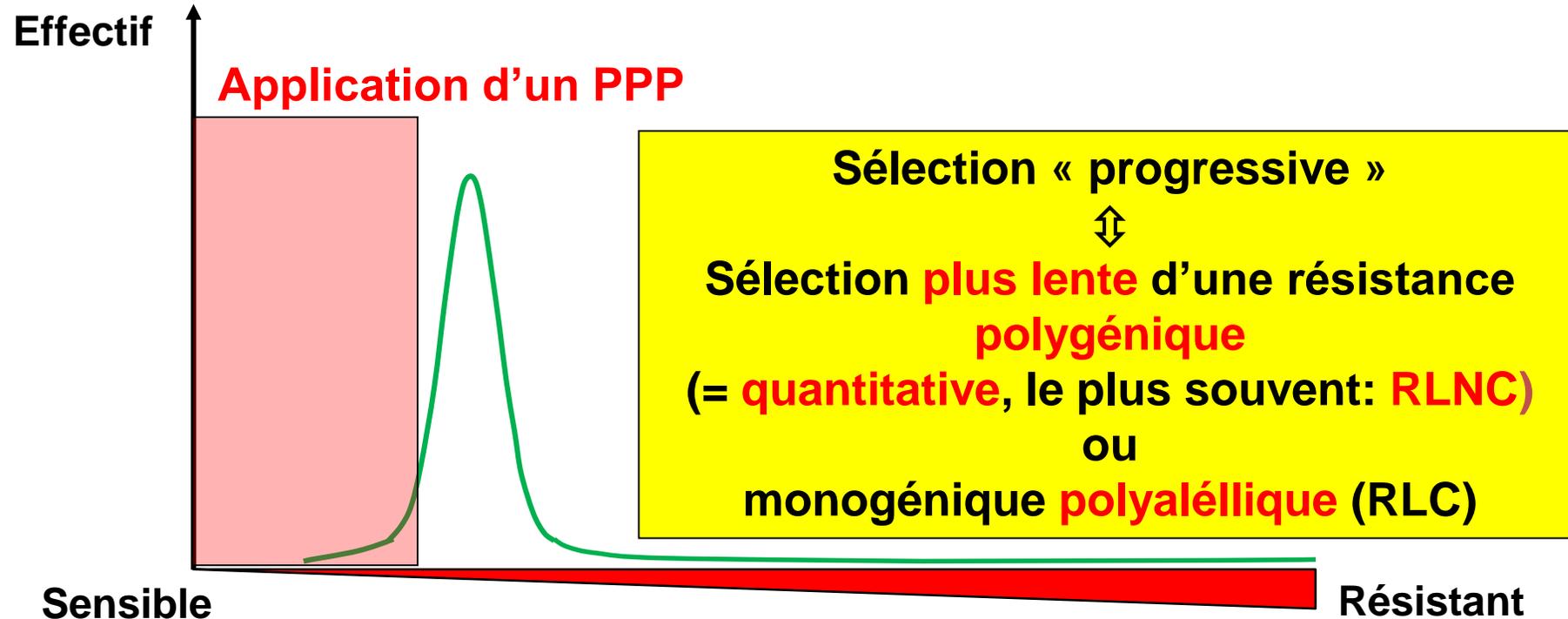
## Sélection « progressive » d'une résistance



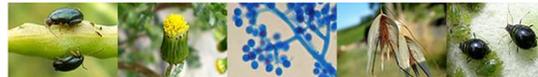
## Sélection « progressive » d'une résistance



# Sélection « progressive » d'une résistance



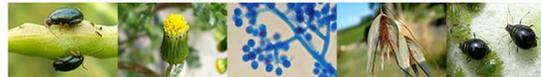
NB: il existe de la **RLC quantitative**  
(accumulation de mutations)  
Adventices: inhibiteurs de l'ALS  
Champignons: IDMs



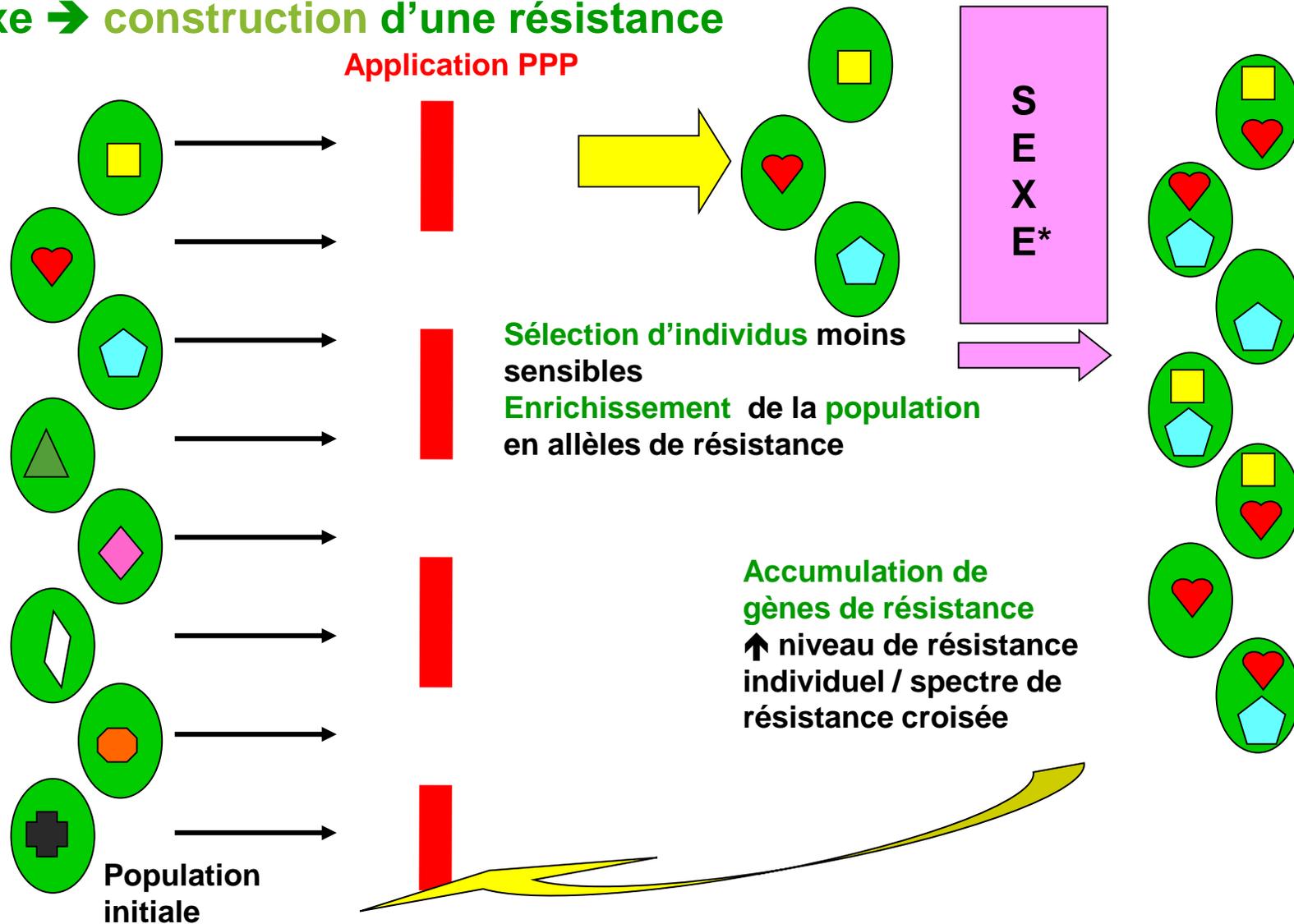
COLLOQUE RÉSISTANCE AUX PESTICIDES 14 ET 15 FÉVRIER 2019 À MONTRÉAL

# Importance du système de reproduction dans la « construction » de résistances

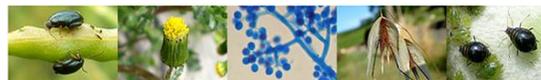
## Sex or not sex?



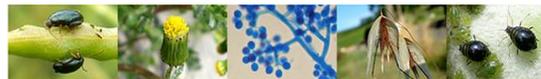
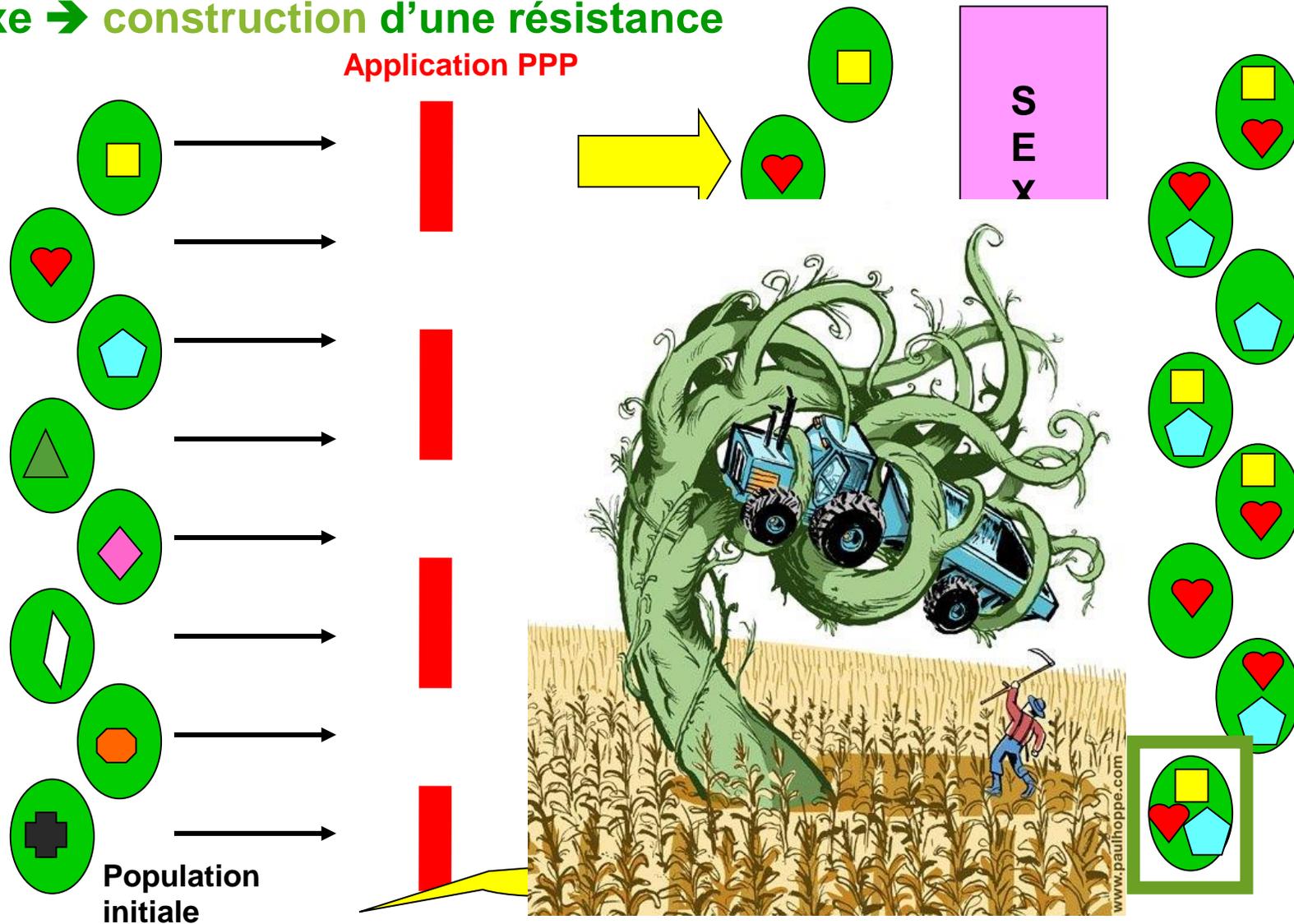
# Sexe → construction d'une résistance



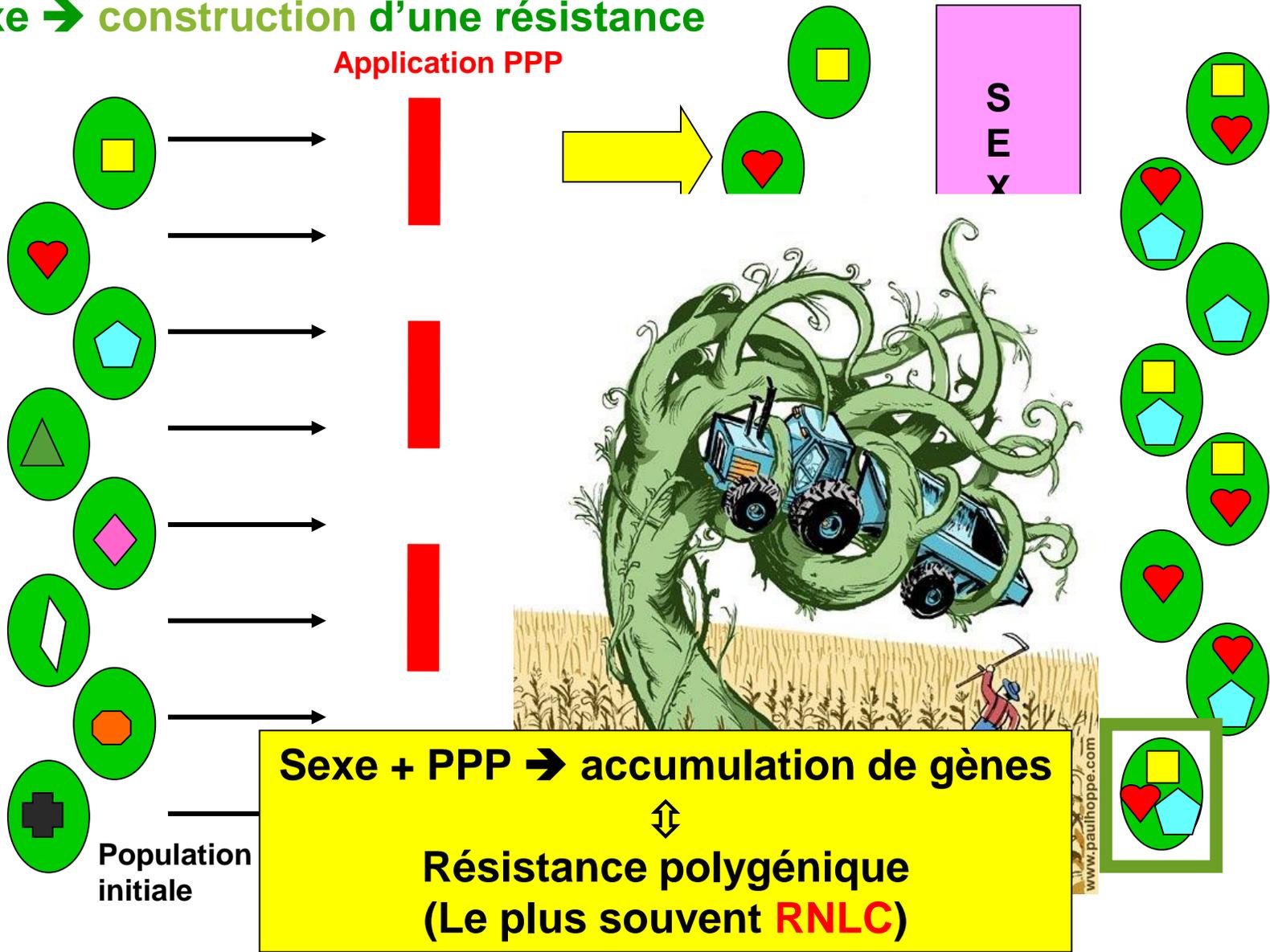
\* Ou parasexualité chez les champignons



# Sexe → construction d'une résistance

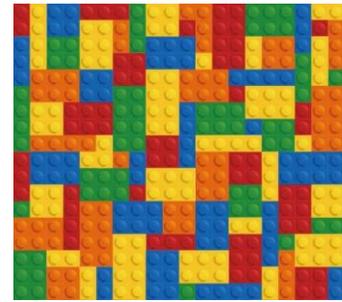


# Sexe → construction d'une résistance

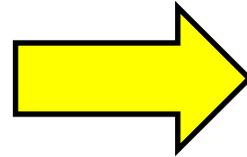


Sexe → destruction d'une résistance (surtout en l'absence de PPP)

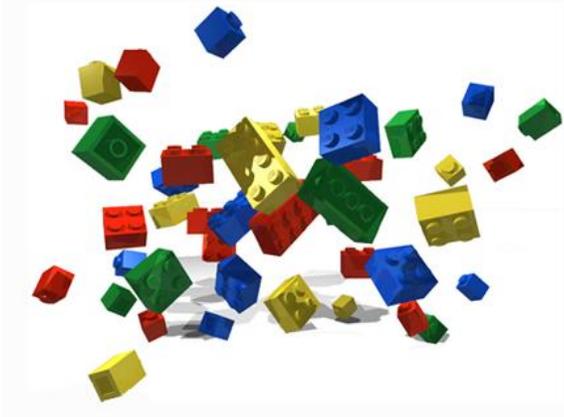
R par résistance polygénique



X S

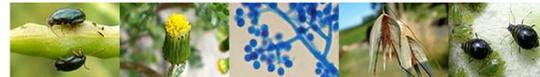


Dissociation de la résistance dans la descendance

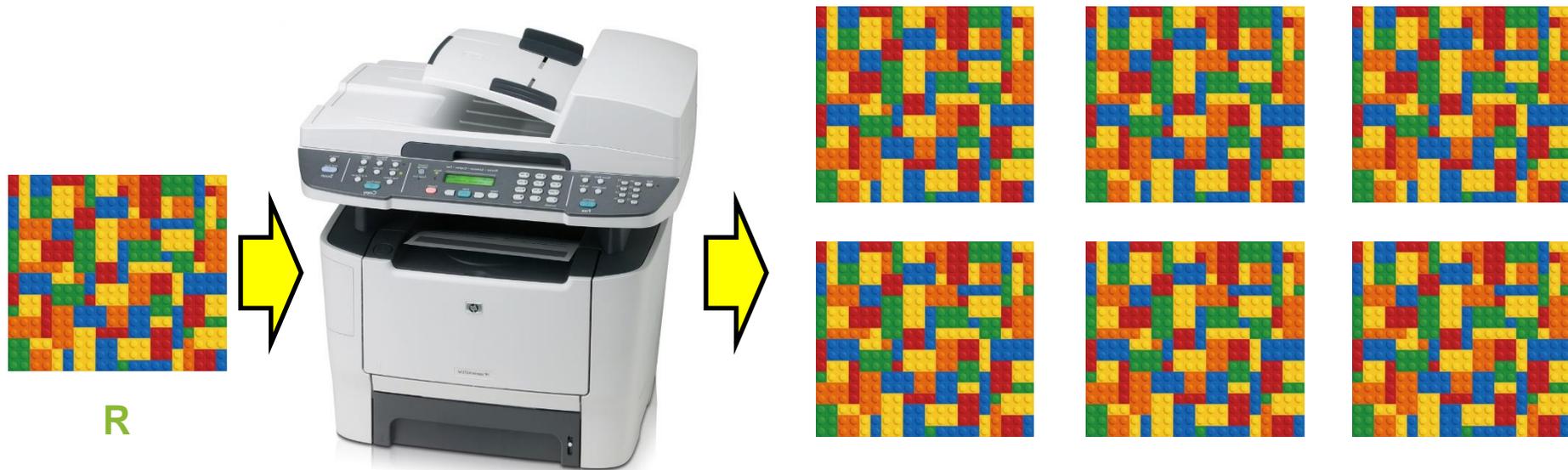


Peu/pas de descendants résistants  
Moins résistants que le parent R

PPP → favorisent l'accumulation par rapport à la dissociation



## Reproduction asexuée ou autogamie → copie d'une résistance

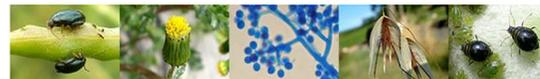


R

Reproduction asexuée  
ou autogamie

Pas de dissociation de la résistance  
dans la descendance  
(Mais pas de construction possible non  
plus)

**Attention** aux organismes capables des deux types de  
reproduction (champignons, pucerons...)



## Pour résumer:

Évolution « **directe** » d'une résistance

**Base:** un gène / une mutation suffit

↳ Simple et efficace

**Au champ:** évolution **brutale** d'une résistance

**Type de résistance attendu: RLC** le plus souvent (donc résistance possible à **un seul mode d'action**)

↳ **Attention:** il existe de la RNLC monogénique

Évolution « **progressive** » d'une résistance

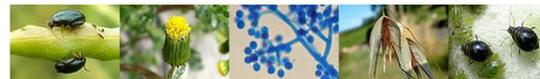
**Base:** accumulation progressive de plusieurs gènes et/ou mutations

↳ Compliqué, mais souvent redoutable une fois en place

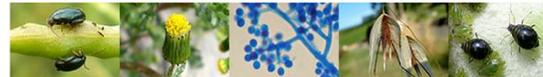
**Au champ:** évolution « **sournoise** » d'une résistance

**Type de résistance attendu: RNLC** le plus souvent (donc résistance possible à **plusieurs modes d'action**)

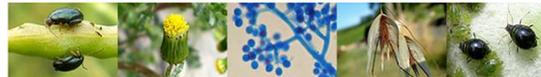
↳ **Attention:** il existe de la RLC **quantitative** par accumulation de mutations (champignons)



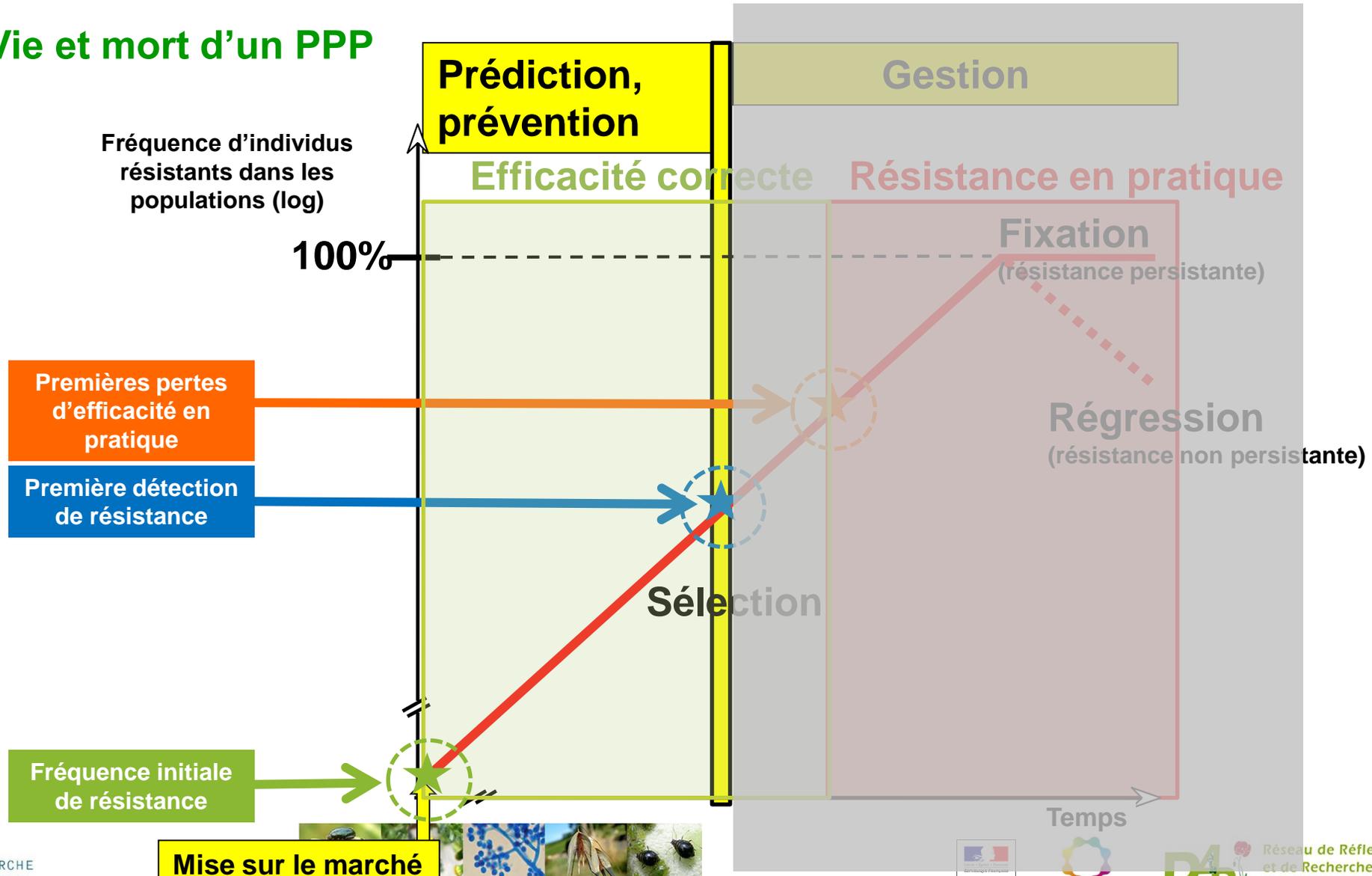
# Questions?



# PRÉDIRE LA RÉSISTANCE: Anticiper la rapidité de sélection de mutants résistants et décrire leurs caractéristiques



# Vie et mort d'un PPP



# Préalable: connaître son/ses bio-agresseur(s) et ses PPP

## 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)

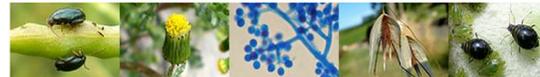


## Facteurs génétiques de la résistance

- 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



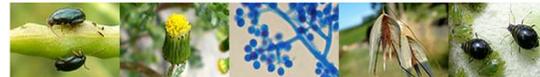
## Préalables à la gestion du risque de résistance au niveau pratique

**Qui connaît son bio-agresseur comme il connaît ses PPP en cent applications ne sera point défait.**

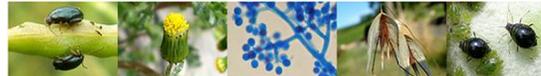
**Qui connaît ses PPP mais ne connaît pas son bio-agresseur sera victorieux une fois sur deux.**

**Qui ne connaît ni son bio-agresseur ni ses PPP est toujours en danger.**

(D'après Sun Tzu, « L'art de la guerre »)



# Prédire la résistance à l'aide des grilles de risque



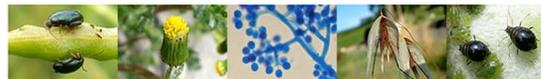
# Prédire le risque de résistance chez les champignons

## 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



7-8 mars 2017  
COLLOQUE RÉSISTANCE AUX PESTICIDES 14 ET 15 FÉVRIER 2019 À MONTRÉAL

# Prédire le risque de résistance chez les adventices

## Estimation en ligne du risque de résistance

The screenshot shows the R-sim website interface. At the top left is the R-sim logo with the tagline "Pour gérer la résistance aux herbicides". To its right is a yellow box containing the URL "www.r-sim.fr". Further right is a "Se connecter" button. The main content area is divided into two panels: "Nouvelle simulation" and "Ouvrir une simulation".

**Nouvelle simulation**

**Rotation**

Colza/Blé/Orge d'hiver

**Adventice**

Choisissez les 1 à 3 adventices les plus présentes sur votre parcelle.  
Maintenez la touche *Ctrl* appuyée pour sélectionner plusieurs lignes.

- Alchémille
- Amarante réfléchie
- Ambroisie (- de 15 pl./m2)
- Ambroisie (+ de 15 pl./m2)
- Ammi majus
- Anthémis
- Anthrisque

*\*Adventices pour lesquelles des cas de résistances aux herbicides des groupes A et/ou B ont déjà été identifiés en France.*

Valider

**Ouvrir une simulation**

Voir les simulations enregistrées lors de vos précédentes visites.

Identifiant (mail)

Mot de passe

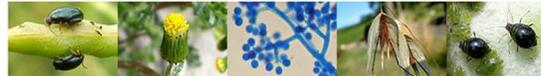
[Créer un compte](#)  
[Mot de passe oublié ?](#)

Valider

**Quel est le risque d'apparition d'adventices résistantes aux herbicides des groupes A et B sur votre parcelle ?**

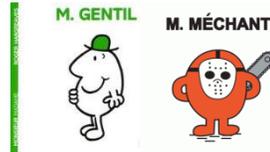
Logos at the bottom: irda (INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT), CETIOM ARVALIS (Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre, Institut du végétal), IFTB (INSTITUT TECHNIQUE DE LA FERME), ACTA (le réseau des instituts des filières animales et végétales), and INRA (SCIENCE & IMPACT).

# Prédire la résistance à l'aide de l'évolution expérimentale



# Évolution expérimentale et prédiction du risque

1. Exposer une population/individu sensible à une dose (croissante) de PPP



Sélection récurrente



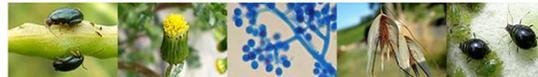
Accélération en laboratoire du processus **naturel** de sélection des résistances

Décrire les résistants

Facteur de R augmenté – spectre de résistance élargi  
mécanisme - fitness

Extrapoler le risque de sélection de résistance – adapter les stratégies

Risque faible / moyen / fort de résistance en pratique



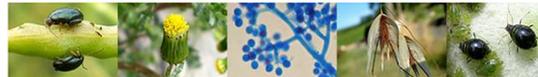
# PRÉVENIR LA RESISTANCE: Comment **réduire** le risque de sélection de résistances aux PPP?

**PRÉVENIR:**

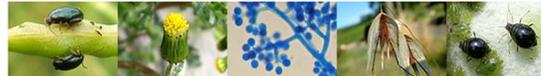
essayer d'empêcher que ça arrive

**= empêcher que la résistance n'augmente en fréquence**

**= mettre en place les stratégies les plus adaptées au cas par cas et maximisant la diversité des techniques de contrôle**



# Diminuer le risque de résistance en **intégrant** des techniques de lutte non chimiques



# Comment réduire le risque de sélection de résistances?



Auxiliaires



PPP (en dernier recours)



Pratiques non chimiques



Techniques culturales, prophylaxie

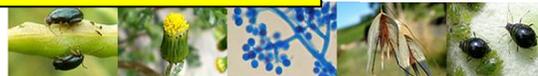


Rotation

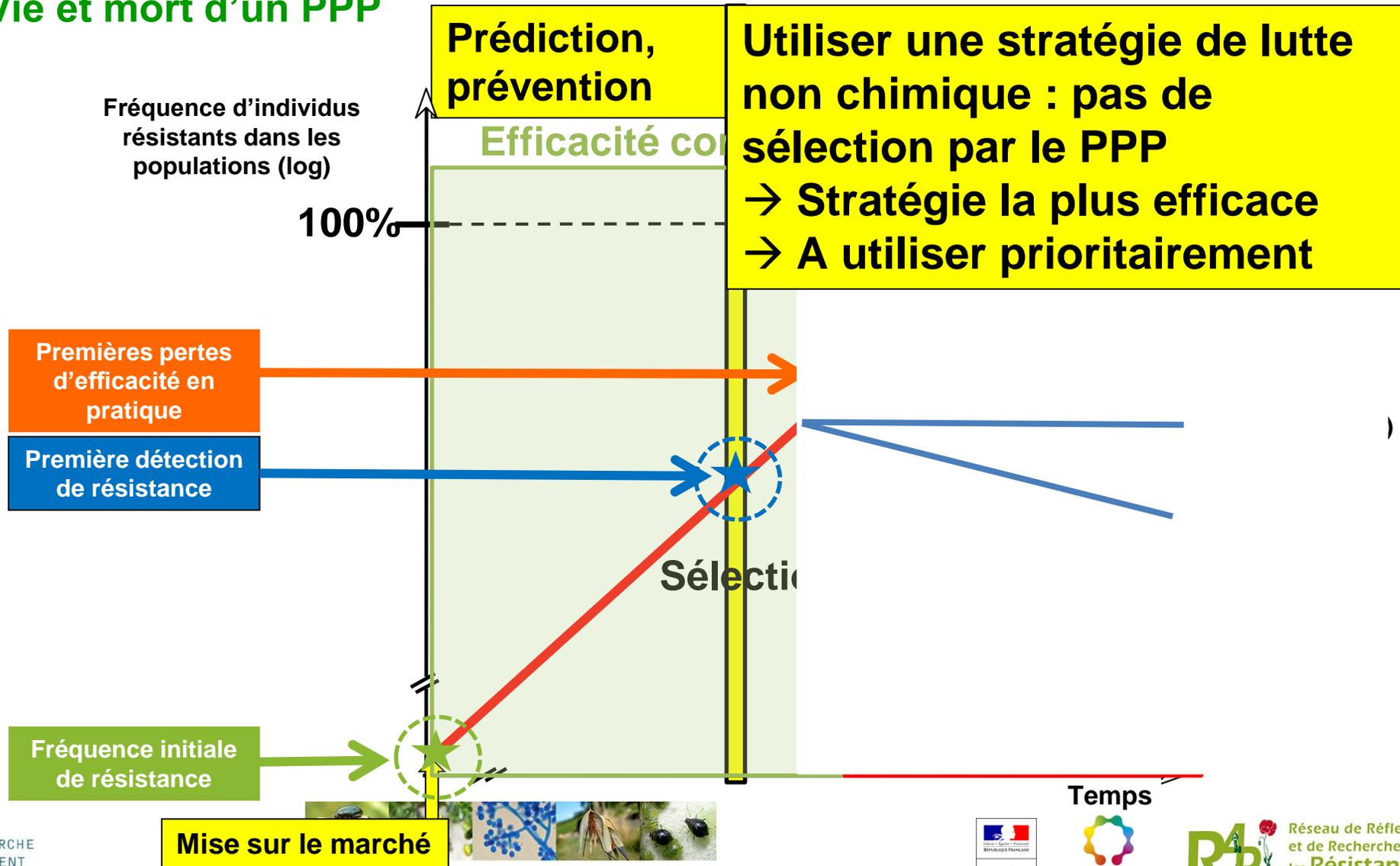


Variétés résistantes

**Rendre le contrôle « imprédictible » pour le bio-agresseur**

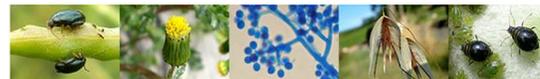


# Vie et mort d'un PPP

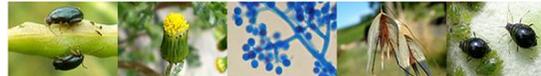


## Disponibilité des moyens de lutte non chimique pour les trois classes de bioagresseurs

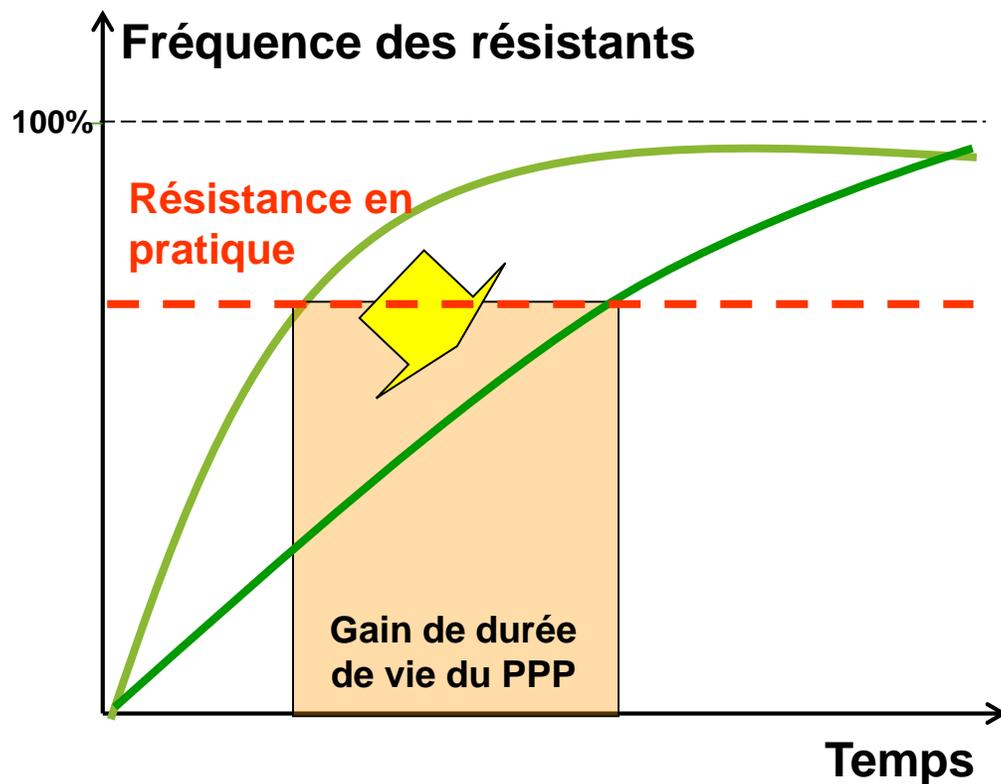
	Mauvaises herbes	Champignons	Insectes
Techniques culturales	+ à +++	+++	+
Rotation culturale	+++	++	+
Lutte physique/climatique	+	+	++
Lutte génétique / OGM	-	+++	++
Molécules naturelles (dont SDN)	-	++	-
Micro-organismes (Bactéries, champignons, virus)	+	+	+++
Macro-organismes	-	-	+++
Médiateurs chimiques / attracticides	-	-	+++
<b>Diversité des techniques</b>	<b>+</b>	<b>++</b>	<b>+++</b>



# Diminuer le risque de résistance en **diversifiant** la lutte chimique



# Comment ralentir la sélection de résistances?



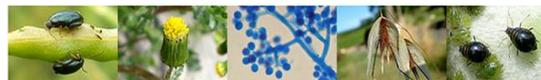
## Facteurs déterminant la vitesse de sélection

### Non maîtrisables

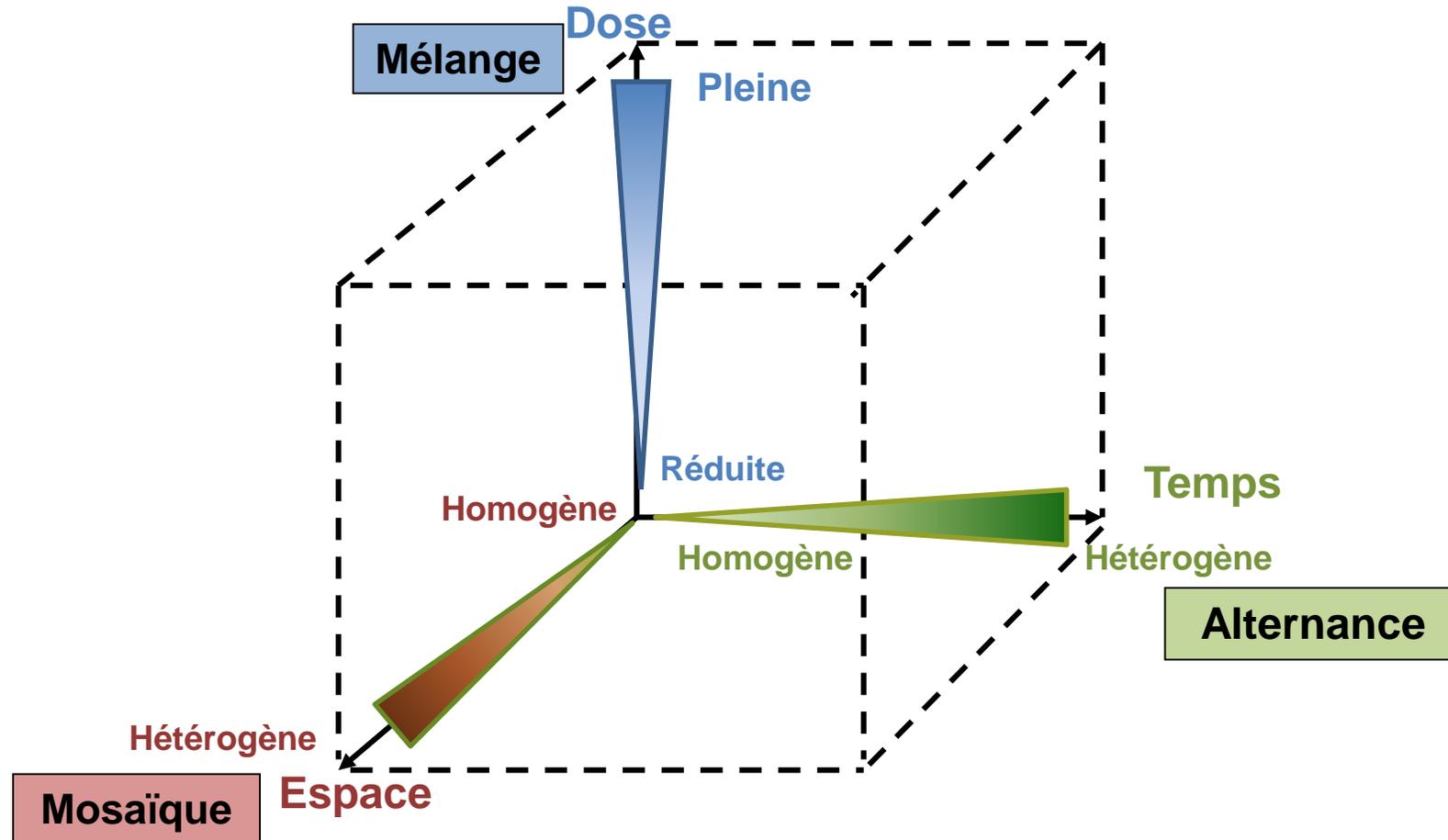
- Biologie du bio-agresseur
- Effet pléiotropes: coût génétique éventuel associé à la résistance

### Maîtrisables

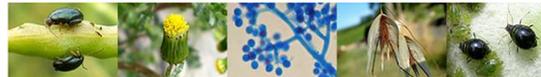
- Mode d'action du PPP (risque de résistance plus ou moins élevé)
- Stratégies de contrôle des bio-agresseurs



# Diversifier la sélection par les différents PPP

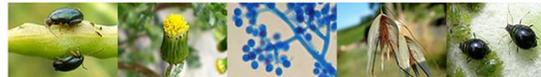


**Définir la tactique la mieux adaptée à un bio-agresseur donné**



# Quelques mots sur les mélanges

Mélange: «tuer un individu plusieurs fois»



## Quelques mots sur les mélanges

**Postulat:** sélectionner la résistance à deux **modes d'action** d'un coup est plus difficile que sélectionner la résistance à un seul.

« **Preuve** » mathématique:

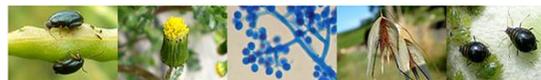
Sélection de la résistance à X seul:  $P_X$

Sélection de la résistance à Y seul:  $P_Y$

Sélection de la résistance à X + Y:  $(P_X \times P_Y)$

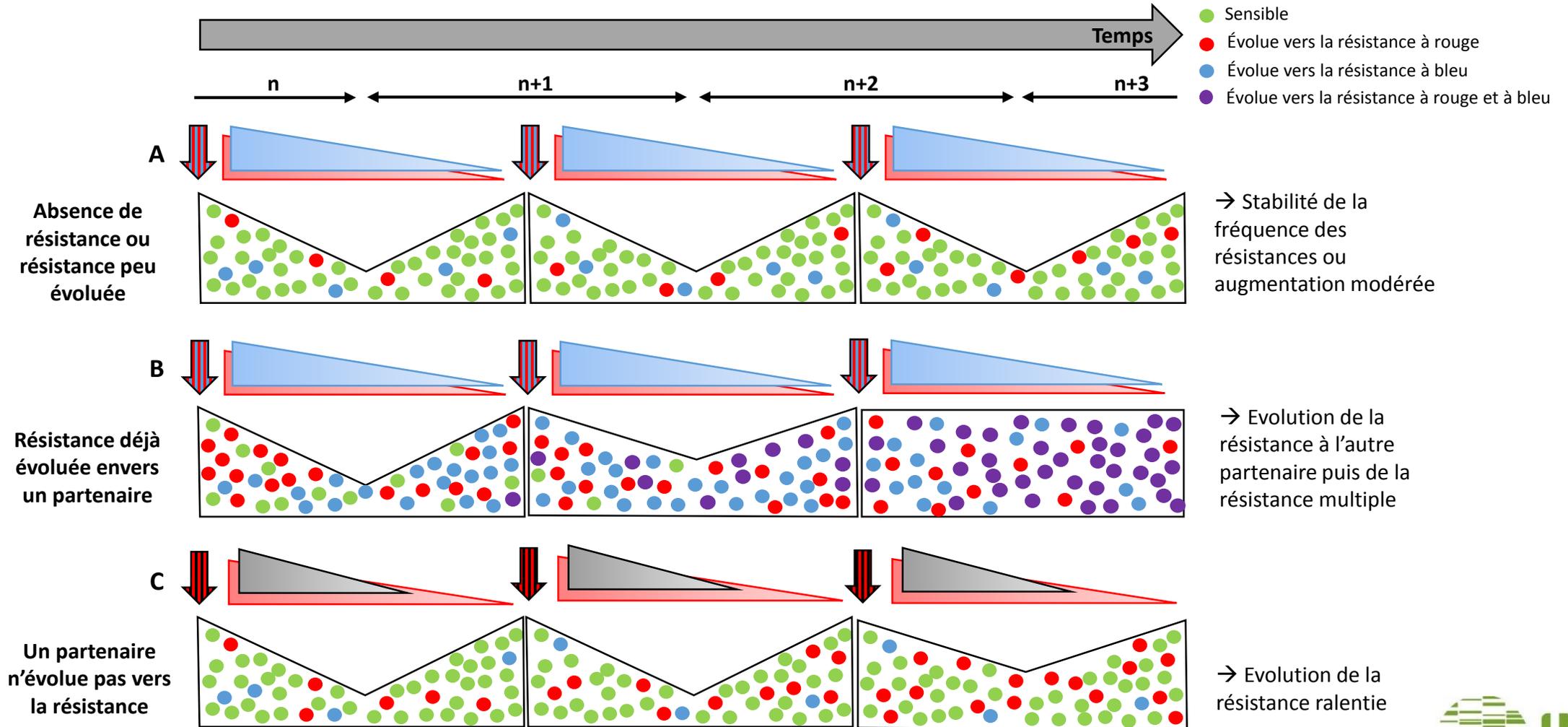


**Spectre de résistance croisée**



COLLOQUE RÉSISTANCE AUX PESTICIDES 14 ET 15 FÉVRIER 2019 À MONTRÉAL

# Principe de la stratégie de mélange



## Quelques mots sur les mélanges (rares pour insecticides)

Deux types de mélanges:

« Cosmétiques »



Association de substances ne visant qu'à élargir le spectre  
(ex: herbicides de groupe A + groupe B contre dicots + graminées  
fongicides IDM contre maladies des céréales)

Si à doses trop réduites, l'efficacité pratique peut devenir insuffisante

↪ **Augmente le risque de résistance**

Vrais



Association de substances:  
-toutes à leur **dose efficace** sur les bio-agresseurs visés  
-toutes avec des **modes d'action différents**  
-peuvent inclure un **multi-site** (si possible)  
- toutes concernées par des **mécanismes de résistance différents** / une **résistance croisée négative** (si possible)

- **Connaître les modes d'actions** - Cf. classifications FRAC, HRAC, IRAC
- **Connaître la résistance croisée**

## Quelques mots sur les vrais mélanges

### Pour être efficaces pour limiter le risque de résistance:

- Appliqués en **prévention** (= sur des populations **sensibles** à tous les partenaires du mélange).
- Tous les partenaires sont **efficaces** sur les bio-agresseurs visés.
- Tous les partenaires sont si possible **à leur dose efficace** dans le mélange.
- Chaque partenaire a un **mode d'action différent** des autres.
- Le mélange est autorisé réglementairement.

### Pour un mélange plus efficace pour limiter le risque de résistance:

- Augmenter le nombre de partenaires utiles dans le mélange  
(à dose efficace chacun)

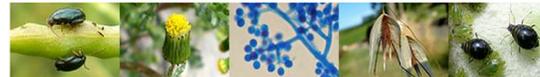
## Quelques mots sur les vrais mélanges

### Inconvénients:

- Coût
- Risque de non-sélectivité (auxiliaires, culture, utilisateurs, chien du voisin...)
- IFT, NODU...
- Législation, mélanges interdits

**À gérer sur la rotation**

- Attention aux RNLC!



## Quelques mots sur les vrais mélanges

Utilisation d'un mélange X+Y sur un bio-agresseur  
ayant déjà évolué une résistance à X :

**Mauvaise idée**

Revient à utiliser Y seul sur le bio-agresseur:  
ce n'est plus un mélange

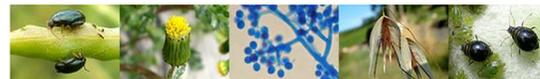


Herbicides: **RNLC à X**

= risque accru de résistance à Y

Fongicides: faire reposer l'efficacité sur un multisite

= « cache-misère »



## Quelques mots sur les vrais mélanges

**Les mélanges sont à utiliser  
en **prévention** de la  
résistance**

*Prévenir est en général plus rentable  
que guérir...*

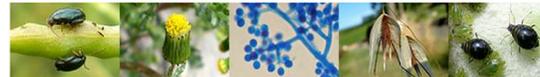
**En cas de résistance:**

**exclure** de la stratégie de mélange les  
substances / les modes d'action  
concernés par la résistance



# Quelques mots sur l'alternance

**Alternance: «tuer différemment les parents et leurs descendants»**



## Quelques mots sur l'alternance



**Alternance = faire varier les modes d'action dans le temps**

**Postulat:** alterner les modes d'action X et Y dans le temps sur une parcelle permet:

**Alterner les modes d'action X et Y dans le temps  
= « casser » la sélection à l'un en utilisant l'autre  
(X tue les résistants à Y et Y les résistants à X)**

Les résistants à X+Y sont beaucoup plus rares que les résistants à X:  $P_x \times P_y$

- De profiter des effets pléiotropes de la résistance (si existent)

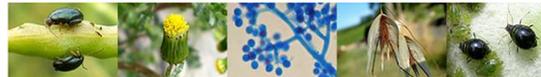
Les résistants à X sont « équivalents » aux sensibles à X en face de Y



Fitness plus mauvaise = diminution en fréquence

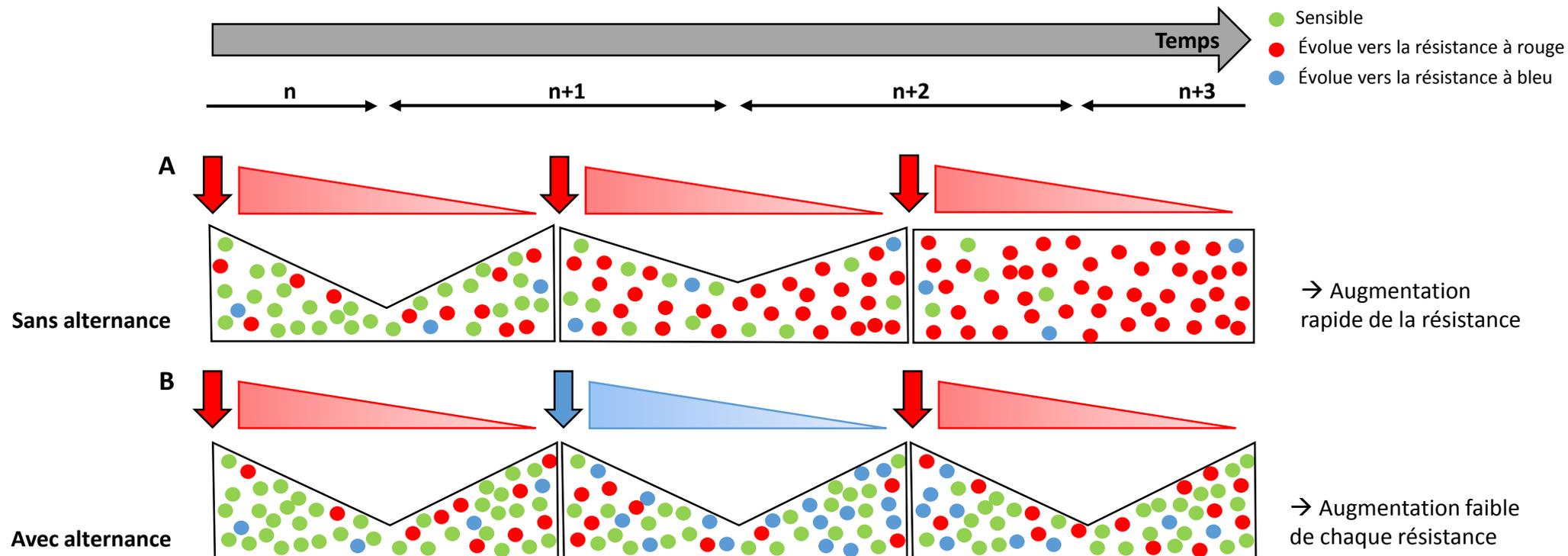


**Spectre de résistance croisée**

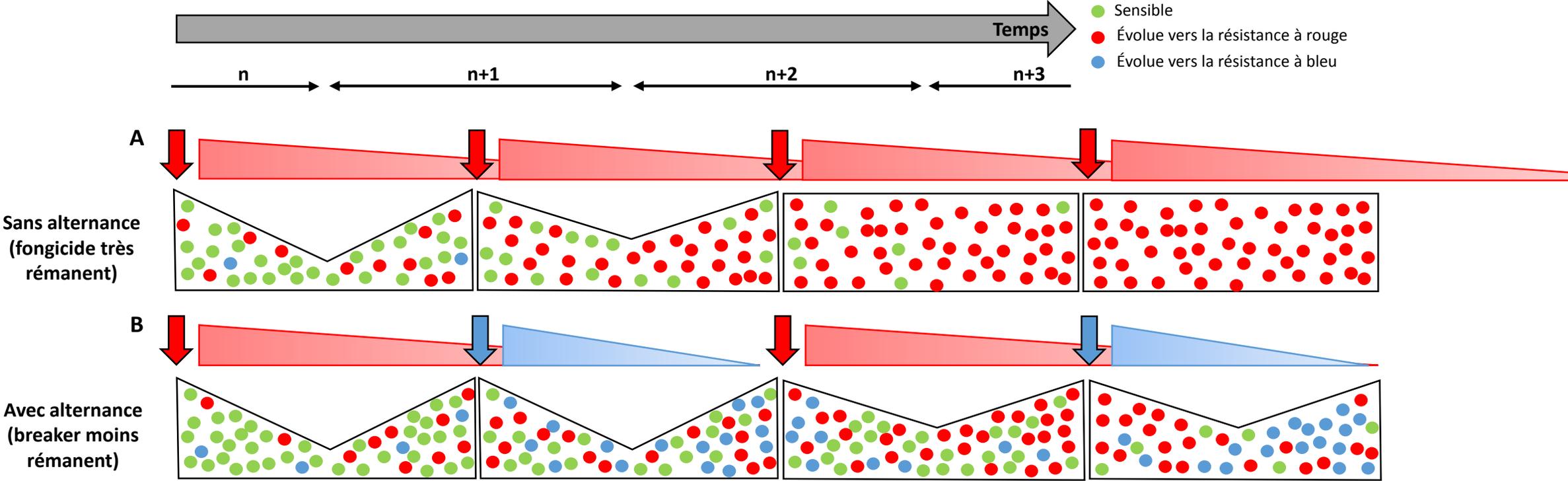


COLLOQUE RÉSISTANCE AUX PESTICIDES 14 ET 15 FÉVRIER 2019 À MONTRÉAL

# Principe de la stratégie d'alternance



# Stratégie d'alternance : impact de la rémanence



## Quelques mots sur l'alternance



**Alternance = faire varier les modes d'action dans le temps**

Deux types d'alternance:

« Cosmétique »



Vraie



Alternance de substances

- Différentes
- De familles chimiques différentes

MAIS de même mode d'action

↳ **Ne réduit pas le risque de résistance**

- **Connaître les modes d'actions**  
Cf. classifications FRAC, HRAC, IRAC
- **Connaître la résistance croisée**

Alternance de substances:

- toutes de modes d'action différents
- toutes à leur dose efficace sur les bio-agresseurs visés
- toutes concernées par des mécanismes de résistance différents / une résistance croisée négative

## Quelques mots sur l'alternance



**Alternance = faire varier les modes d'action dans le temps**

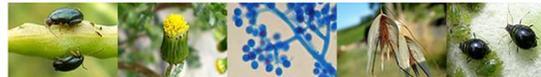
**Alterner les modes d'action X et Y sur un bio-agresseur  
ayant déjà évolué une résistance à X :**

**Mauvaise idée**

**Revient à utiliser sélectionner les résistants à Y parmi  
ceux déjà résistants à X**



**Herbicides: RNLC à X  
= risque accru de résistance à Y**

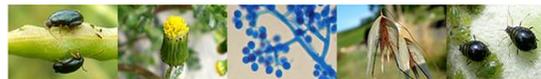


**L'alternance à utiliser en  
prévention de la résistance**

*Prévenir est en général plus rentable  
que guérir...*

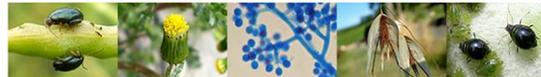
**En cas de résistance:**

**exclure de la stratégie d'alternance  
les modes d'action / les substances  
concernés par la résistance**



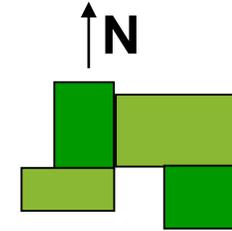
# Quelques mots sur la mosaïque

**Mosaïque: «tuer différemment les résidants et leurs descendants migrants»**



## Quelques mots sur la mosaïque

Mosaïque = faire varier les **modes d'action** dans l'espace



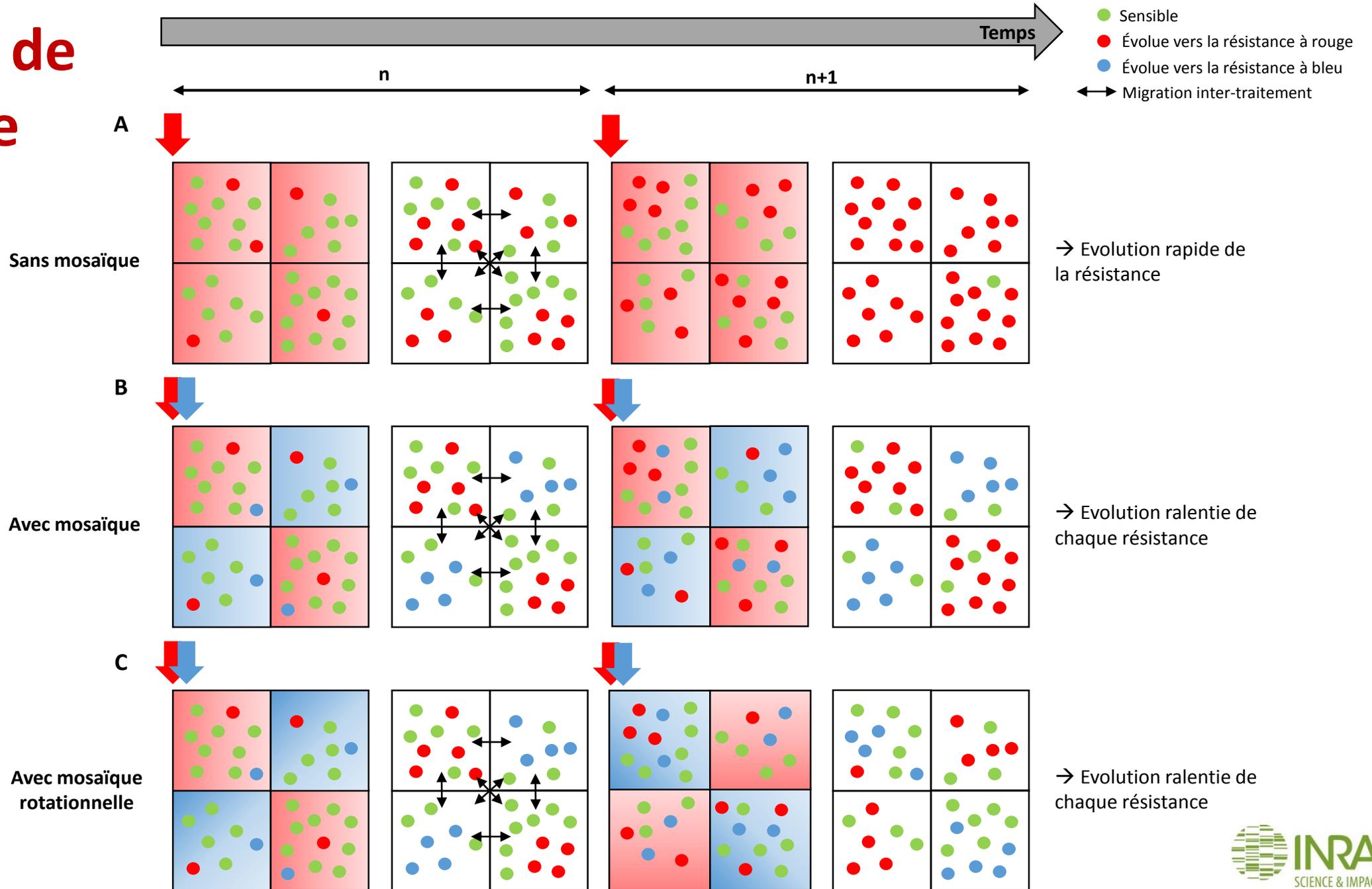
### Postulat:

Éviter de traiter de vastes surfaces avec un seul mode d'action permet de:

- Profiter de la dispersion pour tuer les descendants des résistants à X qui dispersent sur les parcelles traitées avec Y
- De profiter des effets pléiotropes de la résistance (si existent) dans les parcelles non traitées
- De constituer une zone refuge dans les parcelles non traitées



# Stratégie de mosaïque



## Quelques mots sur la mosaïque

Mosaïque = faire varier les **modes d'action** dans l'espace

Deux types de mosaïques:

« Cosmétique »



Mosaïque de substances

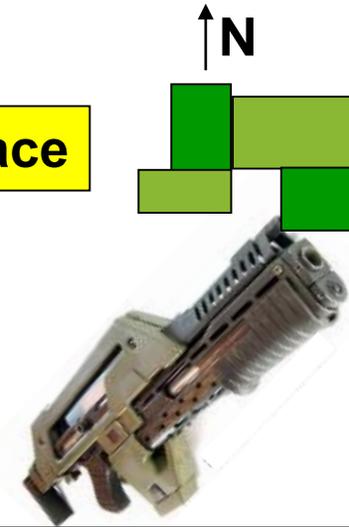
- Différentes
- De familles chimiques différentes

MAIS de **même** mode d'action

↳ **Ne réduit pas le risque de résistance**

- **Connaître les modes d'actions**  
Cf. classifications FRAC, HRAC, IRAC
- **Connaître la résistance croisée**
- **Connaître la dispersion du bio-agresseur (→ taille de la maille)**

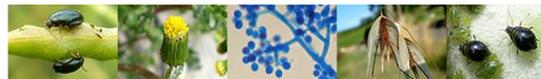
Vraie



Mosaïque de substances:

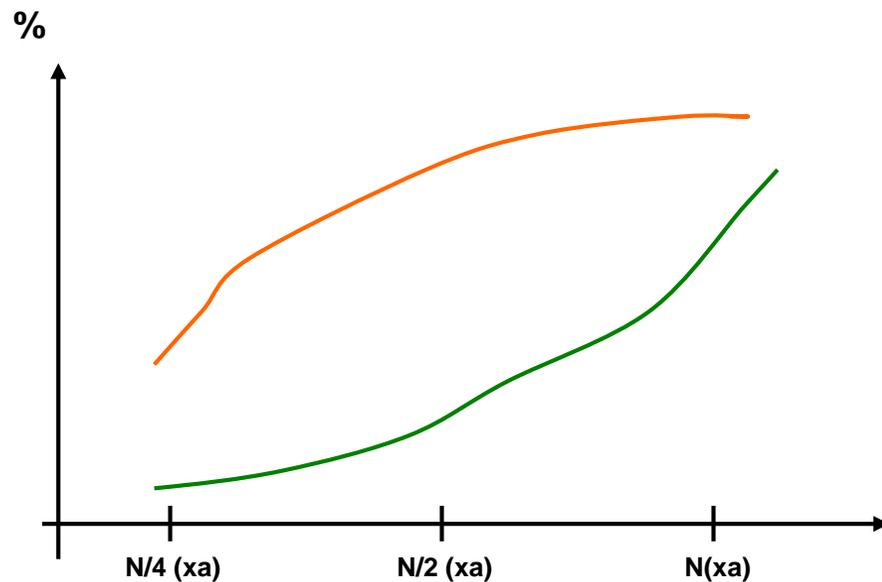
- toutes de **modes d'actions différents**
- toutes à leurs **doses efficaces**
- toutes concernées par des **mécanismes de résistance différents / une résistance croisée négative**

# Quelques réflexions sur la dose

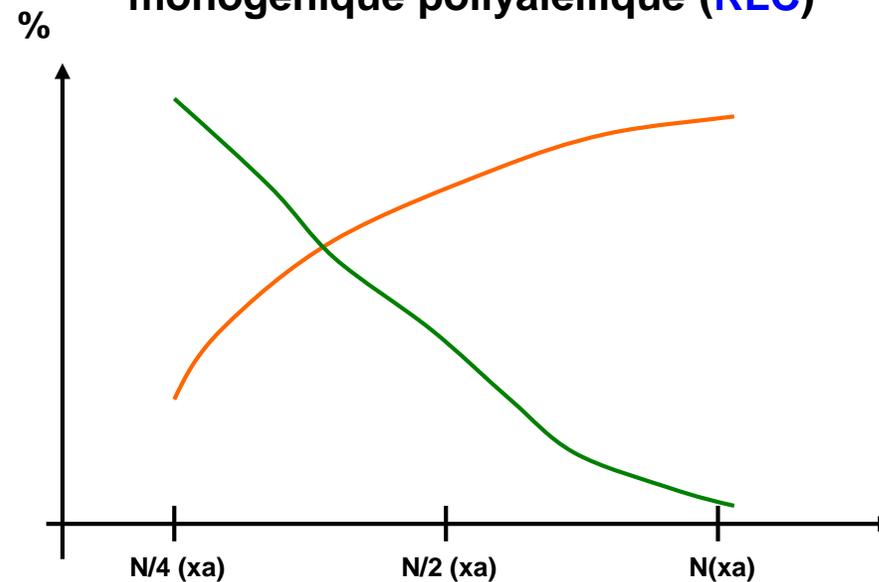


# Relation dose, efficacité pratique et résistance

## Résistance monogénique (essentiellement **RLC**)



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

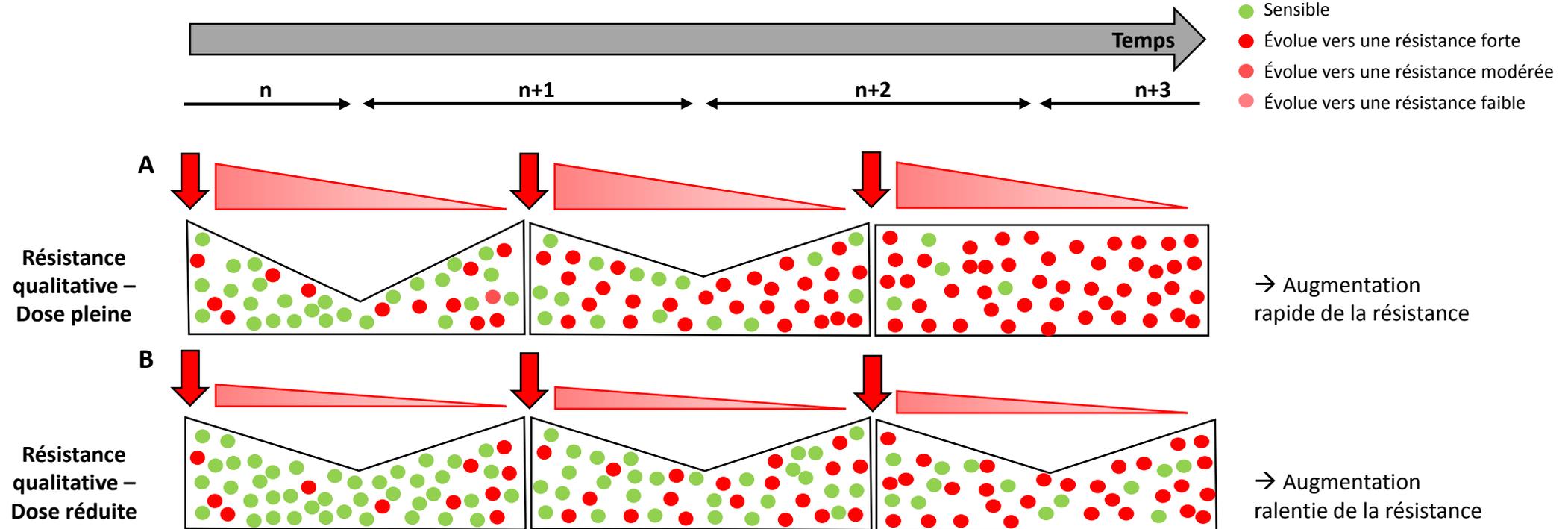


Risque de résistance

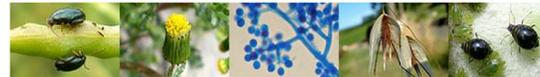
Efficacité pratique



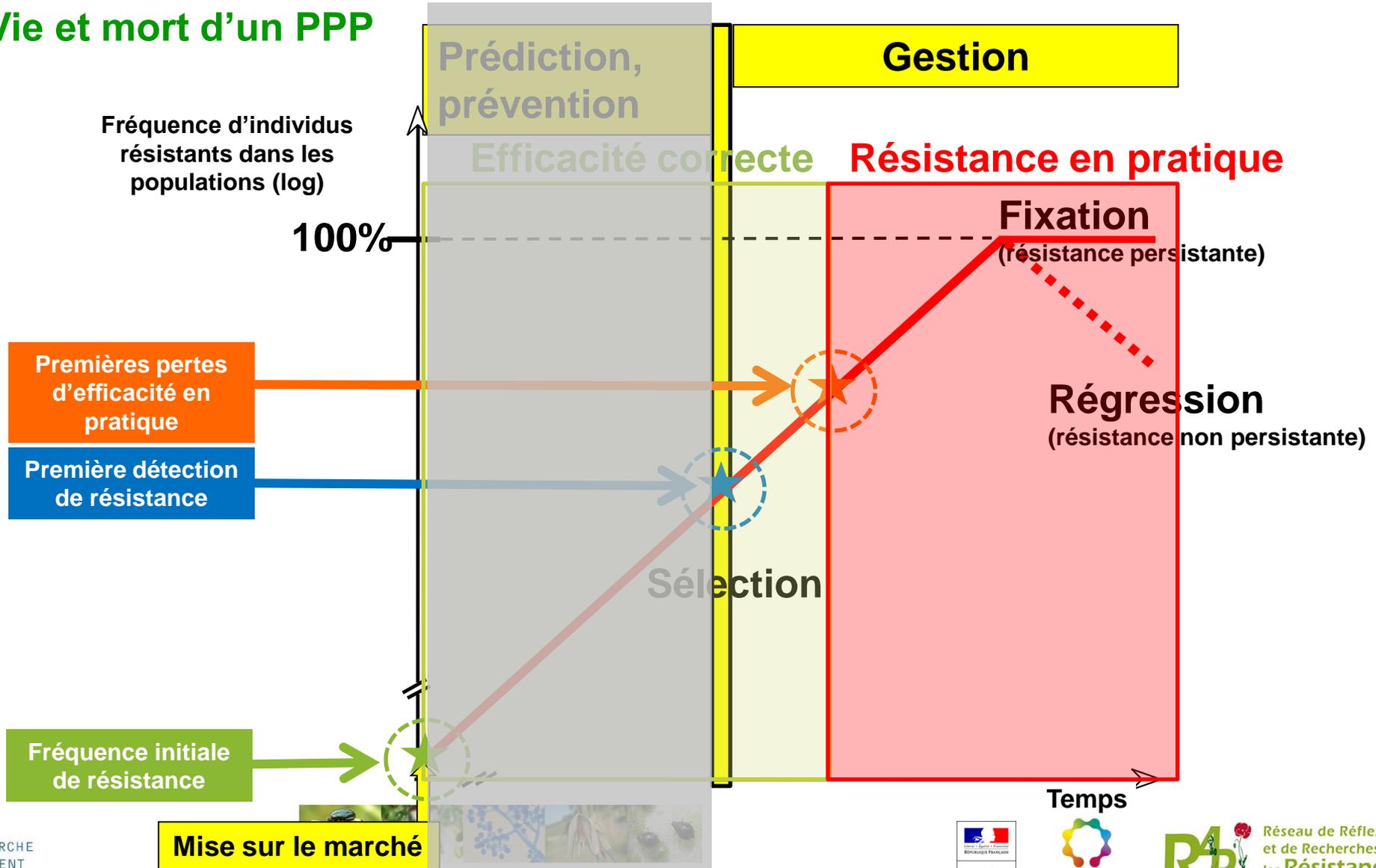
# Stratégie de limitation de dose



# Gérer la résistance lorsqu'elle est installée



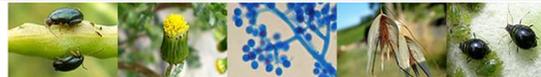
# Vie et mort d'un PPP



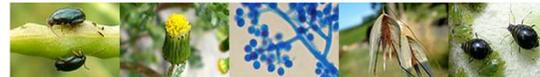
## Gestion d'une résistance déjà installée:

- Repose sur les stratégies déjà présentées  
(utilisation de techniques alternatives au chimique, mélange, alternance, mosaïque, gestion de la dose, zones refuges)
- en les **adaptant** de manière encore plus pertinente aux résistants détectés, dont on connaît les caractéristiques
- en ciblant **en priorité** la/les espèces résistante(s)
- en étant encore **plus restrictif, si besoin** (notamment, limitation du nombre de traitements autorisés).
- L'utilisation des **méthodes alternatives et complémentaires** est **plus que jamais de rigueur**

**≠ entre stratégies de gestion et prévention = connaissance des propriétés de la résistance sélectionnée sur le terrain**



# Conserver un contrôle lorsque la résistance est généralisée

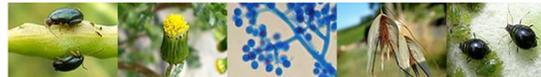


## Gestion d'une résistance généralisée:

Résistance généralisée = plus grand-chose à gérer...

### Enjeu = préserver l'efficacité pratique de la lutte

- **Abandonner l'usage de la substance / du mode d'action sur l'espèce concernée**
- Espérer un coût de la résistance
- Utiliser d'autres modes d'action, chercher les résistances croisées négatives
- Utiliser les méthodes alternatives et complémentaires



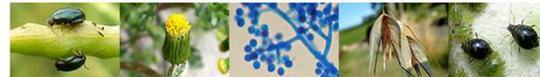
**À ne pas faire** : continuer à utiliser la substance / **le mode d'action** en l'associant à un autre PPP non concerné par la résistance

- Expose l'autre molécule
- Augmente l'IFT inutilement

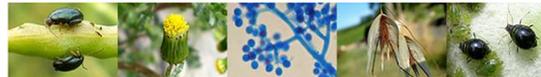
### **Attention:**

Lutte contre un cortège de bioagresseurs dont certains non résistants → **découpler la gestion des bioagresseurs :**

1. L'espèce concernée par la résistance
2. Les autres espèces



# Questions?



**En conclusion, pour limiter le risque de résistance:**

## **Diversité** des pratiques de contrôle

Dans la rotation (si possible)

Dans les pratiques de contrôle  
(prophylaxie, pratiques non chimiques...)

Dans les modes d'action de PPP

**Utiliser les PPP après les pratiques non chimiques de  
contrôle (pour « finir le travail »)**

## **Efficacité** du contrôle

Empêcher les bio-agresseurs de proliférer  
(combinaison de pratiques chimiques et non  
chimiques)

Utiliser une dose adaptée

**Prévenir vaut mieux que guérir**



## Spécificité des trois types de bioagresseurs pour la résistance aux PPP et sa gestion : tendances générales

Critères		Mauvaises herbes	Champignons	Insectes
Différences / biologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proximité phylogénétique</li> <li>- Mobilité</li> <li>- Générations/an</li> <li>- Mode de reproduction</li> <li>- Ploidie</li> </ul>	Souvent proche de la culture ++/- 1 ou plusieurs Sexuée  Diploïdes - polyploïdes	Éloigné culture et homme ++ +++ Asexuée + sexuée + parasexuée Haploïdes (+ Diplo)	Proche des auxiliaires et hommes +++ ++ Sexuée (+ asexuée)  Diploïdes
Différence / stratégies disponibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispo. mélanges</li> <li>- Diversité MoA</li> <li>- Coût résistance</li> <li>- Auxiliaires</li> <li>- Zones refuge</li> </ul>	+++ ++ - - Non applicable	+++ +++ + + Non applicable?	+ + ++ +++ Possible

## Spécificité des trois types de bioagresseurs pour la résistance aux PPP et sa gestion : tendances générales

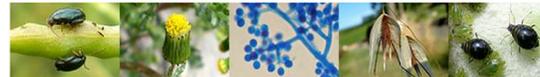
Critères		Mauvaises herbes	Champignons	Insectes
Différences / biologie	- Proximité phylogénétique	Souvent proche de la culture	Éloigné culture et homme	Proche des auxiliaires et hommes
	- Mobilité	++/-	++	+++
Différence / stratégies disponibles	<p><b>Différences dans la biologie et la génétique des organismes</b></p> <p><b>+</b></p> <p><b>Différences d'opérationnalité des stratégies</b></p> <p>→ Génétique et mécanisme de R sélectionnés différents</p> <p>→ Adapter les stratégies de gestion en conséquence</p>			

## Mécanismes de résistance selon les bio-agresseurs

Adventices 	Champignons 	Insectes 
<b>Pénétration – transport:</b> esquive, barrière, séquestration, efflux		
Barrière, séquestration: fréquent mais inaperçu / peu fréquent?	<b>Efflux: fréquent mais inaperçu?</b> (facteur de résistance faible)	Barrière, esquive, Efflux: assez fréquent mais inaperçu facteur de résistance faible
<b>Accumulation:</b> métabolisation exacerbée		
<b>Très fréquente</b> (peut-être sous-estimée car masqué par RLC)	Peu fréquente	<b>Très fréquente</b>
<b>Inhibition du site d'action:</b> mutation de la cible		
Fréquent	<b>Très fréquent</b>	Fréquent
<b>Effets cytotoxiques:</b> compensation, contournement		
Compensation - Peu fréquent?	Contournement - Peu fréquent?	Peu ou mal connu ?

**Type de résistance prépondérant différent selon les bioagresseurs  
→ Adapter les stratégies au bio-agresseur**

# Recommandations spécifiques aux herbicides



## Recommandations spécifiques aux herbicides:

**Forte efficacité = RLC favorisée**

**Faible efficacité = RNLC favorisée**

La RLC est un moindre mal que la RNLC chez les mauvaises herbes



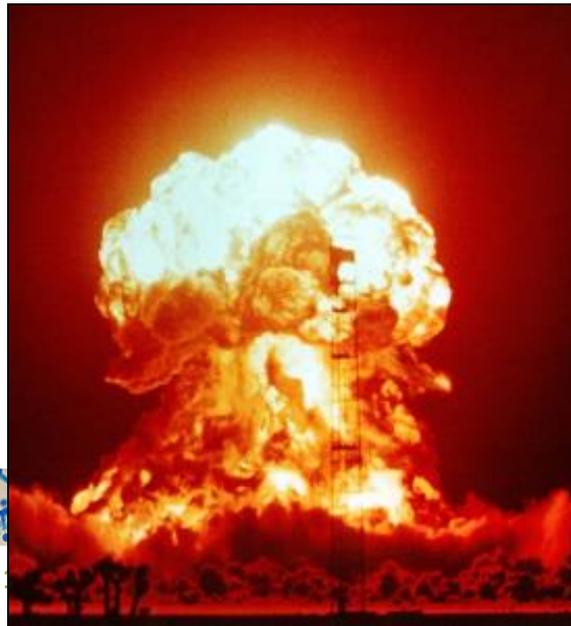
**Essayer d'orienter la sélection de résistance vers la RLC**

**Frapper FORT**

- **Efficacité maximale**
- **Respecter les doses**

**Frapper TÔT**

- **Sensibilité max.**
- **Rendement préservé**



**Surveiller les espèces non ciblées en priorité**  
→ **Attention à la RNLC**



## Recommandations spécifiques aux herbicides:

### Diversité

1. Dans la rotation
2. Dans les pratiques de contrôle (prophylaxie, méthodes non chimiques)
3. Dans les **modes d'action** herbicides

Utiliser les herbicides **après** les pratiques non chimiques (pour « finir le travail »)

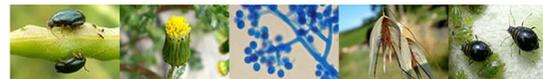
### Efficacité

Empêcher les adventices de proliférer (combinaison avec des pratiques non-chimiques)  
Respecter les doses, le stade, les conditions d'application...

Prévenir vaut mieux que guérir

La RLC est un moindre mal que la RNLC

# Recommandations spécifiques aux insecticides



## Spécificité des trois types de bioagresseurs pour la résistance aux PPP et sa gestion : tendances générales

Critères		Mauvaises herbes	Champignons	Insectes
Différences / biologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proximité phylogénétique</li> <li>- Mobilité</li> <li>- Nb générations/an</li> <li>- Mode de reproduction</li> <li>- Ploïdie</li> </ul>	Souvent proche de la culture ++/- 1 ou plusieurs Sexuée  Diploïdes - polyploïdes	Éloigné culture et homme ++ +++ Asexuée + sexuée + parasexuée Haploïdes (+ Diplo)	Proche des auxiliaires et hommes +++ ++ Sexuée (+ asexuée)  Diploïdes
Différence / stratégies disponibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispo. mélanges</li> <li>- Diversité MoA</li> <li>- Coût résistance</li> <li>- Auxiliaires</li> <li>- Zones refuge</li> </ul>	+++ ++ - - Non applicable	+++ +++ + + Non applicable	+ + ++ +++ Possible

## Recommandations spécifiques aux insecticides:

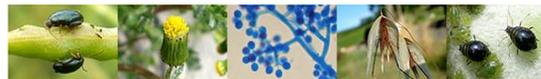
Enjeu = maintenir l'état initial d'une population  
(une très large majorité d'homozygotes sensibles + éventuellement quelques rares hétérozygotes résistants)

Pré

**Prévenir la résistance aux insecticides ne consiste pas à augmenter ou diminuer la dose il faut tenir compte de tous les facteurs (connus) par couple insecte/PPP et agir en conséquence au cas par cas**

Dé

- 
- Utiliser des méthodes alternatives/complémentaires
- Favoriser la réversion naturelle (AUXILLIAIRES)



# Importance des zones refuges : réservoir d'individus sensibles

## Deux exemples :

- ✓ Mais Bt : pression de sélection continue sur de grandes étendues : solution proposée maintien de zones refuges pour « diluer » la résistance
- ✓ Carpocapse des pommes en Catalogne vs au Chili avec deux cas extrêmes opposés



**Importance biodiversité locale**



## Importance des Auxiliaires :

Prédation et parasitisme des individus résistants autant que des sensibles = REVERSION  
+ Maintien d'un équilibre écosystémique

Traitements Benzoylphenyl Urée  
contre le carpocapse ->  
pullulations de *E. lanigerum*

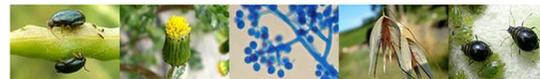
Action spécifique sur un auxiliaire  
méconnu, *F. auricularia*



# PPP comme un bien commun

Le stock de fongicides efficaces est un **bien commun** partagé entre une grande diversité d'acteurs

- **Non-exclusion** de la ressource fongicide : On ne peut pas empêcher certains agriculteurs de surutiliser le fongicide.
- **Rivalité** de la ressource fongicide : Surutilisation d'un pesticide par certains agriculteurs pourrait empêcher les autres agriculteurs de l'utiliser.



# Gestion collective de la résistance

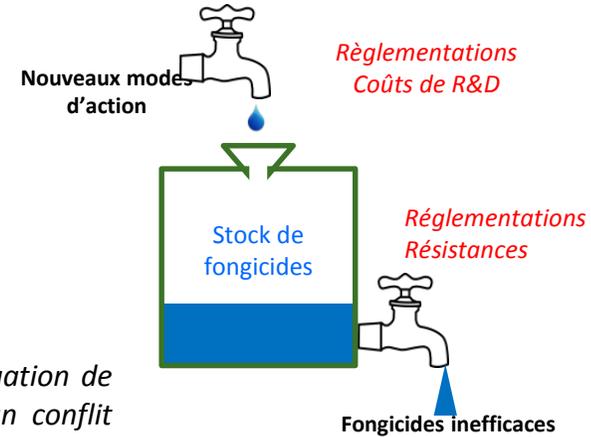
Le flux et le stock (nombre de PPP efficaces et autorisés) diminuent.



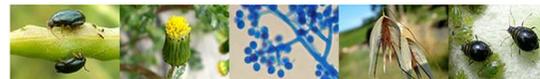
Garrett Hardin

## La tragédie des communs

« La **tragédie** des biens **communs** se produit dans une situation de compétition pour l'accès à une ressource limitée (créant un conflit entre l'intérêt individuel et le bien **commun**) face à laquelle la stratégie rationnelle aboutit à un résultat perdant-perdant »



Des stratégies collectives sont souhaitables éviter la tragédie du bien commun PPP



# Merci de votre attention

