



Intervenante

- Benoit BARRES
- Claire MOTTET
- Myriam SIEGWART

Partenaires



Dans le cadre du projet

Animatrices

- Pauline BONHOMME
- Nadia TOUNSI
- Céline VENOT



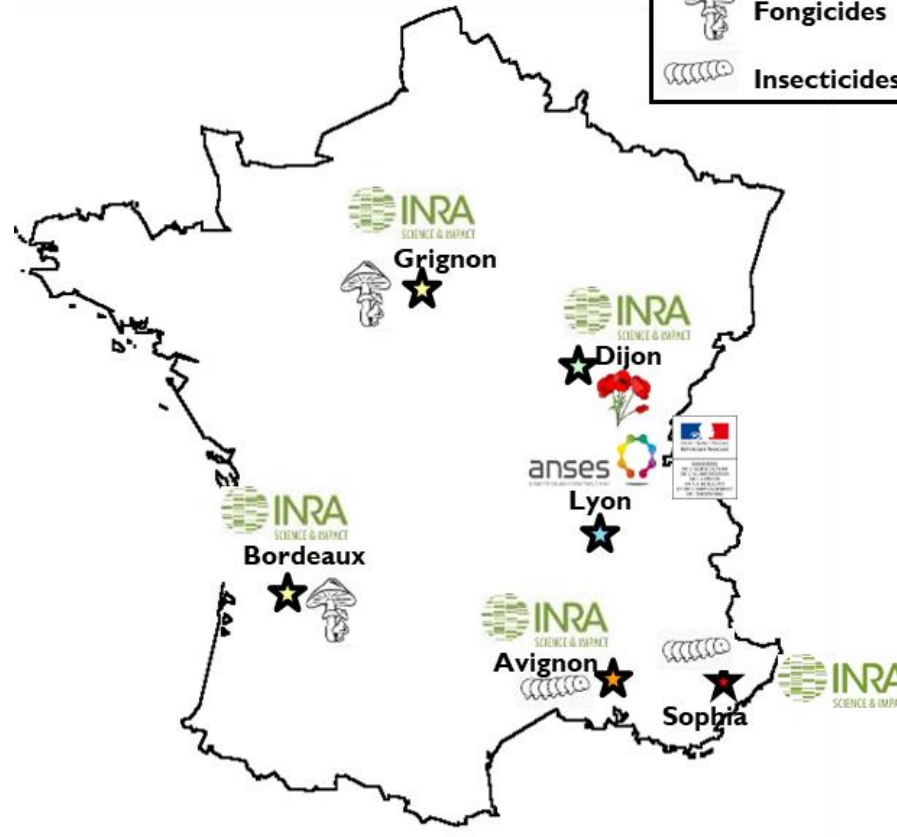
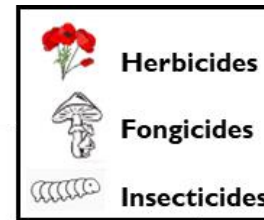
Résistance vis-à-vis des produits phytosanitaires



Myriam Siegwart, Claire Mottet, Benoit Barrès



Le réseau R4P



<https://www.r4p-inra.fr/fr/home/>

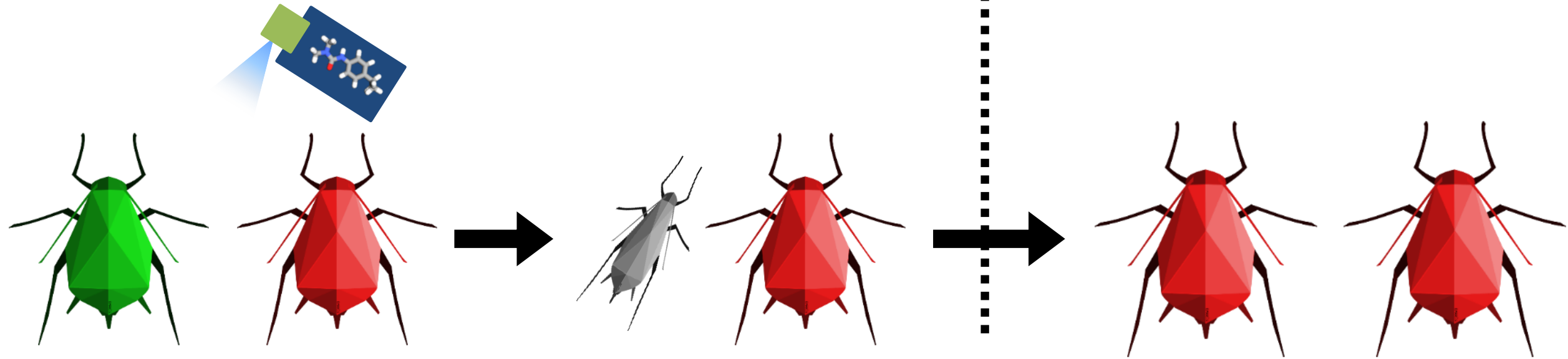




Définition de la résistance aux PPP

génération n

génération $n + 1$



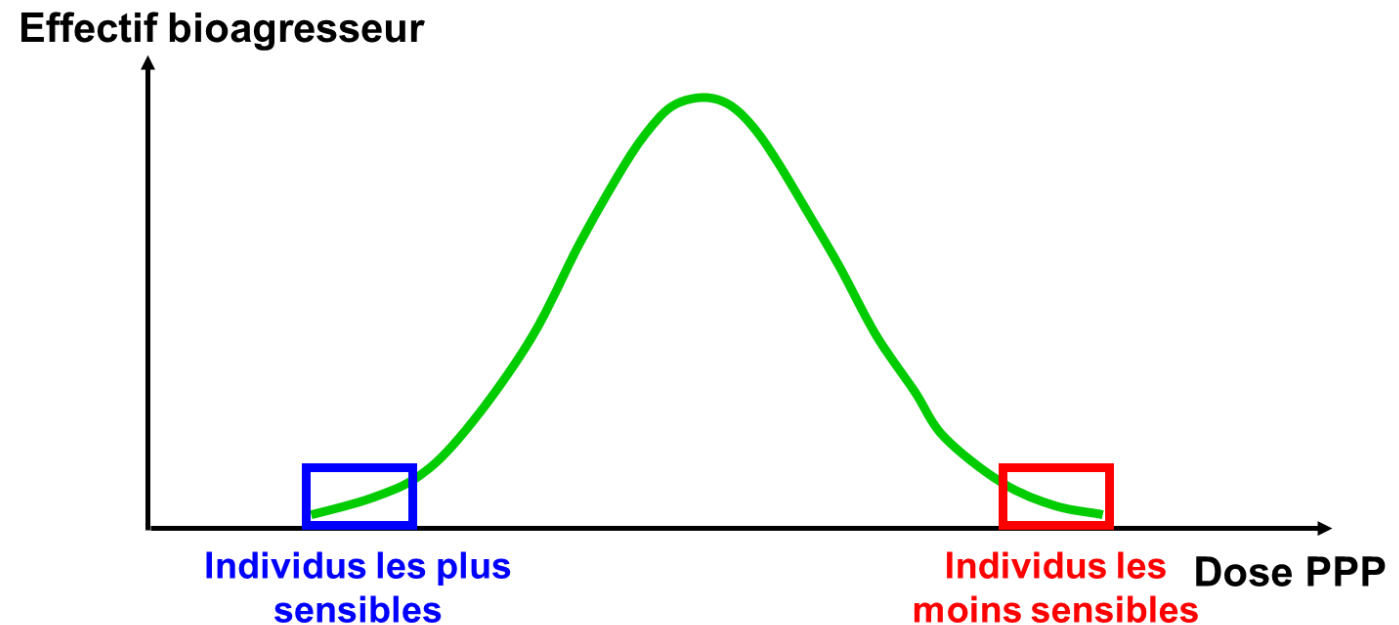
Résistance : capacité **héritable** d'un bioagresseur à **survivre** à un traitement pesticide appliqué en suivant **l'ensemble des recommandations d'usages** (bon PPP, bien positionné, bonne dose, bonnes conditions)



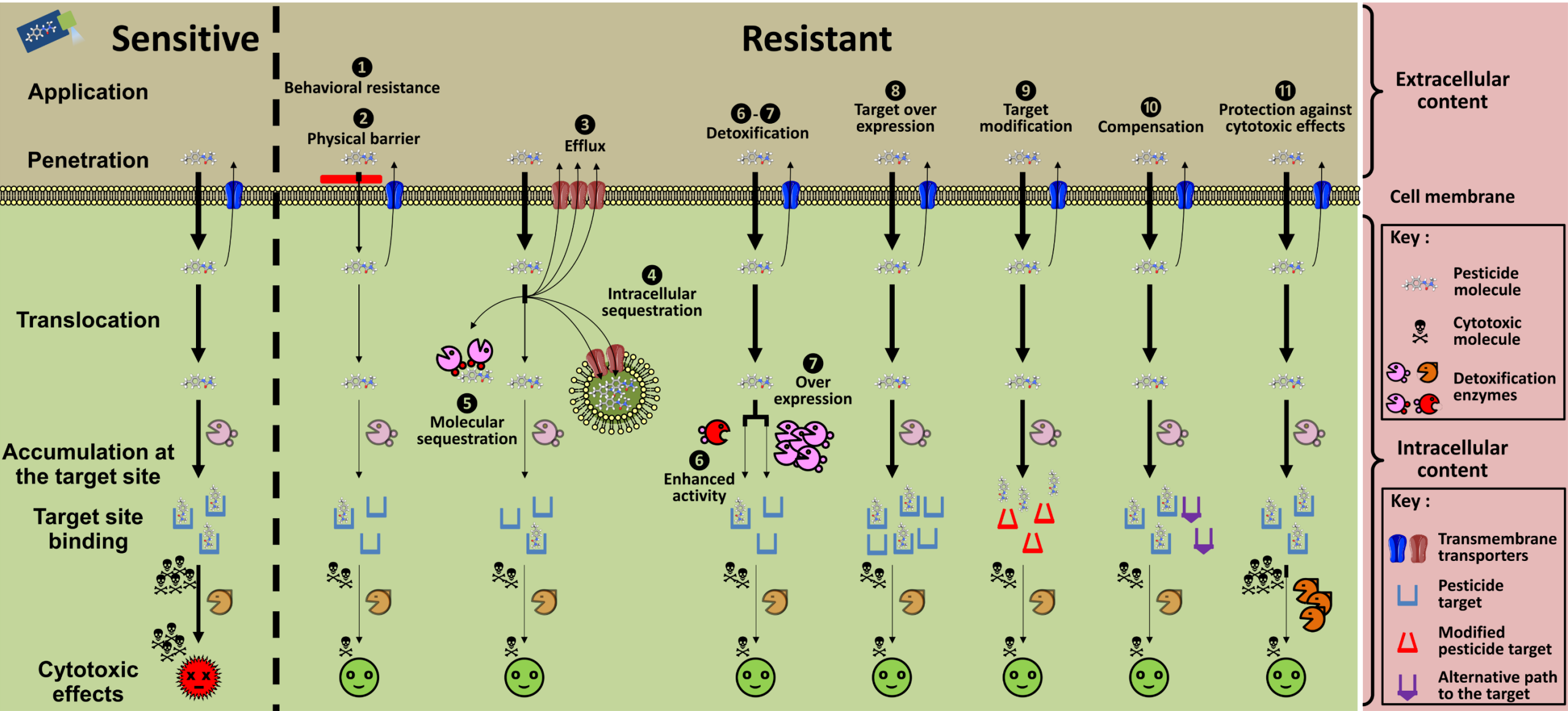
Définition de la résistance aux PPP

Phénomène évolutif =
sélection « naturelle »

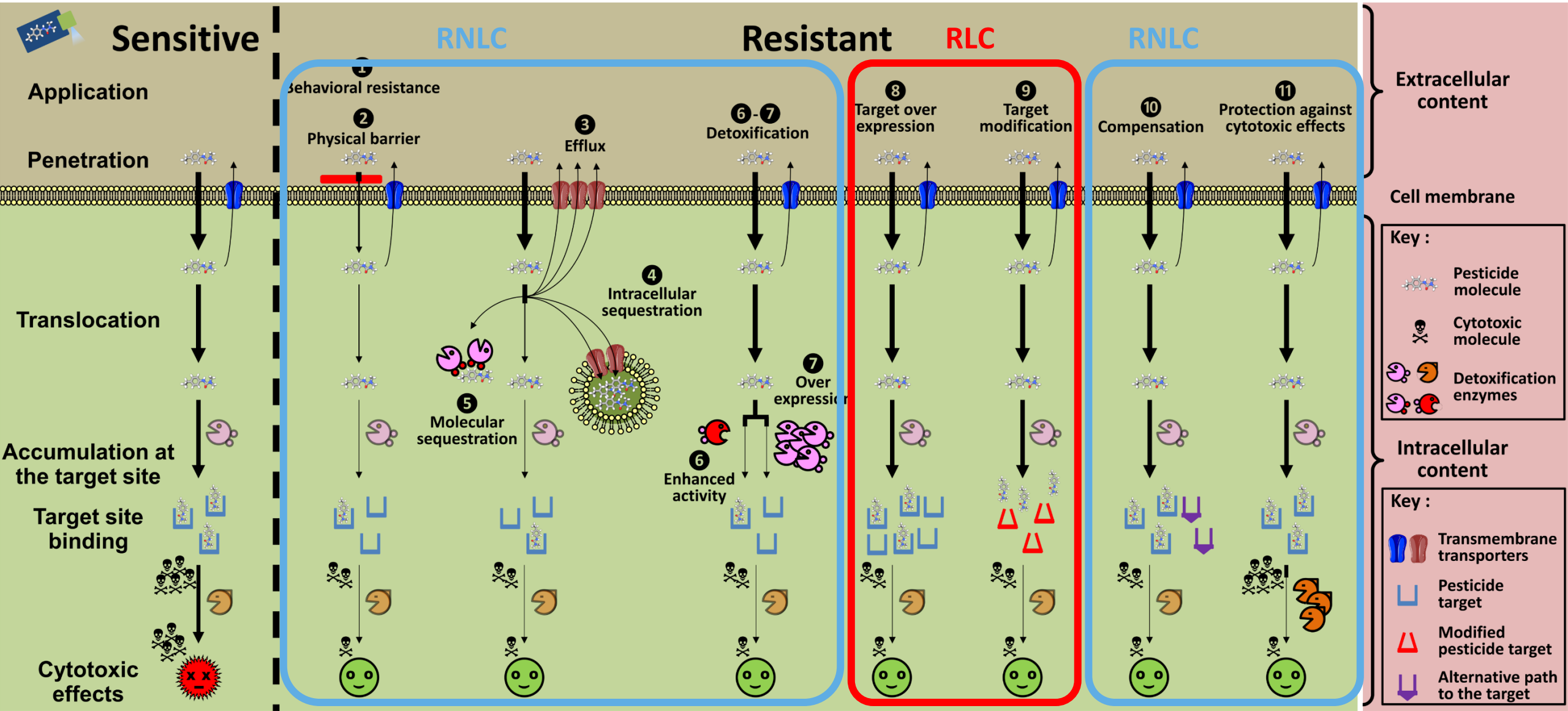
Concerne potentiellement
tous les PPP (synthèses,
naturels, biocontrôles)



Les mécanismes de résistance aux PPP

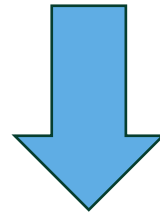


Les mécanismes de résistance aux PPP





échec traitement \neq résistance

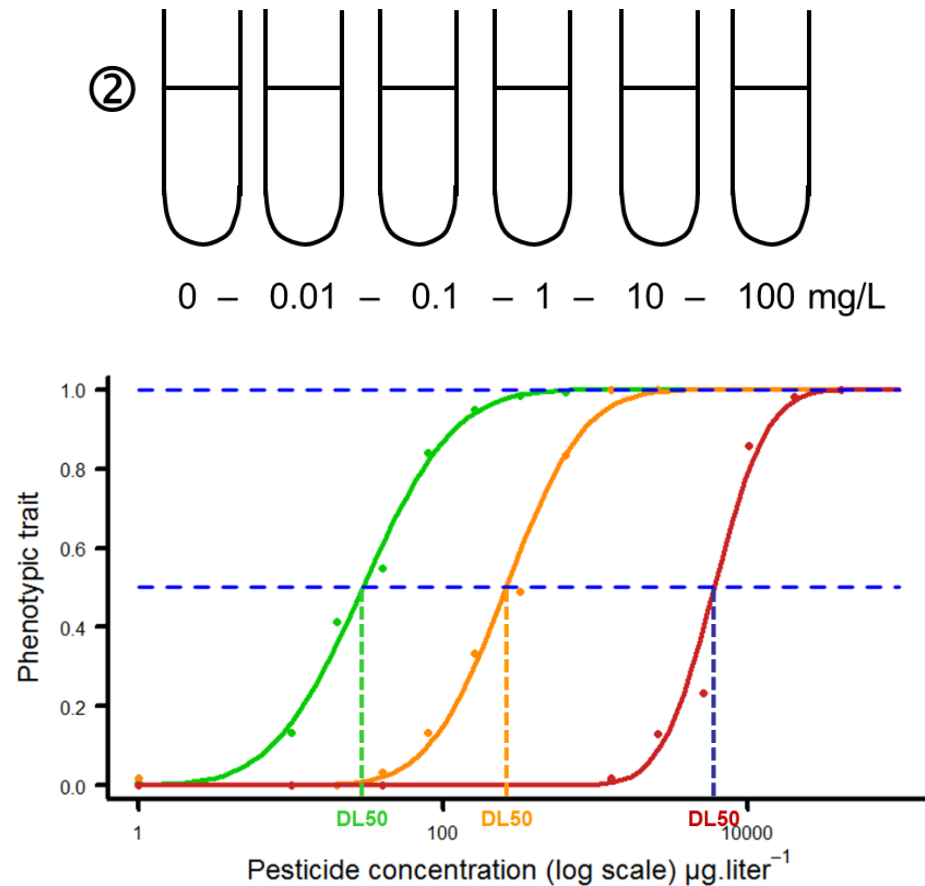


Confirmation par test approprié
nécessaire



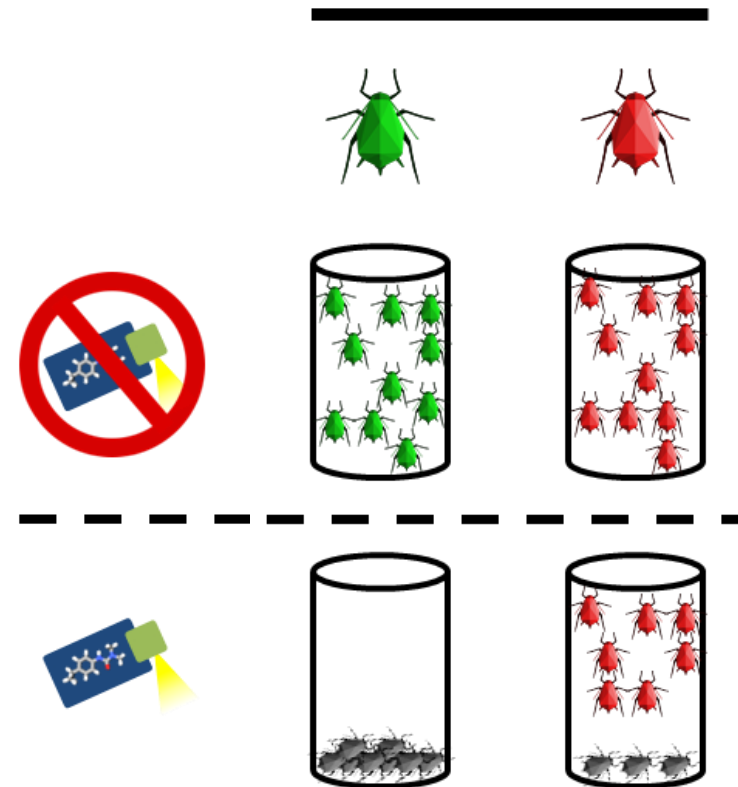
Principe des tests biologiques

gamme de dose



dose discriminante

taux de mortalité

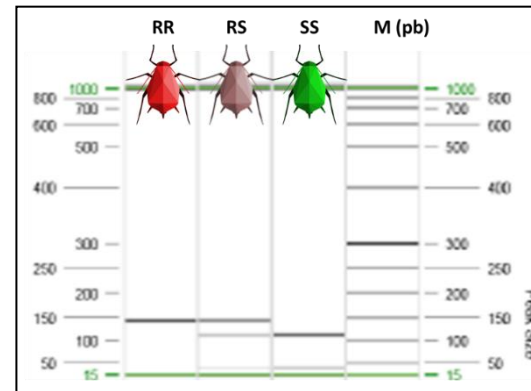




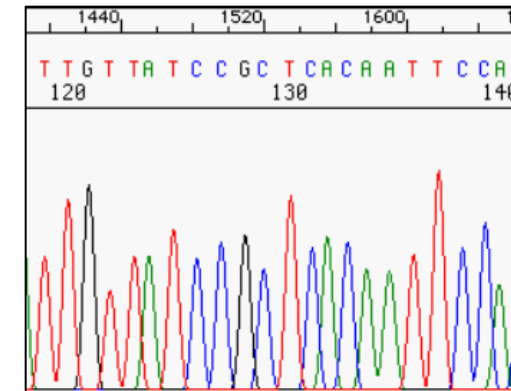
Principe des tests de biologie moléculaire

Génotypage

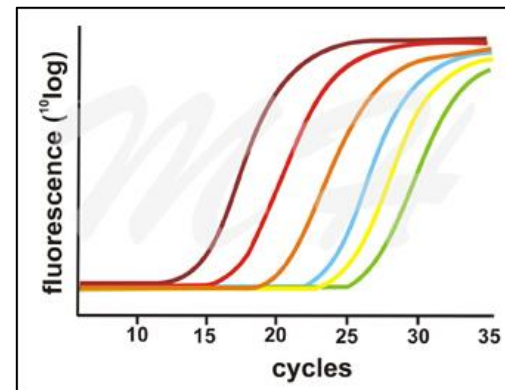
PCR dCAPs



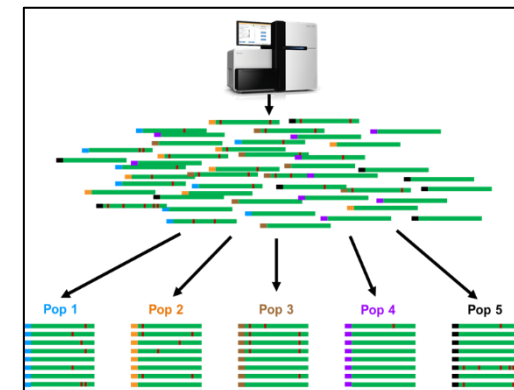
séquençage



qPCR



HTS

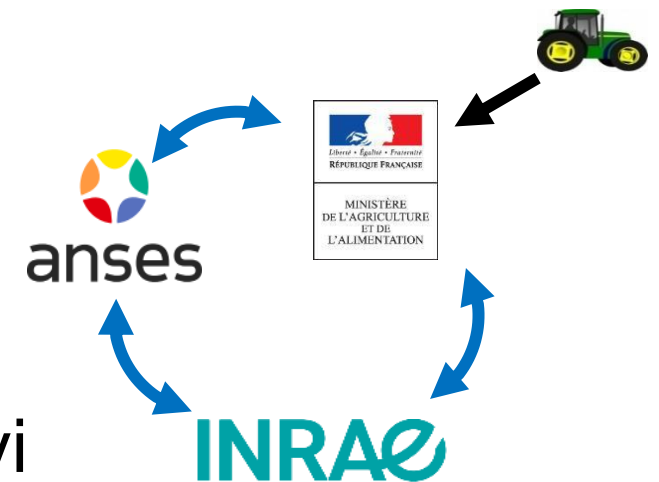


Quantification



Le plan de surveillance des résistances

- appartient au dispositif national de surveillance biologique du territoire, dans le volet « Suivi des **Effets Non Intentionnels** »
- thématiques fixées annuellement
- échantillonnage **non-aléatoire**
- outil **d'alerte** sur l'émergence de résistances (\neq suivi épidémiologique)
- [R] au laboratoire \neq [R] au champ (*ie* perte d'efficacité)





Le plan de surveillance des résistances

- **Toutes catégories** de bioagresseurs confondus (champignons phytopathogènes, insectes, adventices, bactéries...)
- Une **trentaine** de thématiques par an

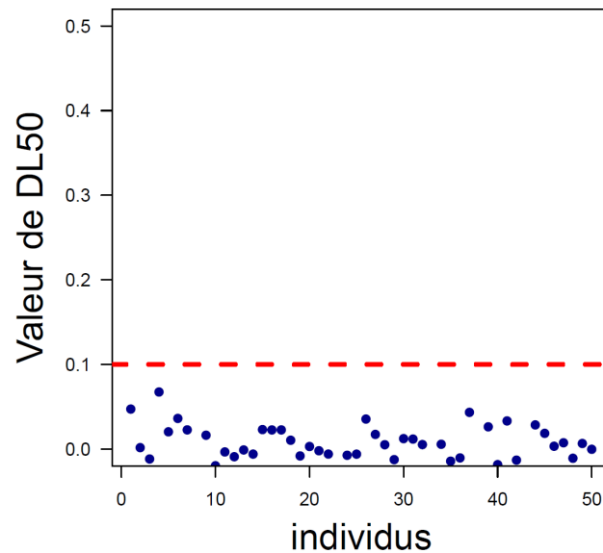


- **400** prélèvements planifiés par an



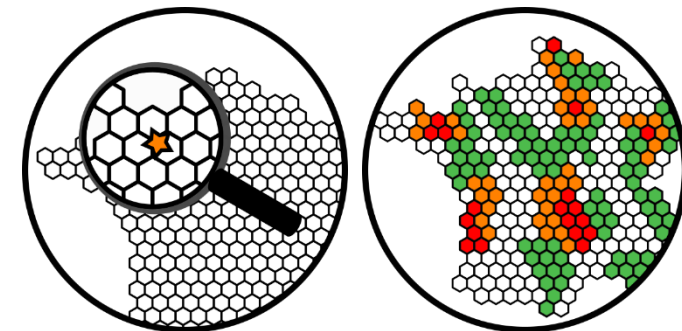
Les objectifs du plan de surveillance

Mise au point de méthodes



Détermination de ligne de base

Premières détections et suivi partiel





Le projet PARSADA ASAP

Anticipation et Surveillance de l'Adaptation des bioagresseurs aux méthodes de lutte en période de diminution du nombre de substances actives Pesticides



Pourquoi un projet PARSADA sur l'évolution des résistances ?

- Parce que le report de sélection accroît le risque d'évolution de résistance sur les solutions restantes, dont les méthodes alternatives.
- Parce qu'en cas d'existence de résistance vis-à-vis des solutions restantes, on veut éviter les usages non efficaces.
- Accroître la durabilité des SA autorisées restantes et des méthodes alternatives pour sécuriser/maitriser la transition.
- Parce que ce sont autant d'expérimentations de biologie évolutive à ciel ouvert qui permettent de poser des questions scientifiques fondamentales.



Anticiper des impasses « fantômes »



Mieux utiliser pour moins utiliser



Ne pas rester sans option de protection



Fronts de science
(compromis adaptatif, sélection indirecte, identification de mécanismes originaux...)



Un partenariat riche et complémentaire

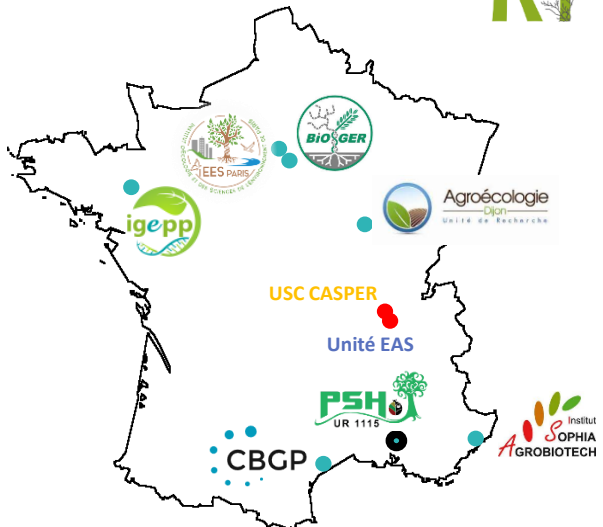


9 laboratoires
de recherche publics

INRAE

7 UR/UMR 2 unités

5 unités R4P



PARSADA PROJET ASAP



12 filières
agricoles





Action 0 Coordination

Coordinatrice
Myriam Siegwart

COFIL

INRAE

anses

ARVALiS

G.R.C.E.T.A.
des Elevages Charcutiers

IT2

Les Producteurs
d'endives
de France

Terres
Inovia
l'agronomie en mouvement

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

unilet
Interprofession
des légumes
en conserve
& surgelés

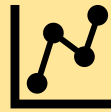
ITB
Institut Technique
de la Betterave

IFV

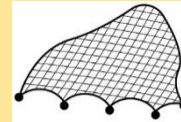
PAM
DE FRANCE
L'ASSOCIATION
D'UN PAYSAN

FNAMS

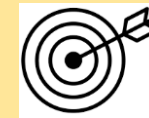
Action 1 : Anticiper



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

Des exemples de surveillance des résistances aux PPP dans la filière pomme

- Tavelure du pommier (Benoit Barrès)
- Carpocapse des pommes (Myriam Siegwart)
- Puceron cendré (Claire Mottet)

Résistance des *Venturia* spp. aux PPP



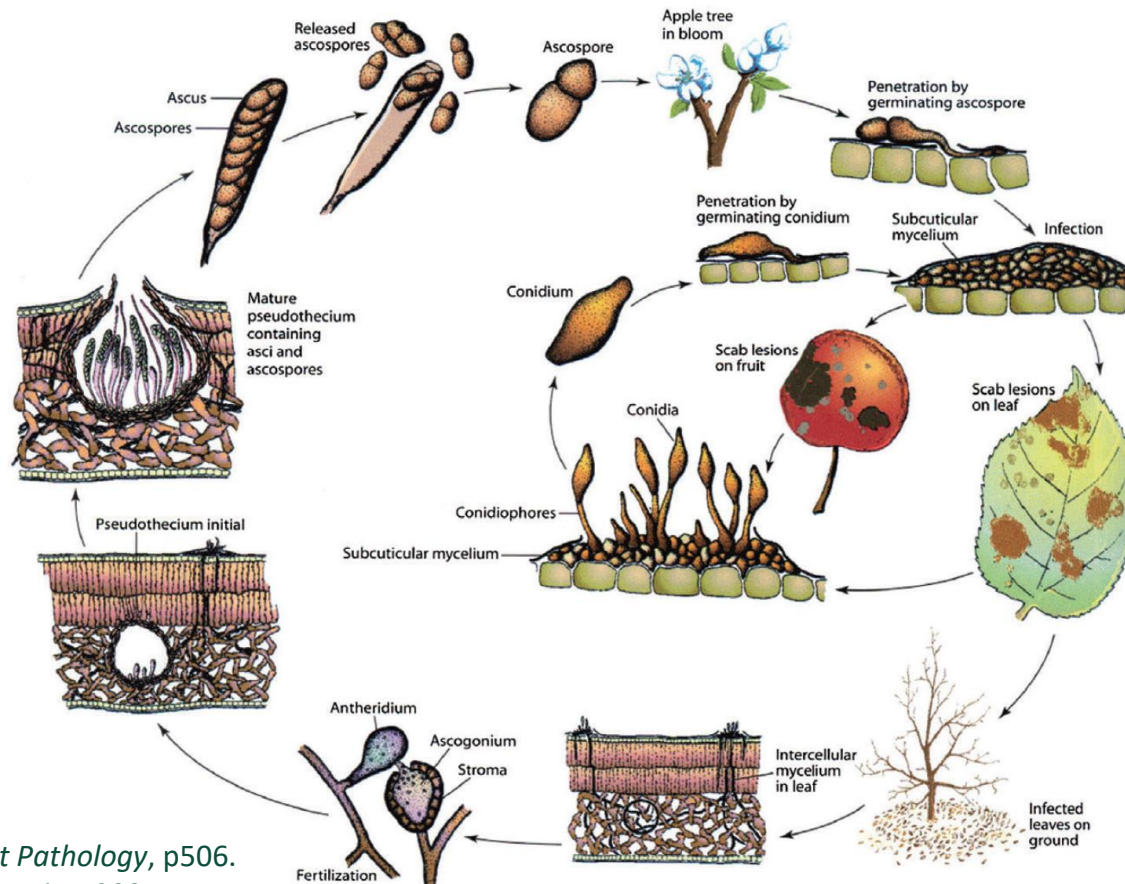
Benoit Barrès

Venturia inaequalis (+ *V. asperata*), tavelure du pommier





Venturia inaequalis



-champignon **ascomycète**

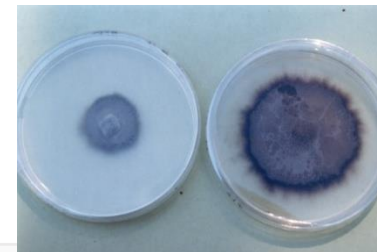
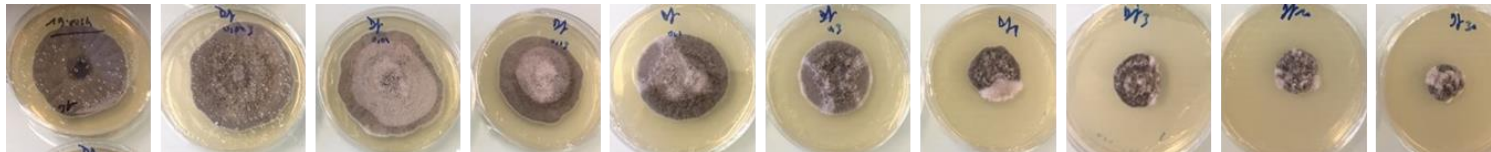
-inoculum primaire à partir de la litière, puis multiplication asexuée

-jusqu'à **100%** des fruits touchés

-**plus de 50%** des traitements ciblent ce pathogène

Biotests sur monospores

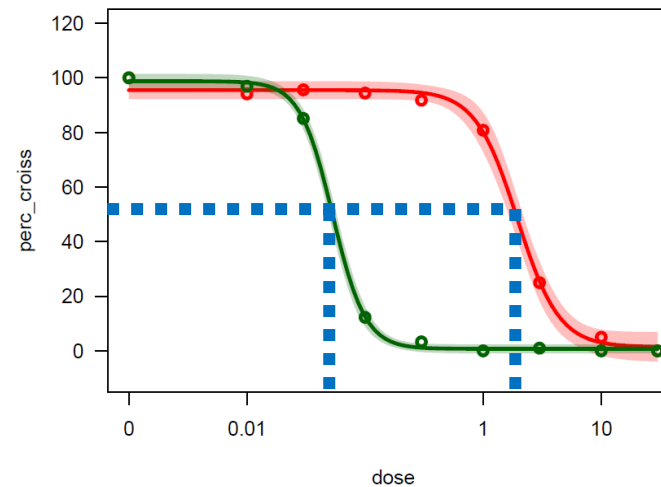
- Isolement de souches
- **gamme** de fongicides (7 substances actives) :
0 – 0,001 – 0,003 – 0,01 – 0,03 – 0,1 – 0,3 – 1 – 3 – 10 – 30 mg/L
- **Mise en culture** ou **inoculation** sur boites gélosées avec incorporation des solutions de fongicide
- mesure du **taux de germination** ou de la **croissance mycélienne**





Biotests sur monospores

- analyse par **régression** pour évaluer le **niveau de sensibilité** de la souche
- détermination de la **CI50**
- $$FR = \frac{CI50_{\text{chantillon}}}{CI50_{\text{référence sensible}}}$$
- lorsque **FR > 10** → échantillon considéré **résistant**





Des résistances contrastées aux PPP

- trifloxystrobine (QoI) et difénoconazole (IDM) : forte résistance, fréquente
- dodine (multi-sites) et cyprodinil (ANP) : résistance modérée, peu fréquente
- fluopyram (SDHI), captane (multi-sites) et dithianon (multi-sites) : pas de résistance à ce jour
- cuivre (multi-sites) : résistance jamais décrite chez phytopathogène



Gestion des résistances aux PPP au verger

- Diversifier les méthodes de lutte : prophylaxie (↘ inoculum primaire), conduite culturale (distance plants, taille, fertilisation), résistances variétales
- Utilisation modèles prévision des risques
- Alternier autant que possible les modes d'actions



Le contournement de résistance variétale

- Même principe = évolution sous pression de sélection
- Autres cibles concernées : récepteur extracellulaire ou QTL
- Problématique pour culture pérenne

Les résistances variétales

Vers une gestion des résistances du pommier à la tavelure

La préservation des variétés résistantes passe par la diversification au sein du génome mais aussi de la parcelle, et le recours à des pratiques agronomiques pour diminuer la pression du pathogène, ainsi qu'à des éliciteurs pour renforcer les défenses naturelles.

● VALÉRIE CAFFIER⁽¹⁾, BRUNO LE CAM⁽¹⁾, CHARLES-ÉRIC DUREL⁽¹⁾, MARIE-NOËLLE BRISSET⁽¹⁾, FRANÇOIS LAURENS⁽¹⁾, LAURENT BRUN⁽²⁾, FRÉDÉRIQUE IDELOT⁽³⁾ ET ARNAUD LEMARQUAND⁽³⁾ (1) Univ. Angers, Institut Agril. Inrae, IRHS, SFR Quasav - Angers (2) Inrae, UFR - Saint-Marcel-Rés-Vallée (3) Inrae, UFR 0449 Unité expérimentale Forêt - Boisacous

- Basée sur des gènes majeurs ou des QTL de résistances
- Gènes majeurs, résistance totale : 18 identifiés (venant de Malus sauvages ou de variétés anciennes) – 11 sur 18 contournés
- QTL, résistance quantitative : nombreux – la résistance s'érode avec sélection de souches agressives

Résistance du carpocapse des pommes au virus de la granulose (CpGV)

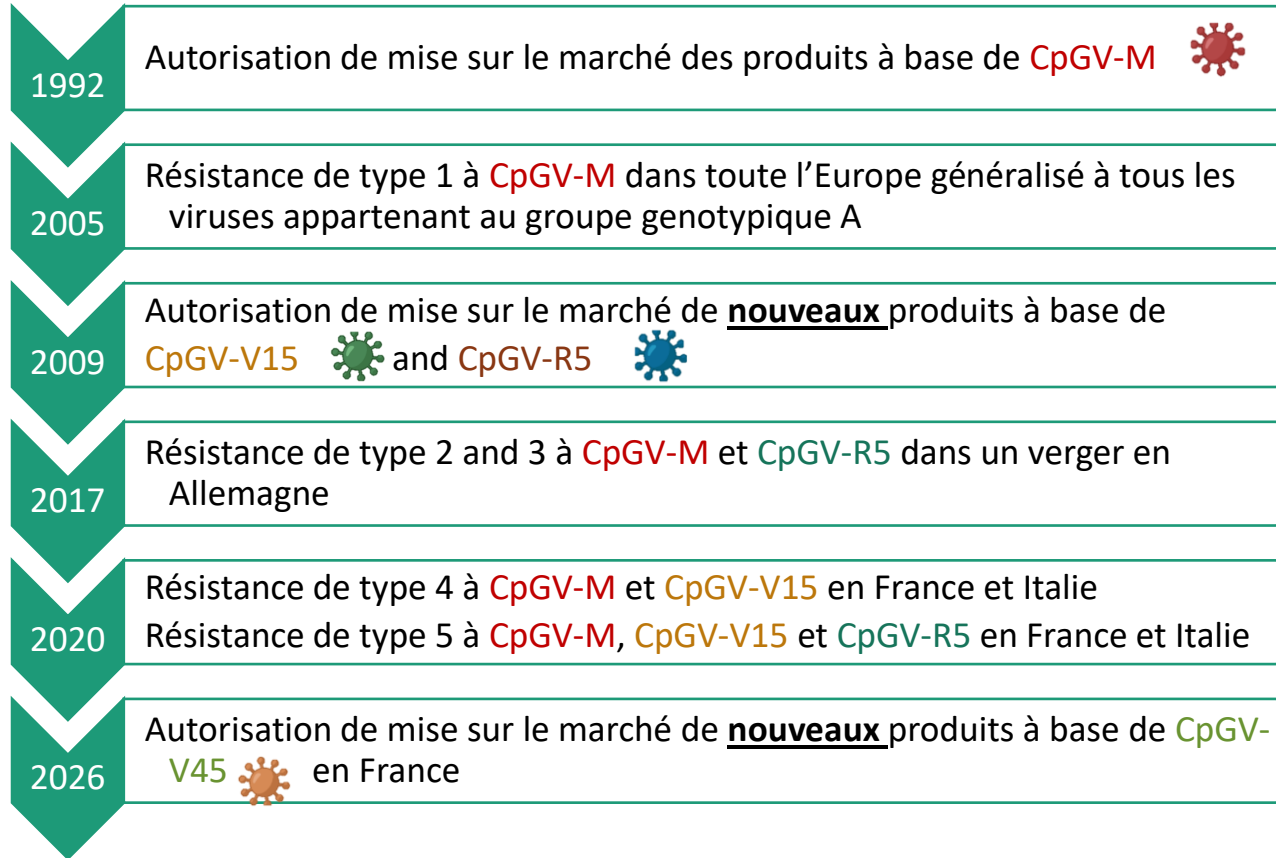


Myriam Siegwart
INRAE Avignon

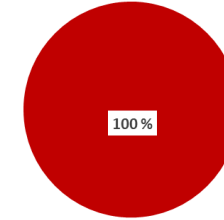
Webinaire du 26 février 2026 - groupes DEPHY et 30 000

La multi-résistance de *C. pomonella* aux isolates de CpGV

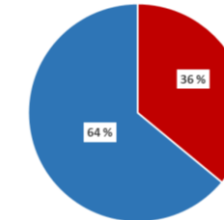
Composition des isolats viraux commerciaux



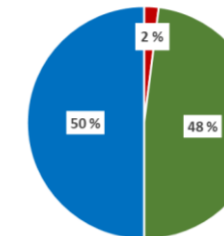
CpGV-M



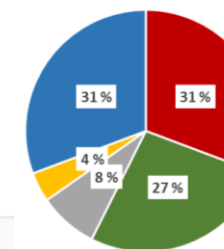
CpGV-R5



CpGV-V15



CpGV-V45



Groupes Génotypiques

- A
- B
- C
- D
- E

Succession de mise sur le marché de nouveaux virus et d'émergence de résistance

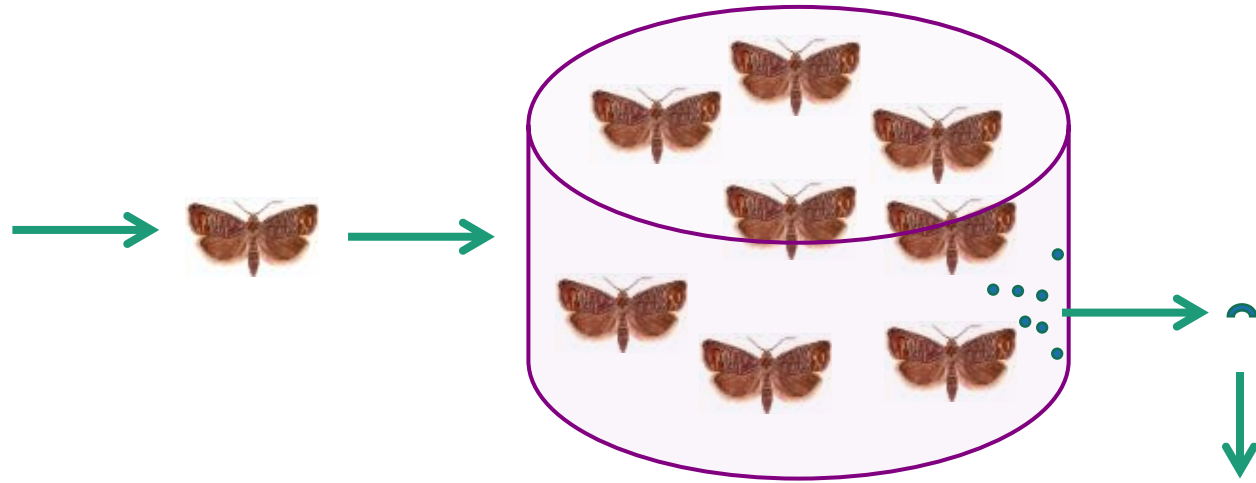
Complexification de la composition de produits à base de virus



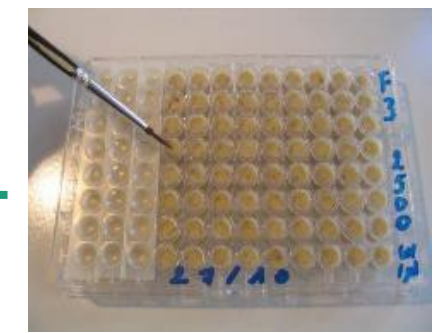
Surveillance par la technique de biotest



Populations sauvages

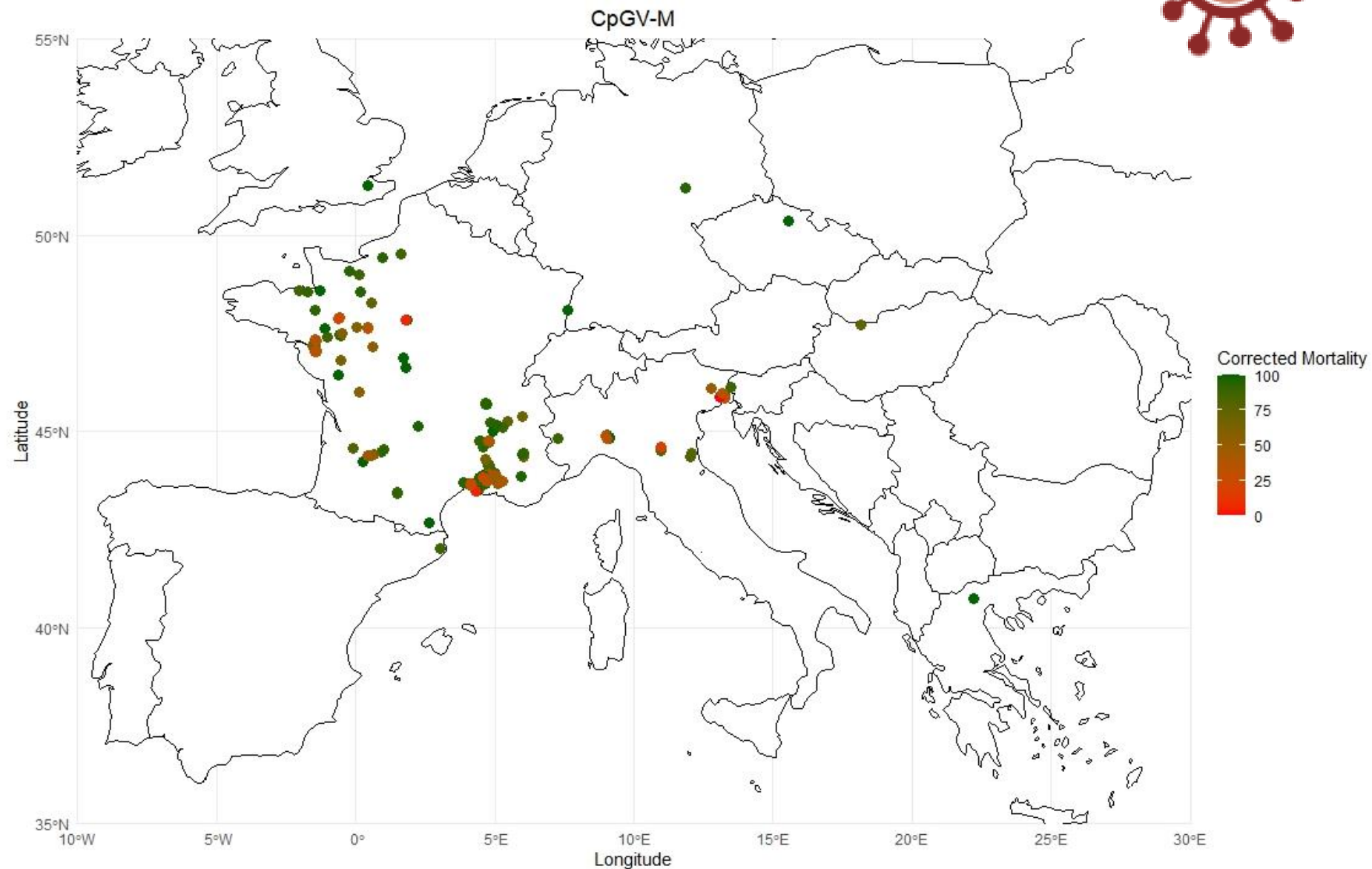
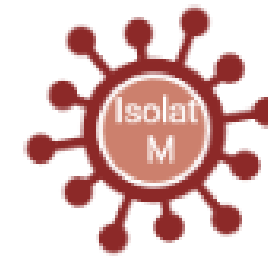


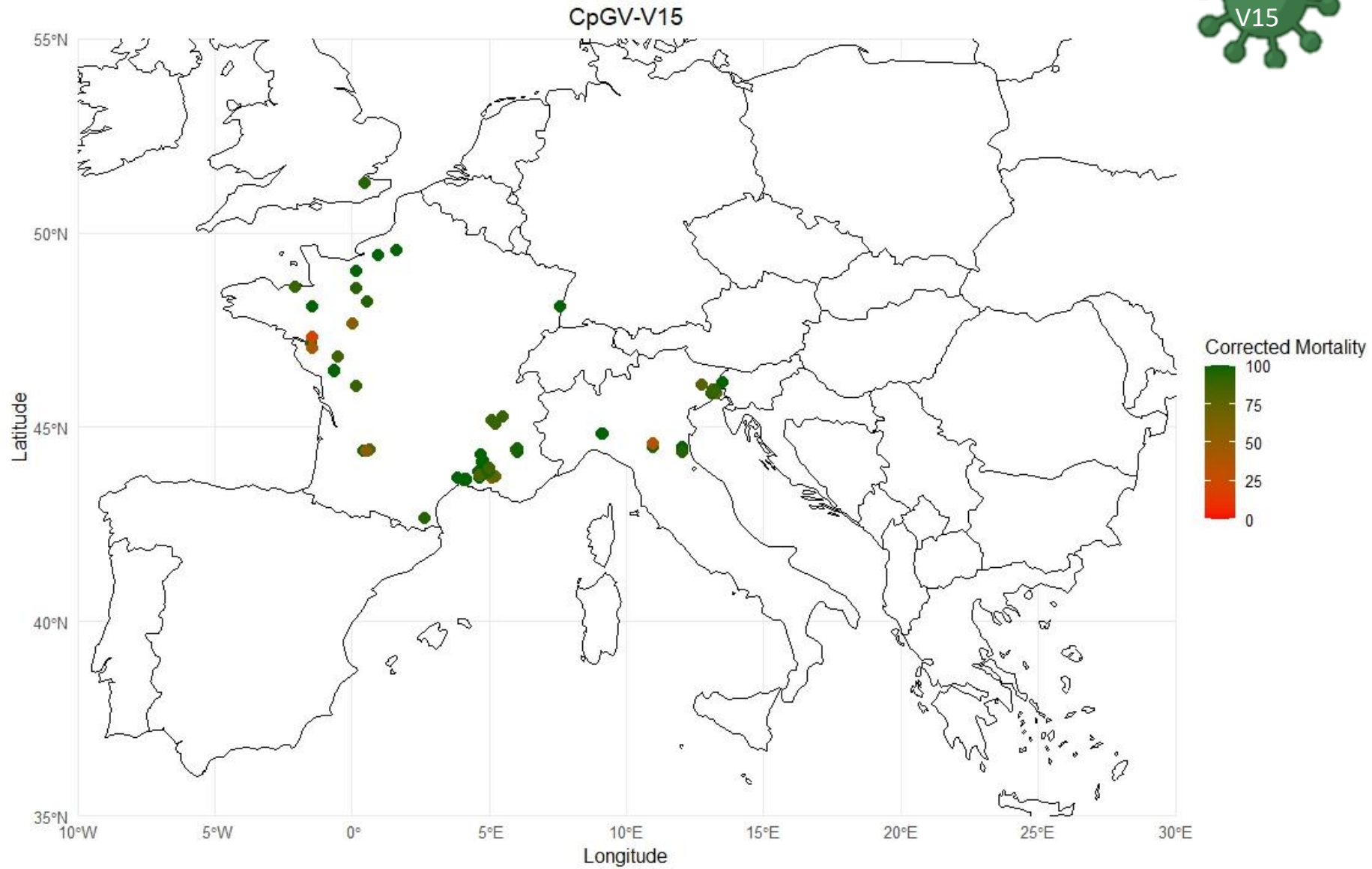
Mortalité larvaire

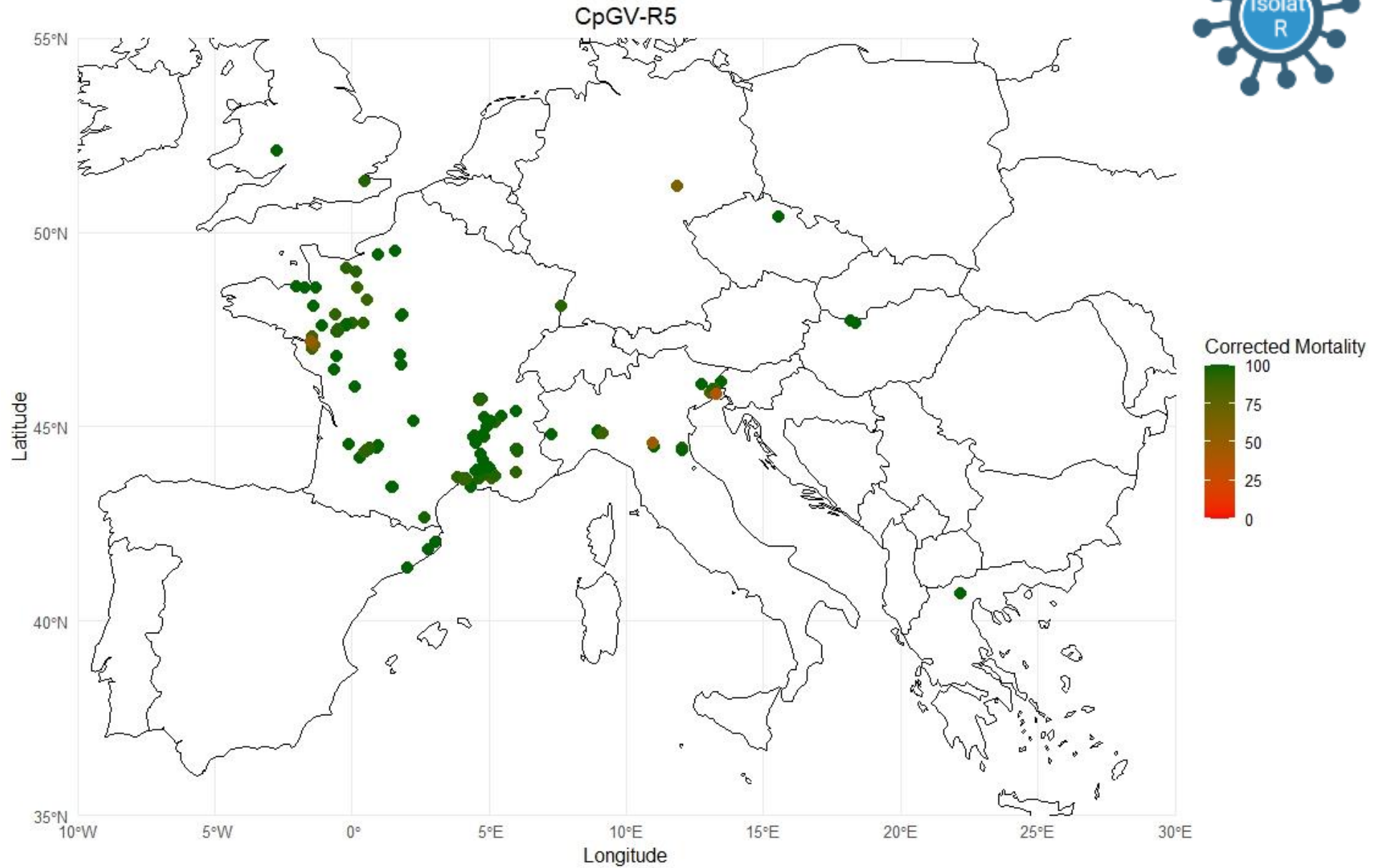


7 jours d'incubation

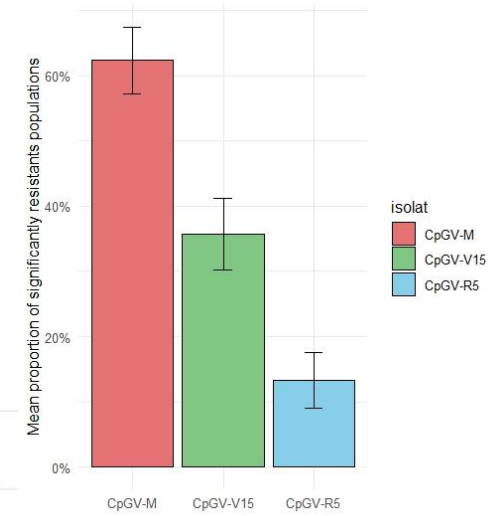
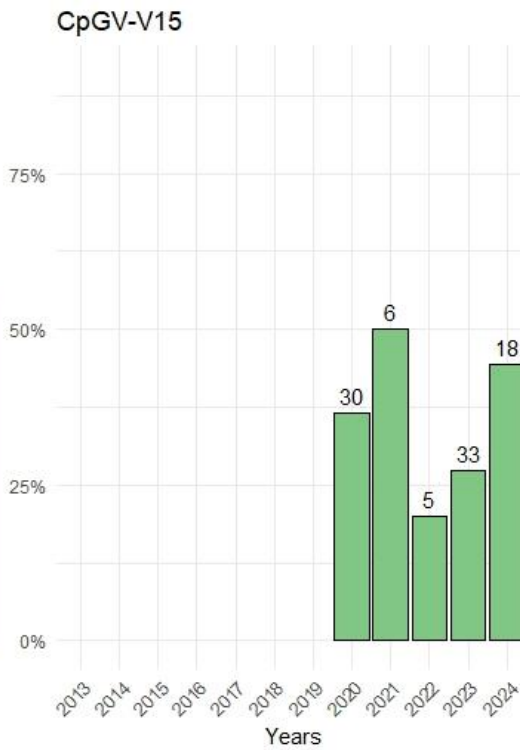
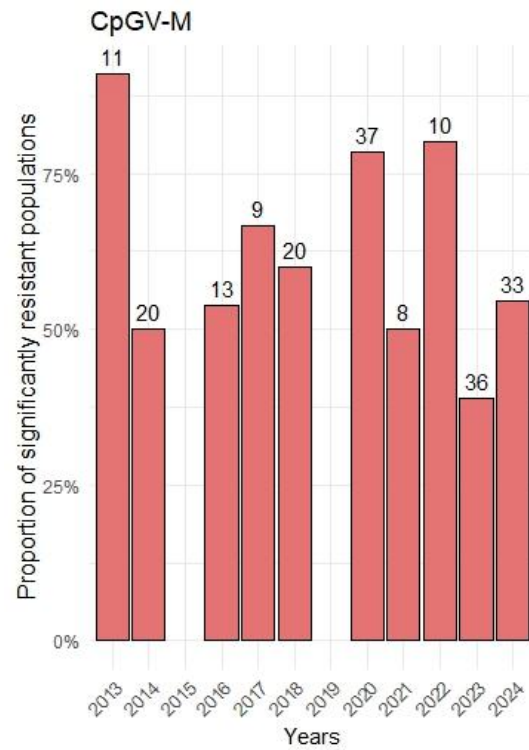
12 ans de surveillance







Evolution des résistances dans le temps

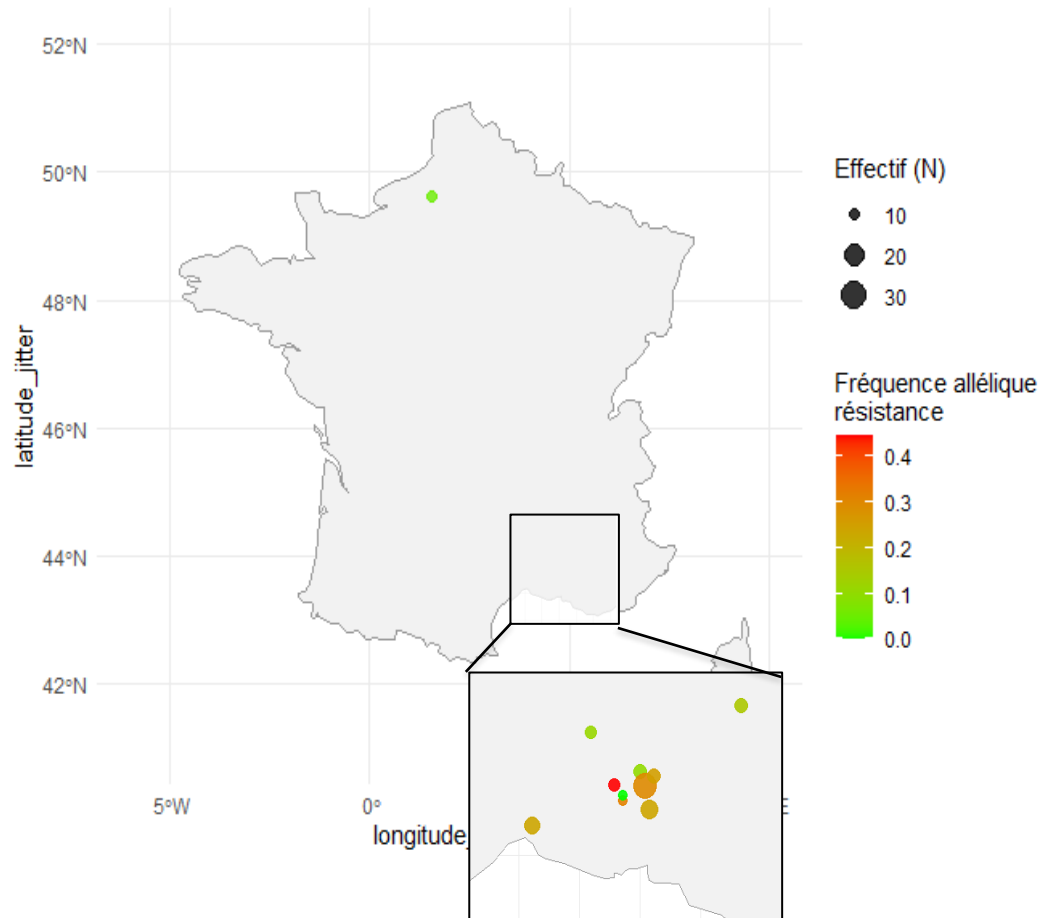


Surveillance par des techniques moléculaires en 2026 projet ASAP

2025 encore en cours d'analyse...

Distribution spatiale d'un marqueur de la résistance à CpGV_R5

vert = sensible → rouge = résistant

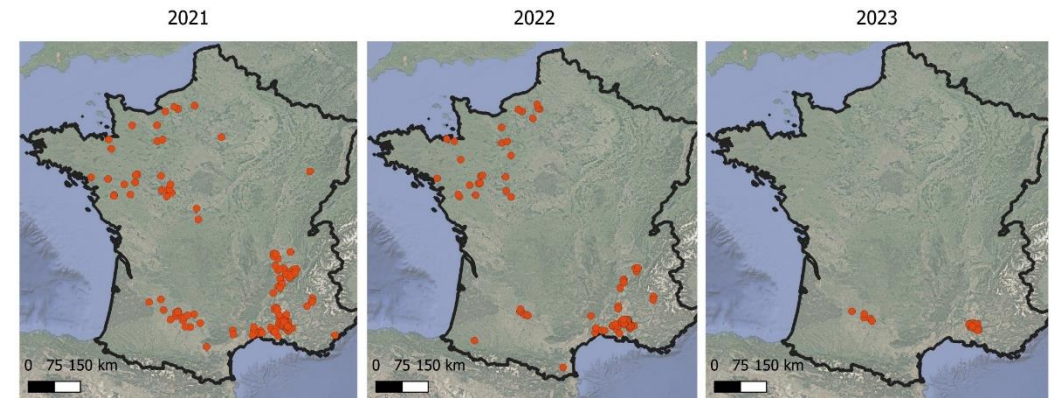


Présence de cette résistance dans le sud-Est

Attention marqueur moléculaire peu satisfaisant → indicateur faible

En cours de développement d'une nouvelle méthode de détection (droplet digital PCR) plus fiable

Echantillonnage participatif important à poursuivre !



DEMANDEZ VOTRE KIT DE PRELEVEMENT !!!



myriam.siegwart@inrae.fr,
elodie.lecerf@inrae.fr



Identification des facteurs influençant l'efficacité des produits à base de virus de la granulose

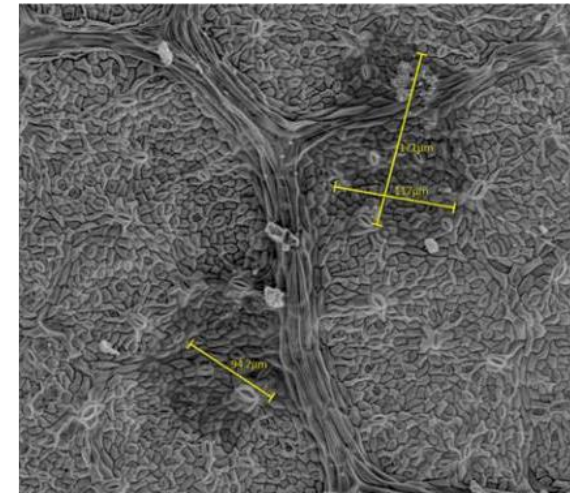
Myriam Siegwart, Valentina Baldazzi
et Miguel Ferber-Lopez



Caractéristiques influençant l'efficacité insecticide

- Les insecticides à base de virus agissent par ingestion
- Le nombre de morsures faites par les larves néonates sur la plantes dépendent de la durée du stade baladeur (fonction linéaire)
- La taille d'une morsure est en moyenne de $0,012\text{mm}^2$
- Le nombre moyen de particules virales qu'une larve doit ingérer pour mourir est 6

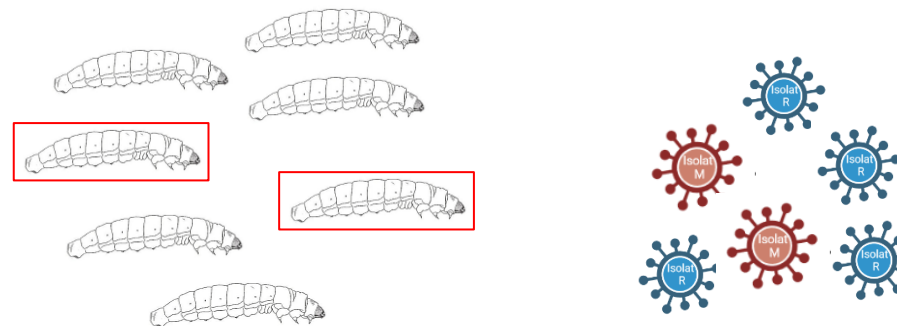
(le nombre de particules qui doit pénétrer dans les cellules de l'insecte pour faire mourir une larve est de 1 en moyenne)



Hinsberger, 2020

Problématique

Comment optimiser l'efficacité de produits à base de virus composés de mélanges de génotypes contre des populations d'insectes composés d'individus résistants et sensibles ?

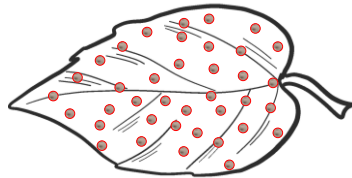


Modèle théorique pour explorer cette question



Entrées du modèle

Qualité de pulvérisation



Proportion de feuille couverte

Volume d'application



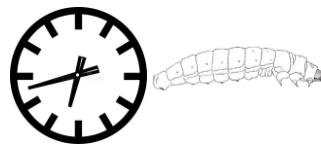
L/Ha

Concentration dans le produit commercial



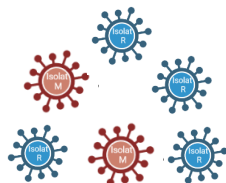
Virus/L

Durée d'exposition = durée stade baladeur

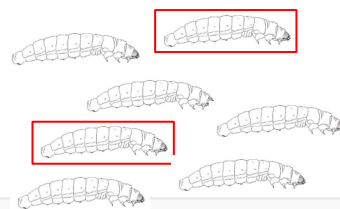


minute

Proportion en géotypes viraux

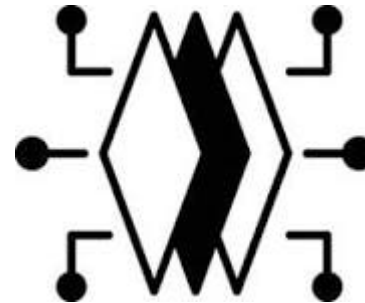


Proportion en insectes résistants



frequence

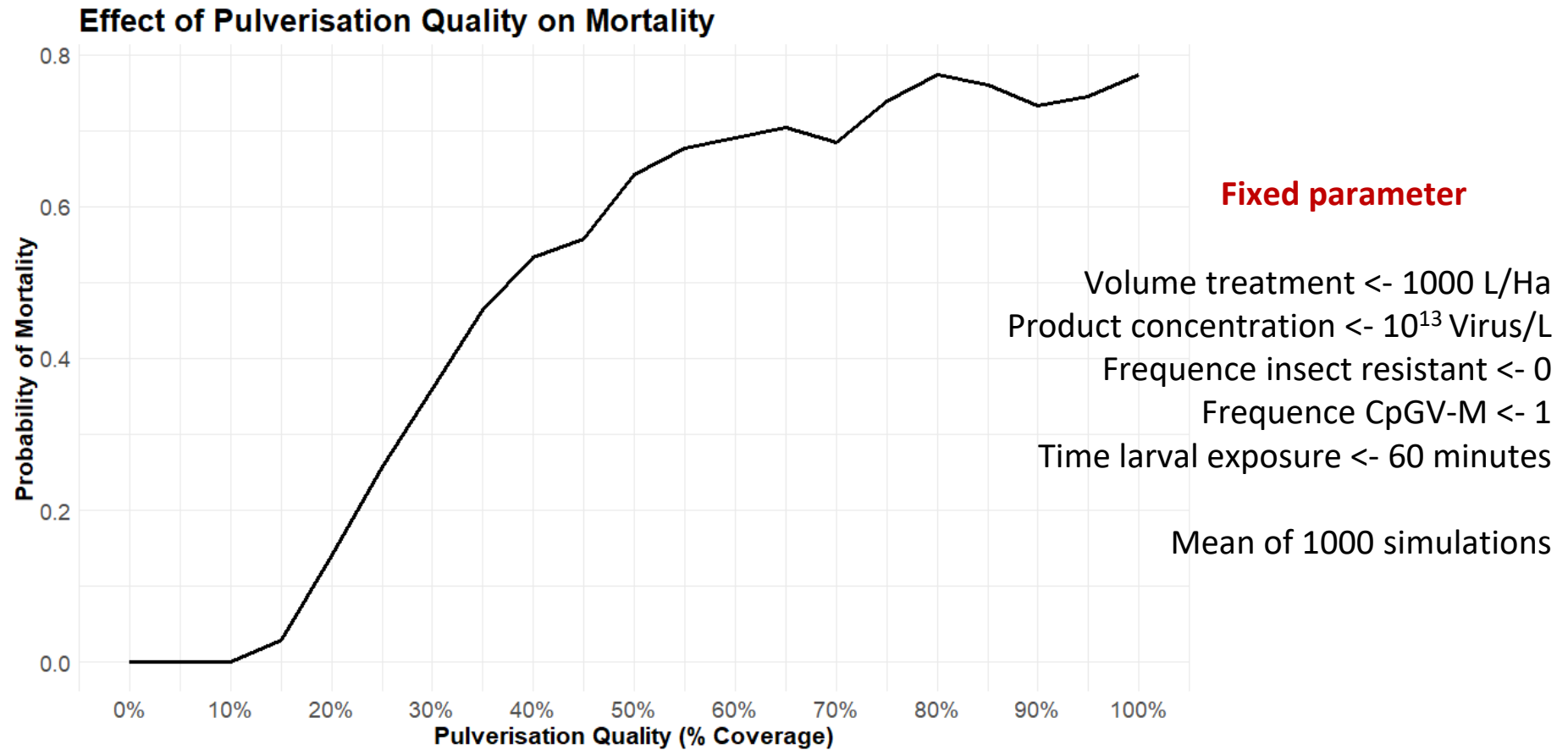
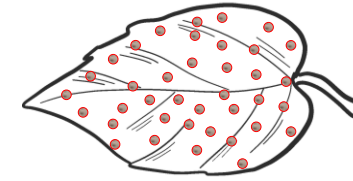
modèle probabilistique



Sortie du modèle

Mortalité larvaire



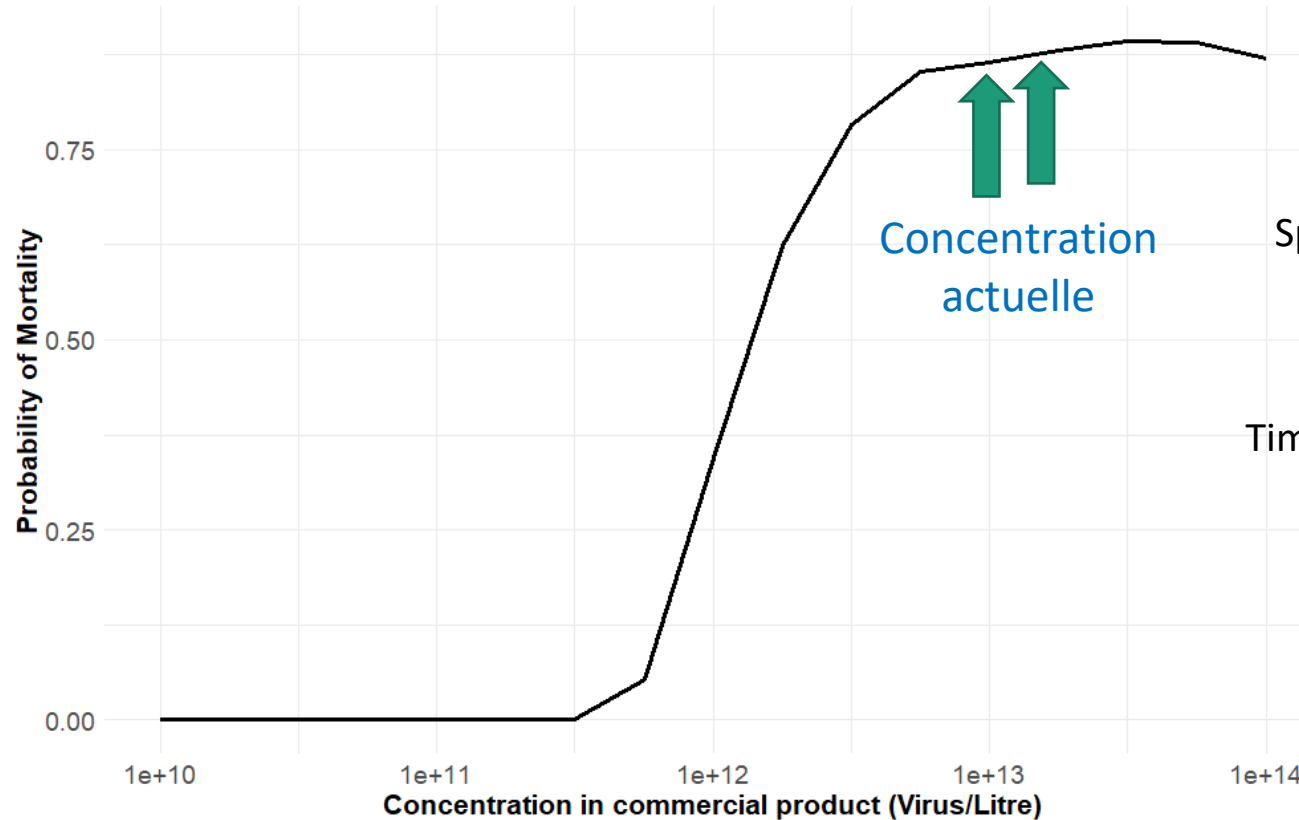


Gros impact de la qualité de pulvérisation sur la mortalité larvaire

Concentration virale dans le produit commercial



Effect of viral concentration in commercial product on Mortality



Fixed parameter

Spray quality <- 60% treated area

Spray volume <- 500 L/Ha

Frequency insect resistant <- 0

Frequency CpGV-M <- 1

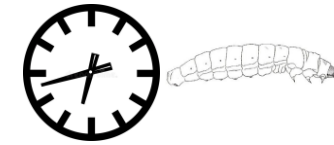
Time larval exposure <- 60 minutes

Mean of 1000 simulations

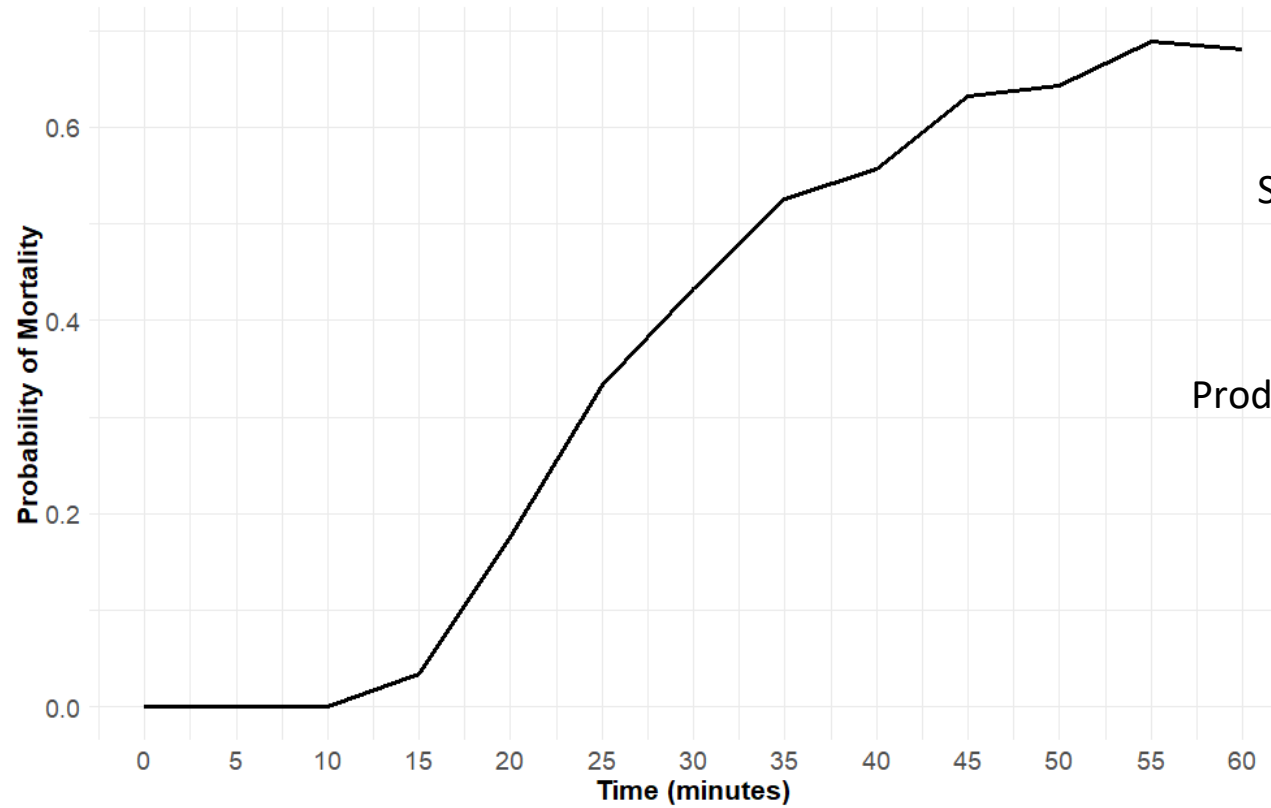
Les concentrations actuelles des produits commerciaux sont appropriés



Durée d'exposition = Stade baladeur



Effect of duration of wandering stage on Mortality



Fixed parameter

- Spray quality <- 60% treated area
- Spray volume <- 500 L/Ha
- Frequence insect resistant <- 0
- Frequence CpGV-M <- 1
- Product concentration <- 10^{13} Virus/L

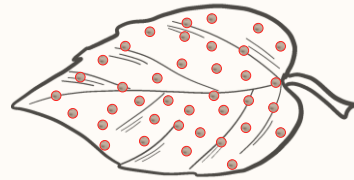
Mean of 1000 simulations

Gros impact de la durée du stade baladeur sur la mortalité larvaire



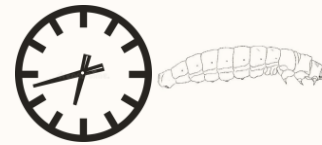
Les facteurs importants sont :

Qualité de pulvérisation



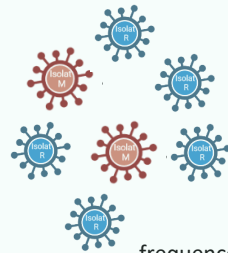
Proportion de feuille couverte

Durée d'exposition =
durée stade baladeur



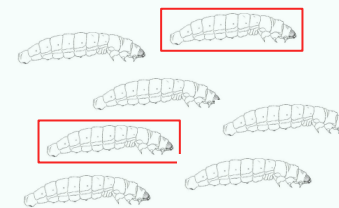
minute

Proportion en
génotypes viraux



frequence

Proportion en insectes
résistants



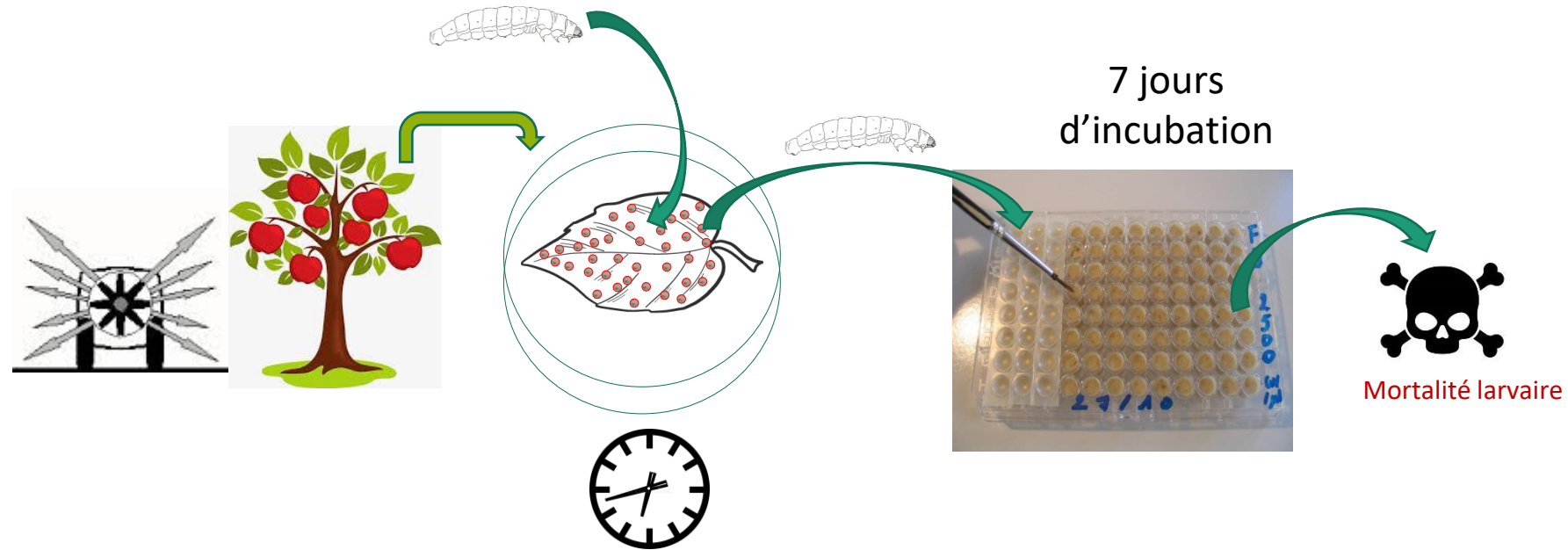
frequence



Validation avec des données expérimentales

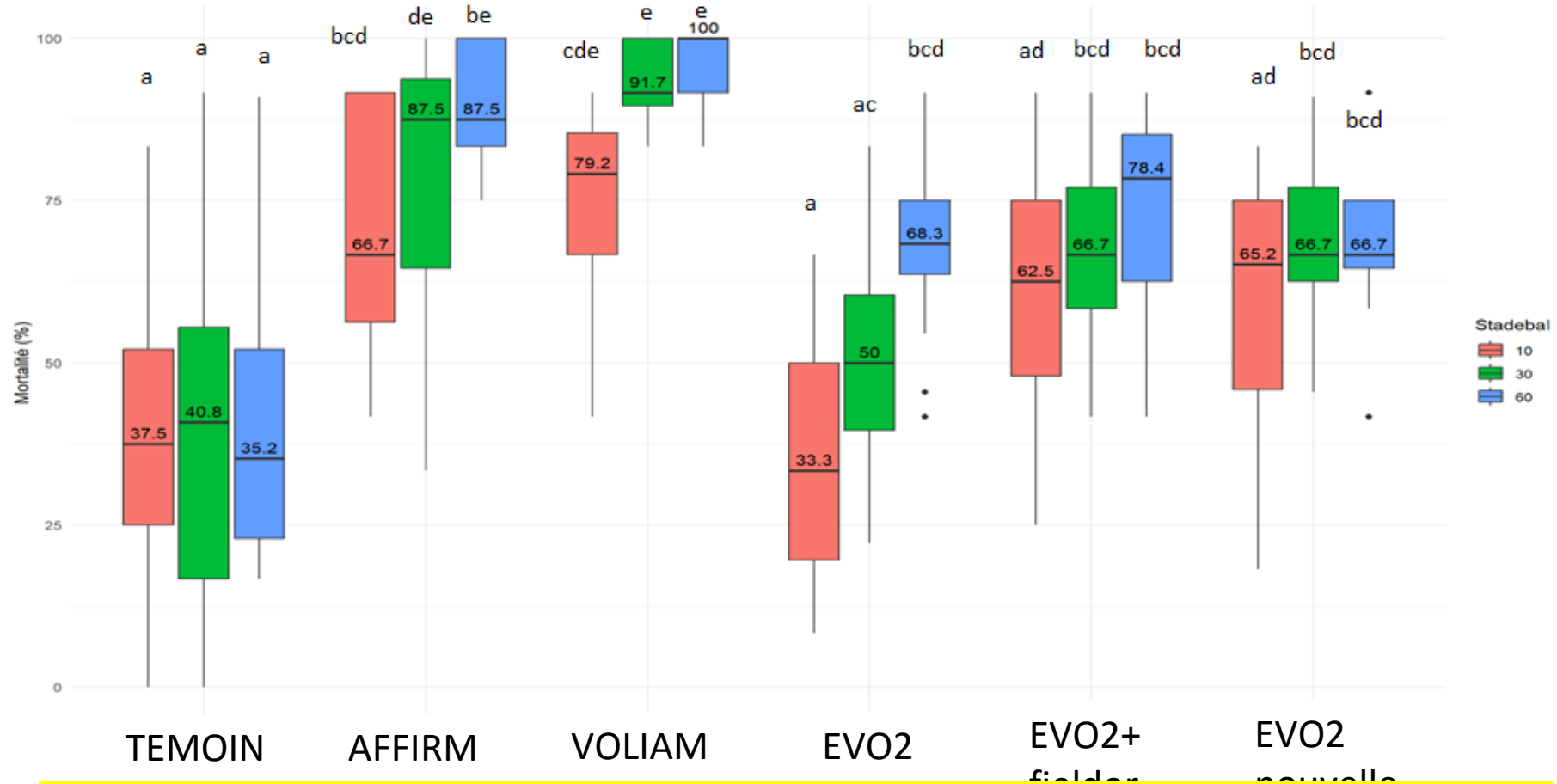


Flavie DELPECH, Camille Métayer, Sandrine MAUGIN, Elodie LECERF,
Sophie HARDY, Myriam SIEGWART





Durée d'exposition = stade baladeur

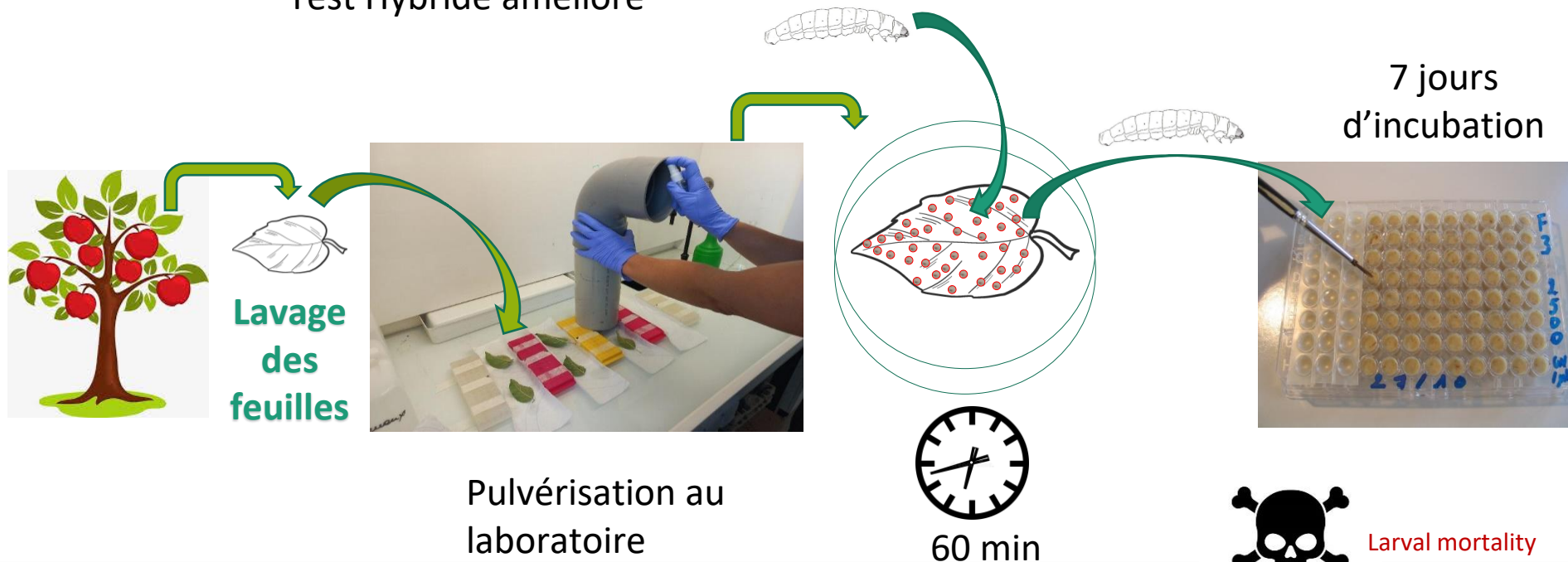


Beaucoup de mortalité dans les témoins et de variabilité dans les données expérimentales → changement de méthode

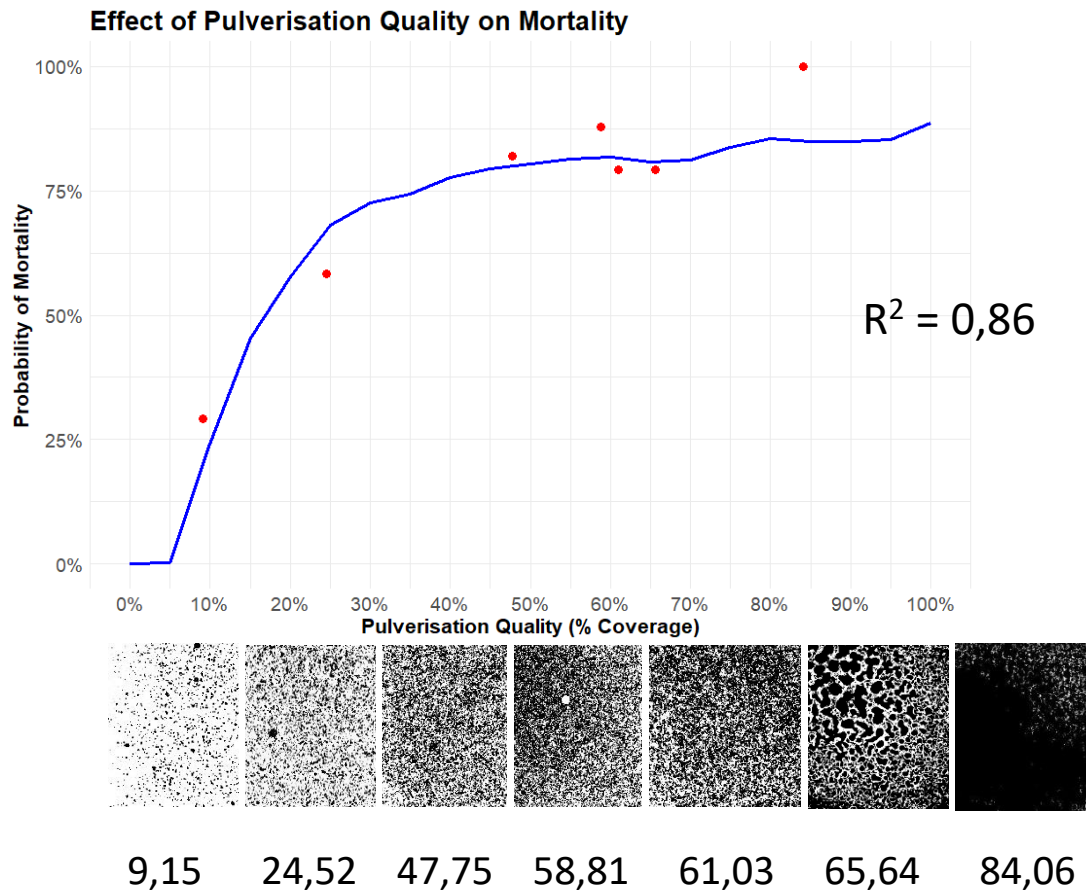


Changement dans le protocole expérimental

Test Hybride amélioré



Effet de la qualité de pulvérisation sur la mortalité

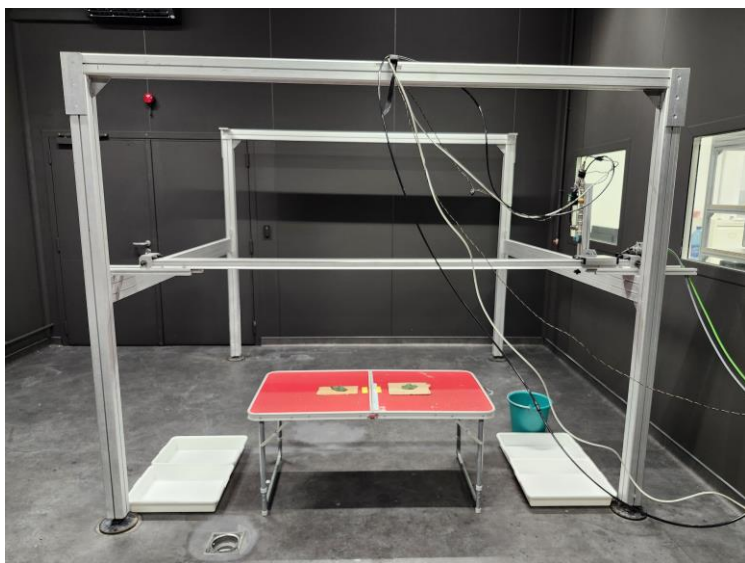


Bonne concordance entre les données expérimentales et le modèle

Validation que la qualité de pulvérisation est un facteur important pour l'efficacité du CpGV

Confirmation en 2025 Stage Camille Metayer !

Impact de la qualité de pulvérisation sur l'efficacité des produits à base de CpGV



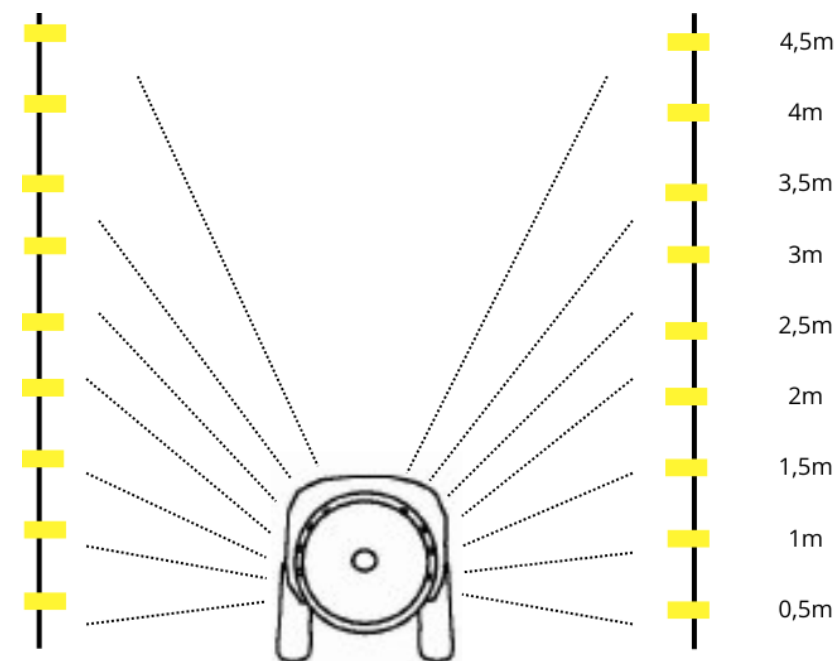
Confirmation couverture optimale : > 55% des feuilles

Impact conditions pulvérisation (température, hygrométrie, pluvé)



Conditions optimales : $T^{\circ} < 24^{\circ}C$; Hygro > 70% ; pluvé à jet porté

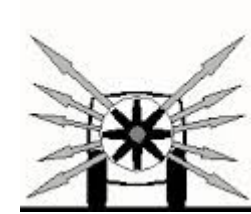
Quel outil pour vérifier la qualité d'une pulvérisation ?



Appli sur téléphone : SmartSpray donne des résultats fiables !

Conclusion

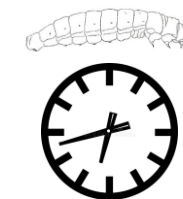
Les deux approches, expérimentale et par modélisation convergent sur le fait que la qualité de pulvérisation est un facteur clef du succès des produits à base de CpGV



La composition et la concentration des produits doivent être surveillé de près par les firmes qui les commercialisent.



Le modèle prédit que la durée du stade baladeur influence l'efficacité de ces produits qui seront donc plus efficaces en première generation (cela demande encore à être validé expérimentalement)



Merci ...



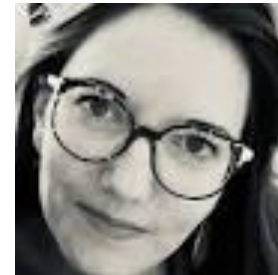
Valentina
Baldazzi



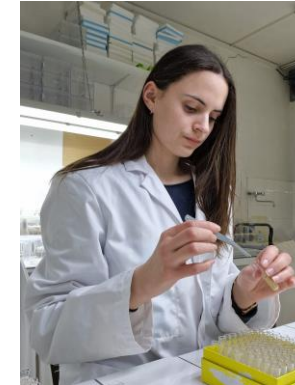
Flavie
Delpech



Sandrine
Maugin



Elodie
Lecerf



Léa
Gingueneau



Miguel
Ferber-Lopez



Jérôme
Olivares



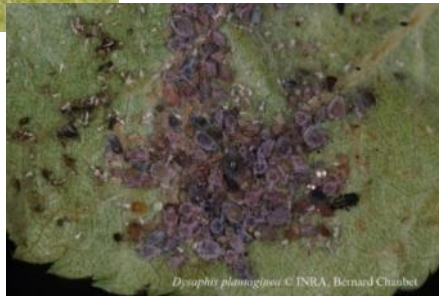
RÉSISTANCE DE *DYSAPHIS PLANTAGINEA* A LA FLONICAMIDE ET A L'AZADIRACTINE



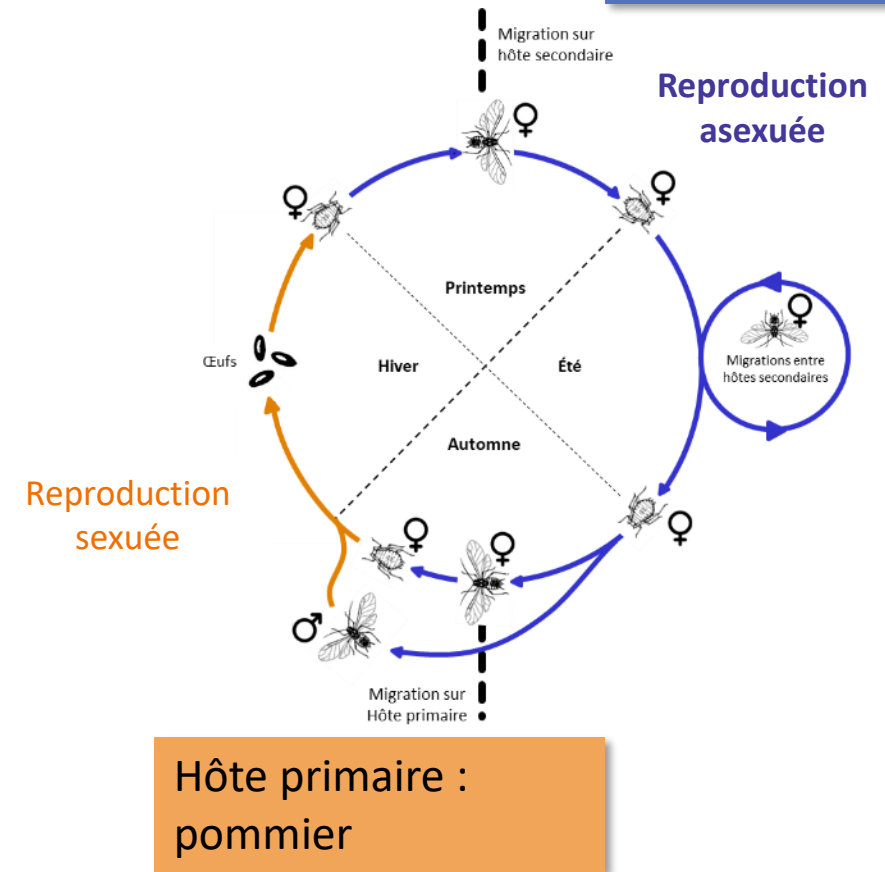
Claire MOTTET

Dysaphis plantaginea - biologie

- Puceron cendré du pommier
- Dégâts sur pommier uniquement (dégâts directs)
- Signalements d'échecs de contrôle + fréquents

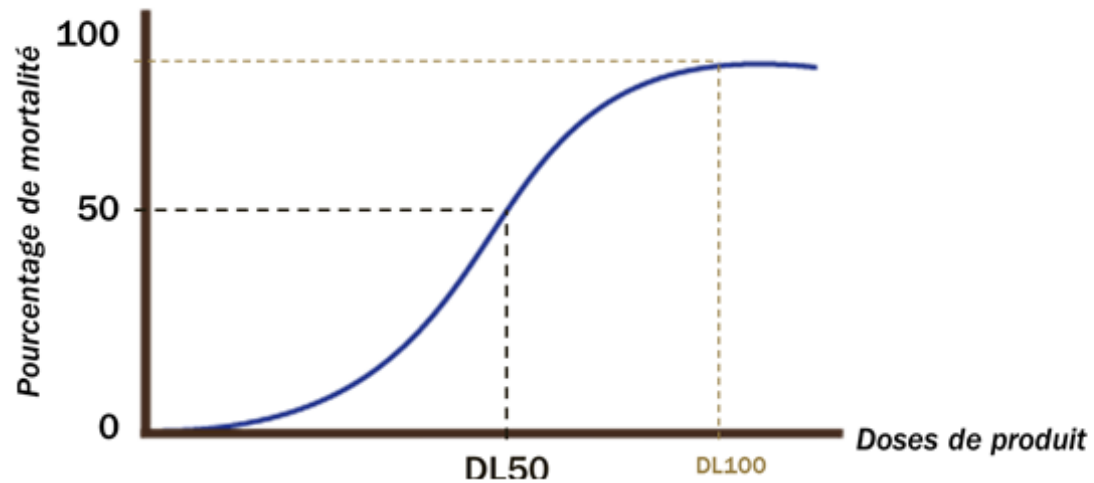


Hôte secondaire :
plantain



Principe général des tests biologiques

Test en gamme de doses :
courbes dose-réponse

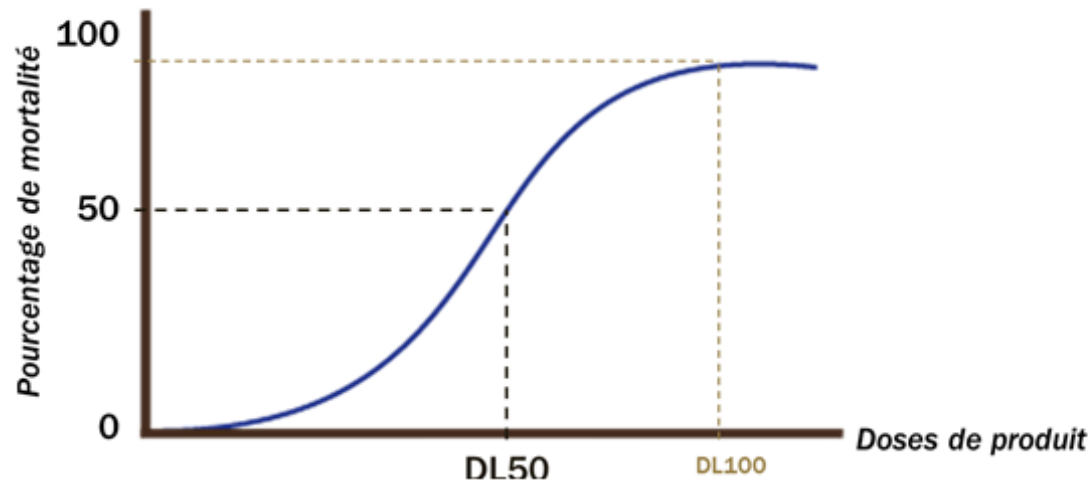


→ Facteur de résistance

$FR = DL50 \text{ individu} / DL50 \text{ référence sensible}$

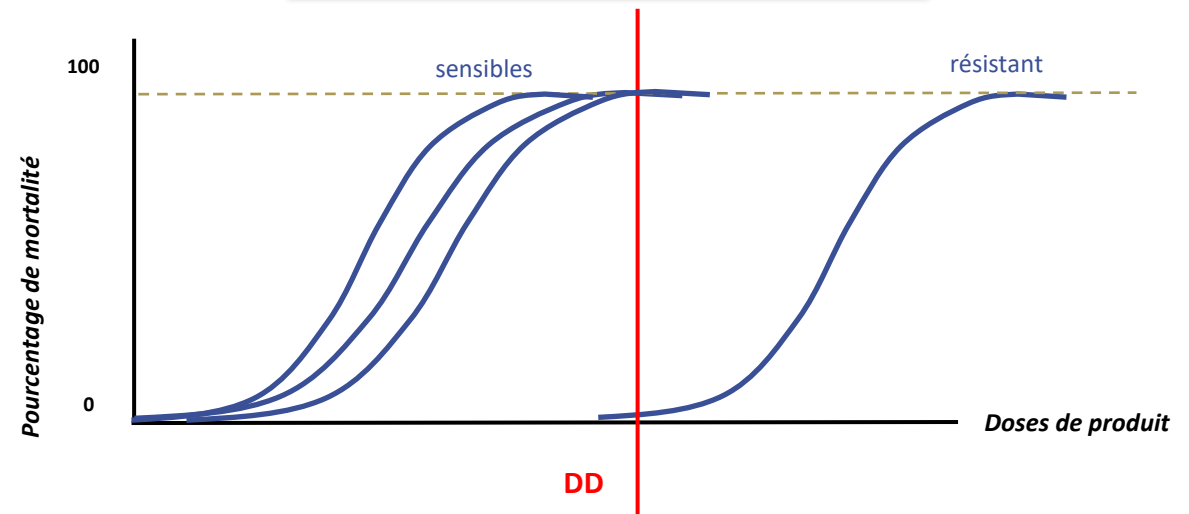
Principe général des tests biologiques

Test en gamme de doses :
courbes dose-réponse



→ Facteur de résistance
 $FR = DL50 \text{ individu} / DL50 \text{ référence sensible}$

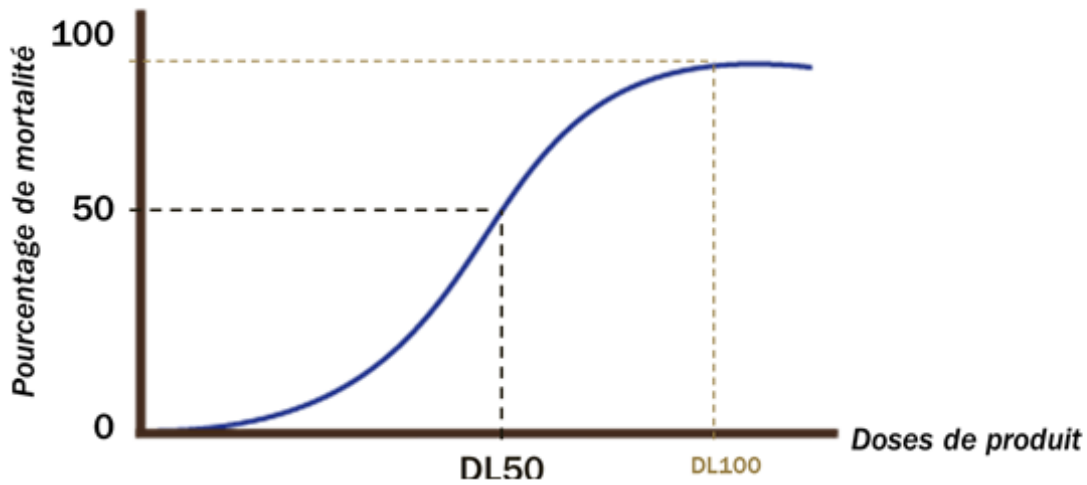
Établissement d'une dose
discriminante (DD)



FLONICAMIDE
DD = 2,5 mg/L

Principe général des tests biologiques

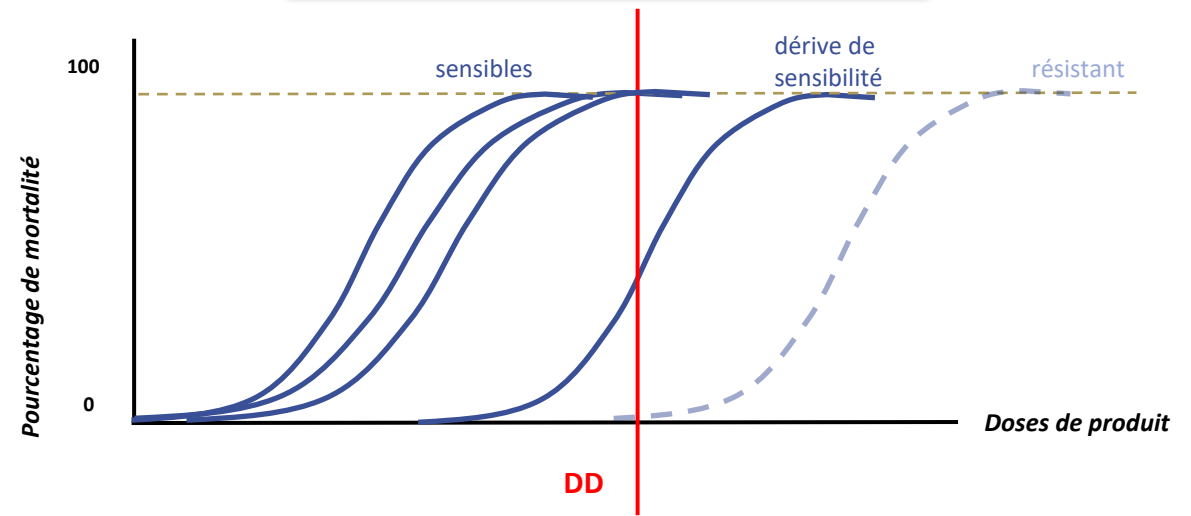
Test en gamme de doses :
courbes dose-réponse



→ Facteur de résistance

$$FR = DL50 \text{ individu} / DL50 \text{ référence sensible}$$

Établissement d'une dose
discriminante (DD)



AZADIRACTINE

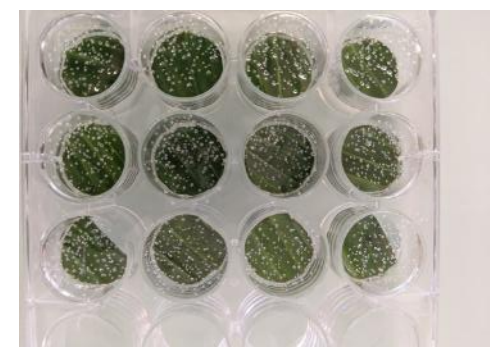
DD = 25 mg/L

Principe général du test

Test par trempage de feuilles

Adaptation de la méthode IRAC 019.v3.2

- Préparation solutions de produit formulé (gamme ou dose discriminante)
- Trempage 10s
- Dépôt sur agar
- Dépôt des pucerons : 1 adulte / puits
- Scellage des plaques
- A 24h, retrait des adultes
- Lecture à 5 ou 7 jours : dénombrement vivants / morts





Résultats des tests de résistance à la flonicamide

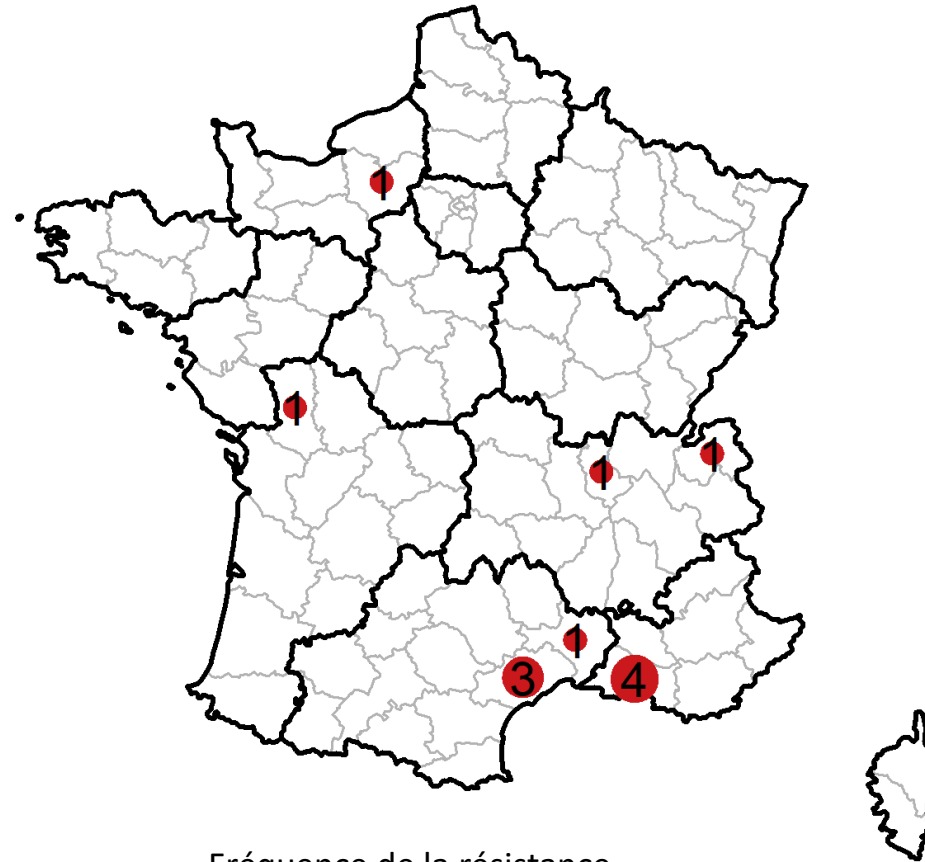
2025 : ASAP



Prélèvement dans lequel aucune résistance n'a été détectée



Prélèvement dans lequel une résistance a été détectée selon le protocole utilisé



Fréquence de la résistance
 ≈ 35% individus/prélèvement

FLONICAMIDE

- Conventionnel
- Seul représentant de la famille des pyridinecarboxamides
- Inhibition de la prise alimentaire - mode d'action mal connu
- Insecticide spécifique des piqueurs - suceurs

Prélèvement résistant =
 au moins 1 individu survivant
 confirmé au test en DD

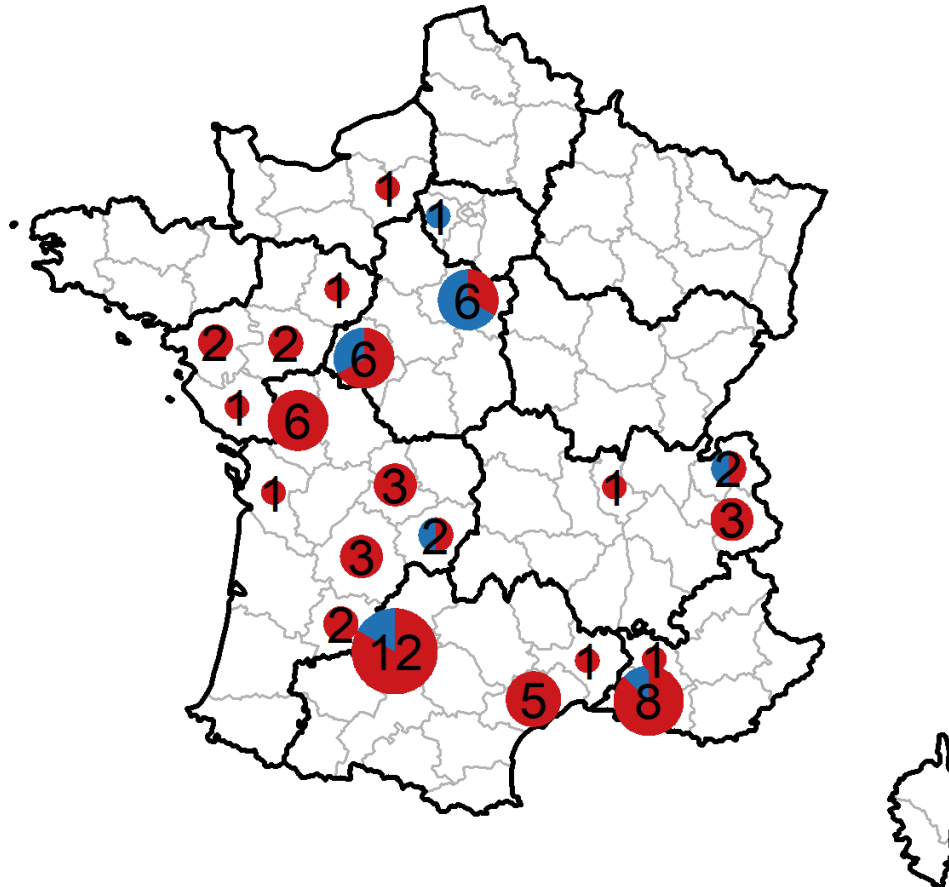


Résultats des tests de résistance à la flonicamide

**2017 - 2025 :
ASAP + PdS**

Prélèvement résistant =
au moins 1 individu survivant
confirmé au test en DD

- Prélèvement dans lequel aucune résistance n'a été détectée
- Prélèvement dans lequel une résistance a été détectée selon le protocole utilisé





Conclusion et perspectives

FLONICAMIDE

Résistance avec une grande occurrence :

forte proportion de parcelles avec au moins un individu résistant

Facteurs de résistance modérés :

- FR allant jusqu'à 17 pour le clone le plus résistant
- autour de 3 à 10 pour la plupart

Résistance à surveiller :

- Recherche de clones à FR plus élevé
 - seconde DD élevée (35 mg/L)
- mis en place pendant plusieurs années, aucun clone hautement résistant détecté





Résultats des tests de résistance à l'azadiractine

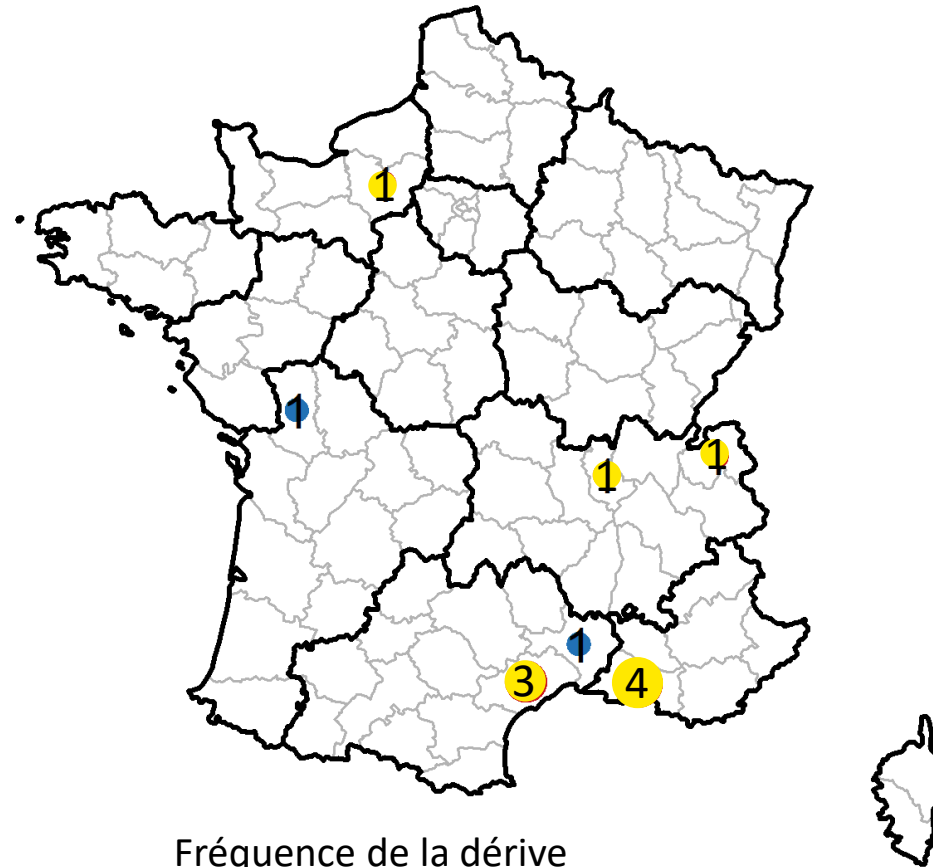
2025

● Prélèvement dans lequel aucune résistance n'a été détectée

● Prélèvement dans lequel une dérive de sensibilité a été détectée

● Prélèvement dans lequel une résistance a été détectée selon le protocole utilisé

Prélèvement résistant =
au moins 1 individu survivant
confirmé au test en DD



Fréquence de la dérive
≈ 15% individus/prélèvement

AZADIRACTINE

- Utilisé en agriculture bio + conventionnelle (dérogation)
- Famille des terpènes
- Responsable d'un blocage du système endocrinien par mimétisme avec des hormones du cycle de la cible
- Triple mode d'action :
 - inhibiteur de mue
 - arrêt de la reproduction et de la ponte
 - arrêt de l'alimentation



Conclusion et perspectives

AZADIRACTINE

En cours de mise au point de la méthode

Dérive de sensibilité possible avec une occurrence non négligeable

Avec le critère choisi (1 individu survivant confirmé au test en DD suffit à déclarer le prélèvement résistant)

Mais peu d'individus survivants par prélèvement

Facteurs de résistance bas :

FR de 2 à 4 par rapport à la moyenne des clones sensibles (DL50 \approx 5 mg/L)



-> Dose discriminante sans doute à revoir



Conclusion et perspectives

Résistance au labo \neq perte d'efficacité au champ

→ Besoin de surveillance d'efficacité au champ par des essais d'efficacité

Stratégie de traitements

→ Recommandations usuelles d'alternance de substances, dans la mesure du possible

En parallèle, recherche par séquençage de **résistance au spirotétramate**



Merci de votre attention !



Merci à Elorri SEGURA



Merci à la DGAI et au réseau
des préleveurs

WEBINAIRES DEPHY FERME

C'est le moment
d'échanger, à vous
de jouer !

INRAE



Action de la stratégie Ecophyto 2030 pilotée par les ministères chargés de l'Agriculture, de l'Environnement, de la Santé et de la Recherche, avec le soutien financier de l'Office français de la biodiversité et de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse

Financé dans le cadre
de la stratégie **écophyto**



Avec le
soutien
financier
de

