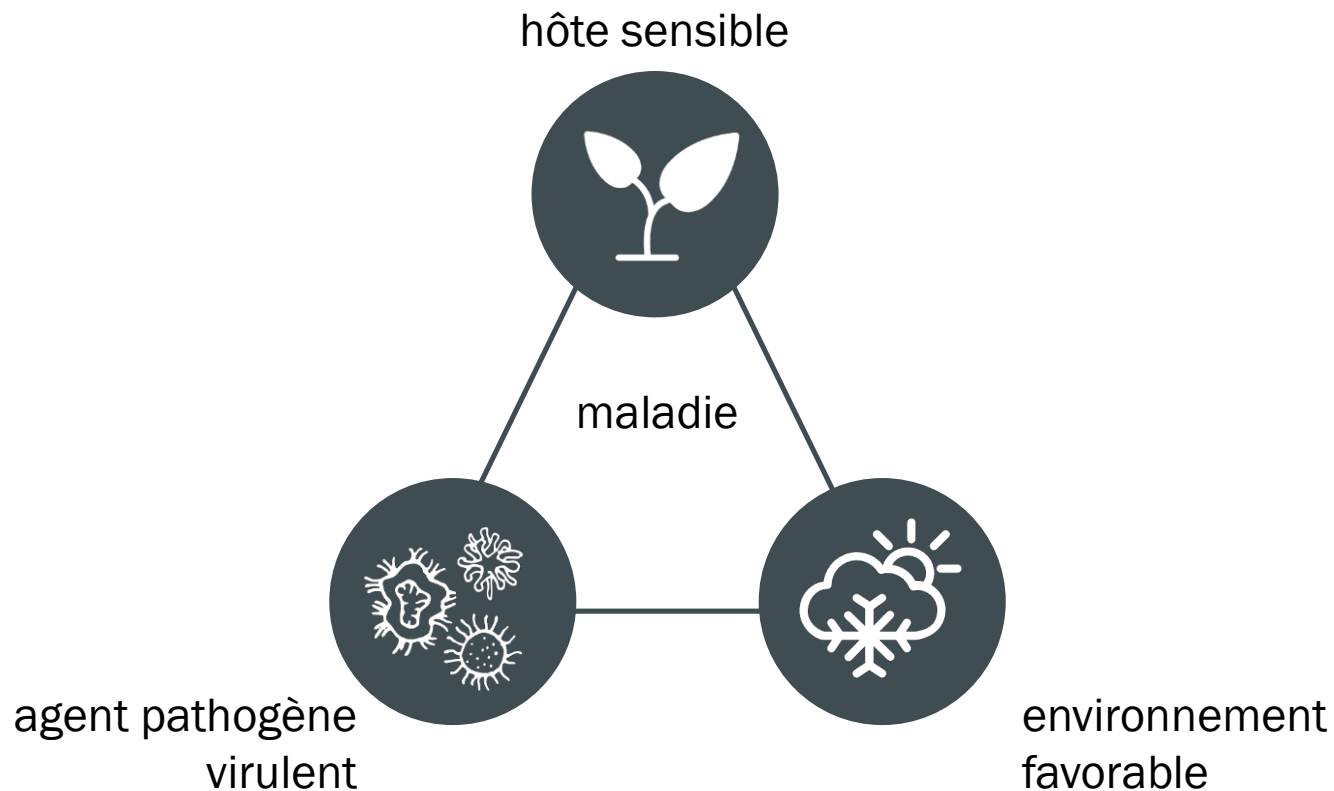


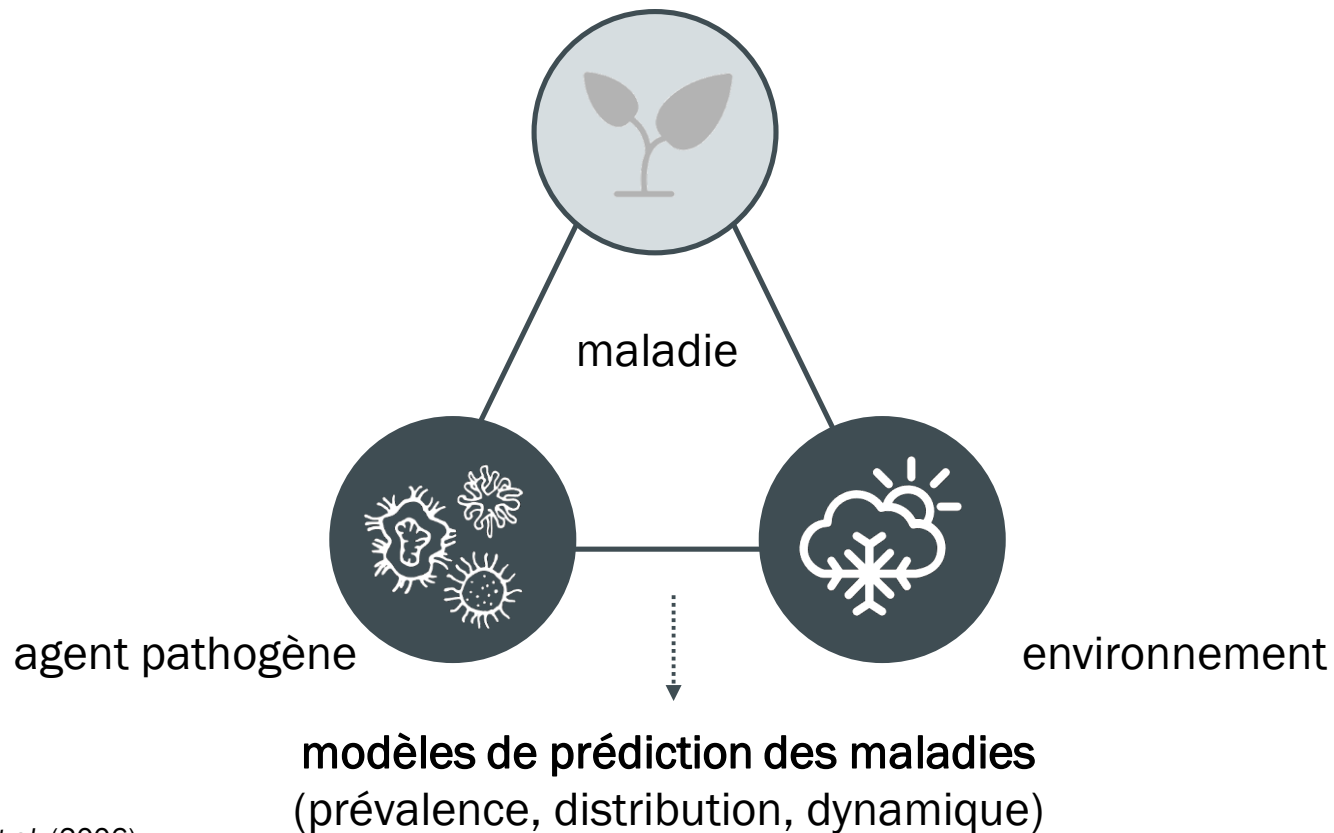
# L'hétérogénéité environnementale, un moteur d'adaptation à la température des populations d'agents pathogènes foliaires ?

Thèse présentée par **Anne-Lise Boixel**  
conduite sous la direction de Michaël Chelle et de Frédéric Suffert  
et soutenue le 19 juin 2020

## Agents pathogènes et climat : quelles interactions ?



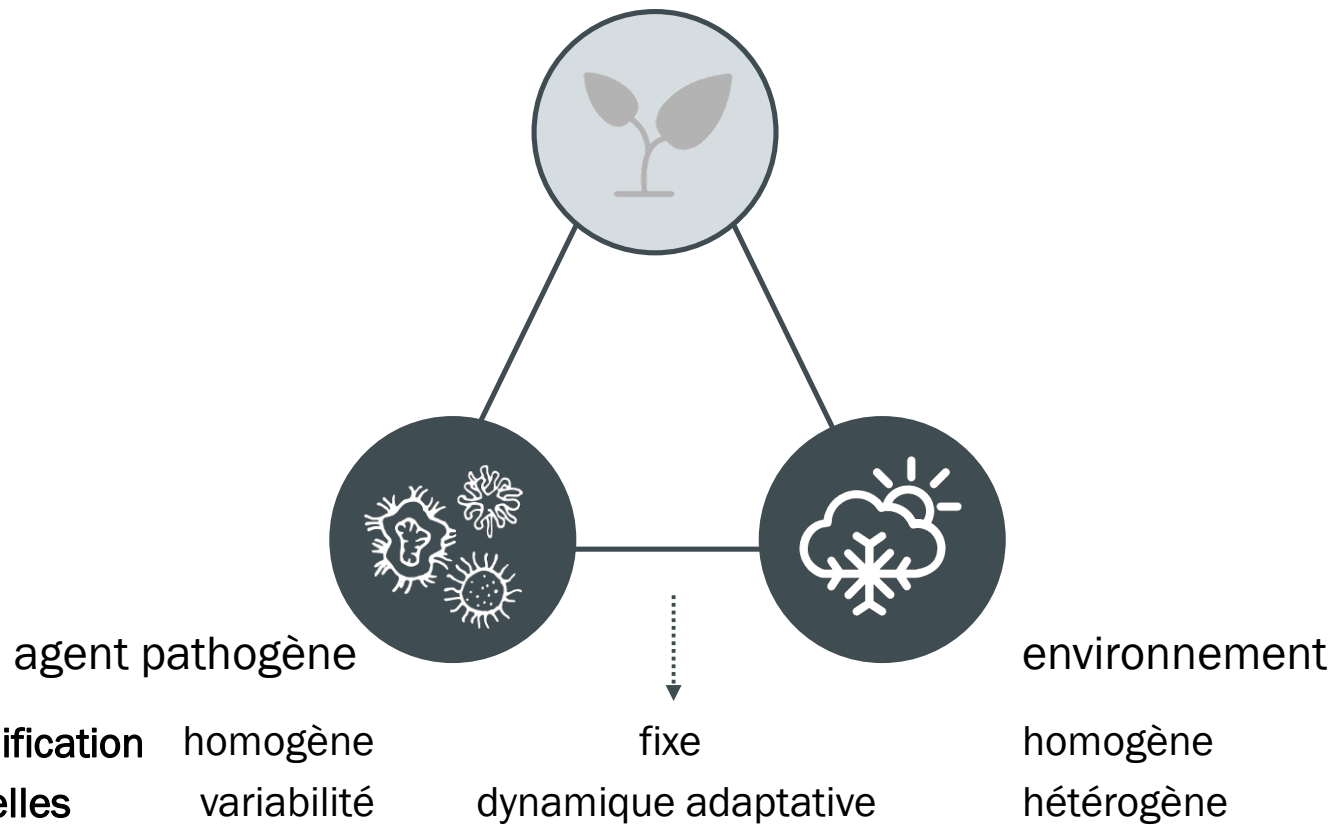
## Agents pathogènes et climat : quelles interactions ?



Garrett *et al.* (2006)  
De Wolf & Isard (2007)  
Shaw (2009)  
Legrève & Duveiller (2010)



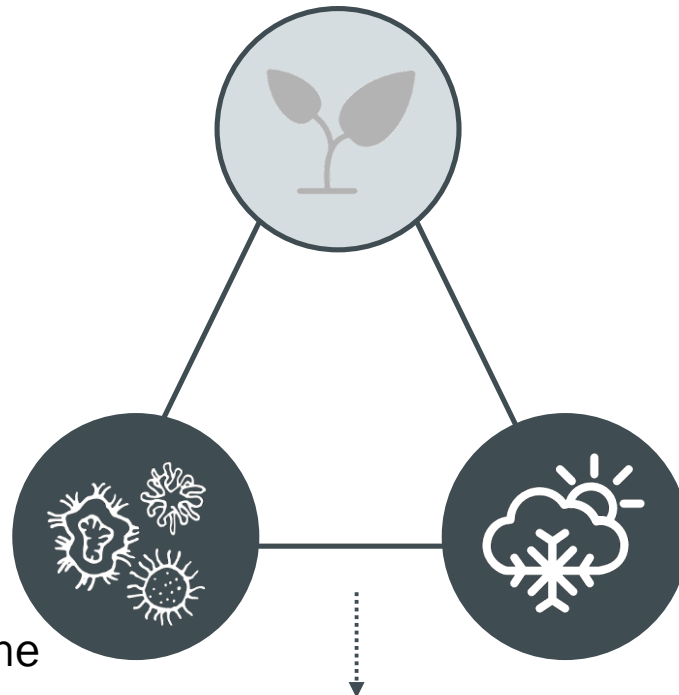
## Agents pathogènes et climat : quelles interactions ?



Evans *et al.* (2008, 2010)  
Butterworth *et al.* (2010)

Gouache *et al.* (2011)  
Madgwick *et al.* (2011)

## Agents pathogènes et climat : quelles interactions ?



agent pathogène

environnement

**biais de simplification**  
**conditions réelles**

homogène  
variabilité

fixe  
dynamique adaptative

homogène  
hétérogène

Quel est  
l'écart réel ?  
Faut-il le  
prendre en  
compte ?



Evans *et al.* (2008, 2010)  
Butterworth *et al.* (2010)

Gouache *et al.* (2011)  
Madgwick *et al.* (2011)

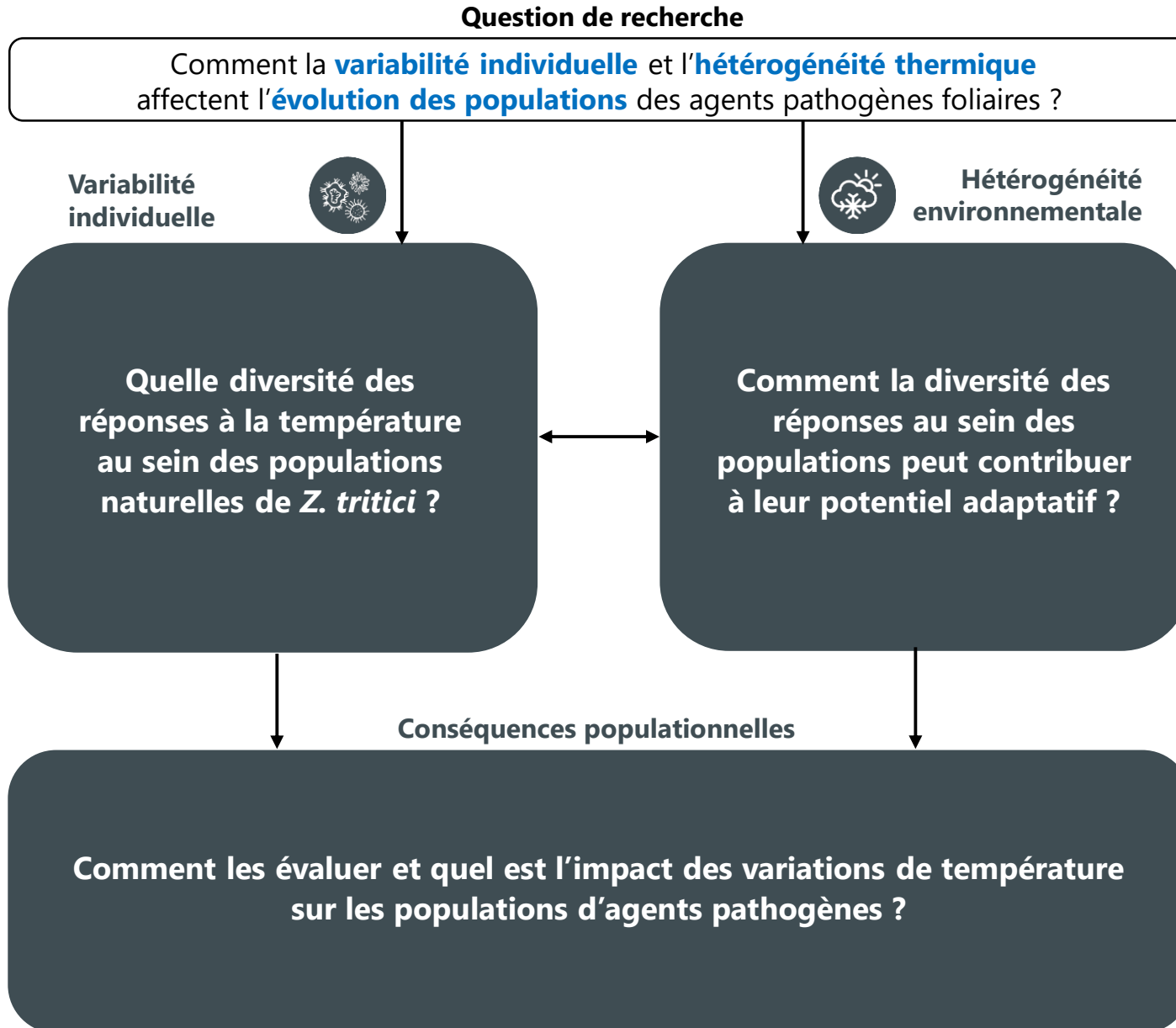
## Etude appliquée au cas d'un agent pathogène foliaire du blé



*Zymoseptoria tritici*,  
agent de la septoriose du blé,  
nuisibilité estimée à 17 q/ha



Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?





## Question de recherche

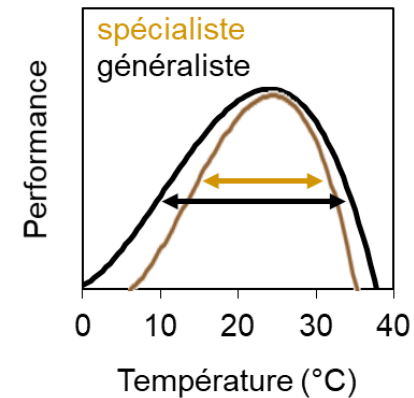
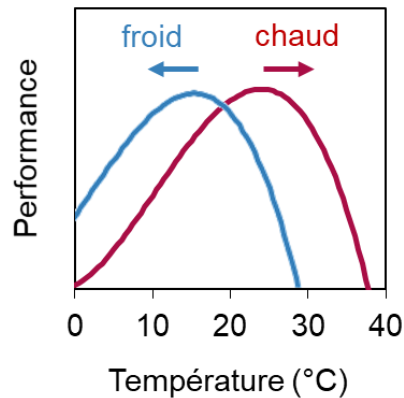
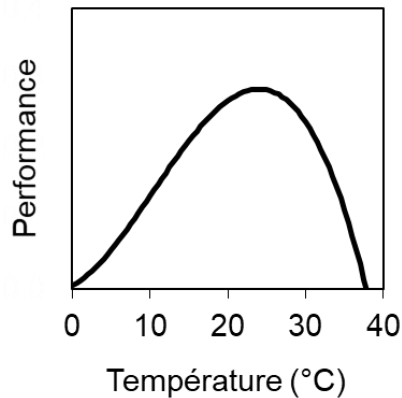
Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?

**Variabilité individuelle**



Développement d'une méthode de phénotypage thermique à haut débit

**Quelle diversité des réponses à la température au sein des populations naturelles de *Z. tritici* ?**



## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?

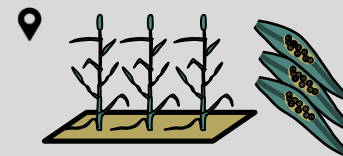
## Variabilité individuelle



Développement d'une méthode de phénotypage thermique à haut débit

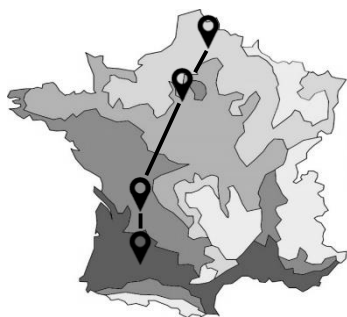
Adaptation des populations de *Z. tritici* aux conditions locales

**Quelle diversité des réponses à la température au sein des populations naturelles de *Z. tritici* ?**

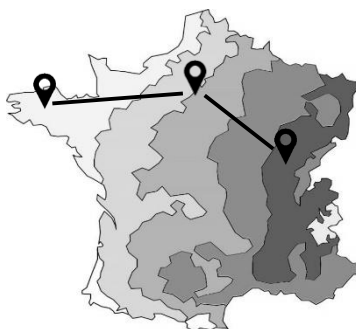


**416 souches  
18 populations  
3 zones climatiques**

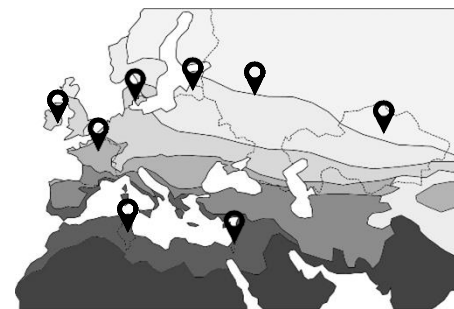
## Transect Nord-Sud



## Transect Est-Ouest



## Zones climatiques contrastées



## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?

## Variabilité individuelle

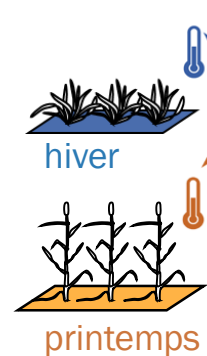
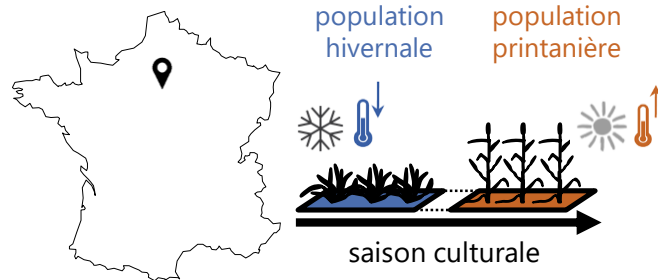


Développement d'une méthode de phénotypage thermique à haut débit

Adaptation des populations de *Z. tritici* aux conditions locales

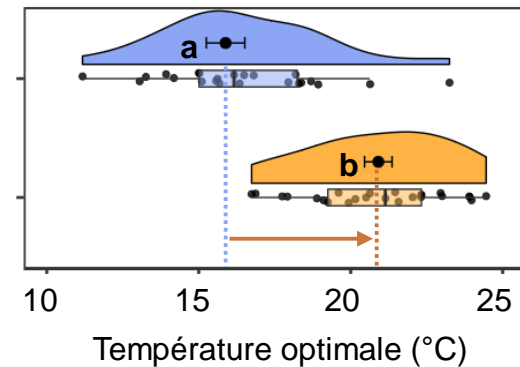
Evolution locale de la population sur une saison culturale

**Quelle diversité des réponses à la température au sein des populations naturelles de *Z. tritici* ?**



1 point = 1 individu

1 population = 30 individus



## Question de recherche

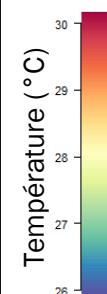
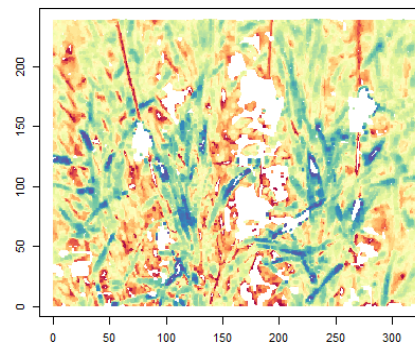
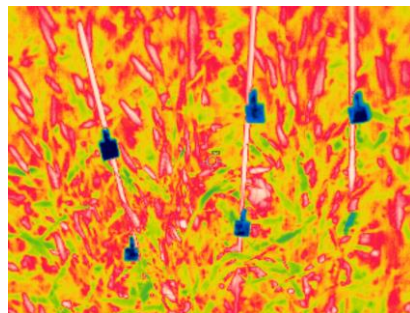
Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?



**Hétérogénéité  
environnementale**

La température des feuilles de blé  
varie à de très petites échelles  
d'espace et de temps

**Comment la diversité de ces  
réponses au sein des  
populations peut contribuer  
à leur potentiel adaptatif ?**



Capture thermique  
d'un couvert de blé  
lors d'un après-midi  
de juin



## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?



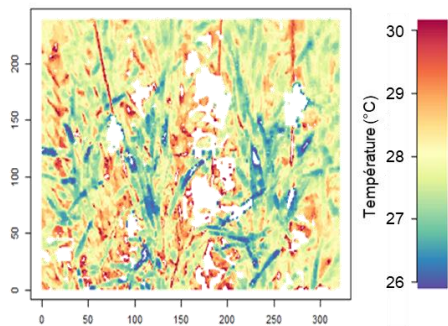
**Hétérogénéité  
environnementale**

La température des feuilles de blé  
varie à de très petites échelles  
d'espace et de temps

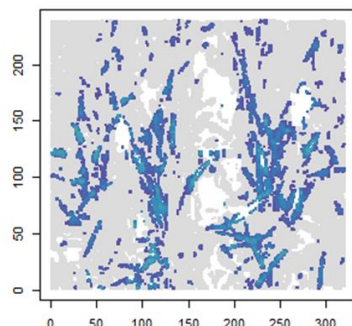
L'hétérogénéité environnementale  
locale induit une variation spatiale  
des pressions de sélection

**Comment la diversité de ces  
réponses au sein des  
populations peut contribuer  
à leur potentiel adaptatif ?**

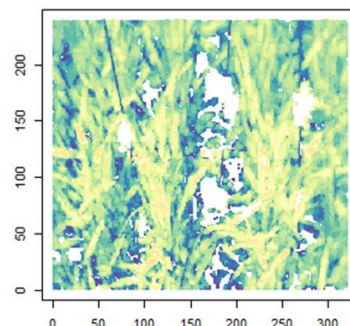
Température du couvert



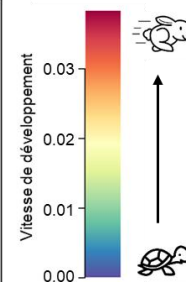
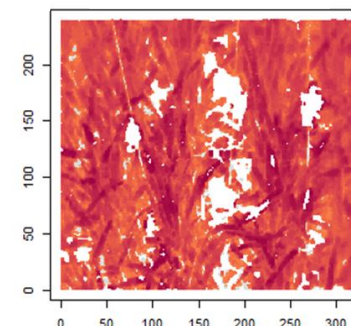
Souche adaptée temp. froides



Souche adaptée temp. tempérées



Souche adaptée temp. chaudes



## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?



Conséquences  
populationnelles



**Comment les évaluer et quel est l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?**

## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?

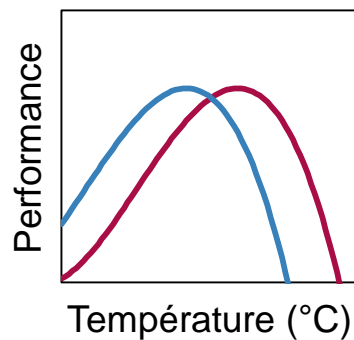
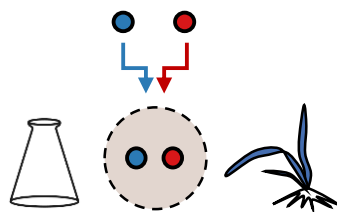


Conséquences  
populationnelles



Comment les évaluer et quel est l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?

souche adaptée au froid    souche adaptée au chaud



## Question de recherche

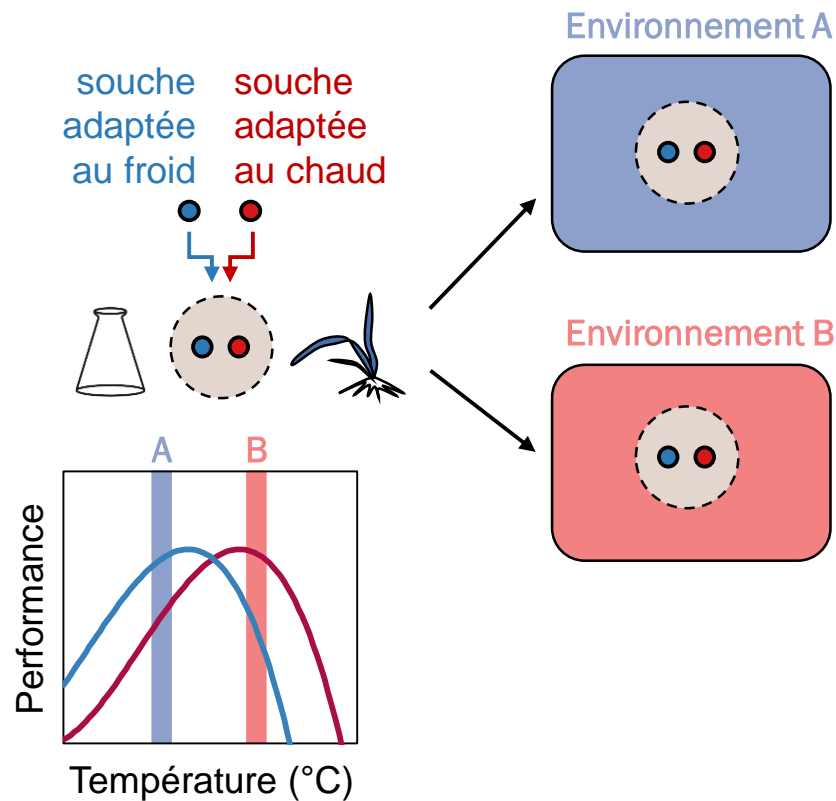
Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?



Conséquences  
populationnelles



Comment les évaluer et quel est l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?





## Question de recherche

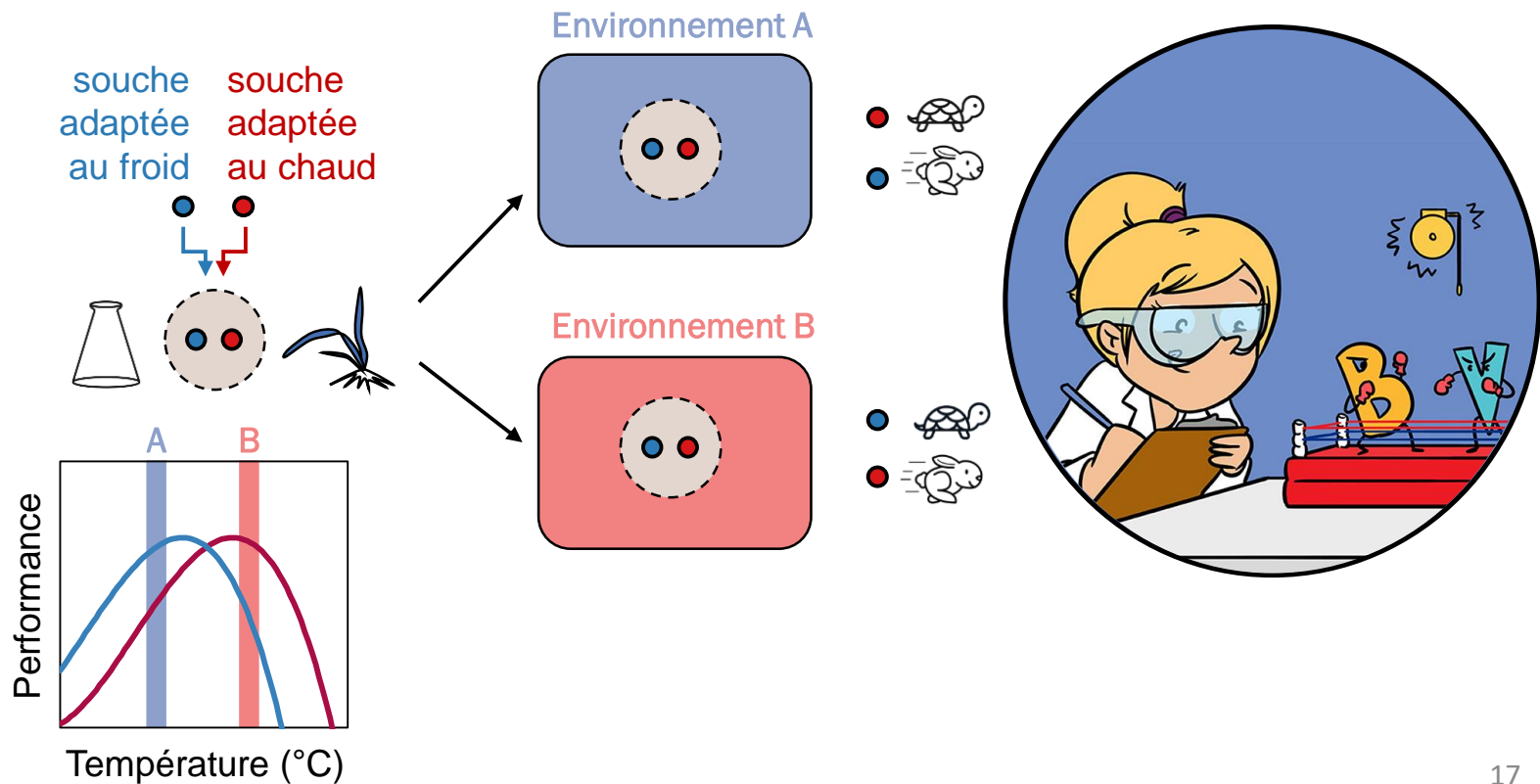
Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?



Conséquences  
populationnelles

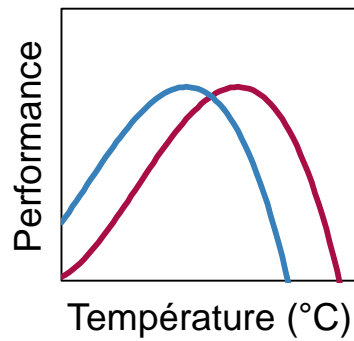
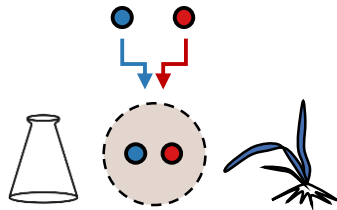


Comment les évaluer et quel est l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?



## Comment évaluer l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?

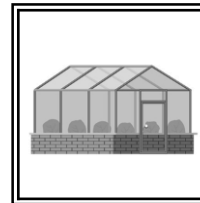
souche(s) adaptée(s) au froid  
souche(s) adaptée(s) au chaud



*in vitro*



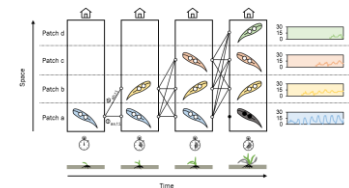
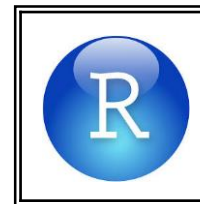
*in planta*

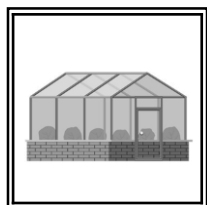


*in natura*



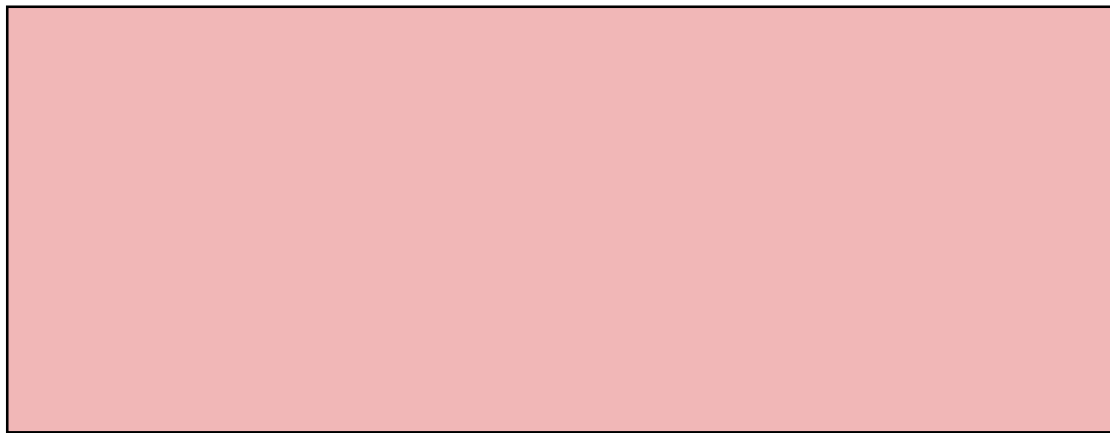
*in silico*





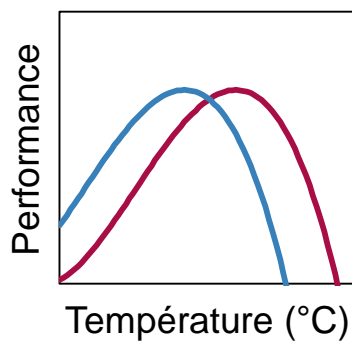
*in planta*

régime chaud :  $21 \pm 1$  °C

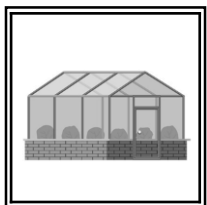


3 souches  
adaptées  
au froid

3 souches  
adaptées  
au chaud



régime froid :  $17 \pm 1$  °C



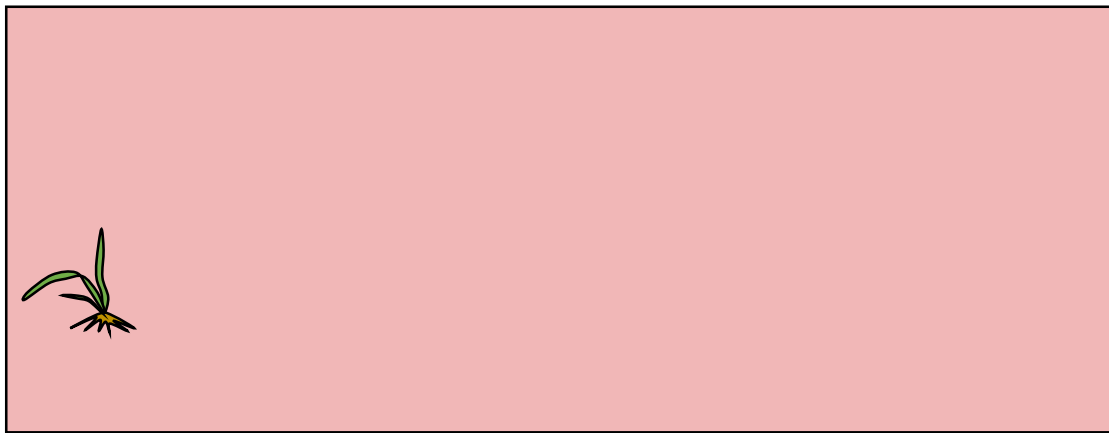
*in planta*

3 souches  
adaptées  
au froid

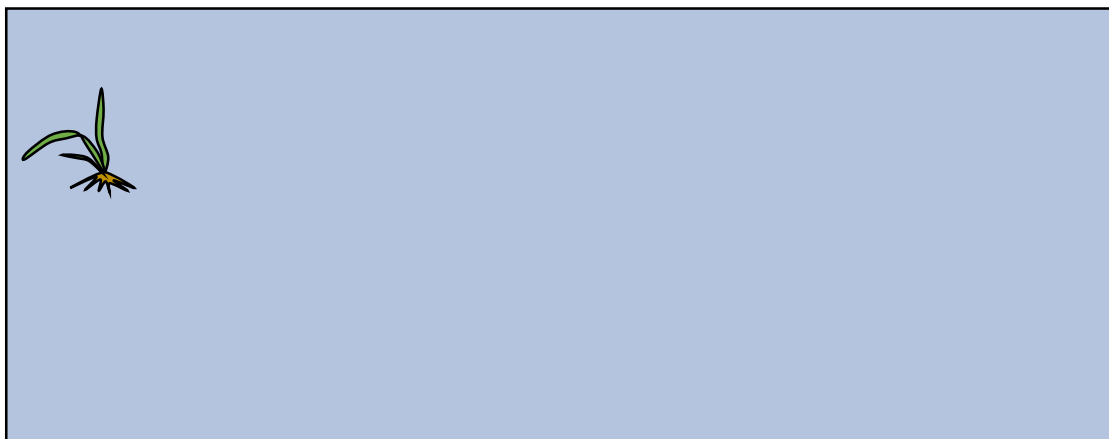
3 souches  
adaptées  
au chaud



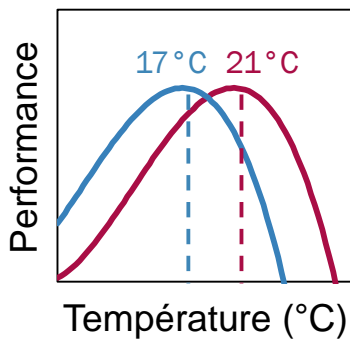
régime chaud :  $21 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$



temps (générations successives de *Z. tritici*)



régime froid :  $17 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$

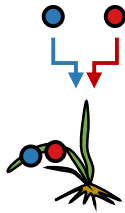




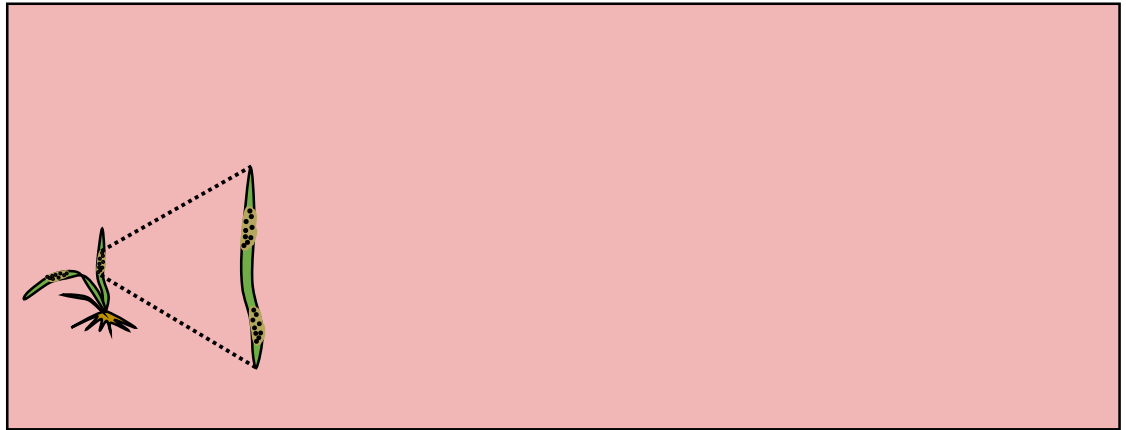
*in planta*

3 souches  
adaptées  
au froid

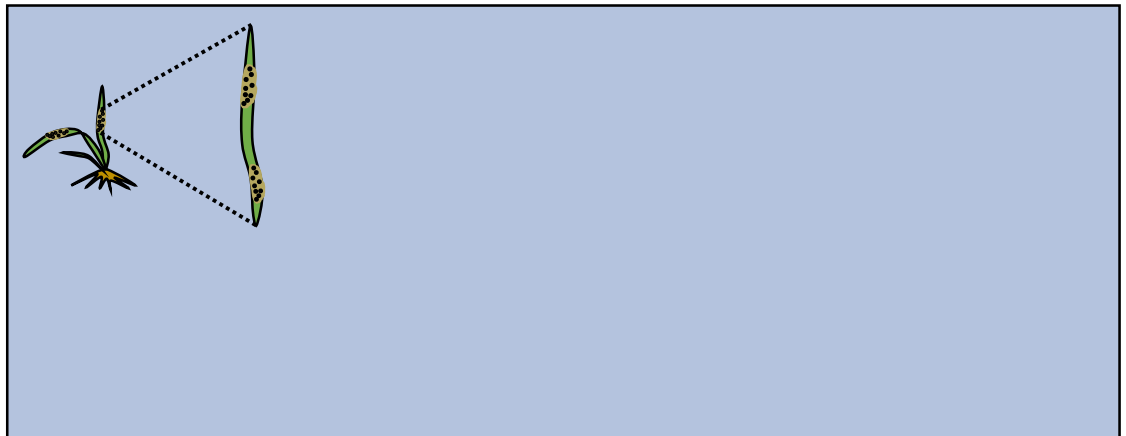
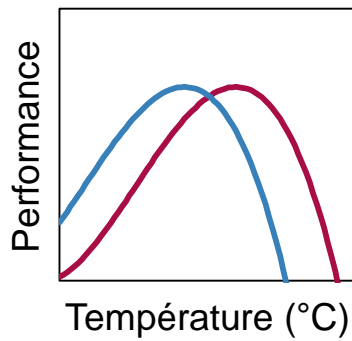
3 souches  
adaptées  
au chaud



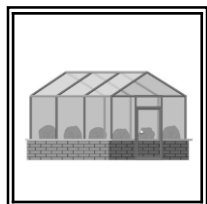
régime chaud :  $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



temps (générations successives de *Z. tritici*)



régime froid :  $17 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$



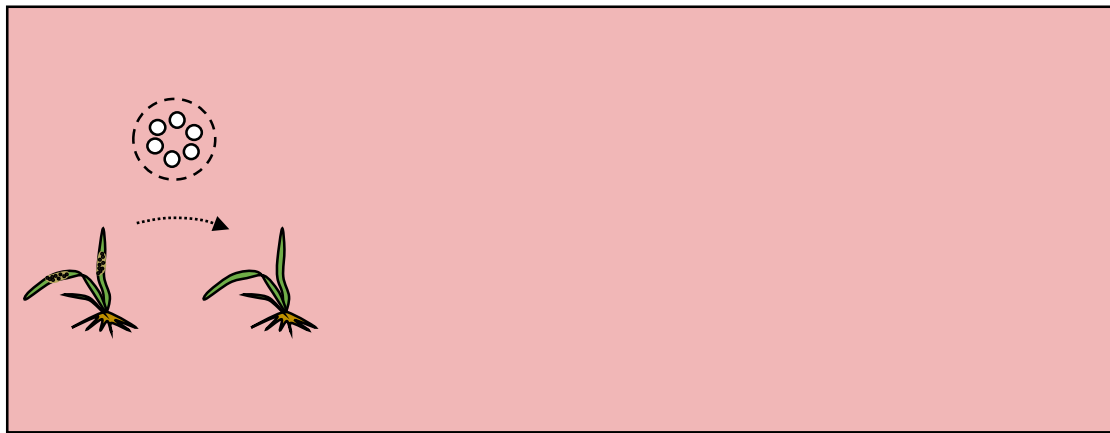
*in planta*

3 souches  
adaptées  
au froid

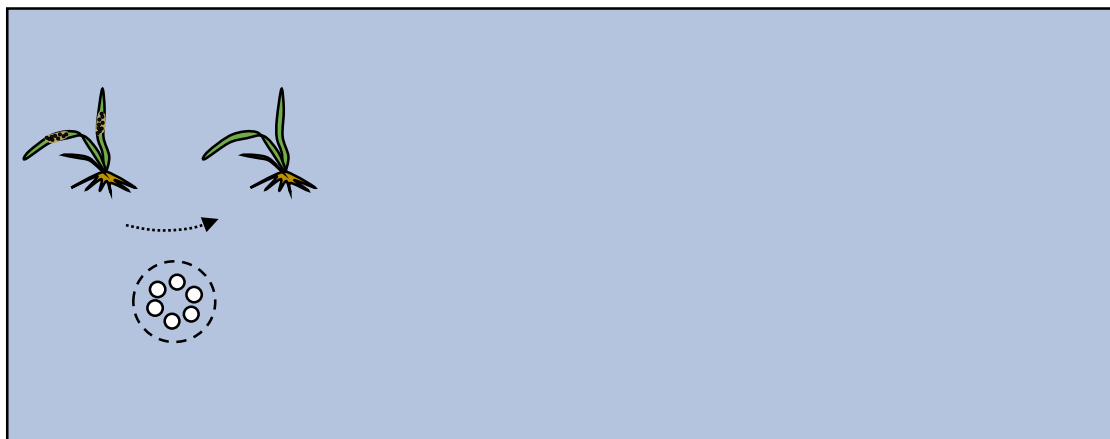
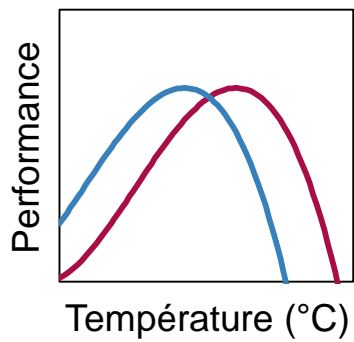
3 souches  
adaptées  
au chaud



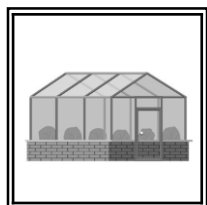
régime chaud :  $21 \pm 1$  °C



temps (générations successives de *Z. tritici*)



régime froid :  $17 \pm 1$  °C



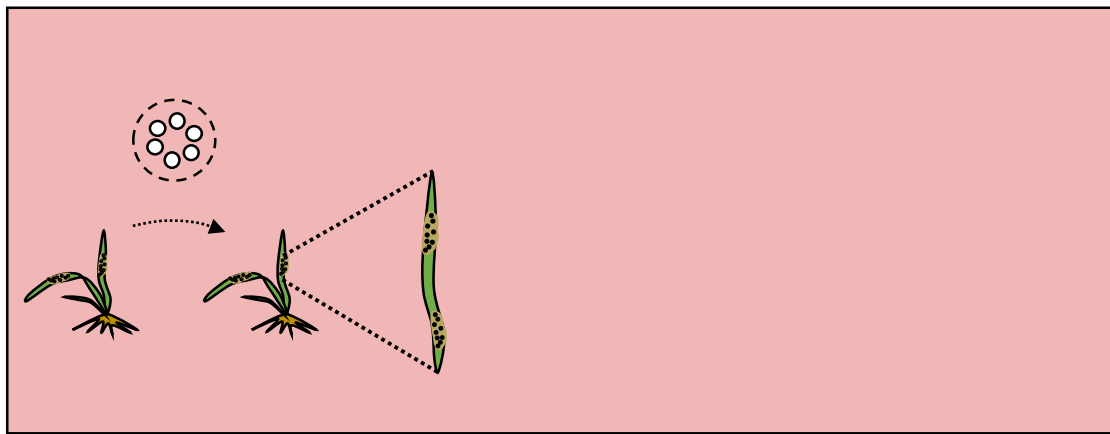
*in planta*

3 souches  
adaptées  
au froid

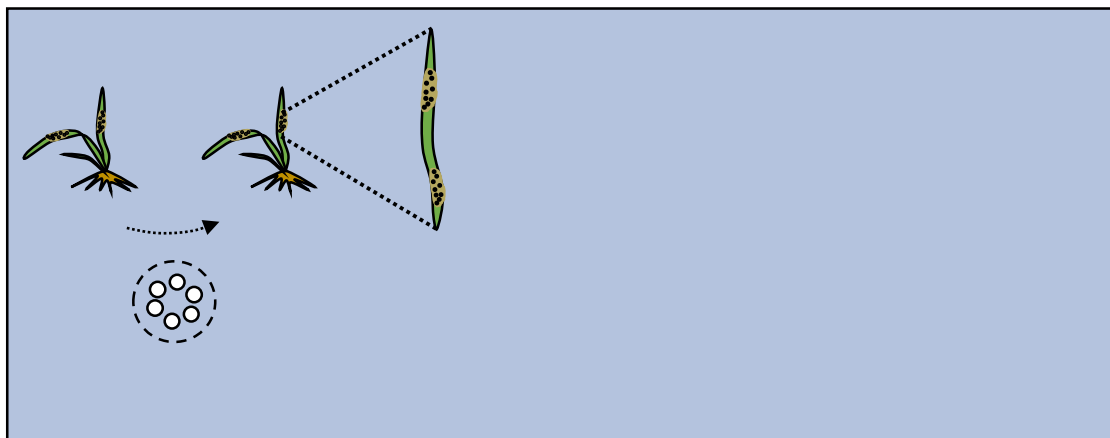
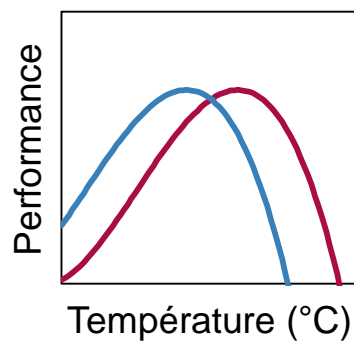
3 souches  
adaptées  
au chaud



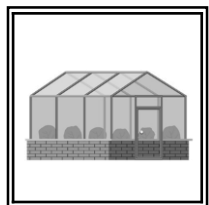
régime chaud :  $21 \pm 1$  °C



temps (générations successives de *Z. tritici*)



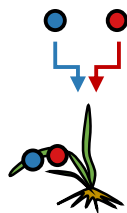
régime froid :  $17 \pm 1$  °C



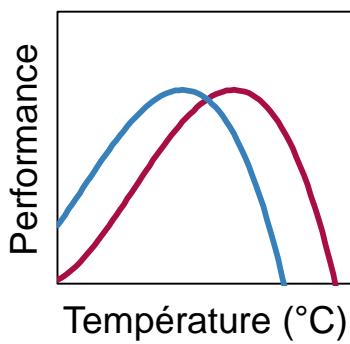
*in planta*

3 souches  
adaptées  
au froid

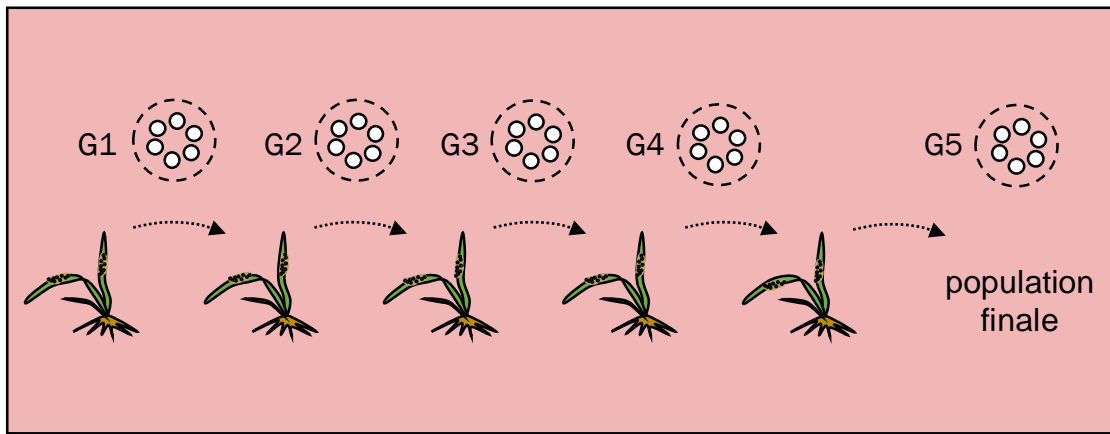
3 souches  
adaptées  
au chaud



G0

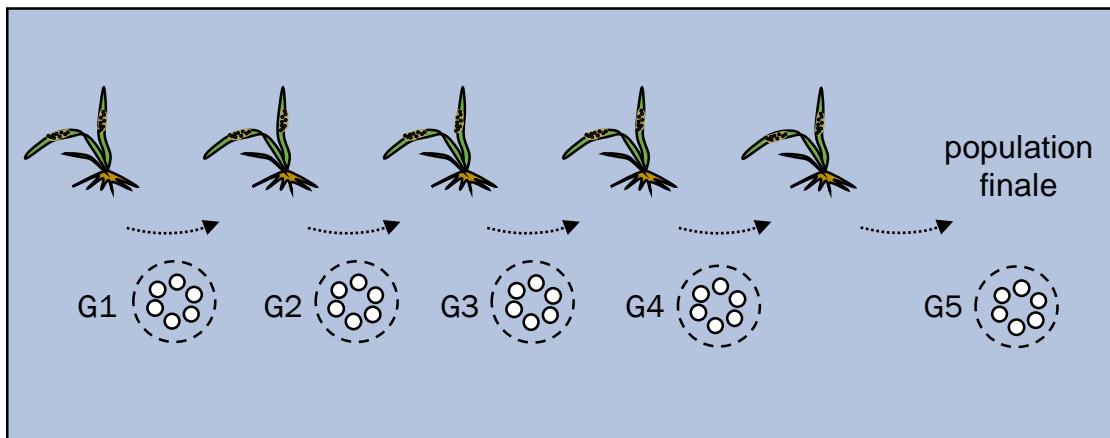


régime chaud :  $21 \pm 1$  °C



× 3

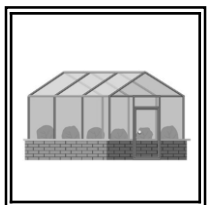
temps (générations successives de *Z. tritici*)



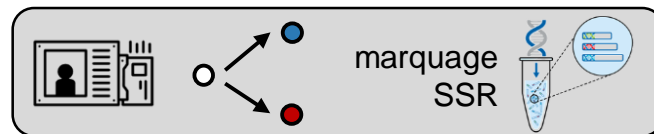
× 3

régime froid :  $17 \pm 1$  °C

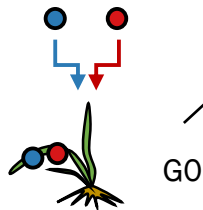




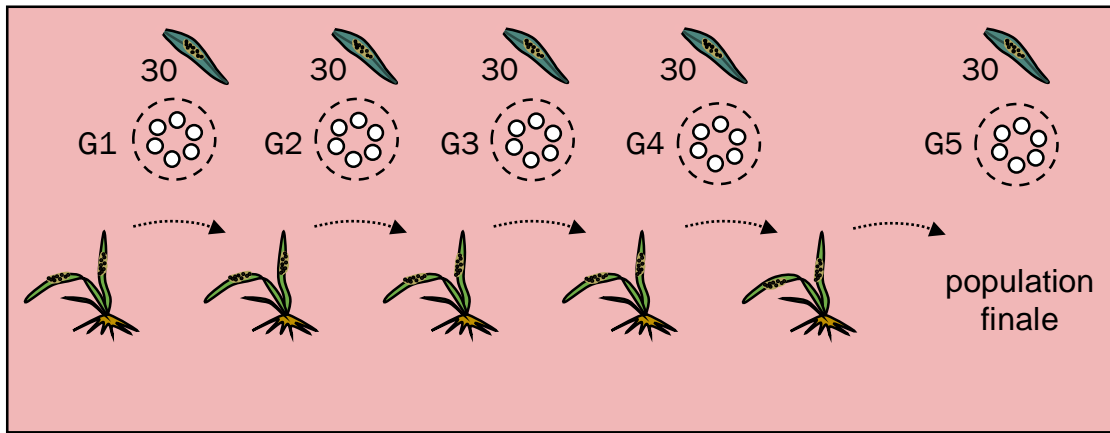
*in planta*



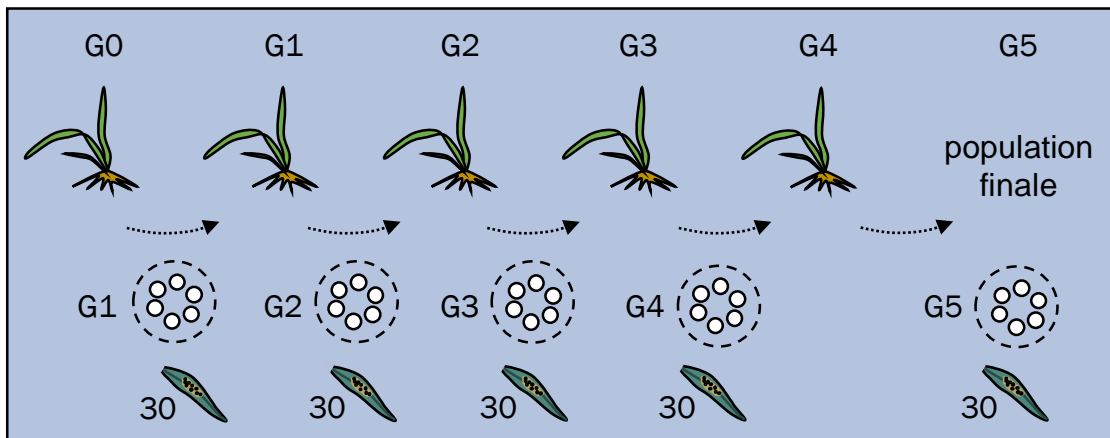
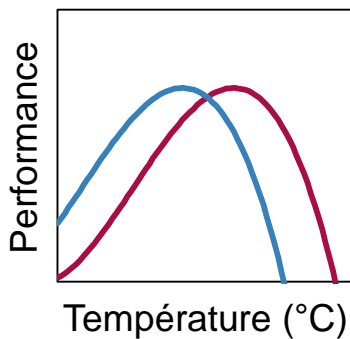
3 souches adaptées au froid  
 3 souches adaptées au chaud



régime chaud :  $21 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$



temps (générations successives de *Z. tritici*)



régime froid :  $17 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$

## Question de recherche

Comment la **variabilité individuelle** et l'**hétérogénéité thermique** affectent l'**évolution des populations** des agents pathogènes foliaires ?

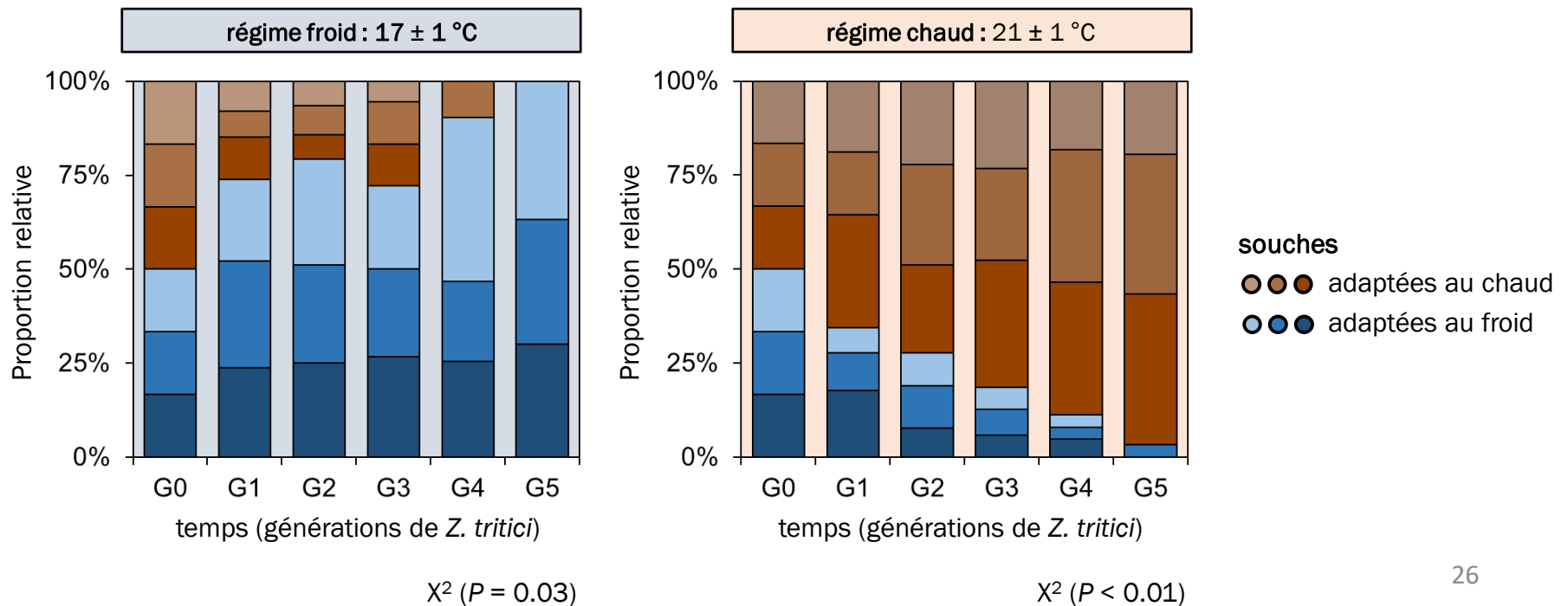


Conséquences  
populationnelles



Comment les évaluer et quel est l'impact des variations de température sur les populations d'agents pathogènes ?

Les régimes thermiques imposent des pressions de sélection sur les populations à l'échelle de quelques générations



**Question de recherche**

Comment la variabilité individuelle et l'hétérogénéité thermique affectent l'évolution des populations des agents pathogènes foliaires ?

**Variabilité individuelle****Chapitre 2**

Développement d'une méthode de phénotypage thermique à haut débit

**Chapitre 3**

La variabilité individuelle au sein d'une population peut excéder la variabilité entre populations

**Hétérogénéité environnementale****Chapitre 5**

La température des feuilles de blé varie à de très petites échelles d'espace et de temps

L'hétérogénéité environnementale locale induit une variation spatiale des pressions de sélection

**Conséquences populationnelles****Chapitre 4**

Les régimes thermiques imposent des pressions de sélection sur les populations à l'échelle de quelques générations

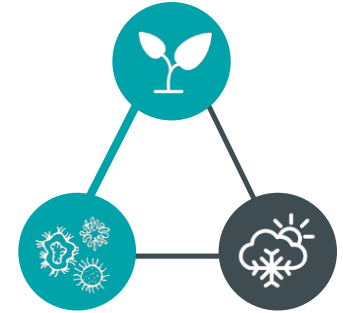
**Chapitre 6**

Développement d'un outil numérique de recherche rendant compte de la réponse des populations aux fluctuations spatio-temporelles des conditions environnementales

Mise en évidence par modélisation de l'importance de prendre en compte l'hétérogénéité individuelle dans la réponse des populations à un environnement hétérogène

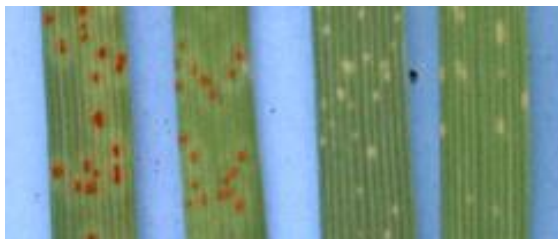


- Recrutée à **INRAE**, au cours de ma thèse, sur un poste d'**Ingénieure de Recherche** en **épidémiologie végétale**
- Poursuite de l'exploration des **interactions plantes-pathogènes**



Comment organiser le **déploiement des variétés cultivées à l'échelle des paysages agricoles** pour améliorer l'efficacité et la durabilité des résistances aux maladies ?

réseau national  
d'épidémiosurveillance des  
interactions blé-rouilles



suivis des dynamiques  
épidémiques à  
l'échelle du paysage



évaluation du risque  
multi-maladies sur  
le blé tendre



# Merci !

## Direction de thèse

Michaël Chelle  
Frédéric Suffert

## Comité de thèse

Marie-Laure Desprez-Loustau  
Sylvain Pincebourde  
Virginie Ravigné  
Ivan Sache

## Jury de thèse

Florence Débarre  
Pascal Frey  
Anne Legrève  
Michael Shaw  
Jacqui Shykoff

## Ecole doctorale ABIES

Christine Duvaux-Ponter  
Corinne Fiers  
Alexandre Péry

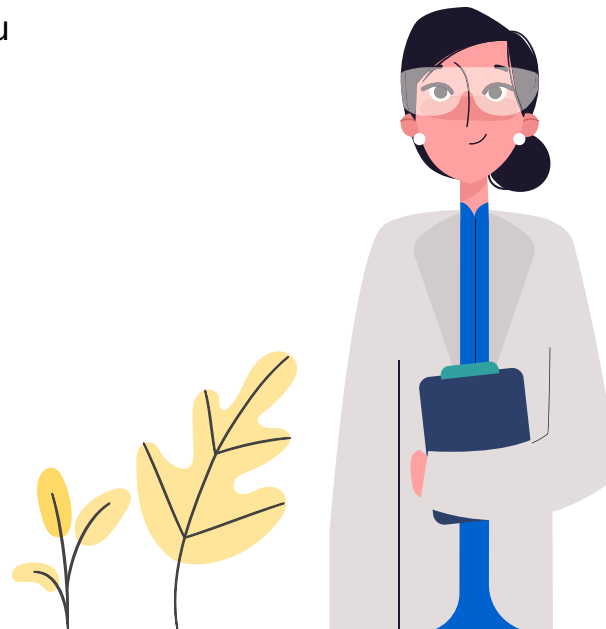
## Parcours EIR-A (Agreenium)

Erik Svensson et l'ensemble  
du labo d'Ecologie Evolutive  
de l'université de Lund



Travaux analysés par **Odile Carisse**  
membre correspondant associé (Canada)

## Organismes financeurs



## UMR Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech

BIOGER (Biologie et gestion des risques en agriculture)  
ECOSYS (Ecologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes)



## Lund University (Suède)

Evolutionary Ecology Unit  
Svensson lab (Evolution and ecology of phenotypes in nature)