



■ **PROGRÈS GÉNÉTIQUE**  
Les efforts de la recherche portent leurs fruits.

■ **LUPIN**  
Limiter les risques de maladies par les pratiques culturales.

■ **FÉVEROLE**  
Ne pas confondre botrytis et ascochytose.

## MALADIES DES PROTÉGÉINEUX

### APHANOMYCES DU POIS

# DES AVANCÉES

## en génétique de la résistance

**La résistance variétale constitue une piste privilégiée pour améliorer la gestion du risque aphanomyces sur pois protéagineux, actuellement principalement basée sur des méthodes culturales préventives.**

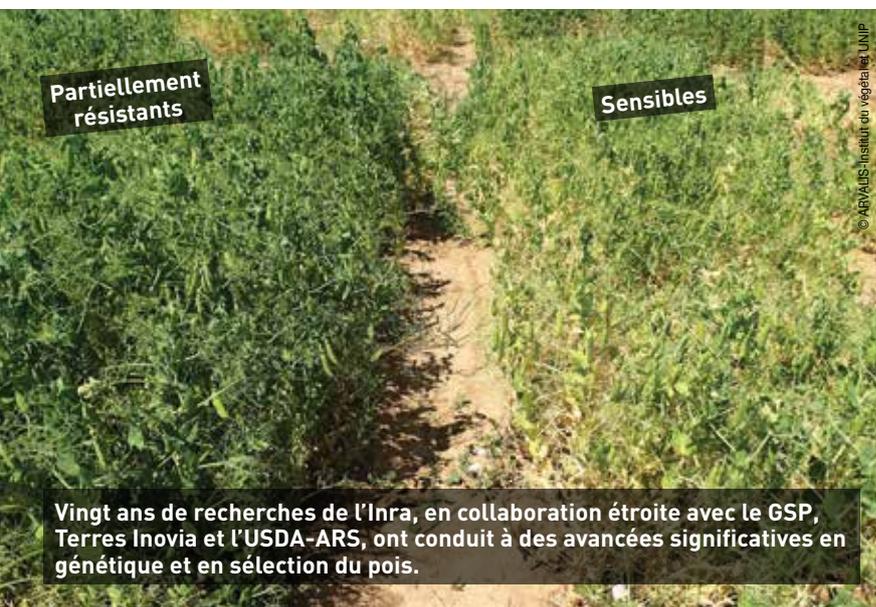
L'aphanomyces est la maladie d'origine tellurique la plus dommageable pour les cultures de pois protéagineux. Apparue dans les années quatre-vingt-dix, cette maladie particulièrement préoccupante a fortement contribué à la baisse des surfaces en pois dans de nombreux bassins. La maladie, due à un oomycète, *Aphanomyces euteiches*, est particulièrement nuisible pour les cultures de pois de printemps. Les pois d'hiver peuvent être touchés, mais la nuisibilité est beaucoup plus faible car les plantes sont proches de la floraison (stade peu sensible) lorsque la maladie se déclare au printemps. L'agent pathogène, qui se conserve dans le sol pendant de nombreuses années, est aujourd'hui présent dans toutes les zones de production du

pois, excepté dans les sols très calcaires, peu réceptifs à la maladie. Lorsque les conditions sont favorables, au printemps, l'oomycète envahit le système racinaire des pois et s'y multiplie, occasionnant une pourriture brun-miel. L'atteinte du système racinaire perturbe l'alimentation et donc la croissance et le développement des plantes qui, si l'attaque est importante, jaunissent et se nanifient. Des foyers de maladie apparaissent alors dans les parcelles.

### Des sources de résistance partielles peu nombreuses

Suite au développement de l'aphanomyces en France, un projet collaboratif a été mis en place entre l'Inra, le Groupement des sélectionneurs de Protégéineux (GSP), Terres Inovia et le département américain de la recherche en agriculture - l'USDA-ARS<sup>(1)</sup>, les États-Unis étant confrontés à ce même problème depuis de nombreuses années. Un vaste programme de recherche de sources de résistance à *A. euteiches* a été mené dans les années 2000. Le niveau de résistance d'environ 1900 accessions du genre *Pisum* (incluant des espèces proches du pois et des variétés de pois non cultivées, conservées dans des banques végétales) a été évalué en conditions contrôlées en réponse à l'infection par une souche française de référence d'*A. euteiches*. Les accessions les plus résistantes en conditions contrôlées ont ensuite été évaluées au champ pendant plusieurs années sur un réseau franco-américain de parcelles contaminées. Ce programme de criblage a conduit à sélectionner vingt accessions partiellement résistantes.

Trois autres collections de pois française, anglaise



Vingt ans de recherches de l'Inra, en collaboration étroite avec le GSP, Terres Inovia et l'USDA-ARS, ont conduit à des avancées significatives en génétique et en sélection du pois.

# PERSPECTIVES AGRICOLES

La seule revue  
indépendante rédigée  
par les experts d'ARVALIS  
et de TERRES INOVIA



Abonnez-vous  
à la meilleure  
revue « Grandes  
Cultures » pour  
seulement  
81 €<sup>TTC</sup>/an



**Oui, je m'abonne à Perspectives Agricoles**

**Formule Premium (magazine + accès internet)\***

1 an 11 numéros France et UE : 81 € TTC Autres pays : 118 € TTC

2 ans 22 numéros France et UE : 146 € TTC Autres pays : 212 € TTC

**Formule Connect (accès internet seul)<sup>1</sup>**

1 an 74 € TTC

2 ans 134 €

**Je choisis de régler**

par chèque à l'ordre de Perspectives Agricoles

à réception de la facture.

Date :

Signature :

**Vos coordonnées** Ecrire en majuscule

Nom .....

Prénom .....

Société.....

Adresse.....

Code postal

Ville.....

Pays.....

Téléphone.....

E-mail\*.....

\*Obligatoire pour accès internet

**À retourner**

Sans affranchir, accompagné de votre règlement à :

**Perspectives Agricoles**

Libre réponse 14403 - 61109 Flers Cedex

Tel : 02 31 59 25 00 Fax : 02 31 69 44 35

\* Le numéro du mois en avant-première et accès illimité aux archives sur perspectives-agricoles.com. Conformément aux dispositions de la loi informatique et libertés, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification sur les informations vous concernant.

Rendez-vous sur  
**perspectives-agricoles.com**

## RÉSISTANCE PARTIELLE DU POIS : la région génomique *Ae-Ps7.6* a l'effet le plus élevé sur la résistance

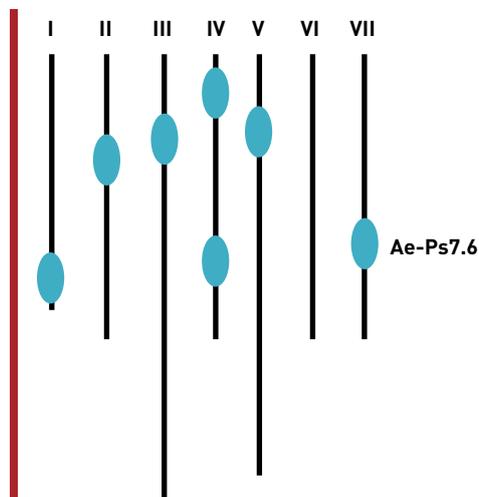


Figure 1 : Positions schématiques des sept principales régions génomiques (en bleu) associées à la résistance partielle à *Aphanomyces euteiches* sur les sept chromosomes du génome du pois (noté de I à VII).

# 10 à 15 q/ha

c'est le gain de rendement obtenu, en cas de forte attaque aphanomyces, par les meilleures lignées de pois partiellement résistantes par rapport à des lignées sensibles.

et américaine, représentant au total 800 accèsions, ont par la suite été évaluées mais ce nouveau criblage n'a pas abouti à l'identification de meilleures sources de résistance. Cela a confirmé qu'il existait très peu d'accèsions partiellement résistantes dans la variabilité naturelle du genre *Pisum*. La recherche de sources de résistance n'a pas été effectuée au sein de genres voisins à *Pisum*, tel que *Lathyrus* (gesses), du fait de leur incompatibilité de croisement avec le pois.

### Des régions du génome associées à la résistance partielle ont été identifiées

Parallèlement, un programme de cartographie génétique de régions du génome associées à la résistance à *A. euteiches* dans quatre des meilleures sources de résistance identifiées a été conduit en étroite collaboration avec l'USDA. Parmi la vingtaine de régions du génome associées à la résistance partielle, sept régions génomiques principales ont été détectées dans deux à quatre des sources de résistance étudiées (figure 1). L'une de ces régions, *Ae-Ps7.6*, a été associée à une résistance partielle plus élevée vis-à-vis des souches françaises d'*A. euteiches*. Les gènes présents dans cette région contrôlant la résistance sont en cours d'identification, afin d'en comprendre le mode d'action.

Dans les années 2010, un programme d'analyse d'association, visant à faire le lien entre les variations au niveau du génome et les variations de réponse du pois à l'infection par *A. euteiches*, a été développé à l'Inra dans une collection incluant spécialement des

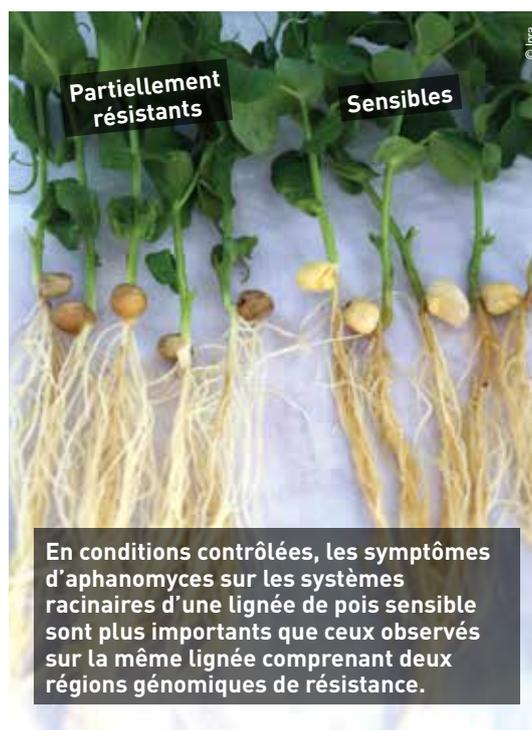
lignées de sélection de pois présentant des niveaux élevés de résistance, obtenues par le GSP suite à des inter-croisements entre les meilleures sources de résistance américaines identifiées. Cette analyse d'association a confirmé et précisé les principales régions génomiques de résistance préalablement identifiées.

Elle a également permis d'analyser le contenu en régions génomiques favorables dans les lignées résistantes et sensibles de la collection. Une accumulation de régions génomiques de résistance a ainsi été observée dans les lignées du GSP les plus résistantes. Il a donc été suggéré de cumuler ces régions dans du matériel agronomique pour créer des variétés présentant un niveau de résistance accru et potentiellement plus durable.

Ce programme, couplé au fort développement récent de ressources génomiques chez le pois, a identifié des marqueurs moléculaires étroitement liés aux sept régions génomiques de résistance. Ces marqueurs sont en cours d'utilisation dans les programmes de sélection assistée par marqueurs.

### De nouvelles lignées agronomiques de pois partiellement résistantes

Grâce aux nouvelles connaissances ainsi acquises en génétique de la résistance, un programme de rétrocroisements assisté par marqueurs a débuté à l'Inra dès 2008, afin de tester l'efficacité de différentes combinaisons de régions génomiques de résistance dans des variétés de pois de printemps et de pois d'hiver. Des géniteurs porteurs d'une ou plusieurs régions de résistance ont ainsi été croisés successivement avec les variétés de pois sensibles.



# LA SÉLECTION ASSISTÉE par marqueurs (SAM) chez le pois



Les fleurs d'une lignée receveuse sont fécondées par le pollen d'une lignée donneuse portant les régions génomiques de résistance partielle à *Aphanomyces*.

Une lignée receveuse, porteuse de caractères agronomiques d'intérêt mais sensible à l'aphanomyces, est croisée avec une lignée donneuse, porteuse de régions génomiques conférant une résistance partielle à l'aphanomyces mais sans intérêt agronomique. La présence des régions de résistance est repérée par les marqueurs moléculaires précédemment mis au point. Parmi les descendants de première génération issus de ce croisement, un tri à l'aide des marqueurs moléculaires sélectionne des plantes BC1 porteuses de tout ou partie des régions associées à la résistance partielle, mais non porteuses d'une grande partie des régions génomiques de la lignée receveuse agronomique. Un croisement entre les plantes BC1 sélectionnées et

de nouveau la lignée receveuse, suivi d'un tri, sélectionne, parmi les descendants de deuxième génération, les plantes BC2 qui conservent les régions associées à la résistance mais qui ont « récupéré » un peu plus de génome de la lignée receveuse.

Le processus de croisement entre descendants sélectionnés et la lignée receveuse d'origine (figure 2) est reproduit jusqu'à la  $n$ -ième génération (3 à 4, classiquement), où sont sélectionnées les plantes BC $n$ . Ces plantes sont alors autofécondées pour sélectionner des lignées dont l'ensemble du génome est fixé. Les lignées ainsi produites, dites « d'introgession », portent les régions génomiques de résistance et ont « récupéré » la totalité du génome de la lignée receveuse qui porte les caractères d'intérêt agronomique souhaités.

Dans le cas particulier du programme de SAM mené chez le pois pour la résistance à l'aphanomyces, cinq lignées donneuses de régions génomiques de résistance partielle ont été rétrocroisées avec trois lignées de pois receveuses d'intérêt agronomique. Un total de 116 lignées BC $n$  d'intérêt agronomique et porteuses de régions génomiques de résistance ont ainsi été créées à l'issue du programme. Ces lignées ont ensuite été évaluées pour la résistance à l'aphanomyces dans diverses conditions et pour leur potentiel de rendement. Les lignées les plus performantes et partiellement résistantes ont été multipliées et transférées aux sélectionneurs comme source de géniteurs dans leurs programmes de sélection.

## SAM : les lignées ayant introgressé les régions génomiques de résistance sont repérées grâce aux marqueurs moléculaires

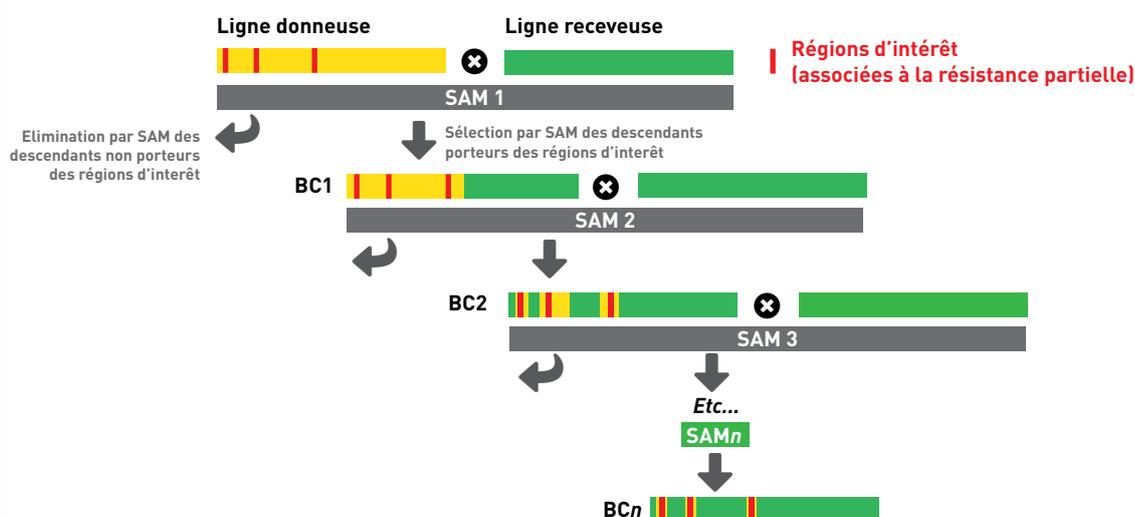


Figure 2 : Schéma des rétrocroisements successifs assistés par marqueurs moléculaires, effectués pour introgresser plusieurs régions génomiques de résistance à *A. euteiches* dans des variétés sensibles. BC#: plante de #-ième génération ayant introgressé les régions génomiques de résistance mais ne conservant qu'une partie des caractères agronomiques portés par la lignée receveuse.



Au champ (en pépinière fortement infestée), le jaunissement des parties aériennes des pois est nettement plus marqué sur une lignée de pois sensible que sur une lignée partiellement résistante.

À chaque génération, les descendants porteurs des régions génomiques de résistance ont été sélectionnés grâce aux marqueurs moléculaires précédemment identifiés (*encadré*). Une centaine de lignées agronomiques dites « d'introgression », porteuses de différentes combinaisons d'une, deux ou trois des sept principales régions génomiques de résistance, ont ainsi été créées.

La résistance de ces lignées d'introgression a été évaluée à la fois en conditions contrôlées (chambre climatique, serre) et au champ, en pépinières contaminées sur plusieurs sites et années, par l'Inra, Terres Inovia et le GSP (*encadré*). Les évaluations de ces lignées ont démontré l'efficacité de plusieurs régions génomiques, spécialement *Ae-Ps7.6* (individuellement ou en combinaison), pour retarder l'apparition des symptômes et réduire la colonisation du système racinaire par l'agent pathogène sur jeunes plantes, ainsi que pour réduire la sévérité de la maladie au champ.

En serre, les résultats ont mis en évidence l'effet individuel de chaque région pour réduire les effets de la maladie sur la croissance et le développement de la plante et sur l'élaboration du rendement. Des combinaisons de régions génomiques efficaces pour limiter la nuisibilité la maladie ont ainsi été identifiées.

## Des outils prêts pour la création de variétés partiellement résistantes

L'ensemble des résultats ainsi obtenus depuis vingt ans en France sur la génétique de la résistance à *A. euteiches* chez le pois ont été transférés aux sélectionneurs du GSP en temps réel. Les outils et ressources développés sont en cours d'utilisation dans les programmes de sélection privée pour la création de variétés résistantes.

Dans les meilleures lignées d'introgression, un gain de 10 à 20 quintaux par hectare a été mis en évidence en situation fortement contaminées au champ par rapport à des variétés sensibles, ce qui reflète un progrès génétique significatif. Les méthodologies d'évaluation disponibles, au champ et en conditions contrôlées, sont complémentaires et peuvent désormais être utilisées en sélection et dans les processus d'inscription et d'évaluation post-inscription.

Si les niveaux de résistance ou de tolérance actuels sont encore insuffisants en situation fortement contaminée, ils peuvent néanmoins présenter un intérêt en parcelles faiblement contaminées. L'insertion de la composante génétique dans la gestion du risque est actuellement en cours d'étude chez Terres Inovia. Par ailleurs, les recherches se poursuivent à l'Inra pour étudier la durabilité de la résistance partielle à l'aphanomyces. La diversité et l'évolution des populations d'*A. euteiches* sont en cours d'étude en conditions contrôlées et dans un essai pluriannuel au champ sur des successions de lignées de pois partiellement résistantes. Ces recherches permettront d'anticiper le développement de stratégies de gestion durable des futures variétés partiellement résistantes.

(1) USDA-ARS (Agricultural Research Service), principale agence de recherche du ministère de l'Agriculture américain (USDA).

Marie-Laure Pilet-Nayel - marie-laure.pilet-nayel@inra.fr

INRA

Christophe Le May - Christophe.Lemay@agrocampus-Ouest.fr

AGROCAMPUS OUEST

Anne Moussart - a.moussart@terresinovia.fr

TERRES INOVIA

### ÉVALUER LES NIVEAUX DE RÉSISTANCE DANS LES FUTURES VARIÉTÉS

Le comportement vis-à-vis de la maladie (symptômes visuels et gains de rendement) des lignées en fin de sélection, en parcelles fortement contaminées, est évalué depuis quelques années au champ sur plusieurs sites, selon un dispositif spécifique mis au point par Terres Inovia et le GSP. Une nouvelle méthodologie évaluant l'efficacité des résistances pour limiter la nuisibilité de la maladie a, par ailleurs, été récemment mise au

point en serre par Terres Inovia. Le dispositif permet de simuler une attaque d'aphanomyces et de mesurer l'effet de la maladie sur la croissance et le développement végétatif et reproducteur des plantes. Les lignées de pois sont évaluées par comparaison à des témoins sensibles et résistants. Les résultats obtenus grâce à cette méthodologie sont bien corrélés à ceux obtenus au champ en situation fortement contaminée.

