

Ecole doctorale Environnements-Santé
Dossier de projet de thèse « Contrat doctoral Etablissements »
ANNEE 2024

TITRE DU PROJET : Comment adapter la culture de pois au changement climatique : approche par simulation de combinaisons "génotype x environnement x pratiques culturales" dans des climats français contrastés.

1) Renseignements administratifs sur la direction de thèse (1 page maximum) :

Directrice de thèse HDR :
Nom : PRUDENT
Prénom : Marion

Co-directrice de thèse :
Nom : LARMURE
Prénom : Annabelle

2) Descriptif du projet de thèse (devra inclure les rubriques suivantes) :

Nom et label de l'unité de recherche : UMR 1347 Agroécologie, Pôle GEAPSI « Déterminismes Génétiques et Environnementaux de l'Adaptation des Plantes », Equipe EcoLeg « Ecophysiologie des Légumineuses »

- **Localisation :** INRAE, 17 rue Sully, BP 86510, 21065 Dijon

- **Directrice de thèse :** Marion Prudent, **Co-directrice :** Annabelle Larmure

- **Contact scientifique :** annabelle.larmure@agrosupdijon.fr

DESCRIPTION DU PROJET

Contexte : Les systèmes de culture dominants peu diversifiés à base de colza et de céréales à paille étaient jusque récemment parmi les plus rentables en France. Cependant, leur durabilité est remise en question face à la multiplication des situations d'impasses techniques en contextes de changement climatique et de forte demande en matières riches en protéines. **Le pois protéagineux (*Pisum sativum* L.) est un bon candidat pour la diversification des systèmes de culture** en vue d'augmenter leurs performances tout en minimisant les intrants (engrais N notamment) et les impacts environnementaux (émission de gaz à effet de serre) (Meynard *et al.* 2013). En effet, cette légumineuse, cultivée pour ses graines riches en protéines, ne nécessite aucune fertilisation azotée grâce à sa capacité à fixer l'azote atmosphérique en symbiose avec des bactéries du sol. De plus, elle permet une rupture des cycles des bioagresseurs et le développement de populations d'auxiliaires de défense des cultures. Cependant, l'introduction du pois dans les rotations est conditionnée à un maintien de la fixation symbiotique et du rendement dans les conditions stressantes générées par le changement climatique en cours (IPCC, 2022). Or, le rendement du pois est aujourd'hui fortement limité par des stress abiotiques tels que le déficit hydrique et les fortes températures (Simmen, 2022). Depuis quelques années, les efforts déployés dans la recherche publique ont fait émerger des caractéristiques génotypiques qui pourraient améliorer l'attractivité de la culture du pois (Burstin *et al.*, 2020 ; Biarnès *et al.*, 2021). Alors que jusqu'à présent, la majorité des semis est réalisée au printemps en France, les semis d'automne pourraient permettre d'augmenter le potentiel de rendement de la culture, principalement par un évitement des stress abiotiques pendant la phase reproductrice (Schneider *et al.*, 2021). Le développement de la culture de pois repose sur la conception d'itinéraires techniques innovants comprenant un choix variétal déterminant par rapport aux autres leviers techniques. Les interactions "génotype x environnement x pratiques culturales" sont de ce fait un levier d'amélioration central pour le devenir des variétés à construire dans le contexte du changement climatique. Pourtant, elles ont souvent été négligées dans le passé car elles sont difficiles à appréhender dans la démarche de sélection variétale. En effet, cela nécessiterait de tester une infinité de situations pédoclimatiques, ce qui est impossible à créer expérimentalement. Les modèles de culture sont donc souvent les seuls outils pertinents pour (i) simuler l'impact des changements climatiques sur les grandes cultures et (ii) mettre au point des stratégies variétales et techniques pour l'adaptation des cultures à ces changements (Soussana *et al.*, 2010).

Dans ce contexte, *il devient donc crucial de proposer des solutions d'adaptation du pois au changement climatique dans les différents contextes pédoclimatiques actuels et futurs français en testant les interactions "génotype x environnement x pratiques culturales" via une approche par simulation mobilisant un modèle de culture pertinent.*

Objectifs et originalités du projet : Les objectifs de la thèse sont de déterminer, par simulation, les conditions de l'adaptation de la culture de pois, une légumineuse à graine annuelle, aux nouveaux contextes pédoclimatiques français exacerbés par le changement climatique. Pour cela, il s'agira de (1) formaliser et intégrer des connaissances récentes sur des mécanismes écophysiologiques de réponse à des stress abiotiques dans le modèle Azodyn-Pea (Larmure *et al.*, 2017) pour concevoir un outil adapté à la simulation de la variabilité génétique (2) réaliser une analyse de sensibilité et une validation du modèle amélioré (3) tester par simulation de multiples combinaisons "génotype réel ou virtuel x environnement x pratiques culturales" dans les différents contextes pédoclimatiques français actuels et futurs.

Le caractère innovant de ce projet réside dans la **mobilisation de connaissances récentes acquises à différents niveaux de complexité (écophysiologique échelle plante, métabolique et moléculaire) pour :**

(i) **le développement de nouveaux formalismes dans le modèle de culture Azodyn-Pea** représentant, à l'échelle du peuplement végétal, la réponse à des stress abiotiques clés et leur variabilité génétique : modulation de la fixation symbiotique de l'azote par le déficit hydrique (tolérance et récupération post-stress) (Prudent *et al.*, 2016 ; Couchoud *et al.*, 2020 ; Jacques *et al.*, 2023) ; résistance du pois d'hiver au gel (Lecomte *et al.*, 2022) ;

(ii) **le test de la réponse complexe de génotypes réels ou virtuels d'une légumineuse à graines** à diverses situations de stress abiotiques actuelles et explorant différentes trajectoires climatiques du futur. Chaque génotype étant alors représenté par une combinaison réaliste de paramètres représentatifs de la réponse des plantes aux facteurs abiotiques de l'environnement.

Stratégie :

Formalisation et intégration dans le modèle Azodyn-Pea de connaissances récentes sur des mécanismes écophysiologiques de réponse à des stress abiotiques et leur variabilité génétique.

Nous utiliserons le modèle de culture de pois Azodyn-Pea (Jeuffroy *et al.*, 2012 ; Larmure *et al.*, 2017). C'est le seul modèle construit pour rendre compte de l'effet de variables de l'environnement abiotiques (climat, sol) sur les processus décrivant l'élaboration du rendement et de la qualité d'une culture de pois à l'échelle de la parcelle en intégrant (i) le mécanisme de prélèvement de l'azote par la fixation symbiotique, spécifique aux légumineuses et (ii) quelques caractéristiques génotypiques. Azodyn-Pea est implémenté sous la plateforme logicielle RECORD sous forme modulaire. Nous adopterons la démarche suivante :

- Amélioration de la simulation de la réponse aux stress abiotiques en intégrant de nouveaux formalismes représentatifs des connaissances écophysiologiques nouvelles sur des mécanismes clés (fonctionnement racinaire, tolérance au stress hydrique et récupération post-stress, résistance au gel hivernal)

- Intégration de la variabilité génétique de réponse aux stress abiotiques simulés par le modèle, via des paramètres génotypiques discriminant des spécificités variétales de comportement vis à vis des stress abiotiques

Exploration du modèle Azodyn-Pea modifié et caractérisation des paramètres génotypiques.

La démarche d'exploration du modèle Azodyn-Pea et de caractérisation des paramètres génotypiques sera la suivante :

- Réalisation d'une analyse de sensibilité du modèle pour hiérarchiser les paramètres auxquels les sorties du modèle est sensible, démarche permettant de hiérarchiser les paramètres génotypiques impliqués dans la réponse aux stress et pour envisager des simplifications du modèle.

- Validation du modèle par confrontation des simulations à des données observées.

- Caractérisation de gammes de valeurs réalistes pour les paramètres génotypiques en utilisant les résultats d'expérimentations passées et en cours de phénotypage dans des équipes d'écophysiologistes et de généticiens. *Cette étape permettra de disposer d'un outil « modèle de culture de pois » opérationnel pour son utilisation à l'échelle annuelle du peuplement végétal.*

Test par simulation de combinaisons "génotype x environnement x pratiques culturales"

Cette étape commencera par le choix des combinaisons "génotype réel ou virtuel x environnement x pratiques culturales" à tester lors des simulations. Un choix de zones géographiques à tester, représentatives de la diversité française (types de sol, climat), sera réalisé. Après avoir identifié la variabilité génétique existante mobilisable pour les caractéristiques introduites dans le modèle Azodyn-Pea, des gammes de caractéristiques génotypiques à tester seront définies. Des choix techniques à tester seront également définis après identification des changements techniques envisageables dans les différentes régions françaises. Ils comprendront la date de semis (en pois d'hiver et de printemps) ; la densité de semis et l'irrigation. Enfin, le test par simulation des combinaisons "génotype x environnement x pratiques culturales" choisies et pour différentes

trajectoires climatiques devrait permettre d'appréhender les conditions de l'adaptation de la culture aux modifications du climat par la recherche des meilleures combinaisons par grand type de pédoclimat français.

Outils et données disponibles ; collaborations :

Le candidat bénéficiera de l'expertise reconnue et de données de différentes équipes déjà partenaires récurrents de l'équipe EcoLeg (UMR Agroécologie, pôle GEAPSI).

- Pour le développement informatique du modèle Azodyn-Pea, son exploration et la réalisation de simulations : Equipe RECORD de l'Unité "Mathématiques et Informatique Appliquées de Toulouse" (MIAT), contact Ronan TREPOS

- Pour les connaissances sur la résistance du pois d'hiver au gel : Equipe "Fonctionnement et adaptation de la plante en interaction avec son environnement" UMRT BioEcoAgro à Mons, contact I. Lejeune-Hénaut

- Pour les données observées de validation du modèle : Terres Inovia, contact V. Biarnès

- Pour le test de multiples combinaisons "génotype x environnement x pratiques culturales" : Données « sol » pôle BIOME de l'UMR Agroécologie, contact M. Ubertosi; Données climatiques actuelles et futures, régionalisées à une maille de 8 km Centre de Recherches de Climatologie UMR Biogéosciences à Dijon, contact T. Castel

L'étudiant profitera par ailleurs des données et de l'environnement scientifique du pôle GEAPSI dans l'UMR Agroécologie pour les questions d'écophysiologie (M. Prudent ; A. Larmure) et de génétique (J. Burstin).

Calendrier :

M0 – M6 : Analyse bibliographique. Appropriation du modèle Azodyn-Pea et formation à son utilisation et à sa modification en collaboration avec la plateforme de modélisation RECORD. Collecte de données pour développer les nouveaux formalismes du modèle Azodyn-Pea. **Rédaction d'un article de type « review »** sur les formalismes de simulation des stress dans les modèles de culture.

M7 – M12 : Développement de nouveaux formalismes dans le modèle Azodyn-Pea pour représenter la réponse à des stress abiotiques et leur variabilité génétique.

M13 – M21 : Exploration du nouveau modèle Azodyn-Pea (analyse de sensibilité ; validation, hiérarchisation des paramètres génotypiques). **Rédaction d'un article** sur le modèle Azodyn-Pea et son domaine de validité.

M22 – M30 : Choix des combinaisons "génotype x environnement x pratiques culturales". Réalisation des simulations et analyse des résultats. **Rédaction d'un ou plusieurs articles** sur l'impact du changement climatique sur la culture de pois en France ; la proposition de génotypes et d'itinéraires techniques adaptés aux différents contextes pédoclimatiques français futurs.

M31 – M36 : Rédaction de la thèse

FINANCEMENT DU PROJET : Un ordinateur récent est disponible pour les travaux de modélisation dans l'équipe EcoLeg. Le reste des dépenses (principalement des déplacements pour des réunions ou des congrès) pourra être financé par les projets France2030-OPTILEG.

CONNAISSANCES ET COMPETENCES REQUISES

- Titulaire d'un Master Recherche en Sciences du Végétal ou d'un diplôme d'Ingénieur en Agronomie, avec de bonnes connaissances en écophysiologie ou physiologie végétale.

- Capacité à s'approprier les concepts

- Capacité à manier les outils informatiques et statistiques

- Goût pour les collaborations pluridisciplinaires et capacité à interagir en équipe.

Résumé en français et anglais (limité chacun à 1800 caractères)

RESUME EN FRANÇAIS

Les légumineuses sont des cultures incontournables pour des systèmes de culture plus agroécologiques, car elles permettent de minimiser l'usage des intrants azotés et les nuisances environnementales associées, tout en produisant d'autres services liés à la diversification des cultures. Cependant, les surfaces cultivées en pois (légumineuse à graine annuelle dominante en France) restent faibles car les rendements sont très instables entre situations pédoclimatiques et entre années. Les stress abiotiques exacerbés par le changement climatique actuellement en cours (déficit hydrique, fortes températures) expliquent une grande part de ces variations. Les interactions "génotype x environnement x pratiques culturales" sont un levier d'amélioration central pour le devenir des variétés à construire dans le contexte du changement climatique. Cependant, elles ont souvent été négligées dans le passé car elles sont difficiles à appréhender dans la démarche de sélection variétale, car cela nécessiterait de tester expérimentalement une infinité de situations pédoclimatiques. **L'objectif de la thèse est de déterminer, par simulation avec un modèle de culture, les leviers d'adaptation de la culture de pois aux nouveaux contextes pédoclimatiques français engendrés par le changement climatique.** La démarche adoptée consistera à (1) formaliser et intégrer dans le modèle Azodyn-Pea des connaissances récentes sur des

mécanismes écophysiologicals de réponse à des stress abiotiques et leur variabilité génétique, (2) réaliser une analyse de sensibilité et une validation du modèle amélioré, (3) rechercher par simulation les meilleures combinaisons "géotype réel ou virtuel x environnement x pratiques culturales" pour les différents contextes pédoclimatiques français actuels et futurs.

RESUME EN ANGLAIS

Pulses are essential crops for more agroecological cropping systems, as they minimize the use of nitrogenous inputs and associated environmental nuisances, while producing other services related to crop diversification. However, the area cultivated with peas (the dominant annual seed legume in France) remains low because yields are very unstable between pedoclimatic situations and between years. Abiotic stresses exacerbated by the current climate change (water deficit, high temperatures) explain a large part of these variations. The interactions "genotype x environment x cultivation practices" are a central improvement lever for the future of the varieties to be developed in the context of climate change. However, they have often been neglected in the past because they are difficult to apprehend in the varietal selection process, as this would require experimental testing in an infinite number of pedoclimatic situations. **The objective of the thesis is to determine, by simulation with a crop model, the levers of adaptation of the pea crop to the new French pedoclimatic contexts generated by climate change.** The approach adopted will consist in (1) formalizing and integrating into the Azodyn-Pea model recent knowledge on ecophysiological mechanisms of response to abiotic stresses and their genetic variability, (2) carrying out a sensitivity analysis and a validation of the improved model, (3) using simulation to find the best combinations of "real or virtual genotype x environment x cropping practices" for the various current and future pedoclimatic contexts.

Préciser le domaine de compétence dans la liste ci-dessous (2 choix possibles maximum – ne pas modifier les intitulés : ils sont imposés par certains sites web) :

✓ Agronomie

Mots clés : Pois (*Pisum sativum* L.), modélisation des cultures, stress abiotiques, changement climatique, variabilité génétique, adaptation

Références bibliographiques citées :

- Biarnès V, Pilet-Nayel ML, Lejeune-Hénaut I, Tayeh N, Burstin J. (2021) Légumineuses à graines : des avancées génétiques pour lutter contre les stress. *Persp. Agr.*, 492, 56-60
- Burstin J, Kreplak J, Macas J, Lichtenzveig J. (2020) *Pisum sativum* (Pea) Genome of the Month. *Trends Genet.*, 36 (4), 312-313
- Couchoud, M., Salon, C., Girodet, S., Jeudy, C., Vernoud V., Prudent, M. (2020). Pea efficiency of post drought recovery relies on the strategy to fine-tune nitrogen nutrition. *Front. Plant Sci.*
- Jacques C, Girodet S, Leroy F, Pluchon S, Salon C and Prudent M (2023) Memory or acclimation of water stress in pea rely on root system's plasticity and plant's ionome modulation. *Front. Plant Sci.* 13:1089720.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers
- Jeuffroy MH, Vocanson A, Roger-Estrade J, Meynard JM (2012). The use of models at field and farm levels for the ex ante assessment of new pea genotypes. *European Journal of Agronomy*, 42: 68-78.
- Larmure A, Bénézit M, Trepos R, Lecomte L, Jeuffroy MH (2017) Azodyn-Pea, a crop model to adapt pea crop to climate change. 2nd Agriculture and Climate Change Conference. Sitges, Spain (Poster, résumé)
- Lecomte C, Lejeune-Hénaut I, Larmure A. (2022) Pois et féverole d'hiver : une meilleure caractérisation du risque de gel. Carrefour Pois Féverole-Terres Inovia. Paris, France (Communication orale, résumé)
- Meynard JM, Messéan A, Charlier A, Charrier F, Farès M, Le Bail M, Magrini MB, Savini I (2013). Freins et leviers à la diversification des cultures. *INRA*, 52 p.
- Prudent M., Vernoud V, Girodet S, Salon C. (2016) How nitrogen fixation is modulated in response to different water availability levels and during recovery: a structural and functional study at the whole plant level, *Plant Soil*, 399:1-12.
- Schneider A, Lecomte V. Brillault L. (2021) Donner plus de place aux légumineuses. *Persp. Agr.*, 492, 39-43
- Simmen M. (2022) La filière pois à la loupe. *Persp. Agr.*, 499, 13-16
- Soussana J.F, Graux A, Tubiello F. (2010). Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *J. Exp. Bot.*, 61(8), 2217-2228