

Comité de Propriété Intellectuelle et de Valorisation de Plant2Pro®

Bilan de fin de projet

ECODIV (Ecophysiologie COmparée des cultures de DIVersification (Légumineuses/printemps) pour guider leur insertion dans les successions culturales)

Date de début du projet : 01/01/2021

Durée du projet : 4 ans (3 ans + prolongation 1 an)

Coordinateur du projet : Véronique Biarnès (Terres Inovia)

Entités Plant2Pro® impliquées : Terres Inovia + 3 unités INRAe (UMR AGIR Toulouse, UMR Agroécologie Dijon et LEPSE Montpellier)

Résumé : (20-30 lignes max)

Dans un contexte de changement climatique et de réduction des intrants, la diversification des cultures peut apporter des solutions pour améliorer les services rendus au sein des systèmes cultivés. L'objet du projet ECODIV était d'aider à insérer des cultures jusque-là peu développées en France dans des systèmes de culture conventionnels trop simplifiés, comme certaines légumineuses à graines (soja, pois, féverole, lupin, pois chiche, lentille) ou du tournesol, qui peuvent amener des services écosystémiques respectivement du point de vue de la gestion de l'azote ou des ressources en eau, tout en contribuant à des enjeux de production de protéines végétales. Le faible développement de ces cultures, malgré l'intérêt agroécologiques qu'elles représentent, s'explique par le fait qu'elles ne sont pas bien connues des acteurs socio-économiques (agriculteurs, coopératives, chambres d'agriculture), notamment concernant les conditions pédoclimatiques favorables et les itinéraires techniques nécessaires pour bien les cultiver.

Le projet ECODIV, via des études bibliographiques, des expérimentations en conditions contrôlées et au champ devait apporter de nouvelles connaissances, en particulier sur des cultures de légumineuses qui ont connu un développement récent (pois chiche, lentille) ou cultivées sur des surfaces réduites (féverole, lupin) mais aussi compléter celles sur des cultures mieux connues comme le pois, le soja ou le tournesol. Pour toutes ces cultures, disposer d'un outil permettant de les positionner dans les meilleures conditions pour favoriser leur développement et leur productivité et ainsi étendre leurs aires de culture respectives était attendu.

Le travail a principalement permis d'avoir une meilleure connaissance sur l'écophysiologie de toutes les légumineuses à graines étudiées, notamment de mieux préciser leur phénologie et leurs différences de sensibilité à certains stress climatiques (stress hydrique en particulier), éléments nécessaires pour élaborer un outil d'aide au choix de ces cultures et faciliter leur insertion dans les systèmes de culture. Un outil de prévision des stades, intégrant l'effet de la température et de la photopériode sur le développement, a été affiné sur soja et adapté au pois chiche, au pois et à la féverole de printemps. Des travaux de cartographie de certains facteurs limitants ont par ailleurs pu être réalisés sur soja, pois de printemps et pois chiche, qui peuvent aider à mieux cerner les zones de culture favorables.

Publications de rang A	Autres formes de communication	Titres de Propriété Industrielle	Liste d'acteurs socio-économiques rencontrés	Accord de partenariat	Accord de valorisation
<p>- Maslard C., Arkoun M., Leroy F., Girodet S., Salon, C., Prudent M. (2025) Decoding the Double Stress Puzzle: Investigating Nutrient Uptake Efficiency and Root Architecture in Soybean under Heat- and Water- Stresses. Plant, Cell and Environment, https://doi.org/10.1111/pce.15268</p> <p>Larmure et al., 2025. Ecophysiological diversity of grain legumes: a tractable resource for sustainable production in Europe under climate change. En préparation</p>	<p>- Dorian Bourgeois (2022). Analyse comparative de la phénologie de légumineuses à graines pour guider leur insertion dans de nouveaux environnements climatiques. Rapport de stage M2. Université de Poitiers /Université de Tours.</p> <p>- Quentin Vienne (2022). Analyse comparative des facteurs climatiques limitant le rendement de légumineuses à graines pour guider leur insertion dans les systèmes de culture. Rapport de stage M2. Institut Agro Rennes Angers / Université Rennes.</p> <p>- Carlos GOMES (2021). De l'utilisation de l'Intelligence Artificielle pour la caractérisation morphologique de systèmes racinaires nodulés dans un contexte de phénotypage de plantes à haut débit. Rapport stage M2 Université Bourgogne</p> <p>- Paloma Veyland (2022). Quel couple de légumineuse x rhizobia permet une meilleure fixation symbiotique de N₂ sous conditions hydriques limitantes ? Rapport de stage M2 B2IPME, Université de Bourgogne.</p> <p>- Jules Bellon (2022). Ecophysologie comparée multi-espèces de légumineuses à graines face à un stress hydrique. Rapport de stage, M2 ECOBIOVALO, Université de Rouen.</p> <p>- Using simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the suitability of soybean crop in France. Bourgeois et al., 2023. Proc. WSRC11, 18-23 June 2023, Vienna (Austria)</p> <p>- Phenotyping of soybean phenology to temperature and photoperiod. Maury et al., 2023. Poster WSRC11, 18-23 June 2023, Vienna (Austria)</p> <p>- Using simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the suitability of spring-sown grain legumes in France. Bourgeois et al., 2024. Poster 18th Congress of the ESA in Rennes, France, August 2024.</p> <p>- Projet ECODIV : la physiologie des légumineuses à graines est mieux connue. Véronique Biarnès et Paloma Cabeza-Orcel, 2025. Perspectives agricoles n° 530, p. 40-42.</p>		<p>Les Jeudis de TI : ECODIV – Ecophysologie Comparée des cultures de DIVERSIFICATION pour guider leur insertion dans les successions culturales. Webinaire présenté par Véronique Biarnès le 10 avril 2025, destiné à un large public</p>		

- Résultats marquants : effectifs et / ou attendus

Tâche 1 : Développer des outils de caractérisation de la phénologie et de cartographie des facteurs climatiques limitant le rendement (Coordination : Véronique Biarnès et Annabelle Larmure)

Sous-tâche T.1.1. Analyse bibliographique (Annabelle LARMURE et Denis VILE)

Un article de review reposant sur une synthèse des connaissances bibliographiques est en cours de rédaction, avec pour titre provisoire "*Ecophysiological diversity of grain legumes: a tractable resource for sustainable production in Europe under climate change*". La rédaction est coordonnée par Annabelle LARMURE (UMR Agroécologie) et Denis VILE (LEPSE) et mobilise comme co-auteurs différents partenaires des différentes tâches du projet : V. Biarnès, S. Gervois & Hélène Tribouillois (Terres Inovia) ; A. Tixier & M. Prudent (UMR Agroécologie) ; P. Debaeke, D. Bourgeois & P. Maury (UMR AGIR). Cet article sera notamment alimenté par 4 synthèses bibliographiques, réalisées dans le cadre du projet par des étudiants en 1^{ère} année Ingénieur Agronomie à l'Institut Agro Dijon. La soumission est prévue avant la fin de l'année 2025, dans une revue à comité de lecture et fort facteur d'impact. Les synthèses bibliographiques des mémoires de fin d'études M2 réalisés dans le cadre du projet pourront également être mobilisées pour étayer l'impact des facteurs limitants abiotiques sur le rendement des différentes légumineuses visées, ainsi que des références sur leurs réponses différenciées à différents stress dans des études comparatives publiées.

Synthèses bibliographiques réalisées par des étudiants :

CARVALHO A, CHALUMEAU A ; 2022. La culture du pois chiche dans le monde, zones de culture, surfaces, production et débouchés - Projet d'Ingénieur 1^{ère} année Institut Agro Dijon (Recherche Documentaire)
JOUY N, JEUNET L, GIROUX B, 2022. La culture du lupin dans le monde, zones de culture, surfaces, production et débouchés - Projet d'Ingénieur 1^{ère} année Institut Agro Dijon (Recherche Documentaire)
MAAS M-O, MARADAN C, PÉRONNET P, 2022. La culture de la féverole dans le monde, zones de culture, surfaces, production et débouchés - Projet d'Ingénieur 1^{ère} année Institut Agro Dijon (Recherche Documentaire)
RIBAULT M, TRANCHANT C, 2022. La culture du haricot commun dans le monde, zones de culture, surfaces, production et débouchés - Projet d'Ingénieur 1^{ère} année Institut Agro Dijon (Recherche Documentaire)

Sous-tâche T.1.2. Outils de caractérisation de la phénologie (Philippe Debaeke et Annabelle LARMURE)

Un travail d'agrégation des connaissances devait conduire à l'établissement de modèles simples permettant de simuler la phénologie de toutes les espèces. Ce travail s'est appuyé d'une part sur l'analyse bibliographique menée en T.1.1., d'autre part sur des expérimentations spécifiques mises en place à l'UMR Agir et à l'UMR Agroécologie de Dijon pour évaluer l'effet de la température et de la phénologie sur le développement (T.2.1.), ainsi que sur des formalismes déjà existants développés pour le soja dans le modèle SPA (Simple Phenology Algorithm) (Thèse Céline Schoving, 2020). Les travaux ont porté sur 4 cultures : soja, pois chiche, pois de printemps et féverole de printemps. Les premiers résultats sont présentés dans le mémoire de fin d'études de Dorian Bourgeois (2022). Pour le soja, ils ont permis d'améliorer le modèle SPA déjà disponible. Ces résultats ont fait l'objet d'une présentation orale ainsi que d'un poster sur le modèle de développement SPA à la Conférence soja (WSRC11) (18-23 juin 2023 Vienne, Autriche). Pour les trois autres cultures, le modèle SPA a été adapté. Chaque modèle a été évalué en 2023 respectivement sur pois chiche, pois et féverole de printemps, à l'aide de bases de données fournies par Terres Inovia. Un poster au congrès ESA à Rennes (26 au 30 août 2024) a permis de présenter le modèle SPA calibré pour les quatre cultures : soja, pois chiche, pois et féverole de printemps.

Mémoire de fin d'études

Analyse comparative de la phénologie de légumineuses à graines pour guider leur insertion dans de nouveaux environnements climatiques. Dorian Bourgeois, 2022. Rapport de stage M2. Master Biodiversité Ecologie et Evolution, Université de Poitiers /Université de Tours. 20 pages + annexes.

Valorisation des résultats

Using simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the suitability of soybean crop in France. Bourgeois D, Kang L, Duchalais A, Schoving C, Constantin J, Champolivier L, Maury P, Debaeke P, 2023. Proc. 11th World Soybean Research Conference, 18-23 June 2023, Vienna (Austria), p 307

Phenotyping of soybean phenology to temperature and photoperiod. Maury P, Quinquy B, Bourgeois D, Ait-Kaci N, Kang L, Schoving C, Debaeke P, 2023. Poster 11th World Soybean Research Conference, 18-23 June 2023, Vienna (Austria).

Using simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the suitability of spring-sown grain legumes in France. D. Bourgeois, Ph. Debaeke, B. Quinquiry, V. Biarnès, H. Tribouillois, P. Maury. Poster 18th Congress of the ESA in Rennes, France, August 2024.

Sous-tâche T.1.3. Outils de cartographie des facteurs climatiques limitant le rendement (Véronique Biarnès et Annabelle Larmure)

Cette sous-tâche visait à établir pour les différentes espèces du projet une cartographie des facteurs climatiques limitant les rendements. Cette étape nécessite la définition d'indicateurs agro-météorologiques simples, issus du croisement entre la phénologie des espèces (phase sensible) et des variables météorologiques simples (températures, rayonnement, pluviométrie, ETP).

Dans le cadre du stage M2 de Quentin Vienne (2022), des cartes de facteurs limitants ont pu être établies sur pois. Cela a permis de représenter pour le pois de printemps à l'échelle nationale le nombre d'années sur 20 ans (2001-2020), pour lesquelles les cumuls de températures maximales supérieures à 25°C ont dépassé le seuil de 20°C, entre le 20 mai et le 20 juin (période de formation des graines). Lorsque les cumuls dépassent ce seuil, le nombre de graines formées dans les gousses est affecté. Il en résulte que la zone intermédiaire, où est principalement cultivé le pois de printemps actuellement apparaît limitante pour l'élaboration du rendement, avec une fréquence élevée d'années avec des fortes températures pendant la période sensible de mise en place des graines (1 année sur 2) alors que la zone nord-ouest (Hauts de France, Normandie, Bretagne) est beaucoup plus favorable pour la culture du pois de printemps, puisqu'elle présente moins de températures élevées pendant cette phase sensible (1 année sur 20 à 1 année sur 10).

Des cartes de dates de récolte pour le pois chiche en fonction de plusieurs dates de semis, à l'échelle nationale, élaborées dans le cadre du stage master 2 de Dorian Bourgeois (cf T.1.2.), ont par ailleurs permis d'indiquer qu'il vaut mieux semer cette culture avant le 1er avril, en particulier dans le nord-ouest de la France. Des cartes de dates de récolte pour le soja pour des groupes de précocités extrêmes (II et 000) et pour des dates de semis contrastées (25 mars et 5 mai) ont montré que dans le nord-ouest de la France, mieux vaut planter le soja avant début mai pour le groupe de précocité 000, pour éviter une récolte trop tardive voire impossible.

L'arrêt prématuré du stage prévu en 2024 n'a pas permis de finaliser les calculs d'indicateurs agro-climatiques ni de réaliser d'autres cartes de faisabilité des cultures.

Mémoire de fin d'études

Analyse comparative des facteurs climatiques limitant le rendement de légumineuses à graines pour guider leur insertion dans les systèmes de culture. Quentin Vienne, 2022. Rapport stage M2. Master Biologie, Agrosociétés. Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal, Institut Agro Rennes Angers / Université Rennes. 27 pages + annexes.

Tâche 2 : Comblant le déficit de connaissances en écophysiologie – Mise place d'expérimentations d'écophysiologie comparée (Coordination Marion Prudent et Denis Vile)

Sous-tâche T.2.1 : caractérisation de la phénologie des différentes espèces

Travaux UMR Agroécologie (Annabelle LARMURE et Corentin MASLARD)

Des expérimentations ont été réalisées à l'UMR Agroécologie pour caractériser les températures cardinales de développement (minimale, optimale et maximale) pour 6 variétés de légumineuses à graines représentatives de 4 espèces : lentille, pois, lupin et soja. La méthodologie décrite par Colbach *et al.* (2002) reposant sur la caractérisation des températures optimales de germination a été utilisée car ce sont de bons indicateurs des températures cardinales de développement en phase végétative des plantes. Les expérimentations ont été réalisées dans des conditions de température contrôlée dans un germinateur Fitoclima S600 (Aralab, Rio de Mouro, Portugal). 11 températures différentes ont été utilisées : de 5°C à 36°C. La méthode décrite par Tribouillois (2016) a ensuite été utilisée pour déterminer les trois températures cardinales de chaque variété suivant l'équation :

$$\frac{1}{t(G)} = \exp(\mu) \times (T - T_0)^\alpha \times (T_{max} - T)^\beta$$

où μ , α , β sont les paramètres du modèle ; $1/t(G)$ est le taux de germination ; T_0 , T , et T_{max} , les températures minimale, réelle et maximale respectivement.

Les résultats montrent une diversité des températures cardinales entre espèces de légumineuses à graines étudiées et qu'il peut exister des différences au sein d'une espèce entre variétés. Ils vont continuer à être analysés et finement comparés à la littérature. En effet, les températures optimales estimées dans cette étude pour la lentille, le pois et le lupin semblent plus élevées que dans la littérature ; tandis que les températures minimales sont plus faibles (Ney et Turc, 1993 ; Tribouillois et al. 2016 ; Kamakar et Nabizadeh, 2017). L'effet de la température sur le taux de germination sera également exploré, puis les résultats seront publiés. Les valeurs de températures cardinales seront précieuses pour représenter la phénologie de ces espèces dans les modèles de culture et comprendre les impacts des stress en fonction du stade de développement dans différentes situations de culture.

Travaux UMR Agir (Stage Dorian Bourgeois encadré par Pierre Maury et Philippe Debaeke)

A l'UMR Agir, pour analyser les effets de la température sur la phénologie des légumineuses à graines, la germination des graines de variétés de soja, de pois chiche, de pois de printemps et de féverole de printemps a été testée sous 11 conditions de températures (3 °C ; 6,5 °C ; 10 °C ; 15 °C ; 20 °C ; 25 °C ; 30 °C ; 35 °C ; 37,5 °C ; 40 °C ; 43 °C). Les trois températures cardinales de chaque variété ont été déterminées selon la même méthodologie que celle utilisée par l'UMR Agroécologie.

Pour étudier la réponse de la phénologie des légumineuses à graines à la photopériode naturelle, une deuxième expérimentation a consisté à suivre en 2022, sur la plateforme extérieure de phénotypage haut-débit HELIAPHEN, située sur le site INRAE d'Auzerville-Tolosane, les stades de développement de plusieurs variétés des quatre cultures placées dans des pots dans des semis échelonnés (02/03/2022 (sauf soja), 05/04/2022, 13/05/2022, 10/06/2022 et 08/07/2022).

Les paramètres nécessaires pour le modèle SPA (températures cardinales de développement des plantes, valeurs de photopériodes seuils (issues de la littérature) ainsi que deux paramètres obtenus par optimisation) ont permis d'affiner le modèle pour le soja et de le calibrer pour les trois autres cultures (Cf T.1.2.).

Références bibliographiques

- Colbach N, Chauvel B, Dürr C, Richard G (2002) Effect of environmental conditions on *Alopecurus myosuroides* germination. I. Effect of temperature and light. *Weed Research*. doi:10.1046/j.1365-3180.2002.00279.x
- Ney, B. and Turc, O. (1993). Heat-unit-based description of the reproductive development of pea. *Crop Sci.*, 33: 510-514
- Kamakar, B Nabizadeh, A. (2017). Cardinal temperature and thermal time required for emergence of lentil (*Lens culinaris* Medik). *Legum. Res.* 40 (2), 291-298
- Tribouillois (2016) Determination of germination response to temperature and water potential for a wide range of cover crop species and related functional groups. *PLoS One*. doi: 10.1371/journal.pone.0161185. doi: 10.1371/journal.pone.0161185
- Tribouillois, H., Cohan, J. P., & Justes, E. (2016). Cover crop mixtures including legume produce ecosystem services of nitrate capture and green manuring: assessment combining experimentation and modelling. *Plant and soil*, 401, 347-364.

Sous-tâche T.2.2 : caractériser la réponse des différentes espèces au stress hydrique, à l'aide de deux expérimentations

Travaux UMR Agir

Dans le dispositif Héliaphen à l'UMR Agir Toulouse décrit précédemment (plantes en pots), pour lequel il existe un système d'irrigation et de pesée régulière des pots, en 2021, un stage de M1 a permis de suivre l'expansion foliaire et la transpiration de 4 légumineuses de printemps : soja, pois chiche, pois et féverole. Pour le soja, l'expérimentation a permis de révéler des comportements contrastés entre 6 variétés par rapport au stress hydrique. Pour les trois autres cultures, elle a permis une mise au point méthodologique concernant l'estimation de la surface foliaire.

Mémoire M1

Analyse comparative de la réponse de légumineuses à graines au déficit hydrique. Hanine IDELBI, 2021. Rapport stage 1^{ère} année du MASTER Sciences et Technologie de l'Agriculture, de l'Alimentation et de l'Environnement, Gestion de la Qualité des Productions Végétales, Université Avignon. 15 pages + annexes

Travaux UMR Agroécologie Dijon

Un premier stage M2 en 2021 sur le développement d'algorithmes d'analyse d'images racinaires par approche deep-learning (Carlos Gomes, avril – sept 2021) a permis de développer une méthodologie pour segmenter les images racinaires dans la plateforme Serres-4PMI et d'accéder à différentes variables (nombre, position et surface des nodosités, nombre de racines, typologie racinaire).

Une expérimentation en conditions contrôlées a été mise en place sur la plateforme Serres-4PMI de Dijon (plateforme de phénotypage aérien et racinaire en RhizoTubes), afin de caractériser la réponse écophysologique de plusieurs espèces de légumineuses à un déficit hydrique du sol.

Le premier objectif de cette expérimentation visait à identifier les couples [souche de rhizobia x variété de féverole] les mieux adaptés à des conditions hydriques limitantes. Pour cela, un travail d'identification de souches de rhizobia présentant une gamme de résistance à un stress osmotique a permis de sélectionner 5 souches contrastées. Ces 5 souches ont ensuite été inoculées à 5 variétés de féverole, également choisies pour leur niveau de tolérance contrasté au déficit hydrique. Ces 25 couples ont été ensuite suivis pour leur capacité à tolérer un arrêt d'arrosage de 3 semaines, dans des RhizoTubes. Ce dispositif étant idéal pour permettre de caractériser la plasticité racinaire de manière non destructive. Des couples permettant une meilleure tolérance au déficit hydrique de la féverole, mais également des stratégies de réponse au stress très dépendantes de l'interaction variété de féverole x souche de rhizobia ont ainsi pu être identifiées. Pour certaines combinaisons, le nombre de nodosités étaient préférentiellement affecté, tandis que pour d'autres, c'était leur taille. Une publication est en cours de rédaction pour valoriser ce travail de stage de M2 de Paloma Veyland.

Une deuxième expérimentation visait à réaliser une étude d'écophysologie comparée chez plusieurs légumineuses à graines. Pour cela, 5 espèces de légumineuses (lentille, soja, féverole, pois chiche et lupin) ont été cultivés en RhizoTubes, et soumises à un arrêt d'arrosage de 3 semaines. L'un des résultats phare de cette expérimentation réside dans les réponses très contrastées observées entre pois et lupin au niveau de la stratégie d'allocation de biomasse. En effet, chez le pois, en réponse au déficit hydrique, une allocation préférentielle du carbone a été observée vers les racines, au détriment des nodosités et des parties aériennes. Chez le lupin, en revanche, c'est l'allocation de carbone vers les nodosités qui a semblé être favorisée en condition de déficit hydrique, au détriment de la croissance racinaire et aérienne. Il semblerait également qu'espèces tropicales et tempérées se différencient pour la répartition des nodosités au sein du système racinaire : si pour les espèces tempérées (lupin, pois, lentille), la majorité des nodosités a été observée sur la racine principale lors d'un déficit hydrique, ces nodosités se répartissent plus équitablement entre racines primaire et secondaires chez les espèces tropicales (soja, pois chiche). Une publication est actuellement en cours de rédaction pour valoriser ce travail de stage de M2 de Jules Bellon.

Tâche 3 : Tâche 3 : Créer une base de données multi-espèces « phénologie et rendements » (Coordination Véronique Biarnès et Céline Schoving)

Sous-tâche T.3.1 : Création d'une base de données

En vue de créer une base de données rassemblant toutes les données acquises dans le projet, un travail a été engagé par un groupe de 3 étudiants ingénieurs AgroSup Dijon en 2^{ème} année, dans le cadre d'une initiation à la démarche de projet, de début octobre 2021 à février 2022. Ce travail a permis de réfléchir à la structuration de la base de données, en prenant en compte les caractéristiques de la base de données déjà utilisée en interne par Terres Inovia.

Les données issues des essais au champ de Terres Inovia (plateformes multi-espèces de légumineuses) ont été stockées dans la base de données de Terres Inovia et donc structurées sous cette forme. Des extractions au format Excel ont également réalisées pour analyser les résultats obtenus, permettant de recenser les principales variables et d'avoir également une base sous format Excel.

L'agrégation des résultats obtenus dans les autres expérimentations n'a pour l'instant pas été effectué.

Rapport projet

Création d'une base de données pour contribuer au développement d'espèces de légumineuses encore peu cultivées en France (féverole, pois chiche, lentille, lupin, pois, soja). Projet ingénieur 2^{ème} année AgroSup Dijon 2022, encadré par Annabelle LARMURE.

Sous-tâche T.3.2. Mise en place de plateformes multi-espèces et multi-sites

Les 6 espèces de légumineuses de printemps (pois, féverole, lupin, pois chiche, lentille et soja) et les 3 types hiver pour les protéagineux (pois, féverole et lupin), soit 9 cultures, ont été testées, dans des plateformes multi-espèces dans 3 sites (Estrées-Mons (80), Bretenière (21), un site près de Toulouse (31) (Auzeville en 2021, En Crambade en 2022 et 2023)). Pour chaque culture, 2 variétés ont été choisies (parmi les plus cultivées pour ces cultures). Des semis plus tardifs ont été effectués en soja par rapport aux 5 autres légumineuses de printemps (toutes semées à la même date). Les variétés de soja (groupe de précocité) ont également été adaptées selon le site. Sur ces essais, les stades de développement ont été recueillis finement pour combler le faible nombre de références disponibles actuellement sur certaines cultures (pois chiche, lentille, lupin). Les rendements obtenus, ainsi que des variables telles le PMG et les teneurs en protéines ont également été mesurés.

La date d'acceptation du projet, à l'automne 2021, n'a pas permis d'implanter des types hiver lors de cet automne-là. De ce fait, il n'y a pas eu de culture d'hiver récoltée lors de la première année. Les deux années suivantes, ces cultures ont été mises en place dans les 3 sites mais ont subi de nombreux dégâts (oiseaux, gibiers, adventices), qui ont conduit à l'abandon des parcelles semées, à En Crambade et Dijon. Il n'y a donc que sur le site d'Estrées-Mons que les protéagineux d'hiver ont pu être semés et récoltés avec de bons rendements. Ces résultats soulignent donc la difficulté d'implanter ces cultures de type hiver.

Pour les types printemps, la majorité des cultures a pu être conduite sur les 3 sites en 2021. Les deux années suivantes, des accidents en cours de cycle ou des problèmes de récolte ont pu entraîner l'abandon des parcelles de certaines cultures (soja, lentille, lupin). L'identification des facteurs limitants au cours du cycle et les réponses différenciées des cultures de printemps en 2021 ont été analysées dans le cadre du stage M2 de Quentin Vienne (Cf. T.1.3). Cette année-là, une pluviométrie importante de la mi-juin à la mi-juillet dans le nord de la France a favorisé certaines cultures comme la féverole, le lupin ou le soja mais été pénalisante pour le pois chiche et la lentille, sur le site d'Estrées-Mons en particulier.

Une analyse complète sur les 3 années et les 3 sites confirme en effet que :

- Le rendement de la féverole de printemps dépend de la pluie reçue entre semis et maturité
- Le rendement du lupin de printemps dépend aussi de la pluie reçue sur le cycle mais est souvent limité par l'enherbement
- Pour le pois de printemps, une forte pluviométrie est favorable pour le rendement mais peut occasionner une verse importante, qui peut limiter le rendement
- Le rendement de la lentille est limité par des difficultés de récolte liés à la verse et à l'enherbement
- Le rendement du pois chiche est limité par une pluviométrie trop abondante sur le cycle (croissance indéterminée)
- Une levée compliquée en soja à Mons en 2021 et à Dijon en 2023, en lien avec des températures basses et une pluviométrie importante après les semis a également été notée. Cela souligne l'importance des conditions climatiques post-levée pour cette culture, notamment dans des sites septentrionaux.

Ces essais ont donc permis de donner des informations sur la faisabilité et la productivité des cultures.

Tâche 4 : Elaborer un outil d'aide au choix des cultures (Coordination Véronique Biarnès et Philippe Debaeke)

Sous-tâche T.4.1 : Elaboration d'un outil d'aide au choix des cultures

Dans cette sous-tâche, il était prévu d'élaborer un outil d'aide au choix des cultures, en utilisant le logiciel DEXi pour prendre en compte l'ensemble des facteurs limitants, avec une pondération à définir par espèce pour les hiérarchiser. Cette étape n'a pas pu être réalisée car elle aurait dû être effectuée dans le cadre du stage M2 2024, qui s'est interrompu prématurément.

Sous-tâche T.4.2. Cartographie des zones de cultures possibles

Pour les mêmes raisons que ce qui a été évoqué précédemment, la cartographie des zones de cultures possibles pour chacune des espèces sur la base des conditions de sol et de climat n'a pu être réalisée. Seules les cartes mentionnées en T.1.3. ont pu être construites. Ces dernières sont malgré tout utiles pour définir des zones de culture pour le pois de printemps, le pois chiche ou le soja mais elles ne sont basées que sur un seul facteur limitant (températures élevées pendant la formation des graines en pois de printemps, possibilité de récolter les cultures de pois chiche et de soja avant une période trop tardive et trop humide).

- Résultats complémentaires

Les données de phénologie issues des essais des plateformes mises en place dans ECODIV, compilées à des données issues d'essais variétés ont permis de calculer des sommes de températures depuis le semis pour les principaux stades-clés des 6 cultures (soja, pois, féverole, lentille, pois chiche et lupin). Ces données sont précieuses car ont parfois permis de situer des stades peu référencés comme la date de maturité physiologique, importante pour bien caler le cycle global de développement.

Les résultats acquis dans le projet ECODIV pourront compléter les données d'autres projets de recherche tels que SOYSTAINABLE, JACK, LETSPROSEED, qui visent à identifier les facteurs limitants du rendement pour plusieurs légumineuses à graines (soja, pois chiche, lentille, pois et féverole).

Dans le projet Insérez-les, la thèse de Noé Kavoukdjian-Detot permettra l'identification et la hiérarchisation des principaux facteurs limitant le rendement des 6 LAG étudiées dans ECODIV et l'identification de leviers d'amélioration. Des simulations permettront d'évaluer l'effet du climat futur sur l'évolution des facteurs limitants. Les aires de production potentielles actuelles et futures de ces LAG seront précisées. L'outil de choix des cultures et le développement de cartes des facteurs limitants et des zones de culture favorables pour les LAG, non développés dans le projet, le seront donc dans cette thèse.

Le modèle de phénologie SPA sera par ailleurs adapté aux protéagineux d'hiver (pois, féverole et lupin), ainsi qu'à la lentille et au lupin de printemps, de manière à compléter la gamme de légumineuses.

Enfin, dans le projet OPTILEG, la thèse d'Abdourahmane Diallo, prévue dans le projet OPTILEG, visant à améliorer le modèle Azodyn-pea, pourra apporter des compléments utiles pour la cartographie des facteurs limitants du pois. Ce projet permettra également de mieux préciser les interactions légumineuse x microorganismes du sol pour pois et lentille pour favoriser la fixation symbiotique et la production de protéines et limiter l'effet du stress hydrique chez ces deux cultures.

Ces deux derniers projets se placent donc en complète continuité avec le travail amorcé dans ECODIV.

- Difficultés rencontrées et moyens de résolution mis en œuvre

Quelques difficultés ont été rencontrées en cours de projet.

Tout d'abord, concernant la mise en place des plateformes multi-espèces de légumineuses dans les trois sites, pour les espèces d'hiver, il a été compliqué de les implanter à la suite de divers accidents (problèmes de levée, oiseaux, gibiers ayant détruit les plantes). Ceci montre bien que ces cultures sont difficiles à gérer. Il a par ailleurs été compliqué également voire impossible dans plusieurs sites de récolter certaines cultures (lentille et pois chiche notamment dans le nord). Ceci souligne que ces cultures ne sont pas adaptées avec les variétés actuelles à des conditions septentrionales où les pluies peuvent soit entraîner de la verse pour la lentille soit allonger le cycle du pois chiche en lien avec son caractère indéterminé.

Le stage prévu en 2024 a été interrompu avant la fin, ce qui a limité les sorties en termes de définition d'indicateurs agro-météorologiques et également la réalisation de travaux de cartographie et l'élaboration d'un outil de choix des cultures.