
SIMULER LA PLASTICITÉ PHÉNOTYPIQUE DES POACÉES COMME PROPRIÉTÉ ÉMERGENTE DE PROCESSUS LOCAUX : UN MODÈLE STRUCTURE-FONCTION COUPLANT LA MORPHOGÉNÈSE ET LE MÉTABOLISME DU CARBONE ET DE L'AZOTE

Thèse de Marion **GAUTHIER**¹

Analysée par Antoine **MESSÉAN**²

Directeur de thèse : Bruno **ANDRIEU**, Directeur de recherche, INRAE UMR EcoSys
Co-encadrant : Romain **BARILLOT**, Chargé de recherche INRAE - Centre Nouvelle Aquitaine Poitiers
Co-encadrant : Christian **FOURNIER**, Ingénieur de recherche INRAE - Centre Occitanie - Montpellier

Au cours des 50 dernières années, l'agriculture française a relevé le défi de la production en quantité et en qualité. Cela s'est fait au travers d'une certaine spécialisation des systèmes de production, des filières associées, d'un recours conséquent aux intrants et, de façon générale, d'une mobilisation de l'ensemble du système sociotechnique (politique, réglementation, éducation, recherche) qui a rendu très performants les systèmes de culture organisés autour de cultures majeures. Alors que la (re) diversification des systèmes de culture présente des atouts indéniables pour atténuer les impacts négatifs des systèmes actuels et répondre aux demandes des consommateurs, elle nécessite des innovations techniques et organisationnelles de nature nouvelle. Par ailleurs, le changement climatique s'accélère avec un dérèglement se manifestant par des événements extrêmes plus fréquents et une imprévisibilité qui remettent en cause à la fois notre compréhension du fonctionnement des peuplements végétaux et la prédictibilité de leur évolution. Ces deux tendances, dérèglement climatique et diversification des systèmes de culture, amènent à repenser la manière dont la recherche a représenté le fonctionnement des cultures au travers de modèles et leur exploitation pour accompagner les décisions.

Dans ce contexte, la thèse de Marion Gauthier s'intéresse à la capacité des modèles de cultures à prendre en compte cette incertitude accrue et l'imprévisibilité de nombreux événements en abordant la plasticité phénotypique, c'est à dire la capacité d'un génotype à adapter son phénotype à ses conditions de croissance. Les modèles de culture ont été plutôt bâtis jusqu'à présent sur la base de la recherche d'invariants dans le fonctionnement de la plante associée à des variables d'entrée représentant le contexte local spécifique. Dans un contexte de changement climatique et de transition agroécologique qui renforce le poids des interactions entre le fonctionnement de la plante, le milieu local et les pratiques (c'est même

¹ Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay, École doctorale n°581 : agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES), Spécialité de doctorat : Sciences végétales, Unité de recherche : Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 78850, Thiverval-Grignon, France-Référent : AgroParisTech, présentée et soutenue à Paris-Saclay, le 23/02/2022.

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, Section1 « Productions végétales ».

l'essence de l'agroécologie) et qui « *crée, pour les plantes, des conditions de croissance inédites et en perpétuelle évolution* », est-il possible de modéliser l'imprévisibilité accrue et ces interactions ?

La thèse soutenue est que cela est possible en développant un modèle FSPM (Functional-Structural Plant Models), de morphogenèse aérienne qui considère le fonctionnement de la plante entière et qui simule l'acquisition de traits de feuille et de plante comme propriétés résultant des interactions entre la morphogenèse, les facteurs environnementaux et les activités source-puits au sein de la plante.

Cette approche avait été initiée, sur l'exemple du blé d'hiver et en focalisant sur les effets du carbone et de l'azote qui sont les principaux facteurs limitant la croissance des plantes, avec le modèle CN-WHEAT (Barillot et *al.*, 2016). Le travail présent s'appuie sur ce modèle CN-WHEAT en l'étendant aux stades de croissance pré-floraison. Si le modèle est développé sur blé d'hiver, il est conçu de façon à être générique pour les Poacées.

Un premier chapitre introductif consiste en une analyse bibliographique qui a permis de dégager les deux principales hypothèses de modélisation :

- les concentrations locales en métabolites carbonés et azotés pilotent les vitesses d'allongement des feuilles et certains traits foliaires majeurs ;
- des règles de coordination entre les feuilles successives marquent la durée d'allongement des feuilles et les moments où sont définis certains traits foliaires majeurs.

Le chapitre 1 est dédié à la présentation du modèle et à l'évaluation de sa capacité à simuler de façon réaliste les traits foliaires et les traits de plante dans des conditions de croissance usuelles au champ.

Le chapitre 2 est consacré à l'évaluation de la capacité du modèle à simuler la plasticité phénotypique de la plante. Deux expérimentations virtuelles ont été réalisées. La première est un ensemble de simulations dans des conditions contrastées de densité de plante, de rayonnement et de fertilisation azotée. La seconde correspond à des simulations avec différents états initiaux de plante, dans plusieurs conditions de croissance. Ces deux expérimentations virtuelles ont conduit à certaines adaptations du modèle par rapport à la version initiale.

Le chapitre 3 présente les résultats d'une expérimentation qui avait deux objectifs :

- caractériser les conséquences d'un stress précoce transitoire sur la croissance de blé pour ensuite discuter la capacité de CN-Wheat à simuler cet impact en comparant les résultats expérimentaux aux simulations du chapitre 2 pour différents états initiaux de plante.
- recueillir des données sur la composition biochimique des organes, données nécessaires à la définition du modèle et à son évaluation.

La discussion générale synthétise les principaux résultats du travail, discute la fiabilité, les limites et les contraintes des principales hypothèses du modèle et dégage également des perspectives possibles à court, moyen et plus long terme.

Les chapitres sont présentés sous forme d'articles scientifiques. Un premier article a été publié dans la revue « *Journal of Experimental Botany* » et un second est accepté dans la revue « *In Silico Plants* ».

Comme le rapporte la discussion, l'étude ne montre pas de caractère prédictif du modèle compte tenu du nombre important de paramètres (160 environ) dont les deux tiers sont définis

à partir de la littérature. Aucune donnée n'existant pour les autres, des estimations sur la base de comportement attendu ont été utilisées. Au total, les résultats montrent que les hypothèses de modélisation sont plausibles et que la représentation pourrait aborder une gamme de conditions relativement large.

Parmi les perspectives, il est envisagé une extension à tout le cycle et la prise en compte de systèmes plus complexes qu'une culture annuelle et « pure » comme le blé d'hiver, comme les associations d'espèces. Il est toutefois souligné que la validation expérimentale préalable reste à effectuer et que celle-ci est limitée actuellement par l'absence de module de tallage dans le modèle.

La thèse est très facile à lire, chaque chapitre intègre un résumé des éléments marquants à retenir pour le développement du modèle. La version du modèle constitue une avancée notable par rapport à la version antérieure. Comme le souligne de manière très lucide l'auteure, alors que le modèle est déjà très lourd, il reste néanmoins de nombreuses étapes à réaliser avant d'obtenir un modèle opérationnel (module de tallage, validation expérimentale) et d'envisager toute extension à des systèmes réels. En parallèle, les systèmes de cultures évoluent en permanence et se diversifient (rotations plus longues avec de nouvelles espèces, associations d'espèces au sein des parcelles, semis de cultures sous couvert permanent ou pas). Il y a donc ici un défi majeur à anticiper ces changements dès maintenant dans la mesure où ces nouveaux systèmes pourraient amener à revoir les hypothèses de modélisation retenues dans le cas d'une espèce annuelle cultivée en culture principale. Néanmoins, le travail a permis de progresser dans l'intégration des réponses de la morphogénèse aux conditions de croissance.

Cette thèse traite avec rigueur, clarté et lucidité de la capacité de la modélisation à explorer le fonctionnement des plantes en interaction avec leur environnement dans un contexte changeant. Marion GAUTHIER a fait preuve de grande maîtrise des formalismes de modélisation, de capacité à acquérir des données expérimentales et d'une prise de recul sur son travail, qui est bienvenue.

Sa thèse présente un intérêt incontestable pour l'Académie d'agriculture, et apparaît pleinement éligible à figurer sur le site de l'Académie d'agriculture à titre de valorisation de ces travaux.