



innovations agronomiques

n°101 / Avril 2025

Connaissances et outils

**pour des démarches préventives
et opérationnelles en gestion
agroécologique des adventices**

Ce volume fait suite au Carrefour de l'innovation INRAE, organisé par Inrae, Agreenium et l'Institut Agro Dijon, les 26 et 27 novembre 2024 de restitution du projet sur les Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices (COPRAA).

/// Crédit photo : Aurélie BAQUET / INRAE





Innovations Agronomiques

Volume 101 – Avril 2025

Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices

Ce volume fait suite au carrefour de l'innovation INRAE, organisé par INRAE, Agreenium et l'Institut Agro Dijon, les 26 et 27 novembre 2024 de restitution du projet sur les Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices (COPRAA).

Directeur de la publication : Philippe Mauguin, Président directeur Général INRAE

Rédaction en chef : Christian Huyghe, Chargé de mission à la Direction Scientifique Agriculture INRAE, et Isabelle Litrico, Directrice Scientifique Agriculture INRAE

Coordination éditoriale : Aurélie Gauguery, Responsable des Carrefours de l'Innovation INRAE

Comité scientifique : Claire Rogel-Gaillard, Sophie Thoyer et Christian Lannou, Directrices et directeur scientifiques Agriculture adjoints ; Sophie Nicklaus, Directrice scientifique Alimentation et bioéconomie adjointe ; Alban Thomas et Pierre Renault, Directeurs scientifiques Environnement adjoints, INRAE ; Nathalie Munier-Jolain, Directrice générale déléguée à la science et à l'innovation adjointe, INRAE ; Isabelle Pion, Chargée de mission agroécologie et transition des systèmes agricoles, Direction de l'Appui aux Politiques Publiques, INRAE ; Marianne Sellam, Directrice scientifique et technique, ACTA, Luc Mounier, Enseignant-chercheur, VetAgro Sup ; Nicolas Brault, Directeur adjoint de l'unité de recherche Interact, Institut Polytechnique UniLaSalle ; Alessia Lefébure, Directrice, Sciences Po Aix.

Coordination scientifique du numéro : Nathalie Colbach, INRAE ; Aurélie Baquet, INRAE ; Frédérique Angevin, INRAE ; Delphine Moreau, INRAE ; Marie Flament, Agro-Transfert-RT

Initiée en 2007, la revue de transfert *Innovations agronomiques* a pour ambition de diffuser les savoirs et de favoriser les échanges entre les acteurs de la recherche et les professionnels de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement, et de faciliter leur appropriation par les acteurs de la chaîne de valeur agri-alimentaire (professionnels du secteur, chercheurs, conseillers, R&D, agriculteurs, enseignants et apprenants, décideurs publics, société civile, etc.). Elle complète la démarche générale de transfert des Carrefours de l'Innovation INRAE (<https://ciag.hub.inrae.fr/>) qui réunissent ces acteurs impliqués dans les travaux au cœur des défis mondiaux et sociétaux de notre siècle : production et performance économique, santé, changement climatique, raréfaction des ressources non renouvelables, préservation de la biodiversité, des ressources naturelles et de l'environnement, qualité de vie et des emplois...

La revue est une propriété d'INRAE, intégralement financée sur des fonds publics.

Revue en accès libre diamant, publiée par INRAE. Les articles sont relus et validés par des experts scientifiques et opérationnels.

Site de la revue : <https://ciag.hub.inrae.fr/revue-innovations-agronomiques>

Contact : innovations-agronomiques@inrae.fr

Adresse : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – 147 rue de l'Université – 75338 Paris Cedex 07

ISSN : 1958-5853 (édition électronique)

ISBN (PDF) : 978-2-7380-1477-1



ISBN (ePub) : 978-2-7380-1478-8

DOI : <https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol101>

Pour citer ce numéro : Collectif. (2025). *Innovations agronomiques, volume 101, avril 2025. Connaissances et outils pour des démarches préventives et opérationnelles en gestion agroécologique des adventices* (Version 1). Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. <https://doi.org/10.17180/innovagro-2025-vol101>

Photo de couverture : Aurélie Baquet / INRAE

Licence : CC BY 4.0



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Sommaire

Production de connaissances sur les processus et modélisation

Quentin COURNAULT, Nathalie COLBACH et Delphine MOREAU, 2025 - **Modéliser la compétition entre cultures et adventices pour l'eau pour la conception de stratégies de gestion des adventices agroécologiques et résilientes au changement climatique.**
Innovations Agronomiques 101, 1-15
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art01>

Solègne SKORUPINSKI, Hugues BUSSET, Jacques CANEILL, Delphine MOREAU, Brice MOSA, Eugène MOTTON et Nathalie COLBACH, 2025 - **Effets des opérations de travail du sol sur la fragmentation des racines du chardon des champs (Cirsium arvense).**
Innovations Agronomiques 101, 16-27
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art02>

Delphine MOREAU, Inès MAHE, Bruno CHAUVEL, Nathalie COLBACH, Stéphane CORDEAU, Aurélie GFELLER et Antje REISS, 2025 - **Le rôle de l'allélopathie dans la régulation des adventices : entre rêve et réalité.**
Innovations Agronomiques 101, 28-37
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art03>

Laurène PERTHAME, Sandrine PETIT et Nathalie COLBACH, 2025 - **La prédation des semences adventices par les carabes peut contribuer à réguler les adventices dans les systèmes de grande culture.**



Innovations Agronomiques 101, 38-47
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art04>

Evaluation de techniques innovantes avec des essais réels et virtuels (simulations)

Stéphane CORDEAU, Alicia ROUGE, Guillaume ADEUX, Hugues BUSSET, Céline COLOMBET, Rodolphe HUGARD, Emilien LAURENT, Juliette MARTIN, Annick MATEJICEK, Brice MOSA, Eric VIEREN, Delphine MOREAU et Jean-Philippe GUILLEMIN, 2025 - Rôle des couverts d'interculture et de leurs modes de destruction dans la régulation des adventices.

Innovations Agronomiques 101, 48-59
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art05>

Nathalie COLBACH, Judith BURSTIN et Delphine MOREAU, 2025 - Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion des adventices : Exemple du pois associé au blé.

Innovations Agronomiques 101, 60-73
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art06>

Pierre LEBRETON, Aurélie BAQUET, Laurent BEDOUSSAC, Catherine BONNET, Etienne-Pascal JOURNET, Éric JUSTES et Nathalie COLBACH, 2025 - Motifs de semis, traits et proportions d'espèces pour la gestion agroécologique des adventices dans les associations légumineuse-céréale.

Innovations Agronomiques 101, 74-84
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art07>

Stéphane CORDEAU, Bastien BOQUET, Philippe CHAMOY, Annick MATEJICEK, Brice MOSA, Bertrand OMON et Violaine DEYTIEUX, 2025 - Effet de l'écimage des adventices sur leurs nuisibilités.

Innovations Agronomiques 101, 85-93
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art08>

Nathalie COLBACH et Stéphane CORDEAU, 2025 - Gérer les adventices sans travail du sol ni herbicides n'est pas possible dans les systèmes de grande culture.

Innovations Agronomiques 101, 94-106
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art09>

Jeanne DELSAUT, Bastien BOQUET, Jean-Marc MEYNARD, Jérôme PERNEL et Marie FLAMENT, 2025 - Vers une meilleure maîtrise du laitron des champs en Hauts-de-France.

Innovations Agronomiques 101, 107-118
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art10>

Développement d'outils d'aide à la décision

Nathalie COLBACH, Nicolas CAVAN, Marie FLAMENT, Thibault MAILLOT, Delphine MOREAU, Jérôme PERNEL, Wilfried QUEYREL et Jean VILLERD, 2025 - La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides.

Innovations Agronomiques 101, 119-134
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art11>

Marianne CERF, Marie-Hélène JEUFFROY, Jean-Marc MEYNARD, Thibault LEFEUVRE, Wilfried QUEYREL et Lorène PROST, 2025 - Une analyse des situations d'usage pour concevoir des outils d'aide au changement de pratiques.

Innovations Agronomiques 101, 135-148
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art12>

Thibault MAILLOT, Mathieu CHANIS, Jean VILLERD, Wilfried QUEYREL, Laurène PERTHAME, Nicolas CAVAN, Jean-Baptiste VIOIX et Nathalie COLBACH, 2025 - OPTIFLORSYS : Un outil pour aider à la conception de stratégies agroécologiques de gestion d'adventices.



Innovations Agronomiques 101, 149-162
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art13>

Diagnostic et conception participative de systèmes de culture

Marie FLAMENT, Jérôme PERNEL et Pierre-Yves BERNARD, 2025 - **Diagnostic sociotechnique du salissement parcellaire en région Hauts-de-France.**

Innovations Agronomiques 101, 163-173
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art14>

Nicolas CAVAN, Jeanne ALEXANDRE, Claire GOETZ, Alice NIDRICHE, Lucille TRINH-QUY, Nathalie COLBACH, Wilfried QUEYREL et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **Apports d'outils d'évaluation dans des démarches de co-conception de systèmes de culture innovants pour la gestion durable des adventices.**

Innovations Agronomiques 101, 174-185
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art15>

Wilfried QUEYREL, Alice NIDRICHE, Thibault LEFEUVRE, Nathalie COLBACH, Nicolas CAVAN et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **Elaboration d'un guide méthodologique pour la co-conception de systèmes de culture afin de gérer durablement la flore adventice.**

Innovations Agronomiques 101, 186-200
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art16>

Bertrand OMON, Nicolas CAVAN, Nathalie COLBACH et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **Mobilisation de la connaissance, pour accompagner la transition vers des systèmes de culture gérant les adventices avec moins d'herbicides.**

Innovations Agronomiques 101, 201-216
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art17>

Christian HUYGHE, 2025 - **Conclusions du séminaire Copraa.**

Innovations Agronomiques 101, 217-223
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art18>

Articles additionnels

Gentiane MAILLET, Arnaud DUFILS, René BAUMONT, Sonia RAMONTEU et Frédérique ANGEVIN, 2025 - **L'introduction d'animaux en vergers et en vignes : une solution agroécologique pour gérer les adventices ?**

Innovations Agronomiques 101, 224-240
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art19>

Mathilde DIONISI, Marie-Hélène JEUFFROY, Louise PERRISSEAU, Priscila DUARTE MALANSKI et Jean-Marc MEYNARD, 2025 - **Capitaliser les pratiques d'agriculteurs innovants pour nourrir le conseil : exemple de l'abandon du glyphosate en grande culture.**

Innovations Agronomiques 101, 241-259
<https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art20>



Modéliser la compétition entre cultures et adventices pour l'eau pour la conception de stratégies de gestion des adventices agroécologiques et résilientes au changement climatique

Quentin COURNAULT^{1,2,3}, Nathalie COLBACH¹, Delphine MOREAU¹

¹ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

² Biogéosciences, UMR 6282 CNRS, Université de Bourgogne, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France

³ AgroParisTech, 91123 Palaiseau, France

Correspondance : delphine.moreau@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/ciag-2025-vol101-art01>

Résumé

FLORSYS est un modèle qui simule la dynamique pluriannuelle des adventices en grandes cultures en fonction du système de culture et pédoclimat. Il est utilisé pour évaluer des systèmes de culture en termes d'impacts des adventices sur la production et la biodiversité. Sa version actuelle prend en compte la compétition pour la lumière et pour l'azote entre plantes, mais pas pour l'eau, ce qui constitue un frein à l'utilisation du modèle dans un contexte de changement climatique, où la limitation en eau devrait devenir plus fréquente. Cet article présente la construction d'un module de compétition plante-plante pour l'eau pour FLORSYS, ancré sur ses variables préexistantes. Le prélèvement d'eau par les plantes y est fonction de la disponibilité en eau du sol, de la demande en eau de la plante ainsi que de la demande en eau des plantes voisines. En cas de prélèvement insuffisant, le module représente les impacts du stress hydrique sur la morphologie des plantes et la photosynthèse, en conjonction avec les stress azoté et lié à l'ombrage. Une fois évaluée, la nouvelle version de FLORSYS sera utilisée pour identifier des règles qui guideront la co-conception de systèmes durables et résilients face au changement climatique.

Mots-clés : Changement climatique, Modélisation mécaniste, Stress hydrique, Traits morphologiques, Compétition cultures-adventices, Diversité interspécifique

Abstract: Modelling crop–weed competition for water to design agroecological weed management strategies resilient to climate change

The FLORSYS model simulates the multi-annual weed dynamics in arable crops from cropping system and pedoclimate. It is used as a virtual field to evaluate cropping systems in terms of weed impacts on crop production and biodiversity. Its current version includes plant–plant competition for light and nitrogen, but not yet for water, which limits its use in the context of climate change, where lack of water is assumed to become more frequent. This article presents the construction of a plant–plant water competition submodel for FLORSYS, anchored on its pre-existing variables. In the submodel, plant water uptake is a function of soil water availability, plant water demand and the water demand of neighbouring plants. In the case of insufficient uptake, the submodel represents the impact of water stress on plant morphology and photosynthesis, in conjunction with nitrogen and shade stress. Once evaluated, the new FLORSYS version will be used to identify rules for guiding the co-design of sustainable and resilient systems to climate change.



Keywords: Climate change, Mechanistic modelling, Water stress, Morphological traits, Crop–weed competition, Interspecies diversity

1. Introduction

Les adventices concurrencent la culture principale pour les ressources indispensables à la croissance (lumière, minéraux, eau). Elles représentent la première cause biotique de pertes de rendement en grandes cultures (Oerke, 2006). La gestion de ces adventices est aujourd'hui confrontée à deux défis : d'une part la nécessité de réduire l'usage d'herbicides pour des raisons environnementales et sanitaires (Comoul and Mougin, 2024), et d'autre part l'impact du changement climatique. En effet, ce dernier va réduire la disponibilité future d'une ressource-clé pour les plantes : l'eau du sol (Fatima *et al.*, 2022). D'une part, l'augmentation des températures induit une plus forte transpiration végétale et donc une hausse de la demande en eau par les plantes (Dinpashoh *et al.*, 2019). D'autre part, la modification du cycle annuel des précipitations se caractérise par (1) une diminution de l'occurrence et (2) une intensification des pluies, en particulier sur les sols secs (Seneviratne *et al.*, 2010). Cela entraîne une diminution des pluies efficaces responsables du remplissage de la réserve utile en eau pour les plantes, et donc une baisse de l'offre en eau.

La raréfaction de l'eau pourra amplifier la compétition cultures–adventices pour l'eau et leurs besoins en eau ne seront plus satisfaits (Zimdahl, 2004). Le stress hydrique résultant pourra impacter leur croissance et modifier leur morphologie selon les espèces et les stades de développement (ex : diminution de la surface foliaire, augmentation de l'allocation de biomasse aux racines) (Farooq *et al.*, 2009 ; Moreau *et al.*, 2022).

La gestion des adventices doit donc être entièrement repensée. D'une part, les herbicides doivent être remplacés par une combinaison de techniques culturales essentiellement préventives et à effet partiel. D'autre part, ces combinaisons doivent réduire la compétition cultures–adventices pour l'eau et/ou rendre les cultures moins sensibles au stress hydrique. Pour tester une large gamme de combinaisons et identifier celles permettant de répondre à ces objectifs, nous avons besoin de modèles des effets des systèmes de culture, en interaction avec le pédoclimat, sur le complexe cultures–adventices.

FLORSYS est aujourd'hui le modèle le plus complet en termes de techniques culturales, d'interactions cultures–adventices et d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité (Colbach *et al.*, 2019a, 2021, 2024 ; Moreau *et al.*, 2021). Ce modèle a déjà été utilisé comme outil d'aide à la (re)conception de systèmes de culture innovants (Omon *et al.*, 2024 ; Queyrel *et al.*, 2023) et d'anticipation de la nuisibilité adventice future (Cavan *et al.*, 2020). Cependant, FLORSYS ne prend pas en compte l'ensemble des mécanismes importants pour le changement climatique, en particulier la compétition pour l'eau, et ne peut donc pas encore entièrement évaluer les conséquences du changement climatique pour la gestion des adventices.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de proposer un nouveau module pour FLORSYS qui représente la compétition plante–plante pour l'eau ainsi que ses conséquences sur la morphologie et la croissance des plantes adventices et cultivées.

2. Cadre de modélisation

2.1. FLORSYS : un modèle mécaniste simulant la flore adventice et ses conséquences en grande culture

FLORSYS est un modèle mécaniste qui simule, au pas de temps quotidien, les effets des opérations culturales sur les processus biophysiques déterminant la dynamique pluriannuelle des cultures et des adventices et les conséquences sur la production agricole et la biodiversité (Colbach *et al.*, 2019a,

2021). FLORSYS prend en entrée (1) le stock initial de semences d'adventices (généralement estimé à partir de statistiques régionales), (2) le pédoclimat journalier (jeux de données historiques de Météo France ou projections climatiques) et (3) les caractéristiques du système de culture testé (espèces et variétés, rotations, opérations culturales). Le modèle simule ensuite des variables d'état quotidiennes décrivant le sol (température, teneur en eau, etc.), les semences de cultures et d'adventices (viabilité, dormance, etc.) et les plantes (biomasse, surface foliaire, hauteur, etc.). Le couvert est décrit en 3D et de manière individu-centré, c'est-à-dire que la position et la morphologie de chaque plante adventice ou cultivée est représentée dans la parcelle virtuelle en 3D. Pour simplifier la comparaison des systèmes de culture testés, le modèle fournit aussi en sortie une série d'indicateurs évaluant la production des cultures (rendement), l'impact des adventices sur cette production (pertes de rendement, salissement des champs, etc.) et sur la biodiversité (offre trophique pour les abeilles, etc.).

La version actuelle de FLORSYS inclut déjà la compétition plante-plante pour la lumière (Munier-Jolain et al., 2013) et l'azote (Moreau et al., 2021). Ces processus sont simulés à l'échelle de voxels (pixels 3D), qui constituent le grain spatial (unité de base) de FLORSYS (**Figure 1**). FLORSYS intègre aussi l'effet du potentiel hydrique du sol sur la germination-levée des semences, mais pas la compétition plante-plante pour l'eau après la levée des plantes.

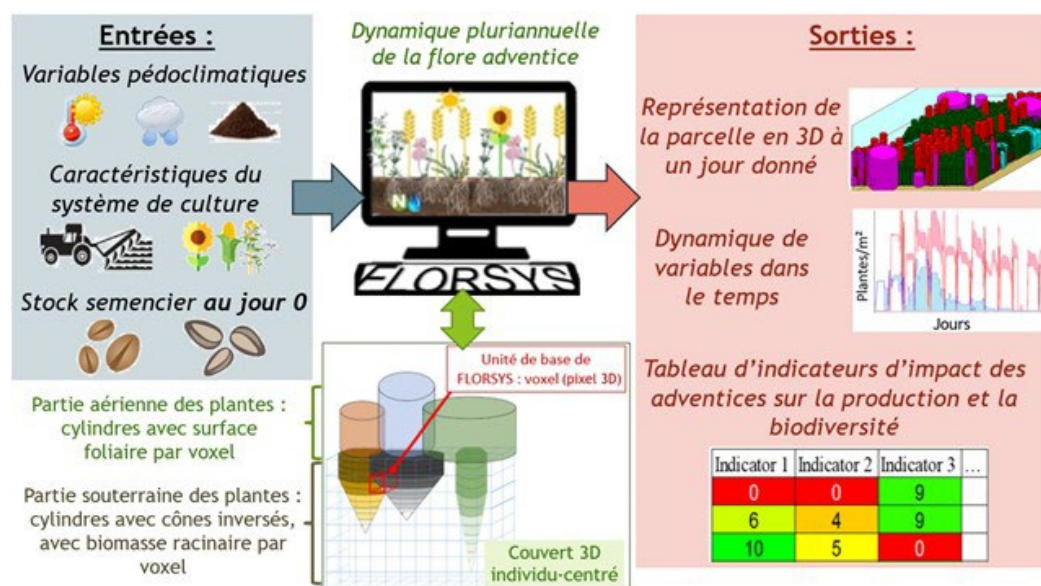


Figure 1 : Représentation schématique du fonctionnement de FlorSys (Colbach et al., 2021). FlorSys simule le cycle de vie de chaque plante (cultivée et adventice) dans la parcelle : c'est un modèle individu-centré. Les plantes sont représentées de manière simplifiée et peuvent être visualisées en 3D. Le grain spatial de base dans FlorSys est le voxel (pixel 3D), à l'échelle duquel les processus de compétition pour les ressources sont modélisés.

2.2. Principes pour modéliser la compétition plante-plante pour l'eau

Dans leur étude, Aschehoug et al. (2016) distinguent le mécanisme de compétition pour l'eau et les conséquences de la compétition pour l'eau sur la croissance des plantes. Le nouveau module pour FLORSYS est construit sur cette base avec deux parties imbriquées (**Figure 2**). Il représente (1) l'état hydrique du sol et le prélèvement de l'eau par les plantes à l'échelle du voxel pour calculer l'éventuel stress hydrique subi par la plante et (2) les conséquences du stress induit par la compétition pour l'eau sur la croissance à l'échelle de la plante, en interaction avec les effets du stress azoté et de l'ombrage, déjà implémentés dans FLORSYS (Moreau et al., 2021 ; Munier-Jolain et al., 2013).



La modélisation suit trois principes :

1. Ancrer le nouveau module de compétition pour l'eau sur les variables pré-existantes dans FLORSYS et le connecter avec les autres modules de FLORSYS (phénologie, azote, lumière entre autres) ;
2. Lorsque cela est possible, adapter des formalismes existants dans d'autres modèles ou dans d'autres modules de FLORSYS (par exemple le module de compétition pour l'azote) ; sinon, réaliser des expérimentations en conditions contrôlées et définir de nouveaux formalismes adaptés à nos besoins ;
3. Construire un module générique, c'est-à-dire dont les équations sont valides pour l'ensemble des espèces et des stades phénologiques inclus dans FLORSYS. Les espèces sont alors distinguées par différentes combinaisons de valeurs de paramètres.

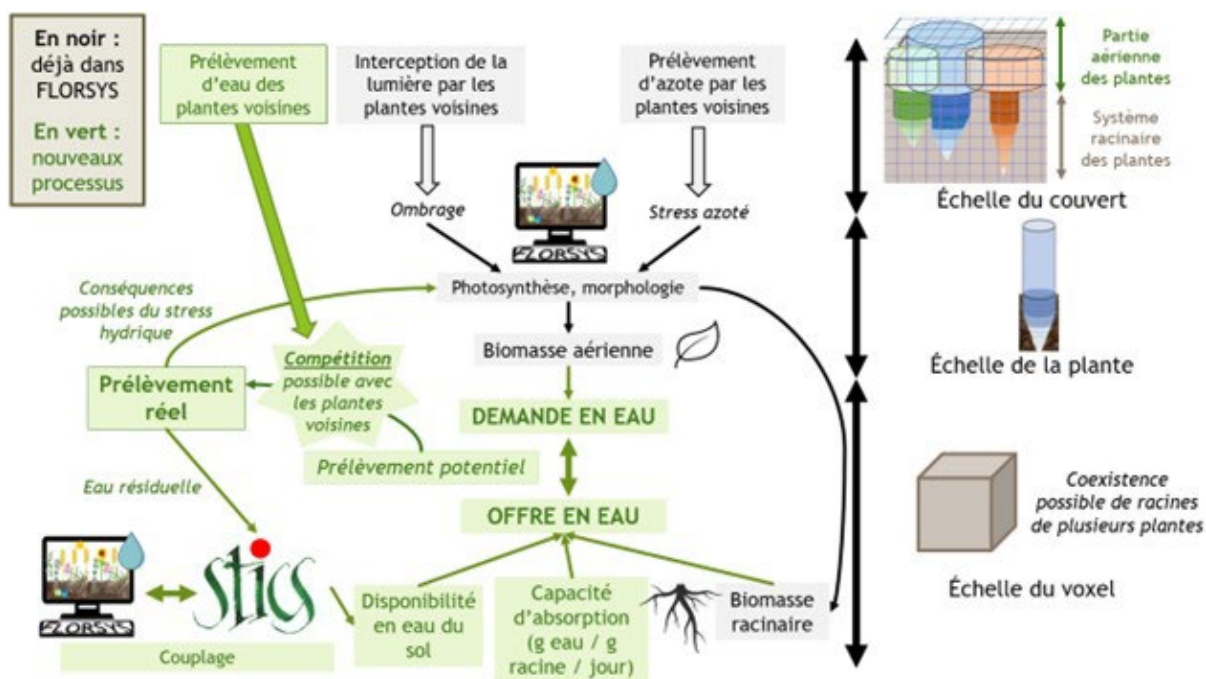


Figure 2 : Organisation multi-échelles (voxel, plante, canopée) du module de compétition pour l'eau (adapté de Cournault *et al.* (2024b)).

3. Comment modéliser l'offre, la demande et le prélèvement de l'eau ?

Chaque jour, le nouveau module calcule la quantité d'eau totale prélevée par chaque plante dans la parcelle virtuelle FLORSYS en sommant les quantités prélevées dans les voxels de sol où elle possède des racines. Dans chaque voxel, la quantité prélevée dépend de (1) l'eau disponible pour la plante et (2) de la demande de la plante et (3) de l'éventuelle compétition qui peut subvenir entre les plantes qui y possèdent des racines.

3.1. L'offre en eau

Dans un voxel, l'eau disponible pour une plante dépend de l'offre en eau du sol ainsi que de la quantité maximale d'eau que ses racines lui permettent de récupérer. Il n'est pas nécessaire de recréer des formalismes pour simuler l'offre en eau du sol, car ce mécanisme est déjà bien représenté dans de nombreux modèles. Nous avons donc couplé le module de compétition pour l'eau à un modèle mécaniste de culture (STICS, Brisson *et al.*, (2008)), dont le module sol calcule l'offre journalière en eau

des couches de sol en simulant les principaux mécanismes hydrologiques (ruissellement, infiltration, percolation) à partir de différentes variables (précipitations, type de sol...). L'eau présente dans les couches de sol STICS est alors répartie dans les voxels FLORSYS, selon le schéma présenté en **Figure 3**.

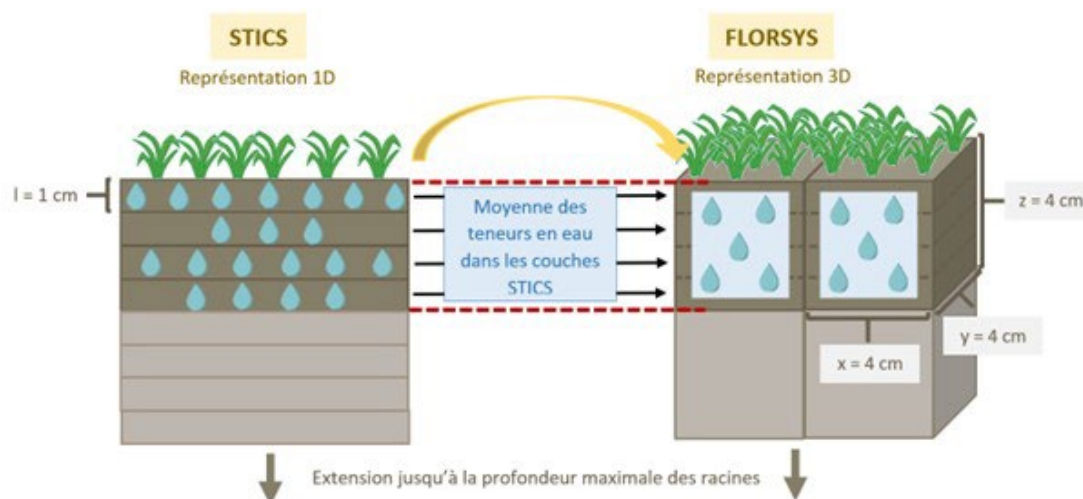


Figure 3 : Répartition de l'eau des couches STICS dans les voxels FlorSys (adapté de Cournault *et al.*, 2023). Exemple pour des voxels de dimension $4 \times 4 \times 4$ cm. Le nombre de gouttes d'eau correspond à la concentration en eau de chaque couche STICS. Tous les voxels FlorSys d'une même couche z contiennent la même teneur en eau.

Cependant, l'intégralité de l'offre en eau du voxel n'est pas forcément disponible pour la plante. Sa capacité à accéder à cette eau dépend de la biomasse racinaire qu'elle a dans le voxel (calculée chaque jour dans FLORSYS) et de la capacité d'absorption de ses racines (en g eau / g racine / jour). Ce paramètre a été calculé pour 12 espèces de FLORSYS, dans des expérimentations en conditions contrôlées, en quantifiant la quantité d'eau absorbée par les racines de plantes cultivées en pots individuels, en conditions hydriques optimales (travaux de Couchoud *et al.*, 2020 ; Cournault *et al.*, 2024). Pour les espèces non testées en expérimentation, ce paramètre est estimé sur la base du clade d'appartenance (monocotylédones / dicotylédones). Les dicotylédones ont alors une capacité d'absorption racinaire 2,5 fois plus importante que les monocotylédones dans FLORSYS.

3.2. La demande en eau

La demande en eau d'une plante est calculée chaque jour en répartissant la demande en eau globale de la canopée aux plantes individuelles, à l'aide de formalismes adaptés du modèle de croissance d'espèces prairiales « Virtual Grassland » (Louarn and Faverjon, 2018).

La demande de la canopée dépend de trois variables principales : l'indice de surface foliaire (cm^2 feuilles / cm^2 sol, prédit par FLORSYS), l'évapotranspiration potentielle de Penman-Monteith (mm, une variable d'entrée provenant de relevés météorologiques ou de projections climatiques futures) et le coefficient cultural de la canopée. Ce coefficient ajuste l'évapotranspiration potentielle selon l'abondance relative des espèces présentes dans la parcelle (Allen *et al.*, 1998). La demande de la canopée est ensuite répartie sur les différentes plantes de la parcelle au prorata du rayonnement qu'elles interceptent au cours de la journée (Louarn and Faverjon, 2018) et prédit par FLORSYS. Enfin, la demande en eau totale de la plante est distribuée dans les voxels de sol en fonction de la biomasse de racines qu'elle y possède, ainsi que selon l'offre en eau des voxels (Maurel and Nacry, 2020) : à biomasse racinaire égale dans deux voxels de sol, une plante cherchera à prélever davantage dans le voxel qui contient le plus d'eau.



3.3. Prélèvement et compétition éventuelle pour l'eau

La confrontation de l'eau disponible et de la demande en eau permet de déterminer dans chaque voxel de sol la quantité d'eau que chaque plante pourrait récupérer au maximum : c'est le prélèvement potentiel. Cependant, il existe des situations où plusieurs plantes possèdent des racines dans un même voxel dont l'eau disponible ne permet pas de satisfaire l'ensemble des demandes : il y a alors compétition pour la ressource (Zimdahl, 2004). Dans ce cas, l'eau du voxel est répartie au prorata des prélèvements potentiels de chaque plante dans le voxel. Sur le modèle de ce qui est fait pour l'azote (Moreau *et al.*, 2021), une boucle de compensation sur les voxels est réalisée suite à la première boucle de prélèvements, afin de réattribuer une partie de l'eau résiduelle dans certains voxels aux plantes qui y possèdent des racines et dont la demande n'a pas été totalement satisfaite. Suite à ces deux boucles, la quantité d'eau totale absorbée par chaque plante de la parcelle peut être calculée.

3.4. Stress hydrique

La plante subit un stress hydrique si le prélèvement d'eau ne permet pas de satisfaire la demande. Ce stress peut être causé par (1) de la compétition ardue avec les plantes voisines, (2) une quantité insuffisante de pluies efficaces (qui remplissent la réserve utile en eau pour les plantes) ou (3) un système racinaire insuffisant pour faire face à la demande, même en l'absence de plantes voisines.

Pour chaque jour de simulation et pour chaque plante, le modèle calcule un indice de stress hydrique qui affectera la photosynthèse et la morphologie de la plante. Cet indice correspond à la proportion de la demande en eau qui n'a pas été satisfaite. Pour tenir compte des stress passés, l'indice est calculé sur la durée de vie de la plante (depuis l'émergence), avec un poids plus important donné aux limitations en eau les plus récentes, selon le même principe que pour l'indice d'ombrage (Munier-Jolain *et al.*, 2014). En cohérence avec l'indice d'ombrage et l'indice de stress azoté déjà introduits dans FLORSYS (Moreau *et al.*, 2021 ; Munier-Jolain *et al.*, 2013), les valeurs de l'indice de stress hydrique varient de 0 (la demande en eau de la plante est satisfaite) à 1 (il n'y a pas de prélèvement d'eau pour satisfaire la demande de la plante).

4. Conséquences du stress hydrique sur la morphologie et la photosynthèse

4.1. Formaliser la réponse morphologique des plantes au stress hydrique

4.1.1. Principe de l'expérimentation

La compétition pour l'eau conduit certaines plantes à ne pas prélever à hauteur de leur demande et donc à un stress hydrique. Si certaines études montrent (1) que le stress hydrique a des conséquences sur la morphologie des plantes et (2) que cette plasticité morphologique dépend des espèces et des stades (Moreau *et al.*, 2022), peu d'études fournissent des données sur les adventices (Chahal *et al.*, 2018 ; Zhou *et al.*, 2020) et à des stades phénologiques avancés (végétatif / reproducteur) (Singh *et al.*, 2022). Par conséquent, notre équipe a réalisé des expérimentations en conditions contrôlées (Cournault *et al.*, 2024a ; Moreau *et al.*, 2022) afin de :

- suivre la réponse morphologique d'une gamme de cinq espèces adventices et deux espèces cultivées (décrites dans le Tableau 1) au stress hydrique, en mesurant quatre traits morphologiques des plantes soumises à différents niveaux de stress hydrique ;
- traduire ces résultats en une équation prédisant cette réponse morphologique en fonction du stress et de deux paramètres spécifiques de la combinaison trait × espèce × stade ;
- caractériser la variabilité inter-espèces et inter-stades des réponses.



Tableau 1 : Caractéristiques des espèces testées (adapté de Cournault *et al.* (2024a)). Les espèces testées sont fréquemment retrouvées dans les grandes cultures françaises et peuvent lever au cours d'une ou plusieurs saisons (d'après Gardarin *et al.* (2010)), abrégées comme suit : A = automne ; H = hiver ; P = printemps ; E = été. La saison de levée principale est écrite en gras.

Code espèce (EPPO)	Nom commun de l'espèce	Clade	Famille	Statut	Saison de germination
ABUTH	Abutilon de Théophraste	Dicotylédone	Malvacée	Adventice	P - E
ALOMY	Vulpin des champs	Monocotylédone	Poacée	Adventice	A - H - P
AVEFA	Folle avoine	Monocotylédone	Poacée	Adventice	A - H - P
BRSNN	Colza (variété Kador)	Dicotylédone	Brassicacée	Culture	A
GERDI	Géranium à feuilles découpées	Dicotylédone	Geraniacée	Adventice	A - P
MATIN	Matricaire inodore	Dicotylédone	Asteracée	Adventice	A - H - P - E
TRZAW	Blé tendre d'hiver (variété Calumet)	Monocotylédone	Poacée	Culture	A - H

4.1.2. Traits morphologiques mesurés

Les quatre traits morphologiques mesurés sont utilisés dans FLORSYS et jouent un rôle clé dans la compétition pour la lumière (Colbach *et al.*, 2019b) et l'azote (Perthame *et al.*, 2022). Deux traits décrivent la manière dont les plantes répartissent la biomasse entre les différents compartiments (traits d'allocation de la biomasse) :

- le ratio biomasse racinaire / biomasse totale (Root Biomass Ratio RBR, en g/g) reflète la proportion de biomasse allouée aux racines et donc la capacité à explorer le sol pour y prélever eau et nutriments. Plus sa valeur est élevée, plus les plantes favorisent la croissance des racines au détriment de celle des parties aériennes ;
- le ratio biomasse foliaire / biomasse aérienne (Leaf Biomass Ratio LBR, en g/g) reflète la proportion de biomasse aérienne allouée aux feuilles et donc l'interception de la lumière. Plus sa valeur est élevée, plus les plantes favorisent la production de la surface d'interception de la lumière aux dépens de celle des tiges.

Deux autres traits décrivent la façon dont la biomasse est transformée en volume :

- le ratio surface foliaire / biomasse foliaire, également appelé surface foliaire spécifique (Specific Leaf Area SLA, en cm²/g), reflète la capacité à traduire la biomasse foliaire en surface foliaire pour l'interception de la lumière. Des valeurs élevées indiquent de grandes feuilles par unité de biomasse foliaire (et donc des feuilles fines), tandis que des valeurs faibles indiquent des feuilles plus petites par unité de biomasse foliaire (et donc des feuilles épaisses) ;
- le ratio hauteur / biomasse aérienne (Height Biomass Ratio HBR, en cm/g) reflète la capacité à croître en hauteur à partir d'une biomasse aérienne donnée et, par conséquent, à dominer la canopée pour l'interception de la lumière. Plus ce ratio est élevé, plus les plantes sont hautes pour une biomasse aérienne donnée.

4.1.3. Estimation des paramètres de réponse des espèces au stress hydrique

Pour chaque combinaison de trait × espèce × stade, une régression non-linéaire à deux paramètres a été ajustée aux valeurs de traits mesurées en fonction d'un indice de stress hydrique basé sur la physiologie de la plante. La figure 4 montre un exemple de régression pour la surface foliaire spécifique



(SLA). Plus le stress hydrique augmente, plus la surface foliaire spécifique diminue. En d'autres termes, les feuilles deviennent plus petites et plus épaisses.

Au final, quatre équations à deux paramètres caractérisent la réponse des traits morphologiques des espèces au stress hydrique dans le module de compétition pour l'eau rajouté à FLORSYS. L'un des paramètres (SLA_{sx} pour la SLA dans la figure 4) correspond à la morphologie attendue pour la combinaison espèce × stade en l'absence de stress hydrique, et l'autre ($SLA_{resist_{sx}}$ pour la SLA) est le paramètre de réponse de la combinaison espèce × stade au stress hydrique. Pour la SLA, plus la résistance est élevée, plus l'espèce est capable de maintenir des feuilles larges et fines (qui transpirent plus) en cas de manque d'eau.

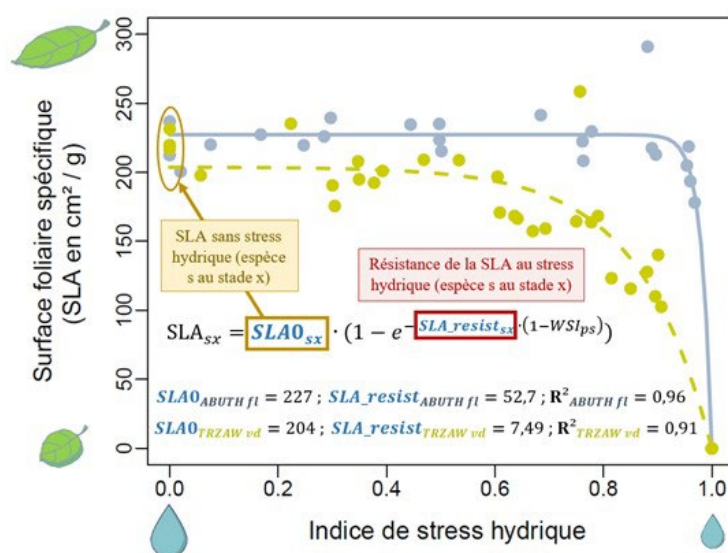


Figure 4 : Formalisation de la réponse de la surface foliaire spécifique au stress hydrique pour FlorSys, sur l'exemple de l'espèce *Abutilon theophrasti* (ABUTH) au stade floraison (fl) et blé tendre d'hiver (TRZAW) au stade début végétatif (vd). L'indice de stress hydrique prend des valeurs allant de 0 (pas de stress hydrique) à 1 (stress hydrique maximal). Chaque point correspond à une plante. Dans l'équation, « WSI_{ps} » est l'indice de stress hydrique (sans dimension) pour la plante p au stade s.

4.2. Le stress hydrique induit des tendances générales de réponse morphologique chez les plantes

Sur l'ensemble des espèces et stades étudiés, les traits morphologiques répondent de différentes manières face à l'augmentation du stress hydrique (**Tableau 2**).

Les deux traits de « transformation de la biomasse en volume » sont très sensibles au stress hydrique. (1) La surface foliaire spécifique (SLA) est le trait morphologique le plus plastique face à l'augmentation du stress hydrique. À biomasse foliaire constante, les feuilles voient leur surface foliaire diminuer (elles deviennent plus petites et plus épaisses) à mesure que le stress augmente : ce mécanisme permet de limiter la demande en eau requise pour la photosynthèse (Poorter *et al.*, 2009). (2) Le ratio de hauteur sur biomasse aérienne (HBR) est lui aussi très sensible à l'augmentation du stress hydrique et connaît une augmentation exponentielle. Lorsque la croissance ralentit suite au stress (et produit moins de biomasse aérienne), ce mécanisme permet aux plantes de rester grandes et de conserver le plus possible un accès à la lumière, indispensable pour réaliser la photosynthèse et continuer à croître (Moreau *et al.*, 2022).

Au contraire, les deux traits d'allocation de biomasse répondent de manière moins importante au stress hydrique. (1) Le ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale (RBR) augmente de manière exponentielle avec le stress hydrique pour plus de la moitié des combinaisons espèce × stade, mais l'amplitude de réponse est beaucoup moins importante que pour le ratio de hauteur sur biomasse aérienne (HBR). Ce mécanisme permet de compenser la sécheresse en explorant mieux le sol pour augmenter le prélèvement en eau (Brouwer, 1962 ; Carretero *et al.*, 2014). (2) Le ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne (LBR) est le seul trait dont le sens de réponse au stress hydrique varie selon les combinaisons espèce × stade : il peut diminuer (en particulier pour les espèces

monocotylédones), rester stable ou augmenter (en particulier chez les dicotylédones et au stade floraison) en réponse au stress hydrique.

Derrière ces réponses générales, il existe pour chacun des traits morphologiques une diversité de réponses au stress hydrique selon les combinaisons espèce × stade.

Tableau 2 : Réponses globales des traits morphologiques au stress hydrique. Pour chaque trait, la couleur des flèches indique le sens de réponse (↑ augmentation, ↓ diminution) et la taille des flèches indique la sensibilité du trait morphologique au stress hydrique.

Trait morphologique	Unité	Réponse au stress hydrique	Variation relative lorsque le stress hydrique passe de 0 à 1
Surface foliaire spécifique (surface foliaire / biomasse foliaire)	SLA / cm^2/g	↓	- 100 % pour toutes les combinaisons espèce × stade
Ratio de hauteur sur biomasse aérienne HBR	cm/g	↑	+ 10 % à + 990 %
Ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale RBR	g/g	↑	0 % à + 300 %
Ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne LBR	g/g	↑ ↓	- 15 % à + 60 %

4.3. Une diversité de réponses selon les espèces et les stades et des stratégies privilégiées devant être modélisés

Afin de caractériser la diversité des réponses des espèces selon leurs stades phénologiques, nous avons réalisé une analyse en composante principale (**Figure 5**). Les variables affichées sont les paramètres de réponse des traits morphologiques au stress hydrique estimés à l'aide des régressions non-linéaires à la section 3.1. (exemple du paramètre de résistance de la surface foliaire spécifique au stress hydrique, **figure 4**), et utilisés ici comme indicateurs de diversité. Les combinaisons espèce × stade sont également représentées et réparties dans des clusters (groupes homogènes) ayant des réponses similaires au stress hydrique. Trois stratégies sont identifiées :

- Diminuer la demande en eau à biomasse foliaire constante (= diminuer la surface foliaire spécifique SLA dès les faibles niveaux de stress hydrique)
- Augmenter le prélèvement d'eau (= augmenter l'allocation de biomasse racinaire RBR)
- Conserver l'accès à la lumière à biomasse aérienne constante (= augmenter le ratio hauteur / biomasse aérienne HBR)

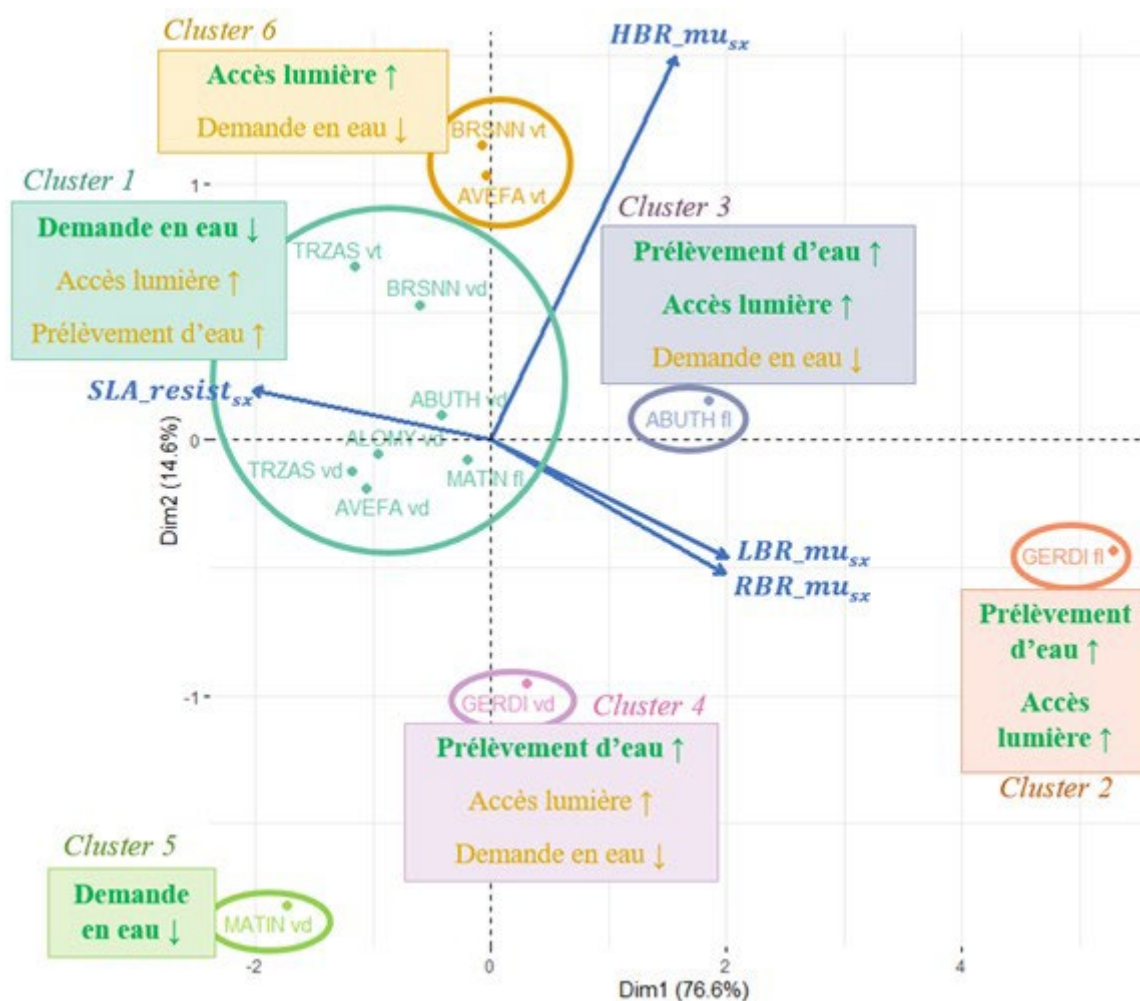


Figure 5 : Typologie de réponses des espèces au stress hydrique, selon leur stade phénologique (adapté de Cournault *et al.* (2024)). Les paramètres de réponse des quatre traits morphologiques au stress hydrique sont les variables de l'analyse en composante principale ($SLA_{resist_{sx}}$ pour la surface foliaire spécifique, $LBR_{mu_{sx}}$ pour le ratio de biomasse foliaire sur biomasse aérienne, $RBR_{mu_{sx}}$ pour le ratio de biomasse racinaire sur biomasse totale et $HBR_{mu_{sx}}$ pour le ratio de hauteur sur biomasse aérienne). Les combinaisons espèce (décrites dans le Tableau 1) $\times$ stade phénologique (vd : végétatif début ; vt : végétatif tardif ; fl : floraison) ont été regroupées en clusters par la méthode HCPC (Classification Hiérarchique sur Composantes Principales). Les stratégies impliquées dans la réponse au stress hydrique sont indiquées pour chaque cluster (stratégies majeures en vert et mineures en jaune) : augmentation ($\uparrow$) du prélèvement d'eau ou de l'accès à la lumière, diminution ($\downarrow$) de la demande en eau par unité de biomasse foliaire.

La majorité des combinaisons espèce $\times$ stade phénologique mobilise l'ensemble des trois stratégies, mais de manière plus ou moins forte selon les stades. Aux stades les plus avancés de la croissance (végétatif tardif, floraison), certaines espèces ou groupes d'espèces vont même jusqu'à se spécialiser en mobilisant seulement une ou deux stratégies. Ainsi, même si le stress augmente, la matricaire inodore (MATIN) ne fait que diminuer sa demande en eau par unité de biomasse foliaire alors que le géranium à feuilles découpées (GERDI) mobilise l'ensemble des stratégies sauf celle-ci (prélèvement d'eau, accès à la lumière).

Cette diversité de comportements modifie les conditions de compétition pour les ressources et plus largement les interactions entre plantes. Cependant, il semble y avoir un compromis entre compétition



pour la lumière et celle pour l'eau. En effet, la réduction de la demande en eau et l'augmentation du prélèvement d'eau se font au détriment de l'interception de la lumière puisqu'elles sont accompagnées de feuilles plus petites et d'un système racinaire plus étendu (laissant moins de biomasse aux feuilles). Le gagnant dépend donc du pédoclimat journalier et des capacités des plantes voisines, un système trop complexe pour tirer des conclusions sans modéliser les différents processus impliqués.

4.4. Conséquences du stress hydrique sur la photosynthèse

Le stress hydrique n'impacte pas seulement la morphologie des plantes, mais aussi la photosynthèse. Cet effet a été inclus dans le module de compétition pour l'eau pour FLORSYS, avec une diminution de la photosynthèse proportionnelle au stress hydrique de la plante. Ce formalisme simple s'inspire de deux modèles de culture (APSIM et DSSAT) (Ritchie, 1998 ; Zheng *et al.*, 2015), et est similaire au formalisme utilisé pour l'effet du stress azoté par FLORSYS (Moreau *et al.*, 2021).

4.5. Coupler les effets des stress hydrique, azoté et de l'ombrage

Une plante située dans un champ peut subir plusieurs limitations en ressources (eau, lumière, azote), en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques des plantes voisines. Pour tenir compte de ces interactions, les impacts du stress hydrique sur la croissance doivent être modélisés en interaction avec les impacts de l'ombrage (Munier-Jolain *et al.*, 2013) et du stress azoté (Moreau *et al.*, 2021). Le **Tableau 3** synthétise les impacts des différents stress sur les traits morphologiques dans FLORSYS. Lorsque plusieurs stress agissent dans le même sens sur un trait morphologique, seul l'effet du stress le plus fort est pris en compte. Au contraire, quand deux stress ont des effets opposés sur un trait morphologique, ces stress se compensent.

Tableau 3 : Effets des stress hydrique, azoté et ombrage sur les traits morphologiques (Cournault *et al.*, 2024a). La couleur des flèches indique le sens de réponse (↑ augmentation, ↓ diminution, 0 stable) et la taille des flèches indique la sensibilité du trait morphologique au stress hydrique.

Type de stress	Trait morphologique			
	Surface foliaire spécifique (SLA)	Ratio hauteur / biomasse aérienne (HBR)	Ratio biomasse foliaire / aérienne (LBR)	Ratio biomasse racinaire / totale (RBR)
Stress hydrique	↓	↑	↑ ↓	↑
Stress azoté (Perthame <i>et al.</i> , 2022, 2020 ; Pointurier <i>et al.</i> , 2021)	↓	↑ ↓	↑ ↓	↑
Ombrage (Colbach <i>et al.</i> , 2020 ; Munier-Jolain <i>et al.</i> , 2014 ; Pointurier <i>et al.</i> , 2021)	↑	↑	↑ ↓	0

5. Conclusion et perspectives

Le module de compétition pour l'eau étend le domaine de validité de FLORSYS à des situations de limitation en eau. De nouvelles séries d'expérimentations au printemps 2024 ont permis de paramétrer sept nouvelles espèces sur la base de leurs réponses au stress hydrique. La nouvelle version de



FLORSYS sera évaluée sur sa capacité à reproduire les dynamiques historiques de flore adventice (et ses conséquences) observées dans 10 systèmes de grandes cultures de la plateforme expérimentale INRAE de Dijon-Bretenières (présentés dans Pointurier *et al.* (2021)). Avec ce module, FLORSYS devient le premier modèle de dynamique de flore adventice en grandes cultures à simuler la compétition pour les trois ressources nécessaires à la croissance des plantes : l'eau, la lumière et l'azote.

Cette version de FLORSYS sera utilisée pour étudier les impacts du changement climatique sur la nuisibilité adventice en grandes cultures à l'échelle de la France métropolitaine. L'intégration de projections climatiques à haute résolution dans FLORSYS (Skamarock *et al.*, 2019 ; Xu *et al.*, 2021) permettra de modéliser les trajectoires futures des espèces adventices et d'évaluer leurs impacts dans des milliers de systèmes de culture en place dans diverses régions agricoles.

À partir des traits des adventices les plus dommageables pour les rendements, nous proposerons des règles pour guider la co-conception de systèmes de cultures répondant au triple objectif d'économie en herbicides, résilience face au changement climatique, et faible impact des adventices sur le rendement.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats de cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de cet article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Quentin Cournault : <https://orcid.org/0009-0003-1513-6154> ;

Nathalie Colbach : <https://orcid.org/0000-0002-3791-037X> ;

Delphine Moreau : <https://orcid.org/0000-0003-2640-9931>.

Contributions des auteurs

Tous les auteurs ont participé au développement du modèle et à la rédaction de cet article.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel de la plateforme 'serres_4PMI' de l'INRAE Dijon pour son assistance technique lors de l'expérimentation en serre, Marion Prudent (Agroécologie, INRAE, 21000 Dijon, France) pour ses conseils et son aide dans la paramétrisation et Gaëtan Louarn et Romain



Barillot (P3F - Prairies et plantes fourragères, INRAE, 86600 Lusignan, France) pour les discussions sur la construction du module.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a été soutenu par INRAE, le Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (thèse de Quentin Cournault), les projets COPRAA (financé par l'Office Français de la Biodiversité), ANR PPR SPECIFICS (ANR-20-PCPA-0008, www6.inrae.fr/specifics/), ANR PPR MoBiDiv (ANR-20-PCA-0006, www6.inrae.fr/mobidiv/), financés par le programme prioritaire de recherche français « Cultiver et protéger autrement » (PPR-CPA, ANR), ainsi que le projet Horizon Europe IntercropVALUES (N°101081973) de l'Union Européenne.

Références bibliographiques

- Allen R., Pereira L., Daes D., Smith M., 1998. Chapter 6 - ETc - Single crop coefficient (Kc), dans: Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.
- Aschewhug E.T., Brooker R., Atwater D.Z., Maron J.L., Callaway, R.M., 2016. The Mechanisms and Consequences of Interspecific Competition Among Plants. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 47, 263–281. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032123>
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parametrisation of the STICS crop model, Update Sciences and Technologies. Quae Editions, Versailles.
- Brouwer R., 1962. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Neth. J. Agric. Sci.* 10, 399–408. <https://doi.org/10.18174/njas.v10i5.17581>
- Carretero R., Bert F.E., Podestá G., 2014. Maize root architecture and water stress tolerance: an approximation from crop models. *Agron. J.* 106, 2287–2295. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0214>
- Cavan N., Castel T., Pergaud J., Angevin F., Colbach, N., 2020. Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. *Innov. Agron.* 81, 209–225. <https://doi.org/10.15454/fqye-3778>
- Chahal P.S., Irmak S., Jugulam M., Jhala A.J., 2018. Evaluating effect of degree of water stress on growth and fecundity of Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) using soil moisture sensors. *Weed Sci.* 66, 738–745. <https://doi.org/10.1017/wsc.2018.47>
- Colbach, N., Colas, F., Cordeau, S., Maillot, T., Queyrel, W., Villerd, J., Moreau, D., 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Res.* 261, 108006. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>
- Colbach N., Cordeau S., Queyrel W., Maillot T., Villerd J., Moreau D., 2019a. Du champ virtuel au champ réel - ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture ? *Agron. Environ. Soc.* 9, 111–128.
- Colbach N., Flament M., Maillot T., Pernel J., Queyrel W., Villerd J., 2024. La complémentarité des outils d'accompagnement des acteurs pour la gestion des adventices économe en herbicides. *Innov. Agron.*, in press.
- Colbach N., Gardarin A., Moreau D., 2019b. The response of weed and crop species to shading: which parameters explain weed impacts on crop production? *Field Crops Res.* 238, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008>
- Colbach N., Munier-Jolain N., Dugué F., Gardarin A., Strbik F., Moreau D., 2020. The response of weed and crop species to shading. How to predict their morphology and plasticity from species traits and ecological indexes? *Eur. J. Agron.* 121, 126158. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126158>
- Comoul X., Mougin C., 2024. Chapitre 14 - Impacts de l'herbicide glyphosate dans un contexte de santé globale, dans: Sols urbains, environnement et santé, repenser les usages. Versailles, pp. 219–223.



- 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.* 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00204>
- Cournault Q., Colbach N., Busset H., Matejcek A., Souche-Suchovsky P., Prudent M., Moreau D., 2024a. Interspecies diversity in morphological responses to water stress: Study on a panel of weed and crop species. *Env. Exp. Bot.* 224, 105825. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105825>
- Cournault Q., Moreau D., Castel T., Colbach N., 2024b. Adapting FLORSYS for climate change: implementing plant-plant competition for water in a 3D mechanistic model for predicting future crop/weed interactions and their consequences in arable cropping systems. 18th Congress of the European Society for Agronomy, Rennes, France.
- Cournault Q., Moreau D., Colbach N., 2023. Déterminer la disponibilité journalière en eau du sol dans le modèle FLORSYS, par couplage au module sol de STICS. XIIIth STICS seminar, Latresne, France.
- Dinpashoh Y., Jahanbakhsh-Asl S., Rasouli A.A., Foroughi M., Singh V.P., 2019. Impact of climate change on potential evapotranspiration (case study: west and NW of Iran). *Theor Appl Climatol* 136, 185–201. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2462-0>
- Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S.M.A., 2009. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- Fatima Z., Naz S., Iqbal P., Khan A., Ullah H., Abbas G., Ahmed, M., Mubeen, M., Ahmad, S., 2022. Field Crops and Climate Change, dans: Jatoi, W.N., Mubeen, M., Ahmad, A., Cheema, M.A., Lin, Z., Hashmi, M.Z. (Eds.), *Building Climate Resilience in Agriculture: Theory, Practice and Future Perspective*. Springer International Publishing, Cham, pp. 83–94. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79408-8_6
- Gardarin A., Guillemain J.-P., Munier-Jolain N., Colbach N., 2010. Estimation of key parameters for weed population dynamics models: Base temperature and base water potential for germination. *Eur. J. Agron.* 32, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.09.006>
- Louarn G., Faverjon L., 2018. A generic individual-based model to simulate morphogenesis, C–N acquisition and population dynamics in contrasting forage legumes. *Ann. Bot.* 121, 875–896. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx154>
- Maurel C., Nacry P., 2020. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. *Nat. Plants* 6, 744–749. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0684-5>
- Moreau D., Busset H., Matejcek A., Prudent M., Colbach N., 2022. Water limitation affects weed competitive ability for light. A demonstration using a model-based approach combined with an automated watering platform. *Weed Res.* 62, 381–392. <https://doi.org/10.1111/wre.12554>
- Moreau D., Pointurier O., Perthame L., Beaudoin N., Villerd J., Colbach N., 2021. Integrating plant-plant competition for nitrogen into a 3D individual-based model simulating the effects of cropping systems on weed dynamics. *Field Crops Res.* 268, 108166. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108166>
- Munier-Jolain N., Collard A., Busset H., Guyot S.H.M., Colbach N., 2014. Investigating and modelling the morphological plasticity of weeds. *Field Crops Res.* 155, 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.09.018>
- Munier-Jolain N., Guyot S.H.M., Colbach N., 2013. A 3D model for light interception in heterogeneous crop:weed canopies: Model structure and evaluation. *Ecol. Model.* 250, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.023>
- Oerke E.-C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.*, 144. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Omon B., Colbach N., Cavan N., Angevin F., 2024. L'accompagnement de la transition vers des systèmes deculture gérant les adventices avec moins d'herbicides : avec quelle mobilisation de la connaissance, et des outils et modèles ? *Innov. Agron.* in press.
- Perthame L., Colbach N., Brunel-Muguet S., Busset H., Lilley J.M., Matejcek A., Moreau D., 2020. Quantifying the nitrogen demand of individual plants in heterogeneous canopies: A case study with crop and weed species. *Eur. J. Agron.* 119, 126102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126102>



- Perthame L., Colbach N., Busset H., Matejcek A., Moreau D., 2022. Morphological response of weed and crop species to nitrogen stress in interaction with shading. *Weed Res.* 62, 160–171. <https://doi.org/10.1111/wre.12524>
- Pointurier O., Moreau D., Pagès L., Caneill J., Colbach N., 2021. Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. *Ecol. Model.* 440, 109376. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376>
- Poorter H., Niinemets Ü., Poorter L., Wright I.J., Villar R., 2009. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytol.* 182, 565–588. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x>
- Queyrel W., Van Inghelandt B., Colas F., Cavan N., Granger S., Guyot B., Reau R., Derrouch D., Chauvel B., Maillot T., Colbach N., 2023. Combining expert knowledge and models in participatory workshops with farmers to design sustainable weed management strategies. *Agric. Syst.* 208, 103645. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645>
- Ritchie J.T., 1998. Soil water balance and plant water stress, dans: *Understanding Options for Agricultural Production*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 41–54. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_3
- Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J., 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth Sci. Rev.* 99, 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
- Singh M., Thapa R., Kukal M.S., Irmak S., Mirsky S., Jhala A.J., 2022. Effect of water stress on weed germination, growth characteristics, and seed production: a global meta-analysis. *Weed Sci.* 70, 621–640. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.59>
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y., 2019. A description of the advanced research WRF model version 4. No. NCAR/TN-556+STR. <https://doi.org/10.5065/1DFH-6P97>
- Xu Z., Han Y., Tam C.-Y., Yang Z.-L., Fu C., 2021. Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Sci Data* 8, 293. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01079-3>
- Zheng B.Y., Chenu K., Doherty A., Chapman, S., 2015. The APSIM-Wheat module (7.5 R3008) documentation. APSRU: Toowoomba, Australia. 33.
- Zhou H., Zhou G., He Q., Zhou L., Ji Y., Zhou M., 2020. Environmental explanation of maize specific leaf area under varying water stress regimes. *Environ. Exp. Bot.* 171, 103932. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103932>
- Zimdahl R., 2004. Definition of Plant Competition, dans: *Weed-Crop Competition*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 6–8. <https://doi.org/10.1002/9780470290224.ch2>

Pour citer cet article : Quentin Cournault, Nathalie Colbach, Delphine Moreau. Modéliser la compétition entre cultures et adventices pour l'eau pour la conception de stratégies de gestion des adventices agroécologiques et résilientes au changement climatique. *Innovations agronomiques*, 2025, 101, pp.1-15. [10.17180/ciaq-2025-vol101-art01](https://doi.org/10.17180/ciaq-2025-vol101-art01)



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.