

Livre de résumés

Webinaire des utilisateurs et développeurs de FLORSYS

24 mars et 1^{er} avril 2026 – Visioconférence

Table des matières

FLORSYS – un modèle mécaniste pour faire interagir scientifiques, conseillers et agriculteurs dans la gestion agroécologique des adventices (Nathalie Colbach)	2
Intégrer le mécanisme d'allélopathie dans un modèle mécaniste simulant les interactions entre plantes cultivées et adventices (FLORSYS) (Delphine Moreau)	4
Contribution de la prédation des semences adventices par les carabes à la régulation biologique des adventices en grandes cultures (Nathalie Colbach)	6
Adaptation du modèle FLORSYS aux systèmes cannières pour évaluer l'impact des adventices sur les performances des systèmes de culture (Pauline Viaud)	8
Utilisation du modèle FLORSYS pour simuler des associations céréale-légumineuse avec compétition pour l'azote (Aurélie Baquet)	9
Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion agroécologique des adventices en association pois-blé. Valorisation pour le développement de l'outil d'aide à la décision DECIFLORMIX (Nathalie Colbach)	11
Identification de traits variétaux complémentaires pour des mélanges de variétés de blé performants (Laura Stefan)	13
Modéliser les adventices vivaces dans FLORSYS pour identifier des leviers de gestion agroécologiques (Solègne Skorupinski)	15
Importer des systèmes de culture depuis AGROSYST (Jean Villerd)	18
Utilisation du modèle FLORSYS pour évaluer les systèmes de culture du réseau DEPHY (Aurélie Baquet)	19
Méta-modélisation de FLORSYS à la base de l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS (Jean Villerd)	21
Mobilisation des connaissances et expériences issues de FLORSYS pour co-construire et utiliser des outils d'aide à la co-conception de systèmes de culture (Wilfried Queyrel)	22
Comment utiliser FLORSYS et ses sorties pour évaluer un seul changement de système ? (Nicolas Cavan)	23

FLORSYS – un modèle mécaniste pour faire interagir scientifiques, conseillers et agriculteurs dans la gestion agroécologique des adventices

Nathalie COLBACH

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Cet article présente l'approche de construction et la structure du modèle mécaniste FLORSYS qui simule la dynamique 3D journalière des populations et couverts cultures:adventices à partir du système de culture et du pédoclimat. Son objectif est l'évaluation et la conception de systèmes de culture multiperformants.

Mots-clés : 3D individu-centré, trait, service agroécologique, système de culture, protection intégrée

1. Introduction

En grande culture, les adventices sont essentielles à la biodiversité, mais très nuisibles pour la production agricole. À ce jour, aucune méthode curative non chimique utilisée seule n'est aussi efficace que les herbicides, et la gestion agroécologique des adventices doit combiner de nombreuses techniques culturales, partiellement efficaces et interactives. Ce changement nécessite de passer du curatif au préventif, de la suppression chimique à la régulation biologique et mécanique et à la conciliation des disservices et services dus aux adventices. Compte tenu de la complexité de l'agroécosystème et du grand nombre de scénarios à étudier, des modèles sont indispensables pour synthétiser les connaissances et évaluer les nouvelles stratégies de gestion des adventices. Pour que celles-ci soient efficaces et acceptables pour les agriculteurs, elles doivent être adaptées aux conditions pédoclimatiques, aux contextes de production et aux spécificités socio-économiques de leurs exploitations.

L'objectif de cet article est de présenter l'approche de construction et la structure du modèle mécaniste FLORSYS ainsi que son lien avec l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS. Ces deux outils visent à combler le fossé entre la recherche sur les processus biophysiques et la gestion agroécologique des adventices sur le terrain. Les autres exposés de ce séminaire sur le monde de FLORSYS illustreront des modules spécifiques et des cas d'étude utilisant ces deux outils.

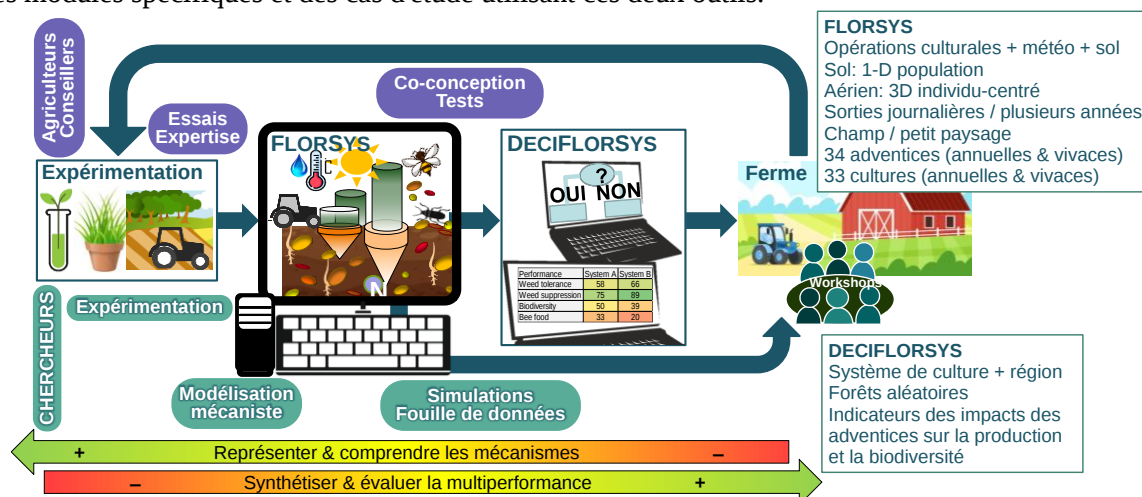


Figure 1. La chaîne de modélisation liant expérimentation, modélisation mécanistique et outils d'aide à la décision pour concevoir des stratégies de gestion agroécologique des adventices, et le rôle des chercheurs, conseillers et agriculteurs (Colbach *et al.*, 2021)

2. Matériel et méthodes

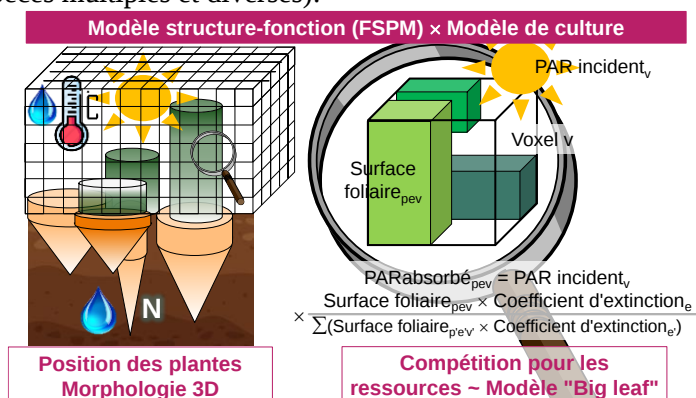
La méthodologie comprend trois étapes (Figure 1) conduites avec des agriculteurs et des conseillers afin de garantir la nature opérationnelle et l'adoption des stratégies de gestion des adventices. L'étape 1 utilise la modélisation mécanistique pour traduire les résultats expérimentaux en équations et paramètres pour le modèle de simulation FLORSYS. L'étape 2 utilise les simulations FLORSYS et la fouille de données ("data mining") pour co-concevoir l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS (voir l'exposé de Jean Villerd plus tard). L'étape 3 utilise ces outils pour évaluer et concevoir des idéotypes de cultures et des systèmes de culture pour la gestion agroécologique des mauvaises herbes.

La construction de FLORSYS devait tenir compte de deux contraintes : (1) simuler des couverts hétérogènes multispécifiques à cause de la diversité des espèces adventices, leurs vagues de levée successives et leur placement en tâches dans les champs d'une part, et d'autre à cause de la diversification des cultures, avec l'introduction de nouvelles espèces et des associations de cultures ; (2) tenir compte des objectifs et contraintes des acteurs (agriculteurs et conseillers, décideurs publics).

3. Résultats

Modéliser des populations et couverts plurispécifiques hétérogènes. FLORSYS (1) fonctionne avec un pas de temps journalier (pour simuler les cohortes de levée successives et leurs interactions avec les techniques culturales), (2) sur des années ou décennies (pour tenir compte de la survie pluriannuelle des semences dans le sol). Il (3) représente chaque plante en 3D (pour tenir compte de la compétition pour les ressources de plantes diverses) (4) avec une morphologie simplifiée et des paramètres estimables à partir de traits simples (pour inclure des espèces multiples et diverses).

Figure 2. Principe de représentation des couverts combinant une approche *Structure-Fonction* avec un approche *Modèle de culture*. Chaque plante est représentée sous forme d'un cylindre et d'un cône inversé. Biomasses aérienne et racinaire, surface foliaire et densité de longueurs racinaires sont distribuées dans ce volume qui grandit en fonction des ressources prélevées et des stress subis par la plante.



Tenir compte des objectifs et contraintes des acteurs. FLORSYS produit deux types de sortie : (1) les sorties journalières 3D décrivant les états des cultures, adventices et sol sont essentielles pour comprendre les performances des cultures, variétés et techniques culturales, une demande-clé des agriculteurs, (2) des indicateurs annuels ont été co-développés avec des agriculteurs et conseillers pour évaluer l'impact des adventices sur la production des cultures (quantité et qualité), la difficulté de gestion des adventices mais aussi la contribution des adventices à la biodiversité et la protection du sol.

Le modèle évolue continuellement pour tenir compte des évolutions de l'agriculture en intégrant (1) des nouvelles techniques culturales, (2) des nouveaux processus pour tenir compte du changement climatique, de réduction des ressources du sol suite à la réduction des intrants, (3) des changements de flore suite aux changements de pratiques.

4. Conclusion

FLORSYS synthétise des résultats de diverses sources (expérimentation, expertise, littérature), équipes et disciplines dans une parcelle expérimentale virtuelle. Ce modèle donne accès à des variables d'état difficiles à mesurer sur le terrain et nécessaires pour comprendre le fonctionnement de l'agroécosystème et faire une évaluation multicritère des systèmes de culture en termes d'impact des adventices.

5. Références

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 Research* 261, 108006, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>.

Intégrer le mécanisme d'allélopathie dans un modèle mécaniste simulant les interactions entre plantes cultivées et adventices (FLORSYS)

**Delphine Moreau¹, Aurélie Baquet¹, Alain Bouchereau², Younès Dellerio²,
Aurélie Gfeller³, Sophie Jasinski⁴, Oumayma Mhamdi⁴,
Alexandre de Saint Germain⁴, Nathalie Colbach¹**

¹Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Europe, 21000 Dijon, France

²IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35000 Rennes, France

³Herbology in Field Crops and Viticulture, Plant Production Systems, Agroscope, Nyon, Switzerland

⁴Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, Institute Jean-Pierre Bourgin for Plant Sciences (IJPB), 78000, Versailles, France

delphine.moreau@inrae.fr

Résumé

L'objectif est de présenter l'approche que nous mettons en œuvre pour intégrer un module allélopathie au modèle FLORSYS. La finalité est d'utiliser la nouvelle version du modèle (complétée par ce module allélopathie) pour estimer, par simulations, les effets au champ des relations allélopathiques générées par les plantes cultivées sur les adventices, mécanisme dont les effets sont très difficiles à quantifier dans des expérimentations réelles.

Mots-clés. Modélisation, allélopathie, adventice, métabolites spécialisés, exsudats racinaires

1. Introduction

La compétition pour les ressources (la lumière, l'eau et les éléments minéraux) est considérée comme le principal mécanisme par lequel les plantes cultivées peuvent réguler les adventices. L'allélopathie (vue ici comme un mécanisme par lequel une plante peut affecter la germination et la croissance d'une plante voisine par la libération de composés chimiques bioactifs dans la rhizosphère au cours de son cycle de vie) pourrait également jouer un rôle, et l'utilisation d'espèces/varieties à activité allélopathique est régulièrement proposée comme levier agroécologique pour favoriser la régulation des adventices. Cependant, peu de démonstrations au champ existent pour soutenir cette idée car allélopathie et compétition se produisant simultanément, il reste difficile de mesurer et d'explicitier les effets strictement associés à l'un et/ou l'autre des deux mécanismes (Mahé et al., 2022).

Les modèles mécanistes sont des outils précieux pour mieux comprendre les systèmes complexes, notamment pour quantifier des variables/mécanismes difficiles à mesurer au champ. Le modèle FLORSYS est, à l'heure actuelle, le seul modèle mécaniste capable d'estimer les effets de systèmes de culture, en interaction avec les conditions pédoclimatiques, sur la dynamique de la flore adventice plurispécifique et les impacts sur la production agricole en grande culture. Ce modèle prend en compte les phénomènes de compétition entre plantes (lumière, azote et eau) mais il n'intègre pas encore les interactions allélopathiques, même s'il considère déjà des processus sous-jacents aux interactions allélopathiques (germination, croissance végétative, distribution des racines dans le sol, etc).

La présentation a pour objectif de montrer le travail que nous menons pour développer un module « allélopathie » à intégrer au modèle FLORSYS, afin de rendre compte de la capacité de certaines plantes à affecter la croissance de plantes voisines par la libération de composés allélochimiques dans la rhizosphère au cours de leur cycle.

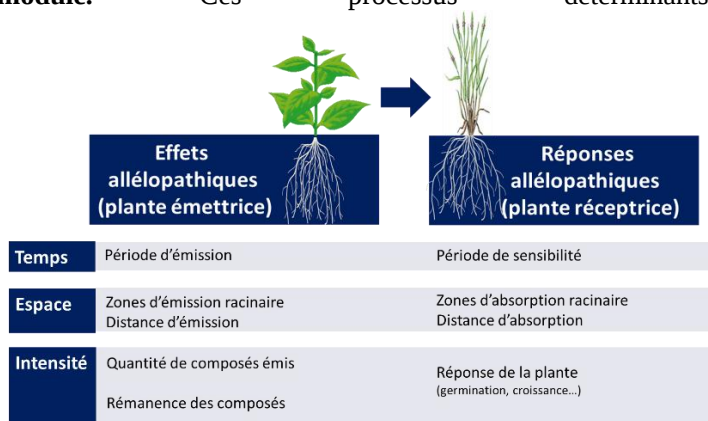
2. Matériels et méthodes

La démarche comporte deux étapes : (1) identifier les processus sous-jacents aux interactions allélopathiques à intégrer dans le nouveau module, et (2) définir des équations pour représenter chacun de ces processus, et les paramétrer. Ce travail mobilise des données expérimentales, des données issues de la bibliographie et de l'expertise. Il se situe à l'interface entre disciplines mêlant des compétences fortes en phytochimie/métabolomique, physiologie, agronomie et modélisation.

Le principe est de développer un module générique (i.e. paramétrable pour une diversité d'espèces émettrices et d'espèces réceptrices, et une diversité de molécules allélochimiques). Le paramétrage a débuté en considérant le colza comme espèce émettrice de composés allélochimiques de type glucosinolates (hétérosides soufrés) et leurs produits bioactifs de dégradation, les isothiocyanates.

3. Résultats

Identifier les processus sous-jacents aux interactions allélopathiques à intégrer dans le nouveau module. Ces processus déterminants sont présentés en



A. Ils reposent sur la nécessité, pour que l'action d'allélopathie puisse opérer, d'un chevauchement temporel entre les périodes (1) d'émission des composés chimiques par les plantes émettrices et (2) de sensibilité des plantes réceptrices. Un chevauchement spatial est également nécessaire entre la zone (1) d'émission et de propagation des composés chimiques (ou de leurs produits transformés) par les plantes émettrices et (2) d'absorption par les plantes réceptrices. L'intensité des interactions allélopathiques est alors conditionné par la quantité de composés allélochimiques bioactifs émis par les plantes émettrices, leur rémanence dans le sol et l'intensité de réponse des plantes réceptrices (en termes de germination et de croissance).

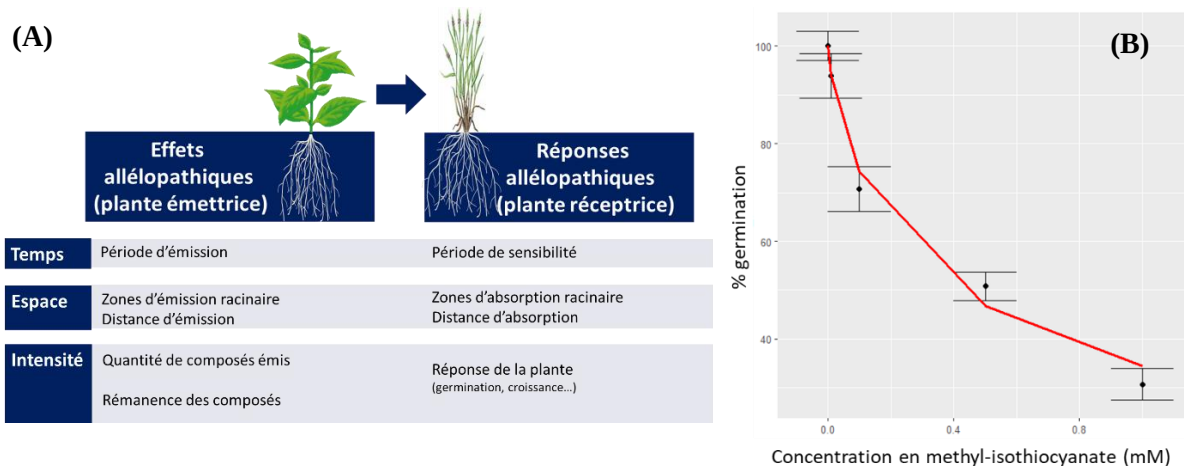
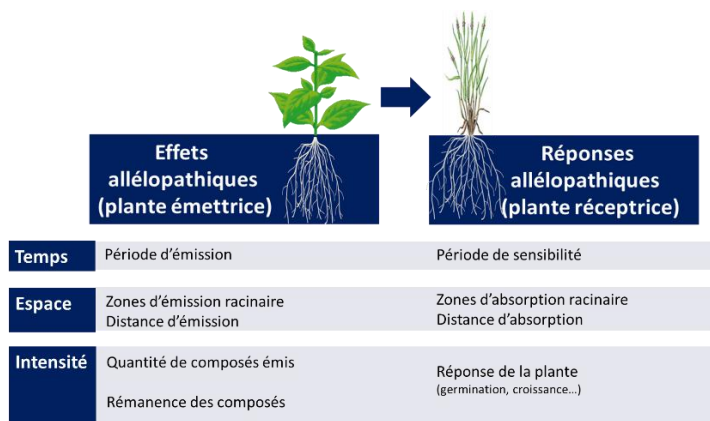


Figure 1 : (A) Processus déterminants des interactions allélopathiques à intégrer dans le nouveau module. (B) Illustration d'une courbe de réponse de la germination d'une espèce adventice (*Centaurea stoebe*) à la concentration en molécule allélochimique obtenue à partir des données de Petersen et al. (2001). Grâce à cette équation, il est possible de déterminer deux paramètres-clés : la concentration correspondant à un taux de germination à de 50 % et un paramètre de forme de la courbe.

Définir des équations pour représenter chacun de ces processus, et les paramétrer. Pour chacun des items présentés en Figure 1A, nous avons mobilisé la bibliographie, des données expérimentales et l'expertise des partenaires pour identifier des équations et débiter leur paramétrage. La



B illustre par exemple comment, à partir de données issues de la bibliographie, nous avons estimé les paramètres d'une équation logistique pour quantifier la réponse du taux de germination à la concentration en composés allélochimiques.

4. Conclusions

Ce travail d'organisation et de synthèse des connaissances a permis de construire un cadre conceptuel de modélisation favorable au dialogue, à la coopération et à la valorisation d'expertises interdisciplinaires. Même si ce travail se révèle fastidieux (en raison de la grande quantité et de la qualité très variable de la bibliographie sur le sujet), il se révèle particulièrement motivant, enrichissant et original ; il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle équivalent à ce jour. Aujourd'hui, la plupart des équations du nouveau module sont définies mais le paramétrage (pour le cas du colza) est incomplet en raison des lacunes de connaissances. De nouveaux travaux seront menés à l'interface entre expérimentation et modélisation pour être en mesure d'estimer plus précisément les paramètres. A terme, il s'agira de mobiliser la nouvelle version du modèle pour (1) déterminer dans quelle mesure l'utilisation de cultures/variétés à actions allélopathiques peut aider à réguler les adventices au champ, et (2) identifier dans quelle(s) situation(s) et comment ce mécanisme d'allélopathie peut être favorisé pour la régulation biologique des adventices.

5. Références

- Mahé, I., Chauvel, B., Colbach, N., Cordeau, S., Gfeller, A., Reiss, A. and Moreau, D. (2022) Deciphering field-based evidence for weed regulation by crop allelopathy. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 50. doi: <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00749-1>
- Petersen, J., Belz, R., Walker, F. and Hurle, K. (2001) Weed Suppression by Release of Isothiocyanates from Turnip-Rape Mulch. *Agronomy Journal*, 93, 37-43. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2001.93137x>

Contribution de la prédation des semences adventices par les carabes à la régulation biologique des adventices en grandes cultures

Nathalie COLBACH & Sandrine PETIT

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Des simulations ont été réalisées avec FLORSYS sur 1372 systèmes de grande culture, avec et sans prédation de semences adventices par les carabes. Cette prédation augmente le rendement des cultures et diminue les impacts des adventices sur la production des cultures et la biodiversité. Les traits des adventices et des pratiques culturales promouvant cette régulation ont été identifiés.

Mots-clés : gestion agroécologique, simulation, travail du sol, herbicide, trait, pratique culturale

1. Introduction

L'utilisation d'herbicides doit être réduite pour des raisons environnementales et sanitaires, et la gestion des adventices doit donc s'appuyer davantage sur la régulation biologique. Des suivis de terrain ont montré que les carabes peuvent prédateur une proportion importante des semences adventices, mais à ce jour, aucune étude sur le terrain n'a démontré que cette prédation influence réellement la dynamique à long terme des adventices ou leur impact sur la production agricole. L'objectif du présent article était de déterminer (1) les pratiques de gestion qui favorisent la prédation des semences adventices et sa contribution à la gestion des adventices, (2) les espèces et les caractéristiques des adventices les plus touchées, (3) dans quelles conditions la prédation des semences adventice compense l'absence de contrôle par le travail du sol ou les herbicides.

2. Matériel et méthodes

FLORSYS prédit le taux de prédation journalier des semences adventices à partir des conditions environnementales, des opérations culturales et des traits des semences adventices (Perthame *et al.*, 2023). En résumé, les insecticides, les travaux du sol et de récolte réduisent le taux de prédation (perturbation des carabes). Le taux augmente en cas de couvert dense (protection des carabes contre leurs prédateurs), journée ombragée (ressentie comme un couvert dense), température élevée (meilleure activité et croissance des carabes), et voisinage de bandes enherbées et autres espaces semi-naturels (refuge pour les carabes). Les carabes préfèrent les semences riches en lipides (plus énergétiques), légères (plus faciles à manipuler) et abondantes (moins de déplacement pour se nourrir).

Ici, 434 systèmes de grande culture ont été collectés via des enquêtes, des statistiques agricoles etc. 868 systèmes sont issus des premiers en supprimant tout travail du sol ou tout herbicide, sans aucune autre modification dans les pratiques. Au total, 1372 systèmes ont été simulés deux fois sur 30 ans (et répétés avec 10 séries météorologiques) à l'aide de FLORSYS, une fois en incluant la prédation des semences adventices par les carabes, et une fois sans. Les taux de prédation, les rendements et les impacts des adventices sur la production et la biodiversité ont été analysés à l'aide d'arbres de classification et de régression (CART) en fonction des traits des adventices et des pratiques culturales.

3. Résultats et discussion

Ajouter la prédation des semences adventices par les carabes dans les simulations augmente le rendement et diminue la nuisibilité des adventices mais aussi la biodiversité (Tableau 1.A). Entourer le champ de bandes enherbées amplifie encore cet effet. L'augmentation de rendement compense la perte de production due à la réduction de la surface cultivée (par exemple, -4% pour des bandes d'un m de large sur les 4 côtés d'un champ de 1 ha). Supprimer le travail du sol ou les herbicides sans compensation augmente considérablement la nuisibilité des adventices et diminue donc le rendement (Tableau 1.C).

Ces variations sont telles que rajouter de la prédation est insuffisante pour compenser, malgré l'augmentation du taux de prédation, notamment en cas de travail du sol (+31%).

Tableau 1. Variation des indicateurs d'impact des adventices sur la production des cultures et la biodiversité en fonction de la prédation, les bandes enherbées, le travail du sol et les herbicides

	Rendement (MJ/ha)		Richesse spécifique	Offre trophique		Perte rendement (%)	Salissement du champ (t/ha)
	potentiel	réel		Oiseaux	Abeilles		
A. Impact de la prédation de semences (sans prédation = 1)							
Prédation	1.00	1.11	1.03	0.93	0.91	0.83	0.82
B. Impact de l'addition de bandes enherbées en présence de prédation (sans = 1)							
Bandes enherbées	1.00	1.08	0.96	0.95	0.83	0.72	0.78
C. Impact de la suppression de leviers-clé en l'absence de prédation (non-modifié = 1)							
Sans herbicides	1.02	0.82	1.00	1.05	1.45	1.45	1.69
Sans travail du sol	1.09	0.82	1.04	2.61	2.69	1.48	1.43
D. Impact de la prédation dans les systèmes à modifiés (sans prédation & systèmes non modifiés =1)							
Sans herbicides	1.02	0.83	1.03	1.07	1.64	1.64	1.80
Sans travail du sol	1.09	0.76	1.21	2.65	3.57	1.93	1.88

Le taux de prédation annuel augmente fortement avec la production de semences ($\%pred = 3.72 + 8.71 \log_{10}(seeds/m^2)$, $R^2=0.46$), les préférences alimentaires des carabes (+10.9% pour les espèces dans le top 30% des espèces préférées) et pour les espèces mûrissant en juillet (+18% si la fréquence de maturité en juillet dépasse les 12%). Les opérations culturales jouent fortement sur la contribution de la prédation à la régulation des adventices. Les rotations avec beaucoup de cultures longues (et donc sans trop de variation de saison de semis), la rareté des épandages de fumier et du travail du sol favorisent la suppression des adventices via la prédation, identifiée en comparant la suppression des simulations avec et sans prédation (Tableau 2.A). Certaines de ces pratiques améliorent aussi la tolérance aux adventices et le rendement en présence d'adventices, comme la durée des cultures (Tableau 2.B et C). Mais d'autres ont l'effet opposé, comme le travail du sol. En effet, le tableau 2.B&C analyse les indicateurs des simulations avec prédation (et non pas la différence entre simulations avec et sans prédation) qui sont le résultat non seulement de la régulation des adventices par prédation, mais aussi de tous les autres effets inclus dans FLORSYS, notamment l'effet des opérations culturales sur les adventices, comme l'effet faux semis ou enfouissement des semences par le travail du sol pour réduire la levée des adventices.

Tableau 2. Pratiques majeures promouvant la régulation des adventices, via la prédation des semences (A, B, C), la compétition pour la lumière avec la culture (B, C) et les impacts des opérations culturales (B, C). Suppression des adventices = réduction de la biomasse adventice, tolérance aux adventices = faible perte de rendement due aux adventices

Pratique	A. Suppression des adventices par prédation	B. Tolérance aux adventices en présence de prédation	C. Rendement en présence de prédation
Durée des cultures	≥ 7 mois	≥ 8 mois	≥ 10 mois
%cultures		$< 68\%$ blé	$< 21\%$
Variation date de semis	< 235 jours	≥ 300 jours	≥ 484 jours
Couverts d'interculture		$> 20\%$	
Épandage de fumier	< 0.2 /an		
Travail du sol	< 0.2 / an nov-mars	≥ 3 / an	> 6 / an

4. Conclusion

FLORSYS permet d'évaluer la contribution de processus individuels comme la prédation des semences et d'identifier les déterminants techniques et biologiques ceux-ci. La régulation des adventices par la prédation augmente le rendement des cultures mais les pratiques favorisant le plus cette régulation sont souvent aussi celles favorisent directement les adventices (ex., semis direct).

5. Références

Perthame, L., Petit, S., Colbach, N., 2023. Modelling weed seed predation and its effects on crop production under contrasted farming systems. *European Journal of Agronomy* 151, 126953. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126953>

Adaptation du modèle FLORSYS aux systèmes canniers pour évaluer l'impact des adventices sur les performances des systèmes de culture

Pauline Viaud¹²³, Nathalie COLBACH³, Aude Ripoche¹²⁴⁵

¹ CIRAD, UPR AIDA, F-97743, Saint-Denis, Réunion, France

² AIDA, CIRAD, Univ. Montpellier, Montpellier, France

³ Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Université Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

⁴ CIRAD, UPR GECO, F-97743, Saint-Denis, Réunion, France

⁵ GECO, CIRAD, Univ. Montpellier, Montpellier, France

Correspondance : aude.ripoche@cirad.fr

Résumé

Cet article résume les expérimentations et approches utilisées et en cours pour adapter le modèle FLORSYS aux systèmes de culture à base de canne à sucre à l'île de la Réunion. Ce travail implique à la fois le paramétrage de nouvelles espèces (canne à sucre, adventices tropicales) et des nouveaux processus (e.g., levée de plantes depuis des bouts de tiges semés, plantes lianescentes).

Utilisation du modèle FLORSYS pour simuler des associations céréale-légumineuse avec compétition pour l'azote

**Aurélié Baquet¹, Pierre Lebreton¹, Laurent Bedoussac², Delphine Moreau¹,
Lionel Alleto³, Eric Justes⁴, Nathalie Colbach¹**

¹Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Europe, Dijon, France

²Univ Toulouse, Toulouse INP, ENSFEA, PURPAN, INRAE, AGIR, Castanet-Tolosan, France

³Univ Toulouse, Toulouse INP, PURPAN, INRAE, AGIR, Castanet-Tolosan, France

⁴CIRAD, Persyst Department, Montpellier, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

Résumé

Les adventices sont les principaux bioagresseurs des cultures car elles entrent en compétition pour les ressources telles que la lumière, l'azote et l'eau. Bien que les herbicides soient le moyen le plus rapide et le plus efficace pour la gestion des adventices, leur utilisation soulève des enjeux environnementaux qui encouragent le développement de stratégies alternatives telles que les associations de cultures. L'étude décrite ici vise à comprendre l'effet de la compétition pour l'azote sur les interactions plante-plante au sein de communautés plurispécifiques à l'aide d'une version enrichie du modèle FLORSYS.

Mots-clés : association, azote, adventice, rendement, simulation

1. Introduction

Des travaux ont déjà été menés pour identifier des combinaisons d'espèces de céréale et de légumineuse, des proportions d'espèces dans l'association, et des motifs de semis, favorables à la fois au rendement et à la gestion des adventices (Lebreton *et al.*, 2024). C'est le cas notamment lorsque les proportions d'espèces sont équilibrées (50 % céréale et 50 % légumineuse) et que les motifs de semis alternent régulièrement les espèces (1 rang céréale – 1 rang légumineuse, ou 2 rangs céréale – 2 rangs légumineuse). La légumineuse bénéficie aussi de la forte compétitivité de la céréale face aux adventices. Ces résultats ont été obtenus en utilisant la version initiale du modèle FLORSYS qui ne considère que la compétition pour la lumière. L'objectif de cette nouvelle étude est d'identifier les situations (combinaison d'espèces, proportion d'espèces, motifs de semis) les plus intéressantes pour maintenir le rendement et gérer durablement les adventices, en prenant en compte la compétition pour l'azote.

2. Matériel et méthodes

Pour mieux prédire la croissance des plantes, la compétition pour l'azote a été intégrée dans le modèle FLORSYS (Moreau *et al.*, 2021), en s'appuyant sur un couplage avec le modèle STICS afin de simuler la disponibilité de l'azote dans le sol. Les plantes entrent en compétition pour l'azote lorsqu'elles partagent un même voxel (unité spatiale du modèle FLORSYS). Cette compétition se manifeste lorsque les besoins totaux en azote dépassent la quantité d'azote disponible. Plusieurs paramètres ont été introduits pour intégrer les besoins en azote des plantes, leur capacité d'absorption racinaire, la fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses ainsi que les réponses morphologiques au stress azoté. Le modèle de recherche FLORSYS intégrant la compétition pour l'azote est utilisé pour simuler deux dispositifs expérimentaux. Le premier porte sur sept proportions d'espèces dans des associations (orge-pois et blé-féverole), le second explore neuf motifs de semis dans différentes associations (blé-pois, blé-féverole et triticale-féverole). Chaque association est comparée aux cultures pures témoins. Les simulations seront réalisées sur une durée de 30 ans, selon 10 scénarios climatiques différents afin d'observer à long terme, l'impact des adventices sur le rendement. Plusieurs simulations seront réalisées, (1) en présence d'adventices pour calculer le rendement réel, (2) en absence d'adventices pour calculer le rendement potentiel. Les simulations seront aussi réalisées avec et sans compétition pour l'azote, ainsi

qu'avec et sans fertilisation azotée pour observer les effets du stress azoté sur la performance des systèmes.

3. Résultats attendus

Cette étude déterminera dans quelle mesure les situations identifiées comme optimales dans l'étude précédente (Lebreton *et al.*, 2024), restent performantes. Plus précisément, l'objectif est de vérifier si la performance des systèmes de culture, en termes de rendement et de gestion des adventices, est confirmée lorsque la compétition pour l'azote est prise en compte. Les systèmes simulés pourront être classés selon leur performance grâce aux calculs d'indicateurs de production, de nuisibilité et de bénéfice des adventices et à leur représentation (Fig. 1). Cette étude permettra (1) d'analyser l'impact de la compétition pour l'azote sur les cultures associées et sur la gestion des adventices, (2) d'identifier si le stress azoté favorise davantage les cultures ou les adventices, (3) et d'identifier les combinaisons d'espèces, les proportions et motifs de semis des systèmes les mieux adaptés.

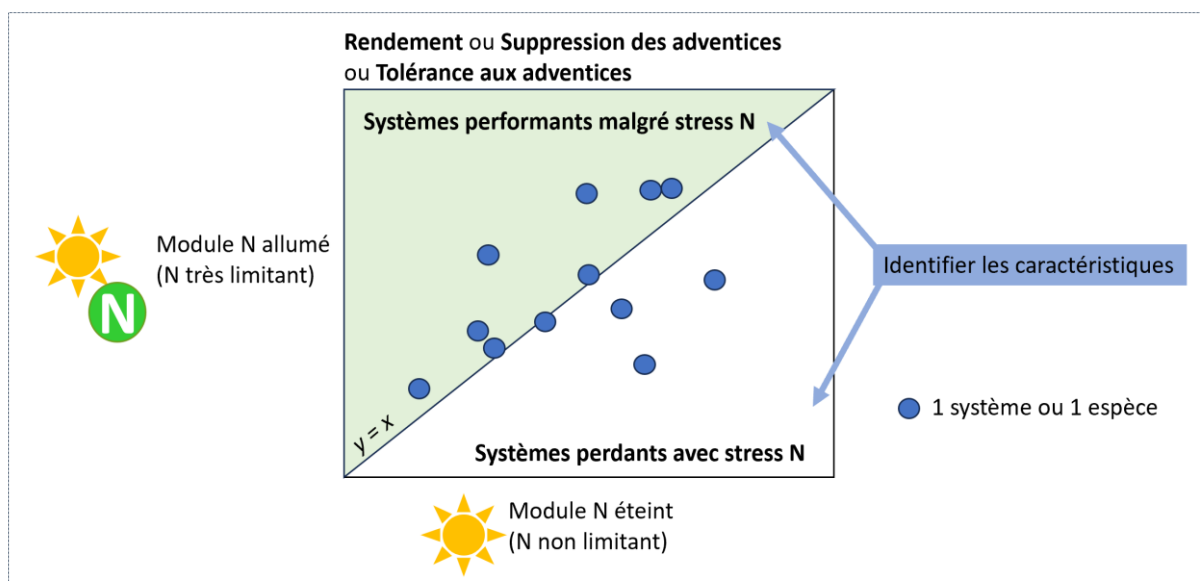


Figure 1. Exemple de représentation pour comparer l'effet de la compétition pour l'azote sur la performance des systèmes simulés avec FLORSYS

La comparaison des indicateurs calculés suite aux simulations avec et sans compétition pour l'azote permettront de mettre en évidence les systèmes les plus performants et d'identifier les pratiques associées.

4. Références

- Lebreton, P., Baquet, A., Bedoussac, L., Bonnet, C., Journet E. *et al.* (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>
- Lebreton P., Bedoussac L., Bonnet C., Journet E., Justes E., Colbach N. (2024) Optimal species proportions, traits and sowing patterns for agroecological weed management in legume–cereal intercrops, *European Journal of Agronomy*, Volume 159, 127266, doi : <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127266>
- 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 Research*, Volume 268, 108166, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108166>

Identification d'idéotypes variétaux pour la gestion agroécologique des adventices en association pois-blé. Valorisation pour le développement de l'outil d'aide à la décision DECIFLORMIX

Nathalie COLBACH, Judith BURSTIN, Léo COCHARD & Delphine MOREAU

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

L'objectif était d'identifier, par simulation avec FLORSYS, des idéotypes variétaux (combinaisons optimales de valeurs de paramètres) pour la gestion des adventices. 3600 systèmes de grande culture incluant des associations pois-blé ont été simulés, combinant des variétés de pois et de blé réelles et virtuelles. Les résultats ont servi à construire un prototype d'outil d'aide à la décision (DECIFLORMIX) pour le choix des variétés à associer et la gestion des associations.

Mots-clés : simulation, trait, variété, perte de rendement, salissement du champ, outil d'aide à la décision

1. Introduction

La gestion des adventices économe en herbicides doit mobiliser davantage la régulation biologique. Les associations de cultures sont un levier crucial pour cette régulation : associer des céréales comme le blé (*Triticum aestivum* L.) à des espèces légumineuses peu compétitrices face aux adventices, comme le pois (*Pisum sativum* L.), améliore la compétitivité du couvert cultivé face aux adventices. Choisir des variétés adaptées rendra ces associations encore plus efficaces. L'objectif de cette étude était d'utiliser le modèle FLORSYS pour (1) identifier les traits (correspondant aux paramètres du modèle) et idéotypes (combinaisons optimales de valeurs de paramètres) du pois et du blé qui rendent les associations compétitrices face aux adventices, dans différents scénarios de gestion, (2) construire un prototype d'outil d'aide à la décision pour le choix des variétés à associer et la gestion des associations.

2. Matériel et méthodes

Le travail comportait les étapes suivantes : (1) création de variétés virtuelles de pois et de blé en tirant au hasard les valeurs de paramètres dans les gammes observées sur les variétés réelles (7 pois, 3 blé) en suivant un plan LHS (Latin Hypercube Sampling) pour optimiser l'exploration de l'espace des valeurs de paramètres, (2) création et simulation de 3600 systèmes de grande culture, également par plan LHS, en combinant différentes rotations (de 2 à 6 ans), types de gestion (conventionnel/bio, avec/sans travail du sol) et flores adventices régionales. Toutes les rotations incluaient une association pois-blé, les variétés ayant été choisies parmi 10 variétés de pois d'hiver (5 réelles et 5 virtuelles) et 13 variétés de blé (3 réelles et 10 virtuelles), (3) simulation de ces 3600 systèmes, en remplaçant les cultures associées par soit le pois en pur, soit le blé en pur (semés soit à la même densité qu'en association, soit à la densité habituelle en pur), pour évaluer l'impact des associations, (4) simulation de ces 4 séries × 3600 systèmes sans adventice pour estimer les rendements potentiels (en l'absence d'adventices) et, en comparaison avec les simulations incluant des adventices, la perte de rendement due aux adventices, (5) réalisation d'arbres de classification et de régression (CART) pour identifier les combinaisons optimales de valeurs de paramètres maximisant le potentiel de rendement, la tolérance aux adventices (faible perte de rendement) et/ou la suppression des adventices (faible biomasse adventice), (6) réalisation de régressions linéaires multiples stepwise pour construire les fonctions de l'outil d'aide à la décision DECIFLORMIX prédisant ces mêmes trois indicateurs en fonction du choix variétal et la gestion des associations pois-blé.

3. Résultats et discussion

Associer le pois au blé, plutôt que le cultiver en culture monospécifique, a réduit la perte de rendement due aux adventices (−30 % pour la variété la moins tolérante aux adventices, i.e., Enduro) et l'infestation

du champ (−14 %). En revanche, la présence du blé réduit le potentiel de rendement du pois jusqu'à 87% (Enduro) en raison de la compétition exercée par le blé sur le pois. Le rendement potentiel du pois est négativement corrélé à celui du blé de l'association ($y = -0.509x + 3.22$, $R^2 = 0.51$).

Les CART ont permis d'identifier des idéotypes en fonction du dispositif d'association. Ces idéotypes correspondent aux meilleurs "branches" des arbres, c'est-à-dire des combinaisons de règles contraignant les valeurs des paramètres (ex. ≥ 0.52 g biomasse feuilles / biomasse aérienne pendant la reproduction). Pour faciliter la lecture des résultats, les gammes de valeurs de paramètres des idéotypes ont été comparées à celles des variétés réelles utilisées dans l'étude (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques-clé des idéotypes de pois et de blé pour maximiser le rendement de pois réel (en présence d'adventices) en association. Les règles vertes et rouges montrent des caractéristiques variétales bénéfiques et négatifs pour l'espèce. Pour le pois, seules les caractéristiques bénéfiques sont montrées, en gras celles qui le distinguent le plus des variétés existantes (Colbach *et al.*, in revision)

Combinaisons de caractéristiques des idéotypes	Association additive [§]		Association substitutive ^{&}	
	Pois	Blé	Pois	Blé
Germination, levée,	Meilleure et plus rapide	Meilleure et plus rapide	Meilleure	Plus rapide
Implantation	Plus rapide et plus homogène		Plus homogène	
Tailles des plantes	Plus larges et plus homogènes	Plus petites et plus larges	Plus grandes, plus larges et plus homogènes	Plus grandes
Feuilles (prop biomasse, position sur la plante)	Plus feuillu, vers le haut	Vers le bas	Plus feuillu	
Réponse à l'ombrage	Plus larges et plus feuillues		Plus grandes	
Système racinaire	Superficiel	Forte biomasse		
Exigences thermiques		Tolérante au gel	Bonne photosynthèse en cas de chaleur	
Variétés répondant à ces règles	Isard	Virtual 5 6	DCG0449	Virtual 3 5 7

[§]les densités de semis des espèces relativement aux cultures en pur $\geq 110\%$, [&] $\sim 100\%$

Les résultats de ces simulations ont contribué au développement de l'outil à la décision DECIFLORMIX. Le premier module évalue les effets du choix des espèces et de la gestion de l'association céréale-légumineuse (bio ou en faible usage herbicide) sur le rendement et le salissement du champ par les adventices, à partir des simulations de Lebreton *et al* (2024). Le deuxième module, basé sur les présentes simulations, est limité aux associations pois-blé, et évalue les effets du choix de la variété de pois, de la gestion de l'association et des autres cultures majeures de la rotation sur le rendement, la perte de rendement due aux adventices et le salissement du champ par les adventices. Le prototype a été codé dans un fichier excel qui permet de comparer 10 systèmes de culture en parallèle.

4. Conclusion

FLORSYS est un outil générique qui permet de tester des variétés réelles et virtuelles dans une large gamme de systèmes de culture et pédoclimats et d'identifier des combinaisons optimales de traits de pois et de blé pour différents objectifs (rendement potentiel, tolérance aux adventices, suppression des adventices). Pour simplifier l'application en sélection variétale, les paramètres du modèle doivent encore être traduits en variables mesurables en routine sur le terrain. FLORSYS peut servir pour développer des modèles plus simples (être "métamodélisé"), résultant ici dans la construction de l'outil DECIFLORMIX qui devra encore être complété et doté d'une interface graphique plus ergonomique.

5. Références

- Colbach, N., Burstin, J., Moreau, D., in revision. Which pea traits for agroecological weed management in pea-wheat intercrops. A simulation study. *European Journal of Agronomy*
- Lebreton, P., Bedoussac, L., Bonnet, C., Journet, E.-P., Justes, E., Colbach, N., 2024. Optimal species proportions, traits and sowing patterns for agroecological weed management in legume-cereal intercrops. *European Journal of Agronomy* 159, 127266. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127266>

Identification de traits variétaux complémentaires pour des mélanges de variétés de blé performants

Laura STEFAN

Techniques Culturelles et Variétés en grandes cultures, Agroscope, Nyon, Suisse

Correspondance : laura.stefan@agroscope.admin.ch

Résumé

L'étude présentée ici montre le potentiel de FLORSYS pour simuler des mélanges de variétés en grand nombre, ainsi que pour déterminer quelles combinaisons de traits variétaux conduisent à une plus grande performance des mélanges de variétés de blé par rapport aux cultures pures.

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les limites environnementales de l'agriculture intensive sont devenues de plus en plus évidentes. En tant qu'alternative plus durable, la diversification des systèmes de culture permet de maintenir ou d'augmenter la production alimentaire tout en réduisant le recours aux intrants artificiels. Une stratégie pratique consiste à utiliser des mélanges variétaux, qui peuvent améliorer la résilience et le rendement des cultures sans nécessiter de changements dans les équipements agricoles. Cependant, leur adoption pour la cultivation du blé reste limitée, car la plupart des variétés ont historiquement été sélectionnées pour un rendement maximal en cultures pures. Il manque donc des critères clairs pour choisir des variétés adaptées aux mélanges.

La sélection traditionnelle en monoculture a favorisé des plantes peu compétitives, qui peuvent donc être semées à haute densité. Dans les mélanges cependant, les interactions entre variétés diffèrent, car celles-ci peuvent utiliser des ressources comme la lumière et l'espace de manière complémentaire. Cela peut conduire à une « surproduction » (overyielding), où les mélanges produisent plus de grains que les monocultures correspondantes.

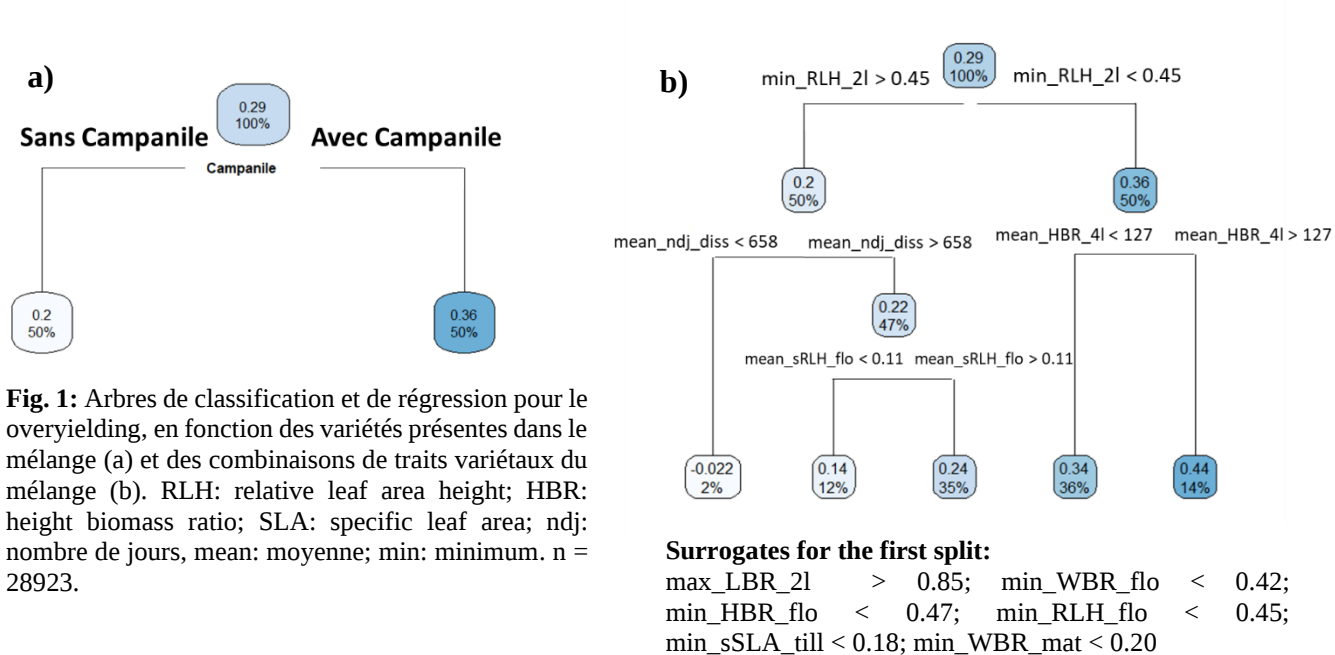
Les expérimentations au champ des mélanges de variétés sont complexes, en raison du nombre exponentiel de combinaisons variétales ; c'est pourquoi l'utilisation de modèles de simulation constitue une alternative efficace. Ce projet utilise le modèle FLORSYS pour simuler des mélanges de huit variétés de blé suisses dans différents environnements, afin d'évaluer les performances des mélanges, de comprendre les mécanismes à l'origine du overyielding et d'identifier les traits variétaux clés pour concevoir des idéotypes de blé adaptés aux mélanges.

2. Matériel et méthodes

Les 8 variétés de blé ont été paramétrisées selon le protocole développé par Colbach, Munier-Jolain et al. (2020). Les paramètres décrivant la croissance et la morphologie des variétés ont été mesurés sur des plantes individuelles cultivées en jardin expérimental extérieur, en conditions de pleine lumière et d'ombrage. Les plantes ont été récoltées à six stades au cours de la saison de croissance, dans des conditions optimales d'eau et de nutriments. Afin de mesurer la réponse des paramètres morphologiques à l'ombrage, ce dispositif expérimental a été reproduit sous des tunnels recouverts de filets d'ombrage, qui simulaient les effets d'ombrage des plantes voisines. Une fois les paramètres obtenus, nous avons effectué des simulations FLORSYS avec les cultures pures, ainsi que des mélanges à 2, 4, 6 et 8 variétés. Ces champs virtuels ont été simulés dans 6 environnements différents, avec 4 distances d'inter-rang. Le overyielding a été calculé, et lié aux critères morphologiques (moyenne et coefficient de variation des traits des variétés dans la parcelle) avec des arbres de classification et de régression CART.

3. Résultats

La variété Campanile s'avère la plus déterminante pour le overyielding: lorsque Campanile est présente, le mélange est plus performant (+0.16 points d'overyielding, Figure 1). Quand on regarde les combinaisons de traits de variétés, le jeu de données est principalement structuré par le minimum de la hauteur relative de la surface foliaire RLH au stade 2 feuilles: le overyielding est plus élevé quand le minimum de la hauteur de surface foliaire est faible, ce qui indique qu'un mélange variétal performant doit avoir au moins une variété avec une hauteur relative de surface foliaire plutôt faible (donc avec la surface foliaire concentrée plutôt vers le sol). Ensuite, le overyielding augmente quand la moyenne des ratio hauteur/biomasse HBR des variétés augmente également, donc que les plantes sont plutôt grandes par unité de biomasse, donc étiolées.



4. Conclusion

Le modèle de simulation FLORSYS permet de simuler de nombreuses combinaisons de mélanges de variétés dans différents environnements. Cela permet de discriminer quels traits variétaux – ou quelles combinaisons de traits variétaux – sont déterminants pour le succès du mélange. D'autres analyses sont en cours afin d'évaluer les traits déterminants pour la stabilité des mélanges entre les différents environnements, ainsi que les effets sur les adventices. Les défis suivants concernent la transmission de ces résultats à la pratique, qui a besoin de critères simples et peut-être plus faciles à mettre en œuvre.

5. Références

- 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? *European Journal of Agronomy* 121, 126158.
- Stefan, L., Strebel, S., Camp, K.-H., Christinat, S., Fossati, D., Städeli, C., Levy Häner, L., 2025. Multi-trait assessment of wheat variety mixtures performance and stability: Mixtures for the win! *European Journal of Agronomy* 164, 127504. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127504>

Modéliser les adventices vivaces dans FLORSYS pour identifier des leviers de gestion agroécologiques

Solèmne SKORUPINSKI¹, Delphine MOREAU², Nathalie COLBACH²

¹ SAS, INRAE, Institut-Agro Rennes Angers, Rennes, France

² Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : solemne.skorupinski@inrae.fr

Résumé

Pour répondre au besoin d'identification de leviers pour une gestion durable des adventices vivaces en grandes cultures, de nouvelles connaissances et outils ont été produits et sont présentés dans cet article. Le modèle FLORSYS a été utilisé comme cadre conceptuel pour synthétiser de nombreuses connaissances sur le fonctionnement des vivaces au champ et les organiser via la construction d'un module mécaniste, intégré à FLORSYS, qui permet simule la dynamique de ces espèces. Une fois évalué, le modèle permettra de mieux comprendre les réponses des espèces vivaces aux techniques culturales et co-concevoir des systèmes agroécologiques intégrant une gestion durable des adventices vivaces.

Mots-clés : modélisation mécaniste ; multiplication végétative ; fragmentation ; racines traçantes ; rhizomes

1. Introduction

Les adventices vivaces sont des espèces particulièrement persistantes dans les champs cultivés en raison de leur capacité à se propager rapidement et à régénérer des plantes par multiplication végétative (Håkansson, 1982). Elles sont très difficiles à contrôler sans herbicide systémique et/ou travail du sol fréquent (Neve et al., 2024) mais ont pourtant été peu étudiées contrairement aux espèces annuelles (Hatcher, 2017). La gestion agroécologique des adventices propose de combiner de nombreuses techniques de gestion à effets partiels et préventifs et qui maximisent les régulations biologiques. L'identification de telles stratégies requiert de tester un grand nombre de combinaisons de techniques et d'évaluer leurs effets sur le long terme. Les modèles de simulation mécanistes sont des outils pertinents pour évaluer de nombreux systèmes de culture dans différents contextes pédoclimatiques et floristiques. Le modèle FLORSYS est à ce jour le plus complet pour répondre à cet objectif (Colbach et al., 2021) sa qualité prédictive, en terme de classement des systèmes de culture selon leurs performances liées au contrôle des adventices, ayant été démontrée (Colbach et al., 2016).

L'objectif de cet article est de présenter comment FLORSYS a servi de cadre conceptuel pour synthétiser les connaissances sur la biologie des adventices vivaces et l'effet des techniques, et les articuler (en intégrant également de nouvelles données que nous avons produite via des expérimentations, Skorupinski et al., 2023; 2024a, b) dans un module mécaniste, compatible avec FLORSYS, qui prédit la dynamique des adventices vivaces. Les étapes futures de validation puis d'utilisation de la nouvelle version du modèle seront discutées.

2. Matériel et méthodes

Le module « vivaces » intégré à FLORSYS a été conçu sur la base d'une synthèse des connaissances sur 6 espèces modèles: le chardon des champs (*Cirsium arvense*, CIRAR), le chiendent rampant (*Elymus repens*, AGRRE), le laiteron (*Sonchus arvensis*, SONAR), le liseron (*Convolvulus arvensis*, CONAR), et deux rumex (*Rumex crispus*, RUMCR ; *R. obtusifolius*, RUMOB). Quatre les principes ont été suivis : (1) ancrer les nouveaux formalismes aux variables préexistantes du modèle ; (2) minimiser les modifications de la représentation 3D des plantes ; (3) veiller à ce que les nouveaux formalismes soient génériques et économes en paramètres ; (4) utiliser la littérature et nos travaux antérieurs pour ajuster les équations et estimer les valeurs des paramètres. Les paramètres des processus liés au cycle annuel des plantes sont issus de la littérature sur les espèces cibles en priorité, sinon sur celle d'espèces similaires, et en dernier recours, sont estimés à partir des relations fonctionnelles avec des traits connus. Deux espèces ont été paramétrées : le chardon des champs et le chiendent rampant.

3. Résultats

Les principaux processus représentés dans le nouveau module sont présentés dans la Figure 1. Les formalismes résultants sont applicables à l'ensemble des espèces vivaces avec des organes souterrains.

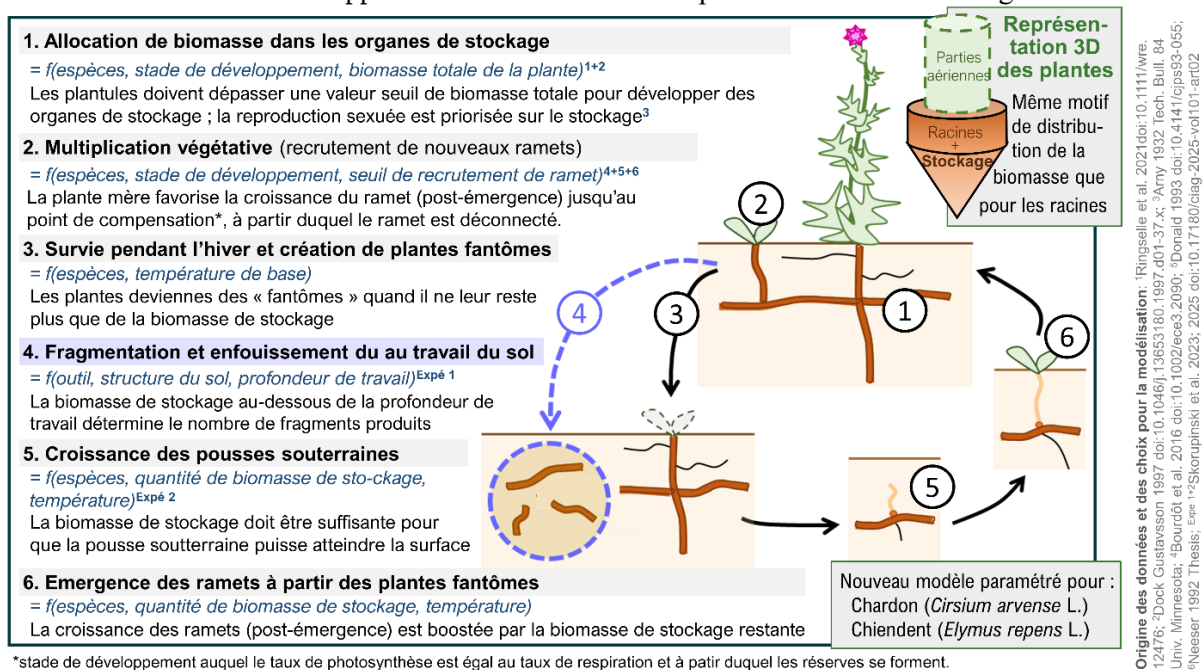


Figure 1. Schéma des principaux processus biologiques du cycle asexué des adventices vivaces et de l'effet du travail du sol représentés dans le modèle. Les paramètres déterminants les processus et les règles principales de modélisation sont précisées. Les chiffres en indice renvoient aux travaux mobilisés (légende verticale à droite).

4. Discussion

La nouvelle version de FLORSYS est le premier modèle mécaniste de dynamique adventice, 3D individu-centré et multi-espèce, qui intègre le cycle de vie complet des adventices vivaces en interaction avec les techniques culturales et le pédoclimat. Il permet de lier les études sur la nuisibilité des vivaces à l'échelle de la plante (e.g., émergence de plantes à partir de fragments, Sciegienka et al., 2011) aux mesures de terrain à l'échelle du peuplement (e.g., nombre de plantes après différentes modalités de travail du sol, Brandsæter et al., 2017) et de quantifier les facteurs impliqués.

Pour des raisons de compatibilité avec la structure du modèle (et ses objectifs), la représentation de certains processus a été simplifiée (e.g., la distribution 3D des organes de stockage ou le maintien des connexions entre plantes). La paramétrisation de certains formalismes reste imprécise lorsque peu de données existaient dans la littérature (e.g., seuils de biomasse pour la production spontanée de nouvelles plantes par multiplication végétative). L'impact de ces choix de modélisation devra être évalué, au regard du domaine de validité du modèle et des objectifs de simulation, afin d'orienter de futurs efforts d'amélioration. La cohérence de la dynamique simulée des espèces vivaces pourra être appréciée qualitativement en se référant des observations de terrain, avant d'entreprendre une évaluation quantitative par la confrontation à des données réelles issus d'essais système.

La nouvelle version de FLORSYS (une fois validée) permettra (1) de mieux comprendre le fonctionnement des adventices vivaces dans les systèmes de culture pour diagnostiquer les effets des techniques (e.g., les impacts variables du travail du sol sur la régénération et la prolifération des individus) et concevoir de nouvelles stratégies de gestion de ces adventices ; et également, (2) enrichira les ateliers de co-conception de système de culture avec des acteurs de terrain (Queyrel et al., 2023), en intégrant dorénavant la problématique de la gestion des adventices vivaces.

5. Références

Brandsæter, L. O., Mangerud, K., Helgheim, M., & Berge, T. W. (2017). Control of perennial weeds in spring cereals through stubble cultivation and mouldboard ploughing during autumn or spring. *Crop Protection*, 98, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.03.006>

- Colbach, N., Bertrand, M., Busset, H., Colas, F., Dugué, F., Farcy, P., Fried, G., Granger, S., Meunier, D., Munier-Jolain, N. M., Noilhan, C., Strbik, F., & Gardarin, A. (2016). Uncertainty analysis and evaluation of a complex, multi-specific weed dynamics model with diverse and incomplete data sets. *Environmental Modelling & Software*, 86, 184-203. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.020>
- 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 Research*, 261, 108006. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>
- Håkansson, S. (1982). Multiplication, growth and persistence of perennial weeds. In W. Holzner & M. Numata (Éds.), *Biology and ecology of weeds* (p. 123-135). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0916-3_11
- Hatcher, P. E. (2017). Perennial Weeds. In *Weed Research* (p. 389-412). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119380702.ch13>
- Neve, P., Matzrafi, M., Ulber, L., Baraibar, B., Beffa, R., Belvaux, X., Farré, J. T., Mennan, H., Ringselle, B., Salonen, J., Soukup, J., Andert, S., Duecker, R., Gonzalez, E., Hamouzová, K., Karpinski, I., Travlos, I. S., Vidotto, F., & Kudsk, P. (2024). Current and future glyphosate use in European agriculture. *Weed Research*, wre.12624. <https://doi.org/10.1111/wre.12624>
- 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. *Agricultural Systems*, 208, 103645. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103645>
- Sciegienka, J., Keren, E., & Menalled, F. (2011). Impact of root fragment dimension, weight, burial depth, and water regime on *Cirsium arvense* emergence and growth. *Canadian Journal of Plant Science*, 91(6), 1027-1036. <https://doi.org/10.4141/cjps2011-059>
- Skorupinski, S., Busset, H., Caneill, J., Moreau, D., Mosa, B., Motton, E., & Colbach, N. (2024). Combining a field experiment and literature to model the regrowth probability of perennial storage organs fragmented by tillage : Case study of *Cirsium arvense* (L.) Scop. *Soil & Tillage Research*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106279>
- Skorupinski, S., Busset, H., Matejicek, A., Motton, E., Moreau, D., & Colbach, N. (2023). Comment repoussent les adventices vivaces à partir de fragments de racines traçantes ou de rhizomes ? Etude des déterminants pour deux espèces problématiques, le chardon et le chiendent. *COLUMA Presentation*. 25ème conférence du COLUMA Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes.
- Skorupinski, S., Colbach, N., Busset, H., Matejicek, A., & Moreau, D. (2024). Rhizome fragment weight and density of competing shoots determine belowground regrowth of *Elymus repens*. *Weed Research*, 64(3), 207-218. <https://doi.org/10.1111/wre.12623>

Importer des systèmes de culture depuis AGROSYST

Jean Villerd, Aurélie Baquet, Nicolas Cavan

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : Jean.Villerd@inrae.fr

Résumé

Cet article présente la procédure et les scripts R pour exporter des données décrivant des systèmes de culture dans le système d'information AGROSYST stockant les systèmes du réseau DEPHY FERME et les transformer en fichier d'entrée pour le modèle FLORSYS.

Utilisation du modèle FLORSYS pour évaluer les systèmes de culture du réseau DEPHY

Aurélié Baquet, Nicolas Cavan, Jean Villerd, Nathalie Colbach

Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne Europe, Dijon, France

Correspondance : nathalie.colbach@inrae.fr

Résumé

Le modèle de simulation FLORSYS est mobilisé pour analyser les performances des systèmes de grande culture du réseau DEPHY (Démonstration, Expérimentation et Production de références sur les systèmes économes en produits PHYtosanitaires). A partir des données issues du système d'information Agrosyst, les systèmes sont simulés sur le long terme pour être évalués. Cette approche vise à comprendre quelles combinaisons de leviers agroécologiques favorisent des systèmes de culture économes en herbicides.

Mots-clés : adventice, modèle de simulation, perte de rendement, régulation biologique

1. Introduction

Plusieurs leviers agroécologiques ont déjà été identifiés pour concilier la production agricole et la réduction de l'usage des herbicides. Il s'agit notamment de la diversification des cultures, des couverts végétaux, du travail du sol ou encore de la modification des dates de semis. Toutefois, la manière dont ces leviers doivent être mis en œuvre et leurs combinaisons optimales restent mal connues, notamment en fonction des contextes pédoclimatiques et floristiques locaux. Une étude de simulation est menée pour évaluer les systèmes de culture du réseau français DEPHY. L'objectif est d'identifier à l'échelle nationale, les systèmes de culture performants en termes de production des cultures, de nuisibilité des adventices, et de contribution à la biodiversité, mais aussi de caractériser les pratiques culturales innovantes qui leur sont associées.

2. Matériel et méthodes

L'étude repose sur une démarche en quatre étapes clés (Figure 1). **(1) Extraction des données d'entrée.** Les pratiques culturales saisies par les agriculteurs et leurs conseillers dans le système d'information Agrosyst ont été extraites puis converties au format « système de culture » attendu par le modèle grâce à une solution d'interopérabilité dédiée (Villerd *et al.*, 2026, Webinaire FLORSYS). Chaque système de culture est composé d'itinéraires techniques décrivant l'ensemble des interventions culturales (la date d'intervention, l'outil de travail du sol et/ou de désherbage mécanique, la profondeur et la vitesse de travail...). Des référentiels spécifiques ont également été mobilisés afin d'assurer la correspondance entre les données Agrosyst et les données d'entrée reconnues par le modèle FLORSYS. Cette première étape a été complétée par l'extraction de données climatiques quotidiennes localisées (Météo-France), des caractéristiques détaillées des sols (Référentiels Régionaux Pédologiques, Base de Données d'Analyses des Terres) et des stocks semenciers initiaux régionaux. **(2) Simulations avec le modèle FLORSYS.** Les 2500 systèmes de culture ainsi formalisés sont simulés avec le modèle FLORSYS, une parcelle virtuelle capable de simuler le cycle de vie des plantes cultivées et la dynamique de la flore adventice sur plusieurs années (Colbach *et al.*, 2021). Chaque système est simulé sur 30 ans selon 10 scénarios météorologiques différents. Le modèle est particulièrement adapté à l'étude des effets à long terme des systèmes de culture sur la régulation des adventices. Les simulations produisent également de nombreuses variables relatives aux cultures, difficiles à mesurer au champ. **(3) Calcul des indicateurs annuels de performance.** Les sorties détaillées du modèle sont ensuite traitées pour calculer des indicateurs annuels évaluant la production des cultures, les dysservices liés aux adventices (perte de rendement, salissement du champ) ainsi que les services rendus par les adventices (richesse spécifique des espèces, ressources trophiques pour les pollinisateurs). Ces indicateurs permettront de classer les systèmes de culture selon leur performance. **(4) Identification des pratiques innovantes.** Enfin, des méthodes de fouille de données (arbres de régression, forêts aléatoires) permettront de caractériser les

pratiques agricoles des systèmes les plus performants, en termes de production et de gestion des adventices, et d'identifier les déterminants techniques et biologiques de la performance.

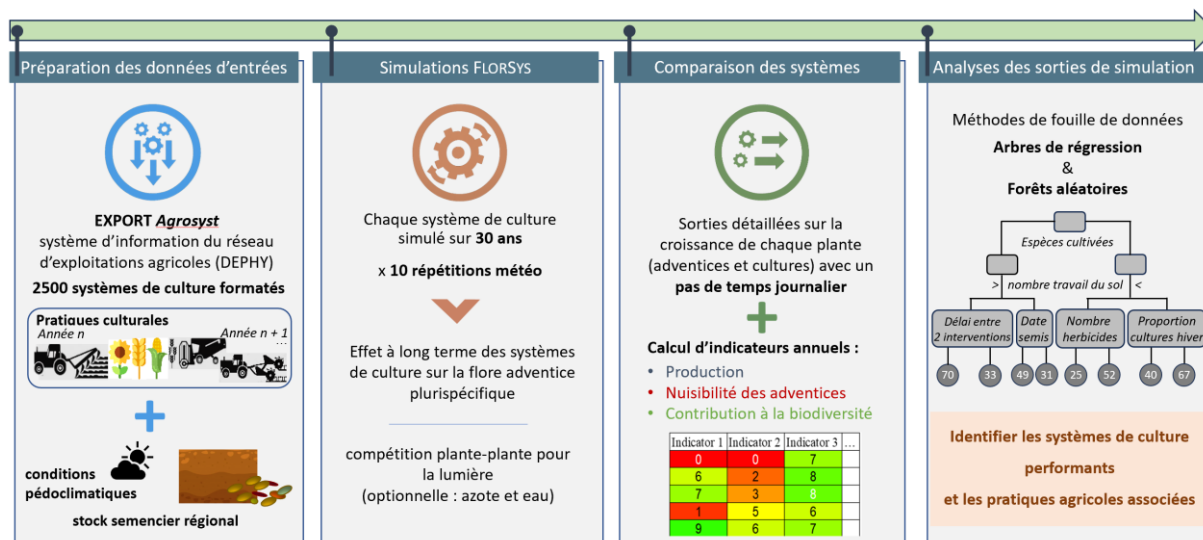


Figure 1. Démarche de diagnostic de systèmes de culture contrastés avec le modèle FLORSYS

La simulation de 2500 systèmes de culture, répartis sur l'ensemble du territoire français, nécessite une préparation importante des données d'entrée du modèle FLORSYS. Une fois les simulations réalisées, le traitement et l'analyse des sorties du modèle permettront de mettre en évidence des pratiques agricoles innovantes, notamment via des méthodes de fouille de données.

3. Conclusion

Cette étude de simulation permettra d'identifier les principaux leviers influençant les indicateurs de performance des systèmes de culture du réseau d'exploitations agricoles DEPHY. Les simulations réalisées permettront également de déterminer des règles de combinaison de ces leviers pour concilier le rendement des cultures, la réduction de l'utilisation des herbicides et la contribution à la biodiversité. Les pratiques innovantes en lien avec la réduction de l'intensité du travail du sol pourront aussi être mises en évidence. Plus largement, cette approche qui combine un réseau d'exploitations agricoles et l'utilisation d'un modèle de simulation permet de valoriser les données d'un système d'information à grande échelle, de réaliser un diagnostic de systèmes de culture contrastés et de fournir des lignes directrices pour la conception de systèmes de culture agroécologiques performants.

4. Références

- Baquet A., Cavan N., Villerd J. (2026, 1 avril) Importer des systèmes de culture depuis Agrosyst, Webinaire FLORSYS, <https://florsys.hub.inrae.fr/>
- 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 Research, 261, 108006, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>

Méta-modélisation de FLORSYS à la base de l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS

Floriane COLAS, Jean VILLERD, Nathalie COLBACH

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : Nathalie.Colbach@inrae.fr

Résumé

Cet article présente les approches utilisées pour créer le moteur "biologique" de l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS à partir de simulations réalisées avec le modèle FLORSYS: (1) le plan de simulation pour couvrir au mieux l'hyperespace des systèmes possible, (2) l'aggrégation des entrées détaillées en descripteurs synthétiques des systèmes de culture, (3) les techniques de fouille de données (machine learning) utilisées pour lier les descripteurs aux indicateurs de nuisibilités et bénéfices des adventices (arbres de classification et de régression, forêts aléatoires). Ce travail avait été initialisé dans la thèse de doctorat de Floriane Colas.

Mobilisation des connaissances et expériences issues de FLORSYS pour co-construire et utiliser des outils d'aide à la co-conception de systèmes de culture

Wilfried QUEYREL

Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

Correspondance : wilfried.queyrel@institut-agro.fr

Résumé

Cet article présente comment l'interface graphique de l'outil d'aide à la décision DECIFLORSYS a été co-conçu avec des acteurs (conseillers, agriculteurs, étudiants...), comment la méthodologie d'utilisation de cet outil a été développée et comment l'outil et la méthodologie sont utilisés avec des acteurs de terrain pour co-concevoir des systèmes de culture pour la gestion agroécologique des adventices.

Comment utiliser FLORSYS et ses sorties pour évaluer un seul changement de système ?

Nicolas CAVAN¹, Aurélie BAQUET, Alice NIDRICHE², Frédérique ANGEVIN², Wilfried QUEYREL¹

¹ Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne Europe, F-21000 Dijon, France

² INRAE, Info&Sols, 45000 Orléans, France

Correspondance : nicolas.cavan@inrae.fr

Résumé

Cet article identifie les étapes clé et précautions pour l'utilisation de FLORSYS avec des agriculteurs.

1. Introduction

FLORSYS est un modèle mécaniste. Le coût d'accès aux paramètres de nouvelles espèces et variétés, ou bien de la définition de nouveaux formalismes étant assez élevé, il n'est pas possible d'avoir un paramétrage fin de toutes les cultures et variétés cultivées ainsi que des adventices présentes dans un contexte précis.

De la même façon pour les données d'entrée, si les pratiques culturales sont assez simples à obtenir de manière déclarative, les autres données d'entrée sont souvent inaccessibles (*e.g.* le stock semencier et le type de sol). Or elles sont susceptibles de modifier les résultats de simulation, comme nous le verrons au travers de quelques exemples.

Par ailleurs, il est possible d'avoir des difficultés à simuler un système en particulier (temps de simulation trop long, conditions limites du modèle, erreurs avec ou sans message). C'est tout à fait normal pour un modèle de recherche, qui est en permanente évolution pour intégrer de nouveaux formalismes et dont on ne peut pas attendre la stabilité d'un logiciel client classique.

Ces deux constats (paramètres et données d'entrée manquantes ou difficiles à acquérir et bugs possibles) ont des conséquences importantes lorsque l'on souhaite faire une évaluation de systèmes de culture dans un contexte très local (une expérimentation ou un groupe d'agriculteurs avec seulement deux systèmes à évaluer : une référence – le système pratiqué – et un innovant – le système co-conçu pour résoudre des problématiques de gestion des adventices). En effet, le manque de données d'entrée ou de paramètres idoines peut conduire rapidement à des conclusions erronées, et les bugs empêchant de faire tourner FLORSYS à l'absence de conclusion (*e.g.* si un des deux systèmes ne peut pas être simulé).

Enfin, en comparaison à des études comportant un plus grand nombre de systèmes de culture, la restitution des résultats est régulièrement l'occasion d'essayer de comprendre en détails les raisons des performances des systèmes de cultures simulés, ce qui peut conduire à quitter le raisonnement aux échelles de la flore adventice dans son ensemble et du système de culture pour descendre à celle d'une adventice problématique seulement sur un itinéraire technique. Comment alors trouver le juste équilibre entre le fait de rester aux échelles souhaitées et celui d'éviter l'effet « boîte noire » ?

L'idée ici est de passer en revue plusieurs expériences de ce type pour en tirer, en fonction des cas, des règles de fonctionnement, des astuces, ou énoncer les questions encore à traiter.

2. Le temps de réalisation des simulations par système est plus long qu'espéré

Dans le cas d'un groupe d'agriculteurs ou d'une expérimentation dont on veut simuler un système en particulier, on peut avoir un retour d'expérience ou des observations, qui vont pousser à relancer des simulations en modifiant des paramètres (notamment ceux de cultures ou couverts). Deux exemples :

- i. Pour un dispositif expérimental, du trèfle violet est semé en tête de rotation pour deux ans. Il est fauché plusieurs fois pour récolter de la biomasse et ne graine pas (observation au champ). Or dans les premiers résultats de simulation FLORSYS, il est devenu la principale adventice, en grainant entre les fauches. Il a donc fallu relancer les simulations avec un trèfle violet plus tardif.
- ii. Pour un autre dispositif expérimental, la nuisibilité très élevée des adventices dans le système de référence a conduit à investiguer pour comprendre ce résultat puis à identifier une ligne manquante dans l'efficacité des herbicides : la folle-avoine seule causait ces problèmes et n'avait

pas d'efficacité renseignée pour un herbicide foliaire de printemps (alors qu'elle est bien renseignée par le fabriquant). Ajouter cette ligne a significativement diminué la nuisibilité. Enfin, lorsqu'il y a des bugs, il faut avoir le résultat de simulation pour les deux systèmes et au moins 5 répétitions, sous peine de n'avoir aucun résultat à présenter. Donc cela conduit à de multiples échanges et essais pour déboguer. Dans le cas d'un bug mémoire, on peut essayer de contourner le problème en lançant les simulations répétition par répétition avec FLORSYS pour les simulations parallèles.

Tous ces phénomènes conduisent à significativement augmenter le temps de réalisation des simulations dans des contextes précis, avec pourtant peu de systèmes à simuler.

3. Absence de règles de décisions : un désavantage de certaines pratiques culturales ?

En revenant sur l'exemple (ii) de la partie précédente (désherbage de la folle-avoine avec un herbicide foliaire de printemps), cela pose une deuxième question, celle de l'absence de règles de décision. C'est une contrainte de FLORSYS non contournable, car ces règles allongeraient trop le temps de calcul des simulations. Néanmoins, cette absence pourrait désavantager certaines stratégies comparativement à d'autres. C'est le cas du désherbage foliaire : si le désherbage a lieu avant la levée des adventices ciblés dans FLORSYS, alors l'herbicide est appliqué avec une efficacité nulle. L'efficacité est également nulle si l'application a lieu trop tard (stade des adventices trop avancé).

Cette règle de décision a bien été implémentée dans FLORSYS, mais peu utilisée depuis : dans une plage temporelle entre deux dates, placer l'application d'herbicide au moment où les adventices ciblées ont levé. C'est un bon exemple de modification de FLORSYS demandé par les utilisateurs des sorties.

4. Interprétation des sorties : que regarder et jusqu'où creuser ?

De manière classique, pour analyser les sorties de FLORSYS, on commence par les moyennes des indicateurs annuels (de nuisibilité et de contribution à la biodiversité). Pour comprendre ces résultats, on peut ensuite regarder l'évolution de certains indicateurs annuel sur la durée de simulation (notamment les pertes de rendement dues aux adventices et la production de graines adventices) : cela permet de repérer des « patterns » dans les rotations culturales, donc les points faibles et forts d'une rotation.

Ensuite, le fichier `annualPlantDensities.prn` permet de contrôler plusieurs variables clés (biomasse et densité) des adventices et cultures (indication des valeurs moyennes et maximales pendant l'interculture et dans la période d'implantation de la culture). Si on trouve des résultats surprenants dans ce fichier, il faut ensuite aller regarder le fichier de synthèse (`synthesis.prn`) qui présente les « photographies » de la parcelle virtuelle (densité par stade, biomasse aérienne et racinaire et production de graine par les adventices et les cultures). Quelques exemples de repérage :

- l'exemple (ii) avec un désherbage inopérant de la folle-avoine (densité et biomasse de cette espèce n'évoluent pas avant / après le passage d'herbicide)
- l'exemple (i) avec un trèfle violet qui graine, ce qui n'est pas le cas sur la parcelle expérimentale
- toujours sur le paramétrage des cultures, on peut parfois observer des levées trop tardives (et systématiques) de certaines d'entre elles.

5. Présentation des sorties : quel équilibre entre présenter le détail et l'effet « boîte noire » ?

Des précautions sont à prendre lorsque l'on présente les résultats de simulation : rappeler qu'on compare les systèmes entre eux, normaliser tous les indicateurs et rappeler que les valeurs absolues n'ont pas de sens. Néanmoins, ces principes peuvent être compliqués à accepter (e.g. la perte de rendement dues aux adventices proche ou égale à 100 % fait toujours réagir). De plus, les questions posées pour comprendre les résultats peuvent conduire à sortir du cadre d'utilisation de FlorSYS (évaluation de systèmes et de l'impact de la flore adventice dans son ensemble), mais y répondre permet de limiter l'effet « boîte noire » du modèle. Un exemple simple : « Pourquoi y a-t-il un pic de chénopodes dans mon tournesol ? Quelle pratique n'a pas été bonne ? » Cela peut conduire à sortir du raisonnement systémique. Enfin, cette présentation est souvent préparée avec une forte contrainte temporelle (suite au temps de simulation plus long que prévu), ce qui limite le temps de réflexion pour de nouveaux formats.

On peut noter certains succès : le développement de l'indicateur de résilience face à des pics de pression adventice (plus généralement la nuisibilité à long terme), les indications sur des changements de flore potentiels à venir. Enfin, une idée récente serait de faire le récit des boucles simulations – conception réalisées pour comprendre comment le modèle a fait partie intégrante du processus de conception.