

La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de culture intégrés

N. Colbach, A. Gardarin, S. Granger, J.P. Guillemain, N. Munier-Jolain

UMR 1210 Biologie et Gestion des Adventices, INRA ENESAD Université de Bourgogne, BP 86510, 21065 Dijon Cedex

Correspondance : Nathalie.Colbach@dijon.inra.fr

Résumé

L'UMR BGA développe des modèles simulant la dynamique des adventices des champs cultivés en fonction des effets cumulatifs des systèmes de culture. Ces modèles sont à la fois des outils d'analyse des interactions au sein de l'agro-système, des outils d'analyse de la diversité des réponses des espèces, et des outils d'évaluation *ex ante* de stratégies de gestion alternatives, proposées en réponse aux enjeux actuels de l'agriculture (notamment la baisse de la dépendance aux herbicides). Nous disposons de deux versions de modèle, l'une monospécifique 'vulpin' (ALOMYSYS), l'autre générique et plurispécifique (FLORSYS), fondées toutes deux sur la représentation du cycle biologique des adventices et sur des fonctions démographiques liées aux systèmes de culture, en interaction avec le climat et les états du milieu. La prise en compte des interactions nécessite de décomposer le système en processus individuels. Dans la version plurispécifique, la diversité des espèces est prise en compte par une approche fonctionnelle. Chaque espèce est représentée par un ensemble de traits, et les paramètres du modèle sont estimés à partir de traits facilement mesurables (poids moyen des semences par exemple). Une méthodologie d'évaluation de systèmes de culture et de tests de scénarii à partir d'ALOMYSYS et d'autres indicateurs est proposée au travers d'exemples rencontrés en exploitations agricoles en Côte d'Or, avec l'objectif de trouver des solutions qui permettent de gérer le vulpin, sans recours aux herbicides et sans accroître les impacts environnementaux et opérationnels.

Abstract

The INRA *Weed Biology and Management* research laboratory develops models simulating weed dynamics in cultivated fields as a function of cumulative cropping system effects. These models are tools for analysing interactions in the agro-system, for analysing the diversity in species behaviour, and for evaluating alternative management strategies that are proposed to address current issues in agriculture (e.g. to reduce the dependence on herbicides). To date, two model versions have been developed, a monospecific prototype for black-grass (ALOMYSYS), followed by a generic and multispecific update (FLORSYS). Both are based on the annual weed life-cycle and on demographic functions depending on cropping systems, in interaction with climate and environmental conditions. Taking account of interactions requires the decomposition of the system into individual processes. In the multi-specific version, the species diversity is integrated by functional relationships. Each species is represented by a combination of traits, and the model parameters are estimated from these easy-to-measure traits (e.g. mean seed mass). A methodology for evaluating cropping systems and for testing prospective scenarios with ALOMYSYS and other indicators was proposed and illustrated with case studies from a farm survey in Côte d'Or. The objective was to identify solutions for managing black-grass, without herbicides and without increasing environmental and operational impacts.

Introduction

En raison des problèmes environnementaux liés à l'utilisation des herbicides, l'agriculture doit appliquer des modes de production plus respectueux de l'environnement, en particulier moins dépendants des herbicides. Cette préoccupation s'accompagne du maintien de la biodiversité, à laquelle peuvent contribuer des espèces adventices ayant un rôle fonctionnel dans l'agro-écosystème.

Nous avons donc besoin de stratégies innovantes pour la gestion des adventices, prenant en compte l'ensemble du système de culture (succession des cultures dans le temps et itinéraires techniques appliqués à ces cultures selon Sebillotte (1990)) au lieu de raisonner indépendamment chaque technique culturale. Or, les effets des systèmes de culture sur les adventices sont complexes. Ils sont susceptibles d'influencer les différents processus du cycle de vie des espèces (levée, compétition, production semencière...) et les espèces adventices répondent différemment en fonction de leur biologie. Les techniques culturales interagissent entre elles ainsi qu'avec les conditions climatiques. De plus, ces effets se cumulent sur plusieurs années. Par exemple, les semences d'une espèce peuvent être remontées en surface lors d'un labour plusieurs années après leur production et leur enfouissement, occasionnant subitement de nombreuses levées au champ.

Dans ce contexte, la modélisation est indispensable pour synthétiser et quantifier ces effets dans une large gamme de situations, analyser les interactions et évaluer les effets cumulatifs à long terme des systèmes de culture sur les adventices. Nous présentons ici les principes pour développer, évaluer et utiliser de tels modèles pour la gestion intégrée des adventices.

Modèles des effets des systèmes de culture sur la flore adventice

À ce jour, nous avons développé dans notre unité deux modèles qui synthétisent et quantifient les effets des systèmes de culture sur la dynamique de la flore adventice. Tout d'abord, un prototype appelé ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2006b ; Colbach *et al.*, 2007) a été développé pour une espèce fréquente et nuisible, le vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides*). Ce modèle est fondé sur la représentation du cycle de vie de l'adventice par une succession de stades-clé (ex. semences germées, croissance prélevée, plantules levées...) reliés par des fonctions démographiques dépendant des effets des systèmes de culture, en interaction avec le climat et les états du milieu. Nous travaillons actuellement à l'extrapolation de ce prototype à une flore adventice plurispécifique pour construire le modèle FLORSYS (pour flore et systèmes de culture).

Nous présentons ici quelques principes de modélisation indispensables pour quantifier correctement les effets des systèmes de culture dans une large gamme de situations et paramétrer le modèle pour une flore adventice diversifiée. Le Tableau 1 synthétise les effets majeurs des composantes du système de culture décrits dans le modèle ALOMYSYS:

Tableau 1 : Synthèse des effets des systèmes de culture sur les stades du cycle de vie des adventices et des états du milieu dans le modèle ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2006, 2007)

Composante du système de culture	Effet intermédiaire	Effet sur le vulpin
travail du sol (outil, profondeur, date)	structure du sol	la compaction du sol ➔ la mortalité des semences germées et ➔ la levée
	mélange de sol = f(structure du sol)	détermine la profondeur des semences
		exposition des semences à la lumière
		stimulation d'une vague de germination
culture	choix des techniques culturales	destruction de semences germées et plantes levées
		(voir effet des techniques)
date de semis	date du semis combinée au travail du sol	en cas de semis tardif, + de semences auront déjà germé et pourront être détruites par le travail du sol lors du semis, donc moins de levée en culture
	date de levée de la culture	plus l'adventice lève tôt par rapport à la culture, mieux elle survit et se reproduit
densité de semis	densité de la culture	➔ mortalité des plantules ➔ production de semences
herbicides (substance active, dose, niveau d'efficacité, date)		mortalité = f(SA, dose, niveau d'efficacité) mortalité ➔ avec densité et stades des plantes ainsi qu'avec la profondeur des semences ➔ tallage des plantes survivantes
désherbage mécanique (date, vitesse, profondeur)	arrachage des plantes recouvrement de sol	mortalité dépend de : arrachage, recouvrement, humidité du sol
fauche		destruction des talles montées
		mortalité des plantes si fauche après début maturité ➔ reproduction des plantes survivantes décalage des stades
azote		➔ fleurs/épi
	Conditions (climat, culture...) durant la production de graines	➔ dormance des semences produites
Récolte		destruction de toutes les plantes
		addition des nouvelles semences au stock du sol

X ➔ (➔) Y : si x augmente, y augmente (diminue).

Variables d'entrée et de sortie

Les variables d'entrée des modèles ALOMYSYS et FLORSYS sont de trois types :

- le stock semencier initial, décrit par la densité de semences d'adventices dans le sol et leur répartition verticale au sein de l'horizon travaillé (de 0 à 30 cm de profondeur).
- les composantes des systèmes de culture. Il s'agit de la succession culturale et des modalités de leur gestion, comprenant les opérations de travail du sol (date, outil, caractéristiques), l'implantation de la culture (variété, date, densité, inter-rang), les traitements herbicides (date, substance active, conditions), le désherbage mécanique (date, outil, profondeur, vitesse), les engrais azotés chimiques et/ou organiques (date, quantité), le broyage ou la fauche, et la récolte (date).
- l'environnement pédo-climatique : température, pluviométrie et ETP quotidiennes, ainsi que la texture et les conditions hydro-thermiques du sol. Les variables hydro-thermiques du sol peuvent

être soit introduites directement par l'utilisateur, soit prédites à l'aide de modèles existants (STICS : Brisson *et al.*, 1998).

En sortie, le modèle calcule quotidiennement la densité d'individus de chaque espèce à chaque stade de développement (plantule, stade végétatif, floraison, *etc.*) ainsi que le stock semencier viable dans le sol.

Décomposition du cycle de vie en processus

Pour comprendre et quantifier la variabilité des réponses observées au champ, sans risque de confusion d'effets, il est nécessaire de décomposer les effets de la technique sur les états du milieu et les processus de base dont la succession détermine le comportement des populations adventices.

Appliqué à l'effet du travail du sol sur la levée des adventices (Figure 1), ce principe revient à modéliser :

- les effets du travail du sol sur les états et conditions physiques du sol (structure, température, humidité, lumière...)
- les effets du travail du sol sur la localisation des semences d'adventices, et
- les effets des conditions physiques et de la localisation des semences sur la survie, dormance, germination et croissance-pré-levée des adventices.

Le stock semencier, qui décroît chaque jour suite aux attaques parasitaires ou par simple vieillissement, est composé de semences dormantes (qui ne germent pas même en conditions favorables) et non dormantes. Les proportions de semences dormantes varient en fonction des saisons. Les semences non dormantes peuvent germer (sortie de la radicule de la semence) si elles sont proches de la surface du sol et si le sol est suffisamment chaud et humide. Une fois germées, les semences produisent un hypocotyle (cas des dicotylédones) ou un épicotyle puis une feuille (cas des monocotylédones). Lorsque cet organe sort de la terre, la plantule est considérée comme levée. Cependant, si les semences sont enfouies trop profondément, ou si l'organe aérien est bloqué par des mottes de terre ou si le sol s'assèche après germination et que la radicule est trop courte pour atteindre les horizons sous-jacents plus humide, la plantule meurt sans lever.

Le travail du sol joue à différents niveaux : il peut enfouir ou remonter des semences, il peut contribuer à lever les dormances des semences et stimule leur germination si le sol est humide au moment du travail, et il est un des facteurs déterminants de la structure du sol. En fonction de l'histoire culturale (déterminant, entre autres, la localisation et la densité des semences adventices) et de l'humidité au moment du travail, l'effet d'un même outil sera donc très différent (Figure 2).

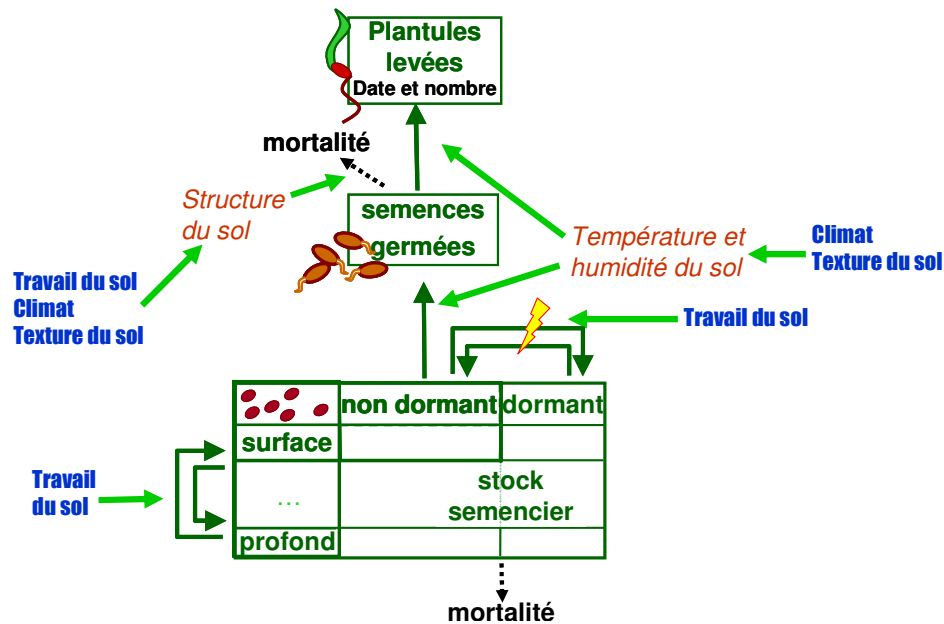


Figure 1 : Décomposition de l'effet du travail du sol sur la levée des adventices en processus biologiques élémentaires, en interaction avec les variables d'entrée (ex. **Travail du sol**) et états intermédiaires (ex. *Structure du sol*) (Colbach et al., 2006b)

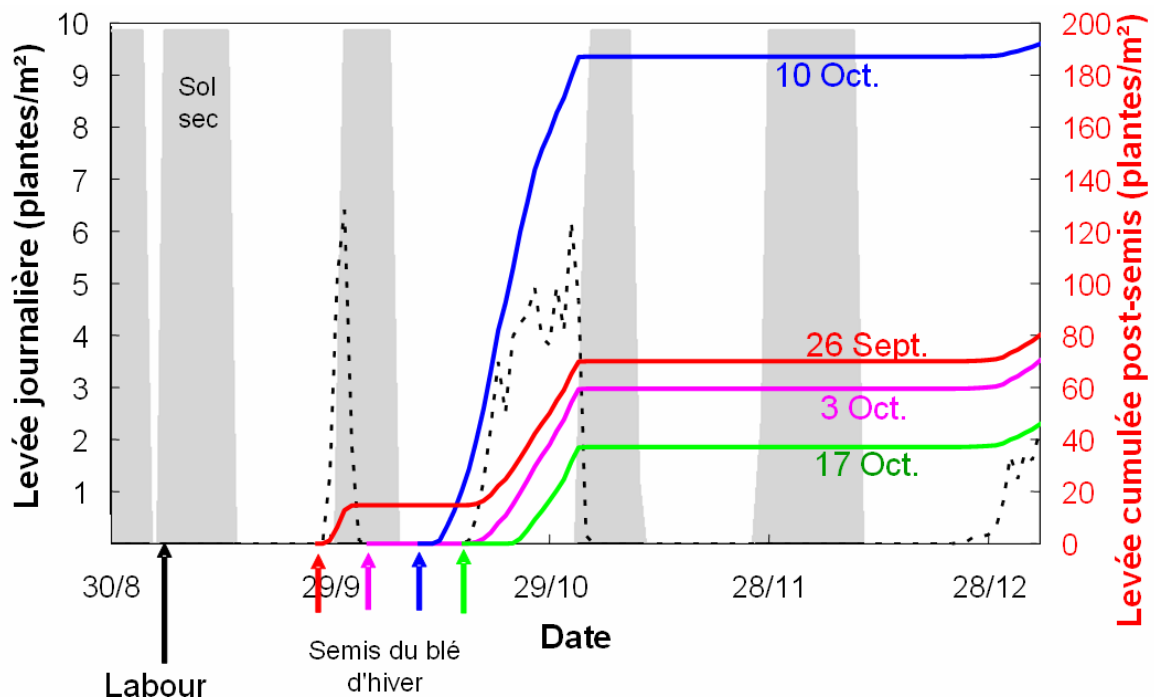


Figure 2 : Effet d'un retard du semis d'un blé d'hiver sur la levée du vulpin en culture simulée par ALOMYSYS. Le semis retardé laisse plus de temps aux semences adventices pour germer avant le semis, réduisant ainsi le nombre de semences adventices pouvant lever en culture. Si le travail du sol associé au semis est réalisé lors de la réhumidification du sol (semis du 10 octobre), il stimule une vague de levée post-semis

Modèle de compétition et le micro-climat lumineux

Une fois levée, les plantules se retrouvent dans un environnement lumineux très variable, en fonction de l'emplacement et de la taille des plantes déjà en place. La production semencière (et donc le renouvellement du stock semencier) de chaque plante d'une espèce peut varier fortement en fonction de la densité de la culture et de la variété ainsi que du climat. La simulation de cette production nécessite donc un modèle dynamique rendant compte de la mise en place progressive des relations de concurrence dans le couvert plurispécifique (Figure 3). Ce module intègre les deux éléments suivants :

- l'hétérogénéité entre plantes, avec de nombreuses petites plantes qui contribuent peu à la production semencière et quelques gros individus qui y contribuent beaucoup. FLORSYS intègre une représentation de la répartition spatiale des individus dans le couvert ; cette répartition détermine un microclimat lumineux hétérogène (adapté de Chave, 1999). Le devenir de chaque individu peut être simulé en fonction de son environnement lumineux, ce qui permet de rendre compte des effets des dates de levée relatives des individus mais aussi de la structure du peuplement cultivé, des écartements entre les rangs, de la régularité de l'implantation...
- la réponse des plantes adventices à leur environnement lumineux par des modifications morphologiques (étiolement, modifications de la masse surfacique des feuilles, ...) qui leur permettent de s'adapter à l'intense compétition pour la lumière (Cavero *et al.*, 2000). Ces adaptations sont simulées par des fonctions de plasticité morphologique (Figure 3).

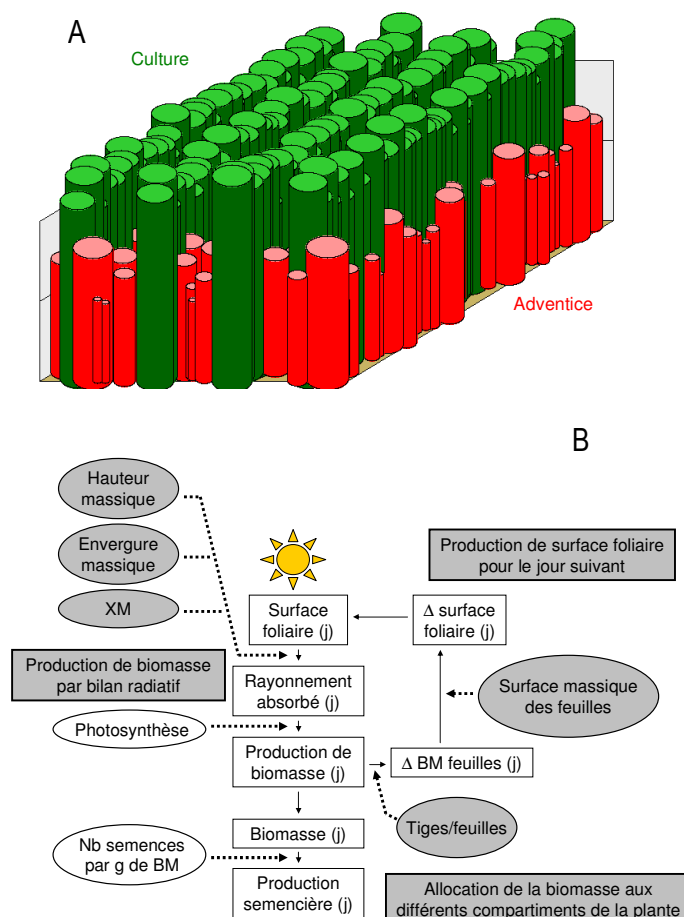


Figure 3 : A) Représentation schématique en 3D des plantes cultivées et adventices dans un champ et B) ensemble des processus déterminant la morphologie des plantes, la quantité de rayonnement absorbé et l'accumulation de biomasse (BM). Les variables Hauteur massique (Hauteur/biomasse), Envergure massique (envergure/biomasse), XM (paramètre de répartition en hauteur de la surface foliaire), Surface massique des feuilles et Tige/feuille (rapport de biomasse entre ces deux types d'organes) sont des variables morphologiques déterminées par l'environnement lumineux des plantes et qui déterminent elles-mêmes l'interception du rayonnement par chaque individu en compétition.

Paramétrage à l'aide de traits caractérisant les espèces

Les modèles ALOMYSYS et FLORSYS nécessitent un nombre important de paramètres pour décrire la réponse de chaque espèce adventice aux systèmes de culture. Il est impossible d'estimer les valeurs de tous ces paramètres pour chaque nouvelle espèce à rajouter au modèle. C'est pourquoi nous avons choisi une approche innovante, adaptée de l'écologie fonctionnelle, qui consiste à estimer les paramètres du modèle à partir de traits faciles à mesurer, permettant de caractériser et discriminer les espèces :

- identification d'un ou plusieurs traits pertinents (ex. masse des semences) pour chaque paramètre du modèle (ex. allongement maximal de l'hypocotyle avant levée),
- choix et étude expérimentale d'une série d'espèces contrastées et représentatives de la gamme de variabilité du paramètre et des traits,
- ajustement de régressions aux résultats expérimentaux et introduction dans FLORSYS (Figure 4),
- estimation automatique du paramètre du modèle pour chaque nouvelle espèce ajoutée à partir du trait mesuré.

Ce principe nous permet alors de simuler rapidement le comportement d'espèces très diverses à partir de quelques traits (Figure 5). La matricaire (*Matricaria perforata*), espèce à faible dormance et à faible potentiel hydrique de base pour la germination, germe rapidement après la récolte du précédent. Ainsi, il reste peu de semences survivantes pouvant germer après le semis de la culture. La germination estivale du brome (*Bromus sterilis*) est retardée parce qu'il germe difficilement à la lumière et a besoin d'être enfoui (même superficiellement) pour faciliter sa germination. En revanche, à la fin de l'interculture, la quasi-totalité des semences a déjà germé et il ne reste presque plus de semences à lever après le semis de la culture. L'amarante (*Amaranthus hybridus*), avec une dormance estivale et sa température de base élevée, germe peu en été. La levée ne devient importante que début mai. Cependant, elle reste assez faible puisque la majorité des semences a été enfouie trop profondément pour lever en culture. Enfin, la renouée à feuille de patience (*Polygonum lapathifolium*), dormante en automne, lève au printemps; cependant, elle est capable de lever plus précocement que l'amarante parce que ses exigences en température pour la germination sont plus faibles.

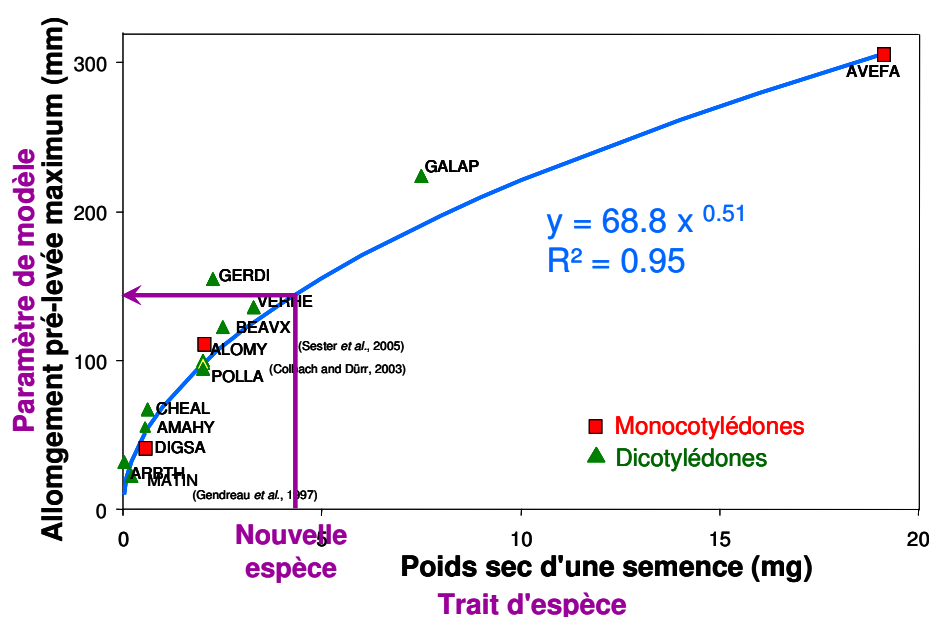


Figure 4. Estimation d'un paramètre de FLORSYS à partir d'un trait facile à mesurer. Exemple de l'estimation de l'allongement maximal pré-levée de l'hypocotyle à partir de la masse des semences (adapté à partir de Gardarin et al., soumis)

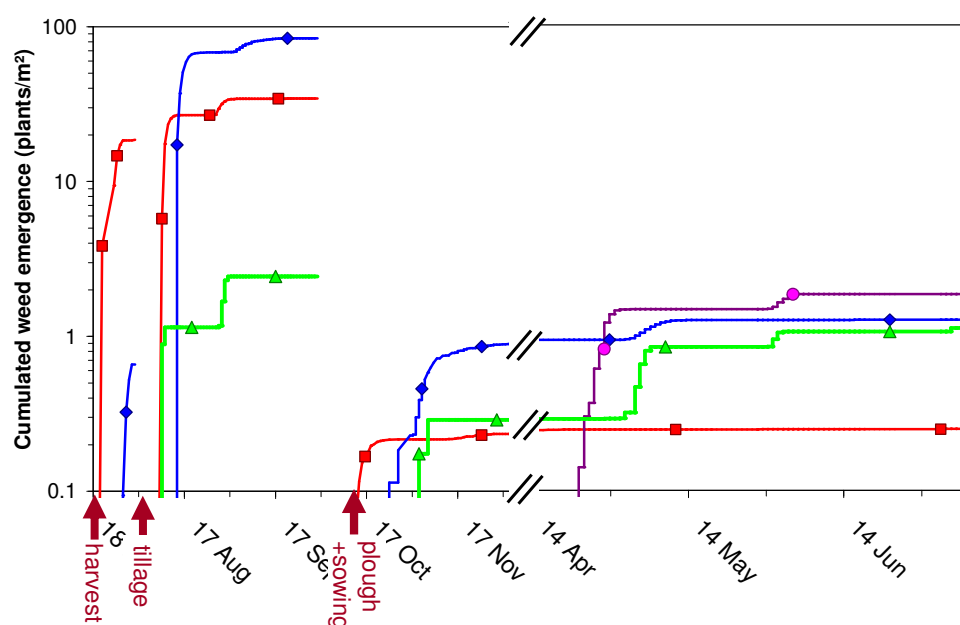


Figure 5 . Simulation à l'aide de FLORSYS de la levée de quatre espèces adventices dans une parcelle récoltée début juillet, déchaumée début août, puis labourée et semée en début octobre (*Matricaria perforata* : ■ - faible dormance, MS (masse d'une semence) = 0.27 mg, T°Cbase (température de base de germination) : 1.96°C, PHbase (potentiel hydrique de base) = -0.75 MPa; *Bromus sterilis* : ◆ - faible dormance, MS = 7.38 mg, T°Cbase = 1.96°C, PHbase = -0.75 MPa; *Polygonum lapathifolium* : ● - dormance automnale, MS = 2.04 mg, T°Cbase = 5.84°C, PHbase = -1.55 MPa; *Amaranthus hybridus* : ▲ dormance estivale, MS = 0.38 mg, T°Cbase = 8.8°C, PHbase = -0.95 MPa).

Évaluation de modèles

Avant d'utiliser ces modèles pour la conception de systèmes de culture, il est indispensable de les évaluer.

Certaines étapes sont un peu techniques, comme les vérifications techniques du programme informatique des modèles. L'analyse de sensibilité aux variables d'entrée permet d'identifier les variables de l'histoire culturale à renseigner lors des enquêtes en exploitations agricoles pour produire des simulations de bonne qualité. Vient ensuite la comparaison de simulations des modèles à des observations indépendantes de terrain afin d'identifier le domaine de validité du modèle, son erreur de prédiction et les éventuels défauts à corriger dans le futur.

La prédiction de la levée, stade critique du modèle ALOMYSYS, a ainsi été évaluée à l'aide d'essais spécifiques combinant les facteurs pertinents influençant les processus de dormance, germination et levée (date et profondeur d'enfouissement et remontée des semences, pluie estivale, structure du sol). Des mesures hebdomadaires ont été réalisées pour suivre les états intermédiaires de l'adventice et du milieu. Cette première évaluation a montré que le modèle prédit correctement les dates et amplitudes des vagues de levée mais surestime la survie des semences de vulpin proches de la surface dans les situations sans travail du sol pendant plus d'un an (Colbach et al., 2006a). Le comportement pluriannuel du modèle et sa capacité à discriminer des systèmes de culture ont été évalués sur un essai "système de culture" existant (Chauvel et al., 2001). Cet essai combinait les éléments majeurs des systèmes de culture (rotation, travail du sol, dates et densités de semis, apports d'azote) et a duré de 1996 à 2004, avec deux à trois notations des infestations de vulpin par an. Cette deuxième évaluation a montré que le modèle classe correctement les systèmes de culture en fonction de leur infestation par le vulpin et prédit bien l'ampleur des infestations (Colbach et al., 2007).

Des expérimentations similaires sont actuellement en cours pour évaluer le modèle FLORSYS.

Utilisation de modèles pour la conception de systèmes de culture

Optimisation d'une technique culturale

Grâce à son pas de temps journalier et la prise en compte des interactions avec le milieu, ces modèles permettent d'optimiser le choix de techniques culturales, en fonction de l'histoire culturale et du milieu. Afin de prendre en compte les interactions avec le climat, les scénarios testés doivent être simulés avec différentes séries climatiques. Ainsi, un retard de semis du blé d'hiver réduit l'infestation de la culture par le vulpin mais que cette réduction n'est systématique que pour les semis après le 24 octobre (Figure 6). Début octobre, un retard de semis peut même occasionnellement augmenter la levée de l'adventice lorsque le travail du sol associé au semis est réalisé pendant la réhumectation du sol. La réduction de l'infestation par un retard de semis n'est systématique que dans des climats où le sol est continuellement humide.

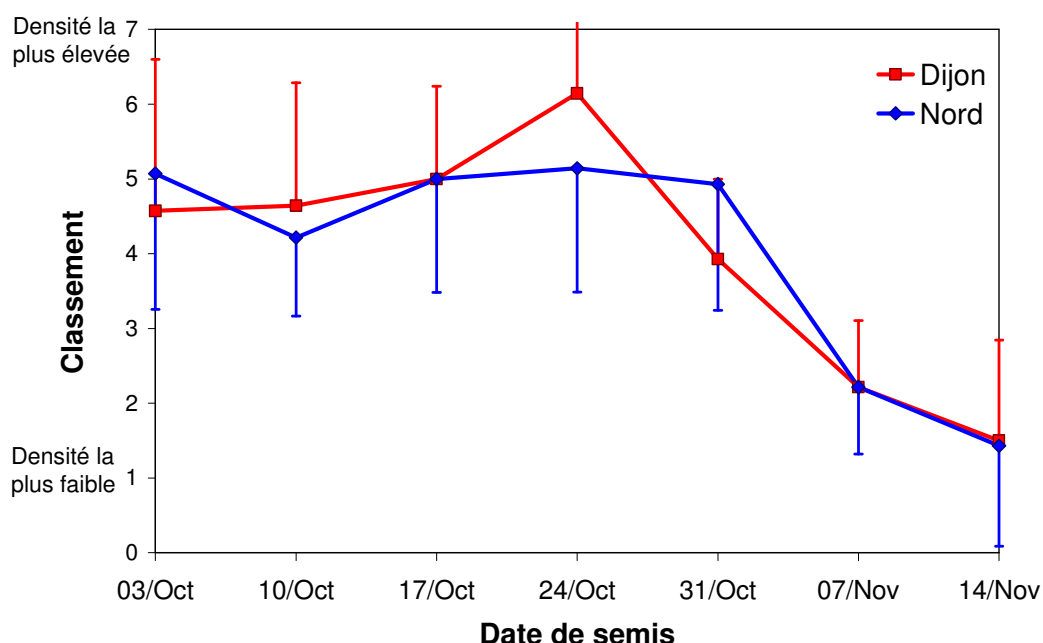


Figure 6 : Exemple d'évaluation d'une technique culturale. Effet d'un retard d'une semaine du semis d'un blé d'hiver sur la levée du vulpin en culture. Moyenne de classements des dates de semis sur 14 répétitions climatiques simulées avec ALOMYSYS (Colbach *et al.*, 2008)

Recherche de solutions adaptés à des systèmes de culture contrastés

L'effet des techniques culturales ne dépend pas seulement des états du milieu mais aussi de l'histoire culturale. Par ailleurs, les solutions doivent être compatibles avec les objectifs et contraintes des systèmes de culture et des exploitations dans lesquels elles vont être mises en œuvre. Nous avons donc effectué des enquêtes chez des agriculteurs en Côte d'Or, en choisissant des exploitations représentatives de la variabilité locale (plateau vs. plaine, avec ou sans élevage, présence de culture de betterave...). Seize exploitations ont été enquêtées afin de collecter les variables d'entrée nécessaires pour utiliser ALOMYSYS. De plus, nous avons aussi posé des questions plus générales sur les objectifs et contraintes (équipements, localisation des parcelles, etc.) des exploitants afin d'orienter le choix des scénarios à tester.

À partir de ces données, nous avons établi une typologie de rotations culturales contrastées que nous avons évaluées à l'aide d'ALOMYSYS pour le risque malherbologique (Figure 7). Ces simulations montrent que l'infestation par le vulpin est la plus importante dans la rotation colza/blé/orge, composée entièrement de cultures d'hiver. La rotation colza/blé/betterave/blé est très proche de la précédente, mais l'introduction d'une culture de printemps, la betterave sucrière, a permis de diviser le niveau d'infestation par dix parce que le vulpin lève et se multiplie difficilement dans une culture de printemps. La troisième rotation, maïs/maïs/blé/soja/blé, comporte trois cultures de printemps sur cinq, ce qui explique son très faible niveau d'infestation par le vulpin. La dernière rotation est constituée d'une prairie temporaire de trois ans de luzerne, suivie de trois années de céréales d'hiver. Bien que le vulpin ne produise aucune semence pendant la prairie temporaire, l'infestation des céréales d'hiver suivantes est aussi élevée que dans la rotation composée uniquement de cultures d'hiver ; la raison en est l'absence de travail du sol pendant les trois ans de luzerne. En effet, le travail du sol estival est indispensable pour stimuler des germinations de semences de vulpin et vider ainsi le stock semencier, la mortalité "naturelle" des semences n'étant pas suffisante.

L'évaluation ne s'est pas restreinte au seul risque malherbologique. Le risque environnemental associé aux herbicides a été estimé à l'aide de l'indicateur I-PEST (van der Werf et Zimmer, 1998), montrant que la rotation avec l'impact le plus faible, maïs/maïs/blé/soja/blé, est aussi celle la moins infestée par le vulpin. Ceci indique qu'il y a des solutions pour gérer le vulpin sans avoir nécessairement recours à des herbicides présentant des risques pour l'environnement. Cependant, l'analyse du nombre de passages indique un autre coût car la rotation maïs/maïs/blé/soja/blé est celle dont le nombre de passages est le plus élevé, notamment en passages coûteux comme le labour et le désherbage mécanique.

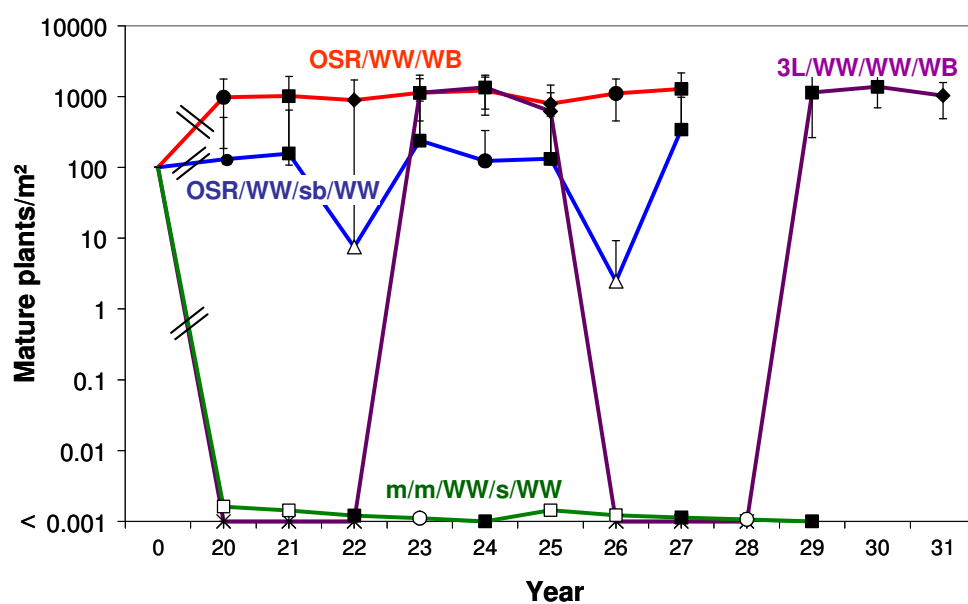


Figure 7 : Infestation de quatre rotations culturales par le vulpin simulée à l'aide du modèle ALOMYSYS (Colbach et al., 2008). Moyenne de 10 répétitions avec des séries climatiques randomisées. ● : OSR = colza, ■ : WW = blé d'hiver, ◆ : WB = orge d'hiver, Δ : sb = betterave sucrière, ○ s = soja, * : 3L = 3 ans de luzerne, □ : m = maïs.

Tableau 2 : Évaluation environnementale et opérationnelle des rotations culturales analysées (moyennes par culture et par rotation) (Colbach *et al.*, 2008).

Rotation	Toxicité des herbicides (I-PEST)#	Nombre d'opérations				
		Total	Herbicides	Labour	Autres travaux du sol	Désherbage mécanique
colza/blé/orge	0.27	5.00	1.33	0	3.67	0.0
colza/blé/betterave/blé	0.55	6.25	2.25	0.25	3.75	0.0
maïs/maïs/blé/soja/blé	0.15	6.40	2.20	1.00	2.80	0.4
3luzerne/blé/blé/orge	0.25	3.50	2.00	0	1.50	0.0

Plus cet indicateur est élevé, plus les herbicides présentent un risque environnemental élevé.

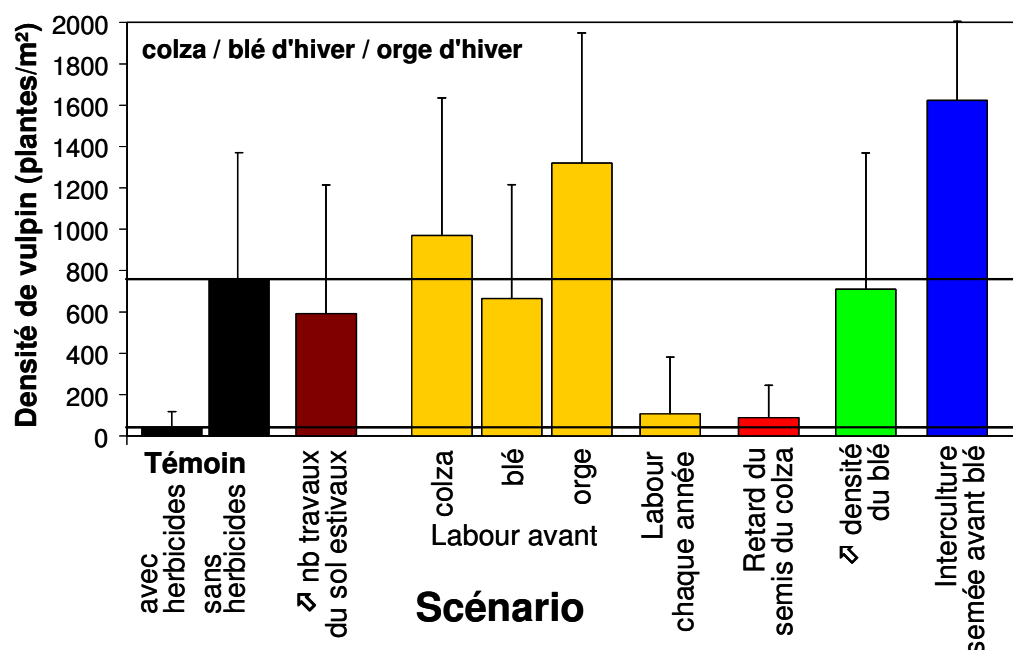


Figure 8 : Test de scénarios de gestion de vulpin sans herbicides à l'aide du modèle ALOMYSYS pour la rotation colza d'hiver/blé d'hiver/orge d'hiver (Colbach *et al.*, 2008). Moyenne de 10 répétitions avec des séries climatiques randomisées.

Dans un deuxième temps, ALOMYSYS et les autres indicateurs ont été utilisés pour tester des scénarii pour chaque rotation, avec l'objectif de trouver des solutions qui permettent de gérer le vulpin, sans avoir recours aux herbicides et sans accroître les impacts environnementaux et opérationnels. L'avantage des simulations est de pouvoir tester une large gamme de modifications dans les systèmes de culture en combinaison avec différentes séries climatiques et de les comparer à deux témoins correspondant à la situation actuelle, avec ou sans applications d'herbicides (Figure 8). L'objectif est alors de réduire l'infestation par le vulpin en-dessous du témoin sans herbicides et de se rapprocher autant que possible du témoin avec applications d'herbicides.

Ces simulations préliminaires montrent ainsi qu'une augmentation de la fréquence du travail du sol superficiel estival permet d'améliorer la maîtrise de l'infestation. Le labour vise à enfouir les semences de vulpin profondément pour empêcher leur levée en culture. Cependant, les simulations montrent que l'effet de cette technique dépend de la culture suivante. Par contre, si le labour est pratiqué dans une rotation constituée exclusivement de cultures d'hiver, il est très efficace (le résultat dépend des

rotations). De même, retarder le semis du colza laisse plus de temps au vulpin de germer en été (réduisant ainsi la quantité de semences pouvant lever en culture). Augmenter la densité des cultures pour étouffer cette adventice est peu efficace tandis que l'introduction d'un couvert d'interculture avant le semis du blé favorise le développement de l'infestation de vulpin. En effet, cette stratégie ne laisse plus assez de temps pour effectuer des travaux du sol estivaux et stimuler ainsi des germinations pré-semis.

Conclusion

Les modèles de simulation du comportement démographique des populations et communautés adventices présentés dans cet article sont originaux, à l'échelle mondiale, par le fait qu'ils prétendent simuler les systèmes de culture dans leur complexité et leur diversité, avec un pas de temps fin permettant d'intégrer les interactions avec le climat et les décisions de l'agriculteur. A l'heure actuelle, nous disposons d'une version monospécifique 'vulpin' (ALOMYSYS) validée, ainsi qu'une version plurispécifique (FLORSYS) non encore validée, et qui reste encore largement à paramétrer pour intégrer la diversité des espèces. Cette version peut cependant d'ores et déjà être utilisée par des utilisateurs avertis, capable d'approximer des jeux de paramètres sur la base d'une expertise de terrain, ou intéressés par des simulations impliquant des espèces virtuelles.

Ces modèles sont utilisables par la recherche et le développement agricole, soit pour évaluer *ex ante* des propositions de systèmes de culture alternatifs, soit pour identifier des règles de décision pour le pilotage de systèmes de culture relevant de la Protection Intégrée contre les adventices, soit encore pour étudier des scénarios alternatifs pour résoudre des problèmes ponctuels de maîtrise de telle ou telle espèce. Le paramétrage et l'évaluation du modèle FLORSYS restent cependant des enjeux importants à traiter pour que le modèle puisse devenir un outil de raisonnement complètement opérationnel.

Les simulations présentées dans cet article pour le vulpin montrent qu'il existe des stratégies de gestion de cette espèce efficaces avec peu ou pas d'herbicides, mais qu'aucune technique individuelle n'est aussi efficace que les herbicides seuls. La Protection Intégrée nécessite donc de combiner différentes solutions pour pouvoir proposer des solutions innovantes adaptées à chacune des situations agricoles. Ces combinaisons de solutions doivent être évaluées pour la faisabilité dans les exploitations d'un point de vue de l'organisation du travail et des coûts engagés, tant économiques qu'environnementaux. Les stratégies proposées doivent prendre en compte d'autres critères d'évaluation, comme le risque d'émission de gaz à effet de serre ou l'apparition d'autres bioagresseurs. Un objectif à court terme est d'étendre l'évaluation actuelle de système de culture pour prendre en compte l'ensemble de la flore adventice, ce qui sera possible dès l'achèvement du modèle plurispécifique FLORSYS.

Références bibliographiques

- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M. H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Dürr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J. M., Meynard J. M., Delecolle R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Cavero J., Zaragoza C., Bastiaans L., Suso M. L., Pardo A., 2000. The relevance of morphological plasticity in the simulation of competition between maize and *Datura stramonium*. *Weed Research* 40, 163-180.
- Chauvel B., Guillemain J. P., Colbach N., Gasquez J., 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Protection* 20, 127-137.

- Chave J., 1999. Study of structural, successional and spatial patterns in tropical rain forests using TROLL, a spatially explicit forest model. *Ecological modelling* 124, 233-254.
- Colbach N., Busset H., Yamada O., Dürr C., Caneill J., 2006a. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - II. Evaluation. *European Journal of Agronomy* 24, 113-128.
- Colbach N., Chauvel B., Gauvrit C., Munier-Jolain N. M., 2007. Construction and evaluation of ALOMYSYS modelling the effects of cropping systems on the blackgrass life-cycle: From seedling to seed production. *Ecological Modelling* 201, 283-300.
- Colbach N., Dürr C., Roger-Estrade J., Chauvel B., Caneill J., 2006b. AlomySys: Modelling black-grass (*Alopecurus myosuroides* Huds.) germination and emergence, in interaction with seed characteristics, tillage and soil climate - I. Construction. *European Journal of Agronomy* 24, 95-112.
- Colbach N., Sassi A., Granger S., 2008. ALOMYSYS: a model for evaluating and developing cropping systems for integrated weed management. *In*: 10th congress of the European Society for Agronomy, Bologna (Italie)
- Gardarin A., Dürr C., Colbach N., soumis. Effects of seed depth and soil structure on the emergence of weeds with contrasted seed traits. *Journal of Experimental Botany*.
- Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *In*: L. Combe, D. Picard, (eds) *Les systèmes de culture*, INRA, Paris, p.165-196
- van der Werf H. M. G., Zimmer C., 1998. An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system. *Chemosphere* 36, 2225-2249.