

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : afa@supagro.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad

Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Gérard CATTIN, retraité de la chambre d'agriculture de la Marne
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Anne VERDENAL, agricultrice

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément (voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

P-7- Avant-propos

A. MESSÉAN (Président de l'Afa) et O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef)

P-9- Éditorial

P. PRÉVOST, S. LARDON, M. CAPITAINE, S. BONIN, S. MADELRIEUX, N. SENIL (coordonnateurs du numéro)

Le design pour penser l'action dans les territoires

P-15- Innovations sociales et scénarios de transition écologique. Des exemples illustrant ce qu'on peut entendre par design territorial
F. JEGOU

P-17- Le design est-il un concept pour les agronomes ?

L. PROST

P-25- Le design est-il une nouvelle forme de l'action publique territoriale ?

V. POUDRAY, P. MAO et N. SENIL

P-31- Projet de paysage, projet agricole et design territorial

S. BONIN et B. FOLLÉA

P-41- De l'agriculture conventionnelle à l'agriculture biologique, comment un paysagiste peut-il enrichir un projet agricole durable ?

L. D'HEYGÈRE

P-49- Le design territorial, un concept adapté au travail des collectivités locales ?

J.S. LAUMOND et R. AMBROISE

Des situations agricoles pour penser le design en agronomie

P-59- Concevoir un système agri-alimentaire territorialisé en milieu rural : vers l'émergence d'un living-lab pour impulser de nouvelles pratiques agricoles et alimentaires à différentes échelles de territoire

C. MIGNOLET, R. FECHÉ, C. SCHOTT et F. BARATAUD

P-67- Des pratiques agroécologiques à la conception de systèmes agri-alimentaires territorialisés : exploitation agricole et design territorial

E. MARRACCINI

P-73- Design territorial et transition agro-écologique d'une exploitation agricole : exemple d'une ferme en agro-foresterie

V. POUDRAY, A. SIEFFERT et M. CAPITAINE

P-79- Design agricole inspiré de la permaculture : exemple d'une micro-ferme de l'Ouest de la France

K. MOREL, N. SENIL et M. TAVERNE

P-87- Comment designer une alimentation durable dans les territoires ?

C. DUMAT, D. MASSALOUX, A. LIMBERTIE et S. LARDON

P-99- Le projet de recherche-action TATA-BOX : démarches et outils pour le design territorial dédié à la transition agro-écologique

E. AUDOUIN, J.E. BERGEZ, O. THEROND, F. PADIE, K. CAPELLE, S. BONIN

P-111- Construction de projets agroécologiques territorialisés : à la recherche des conditions et caractéristiques de ces démarches

S. BONIN, E. AUDOUIN et A. MESSÉAN

P-117- Histoire du grand projet « Biovallée » à travers celle de l'agriculture biologique et relecture par le design territorial

S. MADELRIEUX, F. KOCKMANN et H. VERNIER

P-127- Quelles leçons tirer de l'analyse des situations agricoles pour les usages du design territorial par les agronomes ?

S. LARDON, M. CAPITAINE, S. BONIN, S. MADELRIEUX et P. PREVOST

Des expériences de recherche dans une dynamique de design territorial

P-133- Quand le design territorial réinvente la gestion de l'eau et l'alimentation de proximité

M.H. VERGOTE et S. PETIT

P-141- CAPFARM : simulation d'allocations de couverts à l'échelle des exploitations agricoles et des paysages

H. BOUSSARD, B. ROCHE, H. DECHATRE, A. JOANNON, G. MARTEL et G. PAIN

P-149- Concevoir des systèmes culture-élevage à l'échelle des territoires : une méthode adaptative et participative

M. MORAINÉ, M. DURU et O. THEROND

P- Projet BRIE'EAU : une démarche participative pour repenser ensemble un territoire de grandes cultures

L. SEGUIN, F. BIRMANT, G. LETOURNEL, M. BONIFAZZI, F. BARATAUD, A. ARRIGHI, L. GUICHARD, S. BOUARFA, L. ROGER, L. ROYER, D.

HUREAU, J.E. ROUGIER, R. MELIO-DELAGE, C. BONTOUX, B. BERTHOME et J. TOURNEBIZE

Quand les agronomes faisaient du design sans le savoir...

P-173- Les Plans de Développement Durable en agriculture (1993-1999) : une expérience de design territorial ?

R. AMBROISE et F. KOCKMANN

P-181- *Le domaine du Pradel, un lieu de design territorial depuis Olivier de Serres*
P. PREVOST et B. VIDAL

Note de lecture

P-189- *Paysans de nature. Réconcilier l'agriculture et la vie sauvage*
P.Y. LE GAL



CAPFarm : simulateur d'allocation de couverts à l'échelle des exploitations agricoles et des paysages

CAPFarm: crop allocation simulator at the farm and landscape levels

Hugues BOUSSARD*, Bénédicte ROCHE**,
Hélène DECHATRE***,
Alexandre JOANNON****, Gilles MARTEL*****,
Guillaume PAIN*****

*Modélisation informatique - Bagap, Inra, Agrocampus Ouest, Esa 35042 - Rennes - France - Tél. : 02 23 48 67 58 - Courriel : hugues.boussard@inra.fr

**Zootechnie, Bagap, Inra, Agrocampus Ouest, Esa - 35042 - Rennes - France - Tél. : 02 23 48 70 48 - Courriel : benedicte.roche@inra.fr

***Modélisation des systèmes écologiques - Université Paul Sabatier Toulouse III - 65, rue de Saint-Brieuc - CS 84215 - 35042 Rennes - France - Tél. : 02 23 48 56 24 - Courriel : helene.dechatre@gmail.com

****Agronomie - Bagap, Inra, Agrocampus Ouest, Esa - 35042 Rennes - Tél. : 02 23 48 57 72 - Courriel : alexandre.joannon@inra.fr

*****Zootechnie - Bagap, Inra, Agrocampus Ouest, Esa - 49000 - Angers - France - Tél. : 0241235676, gilles.martel@inra.fr

*****Écologie du paysage, Bagap, Inra, Agrocampus Ouest, Esa 49000 - Angers - France - Tél. : 02 41 23 55 20 - Courriel : g.pain@groupe-esa.com

Auteur correspondant : hugues.boussard@inra.fr

Résumé

Dans les paysages agricoles, de nombreux processus environnementaux dépendent de l'arrangement spatial et de la dynamique des couverts cultivés, et donc des décisions des agriculteurs. Face à la complexité de gérer à la fois des processus sociaux-techniques et environnementaux, le design territorial peut s'appuyer sur des outils de simulation informatique. Nous proposons CAPFarm, un simulateur d'allocation de couverts pluriannuel mobilisable aux échelles de l'exploitation et du paysage. CAPFarm permet de formaliser les règles de décision d'allocation des couverts sous forme d'un système de contraintes et de proposer des solutions d'allocations de couverts cohérentes. Après avoir présenté ses fondements théoriques et appliqués, et son utilisation aux deux échelles dans le cadre d'applications à visée environnementale, nous discutons de sa pertinence dans une démarche de design territorial.

Abstract

In agricultural landscapes, many environmental processes depend on spatial arrangement and dynamic of crops linked to farm management decisions. Given the complexity of managing both socio-technical and environmental processes, territorial design can use software simulation tools. Most of the crop allocation simulation tools are either not taking into account farm level, or take the farm level too precisely to be usable at the landscape level. We propose CAPFarm, a multi-year cover allocation simulator available at the farm level and also at the landscape level. CAPFarm allows users i) to formalize cover allocation decision rules into a system of spatial and temporal constraints and ii) to solve the system of constraints in order to find consistent solutions. First we present theoretical and applied aspects of CAPFarm. Next we show its functioning at both levels by using examples with environmental focuses. At the farm scale, we

evaluate a scenario of practice changes by increasing the duration of temporary grasslands. At the landscape level, we try to increase the grasslands connectivity by exploring crop allocation diversity and by adding crop allocation constraint at the landscape level. Then, we show that CAPFarm is usable to detect issues of feasibility and is helpful to propose alternative scenarios. Finally, we discuss the relevance to use it in a territorial design way.

Mots-clés

Simulation spatio-temporelle, modélisation de territoire, règle de décision, contrainte d'assolement, environnement.

Simuler la dynamique des couverts dans les paysages agricoles, un outil pour le design territorial

Appliqué aux espaces de production agricole, le design territorial consiste à dessiner les territoires de demain en anticipant i) les possibilités d'actions individuelles des agriculteurs agissant sur leurs territoires discontinus respectifs et ii) les processus environnementaux, et plus particulièrement ceux entrant en jeu dans les fonctions écologiques des paysages. Mais comment aborder la complexité des interactions entre des processus agronomiques et environnementaux, aux différentes échelles d'espace et de temps ? Dans les paysages agricoles, de nombreux processus environnementaux dépendent de l'arrangement spatial et de la dynamique des couverts cultivés et non cultivés. C'est le cas par exemple de certaines continuités écologiques qui dépendent à la fois de l'arrangement spatial d'éléments semi-naturels (boisements, haies) et de l'allocation des couverts annuels (type de couverts, voisinages entre couverts). Ainsi, l'étude de Dufлот *et al.* (2016) a montré le rôle positif de voisinages de cultures de printemps et de cultures d'hiver sur certaines communautés carabiques en jeu dans la régulation biologique. L'implication de ces éléments annuels dans la définition des fonctions écologiques pose des questions différentes de celles liées à l'intégration d'éléments pérennes dans le paysage. En effet, l'allocation spatiale des couverts est modifiée tous les ans par les agriculteurs en fonction de règles agronomiques de successions des cultures et des besoins. Gérer collectivement des processus environnementaux suppose donc de comprendre à plusieurs niveaux comment, où et à quelle fréquence les couverts apparaissent dans le paysage.

Le premier niveau à prendre en compte est celui de l'exploitation agricole car ce sont les agriculteurs qui choisissent les couverts qu'ils cultivent sur leurs territoires. La nature, la localisation et la succession dans le temps des couverts résultent de décisions individuelles des agriculteurs. Ces décisions ont été largement étudiées en agronomie (Maxime *et al.*, 1995) et dépendent i) du système de production car les agriculteurs choisissent les couverts selon leurs objectifs de production et ii) de leur territoire d'exploitation, notamment des potentialités de leurs terres. Par conséquent, la dynamique des couverts résulte de choix de successions culturales qui dépendent eux-mêmes du système de production et pas uniquement des caractéristiques de la parcelle. Ainsi, le choix d'implantation d'un couvert sur une parcelle une année donnée, requiert de se référer aux choix faits pour l'ensemble de l'exploitation, tout en prenant en compte les assolements des années précédentes.

Le deuxième niveau d'organisation à prendre en compte est celui du paysage. En effet, ce sont les interactions des pratiques individuelles de chacun des agriculteurs présents dans le paysage, ainsi que la structure et la dynamique de ce dernier, qui ont une influence sur les processus environnementaux, à une échelle plus large que celle de l'exploitation. Par conséquent, organiser les allocations de couverts à l'échelle paysagère est une étape clé dans la mise en œuvre d'objectifs paysagers, définis par un design territorial pour l'agroécologie, puisque cela permet d'améliorer les fonctions écologiques d'un paysage agricole.

Dans le cadre d'une démarche de design territorial, quatre défis majeurs sont à relever : i) la prise en compte du temps, ii) la prise en compte d'espaces parfois étendus, iii) la complexité des processus sociaux et environnementaux et iv) leurs interactions. Ainsi, pour faire face à ces problématiques de gestion de la complexité du système, une voie privilégiée est la modélisation car elle permet de tester virtuellement différents scénarios sur un territoire. En effet, les outils informatiques permettent de représenter explicitement les éléments des systèmes de production et des territoires, ainsi que leurs interactions, dans le but de simuler leurs comportements dans l'espace et dans le temps.

Néanmoins la prise en compte simultanée des deux échelles, exploitation et paysage, n'est pas systématique dans les outils de simulation actuels (Houet *et al.*, 2014). Certains outils de simulation des paysages n'intègrent pas du tout l'échelle de l'exploitation (Mari *et al.*, 2013). Ils simulent l'allocation de couverts sur des parcelles (ou parfois des unités plus larges) sans référence à leur appartenance à une exploitation. Seules des caractéristiques parcellaires, comme la taille ou l'hydromorphie, sont prises en compte pour allouer les couverts. Dans ces cas-là, des successions culturales types sont allouées aux parcelles, sans prise en compte du territoire d'exploitation dans lequel elles s'insèrent. A l'échelle du paysage, des grands types de successions culturales sont appliqués sur tout un espace géographique. Ces approches limitent la prise en compte des décisions des exploitations agricoles pour deux raisons. Premièrement, car les simulations générées ne permettent pas de reproduire fidèlement les choix des agriculteurs. Et deuxièmement, car ces approches n'intègrent pas la diversité des systèmes de production qui composent un territoire réel.

D'autres outils au contraire simulent explicitement le fonctionnement de l'exploitation (Dury *et al.*, 2012). Ils sont développés pour aider les agriculteurs à prendre leurs décisions, à l'échelle de leur exploitation. Ces outils permettent souvent de prendre en compte le temps de manière fine, comme par exemple en intégrant une multitude de décisions dans le déroulement des itinéraires techniques. De ce fait, ils sont difficilement mobilisables à l'échelle d'un paysage car pour fonctionner, ils nécessitent d'avoir des connaissances très précises sur l'ensemble des exploitations, ce qui est rarement le cas.

Notre projet de modélisation est donc de développer un simulateur d'allocation de couverts pluriannuel mobilisable à l'échelle du paysage, mais qui intègre explicitement le fonctionnement des exploitations agricoles. L'objectif est de pouvoir générer des simulations qui puissent prendre en compte

à la fois la spécificité des territoires des exploitations agricoles, mais aussi la diversité des types d'exploitations, et ce afin d'observer et de discuter la répartition spatiale et la dynamique des couverts. Couplé à un outil de simulation environnementale, cela permet d'améliorer un objectif paysager en se plaçant dans un cadre d'allocations de couverts possibles et acceptables pour les exploitants. Nous proposons donc ici CAPFarm, un simulateur d'allocation de couverts au niveau des exploitations agricoles et des paysages. Après avoir présenté les fondements de l'outil, nous décrivons son utilisation à travers deux applications, l'une au niveau de l'exploitation et l'autre au niveau du paysage. Ces exemples sont structurés de façon à présenter i) les modalités d'utilisation puis ii) les résultats obtenus sur des cas concrets mais non exhaustifs des fonctionnalités de l'outil. Enfin nous discuterons de sa mobilisation dans le cadre d'une démarche de design territorial.

Les fondements de CAPFarm

CAPFarm, issu d'un ensemble de mises en œuvre effectives dans des projets de recherche, est une approche agronomique des règles de décisions considérées par les agriculteurs dans la mise en place de leurs assolements et de leurs successions culturales. La littérature scientifique (Maxime *et al.*, 1995) nous montre l'existence de règles de décisions agronomiques pouvant être formalisées pour simuler l'affectation des couverts aux parcelles au fil des ans, dans des systèmes de grandes cultures. Nous avons testé et décliné ces règles de décisions dans le cas d'exploitations en polyculture-élevage. Par le biais de quinze enquêtes en exploitations, nous avons caractérisé les liens entre ces règles et les systèmes d'élevage mis en œuvre (Roche *et al.*, 2013). Ces résultats montrent notamment la pertinence de considérer des minimums de surfaces annuelles obligatoires pour les cultures prioritaires. Nous nous sommes inspirés de ces règles de décisions pour concevoir des contraintes agronomiques pertinentes à intégrer au sein de CAPFarm.

Le développement et l'enrichissement du simulateur s'est basé sur trois projets de recherche (Coleno, 2016 ; Martel *et al.*, 2017 ; Pain *et al.*, 2017) en régions de polyculture-élevage ou de grande culture. Ces trois cas d'applications ont permis d'étendre les fonctionnalités de l'outil et de rendre plus robuste son utilisation. CAPFarm fait partie d'APILand¹, une boîte à outils de logiciels open-sources développés, au laboratoire Inra-Agrocampus-Ouest-Esa Bagap², en JAVA (Bousard *et al.*, 2010). APILand permet de représenter virtuellement le paysage agricole réel sur lequel nous souhaitons travailler. A partir de là, il devient possible de simuler l'implantation de couverts sous contraintes agronomiques avec CAPFarm, mais aussi d'évaluer les fonctions écologiques du paysage ainsi créé en utilisant "Chloe - métriques paysagères" (Chloe) (Boussard et Baudry, 2014), un autre logiciel de APILand.

Application à l'échelle de l'exploitation agricole

Utiliser CAPFarm au niveau d'une exploitation agricole se déroule en trois étapes (Figure 1). La première étape consiste à fournir les données minimales au solveur ; i) les couverts qu'il

¹ APILand : Application Programming Interface Landscape

² Bagap : Biodiversité, AGroécologie et Aménagement du Paysage

peut allouer et ii) les parcelles qu'il doit gérer. Il est également possible d'apporter à CAPFarm des données concernant l'historique des assolements, mais cela est facultatif. Le fait de renseigner deux à trois années d'historique est idéal

car cela permet de "positionner" l'exploitation dans sa dynamique d'allocation des couverts, ce qui améliore la pertinence des solutions apportées par CAPFarm.

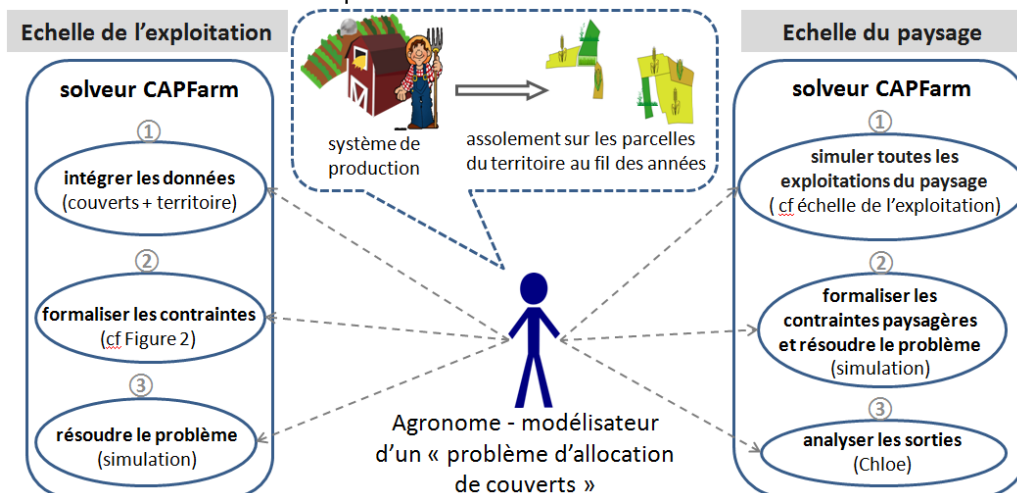


Figure 1 : Présentation du raisonnement du modélisateur et des trois étapes d'utilisation de CAPFarm aux échelles de l'exploitation et du paysage
 Figure 1: Presentation of the intellectual approach of the modeller and the three steps of use of CAPFarm at the exploitation and the landscape scales

Dans une seconde étape, il faut formaliser les règles de décisions de l'agriculteur sous forme de contraintes agronomiques (ou socio-économiques) comprises par CAPFarm (Figure 2). Ces contraintes sont de deux types, les contraintes

spatiales telles que les surfaces minimales annuelles ou les distances aux bâtiments, et les contraintes temporelles telles que les délais de retour des couverts ou leurs répétitions.

Type	Contrainte	Exemple d'utilisation
AGRONOMIQUES		
Spatiales	Distance à un bâtiment	<i>minimum de prairies à moins de 800m du siège d'exploitation</i>
	Distance entre couverts	<i>2 colzas ne sont jamais à moins de 400m les uns des autres</i>
	Surface totale	<i>minimum 25ha de prairies</i>
	Surface des parcelles	<i>parcelles de moins de 1ha forcément en prairie</i>
	Nombre de parcelles	<i>au moins 1 parcelle en jachère</i>
	Contraintes « utilisateurs »	<i>maïs ne peut être implanté que sur les parcelles irrigables</i>
	Localisation	<i>jamais de céréales sur certaines parcelles</i>
Temporelles	Parcelles liées	<i>Lorsque parcelle n°5 est en maïs, parcelle n°12 aussi.</i>
	Répétitions culturales	<i>maïs peut se répéter 2 fois maximum</i>
	Durées d'implantation	<i>prairie a durée d'implantation entre 5 et 8 ans</i>
	Précédents /suivants	<i>maïs peut-être suivi d'un blé ou colza</i>
Temporelles	Délai de retour	<i>Après un colza, attendre 3 ans avant d'en réimplanter un autre</i>
	Patrons temporels	<i>Après un maïs suivi d'un maïs, forcément un orge</i>
SOCIO-ECONOMIQUES		
Spatiales	Profit	<i>marge brute est de 50000 euros minimum</i>
	Travail	<i>travail associé aux couverts n'excède pas 300 jours</i>
Temporelle	Variabilité du profit	<i>marge brute ne doit pas trop fluctuer d'une année sur l'autre</i>

Figure 2 : Les contraintes disponibles dans CAPFarm
 Figure 2: Available constraints on CAPFarm

La troisième et dernière étape consiste à résoudre le "problème d'allocation de couverts", c'est-à-dire à attribuer un couvert à chaque parcelle et pour chaque année simulée, tout en respectant les contraintes imposées. CAPFarm renvoie alors un nombre défini (par l'utilisateur) de solutions d'allocations. Il est également possible que le simulateur ne trouve aucune solution montrant ainsi la non faisabilité du respect de l'ensemble de ces contraintes dans le territoire donné. Concrétisons maintenant l'utilisation de CAPFarm avec la simulation d'une exploitation réaliste. Considérons par exemple une exploitation laitière qui nécessite l'implantation de prairies autour de son siège d'exploitation et qui privilégie

les cultures de maïs, de luzerne et de blé pour l'autonomie alimentaire de son troupeau.

Du point de vue du logiciel cela va plus précisément se traduire en contraintes : i) de couples précédents-suivants (par exemple tel couvert interdit après tel autre), ii) de durées d'implantation, ici d'un an pour le blé et le maïs et de 3-4 ans pour la luzerne, iii) de surfaces annuelles minimales, ici de 7% de la surface agricole utile (SAU) pour le blé, de 30% pour le maïs, de 5% pour la luzerne et de 33% pour les prairies, et iv) de délais de retour, ici de 8 ans pour la luzerne. Des contraintes plus précises encore peuvent être prises en charge par CAPFarm, comme des contraintes de distance au siège, ici de plus de 300 mètres pour le blé, la luzerne et le maïs grain, et de moins de 300 mètres pour le maïs ensilage, ou encore

le fait que les parcelles de moins de 0,5 hectares soient dédiées à la prairie permanente. Il est également possible pour CAPFarm de préciser la localisation des contraintes. Pour l'illustrer nous prenons ici l'exemple des prairies temporaires qui possèdent des contraintes différentes selon leur distance au siège. Ainsi, à moins de 500 mètres du siège les prairies sont réservées aux vaches à traire et doivent occuper une surface minimale annuelle de 15% de la SAU, sachant que ces prairies sont retournées tous les 3-6 ans. Tandis qu'à plus de 500 mètres du siège les prairies temporaires sont utilisées par les génisses et ne sont retournées que tous les 5-7 ans.

La figure 3 montre une solution renvoyée par CAPFarm pour cette exploitation laitière. CAPFarm a établi un prévisionnel sur 3 ans, qui respecte l'ensemble des contraintes citées précédemment. Nous pouvons faire le même exercice (même exploitation, territoire et période) mais avec un système de production différent, un système porcin. Cette fois les contraintes à respecter imposent d'allouer un certain nombre de céréales différentes chaque année, ainsi que des surfaces en colza suffisantes pour l'épandage du lisier et de n'avoir aucune prairie temporaire. La solution issue de cette simulation est très contrastée avec celle du système laitier. Ces deux simulations démontrent bien l'impact des orientations des systèmes de production sur les couverts alloués.

Revenons au système de production laitier et considérons que l'exploitant souhaite augmenter la durée de ses prairies temporaires pour en améliorer la valeur biologique et le caractère environnemental. Considérons donc que l'objectif soit de faire passer la durée des prairies temporaires "proches" du siège de 3-6 ans à 5-8 ans et la durée de ses

prairies temporaires "éloignées" du siège de 5-7 ans à 7-9 ans. CAPFarm pourra alors être mobilisé pour évaluer la possibilité de ce type de changement et proposer des transitions depuis le système actuel. Néanmoins, dans ce cas précis, le simulateur nous dira qu'il n'existe pas de solution au jeu de contraintes proposé. Autrement dit, il n'est pas possible d'allonger la durée des prairies temporaires de cette exploitation sans relâcher d'autres contraintes du système. Deux types de scénarios alternatifs peuvent alors être testés avec succès via CAPFarm. Un premier scénario alternatif consisterait à allonger la durée des prairies temporaires mais de manière moins drastique, de 3-6 ans à 4-7 ans pour les prairies "proches" et de 5-7 ans à 7 ans pour les prairies "éloignées". Un second scénario alternatif consisterait, parallèlement à l'allongement des prairies temporaires souhaité, à réduire la part de surface annuelle allouée en maïs de 30% à 20% de la SAU. Bien sûr ce deuxième scénario impliquerait une réorganisation du mode d'alimentation du troupeau.

A travers cet exemple à visée environnementale à l'échelle de l'exploitation agricole, l'utilisation de CAPFarm permet de repérer des verrous et d'aider à proposer des leviers d'action. Ici la résolution du système n'est possible qu'en modifiant une autre règle, réduire l'objectif de durée des prairies ou diminuer la surface minimum de maïs. La réussite même de la simulation permet d'évaluer la faisabilité du changement. CAPFarm permet donc d'étudier des évolutions possibles des exploitations, notamment dans un contexte de transition agro-écologique.

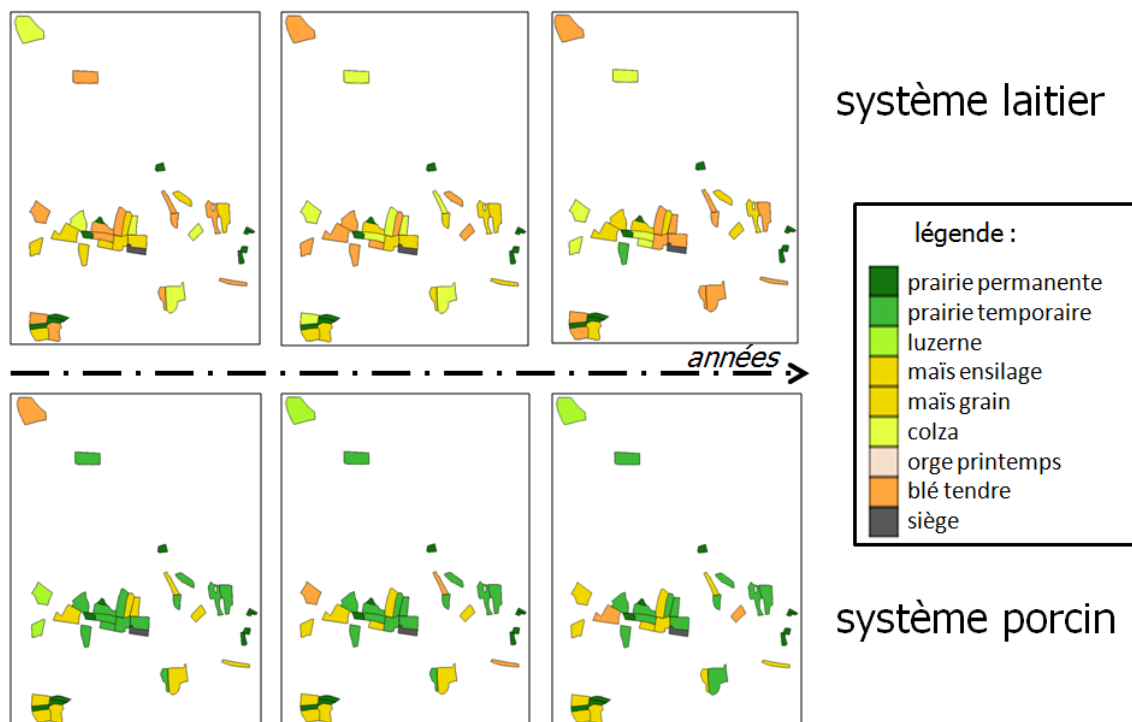


Figure 3 : Exemple d'un résultat de simulation des assolements de deux systèmes de production pendant 3 ans sur le même territoire d'exploitation
 Figure 3: Example of a crop allocation simulation result of two farm systems during 3 years on the same farm territory

Application à l'échelle du paysage

L'utilisation de CAPFarm à l'échelle du paysage se déroule également en trois étapes (Figure 1).

La première étape consiste à simuler un nombre de fois suffisamment grand chaque exploitation qui compose ce paysage

pour estimer la diversité des allocations possibles. Pour cela, il faut donc au préalable avoir mené la méthodologie « exploitation agricole » décrite précédemment pour chaque exploitation du paysage. Il peut arriver que nous n'ayons aucune information sur une exploitation hormis la délimitation de son territoire. Dans ce cas, pour pouvoir tout de même travailler à l'échelle du paysage et évaluer les fonctions écologiques de

ce dernier, nous attribuons arbitrairement à cette exploitation un système de production puisque CAPFarm permet également de paramétrer des exploitations individuelles à l'aide de typologies de systèmes de production. A l'issue de cette première étape, nous avons donc un ensemble de solutions d'allocations de cultures pour chaque exploitation du paysage.

La seconde étape de simulation consiste à allouer des couverts sur tout un paysage par combinaisons d'allocations individuelles. En effet, simuler un paysage pour CAPFarm revient à récupérer les solutions trouvées pour chaque exploitation et à les assembler. Nous parlons alors de "système territorial" pour définir cette combinaison spatio-temporelle de systèmes de production adjacents. Lors de cette étape, il est également possible de prendre en compte des contraintes à l'échelle du paysage. En effet, tous les types de contraintes définis pour l'échelle de l'exploitation sont également mobilisables à l'échelle du paysage. De la sorte, nous forçons CAPFarm à choisir des combinaisons d'allocations qui satisfassent des contraintes paysagères pour chaque année simulée.

Enfin, l'étape d'analyse consiste à caractériser les paysages simulés. En effet, si CAPFarm permet à l'utilisateur de préciser les sorties de simulations souhaitées comme les cartographies d'allocations simulées sur plusieurs années, il peut être nécessaire de coupler CAPFarm avec un outil d'analyse environnementale des paysages. Parmi ces outils, l'analyseur cartographique Chloe (Boussard et Baudry, 2014) permet de caractériser des propriétés écologiques d'un paysage.

Concrétisons l'utilisation de CAPFarm à l'échelle du paysage. Pour cela considérons un paysage virtuel mais réaliste au centre duquel nous retrouvons l'exploitation laitière dont nous avons précédemment détaillé les contraintes. Autour de cette exploitation nous en plaçons 9 autres, elles aussi paramétrées en système laitier. Ces exploitations et la trame non agricole forment *a minima* une zone spatialement continue dans un disque de 1 km de rayon, d'une surface totale de 311 hectares, dont 258 ha de SAU (Figure 4). Considérons que pour maintenir ou renforcer certaines fonctions écologiques au sein de ce paysage, comme la pollinisation, il faille préserver des continuités prairiales.

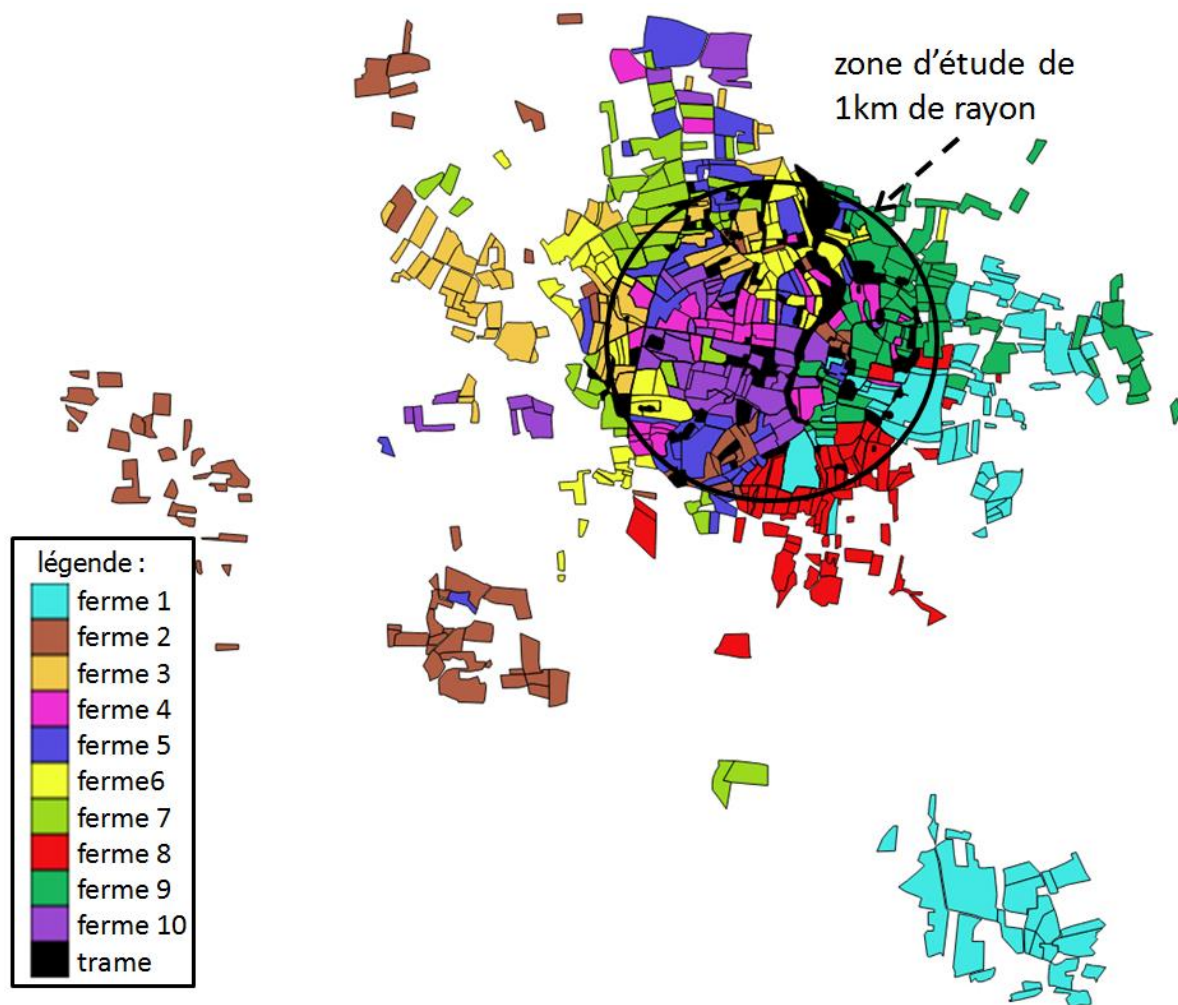


Figure 4 : Représentation du paysage de l'étude virtuelle, contenant les 10 exploitations laitières dans un rayon de 1km délimité par le cercle. Les nuances de gris distinguent les différents territoires d'exploitations. Les parcelles hors du cercle sont également prises en compte par CAPFarm puisqu'elles appartiennent aux exploitations étudiées.

Figure 4: Landscape representation of the virtual study, containing the 10 dairy farms within a radius of 1km delimited by the circle. The shades of gray distinguish the different farms territories. Plots outside the circle are also taken into account by CAPFarm because it belong to the farms studied

À l'aide de CAPFarm, nous paramétrons et simulons 50 allocations possibles, sur 5 années, pour chacune de ces 10 exploitations laitières. Cela représente un nombre de combinaisons d'allocations de couverts possibles de 50^{10} paysages différents. À l'échelle de la zone d'étude

et à l'aide du module Chloe, nous calculons, pour chaque paysage et chaque année, un indicateur de quantité de continuités prairiales (en hectares), caractérisant les espaces composés de 70% de prairie dans un rayon de 100m (Figure 5).

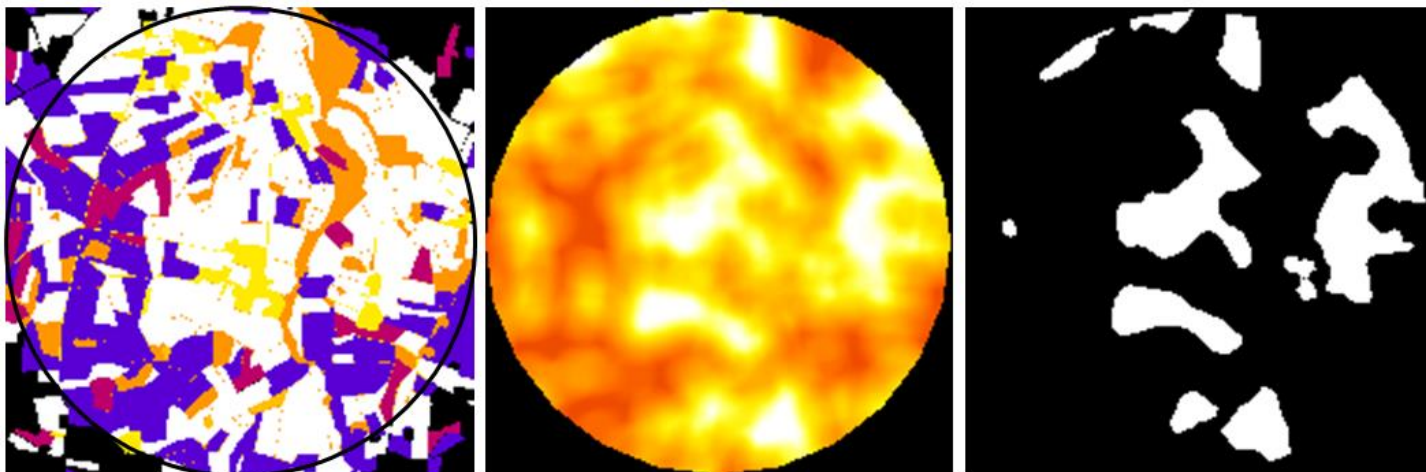


Figure 5 : Procédure de caractérisation des continuités prairiales avec "Chloe - métriques paysagères"
 Figure 5: Characterization process of grassland continuities using "Chloe - landscape metrics"

Dans un premier temps nous pouvons observer le comportement de cet indicateur environnemental sur 50 paysages simulés sans aucune contrainte paysagère. Les résultats de cette expérience virtuelle nous montrent qu'en moyenne annuelle le simulateur alloue 160 ha de prairie dans notre paysage, et que l'indice de continuité prairiale moyen annuel est de 58 ha (soit 19% du paysage). Les meilleures simulations présentent des niveaux de continuités prairiales importants pouvant atteindre 78 ha (soit 25% du paysage). Néanmoins, dans certaines simulations, cet indice ne dépasse pas 38 ha (soit 12% du paysage). Cela nous montre qu'il existe pour ce système territorial des configurations d'allocations de couverts favorables aux continuités prairiales mais que ces continuités ne sont pas assurées. Cela peut permettre d'alerter les agriculteurs et les collectivités territoriales sur la situation et d'éventuellement prendre des mesures en conséquence pour éviter de se retrouver dans un scénario peu favorable d'un point de vue des continuités prairiales. Cela permet également de sensibiliser les agriculteurs sur le fait qu'il peut être intéressant de penser le paysage collectivement et de se concerter lors de leurs choix d'assolements car cela peut être bénéfique à tous de maximiser ce type d'indicateur (pour les services écosystémiques notamment). Cela peut permettre enfin de montrer que les systèmes agricoles sont contraints et que viser certains objectifs environnementaux peut signifier devoir modifier certains systèmes agricoles.

Etudions à présent la faisabilité d'un objectif paysager visant à augmenter la part de continuités prairiales du paysage de 19% à 25%, afin d'augmenter les fonctions écologiques associées. Un levier d'action pour y parvenir peut être d'augmenter globalement la part de prairies. Nous pouvons dès lors imposer à CAPFarm de choisir uniquement des combinaisons d'allocations qui satisfassent une contrainte globale de surface minimale annuelle de prairies dans le paysage pour l'élever de 160 ha à 170 ha. Nous observons alors à l'issue de 50 nouvelles simulations que les continuités prairiales atteignent désormais 73 ha en moyenne (soit 23% du paysage). Le maximum de l'indice est remonté de 78 ha à 91 ha (soit 29 % du paysage) et surtout, le minimum est passé de 38 ha à 55 ha (soit 18 % du paysage).

L'objectif paysager "atteindre 25% de continuités prairiales dans le paysage" n'est pas atteint car les continuités prairiales n'atteignent en moyenne que 23%. CAPFarm permet

donc d'observer que nous touchons aux limites de ce système territorial pour cet objectif paysager. Toutefois, bien que nous n'ayons simulé que 2 x 50 paysages parmi les très nombreux paysages possibles, CAPFarm nous propose déjà des allocations de cultures répondant à cet objectif. Par ailleurs, il est à noter que la mobilisation de CAPFarm a permis de traduire un objectif environnemental défini en termes de continuité prairiale (+ 6%) difficilement appréhendable, en un objectif technique agronomique défini en termes de surface de prairie (+ 10 ha) directement applicable dans l'assolement des exploitations. Bien-sûr, cette expérience virtuelle omet le coût dû à une coordination nécessaire entre les agriculteurs, pour répondre à la répartition effective des efforts d'assolement. Mais là aussi CAPFarm permettra d'orienter les discussions en proposant des scénarios concrets pour y parvenir. Cet exemple nous montre que CAPFarm simule des allocations de couverts qui sont cohérentes à l'échelle du paysage, grâce à l'intégration des logiques d'allocations individuelles et des spécificités des territoires. Ceci permet de repérer les configurations les plus favorables à l'enjeu que l'on se donne et ainsi d'entrevoir les moyens de les favoriser, mais aussi d'identifier des situations impossibles ou peu envisageables sans coordination des exploitations. Ainsi, à travers l'intégration de contraintes paysagères, CAPFarm permet d'entrevoir les gains potentiels d'une gestion collective d'un paysage.

Les perspectives de mobilisation de CAPFarm dans une démarche de design territorial

CAPFarm a été développé et utilisé dans des cadres théoriques, et nous travaillons actuellement à l'intégrer dans une démarche de recherche/action afin de penser, ou repenser, collectivement des territoires. Notre plan d'action est le suivant : i) identifier un projet de développement et son territoire associé, ii) préciser un ou plusieurs objectifs paysagers communs avec les acteurs iii) intégrer les règles de gestion de chacun des exploitants présents dans le territoire, iv) construire des modèles de prédictions statistiques validés pour chacun des objectifs paysagers identifiés et v) discuter en concertation avec les acteurs, les résultats de simulation et l'analyse de scénarios alternatifs.

Ce type de méthodologie se rapproche de la modélisation d'accompagnement, c'est-à-dire de la modélisation avec les acteurs, et notamment de COMMOD (Etienne, 2010). La

méthodologie COMMOD implique les acteurs dès la phase d'identification du problème à résoudre. Elle cherche à comprendre les acteurs impliqués, leurs interactions et leur vision du fonctionnement des ressources sur le territoire. Les différentes visions sont ensuite confrontées et les acteurs aboutissent à un compromis. L'un des avantages de cette méthodologie concerne l'identification d'interactions entre acteurs qui pourront être intégrées dans les simulations. Si CAPFarm n'a effectivement pas été conçu pour prendre en compte ces interactions, il permet d'identifier des motifs spatiaux pertinents pour atteindre des objectifs environnementaux qui nécessiteraient des interactions entre acteurs.

Comme le précise Boiffin *et al.* (2014), dans un cadre de modélisation d'accompagnement notamment, "l'agronomie est en mesure d'apporter une contribution substantielle à la gestion de l'espace". Toutefois, les auteurs pointent également un déficit dans la prise en compte des processus biologiques et des finalités correspondantes qui permettrait "d'associer au génie rural traditionnel une agronomie du paysage capable d'assurer un design des paysages". Autrement dit, là où l'agronomie peut jouer un rôle dans l'aménagement des territoires, c'est en apportant du réalisme i) au niveau de la prise en compte explicite des systèmes de production et des spécificités des territoires des exploitations, et nous avons vu que la mobilisation de CAPFarm est un outil de l'agronomie pertinent pour intégrer ces aspects, et ii) dans la mise en place de modèles environnementaux réalistes eux aussi, et nous voyons là que l'agronome du design territorial doit être capable d'intégrer des regards interdisciplinaires, et ceux de l'écologie du paysage en particulier (Benoît *et al.*, 2012).

C'est à travers cette double-exigence de réalisme que nous envisageons l'apport du design territorial dans notre expérience autour de CAPFarm. Ainsi, pour intégrer au mieux les règles de gestion des exploitations agricoles, nous avons mis en place une méthodologie pour la paramétrisation de CAPFarm qui intègre à la fois des techniques d'enquêtes et du développement informatique. L'objectif est de permettre une interaction simple et directe entre les exploitants agricoles et les résultats de simulations pour explorer la diversité potentielle des assolements. Cette étape clé de paramétrisation et de validation des modèles d'allocation de cultures a été mise en place et testée dans un ensemble d'exploitations agricoles autour du lycée agricole du Robillard (Calvados).

Ces premiers travaux nous ont permis de soulever un certain nombre de questions inhérentes à l'approche de design territorial. D'abord, qu'est-ce qu'un territoire ? Où s'arrête-t-il ? L'exemple décrit via la figure 4 montre l'effet du morcellement des territoires d'exploitations et sous-entend la difficulté de définir une limite spatiale nette pour une gestion concertée. Devons-nous intégrer toutes les exploitations dont une partie du territoire est dans la zone d'étude ? Sinon, à partir de quelle superficie une exploitation présente dans la zone doit-elle être intégrée et son exploitant enquêté ? Quelle marge d'erreur pouvons-nous accepter pour nos résultats de simulations si nous ne prenons pas en compte certaines exploitations ? Si ce n'est pas à l'agronome de définir les contours d'un projet de développement territorial, il lui revient toutefois de préciser et d'évaluer les impacts d'une délimitation administrative (communale par exemple) pouvant induire une erreur dans l'évaluation d'objectifs paysagers.

Une autre difficulté est l'élaboration et la validation de

modèles environnementaux d'intérêt. En effet, la recherche développe certains modèles biologiques (carabes, pollinisateurs...), mais ceux-ci sont souvent validés et valables pour des zones géographiques particulières. Ainsi, les utiliser sur d'autres territoires que ceux sur lesquels ils ont été validés constitue une source d'erreur qu'il faut mesurer. En quoi des modèles écologiques issus du bocage armoricain sont-ils applicables dans les plaines de la Beauce ? De la même manière, tous les ravageurs des cultures sont-ils étudiés par la recherche ? Comment faire le lien entre observations et besoins du terrain immédiats d'une part et recherche et connaissances scientifiques plus pérennes d'autre part ? Il nous semble que l'agronome de design territorial doit contribuer à inventer et à nourrir diverses formes de communications entre les acteurs de territoires. Nous pouvons citer par exemple les Réseaux Mixtes Technologiques (RMT) ou la vulgarisation scientifique. Mais paradoxalement à l'aire du *Big Data*, il semble encore difficile d'échanger les données pourtant nécessaires à une identification simple et rapide i) des problématiques environnementales rencontrées, ii) des pratiques associées, iii) de solutions environnementales alternatives et iv) des outils associés (modèles, méthodes, pratiques).

En conclusion, CAPFarm est un outil mobilisable dans une démarche de design territorial car il permet d'anticiper les actions individuelles des agriculteurs et leurs conséquences sur des processus environnementaux. Cet outil présente l'intérêt d'être générique, éprouvé sur sa capacité à s'adapter à des paysages agricoles de différentes tailles et avec des systèmes de productions variés. De plus, il est évolutif et s'étoffe au fur et à mesure des projets de modélisation mis en œuvre. CAPFarm permet de prendre en compte finement les règles de décisions des agriculteurs grâce à un ensemble de contraintes, et de gérer des contraintes à une échelle paysagère. Il peut être couplé à des modèles environnementaux et offre ainsi un panel de fonctionnalités pour les opérateurs du design territorial, et notamment lors de la construction de scénarios paysagers actuels ou alternatifs. Il permet également d'évaluer la possibilité d'atteindre des objectifs proposés au niveau de chaque exploitation ou au niveau du paysage et aide à identifier des leviers d'action potentiels pour les atteindre. Les prochaines étapes prévues sont la prise en compte : i) des éléments semi-naturels qui peuvent influencer les décisions, ii) de la diversification culturelle, et notamment des cultures intermédiaires, et iii) des aspects de communication et de coordination qu'impliquent une gestion collective et concertée d'un territoire.

Remerciements

Ce simulateur a vu le jour grâce à une succession de projets financés par le Ministère de l'Écologie et du Développement durable (projets du programme DIVA Agriconnect et Tramix) et par l'ANR (projet Gester). Les auteurs tiennent à remercier en particulier le réseau Inra Payote sur la modélisation des paysages agricoles et des processus environnementaux, et l'école chercheurs Inra "Paysage et Santé des Plantes", pour leur espace de visibilité, de discussions et de collaborations.

Références bibliographiques

- Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A.C., Galli, M., Lardon, S., Rapey, H., Thenail, C., Bonari, E., 2012. *Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics*. *Landscape Ecology*, 27, 1385-1394.
- Boiffin, J., Benoit, M., Le Bail, M., Papy, F., Stengel, P., 2014. *Agronomie, espace, territoire : travailler "pour et sur" le développement territorial, un enjeu pour l'agronomie*. *Cahier Agriculture*, volume 23, n°2, mars-avril 2014.
- Boussard, H., Martel, G., Vasseur, C., 2010. *Spatial links specifications in the APILand simulation approach: an application to the coupling of a farm model and a carabid population model*. *LandMod 2010 Int. Conf. Integr. Landsc. Model*, 11p.
- Boussard, H., Baudry, J., 2014. *Chloe2012: A Software for Landscape Pattern Analysis*. INRA, Rennes, France.
- Coleno, F., collectif Gester, 2016. *Rapport du projet ANR GESTER*.
- Duflot, R., Ernoult, A., Burel, F., Aviron, S., 2016. *Landscape level processes driving carabid crop assemblage in dynamic farmlands*. *Population Ecology*, 58 (2), 265-275.
- Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A. Bergez, J.-E., 2012. *Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review*. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 567-580.
- Etienne, M., ed, 2010. *La modélisation d'accompagnement. Une démarche participative en appui au développement durable*. Versailles : éditions Quae.
- Houet, T., Schaller, N., Castets, M. Gaucherel, C., 2014. *Improving the simulation of fine-resolution landscape changes by coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules*. *International Journal Geographical Information Science*, 28, 1848-1876.
- Mari, J-F., Lazrak, E.G., Benoît, M., 2013. *Time space stochastic modelling of agricultural landscapes for environmental issues*. *Environmental Modelling & Software*, 46 : 219-227.
- Martel, G., Aviron S., Joannon A., Lalechère E., Roche B., Boussard, H., 2017. *Impact of farming systems on agricultural landscapes and biodiversity: From plot to farm and landscape scales*. *European Journal of Agronomy*, in press. DOI 10.1016/j.eja.2017.07.014
- Maxime, F., Mollet, J.M. Papy, F., 1995. *Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture*. *Cahiers Agricultures*, 4, 351-362.
- Pain, G., Boussard, H., Krolczyk, L., 2017. *Modélisation de la diversité des exploitations pour mieux penser la TVB*. In 9ème Rencontres du végétal. 16-17 janvier 2017, Angers, France.
- Roche, B., Amiotte C., Boussard H., Joannon A., Martel G., 2013. *Crop acreage allocation decisions on intensive mixed crop-livestock farms*. 64. th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science. Nantes, EAAP Publication / Wageningen Academic Publishers.