



Simulation de paysages agricoles produits par des exploitations agricoles : validation d'un modèle agronomique et évaluation des structures paysagères

Tristan Jean-Charles

► To cite this version:

Tristan Jean-Charles. Simulation de paysages agricoles produits par des exploitations agricoles : validation d'un modèle agronomique et évaluation des structures paysagères. Sciences agricoles. 2014. dumas-01132828

HAL Id: dumas-01132828

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01132828>

Submitted on 18 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**AGROCAMPUS
OUEST**

☐ CFR Angers

☒ CFR Rennes



Année universitaire : 2013-2014

Spécialité :

Ingénieur agronome

Spécialisation (et option éventuelle) :

GAPE

Mémoire de Fin d'Études

☒ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Simulation de paysages agricoles produits par des exploitations agricoles : validation d'un modèle agronomique et évaluation des structures paysagères.

Par : Tristan JEAN-CHARLES

***Soutenu à Agrocampus Ouest, centre de
Rennes le 19/09/2014***

Devant le jury composé de :

Président : Hervé NICOLAS

Maître de stage : Alexandre JOANNON

Enseignant référent : Thomas GUYET

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Samuel CORGNE, examinateur

Laurence HUBERT MOY, examinateur

Gilles MARTEL, co-encadrant du stage

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Lexique:

Abondance (pour une espèce) : Nombre totale d'individus dans un espace donné.

Assolement : Activité consistant à définir sur le territoire de l'exploitation agricole la sole de chaque espèce cultivée. (Maxime F., 1995)

Bloc de culture : Ensemble de parcelles culturales d'une exploitation sur lequel est pratiqué un système de culture donnée (Maxime F., 1995).

Décisions d'assolement : Ensemble des décisions prises par l'agriculteur pour choisir les cultures à planter et leurs caractéristiques (surfaces, localisations)

Face validation: Méthode de validation consistant à quérir des experts impliqués dans la thématique de la validation. Le but est de leur demander si, au vu des résultats fournis par le modèle, ce dernier a un comportement raisonnable et fourni des résultats corrects. (Rykiel, 1996)

Métriques paysagères : Descripteurs quantitatifs rendant compte de l'organisation et des caractéristiques des différentes structures d'un paysage.

Paysage agricole: Ce sont des mosaïques d'éléments naturels et modifié par l'Homme qui varient en taille, forme et agencement. (Bojie F., 1995).

Richesse spécifique totale: Nombre d'espèces faunistiques ou floristiques présentes dans l'espace considéré.

Sole : Surface consacrée à une espèce cultivée sur l'ensemble du territoire d'exploitation et ce, pour une année donnée.

Territoire : Portion d'espace approprié par des acteurs (Aubry, 2007)

Zone cultivable (pour une culture) : L'ensemble des parcelles susceptibles de recevoir la culture considérée. (Maxime F., 1995)

Zone de culture (pour une culture) : Ensemble du ou des blocs de culture incluant cette espèce végétale. (Maxime F., 1995)

Abréviations :

Pour les cultures principalement :

B=Blé, M=Maïs, O=Orge, C=Colza, PP =Prairie permanente, RGATB= Prairie du type Ray
gras trèfle blanc, F=Fétuque, L= Luzerne

RPG = Registre Parcellaire Graphique

Avant-propos :

Ce rapport présente le travail effectué dans le cadre d'un stage de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome, spécialisation GAPE délivré par AGROCAMPUS OUEST, centre de Rennes (ex ENSAR). Il a été réalisé au sein de l'unité INRA SAD-Paysage (Rennes) et s'inscrit dans le cadre de l'ANR DIVA 3 et du projet AGRICONNECT, dont l'objectif est d'étudier les continuités écologiques et les corridors naturels dans les paysages agricoles.

Remerciements :

Tout d'abord, je souhaite remercier avant tout l'ensemble de mes maîtres de stage pour m'avoir accueilli au SAD Paysage mais aussi pour leurs aides et soutiens à ce travail, à savoir Alexandre Joannon, Gilles Martel, Bénédicte Roche et Hugues Boussard. Alexandre, merci pour tes conseils et tes relectures de mon travail ainsi que de tes remarques qui m'ont permis de prendre (beaucoup) de recul. Gilles, merci à toi aussi pour tes remarques et surtout ta patience, notamment lors des longues sessions d'analyses de données qui ne semblaient jamais se terminer. Merci aussi à toi Bénédicte pour tes conseils sur la gestion d'enquête mais aussi pour ta bonne humeur perpétuelle, même pendant les moments de « rush ». Enfin, merci Hugues de m'avoir donné l'occasion de me perfectionner en JAVA, chose qui me tenait profondément à cœur et aussi ta pédagogie.

Je souhaite aussi remercier Thomas Guyet qui a bien voulu prendre de son temps afin de relire mon rapport et lui donner une touche plus « informatique ». Merci encore pour vos conseils !

Un grand merci à toutes les personnes impliquées de près ou de loin au bon déroulement du projet Agriconnect. Merci à Julien Deniau, camarade de bureau et sans qui les sites d'étude auraient du mal à être produit : merci « Service géomatique » !

Je souhaite aussi remercier Nausicaa Le Mouel et Maryvonne Chevallereau pour l'accès aux bases de données, leurs bonnes humeurs et surtout les nombreux reboots du serveur qui avait la fâcheuse tendance de tomber souvent.

De même, je souhaite vivement remercier Etienne Lalechère et Marianne Laslier, compagnon de master pour m'avoir accompagné ces six mois de stage.

Sommaire

Introduction:	1
Matériel et méthodes :	4
1. Analogie à un système expert	4
2. Fonctionnement du modèle Allocation de cultures : description du modèle décisionnel	5
a. Inférence du modèle	5
b. Modélisation du fonctionnement d'une exploitation agricole : base de règles	6
c. Intégration des caractéristiques des exploitations agricoles : base de connaissances	7
3. Démarche de validation du modèle d'Allocation de cultures	7
a. Validation théorique du modèle décisionnel	7
b. Démarche de validation retenue	9
c. Préparation aux entretiens de validation (étape 2)	10
d. Déroulement des interviews de validations (étape 3) et de réimplémentation (étape 1)	13
4. Étude de la dynamique de la mosaïque agricole au niveau du paysage	14
a. De l'exploitation agricole au paysage : objectifs de l'étude et génération des paysages	14
b. Choix des sites de tests	14
5. Mise en œuvre des traitements et démarche globale	16
Résultats :	19
1. Mise en œuvre de la méthode de validation : exemple des cas 11 et 6.	19
a. Présentation des cas 11 et 6	19
b. Analyse des solutions modélisées	23
c. Retour sur l'interview de validation	27
d. Reparamétrage et implémentation du modèle	28
2. Analyses de l'impact des configurations de paysages sur l'évolution de la mosaïque agricole et de la métrique paysagère d'intérêt biologique	29
a. Génération et paramétrages des paysages	29
b. Analyse statistique des soles des paysages	29
c. Analyse du paysage contenu dans le cercle d'analyse	31
Discussions:	36
1. Apports de la démarche de « retour sur épreuve » pour la validation des cas d'assolement	36
2. Validité des données	36
3. Généricité des règles agronomiques implémentées dans le modèle	37
4. Paramétrage de la base de règles des exploitations des paysages	37
5. Effet du paysage sur la métrique « quantité de maïs dans un voisinage de 500 m de rayon »	38

Conclusion :	39
Bibliographie :	40

Introduction:

De nos jours, la gestion de la biodiversité est devenue un enjeu majeur des politiques publiques environnementales. Cette prise de conscience peut être résumée par le Millenium Ecosystem Assessment, organisme international créé en 2000 à la demande du secrétaire national des Nations Unies pour l'évaluation des changements de l'écosystème, et dont l'une des conclusions est que « l'Homme a modifié les écosystèmes (...), ce qui a entraîné la perte considérable et largement irréversible de la diversité de la vie sur Terre ».

C'est dans cette optique que la notion de réseaux écologiques a été développée. Ces réseaux ont été mis en avant surtout dans les années 1980 comme concept permettant l'identification et la protection des communautés écologiques. En effet, la notion de connectivité entre les habitats naturels serait un indice permettant d'expliquer la persistance de la biodiversité dans des paysages dominés par l'activité humaine (Bennett et al., 2006).

L'une des applications des réseaux écologiques concernent notamment les paysages agricoles. Ces paysages sont constitués de trois parties dont les transformations se réalisent à des pas de temps différents (Burel F. et Baudry J., 2010) :

- Une mosaïque de cultures, évoluant rapidement dans le temps et directement influencée par les choix de conduite de cultures des agriculteurs présent sur le territoire comme le choix des cultures à mettre dans la rotation et leurs localisations dans le territoire d'exploitation (Bacic et al, 2006).
- Des éléments semi-naturels (tels des haies, bois et bosquets) plus stable dans le temps mais influencés par les pratiques agricoles.
- Des éléments artificialisés tels que les routes qui changent au bout d'une grande période de temps.

De ces trois composantes, la partie semi-naturelle est celle qui a été le plus étudiée (Petit and Burel, 1998). Pourtant, la mosaïque de culture n'est pas neutre en matière de connectivité, sachant qu'il est généralement admis que la complexité et l'hétérogénéité d'un paysage agricole sont favorables à la biodiversité (Benton et al., 2003 ; Tscharntke et al., 2005).

Ainsi, étudier la formation de la mosaïque agricole et sa dynamique permettrait de décrire et explorer des cas de configurations de mosaïques maximisant des métriques paysagères telle la connectivité des milieux.

De ces constats, le programme de recherche AGRICONNECT a été créé. L'objectif général de ce programme est d'évaluer l'impact sur la biodiversité de différents systèmes de production agricole, via leur contribution à la dynamique de la mosaïque des cultures, en lien avec les divers éléments du paysage. Cette étude concerne plus particulièrement des systèmes de production intensifs, systèmes dont l'impact sur la qualité des services écosystémiques est reconnu (Tillman, 2002).

Sachant que la dynamique des paysages agricoles dépend des décisions d'assolement des agriculteurs présents sur le territoire, la génération de paysages d'étude « susceptibles d'exister » résulte de la bonne compréhension à l'échelle locale des décisions d'assolement pratiquées dans les exploitations.

C'est dans ce cadre qu'a été développé le modèle AGRICONNECT à l'INRA SAD Paysage (voir figure 1).

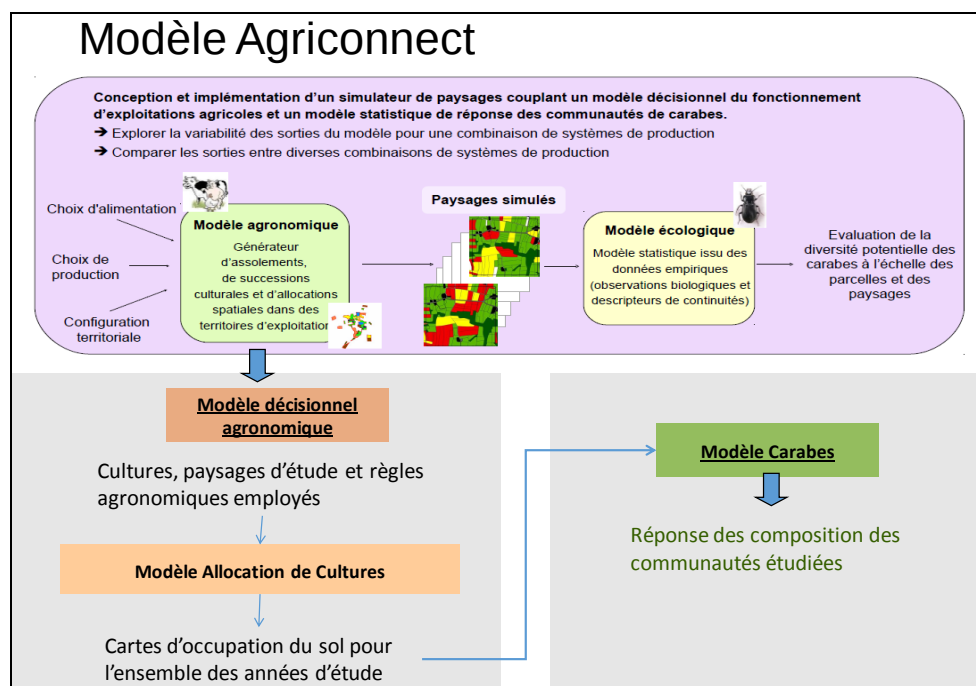


Figure 1 : Modèle globale Agriconnect (source : séminaire AGRICONNECT Mars 2014, Boussard et al)

Ce modèle couple à un modèle agronomique capable de générer des paysages agricoles un module écologique dont le but est d'évaluer la qualité de la biodiversité suivant les différentes combinaisons de paysages. A la différence de travaux de recherche où l'on étudie l'influence de la structure spatiale de paysages d'études théoriques, les paysages générés par le module agronomique du modèle AGRICONNECT doivent être réalistes dans un contexte agricole donné afin que les évaluations de la biodiversité réalisées puissent elles aussi reproduire des dynamiques existantes. Afin d'accorder une confiance élevée en le réalisme des paysages créés, une validation préalable du module agronomique basée sur les simulations des décisions d'allocations de cultures a été envisagée.

Le module agronomique est un modèle décisionnel implémentant des règles et des faits concernant l'assolement des agriculteurs pour inférer et produire des résultats notamment à deux échelles, à savoir :

- Le territoire de l'exploitation agricole où des successions culturales sont définies.
- Un paysage agricole dont l'évolution est directement lié au fonctionnement des exploitations agricoles qui le composent.

La validation de ce modèle décisionnel revient donc à évaluer les capacités du modèle à produire des assolements « réalistes » pour chaque exploitant « modélisé ».

L'objet de ce rapport peut être résumé en deux points :

- Établir une méthode conduisant à la validation du module d'Allocation de cultures pour que les assolements générés par le simulateur soient réalistes et que les règles qui permettent de les engendrer soient correctement modélisées.
- Simulation de paysages agricoles pour l'étude de métriques paysagères liées à la connectivité de milieux et la richesse de la biodiversité. Cet objectif permet d'obtenir des paysages réalistes utilisables pour la prédiction de la biodiversité réalisée par le modèle écologique.

Pour répondre à ces objectifs, nous aborderons les questions en trois temps : nous détaillerons dans un premier temps les aspects méthodologiques concernant la démarche de validation et l'étude des paysages simulés, puis nous détaillerons dans un deuxième temps les résultats de l'application de la méthodologie mise en place, dans un dernier temps nous discuterons ces résultats.

Matériel et méthodes :

La validation du modèle décisionnel d'Allocation de cultures nécessite une démarche claire et rigoureuse pour que l'on accorde une confiance élevée dans les paysages simulés. De même, l'étude des paysages à travers leurs caractéristiques spatiales et temporelles ainsi que leurs générations nécessitent l'élaboration d'une démarche précise. Dans ce chapitre, nous allons présenter le fonctionnement du modèle décisionnel en détaillant son fonctionnement et son paramétrage puis décrire la démarche de validation du modèle mise en place dans le cadre de ce stage. Nous allons par la suite détailler la méthode d'étude des paysages agricoles générés à l'aide du modèle.

1. Analogie à un système expert

Le modèle d'Allocation de cultures que nous étudions dans ce travail peut être assimilé à un système expert dans son fonctionnement. Nous allons décrire plus précisément les spécificités d'un système expert.

D'une manière générale, un système expert est un logiciel dont l'objectif est de reproduire au mieux le raisonnement logique (inductif ou déductif) qu'emploie un expert humain pour aboutir à une décision concernant un domaine d'étude particulier (Negotia, 1985). Toujours selon Negotia (1985), un système expert requiert trois éléments distincts dans son fonctionnement, à savoir des connaissances basiques sur la thématique et des règles, ainsi qu'un algorithme capable de produire un raisonnement logique à partir de ces informations. Ces éléments sont respectivement appelés bases de connaissances, base de règles et moteur d'inférence (figure 2).

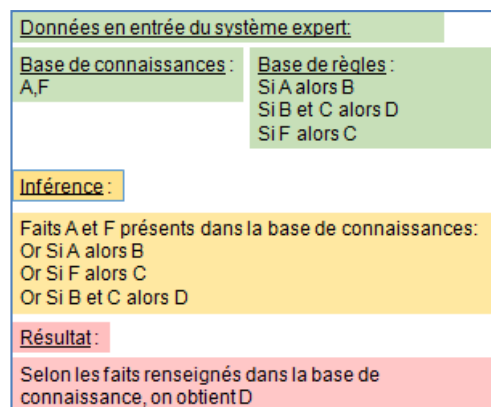


Figure 2 : Illustration du mécanisme d'inférence

À partir des faits présents dans la base de connaissances, le moteur d'inférence dérive des résultats des règles logiques basées sur des liens entre attributs jusqu'à aboutir à des solutions.

Dans le cas du module d'Allocation de cultures, les décisions d'assolement sont prises en prenant en compte les caractéristiques d'un territoire et font suite à un cheminement logique. Nous pouvons donc définir, dans le modèle décisionnel, une base de règles ainsi qu'une base de connaissances. Ces sont ces deux points que nous allons étudier à présent.

2. Fonctionnement du modèle Allocation de cultures : description du modèle décisionnel

Le modèle décisionnel étudié ici à un **fonctionnement analogue** à celui d'un système expert, c'est-à-dire que ce dernier dérive des solutions sous la forme d'assolements spatialisés et sur une durée fixée par l'utilisateur à partir de règles et des connaissances des contraintes spécifique à chaque parcelle et à l'exploitation. Nous allons dans cette partie décrire le fonctionnement complet de ce modèle et les différents éléments qui le composent.

a. Inférence du modèle

Pour chaque exploitation agricole étudiée, le modèle infère des décisions d'assolement spatialisées au cours du temps pour chaque parcelle et ce, à partir de la base de faits et la base de règles. Le modèle décisionnel infère sur la durée indiquée par l'utilisateur (figure 3).

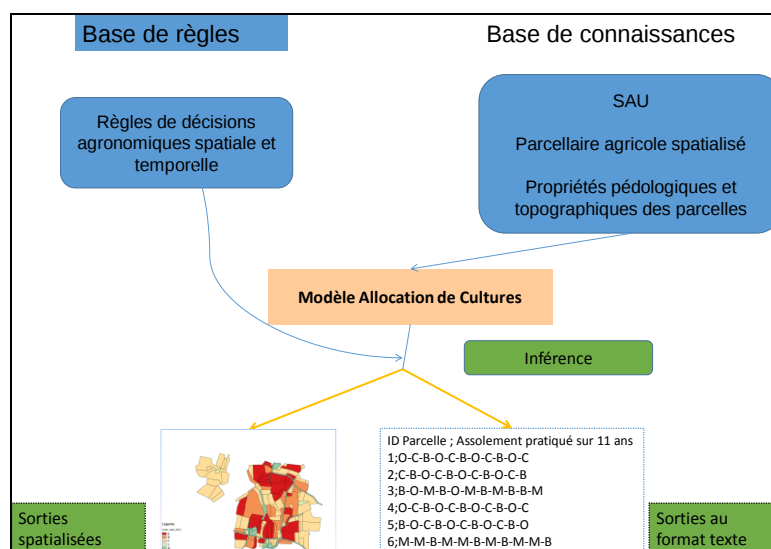


Figure 3: Fonctionnement du modèle décisionnel

À partir de la base de règles, l'utilisateur paramètre la base de connaissances ainsi que les valeurs des paramètres des règles agronomiques. Lors de l'inférence, **le modèle teste à chaque pas de temps** diverses combinaisons d'assolement respectant les règles paramétrées et réalise une sortie des décisions que si celles-ci remplissent l'ensemble des conditions suscitées. Ces sorties prennent alors **deux formes** principalement, à savoir **des sorties spatialisées** représentant une occupation du sol au niveau de la parcelle pour chaque année ainsi que **des sorties temporelles** renseignant des détails sur ces simulations, notamment les rotations de cultures de chacune des parcelles dans le temps.

Nous allons nous attacher à décrire plus précisément les contenus des bases de règles et de connaissances utilisés par le modèle décisionnel d'Allocation de cultures.

b. Modélisation du fonctionnement d'une exploitation agricole : base de règles

Selon l'INSEE (2014), une exploitation agricole est définie comme une unité de production remplissant trois critères, à savoir la création de produit(s) agricole(s), une gestion indépendante ainsi qu'une surface/nombre d'animaux minimale. À cette exploitation agricole est associé un territoire d'exploitation. L'usage du territoire est lié aux décisions d'assolement que l'agriculteur s'est fixé afin de répondre à ses objectifs de production en tenant compte des éventuelles contraintes inhérentes au parcellaire (Sebillotte, 1978, 1990 ; Aubry et al., 1998). Ces contraintes et objectifs impactent l'organisation spatiale des cultures en limitant le nombre de couverts que l'exploitant agricole peut implanter suivant la parcelle: certains agriculteurs n'implantaient pas de cultures telles que le blé sur des parcelles dont la taille était inférieure à 0.5ha (séminaire EAAP 2014). En délimitant les parcelles en ensembles pouvant accueillir les mêmes cultures ou sur lesquelles les règles pratiquées sont identiques, il est possible de définir des blocs de cultures où vont se répartir les cultures à implanter (Maxime F., 1995). La succession culturale mise en place dans les blocs est déterminée en croisant les caractéristiques du bloc ainsi que les règles et préconisations spécifiques à chaque couvert (Maxime F., 1995).

Afin de définir plus précisément la base de règles et leurs applications dans les structures agricoles du type polyculture-élevage en Bretagne, des enquêtes ont été menées auprès d'agriculteurs du type « polyculture-élevage » par l'INRA SAD Paysage.

Une liste des règles agronomiques retenues est présentée ci-dessous (tableau 1) :

Délai de retour minimal (an)	Durée d'attente minimale pour le retour d'une culture dans la rotation d'une parcelle
Nombre minimal de répétitions	Nombre minimal de répétitions d'une culture sur une parcelle
Nombre maximal de répétitions	Nombre maximal de répétitions d'une culture sur une parcelle
Surface minimale (ha)	Surface minimale à mettre pour une culture
Durée maximale d'implantation (an)	Durée d'implantation maximale et continue d'un couvert sur une parcelle
Durée minimale d'implantation (an)	Durée d'implantation minimale et continue d'un couvert sur une parcelle
Couple précédent-suivant	Liste des couples possible
Zone cultivable (pour une culture)	Possibilité d'implantation d'une culture sur une parcelle suivant ses caractéristiques pédologiques

Tableau 1 : Description des règles agronomiques prises en compte

Au sens du système expert, les règles agronomiques correspondent aux attributs constitutifs des règles logiques. Ces attributs définissent des contraintes que le système doit considérer lors de chaque décision d'assolement. Les règles agronomiques présentées ci-dessus ont été intégrées en tant qu'attribut des règles de la base de règles du modèle décisionnel.

c. Intégration des caractéristiques des exploitations agricoles : base de connaissances

Le modèle décisionnel d'Allocation de cultures s'appuie sur les caractéristiques de chaque parcelle de l'exploitation agricole étudiée.

Nous tirons plusieurs types d'information de cette base de connaissances :

- Une information sur la géométrie des parcelles, à savoir sa surface et sa distance par rapport à d'autres éléments du paysage. Ces données ont été obtenues grâce au Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2012 et le redécoupage des ilots parcellaires en parcelles individuelles.
- L'appartenance de la parcelle à l'une des composantes du paysage agricole, à savoir, la mosaïque agricole ou les éléments artificiels comme les sièges d'exploitation.
- La pédologie de la parcelle et les contraintes agronomiques dont elle est l'objet.

Le modèle décisionnel d'Allocation de cultures repose sur une base de règles assimilées aux contraintes agronomiques et de zones culturales tandis que la base de connaissances prend en compte les caractéristiques spatiales des parcelles telles les surfaces et leurs propriétés, notamment pédologiques. La génération d'un paysage agricole « réaliste » dans le contexte agricole breton repose sur la compréhension et l'assimilation dans le modèle du fonctionnement des types d'exploitation étudiés. **Ces vérifications supposent une évaluation des décisions produites par le modèle décisionnel pour valider son fonctionnement ainsi que des règles employées.**

3. Démarche de validation du modèle d'Allocation de cultures

L'objet de cette démarche est de s'assurer du réalisme des solutions proposées par le modèle. Une démarche aboutissant à la validation complète du modèle a été produite et sera abordée dans ce chapitre.

a. Validation théorique du modèle décisionnel

La validation théorique d'un modèle décisionnel fait toujours l'objet de grandes incertitudes, notamment sur la question de l'évaluation des performances du simulateur (Rykiel, 1996). En effet, l'évaluation des performances du modèle décisionnel d'Allocation de cultures sous-entend l'évaluation des décisions d'assolement complexes, rendant toute validation « numérique » peu pertinentes. La validation du module d'Allocation de cultures est vue dans notre démarche comme **un moyen d'accréditer de la confiance** dans la vraisemblance des résultats de simulation, confiance qui s'accroît avec le nombre de cas validés (Holling, 1978). La méthodologie à employer pour accréditer les décisions produites dépend très fortement de l'usage que l'on veut obtenir à partir du modèle implémenté (Rykiel, 1996). Dans notre étude, le module d'Allocation de cultures doit nous permettre d'explorer différentes configurations de paysages et non de pouvoir prédire une évolution de la structure de ceux-ci à une date future. Dans cette optique, la validation à employer doit nous permettre

d'apprécier le réalisme de l'ensemble des décisions prises pour chaque cas simulé. Pour ce faire, nous avons choisi d'adopter la démarche de validation en trois étapes proposées par Rykiel (1996). Cette démarche en trois étapes a été retenue car elle assure une robustesse au modèle. Ces trois étapes correspondent à trois validations distinctes décrites ci-dessous.

➤ Validation du jeu de données pour la calibration du modèle:

Cette phase consiste en l'acquisition de données d'enquêtes pour la calibration et les tests du modèle. Ces données doivent être fiables et ne pas comporter de biais.

Dans notre cas, les données récupérées par l'équipe SAD Paysage sont considérées comme fiable dans le sens où les exploitants agricoles n'ont pas cherché à mentir ou à falsifier leurs résultats sur des données qui ne sont pas sensibles.

➤ Validation du fonctionnement du modèle décisionnel:

Il s'agit de s'assurer de la validité du fonctionnement du modèle informatique géré par l'équipe SAD Paysage. Ce dernier doit retranscrire les règles implémentées correctement pour chaque cas d'étude. Cette étape est gérée par l'équipe qui implémente le modèle informatique suivant les données récoltées et procède aux tests de fonctionnement.

➤ Validation opérationnelle du modèle:

Cette étape correspond en la validation des résultats de simulations par confrontation à des décisions d'assolement effectivement employées. De cette validation, nous obtenons une idée des performances quant aux prises de décisions du modèle.

Parmi toutes les procédures de validation opérationnelle, la méthode la plus usitée est celle du *data splitting* car étant la plus robuste (Power, 1993). Cependant, cette méthode est surtout employée pour la validation d'un modèle dont l'on veut vérifier les capacités prédictives (Power, 1993), ce qui se révèle que peu adapté aux objectifs d'exploration des cas possibles d'assolement par le modèle.

Spécifiquement pour cette étape, nous avons opté pour une validation à dire d'experts, qualifiée par Rykiel (1996) comme une « face validation ». Dans cette méthodologie, un expert est amené à se prononcer sur la validité du comportement du modèle décisionnel et de la qualité des résultats de modélisation obtenus. Dans notre cas, la variabilité des décisions d'assolement produites pour chaque cas d'étude par inférence du modèle est directement expertisée par l'exploitant agricole. Par son expérience, il peut juger de la faisabilité des résultats et accréditer le modèle d'une confiance quant à ses performances.

Une démarche classique pour accroître la confiance dans le modèle décisionnel consiste en la « réalisation de retours sur épreuves » : la procédure consiste en l'implémentation d'un modèle et une base de règles à partir d'une discussion avec des experts puis de leurs soumettre des résultats de simulations jusqu'à ce qu'ils considèrent que celles-ci soient proches des décisions qu'ils auraient prises. Il a été montré dans la validation du modèle SoyBug développé par Howard et Pierce que la simple traduction des recommandations des experts en termes de bases de règles et de modèles, n'était pas suffisante pour obtenir des résultats « réalistes » (Beck, H. W, 1989). Il a en effet été découvert que les experts donnaient des recommandations différentes quand ceux-ci étaient confrontés à de vrais cas d'étude par

rapport au cadre de l'interview. Dans le premier cas, ils ont un cas concret qu'ils peuvent réfuter ou accepter et argumenter sur les raisons précises qui les ont amenés à prendre de telles décisions pour améliorer le modèle. L'intérêt de cette démarche est double : le modèle prend des décisions de plus en plus proches de celles des experts à chaque réunion et on sollicite les experts que sur leurs jugements.

b. Démarche de validation retenue

La démarche retenue pour la validation du modèle correspond en l'intégration dans la partie validation opérationnelle décrite par Rykiel (1996) du système de « retour sur épreuve » pratiqué dans le cas de SoyBug. Dans cette démarche, les deux premiers points ont été validés par le SAD Paysage.

Afin de faciliter la lecture de la démarche, une figure synthétisant l'ensemble de la démarche a été produite et sera commenté sous forme de points dont nous allons faire référence au cours de ce chapitre (figure 4).

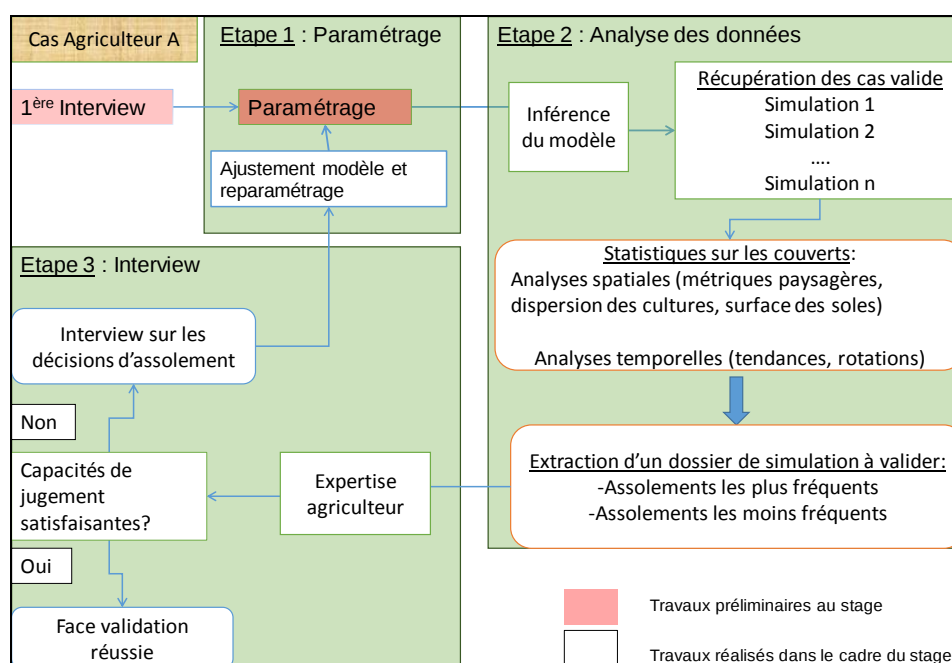


Figure 4 : Démarche globale de validation pour un cas d'étude

Dans la démarche de validation, les premiers traitements correspondant à l'étape 1 sont réalisés à partir des informations recueillis lors des interviews préliminaires réalisées par l'équipe. Nous allons dès à présent décrire les étapes 2 et 3 de la démarche et détailler les conditions à obtenir pour valider un cas.

c. Préparation aux entretiens de validation (étape 2)

Dans l'optique d'analyser puis de soumettre les décisions d'assolement du modèle décisionnel aux exploitants agricoles, une phase préparatoire d'analyse de résultats est mise en place.

i. Méthode d'analyse des décisions d'assolement produites par le modèle

Pour chacun des cas d'exploitation sur lesquels on étudie le modèle, l'utilisateur doit renseigner la base de connaissances ainsi que la base de règles avec les informations spécifiques. Le moteur d'inférence dérive à partir de ces éléments une ou plusieurs solution(s). Il est à noter qu'une solution du modèle correspond à un assolement réalisé par l'exploitant sur l'ensemble des parcelles de son exploitation pour la durée d'étude indiquée par l'utilisateur.

Dans l'optique de juger du fonctionnement du modèle, un expert humain est amené à se prononcer sur le réalisme des solutions proposées par le modèle. Or dans les faits, chaque solution représente une application des règles agronomiques respectant les contraintes définies dans la base de règles. De plus, le nombre de solutions proposées par le modèle pour chaque cas de validation dépend fortement des contraintes des règles agronomiques implantées comme attribut dans la base de règles: une exploitation dont les contraintes sont fortes n'aura que peu de solutions tandis qu'une exploitation avec « une marge de manœuvre » plus élevée pour l'implantation de ses cultures aura un nombre de solutions plus élevés. Sachant que l'on souhaite étudier la variabilité dans les décisions d'assolement produites, il est dès lors difficile pour un expert de juger l'ensemble des solutions pour un cas peu contraint au niveau des règles agronomiques.

Une démarche de synthèse des cas de simulation a donc été entreprise. Afin de caractériser chaque solution produite par le modèle et accéder à leurs spécificités, **des descripteurs des décisions agronomiques** ont été implémentés (tableau 2).

Délai de retour	Descripteur des délais de retour pratiqués pour chaque culture
Durée d'implantation	Descripteur de la durée d'implantation
Nombre de répétitions	Descripteur du nombre de répétitions des cultures pratiquées pour chaque culture
Précédent-Suivant	Descripteur de la fréquence des couples précédent-suivant pratiqué dans l'assolement simulé
Surface (par an)	Descripteur de la sole pratiquée par an pour une exploitation
Nombre d'occurrences	Descripteur de la fréquence d'apparition d'une culture dans un assolement
Dispersion des couverts (par an) Pour une culture Cu, pour une année donnée, $D(Cu) = (\text{moyenne des distances entre les parcelles portant la culture}) / (\text{moyenne des distance entre les parcelles de la zone culturale de la culture Cu})$	Descripteur de la dispersion des cultures sur la zone cultivable de celles-ci. Une culture peut n'être présente que sur certaines parcelles de sa zone cultivable chaque année, celles-ci pouvant être plus ou moins groupées.

Tableau 2 : Les descripteurs implémentés

Ces descripteurs ont été choisis afin d'étudier spécifiquement l'application de chaque règle agronomique intégrée dans la base de règles. Cette approche permet la description de chaque cas d'assolements produit par le modèle ainsi que de cerner la variabilité des valeurs prises par celles-ci parmi l'ensemble des solutions proposées (Figure 5).

Numéro de la solution produite	1	2	3
Variation des surfaces en blé pour toutes les années de simulation	[10-12]	[9-13]	[11-13]
Variation des surfaces en maïs pour toutes les années de simulation	[5-15]	[10-20]	[10-11]
Pour l'ensemble des simulations: Surface en maïs très variable Surface en blé plus stable => Variations valide pour l'agriculteur?			

Figure 5 : Illustration des variabilités étudiées

Une précaution doit être prise lors de l'étude des rotations culturales : si elle est implémentée dans la base de règles, la règle de délai de retour ne concerne pas les premiers couverts (si pour une culture X, nous avons un délai de retour de 3 ans, cette culture ne pourra pas suivre cette règle les deux premières années). Pour cela, une réduction de la longueur des séquences introduites sera effectuée.

L'étude de la variabilité des descripteurs pour un ensemble de simulations a été réalisée par étude classique basée sur la dispersion des valeurs. Cette étude repose sur l'usage des quartiles. Cette méthode, sensible aux valeurs extrêmes, permet une caractérisation simple du comportement des descripteurs (Dixon, 1969). Les études ont été réalisées sous le logiciel R.

Le calcul appliqué a été le suivant :

Avec N le nombre d'individus dans le jeu de données et M le jeu de données :

Recherche de la médiane	$Median = M[i] \text{ sachant } i = N/2$	
Recherche des bornes	$Q0.25 = M[j] \text{ sachant } j = i/2$	$Q0.75 = M[k] \text{ sachant } k = i + j$
Recherche des valeurs extrêmes	$Seuil_sup = Q0.75 + (Q0.75 - Q0.25) * 1.5$	$Seuil_inf = Q0.75 - (Q0.75 - Q0.25) * 1.5$

De l'étude statistique, nous avons dégagé les principales causes de variabilité entre les résultats fournis par le modèle décisionnel.

ii. Méthodologie de constitution des dossiers de validation

De l'étude statistique de la dispersion des descripteurs de l'ensemble des simulations, une classification de ces dernières a été réalisée. Les solutions produites par le modèle sont **classées** en « cas fréquents » et en « cas peu fréquents » : les solutions exhibant **des valeurs extrêmes de descripteurs** par rapport aux autres solutions générées **sont considérées comme des cas « peu fréquents »** alors que des simulations ayant **des valeurs de descripteurs communes** sur l'ensemble des résultats générés **sont considérées comme « fréquent »**. L'objectif d'une telle classification est de pouvoir synthétiser les variabilités existantes entre les différentes solutions pour faciliter une expertise par l'exploitant agricole : en identifiant des applications de règles agronomiques « peu fréquentes » sur l'ensemble des simulations étudiées, il est possible de repérer les sources majeures de variabilité entre l'ensemble des solutions possibles décrites par le modèle et ainsi d'expertiser ces comportements comme « possibles » ou « irréalistes ».

Par classification des solutions, un dossier de simulation contenant les deux types de cas peut être constitué. L'expertise de ces deux cas de solutions répond à deux objectifs :

- La validation des cas « fréquents » permet de fournir au modèle décisionnel une confiance dans ses prises de décisions. En effet, on suppose que les résultats d'assolement dont la fréquence d'occurrence est la plus forte correspondent à des cas de « routine ». Ces cas seraient ceux qui se rapprocheraient le plus d'un assolement réalisé habituellement par l'exploitant agricole pour réaliser ses objectifs. Sous ces hypothèses, la validation des cas de routines validerait le comportement global du modèle sur le cas étudié.
- La validation de cas « peu fréquents » permet de cerner les limites du modèle dans ses prises de décisions.

Un dossier de solutions à valider répond à certaines caractéristiques :

- Sachant que pour un même cas d'étude, un paramétrage différent des règles agronomiques peut aboutir à la formulation de décisions différentes, **chaque dossier à valider concerne un paramétrage et un cas d'étude**.
- La taille du dossier est variable du nombre de solutions générées suite à un paramétrage et de la variabilité des décisions d'assolement.

Ainsi, un cas d'étude dont les contraintes agronomiques sont faibles et dont la variabilité au niveau des solutions est forte aura un dossier contenant plus de « cas peu fréquents » pour cerner les limites du modèle. À l'inverse, la validation d'un cas d'exploitation dont les contraintes sont fortes, sera orientée vers la validation de cas « fréquents » pour tester le comportement du modèle.

À l'aide de ces dossiers de synthèse, une interview est organisée avec l'exploitant agricole dont le fonctionnement agronomique est modélisé.

d. Déroulement des interviews de validations (étape 3) et de réimplémentation (étape 1)

Lors de la constitution du dossier, un rendez-vous avec l'exploitant agricole dont le système a été modélisé est pris. De cette interview, l'expert est amené à se prononcer sur les solutions proposées et à juger des performances du modèle. Nous allons étudier le déroulement de cette interview.

L'objectif de l'expertise par l'exploitant agricole dont le système a été modélisé est double : il s'agit d'une part de vérifier le comportement global du modèle et vérifier que le paramétrage issu des interviews précédentes correspond aux règles agronomiques appliquées par l'exploitant. Les interviews de validations se déroulent en plusieurs parties, explicitées dans la figure 6.

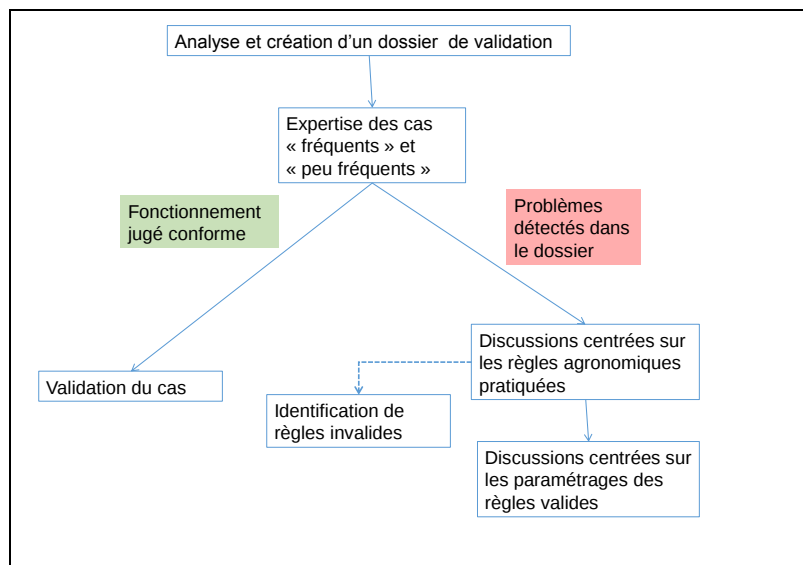


Figure 6 : Déroulement d'une interview de validation

Lors de l'expertise, la validation complète intervient dès lors que **le nombre de solutions validés dans le dossier est suffisant pour que l'expert accrédite de la confiance** dans le fonctionnement du modèle et sa capacité à générer des décisions réalistes. Si celui-ci émet des doutes sur le fonctionnement du modèle et rejettent des décisions simulées, une phase de discussion est alors amorcée afin d'identifier les raisons du rejet. Les défaillances dans le modèle peuvent exister à deux niveaux différents dans le modèle, à savoir :

- Au niveau de la base de règles implémentées. La discussion est orientée vers l'inventaire exhaustif des règles réellement pratiquées par l'exploitant. À ce niveau, il est possible de valider certaines agronomiques et d'isoler les règles responsables du rejet.
- Après analyse des attributs de la base de règles, nous vérifions avec l'expert le paramétrage réalisé pour les règles qui n'ont pas été validées.

De cette phase de discussion, **les règles non validées font l'objet d'une reformulation** tandis que les règles dont le paramétrage n'était pas celui pratiqué par l'exploitant font l'objet d'un nouveau paramétrage à l'étape 1.

À la suite de l'interview, les résultats obtenus permettent l'ajustement du comportement du modèle décisionnel. Le **modèle amélioré est de nouveau utilisé pour produire des solutions d'assolements**, servant à la constitution d'un nouveau dossier de solutions à soumettre à expertise. Ce « retour sur épreuve » prend fin lorsque **l'expert accrédite une confiance élevé** dans les résultats du modèle.

4. Étude de la dynamique de la mosaïque agricole au niveau du paysage

Dans cette partie est de présenter la démarche d'étude des paysages résultants du fonctionnement du modèle d'Allocation de cultures sur plusieurs exploitations.

a. De l'exploitation agricole au paysage : objectifs de l'étude et génération des paysages

Dans ce rapport, une exploitation agricole du type « porcin » a été validée selon la démarche proposée. Nous appliquons son paramétrage à l'ensemble des exploitations agricoles du paysage pour générer des cartes d'assolements. Afin de pouvoir appliquer à des exploitations ayant des caractéristiques différentes en termes de SAU et de contraintes agronomiques des contraintes de ce cas, une mise à l'échelle des surfaces des soles pratiquées par l'exploitant validé a été réalisée: les exploitations du site ont été paramétrées avec les mêmes règles que le cas validé. Les surfaces minimales de cultures à planter pour chaque exploitation sont basées sur les proportions pratiquées dans le cas validé et l'importance de la culture dans les rotations : une culture prioritaire aura une plus grande SAU d'allouer que d'autres. Cette démarche assure un fonctionnement similaire des exploitations quel que soit leurs SAU disponibles (Schaller, 2011).

b. Choix des sites de tests

Deux sites ont été retenus en région Ile et Vilaine (voir Annexe 2, figure 23). La première zone test est située au sud-est de la ville de Rennes et présente une faible densité de haies et de forêts. La deuxième zone test se situe au nord du département et présente une plus forte densité d'éléments semi-naturels sous la forme de haies, résultant en un paysage fermé avec une maille bocagère serrée (tableau 3).

Zone	Échelle	Proportion de la zone en éléments semi-naturel (%)	Proportion de la zone en éléments artificiels (%)	Proportion de la zone en matrice agricole(%)	Densité bocagère	Taille moyenne des parcelles agricoles (ha)	Écart type (ha)	Nombre de parcelles	SAU
Ouverte	Paysage	0.5	3.3	96.1	Faible	2.9	2.2	362	870
Fermé	Paysage	4.6	2.2	93.2	Forte	1.1	1.2	686	744
Ouverte	Cercle	5.5	6.7	86.8	Faible	1.6	2.0	49	350
Fermé	Cercle	10	7.9	62.1	Forte	0.6	0.5	128	305

Tableau 3 : Comparaison des deux paysages

Ces deux paysages sont chacun caractéristiques des paysages existant en Bretagne : le site ouvert, caractéristique d'un paysage dont les parcelles ont été remembrées, possède un nombre restreint de parcelles agricoles et de couverts semi naturel mais ces parcelles ont une surface plus importante, à l'inverse du deuxième paysage qui est qualifié de bocager. La réduction d'échelle aux cercles accentue les différences, notamment au niveau de la proportion de couverts semi-naturels et de surface des parcelles.

C'est à partir de ces deux paysages que nous allons baser notre étude.

c. Démarche d'étude

i. Echelles et variables calculées

Les travaux menés dans la validation de la partie écologique du modèle AGRICONNECT ont montré l'existence d'un lien très fort entre structure et composition du paysage agricole. Plus précisément, l'étude qui a porté sur l'abondance de la population de carabes des cultures de maïs dans le paysage a mis en évidence l'influence significative du nombre de pixel en maïs dans un voisinage de 500 m autour de chaque point dans le paysage : la communauté étudiée était plus abondante dans les milieux où la surface en maïs présente à proximité était forte, cette culture représentant un habitat et un abri naturel pour ces espèces.

Les deux paysages étudiés ont été sélectionnés par l'équipe SAD Paysage. Le premier site présente une maille bocagère faible tandis que le deuxième site possède une maille bocagère plus dense.

L'étude complète des paysages se réalise à deux échelles spatiales :

- L'échelle du territoire global afin de cerner l'évolution complète du paysage. Cette évolution est étudiée à travers l'évolution de deux indices : la surface de cultures annuelle sur le site.
- Une échelle plus restreinte afin d'étudier la métrique paysagère. Cette restriction de l'analyse a été décidée par les écologues du projet à cause du protocole d'étude élaboré pour l'étude des métriques. La génération des paysages par le modèle impose

que chaque élément du territoire soit précisément cartographié. Une digitalisation des sites a donc été réalisée sur des territoires de 1km² au centre des paysages.

ii. Etude de l'évolution de la mosaïque agricole et de la métrique paysagère : démarche statistique

Nous souhaitons caractériser l'évolution spatiale et temporelle de la mosaïque agricole. Les paysages seront étudiés suivant les décisions d'assolement prises par les exploitants agricoles des paysages, les soles de chacune des cultures ainsi que la valeur de la métrique d'intérêt. Nous considérons les soles ramenées à la SAU de chaque territoire afin de pouvoir comparer les paysages. Trois effets ont été étudiés, à savoir l'année d'étude, les soles pratiquées et le type de paysage considéré. Le test de ces effets a été réalisé par l'intermédiaire de modèles linéaires généralisées. Avec l'usage de variables continues, nous avons utilisé une distribution gaussienne.

De ce modèle linéaire, nous avons réalisé une sélection de modèles de type «Top down » en utilisant le critère d'Akaike. Ce critère est une mesure de la qualité du modèle sachant que plus le critère est faible, plus fiable sera le modèle.

La métrique paysagère a été calculée à l'aide du logiciel d'analyses spatiales Chloé2012 développé par l'équipe SAD Paysage. En chaque point du cercle d'analyse considéré, l'algorithme observe les valeurs prises par les pixels dans un voisinage circulaire de 500m de rayon (cf Annexe 1).

5. Mise en œuvre des traitements et démarche globale

La mise en œuvre de la démarche de validation ainsi que les traitements des paysages agricoles simulés ont fait l'objet d'un développement informatique. Cette section présente les réalisations algorithmiques menées lors du stage. L'application de la démarche de validation précédemment décrite nécessite le reparamétrage des bases de règles et éventuellement des bases de connaissances si de nouvelles informations nous parviennent lors des interviews de validation. À chaque paramétrage, une nouvelle analyse des décisions d'assolement par l'intermédiaire des descripteurs est nécessaire. L'analyse a donc été implémentée sous la forme de scripts informatiques.

Deux types de descripteurs sont calculés au cours de l'étude, correspondant aux deux types de sorties possibles par le modèle décisionnel:

- Calculs de descripteurs agronomiques servant à la constitution des dossiers.
- Calculs des descripteurs paysagers.

Nous allons aborder l'implémentation de chaque cas.

a. Implémentation des descripteurs des règles agronomiques

Cinq descripteurs font référence aux règles agronomiques spécifique à chaque culture, à savoir le nombre d'occurrence, le délai de retour du couvert, le nombre de répétitions, la durée d'implantation ainsi que la proportion de couples précédents-suivants. Ces descripteurs ont été calculés à partir de la sortie csv¹ concernant les rotations culturales sur l'ensemble de la durée d'étude indiquée par l'utilisateur et ce pour chaque parcelle (exemple tableau 4).

Année			1	2	3	4	5
Simulation	Bloc cultural	Numéro parcelle					
1	1	1	O	C	B	O	C
1	2	2	B	O	M	B	M
2	1	1	O	C	B	M	C
2	2	2	B	M	M	B	M

Tableau 4 : Deux décisions d'assolement

Au travers de ces descripteurs, trois études sont réalisées sur les rotations culturales, nécessitant trois méthodes algorithmiques différentes à employer (dont la démarche algorithmique est en annexe 4) :

- Une étude de l'occurrence de chaque culture. Il s'agit pour cette analyse de « compter » pour chaque couvert le nombre d'occurrence dans la succession pour chaque parcelle.
- Une analyse temporelle de l'apparition des couverts. Il s'agit ici aussi de « compter » pour chaque couvert la durée séparant chaque apparition.
- Une analyse par couple des couverts. Il s'agit de recenser l'ensemble des couples possibles et de les décompter dans les rotations pratiquées.

À l'aide des scripts, nous pouvons étudier les décisions d'assolement produites par le modèle décisionnel à deux échelles agronomiques différentes :

- Une première échelle, correspondant aux descripteurs par parcelle. À cette échelle, les descripteurs calculés précédemment concernent chaque parcelle de l'exploitation testée.
- Une deuxième échelle correspondant à la synthèse des informations de chaque parcelle par bloc de cultures. Sachant qu'un bloc de cultures est composé d'au moins une parcelle, une étude à cette échelle nous donne accès à un comportement plus global des descripteurs.

1 Une sortie CSV est un format de fichier de sortie structuré.

L'ensemble des algorithmes présentés ont été implémentés en Python. Chacun de ces algorithmes indépendants a été incorporé dans un programme principal qui automatise les traitements en ne changeant que certains paramètres (annexe 3).

b. Implémentation des descripteurs spatiaux

Deux descripteurs utilisent les couverts spatialisés, à savoir le calcul des surfaces annuelles des soles et la dispersion de celles-ci.

Deux méthodes de calculs ont été employées :

- À chaque pas de temps, on analyse l'ensemble des parcelles et on détermine quel couvert y a été « implanté ». Sachant que chaque parcelle possède une surface, nous récupérons la surface de toutes les parcelles possédant le couvert d'intérêt.
- Pour la dispersion des cultures, plusieurs opérations sont réalisées. Tout d'abord, on recense chacune des parcelles et on y identifie leur couvert. Puis, un calcul de distance entre les parcelles possédant le même couvert est réalisé : la distance prise en compte correspond à une distance moyenne. Enfin, Un deuxième calcul de distance est mis en place entre toutes les parcelles pouvant potentiellement recevoir la culture d'intérêt.

Ces calculs ont été implémentés dans le modèle d'Allocation de cultures en langage JAVA. La bibliothèque d'analyses SIG APILand a été utilisée (Boussard, 2008).

Après avoir présenté la méthode de notre travail, nous allons maintenant décrire les différents résultats obtenus.

Résultats :

Dans cette partie, nous allons exposer deux types de résultats, correspondant aux deux objectifs du programme Agriconnect, à savoir une application de la démarche de validation ainsi qu'une étude de l'évolution de la mosaïque agricole et d'une métrique paysagère parmi celles d'intérêt.

Une application de ce modèle concernera des paysages agricoles de Bretagne, région a été choisie notamment à cause des données disponibles et de la connaissance de l'équipe sur ces territoires. Les deux sites sont composés du territoire de dix exploitations agricoles.

1. Mise en œuvre de la méthode de validation : exemple des cas 11 et 6.

Pour illustrer la démarche de validation du module Allocation de cultures du modèle Agriconnect, nous allons décrire deux cas d'étude correspondant aux deux types d'exploitations agricoles pris en compte dans le modèle, à savoir le cas de l'agriculteur 11 en élevage « porcin spécialisé » et l'agriculteur 6 en exploitation « laitière ».

a. Présentation des cas 11 et 6

J'ai choisi d'aborder la description de ces exploitants agricoles dans ce rapport afin d'illustrer la mise en œuvre complète de la démarche de validation du modèle. Il s'agit de la première étape du travail de modélisation. Elle a été réalisée avant le début de mon stage mais il est important d'avoir ces éléments présentés au sein de ce rapport afin d'illustrer l'ensemble de la démarche de modélisation.

Ces deux cas d'exploitation ont été choisis i/ pour être représentatif de deux systèmes de production et de gestion de l'assolement bien différenciés et ii/ pour leur fonctionnement jugé représentatif des exploitations de leurs types :

- L'exploitation 11 est une exploitation porcine spécialisée ayant de larges surfaces destinées à la vente (blé, orge) mais aussi des contraintes liées à la gestion de ses effluents d'élevage (mise en place de colza pour sa capacité à valoriser le lisier tôt en saison).
- L'exploitation 6 est une exploitation laitière où l'alimentation des vaches repose à la fois sur de l'herbe pâturée et sur de l'ensilage de maïs (50% de la SFP en maïs), système fourrager fortement présent en Bretagne. Un autre critère de choix fut notamment la réactivité de ces agriculteurs à nos sollicitations d'interview.

Nous allons à présent décrire les deux cas suivant la démarche établie dans la partie Matériel et Méthode et en exposer les conclusions.

i. Présentation des sites d'étude

Les deux exploitations sont deux SCEA (société civile d'exploitation agricole) situées en Ille et Vilaine. Plus précisément, le territoire de l'exploitation porcine 11 est situé dans le sud-est du département à Martigné-Ferchaud tandis que la majorité du parcellaire de l'exploitation 6 ainsi que son centre d'exploitation est situé à l'est de Rennes, à Chateaubourg :

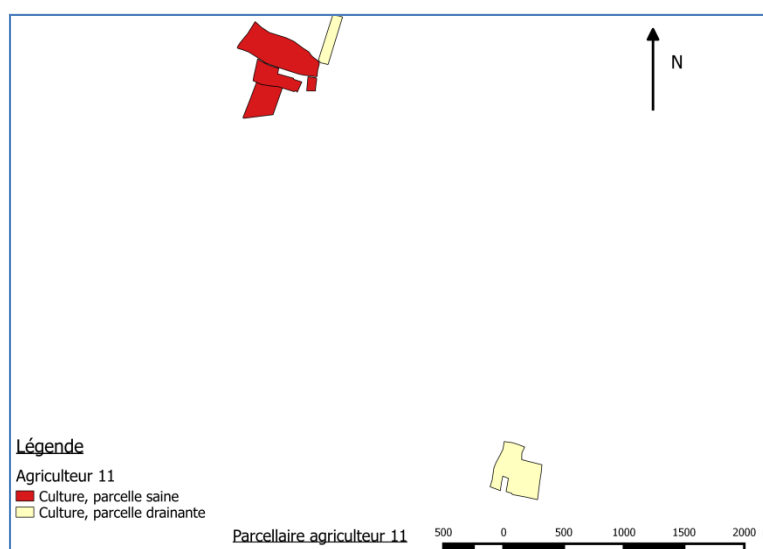


Figure 7 : Parcellaire exploitation 11

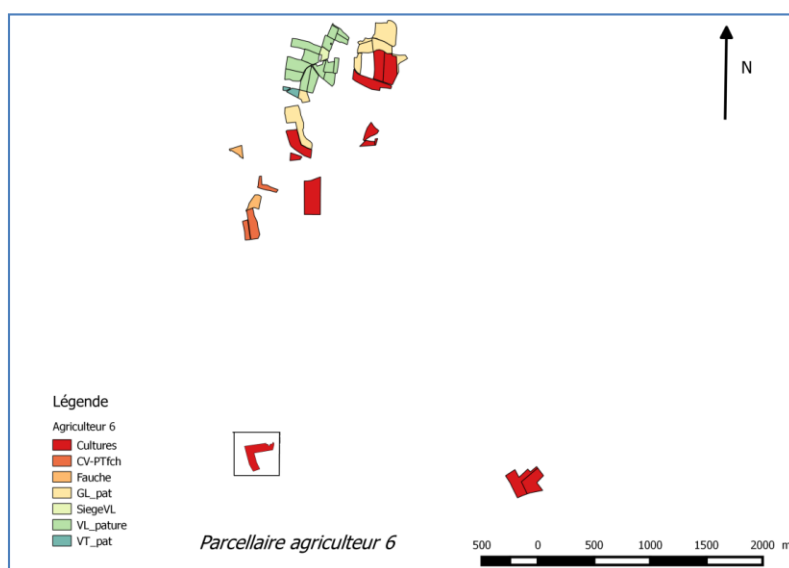


Figure 8 : Parcellaire exploitation 6

Malgré une surface agricole utile (SAU) proche pour les deux cas (44 ha pour le cas porcin et 61 ha pour le cas laitier), les deux cas ont une organisation au niveau du parcellaire très différente :

- L'agriculteur porcin possède 6 parcelles groupées autour de son centre d'exploitation contre 34 parcelles pour l'exploitant laitier dont certaines sont distantes de près de 20 km du siège d'exploitation.
- Concernant la surface des parcelles, nous avons deux cas de figures très différents (figure 9)

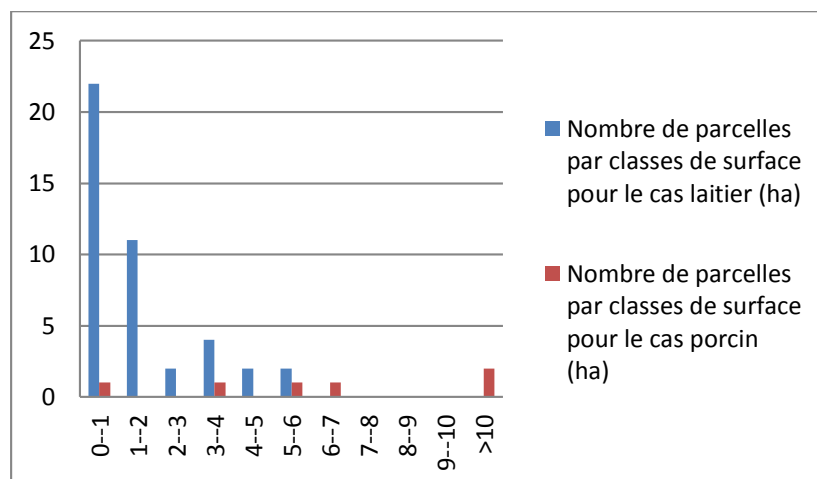


Figure 9 : Classement par intervalle de surface des parcelles des deux cas

Le parcellaire de l'exploitant laitier se caractérise par son nombre important de parcelles de petites tailles : plus de 50% des parcelles font moins de 1 ha et sa plus grande parcelle fait entre 5.3 ha. A l'inverse, le parcellaire de l'exploitant porcin est composé de parcelles ayant des surfaces plus hétéroclites et dont deux font plus de 10ha.

ii. Présentation des bases de connaissances

Ces disparités entre parcellaires contribuent, en plus du système de production, à des fonctionnements différenciés que nous allons expliciter.

Afin de décrire la pédologie des différents sites, nous nous appuierons sur les cartes pédologiques produites par sols de Bretagne dont des extraits sont placés en annexe 2.

➤ Cas exploitation porcine

Les soles cultivées sur l'exploitation porcine sont le blé, le maïs, l'orge et le colza. De ces quatre cultures, le blé ainsi que le colza sont les cultures à forte valeur marchande.

L'implantation de colza dans les rotations répond aussi à la volonté de l'agriculteur de pouvoir épandre plus facilement.

Le parcellaire précédemment décrit est situé sur une même couverture pédologique, à savoir une couverture de schistes tendres et de grès. Cependant, certaines parcelles ont de fortes propriétés drainantes. Ces dernières sont alors exclues de la zone de culture du colza.

➤ Cas exploitation laitière

Dans ce cas, l'exploitant compose ses rotations avec 5 cultures, à savoir : le maïs, le blé, les Prairies type Ray-grass-trèfle blanc (RGATB), la luzerne et la fétuque. Ce dernier complète son assolement avec des prairies permanentes.

Sur ces 6 cultures, quatre sont des cultures fourragères. Dans les rotations, l'agriculteur privilégie les cultures de ce dernier type afin de réduire les charges liées au poste de nourriture de l'élevage laitier. L'organisation de son parcellaire lui permet de faire pâturer ses vaches sur les parcelles à proximité de son bâtiment et celles-ci ont donc vocation à être régulièrement en prairie.

iii. Présentation des bases de règles

Les deux exploitations possèdent des parcellaires qui les distinguent nettement. A partir de ces configurations et de leurs objectifs de production, des décisions d'assolement ont été prises.

➤ Cas agriculteur porcin

En reformulant les informations de l'interview, nous obtenons une description des attributs de la base de règles, attributs résumés ci-dessous (tableau 5)

Couverts				
Règles agronomiques	Colza	Blé	Maïs	Orge
Surface minimale (ha)(% de la SAU)	6(14%)	8(18%)	3(7%)	6(14%)
Délai de retour minimal (an)	3	3	3	3
Nombre de répétitions maximales	0	1	1	0
Durée d'implantation maximale (an)	0	0	0	0
Successeur autorisé	Blé	Blé, Maïs, Orge, Colza	Blé, Maïs	Maïs, Colza
Contraintes agronomiques ?	Oui, interdit si sol drainant	Non	Non	Non

Tableau 5 : Synthèse des attributs de la base de règles

Dans le cas de cette exploitation, une contrainte agronomique a été notée : sur les sols drainants, l'implantation de colza est interdite.

Cette contrainte entraîne la création de deux zones culturales, 0 et 1 (figure 7). La première zone culturale est apte à recevoir l'ensemble des cultures tandis que la deuxième zone ne peut recevoir de colza. Les autres règles agronomiques sont similaires sur toutes les parcelles de l'exploitation.

➤ Cas agriculteur laitier

De même que pour le cas porcin, une reformulation des règles agronomiques, une liste d'attributs a pu être produite tableau 6:

<u>Couverts</u>							Groupe
<u>Règles agronomiques</u>	Blé	Luzerne	Maïs	Prairie RGATB	Fétuque	Prairie	Herbe
Surface minimale (ha) (% de la SAU)	5(8%)	2.8(4.6%)	20(33%)	10(16%)			20(33%)
Délai de retour minimal (an)	1	1	1	1	1		
Nombre de répétitions minimales	0	0	1	0			
Nombre de répétitions maximales	0	0	1	0			
Durée d'implantation minimale (an)	0	3	0	5	10		
Durée d'implantation maximale (an)	0	10	0	7	10		
Successeur autorisé	F,L,M	B,M Luzerne	B,L, RGATB	B,M	B,F	Prairie	

Tableau 6: Description de la base de règles du cas laitier

L'agriculteur se fixe une surface minimale de cultures fourragères à implanter chaque année. Les cultures considérées du groupe « herbe » sont les prairies permanentes et les prairies RGATB.

Par choix (maïs, fétuque) ou par obligation (prairies permanentes), certaines parcelles sont en monoculture. La spécialisation de certaines parcelles organise le parcellaire en plusieurs zones culturales comme définit dans la figure 8. Trois blocs fonctionnels ont été définies, blocs qui correspondent à trois types de gestion : un bloc comprenant essentiellement surfaces en herbe pour le pâturage, un bloc mixte entre la production de céréales et la pâture et un bloc réservé aux cultures céréalières. Par rapport au cas porcin, l'exploitant s'autorise à laisser une culture « durer » plusieurs années sans la récolter. Les cultures concernées sont surtout celles qualifiées de « fourragères».

En utilisant les bases de connaissances et de règles, nous modélisons le fonctionnement des deux exploitations agricoles pour obtenir deux jeux de simulations. Nous allons à présent décrire la variabilité simulée pour chaque cas et les points à valider lors des interviews.

b. Analyse des solutions modélisées

Nous allons aborder dans cette partie l'étude de la variabilité des décisions d'assolement produites par le modèle.

Dans les deux cas, nous avons simulé des décisions d'assolement et effectuer les analyses des résultats sur 10 ans (cf Matériel et Méthodes chapitre 3/c/ii).

i. Analyse des assolements du cas porcin

Sur 4000 tentatives de simulations, nous avons pu obtenir 218 résultats d'assolement, soit 5% de succès pour le simulateur.

Soles et dispersion annuelles des cultures :

En appliquant les coefficients de la démarche d'analyse statistique d'analyse de la dispersion décrite page 13, nous obtenons une analyse de la variabilité de la sole et de la dispersion des cultures que nous avons résumées dans les figures 10 et 11.

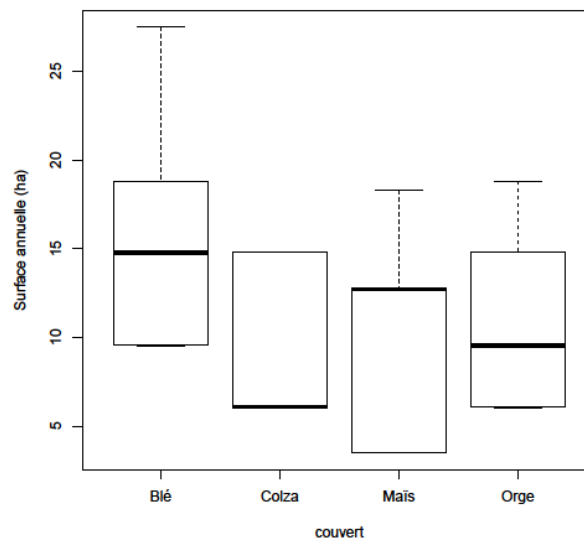


Figure 10 : Variabilité des couverts

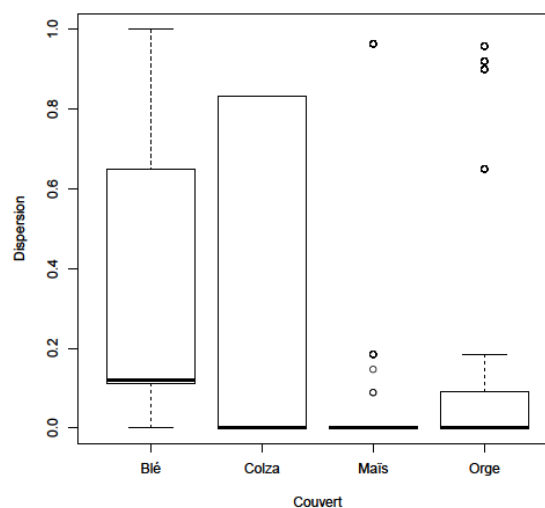


Figure 11 : Variabilité de la dispersion des couverts

Par analyse de ces descripteurs, deux types de couverts s'opposent, à savoir des couverts dont la sole annuelle et leurs positions varient comme le blé, l'orge et le maïs contre un couvert « statique » sur l'exploitation comme le colza (et ce, quelque soit l'année ou l'assolement étudié). Le colza et le maïs sont deux cultures avec une faible variabilité au niveau de la dispersion par rapport au blé, ce qui suppose qu'elles occupent préférentiellement les mêmes parcelles quelque soit les années et les simulations. On constate que la culture la plus pratiquée par l'exploitant est la culture de blé avec une sole annuelle médiane de 15 ha. L'amplitude de la surface de ce couvert est de 20 ha annuellement, ce qui correspond à une proportion de SAU annuelle occupée comprise entre 23 et 68%. L'orge présente une amplitude de sole annuelle plus faible comprise entre 14 et 40% de la SAU avec une sole médiane de 10ha. Enfin, la sole de maïs est une culture présentant une évolution particulière dans l'exploitation : elle présente une sole annuelle minimale très basse (3 ha, soit moins de 10 % de la SAU) mais une sole médiane assez haute (13 ha).

Constitution des dossiers:

De l'étude globale des descripteurs, nous retenons certains critères nous permettant de classer des successions simulées en cas « fréquents » et « peu fréquents ».

➤ Cas « fréquents »

Sur l'ensemble des solutions d'assolement produites par le modèle, le colza apparaît toujours sur l'ensemble des parcelles de sa zone culturale et réapparaît dans les rotations agricoles tous les trois ans uniquement. De cette configuration, nous avons identifié un cas fréquent de successions sur les parcelles non drainées comme étant la séquence « Colza-Blé-Orge-Colza-... ». Cette configuration mène à l'obtention de deux surfaces en colza : 6 ha ou 15 ha, ce qui explique la faible variabilité observée sur la figure 10. Nous vérifierons que de telles contraintes existent.

Comme supposé avec l'analyse des dispersions, la culture de maïs n'apparaît fréquemment que sur les deux parcelles drainantes alors que sa zone culturale autorise une implantation sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation. La rotation type est « Blé Orge Maïs Maïs ».

➤ Cas « peu fréquents »

Sur les parcelles drainantes, la culture en maïs est dans certaines solutions surreprésentée avec l'implantation de cette culture 8 années sur 10.

Dans 5 % des cas, nous obtenons des soles en blé de 29 ha, ce qui représente 66% de la SAU monopolisée par une culture. Ces configurations seront à valider avec l'agriculteur.

ii. Analyse des assolements du cas laitier

Sur 80000 simulations, nous avons obtenu un jeu de données contenant 20 individus (soit un taux de succès de 0.25%). Les variabilités des soles et dispersions annuelles sont synthétisés dans les figures 12 et 13 ci-dessous.

Soles et dispersions des couverts :

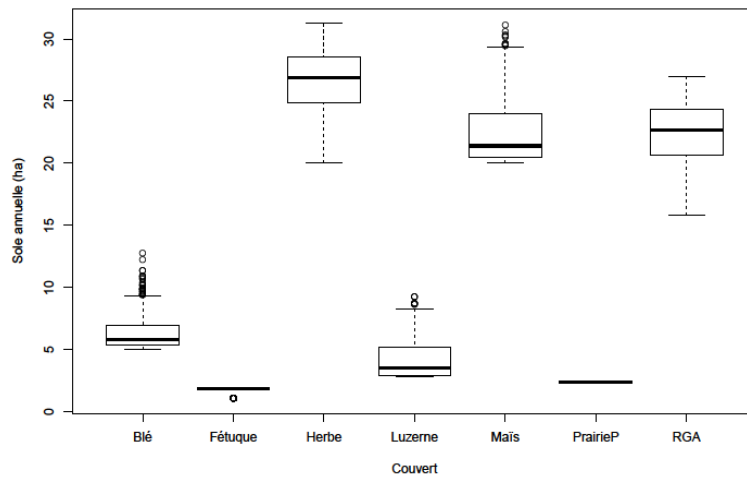


Figure 12 : Variabilité des soles (ha)

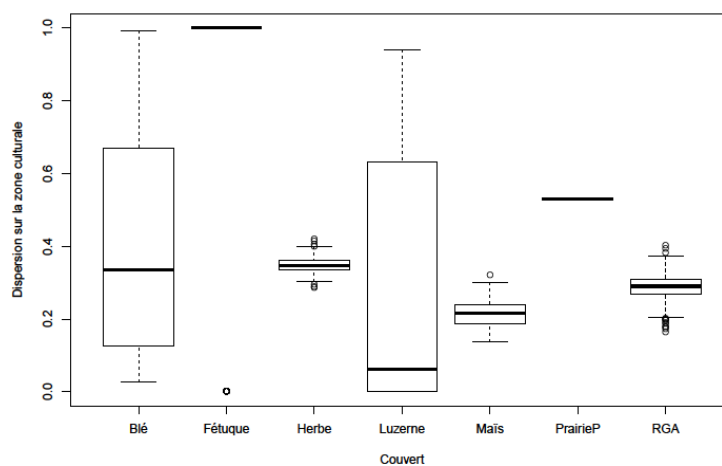


Figure 13 : Variabilité de la dispersion des couverts

Par rapport au cas précédent, les couverts ont un comportement plus complexe. Nous pouvons néanmoins noter que les cultures du type « fourragère », notamment les prairies, ont tendances à être que peu dispersées tandis que d'autres cultures comme le blé ou la luzerne ont moins de contraintes niveau localisation. En termes de soles, l'agriculteur possède une plus grande marge de manœuvre quant à l'implantation du fourrage par rapport aux cultures commerciales : l'amplitude des soles des cultures de type herbe est de 10 ha contre 5 ha pour le blé.

Constitution des dossiers :

De l'étude globale des assolements proposés, nous avons retenu certains critères à valider.

➤ Cas « fréquents »

L'étude des dispersions montre que les différents types de prairies sont peu dispersés : une hypothèse à vérifier serait que le regroupement des pâtures réduit le travail à fournir pour changer les troupeaux de pâtures.

➤ Cas « peu fréquents »

En termes de contraintes, la forte dispersion de la luzerne et du blé imposent à l'exploitant une gestion particulière de ses terres. On suppose que l'exploitant n'a que peu de contraintes de dispersions pour ces cultures.

Par l'intermédiaire de ces dossiers, nous avons pris rendez-vous avec les agriculteurs afin de valider les résultats.

c. Retour sur l'interview de validation

Dans les deux cas, nous avons sollicité les exploitants agricoles des structures 11 et 6 pour leur soumettre les solutions d'assolement du modèle. Nous avons obtenu une interview en vis-à-vis et une interview téléphonique respectivement avec le cas 11 et 6.

i. Interview exploitant 11

L'agriculteur a pu se prononcer sur l'ensemble des cas présentés. Les cas fréquents ont été validés : l'agriculteur adopte pour ses parcelles une rotation fixe Colza-Blé-Orge. De même, l'implantation de maïs est volontairement restreinte à certaines parcelles. Ces deux constats apparaissaient de manière récurrente dans les solutions d'assolement. Le comportement global du modèle est donc raisonnable du point de vue de cette exploitation.

Concernant les cas « peu fréquents », certains, comme la forte proportion de blé, ont été jugés comme « possible » car l'exploitant accorde une grande priorité à ce couvert. Comme suggéré dans le modèle, les décisions d'assolements qui avaient été contraintes par la régularité du motif de successeur « Colza-Blé-Orge » montrent que le colza est aussi une culture centrale dans les décisions d'assolement. Cependant, l'ensemble du dossier n'a pas pu être validé avec le paramétrage actuel : contrairement au paramétrage actuel, l'agriculteur ne souhaite pas inclure des répétitions de cultures dans ses décisions. De même, la culture d'orge n'est pas définie comme une culture principale par l'agriculteur, qui ne souhaite donc pas l'implanter sur la parcelle éloignée du siège (figure 11).

L'interview a mis en évidence une gestion particulière de la parcelle dont la taille était inférieure à 1 ha : ce type de parcelles n'impactaient que peu la production totale de l'exploitation. Une autre contrainte non prise en compte dans le modèle comme les distances aux habitations impacte les zones culturales de l'exploitant : ce dernier ne peut épandre du

lisier sur les parcelles trop proches d'autres habitations et donc n'implante pas de colza sur ce type de parcelles.

Cette interview nous a donc permis de valider le comportement global du modèle décisionnel. Certains paramétrages ont été rejetés par l'exploitant tandis que des décisions de gestion n'avaient pas pu être relevées lors de l'interview préliminaire.

ii. Interview exploitant 6

L'interview a duré 30 minutes. Contrairement au cas 11, l'exploitant a rejeté certains cas jugés par le modèle comme « fréquents » : sur les parcelles accueillant des prairies RGATB ainsi que du maïs, aucune répétition n'est possible. Cette contrainte modifie les règles d'assolement dans la mesure où dans la majorité des cas, le maïs était répété.

Dans ce cas, le faible nombre de solutions proposées par le modèle avec les règles de décisions nous a amené à comparer le parcellaire tel que décrit par l'agriculteur lors de l'enquête préliminaire à celui observé dans différentes bases de données (RPG, photos aériennes). Cette comparaison a révélé des redécoupages possibles qui ont été confirmés par l'éleveur lors de l'entretien téléphonique.

Cependant, la disposition des cultures accredit l'hypothèse d'un groupement des cultures selon leurs objectifs, sachant que les prairies sont groupées pour limiter le déplacement des troupeaux

d. Reparamétrage et implémentation du modèle

Suite aux interviews, des paramétrages ont dû être modifiés pour s'approcher au mieux des choix d'assolement des agriculteurs.

Dans ces deux cas, nous avons pu aborder deux niveaux de modifications :

- Au niveau du jeu de règles, les nouvelles interviews ont mis en lumière certains paramètres dont l'implémentation ne correspondait pas à la réalité, telles les répétitions de cultures qui sont à limiter à certains cas.
- Au niveau de la base de connaissances, la prise en compte de la surface des parcelles se révèle être importante dans les choix d'assolements. Aussi, la reprise de la base de connaissances dans le cas de l'agriculteur laitier s'est révélée impérative.
- Au niveau du modèle, aucun constat n'a remis en cause les méthodes d'analyse des résultats.

Dans les deux cas qui ont été présentés, des modifications ont été apportées pour corriger le comportement du modèle.

De ces cycles de validation, le modèle se rapproche de plus en plus des décisions des agriculteurs et nous assure d'arriver à des paysages de plus en plus réalistes.

2. Analyses de l'impact des configurations de paysages sur l'évolution de la mosaïque agricole et de la métrique paysagère d'intérêt biologique

Des deux cas présentés dans la partie précédente, nous avons repris le fonctionnement de l'exploitation porcine que nous avons appliqué à l'ensemble des exploitations composant les paysages fermés et ouverts.

Des deux paysages, nous étudions les allocations de cultures de 25 simulations sur 10 ans. Les analyses présentées le seront à l'échelle du paysage et à celle du cercle central d'analyse.

a. Génération et paramétrages des paysages

Afin de générer les paysages, nous avons basé le paramétrage de chacune des exploitations agricoles des deux paysages sur celui du cas porcin dont nous avons présenté la démarche dans la partie précédente.

Nous avons montré avec nos résultats que les contraintes de dispersion n'étaient pas significatives dans l'élaboration des décisions d'assolement. Cette variable ne sera donc pas étudiée. A la différence des contraintes de surfaces parcellaires qui restreignent l'emploi de la mécanisation. Les parcelles dont la surface est inférieure à 0.5 ha ont été jugées comme difficilement valorisables par un couvert cultural et ont été par conséquent implantées en prairies permanentes. De même, les parcelles hydromorphes sont considérées comme drainantes et n'auront pas de colza d'implanté. Chaque année, les surfaces de blé et de colza couvrent au minimum 10% de la SAU disponible sur l'exploitation contre 5% pour le maïs et l'orge. Les parcelles drainantes n'auront pas de colza d'implanter.

De ces paramétrages, nous obtenons des paysages agricoles du type « porcin spécialisé » que nous allons décrire.

b. Analyse statistique des soles des paysages

L'évolution des proportions de cultures de chaque site a été étudiée (figure 14). Le paramétrage des surfaces minimales de chaque sole a été décidé en classant les couverts par ordre de priorité : les cultures commerciales comme le blé et le colza sont favorisées par rapport aux autres cultures comme le maïs ou l'orge. Chaque année, les surfaces de blé et de colza couvrent au minimum 10% de la SAU disponible sur l'exploitation contre 5% pour le maïs et l'orge. Les parcelles drainantes n'auront pas de colza d'implanté. Dans le cas de petites exploitations un minimum de 5ha de chaque couvert a été défini.

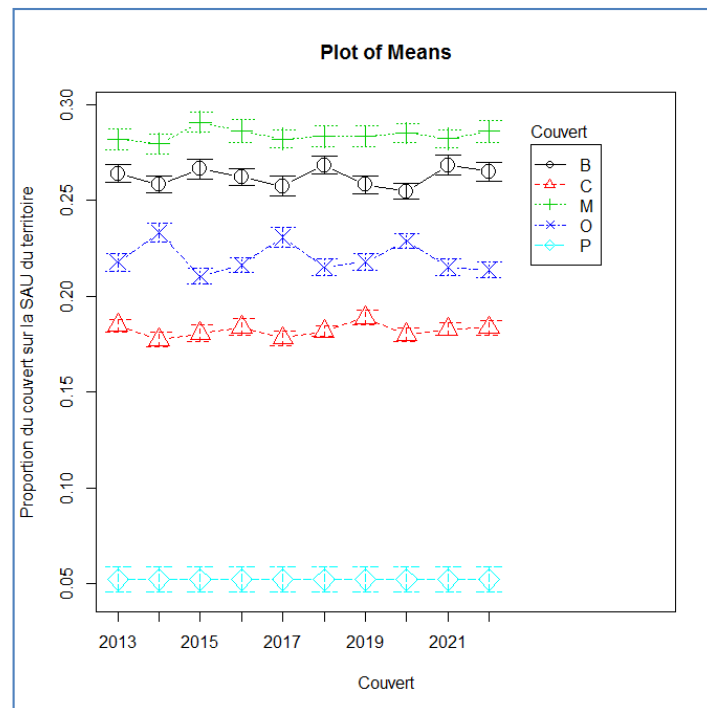


Figure 14 : Représentation de l'évolution des surfaces des couverts selon les années pour l'ensemble des simulations

Pour l'ensemble des paysages, les couverts ne varient que peu entre les simulations : les proportions de chaque couvert varient avec une certaine amplitude autour d'une moyenne. Ces résultats suggèrent une certaine homogénéité des mosaïques agricoles au cours du temps.

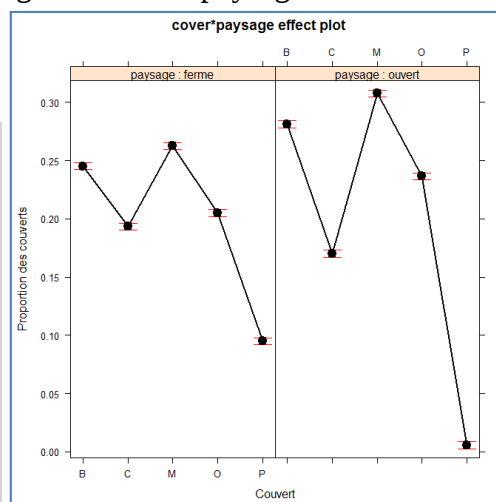
Le modèle linéaire généralisé accrédite ces résultats :

Proportion en couvert = année*paysage + simulation*paysage + simulation*paysage + paysage

Meilleur modèle :

Proportion en couvert ~ couvert + paysage + couvert : paysage

Variable	Coefficient	P_value
Intersect	0.25	<2e-16
Colza	-0.05	<2e-16
Mais	0.017	9.40E-16
Orge	-0.04	<2e-16
Prairie	-0.15	<2e-16
Paysage ouvert	0.04	2.00E-09
Colza:Ouvert	-0.059	<2e-16
Mais:Ouvert	0.009	0.0041
Orge:Ouvert	-0.0044	0.16



Critère d'Akaike = -11100

Figure 15 : Soles des cultures selon le paysage

De ces analyses, le meilleur modèle est celui prenant en compte les interactions entre couverts et paysage. Chaque territoire a donc un fonctionnement propre. De plus, nous avons la confirmation que chaque couvert avait un comportement distinct suivant le paysage dans lequel il se trouvait : les soles des cultures de colza et de prairies sont plus importantes dans le paysage bocager, tandis que les autres cultures sont plus implantées dans le territoire ouvert. Ces variations de soles sont liées aux zones culturales qui varient suivant les contraintes pédologiques: 33% des parcelles comptant pour la SAU ont une surface inférieure à 0.5 ha pour le site fermé contre 7.1% pour le site ouvert, soit respectivement 9.4% et 0.5% de la SAU des sites. De même, les parcelles drainées représentent 2% de la SAU pour le paysage fermé contre 12% pour le site ouvert. Les contraintes pédologiques et agronomiques donneront des évolutions différentes suivant le type de site : plus la maille bocagère est importante, plus la proportion de surfaces en prairies permanentes sera élevée.

Nous allons étudier les résultats au niveau du cercle d'analyse.

c. Analyse du paysage contenu dans le cercle d'analyse

L'objet de cette étude est d'analyser l'évolution des paysages à une échelle plus réduite et déterminer l'effet de leurs structures sur le nombre de pixel en maïs à 500m

i. Analyse des soles du cercle d'analyse

Une analyse similaire a été menée sur les surfaces à l'intérieur du cercle d'analyse (figure 16).

Proportion en couvert = année*paysage + simulation*paysage + simulation*paysage + paysage

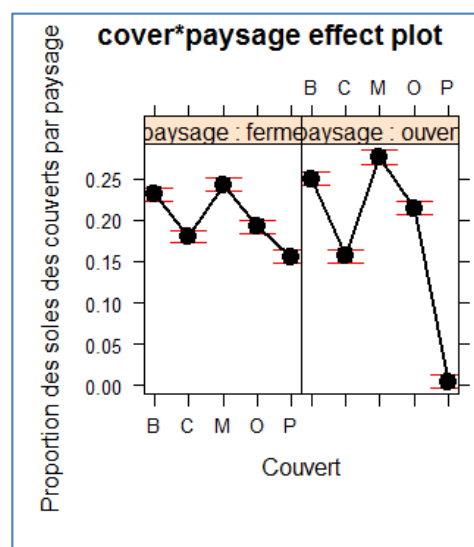
Meilleur modèle :

Proportion en couvert ~ couvert + paysage + couvert : paysage

Variables	Coefficient	P_value
intersect	0.23	<2e-16
Colza	-0.05	<2e-16
Mais	0.01	0.04
Orge	-0.04	8.90E-12
Prairie	-0.07	<2e-16
paysage ouvert	0.02	0.22
Colza:ouvert	-0.04	2.07E-07
Mais:ouvert	0.01	0.08
Orge: ouvert	0.04	0.6

Critère d'Akaike = -6395.95

Figure 16 : Effet du paysage sur la proportion des couverts par paysage



La prise en compte d'un territoire plus petit semble réduire l'impact du paysage dont l'effet n'est plus significatif mais dont la variable est encore présente dans l'équation du meilleur modèle. Au niveau de ce cercle, les deux paysages se ressemblent plus qu'au niveau global en termes de proportions de couverts pratiqués. Les contraintes agronomiques sont présentes cependant avec une sole en prairie permanente forte et une sole en colza faible pour le paysage fermé que pour le paysage ouvert. Deux agriculteurs possédant des exploitations aux caractéristiques similaires dans les deux paysages auront bien deux comportements différents.

Nous allons à présent étudier l'effet du type de paysages sur la métrique de nombre de pixel en maïs à 500m.

ii. Etude de la métrique

Un effet du paysage a été observé sur l'évolution de la métrique paysagère (figure 17).

Variable	Coefficient	P_value
Intercept	1560	<2e-16
Paysage ouvert	669.18	<2e-16

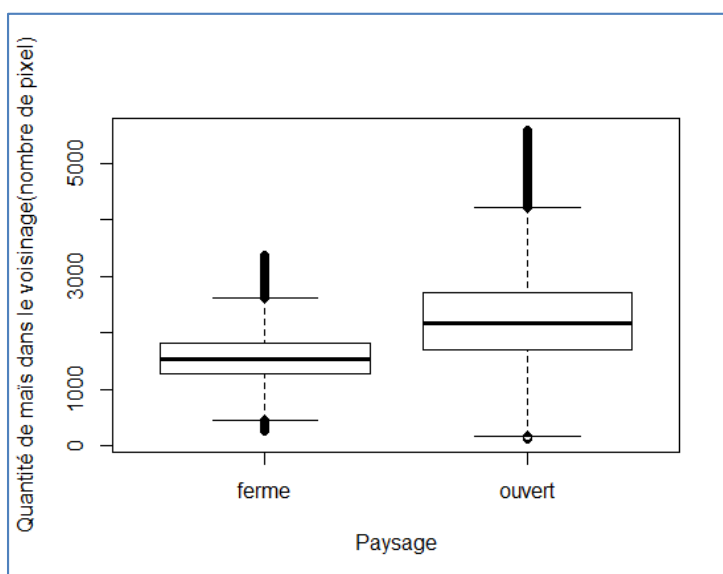


Figure 17 : Effet du paysage sur la variabilité de la métrique

Les différences observées sur la métrique d'intérêt entre les deux paysages se situent à deux niveaux : d'une part la quantité de pixel en maïs autour de chaque point du cercle d'analyse est plus forte dans le paysage ouvert que dans le paysage fermé ($p < 0.0001$) et d'autre part la variabilité de cette métrique est aussi plus importante que dans un paysage fermé (cette métrique varie de 500 à 3600 pour un paysage fermé contre une variation comprise entre 200 et 5400 pour le paysage ouvert) .

De plus, nous constatons que selon le paysage étudié, les quantités maximales en maïs autour de chaque point (c'est à dire la valeur que prendrait l'indicateur sur toutes les parcelles qui le peuvent étaient en maïs) sont différentes (moyennes X et Y) et le potentiel atteint effectivement lors des simulations n'est jamais égal au potentiel maximum et il est différent entre le paysage fermé et le paysage ouvert (figure 18).

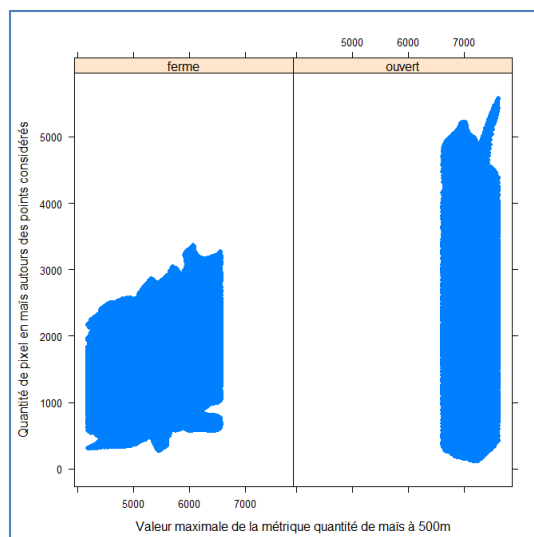


Figure 18 : Quantité de pixels en maïs en fonction de la quantité de pixels de sa zone culturale

Nous avons formulé quelques hypothèses pour expliquer les différences observées entre les deux paysages, mais certaines n'ont pu être testées.

La différence de valeur de l'indicateur dans les deux paysages :

- La surface de la zone culturale de maïs et le nombre de parcelles.

Dans un paysage, la surface disponible pour le maïs est corrélée positivement à la quantité simulée de maïs.

Si les parcelles sont plus grandes, la surface allouée en maïs sera par construction du modèle plus importante aussi. En effet le modèle cherchant à allouer une quantité minimum de maïs dans le paysage, il a plus de chance d'en allouer beaucoup plus avec de grandes parcelles qu'avec de petites parcelles, lui permettant d'ajuster plus facilement les surfaces et donc d'avoir moins de maïs in fine.

La différence de ratio entre nombre de pixel en maïs simulé et nombre de pixel en maïs potentiel ("ratio M") :

- La quantité de maïs dans le paysage global

Plus il y a de maïs dans un paysage et plus on aura de chances d'avoir un ratio simulé/potentiel important. Le paysage ouvert a significativement plus de maïs que le paysage fermé (figure 16).

- Le nombre et la taille des parcelles

Le fait d'avoir des tailles de parcelles plus grandes et/ou moins de parcelles font qu'un paysage va avoir des valeurs extrêmes plus facilement. Le paysage ouvert ayant moins de parcelles et celles-ci étant plus grandes que dans le paysage fermé, les différences observées peuvent s'expliquer par ce phénomène.

- La métrique est influencée par le rapport entre la SAU du maïs disponible dans le cercle et celle dans le reste du paysage.

Plus le ratio surface culturale du maïs dans le cercle/surface culturale du maïs globale (pour les exploitations contribuant au cercle d'analyse) ("ratio E") est important et plus la probabilité d'avoir des valeurs extrême diminue. En effet le maïs ne représente en moyenne que X% de la SAU d'une exploitation. Si toutes les parcelles de l'exploitation sont dans le cercle d'analyse (ratio E= 1), alors le ratio M est forcément autour de la moyenne X. Au contraire si le ratio E est de 0,X, il y a la possibilité soit de n'avoir aucune parcelle en maïs dans la zone d'étude (ratio M=0) soit que toutes les parcelles soit en maïs (ratio M=1).

Afin d'étudier ces hypothèses, nous avons calculé pour chaque point du cercle d'analyse l'influence du nombre de parcelles de la zone culturale du maïs sur le nombre de pixel maximal en maïs dans un voisinage de 500m de rayon (figure19) et l'influence de la SAU disponible autour de chaque point sur le ratio M (figure 20).

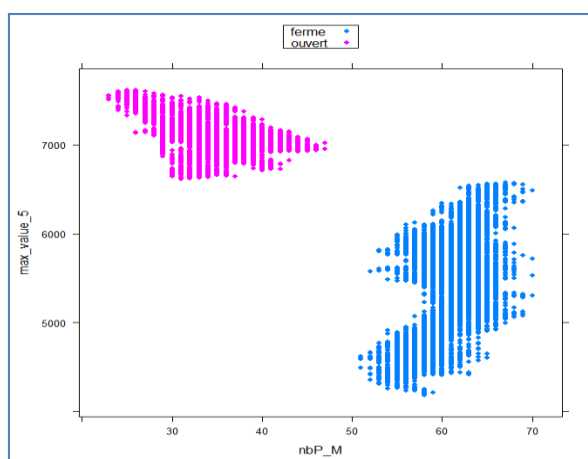


Figure 19 : Influence du nombre de parcelles de la zone culturale du maïs sur la quantité maximale de pixel en maïs

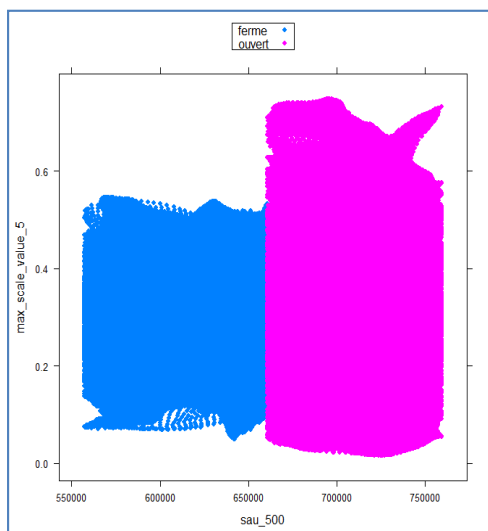


Figure 20: Effet de la variation de la SAU sur le potentiel réalisé en maïs dans un voisinage de 500m

Nous observons une différence de potentiel maximal en maïs entre le paysage ouvert et fermé mais, aucune corrélation ne semble se dégager entre la quantité maximale de pixel de la zone culturale du maïs et le nombre de parcelles au voisinage. La quantité de maïs ne semble pas être influencée par le nombre de parcelles pouvant accueillir potentiellement du maïs.

De même, nous obtenons figure 20 une corrélation positive entre la SAU disponible autour de chaque point et le potentiel du nombre de points en maïs réalisé dans les simulations dans un voisinage de 500 m, avec une pente plus importante dans un paysage ouvert.

L'augmentation de la surface disponible aux cultures n'influence pas le potentiel réalisé dans les deux paysages. Le nombre de parcelles disponible en maïs ainsi que la SAU disponible ne semblent pas expliquer la différence des potentiels réalisés entre les deux paysages.

Nous constatons cependant que les deux paysages sont différents en termes de qualité du parcellaire (cf Chapitre Résultats, p 40 2/b) : les surfaces en prairies permanentes représentent 9.4% de la SAU du paysage fermé.

La mosaïque agricole est une structure qui est, du point de vue de l'occupation des sols, dynamique spatialement et temporellement. Cependant, nos résultats montrent une certaine stabilité du fonctionnement de ce dernier : quelque soit les couverts implantés, ces derniers conservent une sole stable dans un paysage constitué d'exploitations spécialisés en élevage porcin. Cependant, les facteurs responsables de l'effet paysage n'ont pas pu être clairement défini. En effet, soit les résultats que nous obtenons sont non significatifs, soit les méthodologies pour tester les hypothèses et évaluer leurs importances relatives sont complexes à mettre en œuvre. Ces points seront repris en discussion.

Discussions:

Après avoir abordé les résultats obtenus, certaines remarques ont pu être formulées sur la méthode employée et certains résultats. Nous allons effectuer des retours sur la démarche de validation et notamment sur l'impact du « retour sur expérience » sur les expertises réalisées et la prise en compte des données de règles et de validation, puis nous allons discuter de la généralité des règles à implémenter dans le modèle

1. Apports de la démarche de « retour sur épreuve » pour la validation des cas d'assolement

La mise en œuvre dans le processus de validation d'une démarche de retour sur épreuve a permis d'améliorer sensiblement les résultats : comme évoqué lors de la validation de SoyBug (Beck, H. W, 1989), la construction du modèle et la validation en appliquant une démarche basée intégralement sur des discussions pour construire le modèle ne donne pas de résultats probants : lors de l'interview de validation, certaines erreurs de paramétrage ont été signalées. La description par les agriculteurs de l'ensemble de leurs décisions de conduites de cultures est difficile à mettre en pratique. A l'inverse, ceux-ci ont pu identifier rapidement les erreurs de paramétrages dans les dossiers de simulation proposés et pointer les erreurs. Il a été ensuite plus simple de discuter avec eux sur ces points afin de saisir correctement l'application des règles.

2. Validité des données

Dans la démarche en trois temps formulé par Rykiel (1996), nous n'avions pas jugé utile de vérifier avec l'agriculteur les règles agronomiques issues de la synthèse des enquêtes préliminaires. Cependant, il s'est révélé que les données de la base de connaissances n'étaient pas à jour : une vérification de l'occupation des sols grâce à l'outil Géoportail de l'IGN a mis à jour des redécoupages de grandes parcelles agricoles (figure 19). Les parcelles avaient donc des surfaces plus faibles et étaient plus nombreuses. Après modification de la base de connaissances, le taux de succès du modèle décisionnel augmentait exponentiellement : avec les mêmes règles passait de 1 chance sur 4000 à 1 chance sur 25 tentatives.

Cet agriculteur ajuste selon les années de tracé de certaines parcelles pour réaliser son objectif de production. Le redécoupage des parcellaires, qui n'a pas été pris en compte dans les règles du modèle AGRICONNECT, est une réalité comme démontré par Noémie Schaller dans le modèle DYSPALLOD (Schaller, 2011). La prise en compte de cette règle dans le modèle d'Allocation de cultures qui fonctionne sur l'hypothèse que les parcelles agricoles sont fixes permettrait de se rapprocher du comportement de l'agriculteur.

3. Généricité des règles agronomiques implémentées dans le modèle

Nous avons observé dans les deux exploitations que les agriculteurs suivaient des règles particulières et adaptées à leurs objectifs de production :

- l'exploitant 11 intègre du colza dans ses rotations afin de pouvoir épandre les effluents produits par son élevage. Ce dernier n'implante pas cette culture sur les parcelles drainées car celles-ci n'étaient pas adaptées. De plus, la proximité d'une parcelle agricole d'autres habitations remet en cause les opérations d'épandage. Sur cette parcelle, le colza n'est pas implanté.
- l'exploitant 6 gère ses décisions d'assolement afin d'obtenir une surface en herbe de 20 ha autour de son siège d'exploitation.

Ces nouvelles règles posent la question de l'intégration dans le modèle décisionnel de règles spécifiques. Deux solutions peuvent être admises. Une première solution consisterait en l'augmentation du nombre de variables descriptives des décisions agricoles et de la géométrie des parcelles afin de mieux intégrer les fonctionnements particuliers. Le modèle décisionnel DYSPALLOCC présenté dans les travaux de Noémie Schaller (2011) emploie 30 règles agronomiques décrivant autant des règles de successions culturales que des règles précisant le fonctionnement des parcelles variant en fonction de leurs géométries. La prise en compte de nombreuses règles permet de mieux intégrer des décisions plus orthodoxes de l'agriculteur mais alourdit le travail de paramétrage avec la mise en place de nouvelles enquêtes préliminaires. Une solution n'intégrant que les comportements communs à plusieurs exploitations peut aussi être formulée : dans le cas de l'agriculteur laitier, la décision d'implanter une surface minimale en herbe autour du siège d'exploitation est partagée avec de nombreuses exploitations laitières enquêtées par le SAD Paysage. Cette solution ne nous permettra pas de saisir la psyché complète de l'agriculteur, cependant la charge de travail concernant les enquêtes sera réduite en comparaison de la solution précédente. De plus, nos résultats ont montré que malgré que nous n'ayons pas pris en compte les comportements du cas 11 en compte, celui-ci a quand même validé le fonctionnement du modèle.

4. Paramétrage de la base de règles des exploitations des paysages

Le choix du paramétrage des exploitations des paysages est un exercice difficile, notamment pour le choix des surfaces minimales de couverts à implanter : en effet, nous cherchons à appliquer un paramétrage de règles spécifiques d'un cas à des exploitations différentes en termes de SAU. Or, à un paramétrage correspond une logique : l'application de la base de règles de l'exploitation 11 à l'ensemble des exploitations avait abouti à la génération de paysages agricoles ne respectant pas la logique de conduite de cultures du cas validé. Afin de reproduire cette logique, un paramétrage des soles en attribuant une surface plus importante en proportion de la SAU du cas considéré aux couverts jugés « importants » dans les décisions des agriculteurs : l'agriculteur 11 implante préférentiellement du blé et du colza tandis que le maïs et l'orge servent à diversifier les rotations.

5. Effet du paysage sur la métrique « quantité de maïs dans un voisinage de 500 m de rayon »

Comme abordé dans la partie Résultats, l'effet du paysage sur la métrique d'intérêt est complexe : le paysage porcin ouvert présente des valeurs de métriques à la fois plus importante et plus variable que le paysage fermé. Chaque paysage possède un potentiel réalisé différent et n'atteignant jamais 100%, c'est-à-dire qu'en aucun cas dans les deux paysages nous observons un point dont la quantité de maïs dans un voisinage de 500m égale une valeur correspondant à un cas où l'ensemble des pixels de la zone culturale du maïs du voisinage porte cette culture. Nous pouvons cependant formuler une autre hypothèse différente de celles exposées: le fonctionnement du modèle et la recherche de solutions peut influencer ces métriques. En effet, ce dernier suit une méthodologie précise dans la formulation des résultats : à la première année de simulations, les couverts sont placés aléatoirement sur leurs zones de cultures puis le modèle vérifie pour chaque couvert que la contrainte de surface minimale est respectée. Si jamais celle-ci ne l'est pas pour un couvert, le modèle va alors « implanter » le couvert déficitaire à la place d'un couvert « excédentaire » et va vérifier ensuite avec la base de règles. Ce fonctionnement permet l'existence d'un effet « seuil », l'allocation pour un couvert va s'arrêter dès que l'ajout de la nouvelle parcelle résout le problème des surfaces minimales (figure 22).

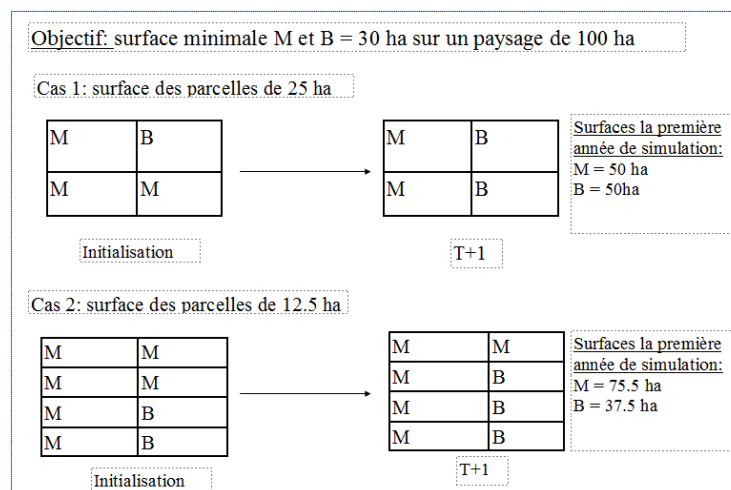


Figure 21 : Mécanisme d'allocation des couverts du modèle

Dans ce cas, les couverts sont placés au hasard mais avec des proportions identiques. Dans les deux cas, la culture de blé n'atteint pas la surface minimale. Au temps t+1, le modèle à réaffecter une parcelle en blé dans les deux cas. Cependant, un paysage ayant de grandes parcelles aura une sole en blé plus importante qu'un paysage ayant de petites parcelles. Cette différence au niveau de l'initialisation se conserve le long de l'analyse comme illustrer figure 14. Un paysage avec de grandes parcelles pourrait avoir un plus fort potentiel réalisé qu'un paysage contenant de petites parcelles. Le choix d'une méthode de recherche de solutions doit s'accompagner d'une méthodologie précise et cohérente vis-à-vis de nos objectifs.

Conclusion :

Comprendre l'organisation spatiale et temporelle d'un paysage dans l'optique d'étudier leurs impacts sur la biodiversité demande une bonne compréhension de l'évolution du fonctionnement des exploitations agricoles. A partir d'un modèle décisionnel d'Allocation de cultures, notre étude a eu pour objectif d'étudier l'effet des structures de paysages et de leurs évolutions sur la métrique paysagère « Quantité de maïs dans un voisinage de 500 m de rayon », métrique dont le rôle en tant que facteur explicatif de l'abondance et la richesse spécifique d'une espèce a été démontré par l'équipe INRA SAD Paysage en charge de l'étude écologique. La génération de paysages agricoles réalistes dans le contexte breton nécessitait l'élaboration d'une démarche de validation des décisions d'assolements produites par le modèle.

A l'issu de ce travail, la démarche de validation produite a permis de valider complètement le fonctionnement du modèle sur un cas d'exploitation en élevage porcin et de valider partiellement un deuxième cas en élevage laitier. L'automatisation du calcul des descripteurs des décisions d'assolement produits simulés nous a permis d'être réactifs quant aux remarques des experts sur le fonctionnement du modèle et d'implémenter rapidement des solutions pour ajuster le comportement du modèle à ceux des deux cas traités.

De l'étude des paysages générés après application des règles agronomiques et des logiques de fonctionnement du cas porcin validé aux exploitations du paysage, nous avons pu mettre en évidence une homogénéité de la dynamique temporelle du paysage avec des soles de cultures constantes au cours du temps sur l'ensemble du paysage. De plus, des éléments relatifs à la structure des paysages tels la forme des parcelles et leurs nombres ainsi que leurs propriétés agronomiques et pédologiques modifient significativement la dynamique du paysage. La structure du paysage influence significativement la métrique liée à l'abondance et la richesse spécifique des espèces étudiées : la structuration du paysage ouvert donne à la métrique une variabilité et une étendue plus importante que dans un cas bocager où celle-ci est plus stable. Ainsi, un paysage bocager sera considéré comme un paysage plus stable qu'un paysage ouvert. Cependant, les facteurs responsables précis de l'effet du paysage restent à démontrer.

Ces résultats sont des bases nécessaires à l'avancée du projet AGRICONNECT. Afin d'étudier l'effet de la structure du paysage, l'étude de paysages générés à partir de l'exploitation laitière en cours de validation devra être abordé. De nombreuses hypothèses devront être formulées pour le paramétrage d'un tel paysage, telles que la prise en compte de la logique de conduites de cultures d'un exploitant laitier. L'étude de la métrique sur ces paysages permettrait d'explorer l'impact de la disposition des couverts sur l'effet du paysage mis en évidence.

Bibliographie :

Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F., Papy, F., Brossier, J., & Dent, B. (1998). Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole: la constitution de systèmes de culture du Bassin Parisien.

Aubry C. (2007) La gestion technique des exploitations agricoles. Composante de la théorie agronomique, INPT, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Toulouse. pp. 101.

Bacic I., Rossiter D., Bregt A. (2006) Using spatial information to improve collective understanding of shared environmental problems at watershed level. *Landscape and Urban Planning* 77:54-66. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.01.005.

Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System dynamics review*, 12(3), 183-210.

Beck, H. W., Jones, P., & Jones, J. W. (1989). SOYBUG: An expert system for soybean insect pest management. *Agricultural systems*, 30(3), 269-286.

Bennett, A., Crooks, K. R. & Sanjayan, M. (2006) the future of connectivity conservation. IN Crooks, K. R. & Sanjayan, M. (Eds.) connectivity conservation. Cambridge, Cambridge university press.

Benton, T. G., Vickery, J. A., & Wilson, J. D. (2003). Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?. *Trends in Ecology & Evolution*, 18(4), 182-188.

Bianchi, F. J. J. A., Booij, C. J. H., & Tschamntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1595), 1715-1727.

Boussard, H. (2008). APILand: une librairie d'éléments constitutifs du paysage orientée objet. Principes et exemples de manipulation sous JAVA.

Dixon, W. J., & Massey, F. J. (1969). *Introduction to statistical analysis* (Vol. 344). New York: McGraw-Hill.

Fu, B. (1994). The spatial pattern analysis of agricultural landscape in the loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 15(2), 113-120.

Holling, C. S. (1978). Adaptive environmental assessment and management. *Adaptive environmental assessment and management*.

Jongman, R. H., Külvik, M., & Kristiansen, I. (2004). European ecological networks and greenways. *Landscape and urban planning*, 68(2), 305-319.

Maxime, F., Mollet, J. M., & Papy, F. (1995). Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures*, 4(5), 351-362.

Mayer, D. G., & Butler, D. G. (1993). Statistical validation. *Ecological modelling*, 68(1), 21-32.

Negoita, C. V. (1984). *Expert systems and fuzzy systems*. Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc.

Power, M. (1993). The predictive validation of ecological and environmental models. *Ecological modelling*, 68(1), 33-50.

Rykiel Jr, E. J. (1996). Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological modelling*, 90(3), 229-244.

Schaller N. (2011). Modélisation des décisions d'assolement des agriculteurs et de l'organisation spatiale des cultures dans les territoires de polyculture-élevage. Doctorat Sciences Agronomiques, AgroParisTech, 384 p

Sebillotte (1978). Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R. Acad. Agric. Fr., 78 :906-914

Sebillotte (1990). Système de culture, un concept opératoire pour l'agronomie . In Combe L et Picard D. (eds) : Les systèmes de de culture. Paris, INRA , coll Un point sur... : 165-196

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.

Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology letters*, 8(8), 857-874.

Velicer, W. F., Prochaska, J. O., Bellis, J. M., DiClemente, C. C., Rossi, J. S., Fava, J. L., & Steiger, J. H. (1993). An expert system intervention for smoking cessation. *Addictive behaviors*, 18(3), 269-290.

B. Lemerrier, M. Lacoste, L. Berthier, A.-L. Le Bris, C. Walter (2011). Estimation de l'hydromorphie des sols en Bretagne par modélisation,

Millennium Ecosystem Assessment
<http://www.maweb.org/fr/About.aspx>
Date de consultation : 19 Juin 2014

INSEE
<http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/exploitation-agricole.htm>
(maj) lundi 25 août 2014 16:55:26
Visite le 25 Aout 2014

Liste des annexes :

Annexe I: Principe de fonctionnement de l'analyse spatiale des cartes d'occupation des sols par fenêtres glissantes

Annexe II : Carte des pédopaysages d'Ille et Vilaine

Annexe III : Algorithme du programme principal automatisant les calculs des descripteurs

Annexe IV : Effet de la révision de la base de connaissances sur le cas 6

Annexe I : Principe de fonctionnement de l'analyse spatiale des cartes d'occupation des sols par fenêtres glissantes

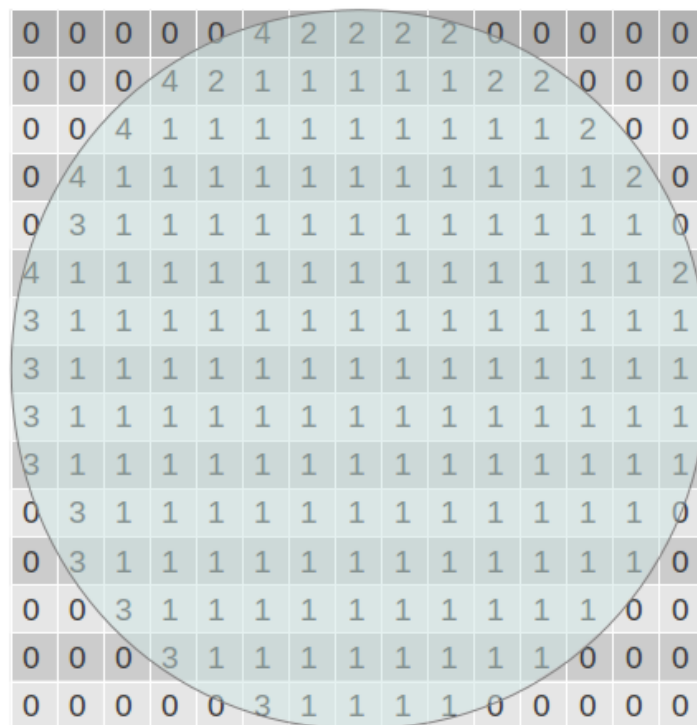
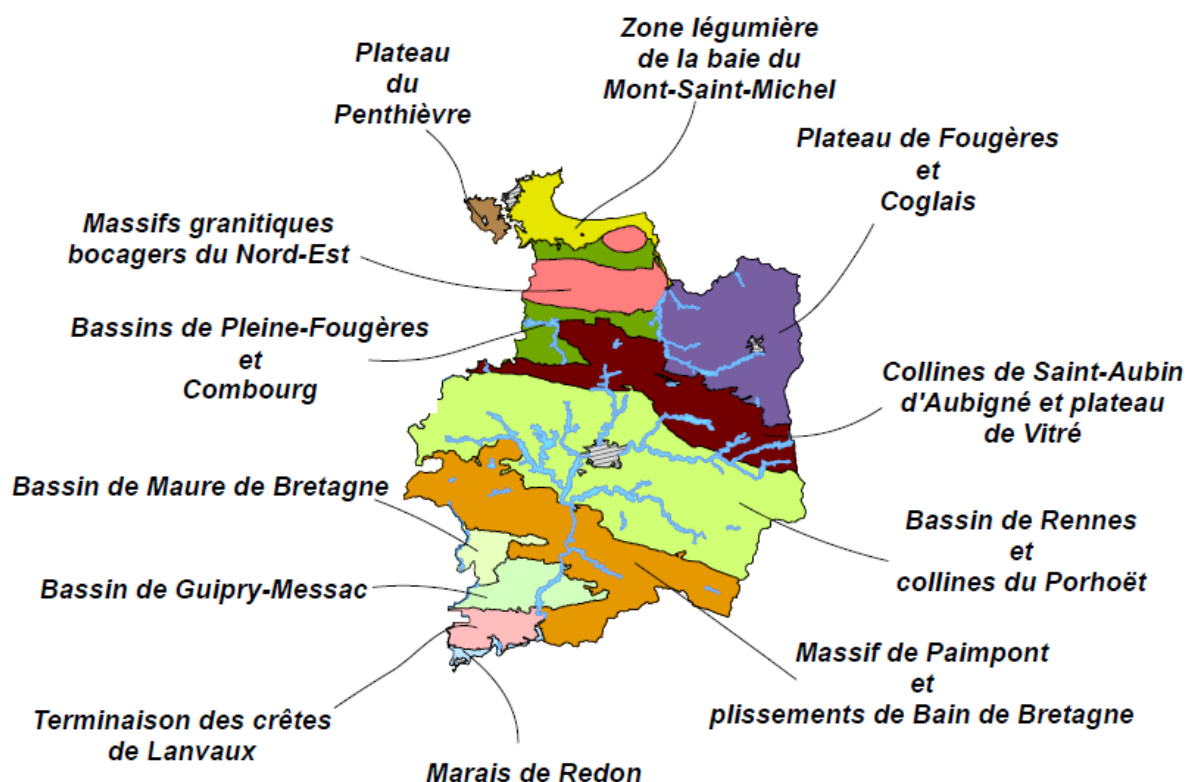


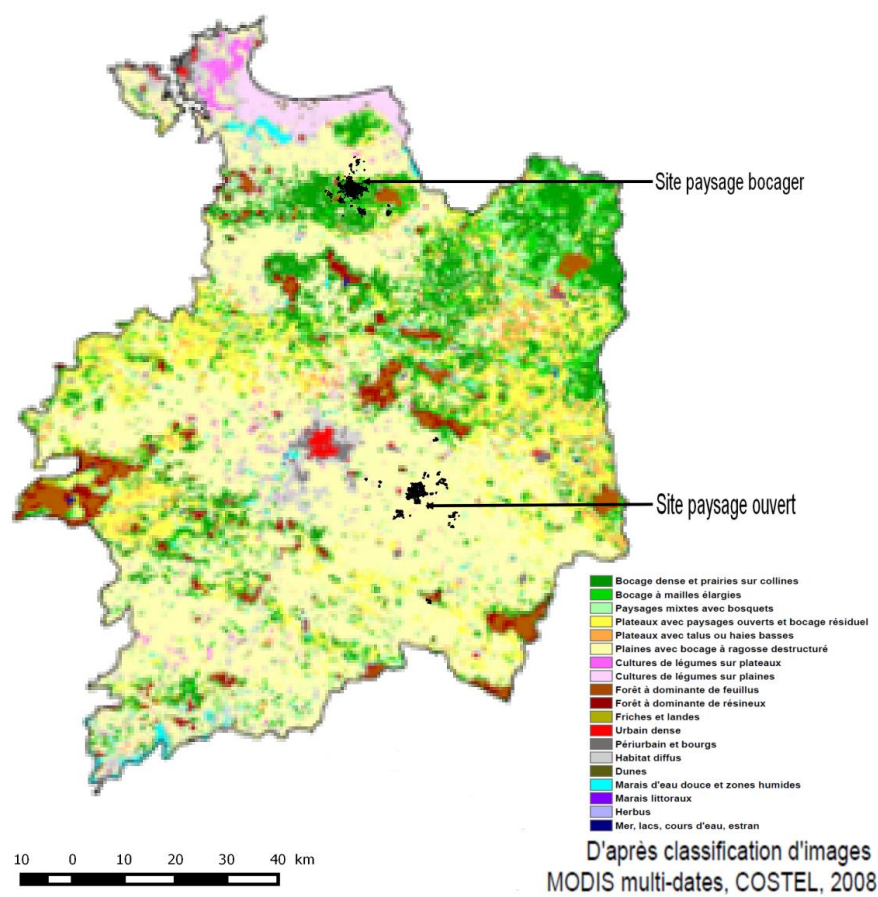
Figure 22 : Fenêtre glissante

Cette analyse permet d'étudier les caractéristiques du voisinage de chaque point contenu dans un buffer circulaire dont la taille est fixée par l'utilisateur.

ENTITES PHYSIOGRAPHIQUES



Carte des régions pédologiques d'Ille et Vilaine (source: <http://www.sols-de-bretagne.fr>)



Carte des unités paysagères d'Ille et Vilaine (source : www.sols-de-bretagne.fr): présentation des sites d'étude

Annexe III: Algorithme du programme principal automatisant les calculs des descripteurs

Nom : Automatisation des traitements

Entrées:

-Dossier de résultats contenant les simulations produites par le modèle.

-Liste des couverts mis en place.

Sortie: Fichier csv synthétisant les informations à deux échelles (échelle de la parcelle, échelle du bloc)

Début:

Initialisation des fichiers csv pour chaque descripteur: création d'entêtes.

Pour chaque descripteur calculé:

Lancement du script de calculs du descripteur et création d'un fichier csv pour chaque cas.

Phase de regroupement des différents fichiers csv en un seul (module pandas)

Fin

Algorithme du traitement automatique des descripteurs

Nom : Calcul des couples de cultures et de leurs fréquences

Entrée: Décision d'assolement complète, liste couples possibles

Sortie: Fichier csv

Début:

S = séquence

Lc = liste_couvert

Liste couple possible

Dictionnaire= {Couple_1:0; couple_2:0; couple_3:0;.....}

Pour chaque élément C de Lc:

Pour chaque année i:

couple = S[i] et S[i+1]

recherche couple dans Dictionnaire

couple_X = couple_X + 1

Ecriture csv

Fin

Algorithme du calcul des couples précédents-suivants

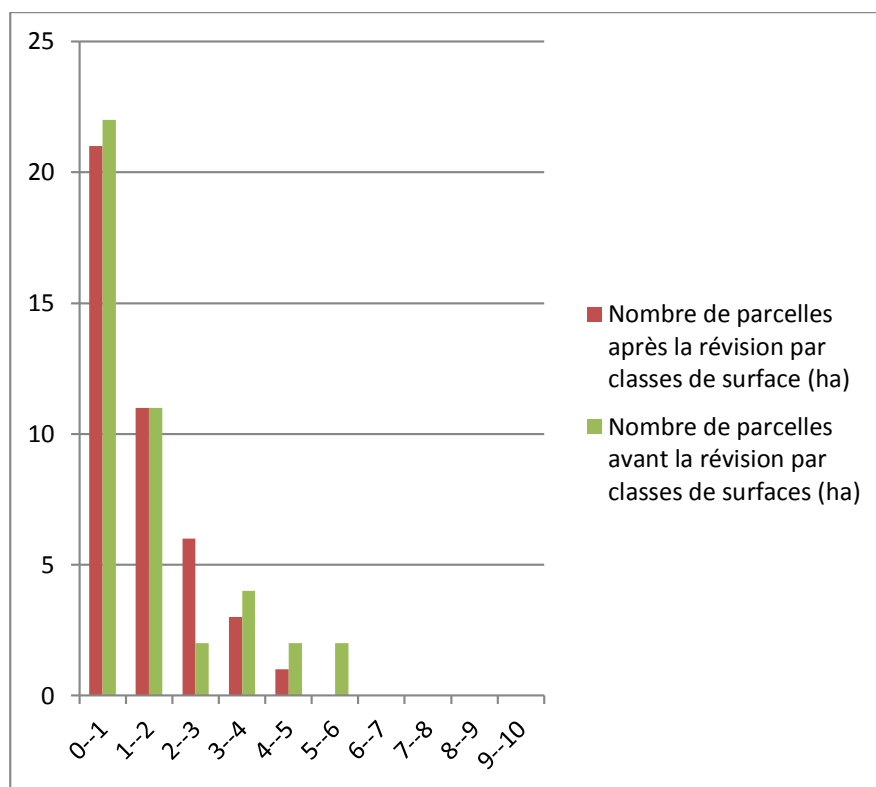
Nom : Calcul d'occurrence de couverts
Entrée: Décision d'assolement complète
Sortie: Fichier csv
Début:
 S = séquence
 Lc = liste_couvert
 Liste_occurrence = []
 Pour chaque élément C de Lc:
 compte = 0
 Pour chaque année i:
 Si S[i] == C, alors:
 compte = compte + 1
 A Liste_occurrence on rajoute compte.
 Ecriture csv
Fin

Algorithme du calcul des occurrences d'apparition des couverts

Nom : calcul de délai entre cultures
Entrée: Décision d'assolement complète
Sortie: Fichier csv
Début:
 S = séquence
 Lc = liste_couvert
 Liste_occurrence = []
 Pour chaque élément C de Lc:
 int compte = 0
 int position
 Pour chaque année i:
 Si S[i] == C, alors:
 position = i
 compte = 1
 Tant que S[i+1] == C, alors:
 compte = compte + 1
 A Liste_occurrence on rajoute compte.
 Ecriture csv
Fin

Algorithme du calcul des dynamiques temporelles des couverts

Annexe IV : Effet de la révision de la base de connaissances sur le cas 6



Groupements des parcelles pré et post révision du cas laitier

	Diplôme : Spécialité : Ingénieur agronome Spécialisation / option : GAPE Enseignant référent : Hervé NICOLAS	
Auteur(s) : Tristan JEAN-CHARLES Date de naissance* : 27/12/189		Organisme d'accueil : INRA SAD Paysage Adresse : 65 rue de St Brieuc CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France
Nb pages : 40 Annexe(s) : 6		Maître de stage : Alexandre JOANNON
Année de soutenance : 2014		
Titre français : Simulation de paysages agricoles produits par des exploitations agricoles : validation d'un modèle agronomique et évaluation des structures paysagères		
Résumé (1600 caractères maximum) : Afin d'évaluer l'influence de différentes structures paysagères sur un paysage agricole, un modèle décisionnel d'Allocation de cultures a été produit dans le cadre du projet AGRICONNECT par l'équipe INRA SAD Paysage. Sachant que l'objectif de ce modèle est de simuler des paysages réalistes, une démarche de validation des décisions d'assolements produites a été créée. A partir d'une exploitation en élevage porcin validé, nous avons généralisé son fonctionnement à l'ensemble d'un paysage de 2km² dont nous avons étudié l'évolution spatiale et temporelle ainsi que son impact sur une métrique paysagère d'intérêt biologique. L'application de la démarche de validation décrite, nous avons pu valider un cas d'exploitation. Nos résultats nous permettent de mettre en évidence une certaine homogénéité dans le fonctionnement des couverts des paysages issus d'exploitations porcines à l'échelle annuelle. De même, les propriétés du paysage ne varient pas suivant la portion étudiée.		
Abstract (1600 caractères maximum) : In order to check the effects of the landscape's composition on an agricultural landscape, an expert system has been created. The aim of this model is to generate realistic landscapes from information about the means of production of the agricultural enterprise inside the site of the study. A validation procedure has been created. An application of this procedure was realised on two kind of farms, one specialized in pig farming and another one specialized in cattle farming. We studied the relationship between the spatial and temporal evolution of a 2km² area and a landscape metric, the quantities of maize in a given neighbourhood, which is linked to the well-being of biodiversity. Our results show that the properties of a landscape don't differ with the evolution of time: a landscape with given properties one year will remain the same on a whole with the passing of time. Moreover, a landscape's dynamic won't change depending of the portion we're studying.		
Mots-clés : Agronomie, Écologie du paysage, Système expert, Modélisation Key Words: Agronomy, Landscape Ecology, Expert System, modelisation		

* Élément qui permet d'enregistrer les notices auteurs dans le catalogue des bibliothèques universitaires