



Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998

Thomas Houet, Cédric Gaucherel

► To cite this version:

Thomas Houet, Cédric Gaucherel. Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager : Validation sur un petit bassin versant breton sur la période 1981-1998. *Revue Internationale de Géomatique*, Lavoisier, 2007, 17 (3-4), pp.491-516. <10.3166/geo.17.491-516>. <hal-00424081>

HAL Id: hal-00424081

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00424081>

Submitted on 6 Dec 2013

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.

Simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager

Validation sur un petit bassin versant breton pour la période 1981-1998

Thomas Houet* — Cédric Gaucherel**, ***

* Laboratoire COSTEL, UMR LETG 6554, IFR 90 CAREN
CNRS/Université Rennes 2 Haute Bretagne
Place du recteur Henri Le Moal, 35043 Rennes cedex
thomas.houet@uhb.fr

** INRA SAD-Armorique, IFR 90 CAREN
65 rue de Saint-Brieuc, CS 84215 Rennes Cedex

*** INRA – EFPA, UMR AMAP, 34398 Montpellier Cedex

RÉSUMÉ. La modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols et des structures paysagères est essentielle pour évaluer leurs conséquences sur l'environnement. La plateforme LI a été utilisée ici pour modéliser de façon dynamique les évolutions possibles d'un paysage agricole discontinu à travers la simulation de changements d'utilisation et d'occupation des sols et de structures paysagères, en considérant les forçages naturels et les décisions humaines qui interviennent à différentes échelles spatio-temporelles. L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité de la plateforme à effectuer ce type de simulations. Les résultats montrent que les simulations effectuées sur la période 1981-1998 sur un petit bassin versant agricole en Bretagne sont plausibles. Ils témoignent aussi du rôle des exploitations agricoles dans le façonnement du paysage.

ABSTRACT. The modelling of land use and land cover changes is essential to the assessment of consequent environmental impacts. The LI platform, a domain specific language has been used to model dynamically possible evolution of an agricultural patchy landscape through the simulation of both land use- land cover and landscape features changes considering the multi-scaled natural forces and human decisions. The aim of the paper is to estimate LI ability to produce such simulations. The outcomes show the plausibility of the simulations performed by the model for the 1981-1998 period on a small watershed in Brittany and highlight the influence of farm dynamics on landscape evolution.

MOTS-CLÉS : Modélisation, Facteurs de changements, Occupation des sols, Zones humides de fonds de vallées, Bocage, Indicateurs paysagers, Intelligence artificielle Distribuée

KEYWORDS: Modelling, Driving factors of change, Land over, Riparian wetlands, Hedgerows network, Landscape descriptors, Distributed artificial intelligence

1. Introduction

De nombreuses préoccupations environnementales telles que la préservation des ressources en eau, de la biodiversité, ou des milieux sont désormais prises en compte dans les politiques et les réglementations nationales (Schémas Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et européennes (DCE - Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/EC). La gestion et l'aménagement de l'espace à moyen et long terme qui visent à respecter un certain nombre de normes environnementales sont au cœur des problématiques des aménageurs.

Les récentes avancées scientifiques concernant la connaissance des relations entre agriculture, structures paysagères et qualité de l'eau (Mérot *et al.*, 2000 ; Baudry *et al.*, 2004 ; Clément *et al.*, 2004 ; Viaud *et al.*, 2004) ont révélé le potentiel écologique des haies bocagères et des zones humides de fonds de vallées pour la restauration de la qualité des eaux.

Forman (1995) définit le paysage comme un assemblage d'éléments qui évoluent et interagissent à plusieurs échelles spatiales et temporelles simultanément. De ce point de vue de l'écologie du paysage, un paysage agricole bocager est l'assemblage de trois composantes : les types d'occupations des sols, les zones humides de fonds de vallées et le réseau de haies (bocage). La simulation dynamique d'un paysage agricole bocager offre la possibilité d'appréhender l'avenir d'un territoire, les facteurs qui expliquent une évolution donnée et ses incidences possibles sur l'environnement, notamment la qualité de l'eau et des milieux aquatiques tels qu'ils sont définis par la DCE.

Il existe à l'heure actuelle un grand nombre de modèles et plateformes qui produisent des simulations dynamiques de paysages (Gaucherel *et al.*, 2004-a). L'analyse comparative de ces plateformes nous a conduit à développer une application à partir d'une plateforme existante pour effectuer une simulation prospective dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager localisé en Bretagne. La première application (Gaucherel *et al.*, 2004-b), effectuée sur un paysage virtuel, a montré son aptitude à modéliser l'évolution des trois composantes d'un paysage agricole bocager. Cependant, les questions de la plausibilité des simulations effectuées et de l'évaluation de cette plausibilité à travers une validation des résultats obtenus se posent alors avec acuité. La validation de simulations de paysages est encore à l'heure actuelle un défi. Il apparaît en effet très ambitieux, voire même illusoire de prédire avec précision l'avenir d'un territoire et sa traduction dans le paysage. La démarche communément adoptée est alors de réaliser des scénarios d'évolution différents (tendanciels et/ou contrastés) afin d'embrasser le champs des futurs possibles d'un territoire sans chercher à valider les simulations produites (Baker *et al.*, 2004 ; Steinitz *et al.*, 2003 ; Flaxman *et al.*, 2002). Mais comment être sûr que le résultat d'une simulation représente un paysage réaliste ayant suivi un cheminement plausible, c'est-à-dire qui reste en cohérence

avec l'ensemble des facteurs qui interviennent dans son évolution et ne se limite pas au seul fruit de l'imagination ? Autrement dit, comment s'assurer que le modèle utilisé simule un paysage avec efficacité (atteindre des objectifs d'évolution – recherche d'une densité bocagère finale par exemple –) et souplesse (introduction de la stochasticité) ?

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'efficacité et la souplesse du modèle développé pour simuler de façon plausible l'évolution d'un paysage agricole bocager avec la plateforme L1, à travers la réalisation d'une simulation effectuée sur une période passée et sur un territoire réel. Pour atteindre ces objectifs, les bases conceptuelles et méthodologiques nécessaires à la simulation d'un tel paysage doivent être au préalable clairement posées.

2. Simulation d'un paysage agricole bocager : concepts et méthodes

2.1. Dynamiques d'un paysage agricole bocager

2.1.1. Des dynamiques spatiales et temporelles différenciées

Pendant longtemps les modes d'occupation des sols, le réseau bocager et les zones humides ont été étudiés de façon indépendante, sans tenir compte de leurs interactions. Cela peut être lié notamment à la manière très différente dont ils s'inscrivent dans l'espace : le réseau bocager constitue un réseau linéaire de haies, l'occupation du sol est un élément d'une trame où la parcelle culturale est une unité homogène, la zone humide étant quant à elle un « compartiment » ou un ensemble de « compartiments spatialement déconnectés » dont chacun d'eux regroupe un ensemble de parcelles ou parties de parcelles. La haie, la parcelle et les parcelles humides constituent les objets ou « unités élémentaires » sur lesquels les changements se produisent.

Les modes d'occupations des sols varient d'une parcelle à l'autre. Les types d'occupation du sol ont des durées de vie variables, allant d'un an en moyenne pour les cultures annuelles telles que le maïs ou les céréales (blé, avoine, chanvre, lin, etc.) à quelques années (de 1 à 8-10 ans pour les prairies temporaires), voire plusieurs dizaines d'années pour les prairies permanentes. La fréquence de retour des cultures annuelles dépend des rotations culturales que pratique l'exploitant agricole sur l'ensemble de son exploitation. L'assolement, qui correspond à la proportion de chacune des cultures principales sur le territoire cultivé par l'agriculteur, dépend essentiellement du type de production qu'il a adopté.

Le réseau bocager a connu une nette régression lors des 50 dernières années. Initiée à partir de la seconde révolution agricole (1950-60) (Flatrès, 1979), la baisse de la densité bocagère s'est accentuée au milieu des années 1970 avec la généralisation du Modèle Agricole Breton (Canévet, 1992). La gêne que les haies occasionnaient au développement de l'agriculture a engendré une disparition d'une

partie d'entre elles. Au cours des années 1990, la prise de conscience des fonctionnalités hydrologique, anti-érosive, écologique, patrimoniale, brise-vent ou encore paysagère du bocage a enclenché une politique de replantation.

Les zones humides de fonds de vallées connaissent trois types d'évolution contrastés. Elles peuvent être utilisées par l'exploitant agricole car ce sont avant tout des terres agricoles. Le mode d'occupation des sols est fortement contraint par l'hydromorphie et les parcelles sont alors dans la majeure partie des cas des prairies permanentes. Elles peuvent connaître une régression à travers le drainage de parcelles qui vise à augmenter la surface cultivable. Enfin, elles peuvent tendre vers une fermeture qui limite l'accessibilité au cours d'eau. Cette tendance a été observée sur plusieurs sites en Bretagne (Hubert-Moy et Houet, 2004 ; Baudry *et al.*, 2004 ; Clément *et al.*, 2004). La fermeture provient de la modification de la gestion des parcelles humides par l'exploitant agricole (abandon, absence d'entretien tels que la fauche et/ou le pâturage) (Regimbeau *et al.*, 1996). Les vitesses d'évolution de la colonisation végétale (passage de prairies permanentes à des friches herbacées, puis à des friches arbustives jusqu'au stade arboré) dépendent de la gestion de la parcelle mais aussi de sa configuration et de sa localisation (Clément *et al.*, 1996-a ; Clément *et al.*, 1996-b).

Ainsi ces trois « objets » du paysage, la haie, l'occupation du sol au sein des parcelles agricoles et la zone humide, connaissent des formes et des vitesses d'évolution différentes. Les changements du réseau bocager s'expriment par des phénomènes souvent irréversibles (disparition, apparition des haies), tandis que les changements d'occupation des sols correspondent à des phénomènes cycliques de durée variable. Enfin, les changements observés au sein des zones humides se produisent à l'échelle de la parcelle humide et sont liés à deux types de phénomènes, certains ponctuels (disparition de parcelles humides par drainage) et d'autres progressifs (diffusion spatiale de la végétation au sein d'une parcelle et évolution temporelle variée des stades de végétations).

2.1.2. *L'exploitation agricole, niveau clef de l'évolution du paysage agricole*

L'exploitant agricole, par ses activités de production, d'entretien et d'aménagement de son territoire, constitue le premier facteur explicatif des changements observés dans un paysage agraire (Thenail *et al.*, 1997 ; Thenail *et al.*, 2001), et l'agrégation des exploitations agricoles explique l'évolution du paysage agricole. Mais ce n'est pas le seul niveau d'organisation qui influence son évolution, d'autres facteurs intervenant sur les décisions humaines (Corgne, 2005). L'ensemble de ces facteurs est présenté dans la figure 1, en fonction de l'échelle spatiale à laquelle ils interviennent (Houet et Hubert-Moy, 2004).

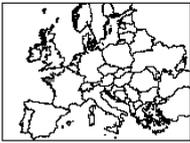
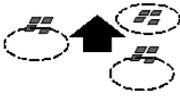
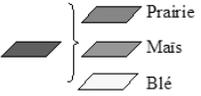
UNITES SPATIALES	FACTEURS EXPLICATIFS
Etat, Europe 	<ul style="list-style-type: none"> - Politiques agricoles (PAC) - Mesures Agri-Environnementales - Directive Cadre sur l'Eau - Contrat Territoriaux d'Exploitation / Contrat Agriculture Durable (CTE / CAD)
Commune, Intercommunalité, Département, Région 	<ul style="list-style-type: none"> - Aménagements fonciers - Industries Agro-alimentaire / Coopératives agricoles - Programme Harmonie
Bassin versant 	<ul style="list-style-type: none"> - Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) - Programme Bretagne Eau Pure (BEP) - Milieu physique (Topographie, sols, climat...)
Exploitation 	<ul style="list-style-type: none"> - Système de Production - Assolement / Itinéraire technique - CTE / CAD - Age de l'exploitant
Parcelle agricole  Haie 	<ul style="list-style-type: none"> - Distance au siège d'exploitation - Taille du parcellaire - Degré d'hydromorphie - Localisation des haies - Précédent culturel - Propriété foncière

Figure 1. Les facteurs explicatifs de l'évolution d'un paysage bocager (Bretagne) (d'après Corgne, 2005)

L'échelle de l'exploitation agricole, au travers des convictions et des choix de l'exploitant, est le niveau d'organisation clé, intégrateur de l'ensemble des politiques agricoles de l'Union Européenne (UE), des textes réglementaires mis en place par l'Etat et des opportunités économiques (accès aux marchés, bassin de production d'industries agro-alimentaires). L'agriculteur adopte un système de production, c'est-à-dire un type de production (élevage bovin, porcin, cultures maraîchères...) assimilable à l'OTEX (Orientation Technico-Economique des eXploitations), et un mode de production (intensive, extensive, biologique...). Il définit alors un assolement, c'est-à-dire la répartition des proportions des types d'occupation des sols sur son exploitation, pour produire ses besoins en fourrages par exemple. Cet assolement est conduit suivant un itinéraire technique (ensemble des successions et

rotations culturales sur son territoire d'exploitation) afin d'obtenir les meilleurs rendements possibles, destinés à améliorer directement ou indirectement la rentabilité de sa production principale (lait, viande, etc.). Dès lors, l'allocation spatiale des types d'occupation des sols à l'échelle d'une exploitation agricole tient compte de la structure spatiale de l'exploitation, des contraintes du milieu (hydromorphie, pente), de facteurs agronomiques (précédent cultural), topologiques (distance au siège d'exploitation par exemple) et géométriques (taille et morphologie des parcelles) (Thenail, 1996 ; Thenail *et al.*, 2001). L'évolution des zones humides est étroitement corrélée à l'ensemble de ces facteurs. Le choix du système de production conditionne l'utilisation ou non de la zone humide comme surface de pâtures et/ou de fourrages. La taille et l'accessibilité de la parcelle humide (distance au siège d'exploitation, localisation dans une vallée encaissée ou non) sont des conditions importantes pour leur utilisation (Baudry *et al.*, 2004). De plus, le temps nécessaire à la gestion de ces espaces ainsi que des haies bocagères peut amener l'exploitant à les abandonner ou à les araser afin d'améliorer ses activités de production.

La cessation d'activité d'un exploitant peut conduire soit à la reprise de son exploitation par un nouvel agriculteur (reprise par le fils par exemple) ou par un ou plusieurs agriculteurs voisins. Dans ce dernier cas, l'augmentation de la taille de la ou des exploitations aura des incidences sur l'allocation spatiale des cultures, la fermeture potentielle des zones humides de fonds de vallées et la disparition du bocage du fait de l'augmentation de leur temps de gestion.

2.1.3. *D'autres facteurs explicatifs de l'évolution du paysage agricole*

Toute réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) ou modifications de la réglementation (foncière, sur l'environnement...) peuvent conduire à des évolutions de l'assolement, à des changements de système de production ou d'itinéraire technique (utilisation des parcelles humides...). Ainsi, la réforme de la PAC de 1992 a eu des conséquences importantes sur l'occupation des sols en Bretagne. Le système de primes allouées à certaines cultures (céréales, maïs fourrager) a fortement encouragé leur implantation au détriment des prairies temporaires, dont la baisse a été limitée par la mise en place des MAE (Mesures Agri Environnementales). De la même façon, les lois sur l'aménagement foncier et rural définissant les procédures d'aménagement ont beaucoup évolué et intègrent, depuis la loi du 31/12/1985, des mesures de protection des haies et talus en renforçant les interdits en matière d'arrachage, de coupe d'arbres et de haies. Autre exemple, le programme HARMONIE mis en place par la Région Bretagne en 1994 permet de financer des aménagements paysagers et vise la plantation de haies autour des bâtiments d'exploitation pour favoriser leur intégration dans le paysage. Depuis 2002, il vise à mettre en cohérence la fonctionnalité de l'agriculture avec l'amélioration et la préservation du milieu naturel (Ligneau, 2002). Enfin, d'autres actions issues de programmes régionaux ou de directives européennes (programme Bretagne Eau Pure, Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux...) prévoient, à l'échelle du

bassin versant, des mesures incitatives et d'accompagnement pour améliorer le rôle anti-érosif, hydrologique et épurateur du bocage (Viaud *et al.*, 2004 ; Caubel *et al.*, 2003), la préservation voire la restauration de certaines fonctionnalités, notamment dénitrifiantes, des zones humides de fonds de vallées (Mérot *et al.*, 2000 ; Hubert-Moy *et al.*, 2003).

2.2. Les plateformes de modélisation destinées à la simulation dynamique d'un paysage

Une plateforme de modélisation se présente comme un noyau commun de données, de connaissances et de méthodes (empiriques, statistiques,...) autour duquel gravitent des modèles (sous la forme de modules) dédiés à différentes applications. Par opposition, un modèle est souvent plus modeste, spécifique à un objectif plus précis et moins évolutif, avec des résultats locaux par définition. Un certain nombre de plateformes développées pour la simulation dynamique du paysage ont été recensés de façon quasi-exhaustive : TELSA (Kurz *et al.*, 2000), LANDIS (He *et al.*, 1999), CORMAS (Antona *et al.*, 1998), CAPSIS (de Coligny *et al.*, 2003), SME (Costanza *et al.*, 2004), SELES (Fall *et al.*, 2001), CLUE (Verburg *et al.*, 1999), L1 (Gaucherel *et al.*, 2004-c). La figure 2 ci-après présente un tableau comparatif des plateformes de modélisation et leur manière de considérer le paysage et de gérer sa simulation.

	TELSA	LANDIS	CORMAS	CAPSIS	SME	SELES	CLUE	L1
Dynamique paysagère	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Description de l'espace	Vecteur Tessels	Raster	Vecteur ou Raster	Vecteur ou Raster	Raster	Raster	Raster	Raster
Représentation du paysage	Discontinu	Continu	Continu et/ou Discontinu	Continu et/ou Discontinu	Continu	Continu	Continu	Continu et/ou Discontinu
Gestion du temps	Discontinu (scénarios)	Discontinu	Discontinu	Discontinu (scénarios)	Continu	Continu	Discontinu	Discontinu
Gestion des échelles	Non	Non	Hiérarchique	Hiérarchique	Hiérarchique	Non	Hiérarchique Multirésolution	Hiérarchique
Structures des données	-	-	Orienté objet	Orienté objet	Orienté objet	Orienté objet	-	(Orienté objet)
Processus potentiels	Forestiers	Tous	Tous	Forestiers	Déterministes	Tous Forestiers	Tous	Tous
Actions autorisées	Attributaires	Géométriques	Attributaires	Géométriques Attributaires	Attributaires	Attributaires	Attributaires	Géométriques Attributaires
Calibration / validation	Non	Non	Oui	Oui	Oui (poussée)	Non	Oui	Non (Oui)

Figure 2. Comparaison des plateformes de simulation du paysage existantes (d'après Gaucherel *et al.* 2004-a)

Quelles sont les contraintes inhérentes à la simulation dynamique d'un paysage agricole bocager? Par ordre d'importance, la simulation doit permettre (1)

d'effectuer des changements géométriques (arasement de haie, agrandissement du parcellaire par la réunion de plusieurs parcelles agricoles) et attributaires (changement de type d'occupation du sol), (2) d'intégrer une dynamique spatio-temporelle du paysage (changements cycliques, instantanés, progressifs), (3) une approche multi scalaire (prise en compte des limites des exploitations agricoles, du niveau d'hydromorphie influençant l'intensité et de la localisation des changements...), (4) de modéliser les décisions humaines et les forçages naturels, (5) de manipuler des objets spatiaux à géométrie variable (linéaire, surfacique) et (6) de prendre en compte les relations topologiques existantes dans le paysage (prise en compte du voisinage d'une haie ou d'une parcelle par exemple).

Les plateformes décrites dans la littérature ne sont pas parfaitement adaptées à la simulation de ce type de paysage: TELSA est dédiée à des paysages forestiers sans dynamique parcellaire et avec seulement des évolutions de type attributaire; CAPSIS impose une structure de données qui ne permet pas la conception d'actions géométriques; CORMAS gère particulièrement bien les processus socio-économiques centrés sur la gestion des ressources naturelles à travers son système multi-agents mais se concentre sur la communication entre agents et non sur l'évolution spatio-temporelle des composantes du paysage; LANDIS permet des actions géométriques mais quasiment sans évolution attributaire et par sauts temporels importants (non graduels); SME applique des processus déterministes à chaque pixel sans intégrer de relations topologiques et avec une gestion du temps et des échelles simplifiée; SELES n'adopte pas une vision discontinue du paysage et gère mal les échelles; CLUE gère quant à lui particulièrement bien les relations multi scalaires, mais ne permet pas d'actions géométriques tels que des arasements de haies ou des réunions de parcelles.

La plateforme L1 semble la plus adaptée à la simulation d'un paysage agricole bocager, même s'il s'agit encore d'un prototype. Elle considère les objets du paysage (haies, parcelles) comme un ensemble de pixels liés qu'elle peut faire évoluer individuellement (orienté objet) sur le plan attributaire et/ou géométrique, suivant des dynamiques temporelles continues et/ou discontinues, progressives et/ou cycliques. Elle intègre l'influence de plusieurs niveaux scalaires, des décisions humaines et des forçages naturels, du voisinage et des trajectoires d'évolution passées. Elle est particulièrement bien adaptée à l'appréhension du paysage à une échelle fine, celle de la haie et de la parcelle. Une première simulation d'un paysage bocager simplifié a montré l'aptitude de la plateforme à intégrer progressivement des processus et des contraintes dans les simulations, le besoin de définir avec précision l'ensemble processus qui le font évoluer, mais aussi par conséquent la nécessité de travailler sur un paysage réel (Gaucherel *et al.*, 2004-b). Un partenariat scientifique avec l'INRA SAD-Armorique a permis d'envisager l'amélioration de la simulation de paysages bocagers, à partir d'une application effectuée sur un territoire où l'ensemble des données nécessaires à la simulation sont disponibles, en particulier celles relatives aux exploitations agricoles (structure foncière, sièges d'exploitation, âge de l'exploitant...).

3. Méthodologie

L'amélioration de la simulation de l'évolution d'un paysage agricole donné par rapport à des simulations antérieures ne peut précisément s'évaluer qu'à l'aune d'une situation connue, à partir d'observations effectuées sur une période passée. Des simulations de trajectoires d'évolutions passées ont été effectuées afin d'évaluer l'efficacité de la plateforme L1 à simuler les changements qui interviennent sur ce type de paysages.

L'approche méthodologique adoptée pour valider la simulation d'un paysage agricole bocager a consisté à effectuer une simulation sur une période passée (1981-1998) qui soit suffisamment longue pour être significative et représentative d'une période à partir de laquelle des simulations prospectives pourraient être réalisées par la suite. Plus précisément, la démarche empruntée doit permettre de (1) tester la sensibilité du modèle aux différents processus qui font évoluer le paysage, (2) réaliser une simulation dynamique et réaliste, (3) mesurer la plausibilité du paysage simulé en comparant statistiquement le résultat d'une simulation à la situation réelle à une date d'observation donnée.

3.1. Site d'étude et trajectoires d'évolution entre 1981 et 1998

3.1.1. Le bassin versant du Lestolet

D'une superficie de 1320ha, le bassin versant du Lestolet est situé dans le Sud-ouest du département des Côtes d'Armor, au cœur du massif granitique de Quintin (Figure 3). Il se caractérise par un bocage dense (124 m/ha) en 1998 et des zones humides de fonds de vallées bien présentes (17% du bassin versant). Les trois principales communes qui le composent (Kerien, Lanrivain et Magoar) comprennent en 1999 respectivement 75%, 68% et 100% d'actifs agricoles (INSEE, 1999). Territoire agricole par excellence, il est dominé la production bovine (lait et viande) et présente une légère production avicole (quelques ateliers) et porcine (un élevage).

Le bassin versant du Haut-Blavet dans lequel s'inscrit le Lestolet présente un enjeu stratégique vis-à-vis de la ressource en eau : son contexte granitique lui confère une forte capacité de rétention en eau favorable au soutien d'étiage du Blavet qui traverse le Morbihan ; il permet d'améliorer par dilution la qualité de l'eau de l'Alimentation en Eau Potable costarmoricaine qu'il alimente. Par conséquent, la dégradation de la qualité des eaux du Haut-Blavet a conduit les pouvoirs publics à y appliquer le programme Bretagne Eau Pure (BEP) depuis 1994. La concentration en nitrates semble s'être stabilisée depuis 2002 autour de 30-35 mg/L.

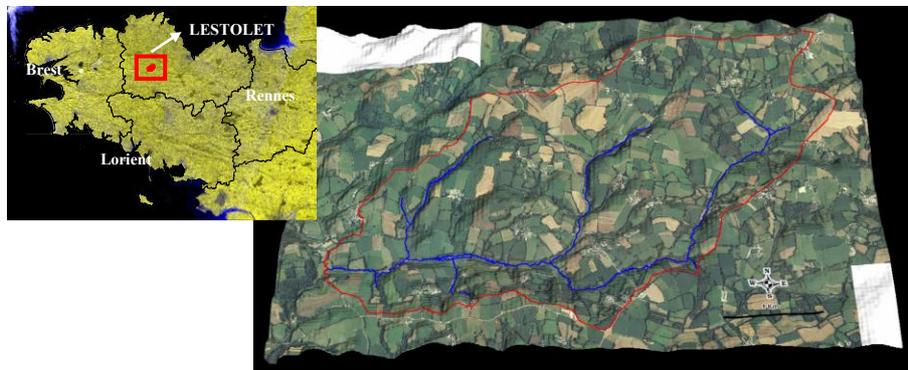


Figure 3. Localisation du site d'étude : bassin versant du Lestolet (sources : BD Ortho 1998 © IGN, IRS-WiFS 2001)

3.1.2. Trajectoires d'évolution du paysage du Lestolet entre 1981 et 1998

La détermination des trajectoires d'évolution sur la période 1981-1998 par l'intermédiaire de 14 indicateurs statistiques et de 5 matrices de transition (Hubert-Moy et Houet, 2004) a permis de mettre en évidence les facteurs explicatifs des changements qui sont réellement intervenus et leur poids sur l'évolution du Lestolet, et par conséquent de reconstruire un scénario d'évolution réaliste sur cette période. Elle a été réalisée à partir des photographies aériennes de 1981 géométriquement rectifiées et d'un orthophotoplan (1998). La numérisation du bocage, du parcellaire et des limites de la zone humide a été réalisée sous SIG à partir d'une photo-interprétation des clichés par stéréoscopie.

Entre 1981 et 1998, la densité bocagère est passée de 145 à 124 m/ha, soit de 200 km à 170 km de linéaire bocager. Cela représente la perte quasi continue de 31,5 km de linéaire bocager (13,5 km arasés au sein d'un îlot de parcelles culturales non hydromorphes relativement éloigné du siège d'exploitation ; 5,5 km arasés à proximité des routes ; 12,5 km dont le contour bocager n'est plus différenciable de son contenu boisé) et la création de 1,5 km de haies à proximité des bâtiments d'élevage (1 km) et des routes (0,5 km). N'ayant pas connu d'aménagements fonciers, cette évolution est le fait d'actions individuelles des exploitants agricoles, de l'élargissement des routes par les organismes compétents et du programme Harmonie. Les zones humides de fonds de vallées ont peu évolué spatialement (seulement 20 ha drainés) mais ont connu une forte fermeture. Les friches et bois totalisaient 42 ha en 1981 contre 151 ha en 1998. Enfin, les proportions de maïs et de céréales ont légèrement augmenté au détriment des prairies temporaires.

L'analyse de l'évolution de la structure du parcellaire par système de production témoigne d'évolutions identiques mais d'ampleurs différenciées. Dès 1981, le

système « porcin » se distingue des autres systèmes de production avec des parcelles de 1,6 ha en moyenne contre 1 ha pour les autres systèmes. Tous ces systèmes ont connu une augmentation de la taille moyenne du parcellaire avec une accentuation de l'écart existant entre le système « porcin » et les autres (2,7 ha en moyenne contre des tailles moyennes variant entre 1,1 et 1,6 ha).

Les assolements ont eux aussi évolué entre 1981 et 1998 en raison de la mise en place des Quotas Laitiers de 1982/83, de la réforme de la PAC et des MAE de 1992. L'évolution de la proportion moyenne des cultures principales (prairies, maïs, céréales) pour chacun des systèmes de production recensés sur le Lestolet est présentée dans la figure 4. Ces données sont issues des recensements agricoles (ONIC, 1979 et 2000) et des occupations du sol observées sur le Lestolet et sur d'autres bassins versant bretons (Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999 ; Hubert-Moy et Houet, 2004). Les primes aux céréales et au maïs fourrager ont engendré, pour les exploitations tournées vers les systèmes « bovin » ou « bovin mixte », une baisse de la proportion des prairies au profit du maïs fourrager (destiné à l'alimentation du cheptel bovin) et des céréales. Ces primes ont incité les exploitations orientées vers le système « porcin » à abandonner la production de maïs au profit des céréales et oléo-protéagineux. A l'inverse, les exploitations appartenant au système « volaille » semble s'être orientées vers une production de maïs au détriment des prairies et, dans une moindre mesure des céréales. Les primes à l'herbe ont incité les exploitations du système « bovin extensif /bio » à réduire la part de maïs au profit essentiellement des prairies.

Systèmes de production	Assolement en 1981			Assolement en 1998		
	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>C-OP</i>	<i>P</i>	<i>M</i>	<i>C-OP</i>
Bovin lait et/ou viande	70 %	17 %	13 %	65 %	20 %	15 %
Mixte bovin + volaille	63 %	25 %	12 %	55 %	30 %	15 %
Mixte bovin + porc	80 %	10 %	10 %	70 %	15 %	15 %
Porcin « option cultures »	10 %	40 %	50 %	10 %	10%	80%
Volaille	45 %	40 %	15 %	35 %	55 %	10 %
Bovin extensif / bio	88 %	10 %	2 %	90 %	5 %	5 %

P : Prairies M : Maïs C : Céréales OP : Oléo-protéagineux

Figure 4. Evolution des assolements par système de production entre 1981 et 1998 (sources : Hubert-Moy et Houet, 2004 ; Conseil Général des Côtes d'Armor, 1999)

L'évolution des territoires d'exploitation n'a pas pu être précisément identifiée car les données délimitant les territoires d'exploitation en 1981 ne sont pas disponibles. A partir des limites d'exploitations existantes en 1998, de la localisation

de sièges d'exploitation potentiels observés sur les photographies aériennes de 1981, de la taille moyenne des exploitations en 1979 (ONIC, 1979), de l'âge des exploitants et de témoignages d'agriculteurs, il a été possible de délimiter des exploitations ayant été reprise *a priori* par un exploitant voisin en estimant des départs à la retraite vers l'âge de 60 ans. Cet historique d'évolution des territoires d'exploitation agricole a une incidence à la fois sur la structure spatiale des exploitations ainsi que sur les systèmes de production présents à l'échelle du bassin versant.

3.2. Modélisation des processus d'évolution du paysage bocager entre 1981 et 1998

D'après les évolutions observées, la dynamique du paysage du Lestolet peut être simulée à travers la plateforme L1 à partir de quatre processus :

- L'évolution du bocage est fortement liée au voisinage de la haie. L'arasement est effectué sur des haies tirées aléatoirement et qui répondent aux critères de voisinage, augmentant d'autant la surface de la parcelle adjacente. La création de haies suit ce même procédé de façon inverse. Le nombre d'arasements ou de créations est défini initialement (en nombre de haies ou en longueur linéaire) de façon à être réalisé annuellement.

- L'évolution des zones humides a du être simplifiée au regard de la complexité des processus intervenant sur leur fermeture. Certaines prairies permanentes évoluent en friches. La vitesse de ce changement dépend du mode de valorisation de ces espaces et donc du système de production ainsi que de la taille et de l'éloignement des parcelles humides au siège d'exploitation. Cela concerne dans le cas des systèmes bovin lait et/ou viande et bovin extensif, les petites prairies éloignées qui ont plus de 5 ans, les petites et moyennes prairies éloignées de plus de 7 ans dans les cas de systèmes mixtes et de l'ensemble des prairies de plus de 7 ans dans le cas de systèmes hors-sol. L'âge des prairies permanentes est tiré aléatoirement à l'état initial. Le passage des friches en bois suit la même logique : cela concerne les friches de plus de 12 ans dans le cas d'un système bovin lait et/ou viande, les friches de plus de 17 ans dans les cas de systèmes mixtes et les friches de plus de 7 ans dans le cas de systèmes hors-sol. Ces vitesses d'évolution ont été estimées à partir de dire d'expert (B. Clément, communication orale).

- L'évolution des exploitations agricoles se traduit à la fois par l'agrandissement de leur structure spatiale (taille relative des parcelles, taille de l'exploitation) et du changement de leur système de production. L'agrandissement des parcelles s'effectue par la réunion de deux parcelles agricoles, ce qui peut provoquer l'arasement d'une haie lorsque celle-ci se situe entre elles deux. La réunion est réalisée à partir d'une parcelle tirée aléatoirement avec une de ses parcelles voisines non hydromorphes, notamment à partir de petites et moyennes parcelles pour le système porcin et de petites parcelles pour les autres systèmes de production. La

reprise partielle ou totale d'une exploitation est réalisée de façon déterministe en identifiant précisément qui va reprendre telle exploitation dès lors que l'exploitant atteint l'âge de la retraite (environ 60 ans).

- L'évolution des modes d'occupation des sols dépend de la distribution spatiale des types de cultures (prairies temporaires, maïs...) et de la variation des assolements (réforme de la PAC de 1992). L'allocation spatiale des terres découle des successions et rotations culturales pratiquées par l'exploitant. Ces dernières tiennent compte de la (ou les) culture(s) précédente(s) et de son « âge » (tiré aléatoirement à l'état initial) et varient suivant la distance relative au siège d'exploitation des parcelles en raison de la variabilité des structures spatiales des exploitations agricoles (regroupées, très éclatées). Trois zones ont été définies : la « zone proche » correspond au tiers de la SAU (Surface Agricole Utile) d'une exploitation le plus proche du siège d'exploitation ; la « zone intermédiaire » tiers suivant, autour de la « zone proche » ; la « zone éloignée » au tiers restant. Les types d'occupation du sol évoluent de façon quasi-stochastique du fait de transitions systématiques entre certaines cultures (contraintes agronomiques) et de transitions stochastiques visant à obtenir un assolement le plus proche possible de l'assolement moyen du système de production adopté par une exploitation donnée (figure 5). Par exemple, dans la zone éloignée, une prairie évoluera en maïs l'année suivante (succession obligatoire). L'année suivante, la culture de maïs étant prioritaire pour l'alimentation du cheptel, si la proportion en maïs à l'échelle de l'exploitation est atteinte alors la parcelle est occupée par des céréales/oléo-protéagineux. Sinon, une des deux cultures est mise en place aléatoirement (succession stochastique). Enfin, les céréales sont implantées exclusivement sur des parcelles non hydromorphes.

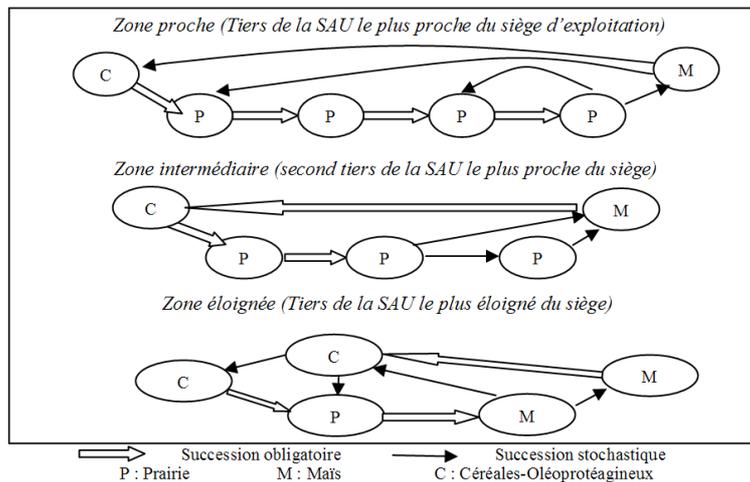


Figure 5. Modélisation de l'allocation spatiale des types d'occupation du sol : des successions annuelles variables selon la distance au siège d'exploitation agricole

3.3. Production des simulations à partir de la plateforme L1

La simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage agricole bocager avec la plateforme L1 nécessite en entrée deux types de données : les données spatiales et les données d'évolution des différentes composantes du paysage. La figure 6 synthétise le fonctionnement général du modèle développé, les données d'entrée nécessaires et la hiérarchisation des processus d'évolution du paysage. Le paysage résultant du premier pas de temps est utilisé comme paysage initial (t) au pas de temps (année) suivant.

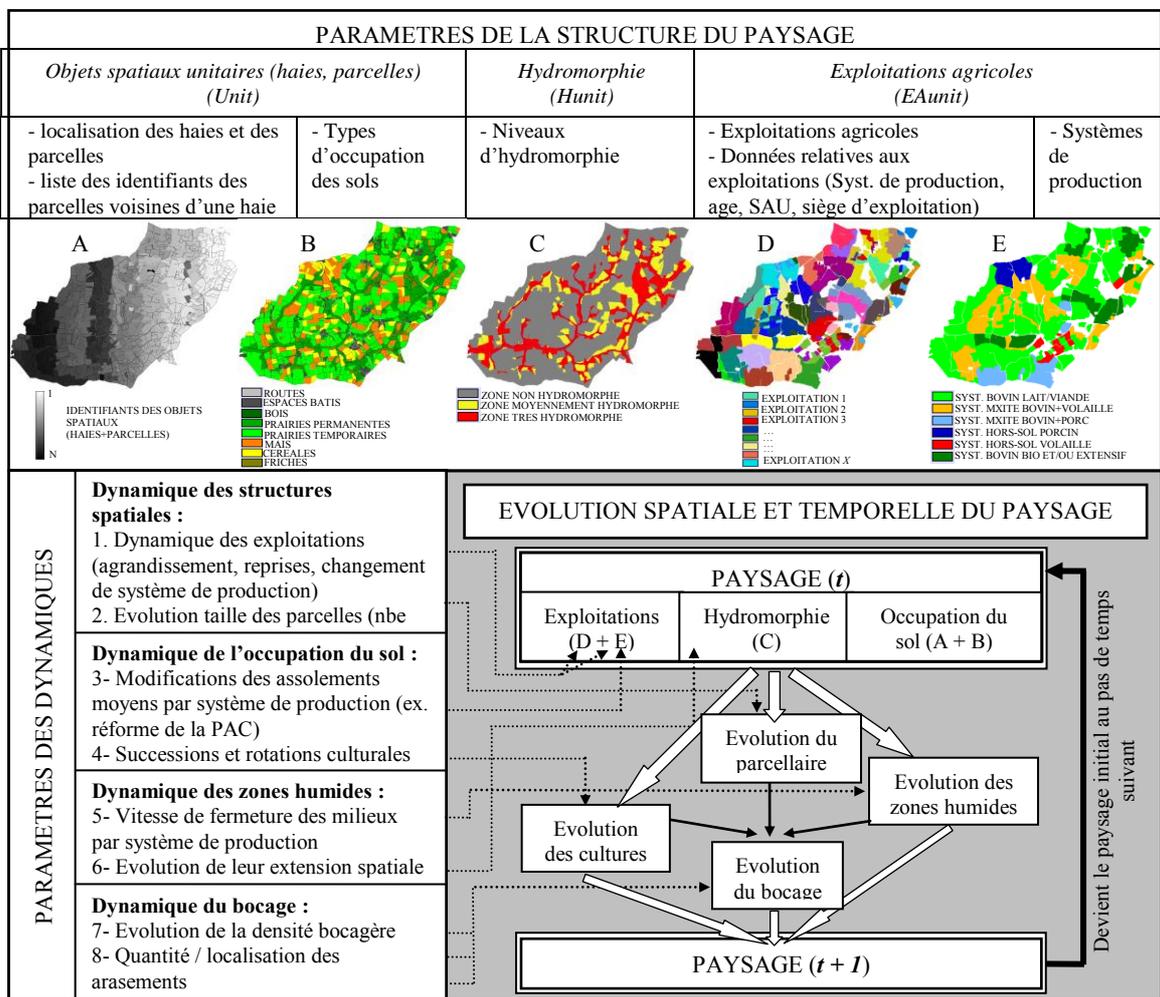


Figure 6. Schéma de synthèse de la production d'une simulation d'un paysage agricole bocager avec la plateforme L1

L'évolution spatio-temporelle d'un paysage (figure 6) est le résultat des changements issus des processus et de leurs interactions. Par exemple, lorsqu'une exploitation reprend en totalité une exploitation voisine, la distance au siège des parcelles change. Une petite prairie humide peut ainsi devenir éloignée du nouveau siège et dès lors abandonnée. Elle deviendra une friche au bout de 5 ans. L'année suivante, elle sera déduite de la proportion de herbe lors du calcul de l'assolement de cette exploitation et aura des répercussions sur l'allocation spatiale des prairies temporaires. De même, l'agrandissement récent de l'exploitation modifie les règles d'allocation des types d'occupation des sols. Il en va de même pour l'agrandissement des parcelles qui peut en plus engendrer l'arasement de la haie située entre elles.

4. Résultats

L'évaluation de l'efficacité et de la souplesse du modèle développé pour simuler de façon plausible l'évolution d'un paysage agricole bocager passe (1) par la vérification du degré de réalisme des processus d'évolution d'un paysage agricole bocager modélisés, (2) par l'analyse de l'évolution temporelle du paysage et (3) par la comparaison du résultat de la simulation avec le paysage réel.

4.1. *Tests de sensibilité du modèle : une simulation réaliste des processus d'évolution d'un paysage agricole bocager*

Chacune des actions nécessaires à la réalisation des processus d'évolution du paysage a été testée indépendamment (ex : création de haies le long des routes, arasement de haies exclusivement au sein du parcellaire agricole, non hydromorphe et non abandonné d'une exploitation, etc.) et quantifiée. Au total, ce sont près de 16 actions et une quinzaine d'indicateurs qui font fait l'objet d'une vérification et d'une validation. Certaines de ces actions pouvant varier suivant des critères attributaires (ex : la vitesse de fermeture des zones dépend du système de production), chacune des combinaison possible a fait l'objet d'un contrôle. Au final, pour chacune des actions et/ou de ses déclinaisons, le nombre de test de sensibilité a pu être répété de 3 à 50 fois suivant les actions. Ces tests de sensibilité du modèle de simulation ont permis de corriger l'algorithme. Le nombre de tests de sensibilité effectués étant important, seuls trois exemples sont présentés ci-après.

Le premier exemple concerne la modélisation des assolements par système de production. Un assolement théorique à atteindre au terme des phases de simulations est fixé pour l'ensemble des exploitations (Figure 4). Une simulation des successions culturales a été réalisée à un pas de temps annuel sur une période de 20 ans afin de vérifier si cet assolement était respecté pour chaque système de production. Cette simulation a été répétée 50 fois à travers une démarche de type Monte Carlo afin d'obtenir des valeurs moyennes issues de 50 simulations différentes. La figure 7a montre, pour trois systèmes de production, que les assolements moyens obtenus sont très proches des assolements théoriques. Ces écarts proviennent de la stochasticité de

certaines successions culturales et sont représentatifs de la variabilité des assolements existants dans la réalité d'une exploitation à l'autre ou d'une année sur l'autre.

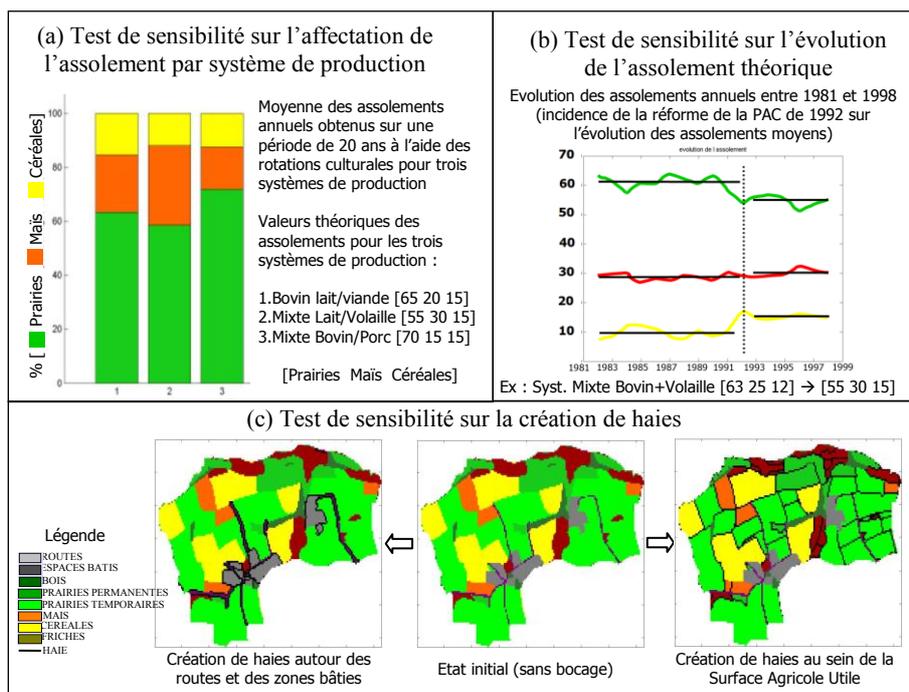


Figure 7. Exemples de tests de sensibilité du modèle de simulation appliqué au paysage agricole bocager (Plateforme L1)

Le second exemple, complémentaire au précédent, vise à déterminer l'évolution dans le temps de l'assolement pour chacun des systèmes de production, notamment lorsqu'un évènement tel que la réforme de la PAC de 1992 intervient. L'objectif est de voir, d'une part, si l'assolement annuel est proche de l'assolement théorique et, d'autre part, si l'assolement annuel évolue effectivement lorsque l'assolement théorique change. Là encore, un processus Monte Carlo a permis de tester une dizaine de fois l'évolution des assolements pour chacun des systèmes de production. La figure 7b met en évidence, pour le système « mixte bovin+volaille » par exemple, que l'assolement annuel est tantôt supérieur, tantôt inférieur aux valeurs théoriques avec des écarts faibles, inférieurs à 5%. Ils montrent des variations interannuelles de l'assolement peu éloignées de l'assolement moyen, conformément à la réalité : les rotations culturales pratiquées par l'exploitant ont lieu sur des parcelles de taille différentes, engendrant des variations annuelles des surfaces cultivées. Ils rendent

également bien compte de l'incidence de la réforme de la PAC sur l'évolution de l'occupation des sols.

Le dernier exemple (figure 7c) présente la création contrôlée de haies suivant des localisations précises (autour des routes et du bâti ; au sein de la SAU) sur une petite zone d'étude vierge de tout bocage. Dans chacun des deux exemples, la création de haies intervient jusqu'à atteindre la situation maximale, où aucune création n'est plus possible. Par exemple (figure 7c, image de droite), les haies ont été créées tant que cela a été possible mais sans jamais être implantées à proximité des routes, bois et zones bâties situées en limite et non au sein *stricto sensu* de la SAU.

Au final, différents tests de sensibilité ont été réalisés sur l'ensemble des actions qui interviennent dans l'évolution du paysage agricole bocager. On distingue des tests réalisés pour évaluer la modélisation des mécanismes, la simulation de l'évolution et la mise à jour des objets spatiaux. Ils se sont avérés concluants, conférant un fort degré de réalisme à la simulation dynamique du paysage bocager par la plateforme L1.

4.2. Evolution dynamique et spatialement explicite du paysage entre 1981 et 1998

La situation de 1981 constitue le paysage initial des simulations réalisées jusqu'en 1998. Un des résultats produits à partir des simulations est la création d'une animation (sous forme de film) qui permet d'analyser localement l'évolution spatiale et temporelle du paysage. D'autres résultats, tels que l'évolution des surfaces occupées par les différents types d'occupation du sol ou l'évolution de la densité bocagère, sont présentés sous forme graphique (Figure 8),

L'évolution de la répartition des modes d'occupation des sols montre une baisse de la place des prairies dans l'assolement jusqu'en 1985 passant de 55% à 49% de la surface totale du bassin versant (Figure 8a). Elle s'explique par deux facteurs : (1) entre 1981 et 1983, une petite proportion de prairies permanentes ont été abandonnées et ont évolué en friches ; (2) entre 1981 et 1985, quatre exploitations ont été reprises par des exploitations voisines dont le système de production présente un assolement ayant une proportion de prairies inférieure (une exploitation caractérisée par un système de production extensif s'est orientée vers un système de type « bovin lait et/ou viande », deux exploitations en système de production extensif sont passées à un système de type « mixte bovin+volaille », une exploitation appartenant à un système de type « bovin lait et/ou viande » s'est réorientée vers un système de type « mixte bovin+volaille »). Entre 1986 et 1998, les surfaces consacrées aux prairies sont restées relativement stables, autour de 50% de la surface totale, alors qu'une baisse était supposée intervenir à partir de 1992 suite à la réforme de la PAC. Cela s'explique là encore par l'évolution des exploitations agricoles : deux grandes exploitations de 40 et 50 hectares ont adopté, suite à cette réforme, un système de production de type extensif ou biologique, compensant la légère baisse de la proportion de prairies des autres exploitations. Ceci confère une

impression de stabilité des surfaces occupées par les prairies entre 1985 et 1998 (Figure 8a). En conséquence, les surfaces occupées par le maïs et autres céréales ont peu évolué sur l'ensemble de la période. La réalisation d'une dizaine de simulations à partir du tirage aléatoire de l'âge des cultures et des rotations stochastiques, a débouché sur des résultats légèrement différents, mais témoignent des mêmes tendances lourdes d'évolution, c'est-à-dire une stabilité des surfaces en céréales sur l'ensemble de la période, une augmentation des surfaces en maïs et une baisse des prairies jusqu'en 1985 suivi d'une période où leurs proportions sont restées stables.

L'évolution du bocage montre une baisse de la densité bocagère dont la vitesse de régression diminue légèrement à partir de 1994, date du début d'implantation du néo-bocage dans le cadre du programme Harmonie (figure 8b). La régression du bocage représente en terme de densité une perte de 15 m/ha, correspondant à la disparition de 275 haies.

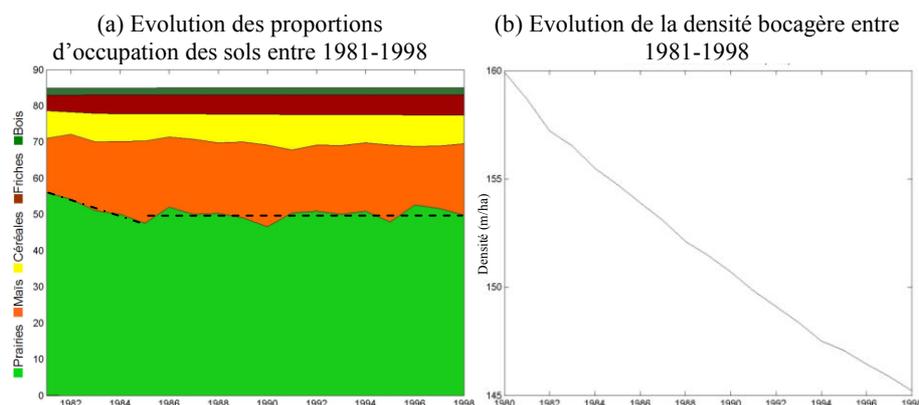


Figure 8. Evolution temporelle de l'occupation du sol et du bocage du bassin versant du Lestolet entre 1981 et 1998 simulée par la plateforme L1

4.3. Comparaison « paysage simulé / paysage réel » en 1998

La comparaison du résultat de la simulation avec la situation réelle en 1998 est réalisée sur chacune des composantes du paysage (occupation agricole des sols, bocage, zones humides), en fonction des superficies estimées et observées et de leur localisation (Figure 9).

4.3.1. Des situations différentes mais aux proportions similaires

A l'échelle du bassin versant¹, les surfaces occupées par les prairies, le maïs et les autres céréales simulés pour l'année 1998 atteignent respectivement 49%, 19% et 8%. Dans la réalité, ces surfaces ont des valeurs très proches : 41% de prairies, 14% de maïs et 13% de céréales. Ces variations s'expliquent par la stochasticité des rotations culturales, mais aussi par une sous-estimation des céréales au profit du maïs et des prairies. Ainsi, la figure 9 révèle, au Nord du Lestolet, dans sa partie centrale, une forte lacune en céréales au niveau d'une exploitation porcine. Le changement des assolements moyens du système porcin suite à la réforme de la PAC de 1992 révèle que le mode de simulation des successions culturales est dans ce cas inadapté car il ne permet pas de simuler des surfaces en céréales/oléo-protéagineux atteignant un total avoisinant les 80%. De plus, la simulation des modes d'occupation du sol pour les exploitations non entières, c'est-à-dire dont la superficie totale n'est pas strictement incluse dans le bassin versant, constitue une source de variation potentielle des proportions de prairies, de maïs et de céréales. Par ailleurs, la figure 9 montre qu'une partie de la surestimation des prairies dans le quart nord-est du bassin versant provient de plantations de boisements, difficiles à prévoir et non modélisé ici.

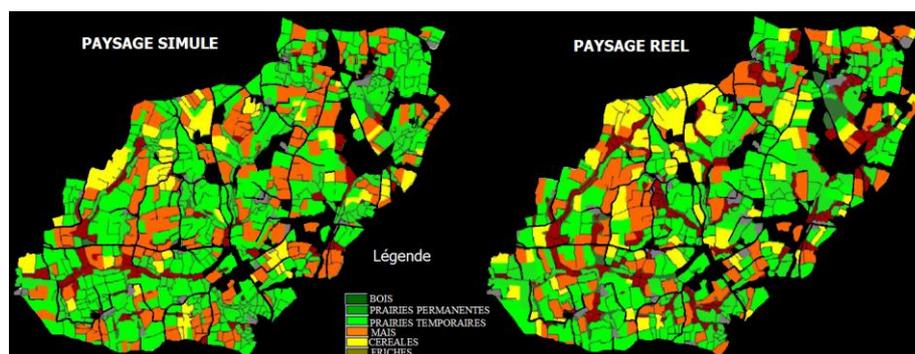


Figure 9. Comparaison « paysage simulé / paysage réel » en 1998

Les parcelles très hydromorphes, les plus susceptibles d'être abandonnées, représentent en 1998 une superficie de 130 ha², composée de 73 ha de prairies permanentes, 53 ha de friches et 3 ha de bois. A la fin de la simulation, les superficies obtenues pour ces mêmes parcelles représentent 80 ha de prairies

1. Le bassin versant se limite ici à l'ensemble des parcelles agricoles pour lesquelles l'exploitant agricole a été identifié.

2. Un grand nombre de parcelles humides n'ont pas été prises en compte car l'exploitant qui est susceptible de les utiliser n'a pas été identifié.

permanentes, 44 ha de friches et 7 ha de bois. Ces résultats montrent qu'une modélisation simplifiée de la fermeture des zones humides produit des résultats assez satisfaisants. Les différences entre simulation et observation au niveau de la superficie et de la localisation des parcelles très hydromorphes en friches et boisées (figure 9) proviennent à la fois des tirages aléatoires des âges des prairies permanentes à l'état initial, mais aussi des décisions individuelles des exploitants agricoles, ces dernières étant difficilement modélisables.

Le bocage présente en 1981 et 1998 des densités respectivement de 145 m/ha et 123 m/ha au format vectoriel. Le passage des données vectorielles au format raster, nécessaire en entrée du modèle, engendre une surestimation de la densité bocagère de près de 15 m/ha en 1981. Cette surestimation n'est pas linéaire, la densité réelle de 1998 étant de 141 m/ha. A la fin de la simulation le bocage atteint une densité de 145 m/ha (figure 8b).

Un autre indicateur, décrivant la distribution spatiale des modes d'occupation des sols, apporte une lecture complémentaire sur la plausibilité du paysage simulé. La répartition des surfaces cumulées de maïs par classes de distance par rapport au réseau hydrographique, adapté de Ruiz *et al.* (2004), donne une indication précieuse sur l'organisation du paysage.

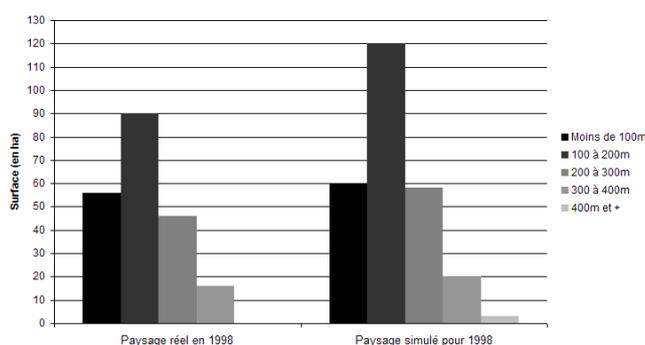


Figure 10. Comparaison « paysage simulé / paysage réel » de la répartition des surfaces cumulées de parcelles de maïs par rapport au réseau hydrographique (par classes de distances) en 1998

Ainsi, bien que la quantité de maïs dans le paysage simulé totalise 75 ha de plus que dans la réalité (soit 5% du bassin versant), la distribution spatiale de ces parcelles est identique (figure 10). La simulation permet de retrouver assez fidèlement la variation spatiale de cette culture. Par exemple, les surfaces en maïs observées et simulées situées dans la zone à proximité du cours d'eau (inférieure à 100 m) sont quasiment identiques (respectivement 56 ha et 60 ha). Ceci montre que

le modèle prend bien en compte l'ensemble des facteurs qui font évoluer l'occupation du sol (hydromorphie, distance au siège...) afin de retrouver une situation réaliste et plausible.

4.3.2. Une structure spatiale semblable

La comparaison du résultat de la simulation avec la situation réelle en 1998 est réalisée cette fois sur la structuration spatiale du paysage à l'aide de deux indicateurs complémentaires.

Le premier indicateur utilisé décrit la répartition des parcelles agricoles par classes de taille. La figure 11 met en évidence que la proportion de grandes (2 à 3 ha) et de très grandes (3 ha ou plus) parcelles est identique. Seules les proportions de petites (moins de 1 ha) et de moyennes parcelles (1 à 2 ha) diffèrent légèrement. Cela provient du tirage aléatoire des parcelles à réunir et de leur taille relative au sein de chaque exploitation.

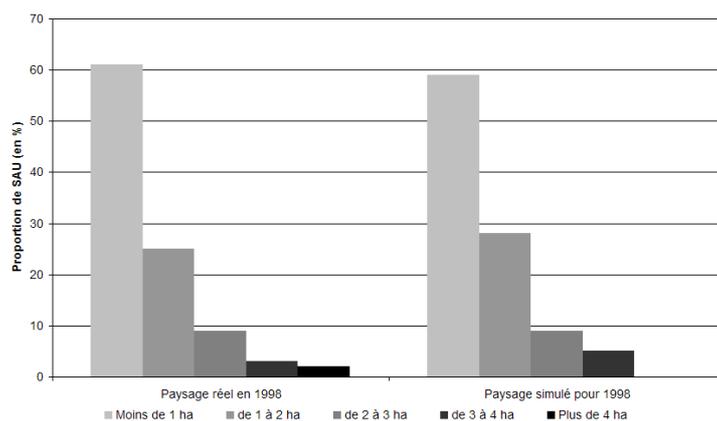


Figure 11. Comparaison « paysage simulé / paysage réel » de la répartition des parcelles par classes de taille en 1998

Un second indicateur, dérivé du premier, présente les proportions de SAU répartie par taille de parcellaire pour chacun des systèmes de production. Ceci permet de vérifier si la structure parcellaire évolue bien de façon différenciée à l'échelle du bassin versant. La figure 12 montre que la structure spatiale issue de la simulation est proche de l'observation en 1998. C'est notamment le cas pour les deux systèmes dominants (« bovin lait/viande » et « mixte bovin+volaille ») sur le bassin versant du Lestolet (25 exploitations). Par exemple, pour le système « bovin lait/viande », on retrouve dans la réalité 52% de petites parcelles (moins de 1 ha), 30% de parcelles de 1 à 2 ha, 10% de parcelles de 2 à 3 ha et 8% de parcelles de

plus de 3 ha et après la simulation 57% de petites parcelles (moins de 1 ha), 28% de parcelles de 1 à 2 ha, 9% de parcelles de 2 à 3 ha et 6% de parcelles de plus de 3 ha. Les différences observées pour les autres systèmes de production proviennent de la faible représentativité statistique des exploitations agricoles. Ces différences sont légères pour le système « bovin bio/extensif » (trois exploitations) et pour le système « porcin » (une exploitation), et sensibles pour les systèmes « mixte bovin+porc » (deux exploitations) et « volaille » (une exploitation).

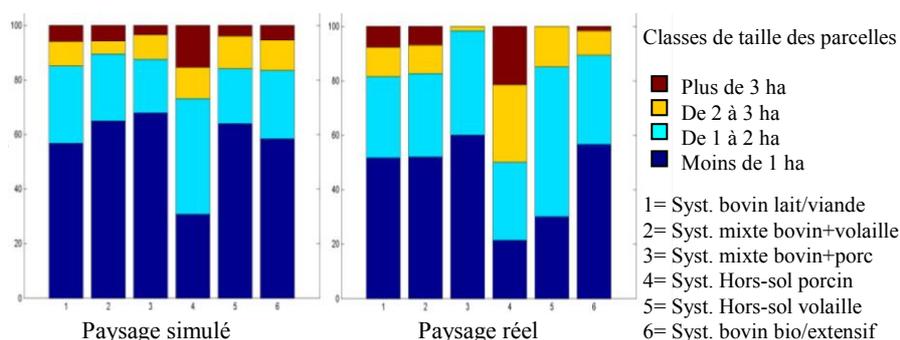


Figure 12. Comparaison des proportions de SAU simulées et observées réparties par classe de taille de parcelles pour les différents systèmes de production en 1998

5. Synthèse et discussion

5.1. Sur la simulation et la validation d'un paysage agricole bocager

L'application développée pour la simulation d'un paysage agricole bocager sur la plateforme de modélisation L1, plateforme de simulation *a priori* la plus adaptée pour travailler à une échelle fine sur ce type de paysage, n'avait pas été complètement testée jusqu'alors sur un paysage réel.

Grâce à la détermination des trajectoires d'évolution des modes d'occupation des sols et des structures paysagères (bocages, zones humides de fonds de vallées) et des facteurs explicatifs des changements observés sur un bassin versant expérimental, ce modèle a pu être optimisé dans le but de simuler des évolutions plausibles et spatialement cohérentes. La mobilisation d'une expertise scientifique a été nécessaire pour paramétrer le modèle et définir les règles d'évolution. Elles sont néanmoins valables pour ce type de paysage et de contexte agricole. De même, la détermination de la situation initiale (structures des exploitations en 1981) a été rendue possible par une collaboration des acteurs locaux et la définition de règles empiriques.

Des tests de sensibilité ont démontré que la plateforme L1 permet de modéliser des actions stochastiques mais réalistes et maîtrisables d'un point de vue quantitatif. D'autre part, les résultats obtenus ont montré que l'évolution simulée des composantes du paysage agricole est en cohérence avec les dynamiques observées. Enfin, la comparaison entre le paysage simulé et le paysage réel en 1998 a mis en évidence un fort niveau de similarité tant pour l'organisation spatiale des composantes du paysage que pour leurs superficies respectives. En effet, l'utilisation d'indicateurs a permis de mesurer le degré de réalisme et la plausibilité du paysage simulé qui diffère de la réalité en raison de la conception même du modèle. D'autres indicateurs pourraient être calculés afin d'enrichir cette validation : fréquence de retour en maïs, indice d'hétérogénéité (Li *et al.*, 1994), etc.

L'utilisation de cette simulation sur de petits bassins versants inscrits dans des contextes agricoles et paysagers très différents est envisageable dès lors que les données nécessaires sont récoltées. Les données indispensables sont les structures foncières des exploitations agricoles totalement ou partiellement incluses dans le territoire étudié. Les données des modes d'occupation des sols et des structures paysagères peuvent être déduites par télédétection. Une application sur un autre site, situé en zone d'agriculture présentant des systèmes de production fondés sur les mêmes cultures principales (prairies, maïs, céréales), est envisageable. Le type de paysage (densité bocagère, étendue des zones humides, ...) n'a pas d'influence sur les performances de la plateformes. Trois autres sites, situés en paysage bocager plus ouvert, ont déjà fait l'objet de simulations avec la plateforme L1. Par contre, son application à des territoires beaucoup plus vastes (supérieurs à 5000 ha) semble toutefois encore limitée par les exigences informatiques du modèle. A l'heure actuelle, la saisie des données sur un paysage tel que le Lestolet (1450 x 1100 pixels, et un nombre de haies et de parcelles très important) nécessite quatre jours, et environ 20 heures pour la production de simulations avec un ordinateur puissant (processeur à 2,4 GHz de fréquence et 512 Mo de mémoire vive).

La validation de l'efficacité et de la souplesse du modèle utilisé et l'évaluation de la plausibilité des résultats obtenus permet à présent d'envisager la réalisation de scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale. La modélisation de l'influence de la réforme de la PAC de 2006 sur les assolements, ou de l'agrandissement des exploitations à l'horizon 2020-2030 à travers la plateforme L1, peuvent permettre d'éclairer les évolutions futures des modes d'occupation et d'utilisation des sols de façon spatialisée et quantifiée à l'échelle d'un territoire enclin à de forts enjeux de gestion. Ces résultats, couplés avec des modèles hydrologiques ou écologiques, confèrerait à cette démarche une dimension d'outil d'aide à la décision pertinente : par exemple, dans le contexte de la Directive Cadre sur l'Eau, les gestionnaires de l'eau pourraient anticiper des évolutions futures. La reconquête et la gestion durable de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques tiendraient compte à la fois du niveau local et d'une vision à moyen ou long terme. Cette démarche peut aussi intéresser des organismes agricoles et/ou publics pour adapter par exemple leurs politiques d'installation de jeunes agriculteurs ou d'acquisition foncière.

5.2. Sur l'apport de la simulation à la compréhension des changements

Un des apports majeurs de la simulation dynamique est la possibilité de révéler l'influence de variables clefs, cachées, explicatives des changements observés dans la réalité entre deux dates. L'évolution des modes d'occupation des sols sur le Lestolet entre 1981 et 1998 s'explique essentiellement par l'évolution des exploitations (structure spatiale, système de production) et par la réforme de la PAC. Cela n'avait pas pu être découvert lors de la détermination des facteurs explicatifs des changements observés à l'échelle du bassin versant (Houet et Hubert-Moy, 2004). Par conséquent, ceci illustre l'intérêt de modéliser les processus intervenant à différentes échelles qui engendrent des changements dans le paysage (rotations culturales, arasements, ...). Les interactions entre ces changements engendrent une évolution non linéaire d'un territoire, qui n'est pas toujours visible à une échelle plus grossière, où ces changements sont agrégés, comme celle du bassin versant.

Un autre apport des simulations dynamiques et spatialement explicites des paysages agricoles réside dans la compréhension des processus qui font évoluer le paysage. L'étude des écarts constatés par rapport à la réalité, communément appelée analyse des résidus, témoigne de certaines carences au niveau de la simulation des processus étudiés. Par exemple, la trop faible place accordée aux céréales dans la simulation par rapport à la réalité entraîne une inadaptation des rotations culturales modélisées pour représenter convenablement l'assolement du système porcin après la réforme de la PAC de 1992. Les améliorations à apporter au modèle sont identifiées rapidement grâce à la simulation du paysage. De nouveaux développements de la plateforme, telle que l'introduction d'une nouvelle rotation culturale basée sur les céréales et les oléo-protéagineux, devrait ainsi permettre d'accroître légèrement le degré de plausibilité des simulations.

5.3. Sur la démarche méthodologique de simulation dynamique et spatialement explicite d'un territoire

La simulation dynamique et spatialement explicite d'un paysage, qu'il soit agricole ou non, bocager ou non, nécessite d'adopter une approche méthodologique rigoureuse, organisée suivant quatre points :

- (1) L'identification et l'analyse des trajectoires d'évolution du paysage étudié. Cette phase a pour but de constituer une base de données (cartographiques et alphanumériques pour quantifier les changements passés) sur les composantes du paysage qui sont étudiées. Elle permet aussi de comprendre comment et où le changement a lieu.

- (2) La détermination des facteurs explicatifs des changements. Elle doit permettre d'identifier les échelles auxquelles ils se produisent, et les processus qui les régissent. Au terme de ces deux premières phases, étroitement liées et nécessitant parfois quelques allers et retours, on est en mesure d'identifier les besoins en matière

de modélisation et de désigner la plateforme la plus adaptée, de modéliser et de structurer l'imbrication des processus.

- (3) Le développement du modèle de simulation, intégrant les processus (en s'appuyant sur les phases 1 et 2) et les indicateurs pertinents pour étudier l'évolution spatiale et temporelle du paysage.

- (4) La validation du modèle.

Le terme de processus est ambigu. Dans ce travail, seuls les processus qui font évoluer le paysage ont été pris en compte. Les décisions humaines ont été modélisées de façon très simplifiée. Par exemple, l'influence de la réforme de la PAC de 1992 se traduit essentiellement par l'évolution de l'assolement. C'est bien la conséquence de cette décision humaine sur le paysage, contrainte par les forçages naturels, qui a cherché à être simulée.

La modélisation des processus influençant les décisions humaines, à travers des méthodes telles que les SMA (Système Multi Agents) par exemple, constitue une voie de travail intéressante. Cela permet d'envisager la modélisation des dynamiques d'évolution des systèmes de production (assolement, adoption d'un nouveau système) face à de futures réformes par exemple, ou encore la modélisation des dynamiques d'évolution des exploitations agricoles (intégration de contraintes socio-économiques, réglementaires... au moment de reprises d'exploitations). Il convient alors de savoir ce qui est recherché : la simulation spatialisée à l'échelle locale d'images plausibles du futur dans le cadre de scénarios prospectifs contrastés ou la reproduction de l'évolution tendancielle la plus proche possible de la réalité?

6. Conclusion

Le principal objectif de ce travail visait à évaluer l'efficacité et la souplesse du modèle développé pour simuler de façon plausible l'évolution d'un paysage agricole bocager avec la plateforme L1. La comparaison des simulations effectuées sur une période passée (1981-1998) et sur un territoire réel (le bassin versant du Lestolet) avec les changements observés sur la même période a permis d'estimer la souplesse et l'efficacité du modèle développé. Cette estimation a été rendue possible par l'utilisation de nombreux tests de sensibilité et d'indicateurs paysagers, le but n'étant pas de reproduire le paysage réel, mais de produire des simulations plausibles du paysage agricole.

L'intérêt d'un tel modèle réside dans la production d'images plausibles du futur à une échelle fine, qui vont découler de scénarios prospectifs tendanciels ou contrastés. Le couplage de ces simulations avec des modèles hydrologiques ou écologiques devrait permettre de mesurer l'impact des changements d'occupation du sol et de structures paysagères sur l'environnement, par exemple sur la qualité des eaux, la biodiversité ou encore sur l'érosion des sols.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier le Syndicat Mixte de Kerné Uhel et la Chambre d'agriculture des Côtes d'Armor pour les données mises à disposition sur le bassin versant du Lestolet. Nos remerciements s'adressent également à l'Institution Interdépartementale du SAGE Blavet pour la mise à disposition des données statistiques des Recensements Généraux de la Population (INSEE) et des Recensements Généraux Agricoles (ONIC) et des données cartographiques (orthophotoplan). Enfin, nous adressons notre reconnaissance à Laurence Hubert-Moy du laboratoire COSTEL, Bernard Clément du laboratoire ECOBIO UMR 6553 (Rennes), Jacques Baudry de l'INRA-SAD Armorique (Rennes), Xavier POUX du bureau d'études AScA (Paris) et aux deux relecteurs anonymes pour leurs éclairages scientifiques et leurs conseils méthodologiques pertinents.

7. Bibliographie

- Antona, M., Bousquet, F., LePage, C., Weber, J., Karsenty, A. and Guizol, P., Economic theory of renewable resource management: A multi-agent system approach. - In: *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, 1998, p. 61-78.
- Baker J., Hulse D., Gregory S., White D., Van Sickle J., Berger P., Dole D., Schumaker N., "Alternative futures for the Willamette river basin, Oregon", *Ecological Applications*, vol. 14, n°2, 2004, p. 313-324.
- Baudry, J. and Thenail, C., "Interaction between farming systems, riparian zones and landscape patterns: a case study in western France", *Landscape and urban planning*, vol. 60, 2004, p. 121-129
- Canévet C., *Le modèle agricole Breton, Histoire et géographie d'une révolution agro-alimentaire*, Ed. PUR, 1992.
- Caubel V., Grimaldi C., Mérot P. and Grimaldi M., "Influence of a hedge surrounding bottomland on seasonal soil water movement", *Hydrological processes*, vol. 17, 2003, p. 1811-1821.
- Clément B. et Maltby E., « Quelques facteurs de la biodiversité végétale dans les prairies humides des corridors fluviaux », *Acta Botanica Gallica*, vol. 143 (4/5), 1996-a, p. 309-316.
- Clément B., Maltby E., Hogan D. and McInnes R., "Relationships between vegetation, hydrology and soil properties in river marginal wetlands of the Torridge basin", *Actes du colloque « Hydrologie dans les pays celtiques »*, Rennes, 8-11 juillet, 1996-b, p. 305-314.
- Clément B., Hubert-Moy L., Houet T., Aidoud A., « Délimiter pour évaluer et spatialiser les fonctions des zones humides de fonds de vallées », *Actes du colloque interrégionale « BV Futur : savoirs et savoir-faire sur les bassins versants »*, Vannes, 20-22 avril 2004, p. 183-184
- Conseil Général des Côtes d'Armor, Lutte préventive et curative contre la prolifération des marées vertes, Conception d'un programme d'actions préventives en Baie de Lannion, Rapport SCE/FEDR/CG 22, BEP II, 1999.

- Corgne, « Hiérarchisation des facteurs de changements de l'occupation hivernale des sols Application au bassin versant du Yar (Bretagne) », *Norois*, vol. 193, 2005, p. 17-29.
- Costanza, R. and Voinov, A., *Landscape simulation modelling. A spatially explicit, dynamic approach*, Springer, New York, 2004.
- De Coligny, F., Ancelin, P., Cornu, G., Courbaud, B., Dreyfus, P., Goreaud, F., Gourlet-Fleury, S., Meredieu, C., Orazio, C. and Saint-André, L., « CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies In Silviculture : An Open Source Simulator for Stands Dynamics Models », *Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference*, September 2002, Harrison, British Columbia, Canada, 2003.
- Fall, A. and Fall, J., "A domain-specific language for models of landscape dynamics", *Ecological Modelling*, vol. 141, 2001, p. 1-18.
- Flatrès P., « L'évolution des bocages: la région de Bretagne », *Norois*, vol. 103, 1979, p. 303-320.
- Flaxman, M. and Steinitz, C., Alternative Futures for the Southern Region of Lake Biwa Kyoto, Japan, 2002, Website : <http://www.gsd.harvard.edu/studios/brc/biwa/index.htm>
- Forman, R. T. T., "Some general principles of landscape and regional ecology", *Landscape Ecology*, vol. 10, 1995, p. 133-142.
- Gauchere C., Baudry J., Auclair D., Houiller F., Etat de l'art de la modélisation du paysage, Rapport interne, INRA SAD-Armorique, 2004-a.
- Gauchere C., Giboire N., Viaud V., Houet T., Baudry J. et Burel F., "A domain specific language for patchy landscape modelling : the Brittany agricultural mosaic as a case study", *Proceedings of the Fourth European Conference of Ecological Modelling*, Bled, Slovenia, Sept. 27 - Oct. 1st, 2004-c.
- Gauchere C., Fleury, D., Auclair, A., Baudry, J. and Dreyfus, P., "Forest modeling based on landscape ecology concepts. Landscape ecology of trees and forests", *Proceedings of the twelfth annual IALE (UK) conference*, 2004-c, p. 309-312.
- He, H. S., Mladenoff, D. J. and Boeder, J., "An object-oriented forest landscape model and its representation of tree species", *Ecological Modelling*, vol. 119, 1999, p. 1-19.
- Houet T. et Hubert-Moy L., Etude diagnostique de l'évolution de l'occupation des sols sur trois sous-bassins versants du Blavet (1952-2002), Rapport Final, COSTEL, Rapport interne, 2004.
- Hubert-Moy L. et Houet T., Etude diagnostique de l'évolution de l'occupation des sols sur trois sous-bassins versants du Blavet (1952-2002) : Rapport intermédiaire, COSTEL, Rapport interne, 2004.
- Hubert-Moy L., Clément B., Lennon M., Houet T., Lefeuvre E., « Etude de zones humides de fond de vallées à partir d'images hyperspectrales CASI : Application à un bassin versant de la région de Pleine-Fougères (Bretagne, France) », *Photo-Interprétation*, n°1, 2003, p. 33-43.
- INSEE, Recensement Général de la Population, Données statistiques, 1982.
- INSEE, Recensement Général de la Population, Données statistiques, 1999.

- Kurz, W. A., Beukema, S. J., Klenner, W., Greenough, J. A., Robinson, D. C. E., Sharpe, A. D. and Webb, T. M., "TELSA: the Tool for Exploratory Landscape Scenario Analyses", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 27, 2000, p. 227-242.
- Li, H. and Reynolds, J.F., "A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps", *Ecology*, vol. 75, 1994, p. 2246-2455.
- Ligneau L., Harmonie 4, Projet de cahier des charges, Etudes collectives globales à l'échelle d'un territoire, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, 2002.
- Mérot P. *et al*, 2000, TY-FON, Typologie fonctionnelle des zones humides de fonds de vallée en vue de la régulation de la pollution diffuse. Rapport de synthèse final PNRZH, septembre 2000, 113 p.
- ONIC, Recensement Général Agricole, Données statistiques, 1979.
- ONIC, Recensement Général Agricole, Données statistiques, 1988.
- ONIC, Recensement Général Agricole, Données statistiques, 2000.
- Regimbeau C. et Clément B., « Dynamique des communautés végétales des prairies humides après abandon dans le bassin versant du Jet (Bretagne, France) », *Acta Botanica Gallica*, vol. 143 (4/5), 1996, p. 411-419.
- Ruiz L., Arousseau P., Baudry J., Beaujouan V., Cellier P., Curmi P., Durand P., Gascuel-Odoux C., Leterme P., Peyraud J.L., Thenail C., Walter C., « Conception de bassins versants virtuels : vers un outil pour l'étude de l'influence de l'organisation spatiale des activités agricoles et du milieu physique sur les flux d'azote dans les bassins versants », *in Organisation spatiales des activités agricoles et des processus environnementaux*, Ed. Monestier P., Lardon S. et Seguin B., INRA Editions, 2004, pp. 337-354.
- Steinitz, C., Rojo H.M.A., Bassett, S. Flaxman, M., Goode, T., Maddock, T., Mouat D., Peiser, R. and Shearer, "Alternative Futures for Changing Landscapes: The Upper San Pedro River Basin in Arizona and Sonora." Washington, D.C., Island Press, 2003.
- Thenail C., Exploitations agricoles et territoires : contribution à la structuration de la mosaïque paysagère. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 1996.
- Thenail C., Le rôle des exploitations agricoles dans l'évolution des paysages : un facteur essentiel des dynamiques écologiques, *Ecologia Mediterranea*, vol. 23, 1997, p. 71-90.
- Thenail C. et Baudry J., « Modélisation des systèmes techniques agricoles contribuant aux dynamiques des structures paysagères : de la parcelle à l'exploitation agricole et au paysage », « *Etude des changements d'utilisation et d'occupation du sol : échelles et modèles* » Séminaire de l'UMR 6554, Rennes, Ed. L. Hubert-Moy, 2001, p. 16-24.
- Verburg P., de Coning G., Kok K., Veldkamp A., Bouma J., "A spatial explicit allocation procedure for modelling the pattern of land use change based upon actual land use", *Ecological Modelling*, vol. 116, 1999, p. 45-61.
- Viaud V., Mérot P. and Baudry J., "Hydrochemical buffer assessment in agricultural landscapes, from local to catchment scale", *Environmental Management*, vol. 34, n°4, 2004, p. 559-573.