

---

# Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique

## Application à la gestion de l'eau en Bretagne

Thomas Houet<sup>\*,\*\*</sup> — Laurence Hubert-Moy<sup>\*\*</sup> — Cyril Tissot<sup>\*\*\*</sup>

\* *Laboratoire GEODE, UMR 5602 CNRS  
Université de Toulouse 2 Le Mirail  
5 allées A. Machado, 31058 Toulouse cedex  
[thomas.houet@univ-tlse2.fr](mailto:thomas.houet@univ-tlse2.fr)*

\*\* *Laboratoire COSTEL, UMR LETG 6554 CNRS, FR 2116 CAREN  
Université Rennes 2 Haute Bretagne  
Place du recteur Henri Le Moal, 35043 Rennes cedex  
[laurence.hubert@uhb.fr](mailto:laurence.hubert@uhb.fr)*

\*\*\* *Laboratoire GEOMER, UMR LETG 6554 CNRS, FR 2195 IUEM  
Technopôle Brest Iroise, Place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané  
[cyril.tissot@univ-brest.fr](mailto:cyril.tissot@univ-brest.fr)*

---

### RÉSUMÉ

Le principal objectif de ce travail est d'élaborer une démarche méthodologique générique pour réaliser des scénarios prospectifs spatialisés à une échelle locale. Cette démarche, fondée sur la méthode des scénarios en prospective, se nourrit des apports méthodologiques utilisés en modélisation de systèmes complexes. Elle comprend quatre phases : la construction de la « base » des scénarios, l'élaboration des scénarios eux-mêmes, leur spatialisation et leur évaluation. Appliquée au contexte de la gestion de l'eau en Bretagne et plus précisément à la mise en place du SAGE du Blavet, elle est illustrée ici à travers un scénario exploratoire et un scénario normatif visant à évaluer l'impact potentiel de la politique agricole commune de 2006 et de l'agrandissement des exploitations agricoles sur l'évolution à moyen terme des modes d'usages des sols. Le scénario exploratoire a été spatialisé avec une plateforme de modélisation dynamique et spatialement explicite (L1), tandis qu'un SIG a servi à élaborer le scénario normatif. L'analyse des scénarios spatialisés ainsi que des impacts sur l'environnement des changements paysagers a montré l'intérêt de ce type de démarche pour mettre en évidence des zones à risque en matière de pollution diffuse et identifier des leviers d'actions pour une gestion durable des ressources en eau. En outre, les scénarios spatialisés constituent un outil de concertation puissant pour faciliter le dialogue entre les acteurs locaux.

### ABSTRACT

The main objective of this work is to elaborate a generic methodological approach to build prospective scenarios spatially explicit at a local scale. This approach is based on the scenario

method used in prospective studies, and uses methodological techniques developed for the modelling of complex systems. The scenario-development process comprises four steps: construction of the basis, scenario building, giving a spatial dimension to the scenarios, and their evaluation. Applied in the framework of water planning in the Brittany region and more precisely of the application of integrated water management procedures based on catchment basins (SAGE) on the Blavet watershed, the approach is illustrated here by the example of one explanatory scenario and one normative scenario, both aiming at evaluating the potential impact of the 2006 Common Agricultural Policy and farms enlargement on futures land uses. We introduced a spatial dimension to the exploratory scenario with a dynamic and spatially explicit modelling platform (L1), whereas the normative scenario has been built with a GIS. The analysis of the spatial scenarios and their environmental impacts has shown the interest of such an approach to identify risk areas and identify key-issues for a sustainable management of water resources. Moreover, spatial scenarios constitute a powerful tool to facilitate stakeholder dialogue.

#### **MOTS-CLÉS**

Modélisation, Prospective, Scénarios, Changements d'occupation et d'utilisation des sols, Paysages agricoles, Analyse spatiale

#### **KEYWORDS**

Modelling, Prospective, Scenarios, Land use and land cover changes, Agricultural landscapes, Spatial analysis

---

### **1. Introduction**

#### *La problématique des changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols à l'échelle locale*

Les changements des modes d'usages des sols résultent de facteurs anthropiques (déforestation, urbanisation, intensification...) et de facteurs naturels (sécheresse, cyclone...), et engendrent des conséquences plus ou moins sensibles sur l'environnement. Ils influent sur la circulation et la biogéochimie de l'eau et de l'atmosphère, modifient les caractéristiques et le fonctionnement de la couverture pédologique et entraînent des variations de la biodiversité (Turner *et al.*, 1995). Des programmes internationaux tels que les programmes LAND ou GAM (Geographic Analysis and Monitoring Program), en raison des conséquences environnementales induites par ces changements (Lambin *et al.*, 1999 ; Muchoney, 2002), ont pour objectif d'apporter des connaissances sur la nature, l'ampleur, les causes et les conséquences de ces changements. Ils portent pour l'essentiel sur des mutations majeures à l'échelle globale. *A contrario*, le plus souvent, les changements subtils issus par exemple de l'intensification de l'utilisation des terres agricoles, non perceptibles à l'échelle globale, sont méconnus ou sous-estimés, bien que leurs conséquences environnementales puissent être sensibles sur le plan économique et/ou sanitaire (Hubert-Moy, 2004 ; UNEP, 2005).

*L'incertitude sur le devenir de l'occupation et de l'utilisation des sols*

La question des changements futurs (à moyen et long terme) des modes d'usages des sols interroge l'ensemble des acteurs du développement d'un territoire. Pour prendre des décisions qui permettent un développement territorial durable, les décideurs font communément appel à la prospective, discipline visant à réduire les incertitudes liées à l'avenir en donnant « un regard sur l'avenir, destiné à éclairer l'action présente » (Hatem, 1993).

*La gestion durable de l'eau : exemple de l'enjeu d'une modélisation prospective à une échelle fine*

Depuis l'adoption en 2000 de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), les gestionnaires de l'eau ont une obligation de résultats visant à rétablir à l'horizon 2015 le « bon état écologique des masses d'eau naturelles et le bon état potentiel des masses d'eau artificielles et profondément modifiées ». La DCE se traduit dans la politique de l'eau en France à travers l'établissement des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Leur élaboration repose sur un volet prospectif qui leur permet d'une part, de tester différents choix stratégiques de gestion à l'échelle des grands bassins versants et d'autre part, de prendre en compte les dynamiques futures d'évolution des modes d'usages des sols et des structures paysagères (bocage, zones humides) à l'échelle locale. En effet, il a été démontré que c'est à l'échelle de la haie et de la parcelle que les processus de dégradation de la qualité des eaux se produisent (Cheverry, 1998, Mérot, 1999 ; Caubel 2001 ; Clément, 2001). Ainsi, la gestion de la qualité de l'eau se pose donc en terme de gestion des activités et des territoires agricoles et requiert d'éclairer leurs devenirs possibles à l'échelle locale.

*Des outils d'aide à la décision en matière de gestion durable à l'échelle locale encore insuffisants*

La « méthode des scénarios » en prospective (Godet, 1992), bien adaptée à la prise en compte de la dimension temporelle des territoires, est régulièrement mobilisée pour des études portant sur la gestion de l'eau au niveau mondial (Alcamo *et al.*, 1998) ou régional (Narcy *et al.*, 2006). Il existe peu d'études prospectives réalisées à des échelles locales, bien que des auteurs (Poux *et al.*, 2001) aient mis en évidence l'intérêt de travailler à cette échelle, notamment pour identifier des enjeux de gestion et des sources de conflits locaux ou encore pour déterminer l'influence de facteurs locaux sur les changements des modes d'usage des sols et des pratiques agricoles. En outre, les travaux prospectifs sont restitués la plupart du temps sous la forme de récits. L'avantage des récits réside dans l'espace de liberté fourni aux lecteurs -représentations mentales- pour prendre conscience des enjeux actuels et futurs des territoires. En parallèle, des modèles, tels que CLUE (Veldkamp and Fresco, 1996) ou Environment Explorer (Engelen *et al.*, 2002), ont été développés et permettent aujourd'hui de spatialiser des situations futures possibles des modes d'occupation des sols à moyen ou long terme (20-30 ans). Cependant, bien qu'ils permettent d'intégrer une vision à long terme, ils ne sont applicables, pour la

plupart, qu'à des échelles nationales ou régionales. Les récits ou les cartes issus de modèles restent insuffisants pour bien localiser les espaces porteurs d'enjeux dans la réalité à l'échelle locale. Ceci est d'autant plus vrai qu'il a clairement été démontré que l'organisation spatiale des modes d'occupation des sols et des structures paysagères, issue des dynamiques des activités agricoles (Thenail, 1996 ; Baudry and Thenail, 2004), a une influence forte sur la dynamique des processus écologiques (Mérot, 1999 ; Burel *et al.*, 2000 ; Baudry *et al.*, 2003). Quelques travaux prospectifs ont cherché à donner une dimension spatiale aux scénarios prospectifs produits (Flaxman *et al.*, 1996 ; Steinitz *et al.*, 2003), mais à une échelle qui n'atteint pas la précision de la parcelle ou de la haie.

L'objectif de ce travail est de mettre en place une démarche méthodologique générique visant à produire des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale. L'approche proposée s'inscrit dans le contexte de la gestion de l'eau en France, et plus particulièrement en Bretagne où les enjeux liés à la qualité des eaux sont très forts. Une définition préalable des concepts et méthodes utilisés en prospective et en géographie permettra de justifier la méthode élaborée, qui sera ensuite détaillée. Des exemples de scénarios prospectifs et leur évaluation illustreront ensuite la pertinence de la méthode qui sera, dans un dernier temps, mise en discussion.

## **2. Modélisation prospective spatialisée à une échelle fine : état de l'art**

Cette partie vise à présenter succinctement les référents théoriques, notamment les convergences conceptuelles entre la prospective et la géographie, les bases méthodologiques d'une démarche prospective, ainsi que les méthodes qui permettent d'intégrer la dimension spatiale dans des études où le temps constitue la dimension principale.

### **2.1. La modélisation de la complexité : entre paradigme de la prospective et objet de recherche en géographie**

La modélisation de la complexité constitue le paradigme de la prospective. La construction d'un scénario prospectif repose sur la prise en compte de l'ensemble des facteurs (sociaux, économiques, géographiques...) et de leurs interactions dans un espace non limité (intégration des relations multi-scalaires) au cours d'une période définie au préalable. La complexité, c'est la « recherche d'une possibilité de penser à travers la complication (c'est-à-dire les inter-rétroactions innombrables), à travers les incertitudes et à travers les contradictions » (Morin, 1990). Le paradigme de la complexité permet de combiner imprévisibilité et prédictibilité et fonde donc la démarche prospective (Piveteau, 1995). En cela, la géographie possède tous les attributs de la complexité : depuis le simple fait de représenter spatialement un monde réel complexe jusqu'à l'intégration dans des modèles, des dynamiques naturelles (biogéographiques, ...) et anthropiques (activités agricoles, jeux

d'acteurs, etc.) et de leurs interactions à différentes échelles qui font évoluer un territoire.

La prise en compte de l'ensemble des relations spatiales et temporelles est un objectif commun à la prospective et à la géographie relevant d'une façon plus générale de l'analyse des systèmes complexes à l'interface Nature / Société : dans le cas de la première, afin de mieux cerner le fait temporel ; dans le cas de la seconde, afin de mieux comprendre le fait spatial. La présentation des méthodes utilisées en prospective et en géographie pour modéliser cette complexité constitue un préalable pour la construction de scénarios prospectifs spatialisés.

## **2.2. Les scénarios prospectifs : méthodologie de construction et typologies**

Les scénarios sont une des méthodes les plus employées en prospective. Formellement, ils consistent en des récits cohérents qui décrivent une ou plusieurs anticipation(s) plausible(s) du futur, relativement à un sujet donné (l'environnement, l'économie, les représentations sociales,...) (Poux, 2003).

### *2.2.1. La « méthode des scénarios » en prospective*

Bien qu'il existe différentes méthodes de construction de scénarios, la plupart s'appuient sur une base méthodologique commune (ou « méta-méthode ») qui a été synthétisée sous l'impulsion de Godet (1992) et dénommée « la méthode des scénarios »<sup>1</sup>. Elle se décompose en deux phases : la construction de la « base » et l'élaboration des scénarios.

La base peut se définir comme « l'image actuelle du système, aussi complète, globale et explicative que possible, à partir de laquelle l'étude prospective proprement dite (c'est-à-dire la construction des scénarios) pourra être mise en œuvre » (Hatem, 1993). La description du système doit prendre en compte la situation à un instant  $t$  et sa dynamique temporelle passée. Le système est défini à travers l'identification des variables principales qui le composent, qui peuvent être à la fois des variables externes (caractérisant l'environnement du système) et des variables internes (caractérisant le système *stricto sensu*). Son analyse doit permettre d'identifier les relations de causalités entre les variables : les variables motrices qui influencent fortement l'évolution du système et les variables « sensibles » pour lesquelles l'évolution future est la plus incertaine. La dynamique du système est déterminée lors d'une analyse rétrospective qui permet de comprendre l'évolution passée, et d'identifier les acteurs et les variables qui ont joué un rôle, ceux qui jouent encore un rôle et ceux qui sont susceptibles de jouer un rôle à l'avenir. A l'issue de la construction de la « base », il doit être possible de définir un certain

---

<sup>1</sup> Nous reprenons ici l'expression de Godet (1992) dont certains éléments fondamentaux apparaissent dès 1977 (Godet, 1977).

nombre de « dimensions d'incertitude ». Hatem (1993) définit une dimension d'incertitude comme « une incertitude considérée comme décisive pour l'avenir du système (ex : l'évolution démographique, un aléa climatique, ...) et dont les réalisations possibles seront utilisées comme hypothèses de base pour la construction de scénarios ». Celle-ci est effectuée selon l'intérêt qu'il peut présenter pour les acteurs concernés et l'apport qu'il peut produire par rapport à d'autres scénarios.

Les scénarios décrivent une évolution possible d'un système entre un état initial et une date à atteindre qui constitue *l'horizon temporel*. Un scénario est fondé sur deux règles : (1) la description synchronique du système à différents moments de son évolution, appelée *images* ; (2) la description diachronique d'une succession d'évènements hypothétiques et des relations de causalité qu'ils entretiennent avec le reste du système, qui constitue *le cheminement*. La construction d'images et de cheminements peut être effectuée à partir de récits et/ou de modèles. Le récit est une manière « intellectuelle » et souple d'établir de façon dynamique les relations causales entre variables du système qui donnent leur cohérence aux scénarios (Poux, 2003). Plus rigides que les récits, les modèles informatiques offrent l'avantage de fournir des données quantifiées et/ou spatialisées à l'aide de simulations, souvent plus explicites que la description qualitative des récits. Enfin, un scénario s'inscrit de façon formelle dans une démarche prospective si et seulement si il répond à quatre critères : la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence (Godet, 1992).

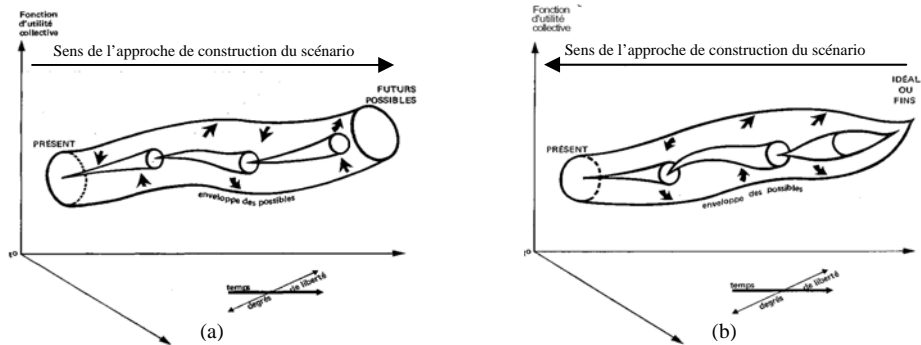
### 2.2.2. Scénarios prospectifs : typologies

Plusieurs typologies de scénarios existent suivant l'approche adoptée lors de la construction du scénario, et le degré d'ouverture des dimensions d'incertitudes (Greeuw *et al.*, 2000) : les scénarios « qualitatifs » (narratifs) *versus* « quantitatifs » (issus de modèles) ; scénarios exploratoires *versus* normatifs et scénarios tendanciels *versus* contrastés (voir encadré ci-dessous et figure 1).

*Scénarios exploratoires ou normatifs. Appelés aussi forecasting et backcasting) ils se distinguent par leur approche de construction. Les premiers partent d'une situation connue, initiale, pour explorer progressivement le futur (Figure 1-a). Les seconds partent d'une norme de désirabilité (image souhaitable ou non) et remontent le futur jusqu'au présent. Le cheminement est alors construit de façon rétrospective (Figure 1-b). Ils éclairent davantage les risques de ruptures et les moyens à mettre en œuvre pour parvenir à des objectifs prédéfinis (éviter telle situation ou atteindre telle autre) alors que les premiers illustrent les tendances les plus vraisemblables.*

*Scénarios tendanciels ou contrastés. Les premiers ou scénarios « sans surprise » (Hatem, 1993) correspondent à une poursuite des tendances actuelles, sans rupture majeure et intègrent des facteurs de changements déjà connus dont la probabilité est certaine. A l'inverse, les scénarios contrastés sont destinés à*

| explorer des hypothèses de rupture, ayant ou non un degré de probabilité faible |



| mais dont l'impact est potentiellement important. |

**Figure 1.** Représentation tridimensionnelle (a) d'un scénario exploratoire et (b) d'un scénario normatif (in Julien et al., 1975)

### 2.3. Apports des approches spatiales à la construction de scénarios prospectifs spatialisés

La modélisation des changements des modes d'utilisation des sols<sup>2</sup> constitue un excellent exemple pour illustrer les différentes méthodes existantes pour traduire la complexité dans sa dimension spatiale et, par corollaire, aider à intégrer la dimension spatiale à la prospective.

#### 2.3.1. La modélisation spatiale de la complexité

La modélisation de la complexité peut être réalisée suivant trois approches différenciées : la représentation spatiale des états successifs, l'approche systémique et la modélisation dynamique.

##### 2.3.1.1. La représentation spatiale des états successifs d'un système complexe

La représentation spatialisée d'un territoire permet de témoigner des états successifs de modes d'occupation et d'utilisation des sols et de leurs changements passés et actuels de façon diachronique. Par exemple, elle peut être effectuée à l'aide de chorèmes (Benoit, 1990), de SIG (Joliveau, 2004), de blocs diagramme

<sup>2</sup> Nous nous référons ici à la définition de Veldkamp and Fresco (1996-a) qui considèrent que l'utilisation des sols « is determined by the interaction in space and time of biophysical factors (constrains) such as soils, climate, topography, etc., and human factors like population, technology, economic conditions, etc. ».

(Michelin, 2000), de vues paysagères virtuelles (Joliveau et Michelin, 2000 ; Joliveau 2001) ou encore à l'aide de données de télédétection (Hubert-Moy, 2004).

#### 2.3.1.2. L'approche systémique en géographie

Il s'agit d'une approche conceptuelle, formalisée ou non sous forme mathématique, décrivant plusieurs processus et leurs interactions. L'analyse systémique a pour intérêt d'appréhender un territoire comme un système dynamique, permettant de comprendre, dans une approche globale, les mécanismes de la dynamique des activités humaines dans un espace géographique donné (Chamussy *et al.*, 1986). L'approche systémique appliquée en géographie cherche ainsi à établir l'ensemble des interactions spatio-temporelles entre des contraintes historiques, économiques, sociales, mentales, physiques, naturelles et un territoire donné. L'ensemble de ces interrelations influence le fonctionnement et la structuration de ce territoire, voire le fonctionnement et la structuration d'autres territoires englobés ou englobants, voisins directs ou éloignés (Marchand, 1996). L'approche systémique constitue la base conceptuelle des modèles de simulation dynamique qui prennent en compte dans leurs processus de modélisation les différentes configurations spatiales de la surface du sol et les actions possibles que l'homme peut effectuer pour modifier l'utilisation du sol (Dale *et al.*, 1993).

#### 2.3.1.3. La modélisation dynamique et spatialement explicite

De multiples modèles ont été développés pour produire des simulations de l'évolution de l'utilisation des sols (Le Ber et Benoît, 1998 ; Briassoulis, 1999 ; Agarwal *et al.*, 2000 ; Veldkamp et Lambin, 2000). Un modèle est dynamique dès lors qu'il intègre la notion d'évolution, qu'elle soit déclinée dans le temps, dans l'espace ou les deux. Certains d'entre eux peuvent être « spatialement explicites » c'est-à-dire que ces modèles sont distribués dans l'espace et « spatialement intelligents ». Ils ont une connaissance plus ou moins poussée de l'environnement qu'ils étudient et utilisent cette connaissance (relations de voisinage et/ou multi-scalaires) dans leur évolution. Trois types de modèles peuvent être distingués : les automates cellulaires (White and Engelen, 1993 ; Batty and Xie, 1994 ; Langlois, 2005), les systèmes multi-agents (Ferber, 1995 ; Sanders *et al.*, 1997 ; Poix et Michelin, 2000 ; Daudé, 2005) et les réseaux neuronaux (Paegelow *et al.*, 2004).

### 2.3.2. Scénarios prospectifs / simulations des changements d'occupation des sols

#### 2.3.2.1. Distinction sémantique

Le couplage entre récits et modèles est de plus en plus courant, les seconds permettant de quantifier les tendances de certaines variables (climatiques, etc.). Ils permettent, à travers les simulations, d'explorer le modèle (Ginot *et al.*, 2006) (analyse de sensibilité, analyse de robustesse) ou encore d'expérimenter un ensemble de combinaisons. Une simulation constituera un scénario prospectif si et seulement si les hypothèses sur lesquelles elle se fonde sont plausibles et cohérentes



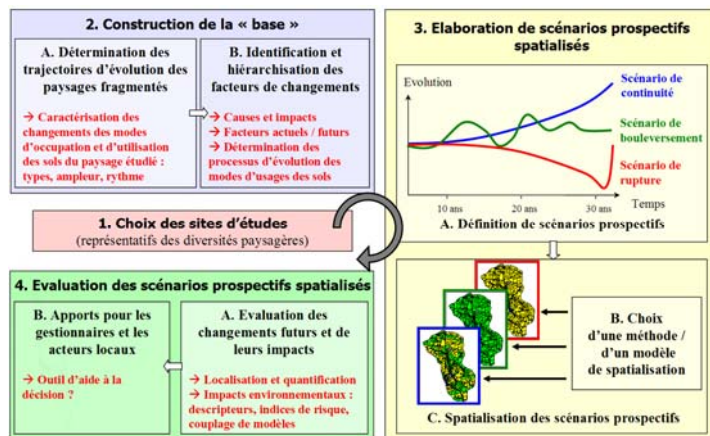
entre elles, c'est-à-dire caractéristiques d'une situation future possible d'un territoire.

#### 2.3.2.2. Les prospectives des changements d'occupation et d'utilisation des sols

L'objectif ici n'est pas de présenter une liste exhaustive des études existantes, mais de faire une synthèse des avancées en matière de spatialisation de scénarios prospectifs à partir d'exemples réalisés dans différents domaines : l'étude du changement climatique (Liu *et al.*, 1999 et 2003 ; Kerr *et al.* 2003), la planification territoriale (Goetz *et al.*, 1998 ; Wang and Zhang, 2001 ; Jantz *et al.* 2003 ; de Nijs *et al.*, 2004 ; Veldkamp et Fresco, 1996-b), l'agriculture (Moore *et al.* 1992 ; Verburgh *et al.*, 2000 ; Ewert *et al.*, 2005 ; Rounsevell *et al.*, 2005 ; Nassauer and Corry, 2004), la lutte contre la dévitalisation du tissu rural (Piveteau, 1995 ; Michelin, 2000), la gestion de l'eau et/ou de la biodiversité (Poux *et al.*, 2001 ; Kersebaum *et al.*, 2003 ; Baker *et al.*, 2004 ; Narcy *et al.*, 2006)... Il apparaît que (1) les études utilisant des modèles dynamiques pour spatialiser et quantifier les changements d'occupation et d'utilisation des sols portent sur des territoires vastes (échelles régionales à continentales), (2) les études qui s'intéressent à des échelles plus fines sont moins nombreuses, généralement sous la forme de scénarios exploratoires et s'appuient exclusivement sur des récits parfois accompagnés par des représentations successives de ces territoires.

### **3. La construction des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale : méthodologie et application dans le contexte de la gestion de l'eau en Bretagne**

La méthode développée pour construire des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale est fondée sur la méthode des scénarios, en intégrant la dimension spatiale tout au long du processus d'élaboration des scénarios (Figure 2).



**Figure 2.** Schéma de la démarche méthodologique d'élaboration de scénarios prospectifs spatialisés

Elle est détaillée dans les paragraphes ci-après et a été appliquée à la problématique de la gestion durable de l'eau en Bretagne, et plus précisément dans le cadre de la mise en place du SAGE du bassin versant du Blavet.

### 3.1. Le choix des sites d'étude

La mise en place du SAGE du bassin versant du Blavet (2000 Km<sup>2</sup>) a constitué un cadre d'application concret à ces questions de recherches. La réalisation de scénarios prospectifs spatialisés à une échelle fine sur des petits sites (1400 ha environ) avait pour objectifs d'évaluer les changements futurs possibles et d'alimenter des scénarios plus globaux (à l'échelle du Blavet) portant sur l'ensemble des thèmes de gestion de l'eau (Alimentation en Eau Potable, gestion des étiages, navigation, pêche, etc.).

Trois petits bassins versant ont été choisis en partenariat avec l'Institution Interdépartementale du SAGE du Blavet : le Lestolet (Côtes d'Armor), le Coët-Dan et le Stang Varric (Morbihan) (Figure 3). Le choix s'est porté sur des sites représentatifs de la diversité paysagère (paysages bocager, d'openfield breton et mixte), agricole (production laitière *versus* production hors-sol, production extensive *versus* production intensive) et des enjeux de gestion de la qualité de l'eau différenciés de l'ensemble du Blavet.



**Figure 3.** Localisation des trois sites d'étude : le Lestolet, le Coët-Dan et le Stang Varric

### 3.2. La construction de la « base »

La construction de la « base » consiste ici à comprendre le fonctionnement d'un système « territoire agricole bocager », à mettre en évidence les variables clefs des changements actuels et futurs et à identifier les processus qui le font évoluer. Elle s'appuie sur deux phases successives : (1) la détermination des trajectoires d'évolution des sites d'étude à l'aide de données de télédétection et de récits élaborés suite à des réunions participatives avec un groupe d'acteurs locaux et d'experts ; (2) l'identification et la hiérarchisation de l'ensemble des facteurs explicatifs des changements mis en évidence à l'aide d'une analyse systémique et d'une étude géostatistique. La démarche méthodologique et les résultats obtenus sont développés en détails dans Houet *et alii* (sous presse).

Les principaux processus et facteurs de changements d'occupation et d'utilisation des sols ont été identifiés lors de l'analyse du fonctionnement d'un territoire agricole bocager. L'exploitation agricole, par ses activités de production, d'entretien et d'aménagement de son territoire, constitue le premier facteur explicatif des changements observés (Thenail, 1997). Les changements intervenant au niveau de la mosaïque des exploitations agricoles expliquent l'évolution du paysage agricole. Se distinguent les dynamiques des structures foncières (reprise d'exploitations agricoles, agrandissement du parcellaire), de l'occupation des sols (changement de l'assolement moyen lié à un type de production, successions culturales, changement de successions culturales), des zones humides de fonds de vallées (changement d'occupation des sols suite à un abandon, diminution par drainage ou extension) et du bocage (création et/ou arasement de haies) (Houet et Gaucherel, 2007). L'évolution du contexte agricole (variations des marchés, réforme des politiques agricoles et environnementales, etc.) contraint l'exploitant à adapter ses activités à son territoire qui lui-même évolue, notamment en raison de la baisse du nombre d'exploitants. Par conséquent, tout facteur ayant une incidence sur

les pratiques des agriculteurs contribue à modifier la composition et l'organisation du paysage.

### **3.3. L'élaboration de scénarios prospectifs spatialisés**

Une fois l'ensemble des processus et facteurs faisant évoluer un paysage agricole bocager identifié, des scénarios prospectifs ont été construits suivant des enjeux de gestion de l'eau différenciés. La méthode utilisée pour spatialiser les scénarios dépend du type de scénario adopté.

#### *3.3.1. L'identification des enjeux liés à la gestion de l'eau à moyen et long terme*

Les enjeux portant sur la gestion durable des ressources en eau ont été déterminés lors d'une réunion participative regroupant des gestionnaires de l'eau (Agence de l'eau, Institution du SAGE Blavet, Syndicat Mixte et collectivités locales) et d'autres acteurs (élus locaux, agriculteurs, chambre d'agriculture). Deux enjeux majeurs ont été définis : (1) la compréhension des processus et facteurs de changements des modes d'occupation et d'utilisation des sols et de leurs interactions ; (2) la délimitation de la gamme des futurs possibles pour contribuer à évaluer les moyens de gestion de l'eau. Répondre à ces deux enjeux requiert de s'appuyer sur des scénarios exploratoires et normatifs. Pour cela, onze scénarios prospectifs ont été produits (Houet, 2006-a) : huit scénarios exploratoires et trois scénarios normatifs. Les scénarios exploratoires, en simulant les processus qui font évoluer un paysage, permettent de localiser et de quantifier les influences possibles de facteurs de changements tels que la réforme de la PAC de 2006 ou l'agrandissement des exploitations agricoles, et de leurs interactions. Les scénarios normatifs ont pour objectifs de produire des situations vraisemblables, fondées sur des hypothèses très contrastées d'évolution du bocage, des zones humides et des modes d'occupation des sols de façon à rendre compte des moyens à mobiliser pour éviter ou atteindre l'une ou l'autre de ces situations et de témoigner de l'efficacité relative de ces actions.

Pour illustrer cette démarche méthodologique, un scénario exploratoire et un scénario normatif sont présentés ici. Le premier repose sur les hypothèses suivantes : la réforme de la PAC de 2006 va inciter les agriculteurs à intensifier légèrement leur mode de production et l'agrandissement des exploitations poursuivra son évolution tendancielle. L'horizon temporel du scénario exploratoire aurait dû se limiter à 2014 qui est la date limite théorique d'application de la réforme de la PAC de 2006. Cet horizon est toutefois trop proche pour témoigner de réels changements. Par conséquent, nous émettons l'hypothèse que la réforme de la PAC sera prolongée jusqu'en 2020 car d'une part, la période 2006-2020 présente une durée d'application similaire à la réforme de la PAC de 1992 (1992-2006) et, d'autre part, l'Union Européenne ne devrait pas remettre totalement en cause ce système d'aides qui a nécessité cinq années d'élaboration. Le scénario normatif

présenté est fondé sur trois hypothèses d'évolution du paysage : une régression du bocage qui s'accélère ; la fermeture quasi-totale des zones humides de fonds de vallées, qui se traduit par une extension des friches et des surfaces boisées ; une réforme de la PAC de 2006 favorisant l'implantation quasi-généralisée des céréales (maïs, blé). L'année 2027 constitue l'horizon temporel de ce scénario: elle correspond à la date de mise en application la plus tardive possible de la Directive Cadre sur l'Eau.

Ces scénarios ont été réalisés sur le bassin versant du Lestolet où les enjeux environnementaux (contamination des eaux par les nitrates) et sociaux (dévitalisation du tissu rural) ont engendré une forte implication de l'ensemble des acteurs. L'année initiale pour les deux scénarios est 1998, date pour laquelle des données exhaustives sur les exploitations agricoles étaient disponibles.

### 3.3.2. *Le choix d'une méthode de spatialisation adaptée*

La spatialisation des scénarios prospectifs a pour objectif de représenter les images du futur avec précision sous forme cartographique. Le choix d'une méthode de spatialisation dépend de la façon dont le temps est pris en compte dans les scénarios.

S'il semble logique de faire appel aux modèles dynamiques pour spatialiser des scénarios exploratoires, il n'existe pas *a contrario*, de méthode qui permette de remonter le temps de façon dynamique afin d'obtenir avec exactitude la configuration spatiale désirée décrite dans les scénarios normatifs. La seule manière utilisée pour y parvenir s'apparente aux analyses de types diachroniques.

#### 3.3.2.1. La méthode de spatialisation de scénarios exploratoires

Les études de Gaucherel *et al.* (2006) et de Houet et Gaucherel (2007), fondées sur une approche comparative des modèles et plateformes de simulations existants, ont montré que la plateforme L1 était la plus adaptée pour spatialiser des scénarios exploratoires au sein de paysages agricoles fragmentés et plus spécifiquement de type bocager. En effet, cette plateforme de modélisation possède l'avantage de pouvoir simuler, de façon dynamique et spatialement explicite, des changements géométriques et attributaires d'objets spatiaux différenciés (linéaires, polygones) et de prendre en compte des relations spatiales de voisinage et multi-scalaires. Son fonctionnement, présenté en détail dans Gaucherel *et al.* (2006), Houet (2006-b) et Houet et Gaucherel (2007), permet de modéliser des changements d'occupation des sols et des structures paysagères à un pas de temps défini par l'utilisateur. Dans notre cas, L1 simule pour chaque année l'ensemble des usages des sols et les facteurs qui les font évoluer à partir d'un « script » décrivant leur occurrence dans le temps jusqu'à l'horizon temporel du scénario. Par exemple, les successions culturales sont simulées annuellement pour chaque exploitation de façon à atteindre un assolement moyen annuel (proportion de prairies, de maïs et de blé) variable selon le système de production et tout en respectant des contraintes géographiques,

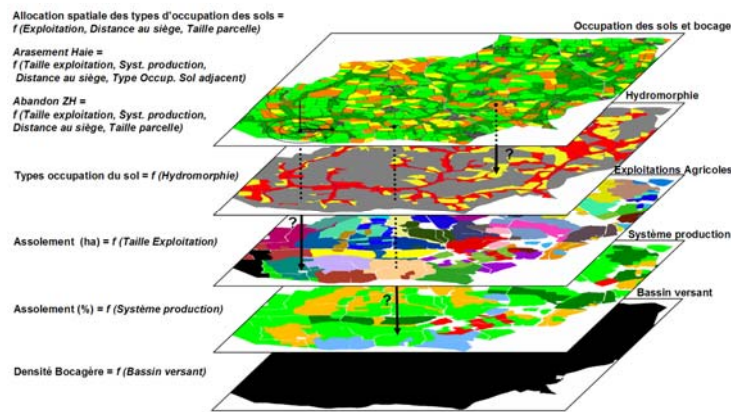
pédologiques et agronomiques. Le script peut également prévoir de façon déterministe qu'à une date donnée, en 2006 par exemple, les assolements des différents systèmes de production changent. Ceci traduit l'influence de la réforme de la PAC sur les modes d'occupation des sols, les assolements futurs ayant été déterminés par des experts. Ainsi, l'ensemble des processus identifiés lors de la construction de la « base » ont été modélisés, sont mobilisables et leurs paramètres modifiables de façon à retranscrire, sous forme de règles successives, le scénario prospectif préalablement construit.

Le modèle utilisé a été validé en simulant l'évolution du paysage du Lestolet entre 1981 et 1998 et en comparant les résultats obtenus avec la situation réelle de 1998 (Houet et Gaucherel, 2007). Au final, les paysages réels et simulés présentent de fortes similarités en terme d'organisation spatiale (surfaces cumulées en maïs par classes de distance aux cours d'eau ; tailles des parcelles) et de composition (proportions des classes d'occupation des sols équivalentes à 5-8% près). Cette comparaison a également permis d'améliorer certains processus tels que les successions culturales pour des systèmes de production spécifiques (Houet, 2006-b). Enfin, l'utilisation de tirages aléatoires pour certains de ces processus ne permet pas d'obtenir avec exactitude la situation réelle mais répond aux objectifs de la prospective en conférant réalisme et plausibilité aux changements simulés.

#### 3.3.2.2. La méthode de spatialisation de scénarios normatifs

Le principe des scénarios normatifs consiste à construire, à l'aide d'hypothèses contrastées, une image du futur à partir de laquelle le cheminement est élaboré rétrospectivement jusqu'à l'image initiale. Il s'agit donc de représenter de façon synchronique une forme spatialisée de ces hypothèses, la dynamique entre deux images étant réalisée à travers une analyse diachronique. A l'inverse des chorèmes et des blocs diagrammes qui sont inadaptés à la production d'images plausibles et réalistes, les SIG offrent plusieurs avantages : (1) ils facilitent l'échange éventuel de données avec les acteurs locaux et gestionnaires de l'eau ; (2) la construction préalable de la « base » (reconstitution des trajectoires d'évolution) à l'aide d'un SIG facilite considérablement la production de ces images, les couches d'information géographiques étant déjà constituées ; (3) les changements des modes d'occupation des sols et des structures paysagères peuvent être rapidement localisés et représentés de façon plausible et réaliste à l'aide de requêtes multicritères, attributaires et/ou spatiales.

La figure 4 présente les requêtes qui ont été utilisées pour spatialiser un scénario normatif. Par exemple, la reprise d'une exploitation ayant un système de production différent de celle en cessation d'activité engendre un changement des types d'occupation des sols des parcelles reprises. Les types d'occupation des sols sont alors alloués en fonction de l'assolement mis en place par l'exploitant reprenneur, de la distance au nouveau siège d'exploitation, de la taille et du degré d'hydromorphie des sols.



**Figure 4.** Utilisation d'un SIG et de requêtes multicritères pour spatialiser un scénario prospectif normatif

Les méthodes de spatialisation de scénarios prospectifs présentées ici portent sur des objets très précis du paysage (la parcelle, la haie). L'utilisation de règles précises, identifiées lors de la construction de la « base » (ex : aucun arasement de haie située entre deux exploitations agricoles) et de tirages aléatoires lorsque plusieurs possibilités existent dans la localisation des changements, confère aux simulations une plausibilité et un réalisme cohérent vis-à-vis d'un horizon temporel lointain (20-30 ans). Ceci signifie également qu'il n'existe pas qu'une image ou carte d'occupation des sols possible pour un même scénario.

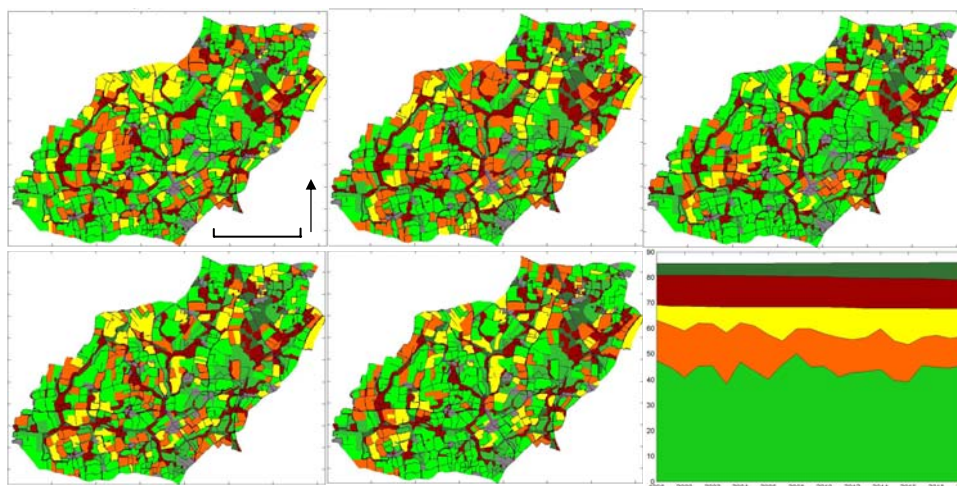
## 4. Résultats

Cette partie présente deux exemples de scénarios exploratoire et normatif fondés sur l'analyse de l'impact potentiel de la politique agricole commune de 2006 et de l'agrandissement de la structure des exploitations agricoles sur les changements des modes d'occupations des sols et des structures paysagères.

### 4.1. Le scénario exploratoire

#### 4.1.1. Le récit : « une stratégie d'adaptation fondée sur les cultures de vente »

Suite à la mise en application de la réforme de la PAC en 2006, les incertitudes face aux nouveaux modes de calculs des aides de la PAC incitent les agriculteurs à



implanter en priorité légèrement plus de céréales (+5%), afin d'assurer l'obtention des aides accordées aux « grandes cultures ». A partir des données existantes sur les exploitations agricoles du Lestolet en 1998 et 2005 (âge des exploitants, SAU, mise aux normes...), il a été estimé que 17 exploitations clairement identifiées sur les 31 existantes en 1998 cesseront leur activité d'ici 2020. Sur ces 17 cessations, 6 exploitations sont reprises par un jeune et les 11 autres par des exploitations voisines. Les reprises d'exploitations vont dans le sens d'une accentuation de la spécialisation dans la production laitière de la région du Haut-Blavet, conformément aux tendances agricoles régionales (Institut de l'élevage, 2004) et aux prévisions faites par les représentants agricoles locaux.

**Figure 5.** *Spatialisation du scénario exploratoire : cartographies (tous les 5 ans) et évolution annuelle des proportions des types d'occupation des sols*

Ce scénario a permis de définir l'ensemble des éléments qui ont été utilisés pour paramétrer la plateforme L1. Les simulations sont réalisées à partir de l'année 1998 où des données exhaustives existent sur le Lestolet, et jusqu'en 2020. Les cartes obtenues et l'évolution des proportions des types d'occupation des sols à l'échelle du bassin versant sont présentées dans la figure 5.

#### 4.1.2. *Les changements des modes d'occupations des sols*

Dans ce scénario, les cultures (maïs, céréales) occupent les mêmes zones qu'en 1998 au sein du bassin versant. La tendance au regroupement des parcelles de cultures est légère. Après 2006, la part de céréales a augmenté de façon non négligeable, passant de 7.5% en moyenne avant 2006 à 11.1% après 2006, soit une hausse de 48 ha. La proportion de surfaces en herbe reste stable avec 43.9% avant 2006 et 43.7% après 2006. Toutefois, une légère décroissance s'observe après 2006 : entre 2006 et 2013, la part en herbe est de 44.2% contre 43.2% entre 2013 et 2020. Le maïs ne totalise plus que 13.2% de la surface du bassin versant après 2006 contre 17,2% avant 2006. La fermeture des zones humides de fonds de vallées se poursuit : il ne reste plus que 23 ha de prairies permanentes humides en 2020, contre 36 ha en 1998.

Si les changements apparaissent peu marqués, comparativement à la situation initiale, ils cachent une réalité plus complexe : la réforme de la PAC peut inciter à intensifier la production de blé, engendrant un changement dans les successions culturales et notamment dans la fréquence de retour des parcelles en maïs. Ceci peut engendrer des conséquences environnementales bénéfiques vis-à-vis des transferts de flux de nitrates : la réduction du nombre d'occurrence en maïs réduit les risques de contamination des eaux de surface et de sub-surface.



## **4.2. Le scénario normatif**

### *4.2.1. Le récit : « L'intensification généralisée et la gestion minimale des structures paysagères »*

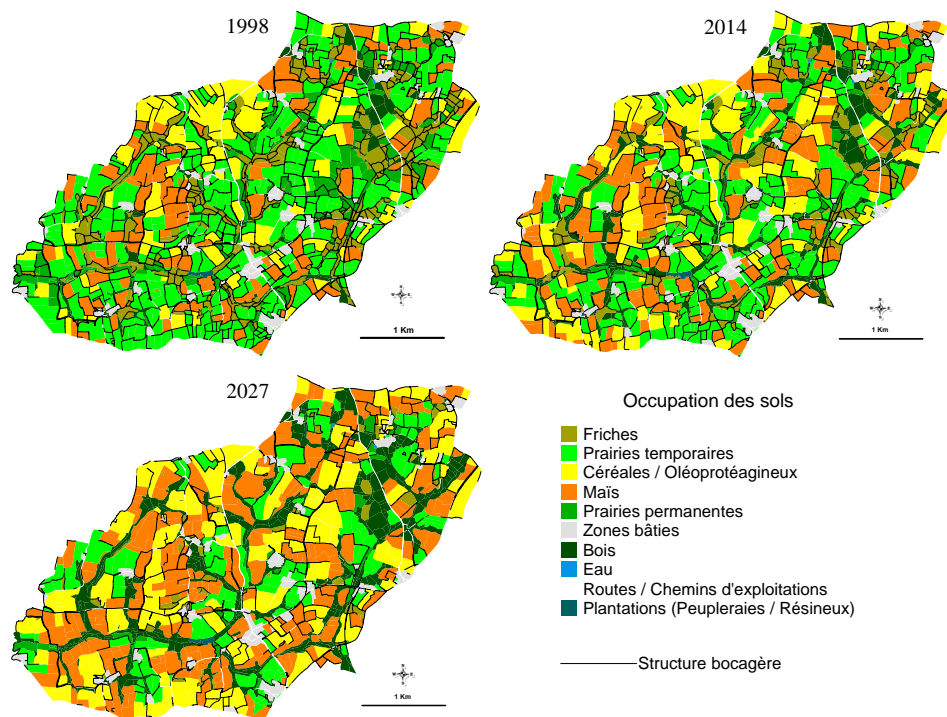
En novembre 2005, les modalités de la PAC de 2006 sont enfin révélées et les agriculteurs découvrent le montant des primes, calculées à partir des productions réalisées entre 2000 et 2002, qu'ils toucheront annuellement jusqu'en 2013-2014. Le système complexe du Droit à Paiement Unique (DPU) incite les agriculteurs à produire au moins la même quantité de céréales pour conserver 100% des aides accordées aux « grandes cultures ». Le prix du blé sur le marché mondial poursuit, en 2006, la tendance à la baisse observée les années précédentes. Les agriculteurs du Lestolet sont avant tout éleveurs et tout concorde pour ne pas engendrer de modification immédiate des assolements au niveau du système de production. Au cours de la même année, le SAGE du Blavet est adopté. La priorité est mise sur les bassins versants les plus intensifs et le Lestolet n'en fait pas parti. Les exploitants agricoles continuent ainsi de gérer leur exploitation comme ils le faisaient avant la PAC 2006, avec toutefois une légère augmentation des céréales (5%) au détriment des prairies temporaires et du maïs afin d'assurer la perception des aides aux « grandes cultures ».

Entre 2005 et 2014, quelques exploitations s'agrandissent de façon non négligeable, suite au départ à la retraite d'un tiers des exploitants du Lestolet. La reprise des quotas laitiers, des DPU et des terres induit une intensification du système de production. Ainsi, la part des prairies, nécessaire aux pâturages et aux fourrages, n'évolue pas proportionnellement aux quotas et seules les prairies permanentes hydromorphes localisées à proximité du siège d'exploitation sont encore utilisées. Les initiatives individuelles d'arasement des haies poursuivent les tendances des 50 dernières années. Les haies situées autour du siège d'exploitation et des prairies qui l'entourent, en limite de propriété ou d'usage entre deux exploitations, ainsi que les haies de ceinture de fonds de vallées ne sont pas concernées.

Dès 2010, suite aux crises pétrolières de 2006 et 2008, la production de biocarburants, marginale avant 2008, devient une nécessité et se généralise. Ainsi, après 2010, on observe une augmentation sensible de la production d'oléoprotéagineux (biodiesel) et de maïs et de céréales (bioéthanol). Les exploitations laitières tendent donc à augmenter la part de cultures dans leur assolement, à réduire au maximum les surfaces de pâturage pour tendre vers une production laitière quasiment hors-sol, telle qu'elle est déjà pratiquée depuis près de 10 ans aux Pays-Bas (Figure 6). En 2014, le système d'aides de la PAC 2006 n'est pas fondamentalement remis en cause et est prolongé jusqu'en 2022 grâce à la présidence de la France à la Communauté Européenne. Les agriculteurs du Lestolet restent sensibles aux préoccupations environnementales de leur bassin versant et s'attachent à avoir les meilleures pratiques de fertilisation possibles, tant que cela est rentable pour eux.

En 2015, sous la pression de la communauté internationale s'appuyant sur des études scientifiques américaines, et en raison de l'absence de résultats scientifiques fondés des laboratoires européens et des cours inflationnistes du pétrole, l'Etat et la Communauté Européenne autorisent l'utilisation de cultures transgéniques. Le modèle américain de la « Corn Belt » des années 2000-2005 se met en place en Bretagne et dans d'autres régions françaises. En l'espace de 2 ans, un réseau d'IAE (Industries Agro-Energétiques) se structure pour absorber cette production massivement adoptée par les agriculteurs bretons. La production céréalière est toutefois maintenue pour percevoir les aides « grandes cultures ». A l'échelle de l'exploitation, la part des prairies se limite au strict minimum pour le pâturage du cheptel bovin afin de respecter le principe d'éco-conditionnalité (bien-être animal).

Les deux sécheresses consécutives de 2018 et 2019, encore plus sévères que celles de 2003 et de 2005, ont fini de convaincre les derniers agriculteurs réticents. Les cultures OGM ont beaucoup moins souffert de la sécheresse. L'agrandissement des exploitations se poursuit et engendre un abandon quasi-total des zones humides de fonds de vallées. Seules les prairies permanentes situées à proximité des sièges d'exploitation n'ont pas évolué en friches. Les anciennes friches ont quasiment toutes évolué en bois. L'augmentation de la taille des exploitations se traduit essentiellement par une hausse de la part du maïs dans l'assolement et une production laitière de type hors-sol. Cela concorde avec une recherche de simplification maximale du travail de la part des exploitants. Avec l'agrandissement continu des exploitations, le bocage devient une véritable gêne. Sur l'ensemble de la période 2015-2027, l'ensemble des haies qui ne sont pas situées autour du siège d'exploitation et des prairies qui l'entourent, en limite de propriété ou d'usage entre deux exploitations et les haies de ceinture de fonds de vallées a été arasé progressivement (Figure 6).

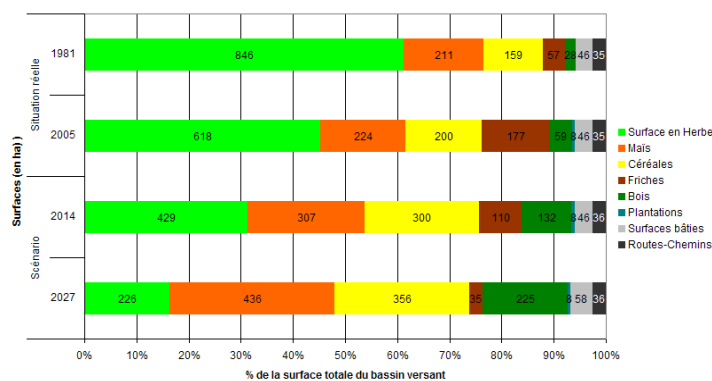


**Figure 6.** Spatialisation du scénario normatif: image initiale en 1998, image intermédiaire en 2014 et image finale en 2027

#### 4.2.2. Les changements d'occupations des sols et des structures paysagères

En 2014, le bassin versant du Lestolet présente ainsi près de 392 ha de prairies temporaires, 37 ha de prairies permanentes (contre 41 en 2005), 307 ha de maïs et 300 ha de céréales. La densité bocagère a sensiblement diminué, atteignant 96 m/ha, soit 133 km de linéaire bocager contre 170 en 2005 : 9 km de structures linéaires boisées ont disparu sur les versants et 28 km ont disparu suite à l'évolution de parcelles (friches ou autres) en surfaces boisées. Les zones humides de fonds de vallées n'ont pas régressé sur le plan foncier mais se sont considérablement fermées (31 ha de prairies permanentes, 57 ha de friches et 132 ha de bois, contre respectivement 40 ha, 123 ha et 57 ha en 1998), entraînant une baisse probable de la biodiversité floristique et faunistique. La concentration en nitrates qui varie entre 40 et 45 mg.L<sup>-1</sup> est tributaire de l'augmentation de la part des cultures à l'échelle du bassin versant. Par contre, un autre problème apparaît sur le Lestolet : la fermeture des zones humides de fonds de vallées a engendré une forte augmentation de la biomasse et, par voie de conséquence, de l'eutrophisation.

En 2027, la majeure partie des terres arables du Lestolet a été convertie en cultures (436 ha de maïs, 356 ha de céréales/oléo-protéagineux). Des prairies subsistent seulement à proximité des sièges d'exploitation (204 ha de prairies temporaires, 22 ha de prairies permanentes). La densité de linéaire bocager a fortement baissé entre 2014 et 2027, atteignant au final 64m/ha, soit une perte de 82 km de haies en moins de 15 ans. Cette perte résulte de l'arasement de 27 km de haies sur les versants et de l'évolution de parcelles (friches ou autres) en surfaces boisées (non différenciation des 55 km de haies). Les zones humides de fonds sont quasi-totalement fermées. Il ne reste que 22 ha de prairies permanentes hydromorphes, contre 190 ha de bois et 8 ha de friches humides. Ainsi, la concentration azotée dépasse régulièrement les 50 mg.L<sup>-1</sup>, les concentrations en phosphore sont alarmantes et provoquent des phénomènes d'eutrophisation de plus en plus fréquents.



**Figure 7.** Evolution des proportions des types d'occupation des sols selon le scénario normatif sur la période 1981-2005

Ce scénario, qui se situe dans le prolongement des tendances actuelles (1981-2005) (Figure 7), représente une évolution aux conséquences dramatiques sur le plan environnemental. Cette évolution est le fruit d'un contexte économique international très contraignant (marché du pétrole, marchés agricoles...), du contexte réglementaire vis-à-vis des OGM destinés à de nouveaux marchés (biocarburants) et de l'absence d'actions concertées entre agriculteurs et gestionnaires de l'eau.

#### 4.3 Evaluation et apport des scénarios prospectifs spatialisés

En prospective, il est impossible de savoir si ce qui est décrit dans les scénarios va se réaliser ou non, la prévision n'étant pas l'objectif poursuivi. Toutefois, la prospective peut faire l'objet de plusieurs types d'évaluations : Elle peut être évaluée (1) *a posteriori*, à travers une démarche appelée rétrospective, la

situation réelle étant alors comparée avec la ou les situation(s) envisagées par les scénarios ; (2) *via* le fonctionnement des méthodes utilisées pour la construction des scénarios (modèles, probabilités...), en vérifiant la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence des scénarios produits par ces méthodes (Houet et Gaucherel, 2007) ; (3) en mesurant l'impact des changements futurs sur l'environnement (impacts sur la qualité de l'eau, la biodiversité...) et la société (coûts sociaux et économiques, etc.) ; (4) à travers l'apport qu'elle produit aux acteurs et décideurs (Piveteau, 1995).

L'ensemble des onze scénarios élaborés sur les trois sites d'étude ont été évalués (Houet, 2006-a) : sur le plan environnemental à l'aide d'un certain nombre d'indicateurs tels que la fréquence de retour en maïs, les surfaces cumulées en maïs par classe de distance au cours d'eau (Ruiz *et al.*, 2004) et à l'aide du couplage avec des modèles distribués de transferts de flux : *Ruicells* (Langlois et Delahaye, 2002 ; *Landbuf* (Viaud, 2004) ; *Odissés* (Bocher et Bedel, 2004) ; sur le plan humain, en présentant les résultats lors d'une réunion regroupant des gestionnaires de l'eau et des acteurs locaux, au cours de laquelle un questionnaire d'évaluation du fond et de la forme des scénarios a été rempli. Si l'échantillon des personnes enquêtées n'est pas statistiquement significatif, le nombre de participants étant limité à 5, il est représentatif de la diversité des acteurs concernés par la gestion de l'eau. Les conclusions tirées de cette évaluation peuvent être considérées comme indicatives. D'une façon générale, les scénarios exploratoires ont été jugés comme potentiellement utiles à très utiles. Les fortes interrogations liées à l'influence de la réforme de la PAC de 2006 et à l'agrandissement des exploitations y contribuent probablement largement. Les gestionnaires de l'eau se sont montrés les plus intéressés par ces résultats. Les acteurs du monde agricole ont semblé moins surpris : certains avaient déjà pressenti l'influence de l'agrandissement des exploitations sur les modes d'occupation et d'utilisation des sols, d'autres pensent que l'ensemble des mécanismes sont plus complexes que ceux qui ont été reproduits par les scénarios et que d'autres facteurs, telle que l'attribution d'une « fonction » à certaines parcelles (« culture », écologique...), pourraient fortement influencer l'allocation spatiale des cultures. Néanmoins, ils ont montrés à travers cette évaluation leur sensibilisation et leur intérêt vis-à-vis des préoccupations propres aux acteurs de la gestion de l'eau.

De la même façon, les scénarios normatifs ont été jugés utiles à la compréhension des différents points de vue (acteurs agricoles et gestionnaires de l'eau), mais surtout très utiles pour mettre en valeur l'importance des interactions entre acteurs pour une gestion durable de l'eau. Ceci montre tout d'abord que les récits, bien que peu synthétiques, constituent un moyen explicite de mettre en évidence le poids des jeux d'acteurs et, par corollaire, les enjeux de la gestion de l'eau ainsi que les moyens nécessaires à sa mise en œuvre. Ceux qui ont majoritairement jugé ces scénarios comme « éclairant sur l'avenir » sont les acteurs du monde agricole. L'hypothèse est que ces scénarios leur apportent une vision globale qui ne se limite pas à leur seule exploitation.

Enfin, les acteurs ont tous témoigné du fait que les représentations spatiales aident à la gestion durable de l'eau car les scénarios spatialisés apportent plus de réalisme d'un point de vue visuel et quantitatif et permettent ainsi de sensibiliser l'ensemble des acteurs concernés. De plus, ils offrent la possibilité de produire des descripteurs de risque qui permettent d'identifier les zones sur lesquelles des opérations d'aménagement ou de sensibilisation peuvent être réalisées (Houet, 2006-b). Cette évaluation a mis en avant un point essentiel de la finalité des scénarios prospectifs : l'opportunité de définir de façon concertée de futurs moyens de gestion de l'eau. C'est ainsi que la discussion entre les acteurs sur les scénarios prospectifs spatialisés et leurs conséquences a mis en avant l'importance d'intégrer les organismes de gestion du foncier (communes, SAFER) dans la gestion de l'eau.

## **5. Discussion**

### **5.1. *L'apport de la dimension spatiale aux scénarios prospectifs***

Les scénarios prospectifs spatialisés, qu'ils soient exploratoires ou normatifs, permettent de quantifier les évolutions possibles d'un paysage agricole bocager, d'identifier les dynamiques spatiales des changements futurs et de localiser des zones porteuses d'enjeux vis-à-vis des ressources en eau. La dimension spatiale n'a pas la même fonction suivant le type de scénario employé. Dans le cas d'un scénario exploratoire, elle met tout d'abord en avant la complexité des changements des modes d'occupation et d'utilisation des terres à travers la simulation dynamique et spatialement explicite des processus qui font évoluer un territoire agricole bocager. Par ailleurs, elle permet de distinguer les influences respectives et les interactions entre les facteurs de changements qui avaient été identifiés comme essentiels pour éclairer l'avenir d'un paysage agricole bocager. Dans le cas d'un scénario normatif, elle apporte un réalisme à des scénarios très contrastés, parfois considérés comme improbables par les acteurs lors de la lecture des récits. Elle contextualise des évolutions futures qui restent plausibles et facilite la prise de conscience des enjeux de la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. La dimension spatiale facilite la concertation et la participation des différents acteurs concernés par la gestion de l'eau.

Par ailleurs, certains auteurs identifient les changements d'utilisation des sols à un facteur déterminant de la dynamique des anthroposystèmes et des écosystèmes (Walker et Will, 1996). Ce constat pose un problème de sélection d'une unité spatiale de référence ayant un rôle d'interface entre l'exploitation économique de l'espace rural et les processus « naturels » d'évolution des paysages. Autrement dit, l'occupation du sol détermine la capacité d'évolution d'une entité paysagère en fonction de processus horizontaux (variabilité des affectations sur un gradient spatial) et verticaux (juxtaposition de différentes pratiques sur un même espace de référence). La modélisation de ces processus à partir de scénarios spatialisés suppose donc que le système développé soit en mesure d'intégrer la théorie

hiérarchique de l'espace (Burel et Baudry, 1999). Les outils de la géomatique (télédétection et SIG en particulier) s'avèrent donc ici particulièrement adaptés à la description spatiale du système « Territoire agricole bocager » à partir de la combinaison de données multi-échelles et multi-critères et à la formalisation de scénarios spatialisés. La dimension spatiale n'apparaît plus comme un simple support illustrant des récits d'évolution mais bien véritablement comme un pilier de la démarche prospective spatialisée, depuis la construction de la « base » (reconstitution des trajectoires d'évolution, identification des changements d'usages des sols, etc.) jusqu'à la production d'*images* du futur sous forme cartographique (utilisation de modèles de simulation spatialement explicite, SIG et requête multi-critères, ...).

Enfin, les enjeux respectifs des acteurs concernés par la gestion de l'eau (agriculteurs, syndicats ou agences de l'eau, etc.) relèvent d'échelles différenciées qui sont probablement à l'origine du manque d'efficacité actuel, voire de conflits préjudiciables. Au terme de la démarche d'évaluation, il apparaît que la complémentarité des scénarios prospectifs spatialisés exploratoires et normatifs leur ont apporté des connaissances essentielles : une meilleure compréhension des processus qui font évoluer les paysages agricoles bocagers pour les gestionnaires et une plus forte prise de conscience d'enjeux « englobants » dépassant les problèmes strictement locaux pour les agriculteurs.

### ***5.2. La démarche prospective spatialisée à l'échelle locale : un outil d'accompagnement et d'aide à la gestion durable de l'eau***

A l'origine, les gestionnaires de l'eau sont apparus démunis d'outils pour mettre en œuvre un plan de gestion durable à moyen terme. Leurs objectifs étaient, pour être le plus efficace possible, d'une part d'éviter les conflits avec les acteurs du monde agricole et d'autre part d'évaluer les évolutions possibles des usages de sols et les moyens d'actions potentiels. Les projections plausibles et réalistes ont permis à la fois de mettre les acteurs en situation et d'introduire une certaine distanciation (temporelle) par rapport à la situation réelle. Ainsi, conformément aux principes de modélisation d'accompagnement (Antona *et al.*, 2005), la démarche employée a favorisé la participation de tous à travers l'amélioration de la connaissance des processus et la sensibilisation des acteurs. L'approche participative constitue un des fondements de la démarche prospective. Cela s'est effectué à travers trois réunions participatives regroupant des acteurs locaux et des experts. La première a visé l'identification des facteurs explicatifs des changements observés lors de la construction de la « base ». La seconde a eu pour objectif de valider « la base » et d'identifier clairement les enjeux des scénarios prospectifs, c'est-à-dire d'identifier ce que l'on cherche à mettre en évidence grâce à eux ? Ainsi, les scénarios produits ont été définis par les besoins des acteurs pour comprendre (1) l'influence possible de certains facteurs clefs de changement des modes d'usages des sols et (2) les moyens à mettre en œuvre pour atteindre ou éviter une situation future. La troisième a permis de leur restituer les scénarios prospectifs, d'en discuter et de les évaluer.

D'autre part, la localisation des zones potentiellement à risque à moyen ou long terme, comme par exemple une haie ayant un rôle fort dans les transferts de flux et risquant d'être arasée ou des parcelles à forte fréquence de retour en maïs, constitue déjà en soi un outil d'aide à la gestion de l'eau. L'évaluation des impacts des scénarios sur les ressources en eau a permis d'identifier des leviers d'actions pour une gestion de l'eau plus durable et plus efficace. Certains de ces leviers tels que la fertilisation raisonnée, la couverture des sols en hiver, la restauration des haies de ceinture, ou encore l'entretien des zones humides de fonds de vallées étaient déjà connus, mais leur intérêt aux yeux des acteurs est conforté, voire renforcé. En revanche, d'autres facteurs ont été révélés à travers cet exercice : la participation à la gestion ou au contrôle de l'évolution des structures foncières des exploitations, les synergies locales à mettre en place et à pérenniser entre les gestionnaires de l'eau et les acteurs locaux dans l'intérêt économique et environnemental de chacun.

### **5.3. La démarche prospective spatialisée : les limites**

Il existe, selon notre point de vue, une relation intrinsèque entre les dimensions spatiales et temporelles mobilisées lors d'une modélisation prospective spatialisée. La réalisation de scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale requiert, pour être plausibles, cohérents et réalistes, un horizon temporel pas trop éloigné. Les incertitudes liées aux futurs facteurs de changements (tel que la réforme de la PAC de 2013 par exemple) et la précision nécessaire à la réalisation de scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale pour la gestion durable de l'eau (échelle de la haie et de la parcelle) ne permettent pas *a priori* d'explorer le futur de façon lointaine (20-30 ans maximum environ). Enfin, l'acquisition des données nécessaires à la modélisation relatives aux exploitations agricoles (limites d'usages, âge des exploitants, mise aux normes des bâtiments, système de production, ...) constitue une limite forte à la réalisation de scénarios portant sur des étendues plus vastes. Enfin, si ce protocole apparaît relativement conséquent à mettre en œuvre, c'est parce qu'il a trait à une question de recherche qu'il a fallu explorer et qui reste encore ouverte pour d'autres problématiques, d'autres territoires. Toutefois, à l'exception des scénarios exploratoires, les moyens techniques nécessaires pour la production de scénarios normatifs restent facilement abordables.

## **6. Conclusion**

Le principal objectif de ce travail consistait à élaborer une démarche méthodologique générique pour réaliser des scénarios prospectifs spatialisés à l'échelle locale. Fondée sur la méthode des scénarios en prospective, cette démarche se nourrit des apports méthodologiques utilisés en modélisation de systèmes complexes afin d'apporter une dimension spatiale aux scénarios. Elle s'organise en quatre phases. La première phase vise à construire « la base » des scénarios. La



deuxième consiste à élaborer des scénarios prospectifs pertinents pour éclairer les futurs possibles du territoire étudié. La troisième constitue la phase de spatialisation des scénarios, la méthode utilisée différant selon le type de scénarios. Dans le cas exposé ici, une plateforme de modélisation dynamique et spatialement explicite (L1) a été utilisée et optimisée dans le cas des scénarios exploratoires, tandis qu'un SIG a servi à élaborer les scénarios normatifs. Enfin, la dernière phase consiste à évaluer les scénarios prospectifs spatialisés, leurs impacts sur l'environnement et leurs apports pour les gestionnaires et les acteurs locaux.

Le contexte de la gestion de l'eau en Bretagne et surtout la mise en place du SAGE du Blavet, a constitué un cadre d'application particulièrement adapté à cette démarche prospective. Cette expérience a permis de mettre en évidence que la localisation de zones à risque vis-à-vis des ressources en eau ainsi que l'identification de leviers d'actions (synergies locales, maîtrise du foncier) sur des sites représentatifs de la diversité des situations agricoles et paysagères confèrent aux scénarios prospectifs spatialisés un rôle d'outil d'aide à la gestion pour les gestionnaires de l'eau et les acteurs locaux.

## 7. Bibliographie

- Alcamo J., Leemans R. and Kreileman E., 1998, *Global Change Scenarios of the 21<sup>st</sup> Century, Results from the IMAGE 2.1 Model*, Pergamon, Elsevier Sciences, 296 p.
- Antona M., D'Aquino P., Aubert S., Barreteau O., Boissau S., Bousquet F., Daré W., Etienne M., Le Page C., Mathevet R., Trébuil G., Weber J., 2005, La modélisation comme outil d'accompagnement, *Natures Sciences Sociétés*, vol. 13, pp. 165-168
- Agarwal C., Green G.L., Grove M., Evans T. and Schweik C., 2000, *A review and assessment of land-use change models : Dynamics of space, time and human choice*, General Technical Report NE-297, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 67 p.
- Baker J.P., Hulse D.W., Gregory S.V., White D., Van Stickle J., Berger P.A., Dole D. and Schumaker N.A., 2004, Alternative futures for the Willamette river basin, Oregon, *Ecological Application*, vol. 14, n°2, pp. 313-324.
- Batty M. and Xie Y., 1994, From cells to cities, *Environment Planning B*, vol. 21, pp. 31-48.
- Burel F. et Baudry J., 1999. *Ecologie du paysage. Concept, méthodes et applications*. Lavoisier, Paris, 359 p.
- Baudry J., Burel F., Aviron S., Martin M., Ouin A., Pain G. and Thenail C., 2003, Temporal variability of connectivity in agricultural landscape: do farming activities helps?, *Landscape ecology*, vol. 18, n°3, pp. 303-314.
- Baudry J. and Thenail C., 2004, Interaction between farming systems, riparian zones, and landscape patterns: a case study in western France, *Landscape and urban planning*, vol. 67, pp. 121-129.

- Benoît M., 1990, La gestion territoire de l'activité agricole dans un village lorrain, *Mappemonde*, n°4, pp. 15-17.
- Bocher E. et Bedel O., 2004, Odissés 1.0 : Outils distribués pour la spatialisation des écoulements superficiels, Didacticiel, *Laboratoire RESO UMR 6590 CNRS*, 27 p., <http://r1.bocher.free.fr/index.php?n=Main.Logiciels>
- Briassoulis H., 1999, *Analysis of land-use change: Theoretical and modelling approaches*, The web book of regional Science, Regional Research Institute, West Virginia University, [http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter2\(Histoverview\).htm](http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/Chapter2(Histoverview).htm)
- Burel F., Baudry J., Thenail C. and Le Coeur D., 2000, Relationships between farming systems and ecological patterns along a gradient of bocage landscapes, in *Consequences of land use changes*, Ed. Mander Ü. and Jongman R.G.H., WIT press, pp. 227-246.
- Caubel V., 2001, *Influence de la haie de ceinture de fond de vallées sur les transferts d'eau et de nitrate*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, 155 p.
- Chamussy H., Le Berre M., Uvietta P., Durand M.G., 1986, Cheminement systémiques du modèle AMORAL à une réflexion théorique en géographie. Grenoble, L.A.M.A., Université de Grenoble, 140 p et article in *Analyse de système en géographie*, (1984), textes réunis par GUERMOND Y., Lyon, Presses Universitaires de Lyon (collection Science des systèmes), 324 p.
- Cheverry C., 1998, *Agriculture intensive et qualité des eaux*, INRA Editions, 298 p.
- Clément J.-C., 2001, *Les zones humides de fonds de vallées et la régulation des pollutions azotées diffuses*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 184 p.
- Dale V.H., O'Neill R.V., Pedlowski M. and Southworth F., 1993. Causes and effects of land-use change in Central Rhondonia, Brazil. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, n°6, pp. 997-1005.
- Daudé E., 2005, *Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle*, in *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*, Ed. Guermond Y., Hermès Science, Lavoisier, pp. 353-380.
- De Nijs T.C.N., De Niet R. and Crommentuijn L., 2004, Constructing land use maps of the Netherlands in 2030, *Journal of Environmental Management*, 72, pp. 35-42.
- Engelen G., White R. and De Nijs A.C.M., 2002, Environment Explorer : Spatial support system for the integrated assessment of socio-economic and environmental policies in the Netherlands, *1st Biennial Conference of the International Environmental Modelling and Software Society*, Lugano, pp. 109-114.
- Ewert F., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Metzger M.J. and Leemans R., 2005, Future scenarios of European agricultural land use: I. Estimating changes in crop productivity, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 107, pp. 101-116.
- Flaxman M., Hulse D.W., Freemark K., Bernert J., Eilers J., White D. and Radosevich S., 1996, Past, Present and Future Stresses on the Ecological Resources of the Mid-Willamette River Basin (Oregon), *11th Annual U.S. Landscape Ecology Symposium, International Association of Landscape Ecology*, Galveston, Texas, USA, <http://ise.uoregon.edu/Muddy/MuddyFramework.html>

- Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions, 522 p.
- Gaucherel C., Giboire N., Viaud V., Houet T., Baudry J. and Burel F., 2006, A domain specific language for patchy landscape modelling: the Brittany agricultural mosaic as a case study, *Ecological Modelling*, vol. 194, n°1-3, pp. 233-243.
- Ginot V., Gaba S., Beaudouin R., Aries F. and Monod H., 2006, Combined use of local and ANOVA-based global sensitivity analyses for the investigation of a stochastic dynamic model: Application to the case study of an individual-based model of a fish population. *Ecological Modelling*, vol. 193, n°3-4, pp. 479-491.
- Greeuw, S. C. H., van Asselt, M. B. A., Grosskurth, J., Storms, C. A. M. H., Rijkens-Klomp, N., Rothman, D. S., and Rotmans, J. 2000. *Cloudy crystal balls: an assessment of recent European and global scenario studies and models*, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 96 p
- Godet M., 1977, *Crise de la prévision, essor de la prospective*, Presses Universitaires de France, 188 p.
- Godet M., 1992, *De l'anticipation à l'action*, Dunod, 390 p.
- Goetz S.J., Smith A.J., Jantz C., Wright R.K. and Prince S.D., 2003, Monitoring and predicting urban land use change: Applications of multi-resolution multi-temporal satellite data, *IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, July 2003, Toulouse, pp. 1567-1569.
- Hatem F., 1993, *La prospective : Pratiques et méthodes*, Economica, série "Gestion", 385 p.
- Houet T., 2006-a, *Occupation des sols et gestion de l'eau : modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (application au SAGE du Blavet)*, Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 368 p.
- Houet T., 2006-b, Modélisation prospective de l'occupation des sols en zone agricole intensive de la France de l'Ouest, *Norois*, n° 198, pp. 35-47.
- Houet T. et Gaucherel C., 2007, « 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*, vol. 17, n°3-4, pp. 489-520.
- Houet T., Hubert-Moy L., Corgne S. et Marchand J. P., Approche systémique du fonctionnement d'un paysage agricole bocager, *L'espace Géographique* (sous presse).
- Hubert-Moy L., 2004, *Occupation du sol et télédétection : de l'inventaire à la modélisation prédictive*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rennes 2 - Haute Bretagne, 327 p. (hors annexes) .
- Institut de l'élevage, 2004, *Réforme de la PAC et production laitière : scénarios d'évolution à l'horizon 2010-2012*, Le Dossier Economie de l'Elevage, 70 p.
- Jantz C., Goetz S.J., Smith A.J. and Shelly M., 2003, Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on land use in the Baltimore-Washington metropolitan area, *Environment Planning B*, 30, pp. 251-271.

- Joliveau T., 2001, Informatique et paysage, *Support de formation - ENGREF, CRENAM / UMR CNRS 5600 - Université de Saint-Etienne*, <http://dossier.univ-st-etienne.fr/crenam/www/formationpaysage/index.html>
- Joliveau T. et Michelin Y., 2001, *Paysages et modèles spatiaux pour la prospective concertée d'un territoire rural*, in *Représentations spatiales et développement territorial*, Ed. Lardon S., Maurel P. et Piveteau V., Hermès, pp. 240-266.
- Joliveau T., 2004, *Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Rouen, 2004, 2 vol. 504 p. + non pag.
- Kerr S., Liu S., Pfaff A.S.P. and Hughes R.F., 2003, Carbon dynamics and land use choices: building a regional scale multidisciplinary model, *Journal of Environmental Management*, vol. 69, pp. 25-37.
- Kersebaum K.C., Steidl J., Bauer O. and Piorr H.-P., 2003, Modelling scenarios to assess the effects of different agricultural management and land-use options to reduce diffuse nitrogen pollution into the river Elbe, *Physics and chemistry of the Earth*, vol. 28, pp. 537-545.
- Julien P.-A., Lamonde P. et Latouche D., 1975, *La méthode des scénarios : une réflexion sur la démarche et la théorie de la prospective*, série "Travaux et recherches de prospective", DATAR, La documentation française, Paris, 131 p.
- Lambin E.F., Baulies X., Bockstael N., Fischer G., Krug T. and et al., 1999, *Land-use and land-cover change (LUCC): Implementation strategy*, IGBP Rep. 48, IHDP Rep. 10, Int. Geosph.-Biosph. Program., Int. Hum. Dimens. Glob. Environ. Change Program., Stockholm/Bonn, 125 p.
- Langlois P., 2005, *Les automates cellulaires pour la modélisation de systèmes spatiaux*, in *Modélisations en géographie : déterminismes et complexités*, Ed. Guermond Y., Hermès Science, Lavoisier, pp. 321-352.
- Langlois P. et Delahaye D., 2002, RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface, *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 12, n°4, pp. 461-487.
- Le Ber F. and Benoît M., 1998, Modelling the spatial organisation of land use in a farming territory. Example of a village in the Plateau Lorrain. *Agronomie: Agriculture and Environment*, n° 18, pp. 101-113.
- Liu S., Loveland T.R. and Kurtz R.M., 2003, Contemporary carbon dynamics in terrestrial ecosystem in the southeastern plains of the United States, *Environmental Management*, vol. 33, pp. 442-456.
- Liu S., Reiners W.A., Keller M. and Schimel D.S., 1999, Model simulation of changes in N<sub>2</sub>O and NO emissions with conversion of tropical rain forests to pastures in the Costa Rican Atlantic zone, *Global biogeochemical Cycles*, vol. 13, pp. 663-677.
- Marchand J.-P., 1996, *Les contraintes naturelles et l'organisation de l'espace in Géopoint 96 « Espace et nature dans la géographie aujourd'hui ? »*, Gpe Dupont, Avignon, pp. 9-15.
- Mérot P., 1999, The influence of hedgerow systems on the hydrology of agricultural catchments in temperate climate, *Agronomie*, vol. 19, pp. 655-669.

- Michelin Y., 2000, Le bloc-diagramme: une clé de compréhension des représentations du paysage chez les agriculteurs? Mise au point d'une méthode d'enquête préalable à une gestion concertée du paysage en Artense (massif central français), *Cybergéo*, n°118, 11 p.
- Moore D.G., Tappan G., Howard M.S., Lietzow R.W., Nadeau C.A., Renison W., Olsson J. and Kite R., 1992, *Geographic modeling of human carrying capacity from rainfed agriculture: Senegal case study*, Technical report, US Agency for International Development, Washington, 51 p.
- Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, E.S.F éditeur, 158 p.
- Muchoney D., 2002, *Geographic Analysis and Monitoring Program - 5-year program plan*, United States Geological Survey, 35 p.
- Narcy J.-B., Poux X. et Houet T., 2006, Méthode et apports d'une intervention prospective dans une problématique de gestion des eaux: le cas du Blavet, in *Qualité de l'eau en milieu rural : savoirs et pratiques dans les bassins versants*, Ed. P. Mérot, Editions Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra, pp. 287-296.
- Nassauer J.I. and Corry R.C., 2004, Using normative scenarios in landscape ecology, *Landscape ecology*, vol. 19, pp. 343-356.
- Paegelow M., Villa N. et Cornez L., 2004, Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne, *Cybergéo*, n°295, pp. 1-19.
- Piveteau V., 1995, *Prospective et territoires: apports d'une réflexion sur le jeu*, Collection Etudes, Série Gestion des territoires, Cemagref Editions, Antony, 298 p.
- Poix C. et Michelin Y., 2000, Simulation paysagère : un modèle multi-agents pour prendre en compte les relations sociales, *Cybergéo*, n°116, pp. 1-10.
- Poux X., Mermet L., Bouni C., Narcy J.-B. et Dubien I., 2001, *Méthodologie de prospective des zones humides à l'échelle micro-régionale - problématique de mise en oeuvre et d'agrégation des résultats*, Rapport scientifique au PNRZH, ASca, 111 p. + annexes.
- Poux X., 2003, Les méthodes des scénarios, in *Prospectives pour l'environnement : Quelles recherches ? Quelles ressources ? Quelles méthodes ?*, Ed. Mermet L., *La documentation française*, pp. 33-50.
- Rounsevell M.D.A., Ewert F., Reginster I., Leemans R. and Carter T.R., 2005, Future scenarios of European agricultural land use: II. Projecting changes in cropland and grassland, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 107, pp. 117-135.
- Ruiz L., Arousseau P., Baudry J., Beaujouan V., Cellier P., Curmi P., Durand P., Gascuel-Oudou C., Leterme P., Peyraud J.-L., Thenail C. et Walter C., 2004, Conception de bassins versants virtuels : vers un outil pour l'étude de l'influence de l'organisation spatiale de l'activité agricole et du milieu physique sur les flux d'azote dans les bassins versants, in *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, Ed. Monestier P., Lardon S. and Seguin B., INRA Editions, 356 p.
- Sanders L., Pumain D., Mathian H., Guerin-Pace F., Bura S., 1997, SIMPOP : a multiagent system for the study of urbanism, *Environment Planning B*, vol. 24, pp. 287-305.

- Steinitz C., Rojo H.M.A., Basset S., Flaxman M., Goode T., Maddock T., Mouat D., Peiser R. and Shearer, 2003, *Alternative Futures for Changing Landscapes : The Upper San Pedro River Basin in Arizona and Sonora*, Island Press, Washington, D.C., 200 p.
- Thenail C., 1996, *Exploitations agricoles et territoires : contribution à la structuration de la mosaïque paysagère*, Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 396 p.
- Thenail C., 1997, Le rôle des exploitations agricoles dans l'évolution des paysages : un facteur essentiel des dynamiques écologiques, *Ecologia Mediterranea*, vol. 23, pp. 71-90.
- Turner B.L., Skole D., Sanderson S., Fischer G., Fresco L.O. and Leemans R., 1995, *LUCS Science Research Plan*, IGBP Rep. 35, HDP Rep. 7, Int. Geosph.-Biosph. Program., Int. Hum. Dimens. Glob. Environ. Change Program, Stockholm/Geneva, <http://www.icc.es/lucc/sciencep/scienceplan.htm>
- UNEP, 2005, *One planet, Many people - Atlas of our changing environment*, Division of Earth Warning and Management, United Nation Environment Programme, UNEP/Earthprint., Nairobi, Kenya, 330 p.
- Veldkamp A. and Fresco L.O., 1996-a, CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects, *Ecological Modelling*, vol. 85, pp. 253-270.
- Veldkamp A., Fresco L.O., 1996-b, CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica, *Ecological Modelling*, vol. 91, pp. 231-248.
- Veldkamp A. and Lambin E.F., 2001, Predicting Land-use change, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 85, n°1-3, pp. 1-6.
- Verburg P.H., Chen Y.Q. and Veldkamp A., 2000, Spatial explorations of land use change and grain production in China, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 82, pp. 333-354.
- Viaud V., 2004, *Organisation spatiale des paysages bocagers et flux d'eau et de nutriments*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Rennes, 281 p.
- Walker B. and Will S., 1996. *Global change and terrestrial ecosystems*. Cambridge University Press, 619 p.
- Wang Y. and Zang X., 2001, A dynamic modeling approach to simulating socioeconomic effects on landscape changes, *Ecological Modelling*, vol. 140, pp. 141-162.
- White R. and Engelen G., 1993, Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns, *Environment Planning A*, vol. 25, pp. 1175-1199.