

Études prospectives appliquées à la dynamique de l'occupation et d'usage du sol et des ressources en eau : État de l'art

[Prospective studies applied to the dynamics of occupation and uses of soils and water resources : State of the art]

Anzoumanan KAMAGATÉ¹, Blaise Yao KOFFI¹, and Michel Amani KOUASSI²

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université Felix Houphouët Boigny 22 Bp 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

Copyright © 2019 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This theoretical article aims to make a state of the art on prospective studies applied to the dynamics of land use and the use of water resources. As a first step, it presents a general overview of prospective studies by providing a refined and consensual definition of foresight, by presenting a brief history of the evolution of prospective studies worldwide, by presenting the scenario method in prospective and the two big families of scenarios (exploratory or forecasting and normative or backcasting). In a second step, he tackles the question of the prospective study and the dynamics of the occupation of the soil and use of the soil. Thirdly, it presents prospective studies and water resources on a given territory.

KEYWORDS: Prospective study, Land use, Water resources, Model, Scenario.

RÉSUMÉ: Cet article théorique a pour objectif de faire un état de l'art sur les études prospectives appliquées à la dynamique de l'occupation du sol et usage du sol et des ressources en eau. Dans un premier temps, il présente un bref historique de l'évolution des études prospectives dans le monde. Dans un second temps, il aborde la question de l'étude prospective et la dynamique de l'occupation du sol et usage du sol. Dans un troisième temps, il présente les études prospectives et ressource en eau sur un territoire donné.

MOTS-CLEFS: Etude prospective, Occupation du sol, Ressources en eau, Modèle, Scénario.

1 INTRODUCTION

La prospective est une discipline à laquelle on a recours afin d'avoir « un regard sur l'avenir destiné à éclairer l'action présent » [1]. Elle repose sur des bases conceptuelles et méthodologiques rigoureuses qui la différencient d'une simple projection dans le futur. Elle n'est pas destinée à prédire l'avenir mais bien à donner, sous certaines hypothèses, un panel de représentations futures plausibles et cohérentes.

Les travaux prospectifs portant sur les types d'occupation et usage des sols et les ressources en eau sont relativement récents [2]. Leur nombre est en large augmentation depuis quelques années, grâce au regain d'intérêt du concept de

développement durable dans le cadre de politiques environnementales ou d'aménagement du territoire, ainsi qu'à l'essor des recherches scientifiques ayant trait au changement global.

Cet article dans un premier temps, relate succinctement l'évolution de la prospective qui est une discipline récente, puis dans un second temps fait un état des études et recherches prospectives portant sur les modes d'occupation et usage des terres. Enfin, il présente les études prospectives et les ressources en eau sur un territoire donné.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 DONNÉES DE L'ÉTUDE

Les données de base sont constituées des articles scientifiques, des thèses et des rapports de recherche. Afin d'identifier et d'évaluer les études scientifiques pertinentes un processus de sélection en trois étapes a été suivi (Fig 1). Une première étape a permis d'identifier 64 études s'inscrivant dans le champ de la modélisation prospective. Dans un second temps, les études redondantes, c'est-à-dire s'inscrivant dans un même projet de recherche ou portant sur un même terrain d'étude à des périodes différentes, ont été supprimées. Enfin, 35 articles scientifiques, thèses et rapports de recherche ont été retenues. Il ne s'agit pas ici d'être exhaustif mais que l'échantillon choisis soit suffisamment significatif afin de permettre une analyse qualitative et quantitative représentative d'une variété de thématiques et d'approches de modélisation prospective.

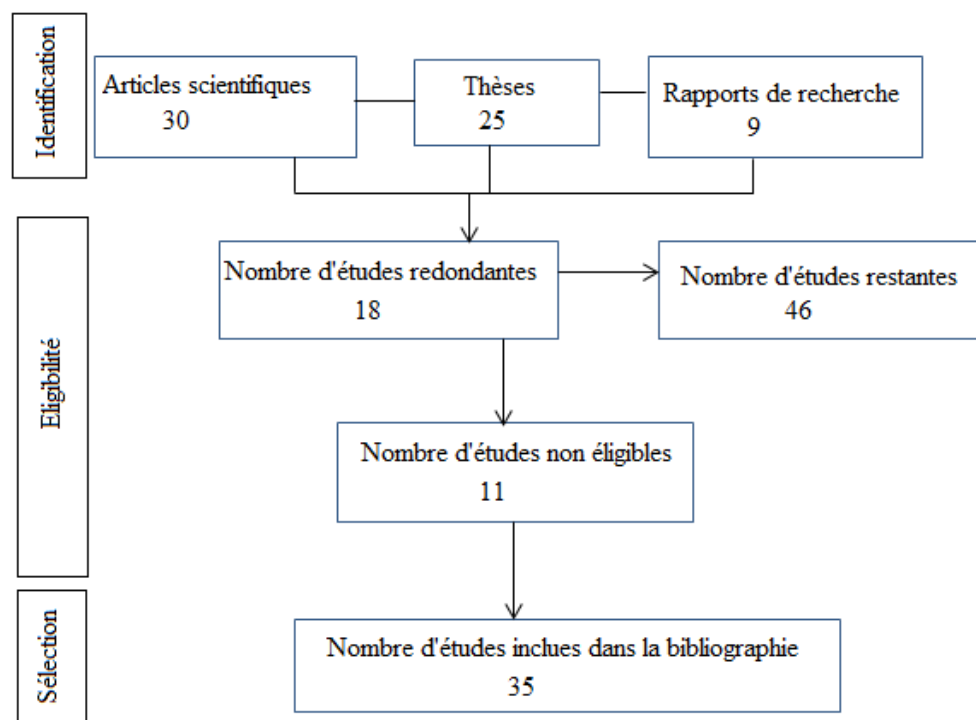


Fig. 1. Processus de sélection des données

2.2 MÉTHODES

La sélection des données a permis de mettre en place la méthodologie. Elle a consisté à faire une brève historique des études prospectives dans le monde, d'identifier les modèles dynamiques de changements d'occupation et d'usage du sol et enfin de présenter les études prospectives appliquées à l'occupation du sol et usage du sol et des ressources en eau sur un territoire donné.

3 RÉSULTATS

3.1 ÉVOLUTION DES ÉTUDES PROSPECTIVES DANS LE MONDE

La prospective prend ses racines dans la pensée anticipatrice qui apparaît dès le premier siècle avant notre ère, dans le *de divinatione* de Cicéron [3]. La pensée anticipatrice regroupe différents types de littératures : les textes divinatoires, prophétiques, conjoncturels (utopiques ou catastrophiques) et la science-fiction. Des concepts visionnaires, nés au 19^{ème} siècle, fruits de l'imagination de différents auteurs, ont pu devenir réels par la suite : métro, sous-marin, pollution urbaine [4], réchauffement climatique [5], ou parcs nationaux [6] en sont des exemples. *Le meilleur des mondes* d'Huxley est un autre exemple très connu de la pensée d'anticipation. Ces œuvres littéraires sont le fruit d'imaginations, parfois fondées sur des logiques rigoureuses, mais exemptes de fondements méthodologiques. De façon générale, deux centres géographiques sont à la base de l'avancement des connaissances sur la prospective à savoir :

❖ Les États-Unis

La démarche prospective contemporaine, destinée à l'analyse stratégique, a véritablement émergé aux États-Unis dans les années 1929. Le premier exercice prospectif a été commandé par le président Hoover en 1929 et restitué en 1933 pour mettre en place des réformes sociales. Mais c'est surtout à la fin de la seconde Guerre mondiale que les études prospectives se sont développées à des fins de stratégies militaires. Au sortir de la guerre, le projet *Research et Development* (Rand) destiné à orienter les choix en matière de défense et de technologie militaires, a donné naissance à un organisme autonome (la *Rand Corporation*) a joué un rôle essentiel dans l'essor de la discipline. Il est rapidement devenu un laboratoire de méthodes de prospective : c'est là que sont conçues la méthode Delphi, les méthodes coûts/avantages et l'analyse systémique [1]. Mais c'est en 1970 que la prospective est sortie de son état embryonnaire avec le club de Rome, regroupant des responsables et intellectuels internationaux, et à l'origine des retentissements engendrés par la publication du rapport *Halte à la croissance* [7]. La France : La prospective a véritablement émergé en France à partir des années 1950 grâce à G.Berger et B.de Jouvenel. Le terme même de « prospective » est créé par G.Berger en 1957 [8], néologisme exprimant que le regard porte vers l'avenir, par opposition au terme « rétrospective » qui regarde vers le passé. C'est lui qui a posé les premiers concepts de la discipline [9] :

- La prospective n'est pas un système théorique, mais un engagement dans l'action.

Le futur est le résultat de nos actions présentes ;

- La prospective est nécessairement une discipline de long terme, car « l'avenir se regarde au loin ».

❖ La France : La prospective a véritablement émergé en France à partir des années 1950 grâce à G.Berger et B.de Jouvenel. Le terme même de « prospective » est créé par G.Berger en 1957, néologisme exprimant que le regard porte vers l'avenir, par opposition au terme « rétrospective » qui regarde vers le passé. C'est lui qui a posé les premiers concepts de la discipline :

- La prospective n'est pas un système théorique, mais un engagement dans l'action. Le futur est le résultat de nos actions présentes ;
- La prospective est nécessairement une discipline de long terme, car « l'avenir se regarde au loin ».

3.2 MODÈLES DYNAMIQUES DE CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'USAGES DU SOL

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. Les modèles dynamiques et spatialement explicites portent une attention particulière à la dimension temporelle d'un système en tenant compte des changements d'occupation et d'usage du sol, de l'irréversibilité des évolutions antérieures et des trajectoires d'évolution prédéterminées [10]. Ces modèles s'insèrent dans une approche systémique, approche privilégiée pour l'étude de systèmes géographiques complexes car tenant compte des interactions entre les phénomènes à différentes échelles temporelles et spatiales. Si les typologies de modèles font l'objet de travaux à part entière [11], [12], [13], [14], [15], nous avons choisi de distinguer trois grands types de modèle : les automates cellulaires, les systèmes multi-agents et les réseaux neuronaux.

UTILISATION DES AUTOMATES CELLULAIRES

Les automates cellulaires ont été introduits pour la première fois par Ulan et Neumann en 1940 et ont été plus largement médiatisés à travers le « Jeu de la vie » développé par John Conway en 1970. Ils sont aujourd'hui fréquemment utilisés dans des domaines d'application variés tels que la géographie, l'écologie, la physique, etc...

Ils sont des modèles permettant de simuler des comportements simples ou complexes d'un système. Ils se définissent par une grille ou un maillage de cellules à n dimensions auxquelles sont attribués un état discret et fini à un instant t et dont l'évolution dépend de règles de transition communes basées sur l'état à $t-1$ de la cellule concernée et sur celui de ses cellules voisines [16], [17]. Les deux notions de voisinage les plus répandues renvoient soit aux huit cellules entourant une cellule centrale, connue sous le nom de voisinage de Moore, ou aux quatre cellules adjacentes définissant le voisinage de Von Neumann.

Ces automates cellulaires se basent sur une approche ascendante, dite bottom-up, où les changements modélisés à l'échelle de la cellule entraînent par la suite l'émergence de schémas globaux à l'échelle du système. Ils peuvent ainsi opérer à différentes échelles spatiales et temporelles au sein d'un environnement hétérogène, en prenant en compte des facteurs d'évolution endogènes et exogènes. Pour modéliser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, [18] ont développé un automate dans lequel les cellules peuvent avoir des formes variables (points, lignes, surfaces) afin de répondre à des contraintes topologiques.

Les facteurs de changements intégrables dans les modèles sont divers et regroupent généralement des variables biogéophysiques, pédologiques, démographiques et climatiques ; des variables économiques, politiques et sociales pouvant être ajoutées dès lors que des informations spatialement explicites sont disponibles [19]. Les règles de transition peuvent également être complétées en associant aux automates cellulaires des méthodes ou des modèles complémentaires, telles que des chaînes de Markov permettant alors d'obtenir des probabilités de transitions entre différents états basées sur l'observation de transitions antérieures [20].

La littérature scientifique faisant appel à des automates cellulaires est riche, comme en témoigne la variété d'analyses des travaux dans ce domaine [21], [22]. En outre, les automates cellulaires sont largement utilisés au sein de modèles de simulation tels que CLUE [23], DINAMICA [24], FORE-SCE [25].

UTILISATION DES SYSTEMES MULTI-AGENTS (SMA)

La référence [26] définit un système multi-agent (SMA) comme « une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et son environnement, qui dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de ses connaissances et de ses interactions avec les autres agents ». Les modèles multi-agents sont ainsi composés d'unités autonomes (ou agents) qui échangent des informations avec les autres agents et le territoire dans lequel ils évoluent. En appliquant des processus bottom-up, ils apportent une meilleure compréhension des systèmes en simulant les actions individuelles d'agents et en analysant le comportement du système résultant des simulations [27].

Les modèles basés sur les SMA développés récemment, permettent de simuler les effets de processus variés sur les changements d'occupation et d'usage du sol tout en tenant compte des interactions entre eux. Ils sont ainsi particulièrement adaptés afin de représenter des interactions spatiales complexes au sein de systèmes géographiques complexes et hétérogènes et de modéliser des processus d'évolution autonomes et exogènes.

De nombreux travaux sur l'étude des changements d'occupation et d'usage du sol ont été ainsi menés dans des domaines variés tels que le suivi du développement des fermes en Amazonie [28] ou l'impact des politiques publiques sur les communautés de fermiers au Vietnam [29]. Les références [30] proposent une analyse détaillée des différents domaines d'application des modèles multi-agents pour le suivi de l'occupation et l'usage du sol.

Les modèles multi-agents sont donc des outils privilégiés afin de tester l'influence d'orientations de gestion contrastées et les effets de prise de décisions spécifiques. En d'autres termes, ils permettent de mieux prendre en compte les usages et changements d'usages du sol dans ce type de modélisation. La force, et la limite, de ce type de modèles est qu'ils se concentrent en général sur les comportements humains et sont donc globalement utilisés dans des situations présentant une forte composante humaine et/ou sociale. En tant qu'unité élémentaire du système en tant qu'acteur, un modèle multi-agents ne permet pas de bien prendre en compte les dynamiques spatiales inhérentes au système s'il n'est pas couplé à un automate cellulaire.

UTILISATION DES RÉSEAUX NEURONAUX ARTIFICIELS (RNA)

Les Réseaux de Neurones Artificiels (R.N.A.) sont des fonctions algébriques non linéaires et bornées qui fonctionnent sur le même modèle que le cerveau humain. Chaque neurone représente une de ces fonctions algébriques [31]. Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communique aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connections entre les neurones se font par des poids.

En résumé, il existe trois grands types de modèles (les automates cellulaires, les SMA, les réseaux neuronaux) qui permettent de réaliser des simulations dynamiques et spatialement explicites. Ils possèdent chacun leurs avantages et leur limites, et le choix doit avant tout dépendre de la problématique étudiée. La figure présente le type de modèles privilégiés selon l'échelle spatiale considérée.

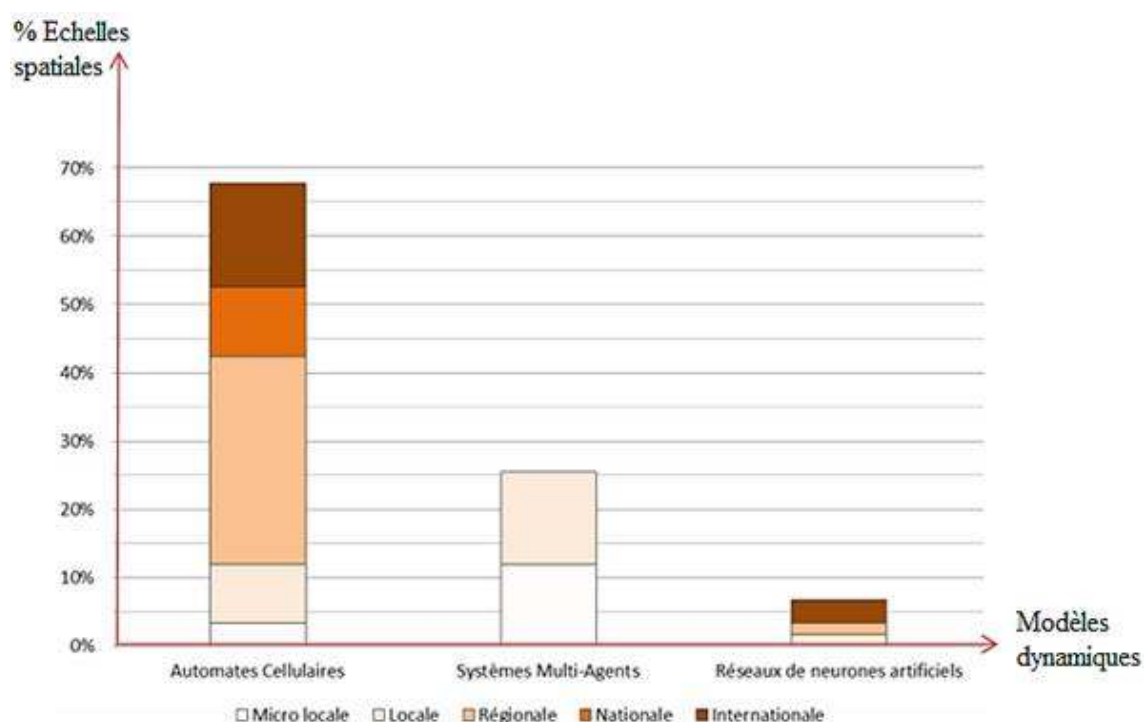


Fig. 2. Types de modèles dynamiques privilégiés selon l'échelle spatiale considérée ([32] modifié)

L'utilisation des automates cellulaires pour la modélisation des changements d'occupation et d'usage du sol se retrouve à toutes les échelles spatiales, ces modèles étant conçus pour reproduire une grande majorité des configurations spatiales ou temporelles existantes [33]. Ils sont majoritairement utilisés aux échelles spatiales larges (56% d'entre eux sont appliqués aux échelles, régionales, nationales et internationales (Fig 2).

Aux échelles spatiales fines (locales et micro-locales), les approches de simulations font exclusivement appel aux modèles multi-agents car ils se présentent comme plus adaptés à la modélisation de dynamiques environnementales liées à des processus individuels (Fig 2).

Les quantités de changement sont essentiellement renseignées par l'utilisateur et proviennent donc de sources externes. Le recours à des modèles externes de type modèles macroéconomiques ou climatiques est rare [34] car plutôt conçus pour simuler des dynamiques socio-économiques et environnementales à des échelles spatiales généralement larges. Les outils informatiques restent également minoritaires [35], [36], les modèles à base d'agents s'insèrent généralement dans des démarches de modélisation participative faisant appel à des connaissances expertes. De fait, la majorité des changements d'occupation et d'usage du sol sont calculées à partir d'approches empiriques développées au cours d'ateliers participatifs [37], [38], d'enquêtes de terrain [39], [40] ou d'analyses expertes [41], [42], [43].

Les réseaux de neurones artificiels, parce qu'ils sont basés sur des méthodes d'auto-apprentissage, ne nécessitent plus ou moins de connaissances a priori sur la distribution statistique des données [2] et donc une compréhension experte et détaillée du système. Ils sont globalement plus utilisés à des échelles spatiales larges (régionale et internationale, Fig 2), peuvent également être utilisés à l'échelle spatiales fines (locales, Fig 2). D'une manière générale, les méthodes employées par les réseaux neuronaux pour la quantification des changements est similaire à celles des automates cellulaires et renvoient à l'utilisation de chaînes de Markov [44], de matrices externes ou de modèles externes [45], [46].

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) présentent des capacités de modélisation supérieures aux automates cellulaires et aux systèmes multi-agents [22]. La non linéarité ; la tolérance au manque d'information ; la résistance aux entrées aberrantes, la possibilité de se passer de pré requis ; la non-unicité du modèle par rapport aux paramètres ; l'adaptabilité ; l'utilisation des données à leur état brut ; l'universalité et l'analogie avec la neurobiologie témoignent de la performance de ce modèle [47], [48]. Afin de simuler l'évolution de l'occupation et l'usage du sol, les modèles peuvent être combinés à d'autres types de modèles et d'approches permettant d'inclure la dimension spatiale au sein des chaînes d'analyse, l'idée d'une approche « taille unique » n'étant pas toujours la plus appropriée pour traiter les dynamiques de systèmes complexes [49]. Les travaux de [50] illustrent ce parti pris. L'utilisation de modèles différents mais complémentaires permettant d'évaluer leur utilité individuelle et la valeur ajoutée d'une utilisation combinée.

Ils mettent l'accent sur le bien-fondé d'approches complémentaires se focalisant sur l'intégration de différents modèles plutôt que sur le développement de modèles individuels [51]. Ainsi, lorsqu'il s'agit de reproduire une variété de processus et de schémas d'évolution modélisables à des échelles spatiales spécifiques, les approches multi-scalaires se présentent comme des solutions particulièrement adaptées [50].

3.3 PROSPECTIVE ET DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL ET USAGE DU SOL

3.3.1 OCCUPATION ET USAGES DU SOL : DISTINCTIONS SÉMANTIQUES

Les termes « d'occupation » et « d'usage » du sol sont largement utilisés au sein des études hydrologiques en général et des travaux de modélisation prospective en particulier. Souvent associés lorsqu'il s'agit d'analyser les résultats de classifications thématiques (cartographies d'occupation et/ou d'usage du sol) produites par les modèles, les termes « occupation » et « usage » présentent des différences sémantiques. L'occupation du sol renvoi généralement aux « propriétés physiques de la surface terrestre » tandis que l'usage du sol fait appel aux « fonctions économiques et sociales de celle-ci » [52], [53]. L'usage du sol fait référence à l'utilisation que les sociétés humaines font d'un espace, tandis que l'occupation du sol désigne le type de couvert végétal ou structurel résultant de cet usage.

3.3.2 PROSPECTIVE APPLIQUÉE A L'OCCUPATION ET A L'USAGE DES SOLS

Les études prospectives portant sur les modes d'occupation et usage des sols ont été abordées par de nombreux chercheurs dans différents domaines. Plusieurs résultats intéressants ont été obtenus par les travaux qui concernent les domaines de l'agriculture et de la planification du territoire. Les horizons choisis ici varient d'un auteur à un autre et certainement fonction des objectifs de ces études. En effet, les horizons vont des plus proches (2020) aux plus lointains (2080). Il existe cependant des études qui traitent de cette thématique sans toutefois se soucier de l'horizon temporel.

L'objectif ici n'est pas de présenter une liste exhaustive des études existantes, mais un panel d'exemples de perspectives appliquées à la modélisation de l'occupation et de l'usage des sols.

Les références [54] ont appliqué la prospective à l'agriculture/ sol en Russie et Ukraine à l'horizon 2050 et ont montré que : (i) à travers un scénario normalisé les mesures d'adaptation pourraient augmenter le nombre de carbone organique du sol (SOC) d'ici 2010-2020 ; (ii) le taux de perte de carbone (C) est sensible aux différents scénarios climatiques ; (iii) le taux de perte de carbone est plus prononcé pour les sols arides sous le scénario d'émission avec une augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ ; (iv) la séquestration de carbone (C) a été permanente pour les sols argileux avec une teneur en C de plus de 2% séquestration du carbone (C) devrait être axée sur des sols fortement fertiles et à texture fine.

Pour ce qui concerne la prospective appliquée au changement global et à l'agriculture, les références [55] ont utilisé les modèles de processus écologique-et économique et ont montré que : (i) le modèle intégré prédit que l'utilisation des terres a des conséquences sur le stockage du carbone pour les scénarios de politiques ; (ii) les prédictions obtenues peuvent être utilisées pour estimer les valeurs environnementales et économiques de la séquestration du carbone dans les forêts tropicales dans le cadre des efforts visant à atténuer les changements climatiques mondiaux.

Les références [56] ont évalué l'impact des scénarios de développement réalisés sur des pays européens par le IPCC (IPCC, 2000) sur les changements de productivité céréalière et de la proportion des terres arables destinées à la production alimentaire à l'horizon 2080. Leurs travaux ont montrés: (i) des avancées importantes au sujet du développement technologique pour le futur usage de superficies agricoles en Europe, (ii) les avancées devront diminuer sensiblement les superficies agricoles de 50%, (iii) le déclin ne se produira pas s'il n'y a pas une forte demande des marchandises agricoles, ou les décisions politiques de certains états à encourager la productivité céréalière.

Les références [57] ont simulés à l'horizon 2030, des changements dans l'occupation/utilisation du sol (agriculture, forêt, zones de pâturage, sols nus et eau) dans le district de Bindura au Zimbabwe sur la base d'un modèle d'automate cellulaire de Markov. Les résultats de la simulation ont indiqué (i) une tendance à la baisse continue des zones boisées et une tendance à la hausse des zones de sols nus, (ii) si les tendances actuelles d'utilisation et de couverture des terres se poursuivent dans la zone d'étude sans mesures holistiques de développement durable, la dégradation des terres sera grave.

La référence [58] propose des simulations de l'expansion urbaine de la ville de Lomé au Togo à l'horizon 2030. Les résultats ont montré (i) une augmentation considérable des surfaces artificialisées qui se fait au détriment des espaces agricoles (ii) une artificialisation qui se produit majoritairement le long des principaux axes routiers.

De même, [59] a évalué l'impact de étalement urbain sur la biodiversité dans l'agglomération de Rennes Métropole à travers le modèle Land Change Modeler (LCM). Les résultats cartographiques ont montrés (i) une régression des forêts et espaces verts à l'extérieur de la tache urbaine contre une augmentation à l'intérieur de cette tâche, (ii) une fragmentation progressive des surfaces artificialisées et des espaces verts (iii) une faible connectivité des espaces verts entre la ville et la périphérie, (iv) l'urbanisation affecte le nombre d'espèces qui diminue sensiblement en allant du périurbain vers l'urbain, (v) l'urbanisation affecte différemment les taxons en fonction de leur capacité de dispersion.

3.4 ÉTUDE PROSPECTIVE ET RESSOURCE EN EAU SUR UN TERRITOIRE DONNÉ

La prospective est utilisée comme démarche visant à construire des futurs possibles afin d'orienter les choix des décideurs de manière stratégique [7]. Une meilleure prise en compte de la dimension spatiale a fait évoluer cette discipline vers la prospective territoriale [60], [61] avec pour objectif de construire une variété de futurs possible afin d'anticiper de manière stratégique l'évolution des territoires et aboutir à un diagnostic où les aménageurs, les acteurs locaux (gestionnaires de l'eau, etc...) prennent une place centrale dans la démarche de création des scénarios.

Tout comme les études prospectives portant sur les modes d'occupation et usage des sols, celles consacrées à la ressource en eau, les horizons choisis varient d'un auteur à un autre et d'une étude à l'autre. Ces horizons d'étude varient du plus proche (2020) aux plus lointains (2050).

Il est cependant bon de signaler que les études prospectives portant sur les ressources en eau sont peu nombreuses et sont généralement mises en relation avec d'autres phénomènes ou thématiques comme les changements climatiques [62], [63], le tourisme [64] ou l'occupation du sol [2].

En effet, au niveau de la prospective appliqué à la relation entre les ressources en Eau- et les changements climatiques, les travaux des références [62] réalisés sur le bassin versant de la rivière Koshi, au Népal montrent que peu d'impacts sont prévus à l'échelle annuelle, au niveau de ce bassin versant; mais à l'échelle d'un sous bassin, ces travaux prévoient que les précipitations augmenteront dans les années 2030 et dans la majeure partie du bassin dans les années 2050.

Quant aux travaux des références [63] qui se sont intéressés au Bassin versant du Sella en Grèce, les futurs changements dans la gestion de l'eau terrestre pourraient réduire le flux sous le climat actuel de 3 ou 5% selon que le changement implique l'exportation d'eau à l'extérieur du bassin versant. Dans cette même thématique, les travaux de Ogouale et al., (2016) réalisés sur le Bassin versant de l'Okpara, au Bénin ont abouti aux résultats suivants : (i) à l'horizon 2050, en référence à la période 1971-2000, l'élévation de la température moyenne serait de 2,4 à 3,5°C et la diminution des pluies en moyenne de 43 % avec une variation spatiale de -18 à -37 % selon les résultats des scénarii A1B et B1 du modèle Régional REMO ; (ii) tous les scénarii montrent des écarts de hauteur de pluies à l'horizon 2050, qui seront de l'ordre de 60 à 70 % pour le scénario A1B et de 20 à 41 % pour le scénario B1 ; (iii) cette situation aura des impacts sur l'écoulement de surface (de 35 à 37 %) et de la production moyenne en eau (28 %) avec les scénarii climatiques.

Pour les études prospectives qui se sont consacrés à la ressource en eau-et au tourisme, les travaux des références [64] peuvent être citer en exemple. Dans cette étude les auteurs ont montré que : (i) les forêts sont affectées par une demande croissante de bois de feu (en raison de la croissance du tourisme comme l'une des principales sources d'énergie ; (ii) les forêts sélectionnées affichent une réduction moyenne de 38% de la biomasse forestière de 1992 à 2008 ; et (iii) une réduction de 75% de l'utilisation du bois de feu réduirait les concentrations de monoxyde de carbone (CO).

En ce qui concerne les ressources en eau et l'occupation du sol, les travaux de [2] réalisés sur le bassin versant du Blavet en Bretagne montrent que : (i) la régression du bocage, le drainage et/ou la fermeture des zones humides de fonds de vallées observés en Bretagne durant les 50 dernières années, associés à l'intensification de l'usage des surfaces cultivées depuis le milieu des années 1980, constituent des facteurs défavorables pour la préservation des ressources en eau ; (ii) dans certaines régions, la dégradation de la qualité de l'eau est telle que la gestion de l'eau doit désormais répondre à de multiples enjeux : lutte contre les contaminations par les pesticides, réduction de la pollution azotée, baisse de l'eutrophisation des eaux continentales et littorales ; (iii) pour une gestion durable de l'eau par exemple, les scénarios permettent de cibler les agriculteurs auprès desquels des actions de sensibilisation sur la nécessité des couverts hivernaux ou d'adopter des pratiques de fertilisation raisonnée doivent être menées.

4 DISCUSSION

La bibliographie ne présente pas un état de l'art des études prospectives de façon générale. Toutes fois plusieurs études sur la prospective et singulièrement la modélisation prospective de l'occupation et usage du sol ont été réalisées. Ces études ont permis de définir une vision à long terme, dans un horizon fixe l'évolution de l'espace humain dans un contexte de développement durable. Ainsi selon la référence [2], la modélisation prospective de l'occupation et usage du sol permet aux gestionnaires de gérer durablement les ressources existantes particulièrement les ressources en eau. Au-delà de la gestion qu'il met en exergue selon les références [65], [32] l'utilisation des modèles est nécessaire pour prédire le changement futur d'un système. Mais le mode de validation des études prospectives (modèles) influence fortement les résultats présentés par les différents auteurs. En effet, les validations par rétrospective et par dire d'experts se rejoignent du fait qu'elles tiennent compte des états passés des phénomènes étudiés. A la différence, l'approche qui s'intéresse exclusivement à la démarche de construction du modèle ne tient pas compte du passé du phénomène étudié. Quelque soit le modèle utilisé et le mode de validation appliqué, il est impossible d'estimer la véracité de ce qui est décrit dans les résultats issus de travaux prospectifs [66]. De plus, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle capable de simuler parfaitement les changements d'occupation et d'usage du sol [67].

5 CONCLUSION

L'émergence de la prospective en tant que discipline est le fait de quelques hommes, relayée par les questionnements des instances dirigeantes sur les politiques à mettre en œuvre dans différents domaines (militaire, social, environnement...). Le développement des principes et des méthodes de la prospective s'est effectué au travers des groupements d'intellectuels et de scientifiques (Rand Corporation, Club de Rome...). Mais ce sont véritablement les projections faites à l'échelle de la planète (rapports Meadows [7]; rapport Brundtland qui ont, par leurs conclusions, suscité auprès des institutions nationales un intérêt plus fort pour cette discipline. L'utilisation de la prospective s'est alors généralisée à travers la réalisation d'études globales, sectorielles ou transversales à des échelles nationale ou régionale. Les études prospectives portant sur les modes d'occupation et usage du sol ont été abordées dans beaucoup de domaines. La connaissance de leurs évolutions possibles à moyen et long terme constitue un enjeu fort en matière d'aménagement de l'espace, de gestion des ressources et de développement durable. Toutefois, il apparaît que, dans le domaine de la gestion de l'eau, peu d'études prospectives ont été réalisées et sont généralement mises en relation avec les changements climatiques [62], [63] ou le tourisme [64] ou l'occupation du sol [2].

Trois grands types de modèles permettent de modéliser de manière dynamique et spatialement explicite l'évolution de l'occupation et l'usage du sol : les automates cellulaires, les réseaux de neurones artificiels et les modèles multi-agents. De par leur méthode de quantification et d'allocation spatiale des changements, ils présentent chacun des avantages et des inconvénients suivant l'étendue spatiale de la zone d'étude et les objectifs thématiques et méthodologiques fixés.

Enfin, les étapes de validation des travaux prospectifs sont essentielles afin de renforcer la confiance des utilisateurs à la fois dans la démarche prospective mais également dans les simulations.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce présent article remercient le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) de l'Université Felix Houphouët Boigny et le Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques de l'Institut National Polytechnique Felix Houphouët-Boigny (INP-HB) pour leur apport dans la réalisation de cette étude.

REFERENCES

- [1] F. Hatem. La prospective. Pratiques et méthodes, *Economica*, Paris pp. 86, 1993.
- [2] T. Houet. Occupation des sols et gestion de l'eau : Modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE du Blavet). Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2 Haute Bretagne, pp. 357, 2006.
- [3] B. Cazes. Histoire des futurs. Les figures de l'avenir de Saint-Augustin au XXIème siècle, Seghers, Paris, pp. 475, 1986.
- [4] A. Robida. La vie au XXème siècle la vie électrique, Librairie Illustrée pp. 1892.
- [5] E. Mouton. La fin du monde, in Nouvelles et Fantaisies Humoristiques, Librairie Générale Paris, pp. 47-57, 1872.
- [6] E. Souvestre. Le monde tel qu'il sera, W.Coquebert, Paris, pp. 324, 1846.
- [7] D. H. Meadows, D.L. Meadows, J. Rangers and I.W.W. Behrens. Rapport sur les limites à la croissance, in Halte à la croissance ? Ed. Club de Rome, Collection Écologie, Fayard, pp. 314, 1972.
- [8] G. Berger. Sciences humaines et prévision, *Revue des deux Mondes*, n°3, pp. 417- 426, 1957.
- [9] G. Berger G. L'attitude prospective, *Prospectives*, n°1, pp.1-10, 1958.
- [10] P. Verburg, K. Kok, R. Pontius and A. Veldkamp. Modeling Land-Use and Land-Cover Change. Ed. Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts. New York/Berlin, Springer, pp.117-131, 2006a.
- [11] C. Agarwal, G. Green, J. Grove, and T. Evans. A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice. *Apollo the International Magazine of Art and Antiques*, pp.62, 2002
- [12] R. Schaldach and J. Priess. Integrated Models of the Land System: A Review of Modelling Approaches on the Regional to Global Scale. *Living Reviews in Landscape Research*, 2, pp.1–34, 2008
- [13] D. Haase and N. Schwarz. Simulation models on human-nature interactions in urban landscapes: A review including spatial economics, system dynamics, cellular automata and agent-based approaches. *Living Reviews in Landscape Research*, pp 3, 2009
- [14] J.F. Mas, M. Kolb, T. Houet, M. Paegelow, and M.T. Camacho. Éclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative. *Géomatique et occupation des sols*, 21, pp.405–430, 2011.
- [15] V. Snow, C. Rotz, A. Moore, R. Martin-Clouaire, I. Johnson, N. Hutchings, and R. Eckard. The challenges and some solutions to process-based modelling of grazed agricultural systems. *Environmental Modelling & Software*, 62, pp.420–436, 2014.
- [16] F. Wu. Calibration of Stochastic Cellular Automata: The Application to Rural-Urban Land Conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 16(8), pp.795–818, 2002.
- [17] P. Langlois and D. Reguer. La place du modèle et de la modélisation en Sciences Humaines et Sociales. In Y. Germond, Edition. *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*. Paris, pp. 35–48, 2005.
- [18] P. Langlois and D. Delahaye. RuiCells, automate cellulaire pour la simulation du ruissellement de surface, *Revue Internationale de Géomatique*, vol, 12n°4 pp 461-487, 2002.
- [19] K. Kok and M. Winograd. Modelling land-use change for Central America, with special reference to the impact of hurricane Mitch. *Ecological Modelling*, 149(1-2), pp.53–69, 2002.
- [20] T. Houet and L. Hubert-Moy. Modeling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton in considering landscape trajectories : an improvement for simulation of plausible future states. *EARSel eProceedings*, (1), pp.63–76, 2006.
- [21] H. Balzter. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 107, pp.113–125, 1998.
- [22] D. Triantakou and G. Mountrakis. Urban Growth Prediction : A Review of Computational Models and Human Perceptions. *Journal of Geographic Information System*, 4, pp.555–587, 2012.
- [23] P. Verburg, A.Veldkamp, R. Limpiada and V. Espaldon. The spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environ Manage*, 30(3), pp.391–405, 2002.
- [24] B. S. Soares-Filho and G. Coutinho Cerqueira. Dinamica a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, 154, pp.217–235, 2002.
- [25] T. Sohl and K Saylor. Using the FORE-SCE model to project land-cover change in the southeastern United States. *Ecological Modelling*, 219(1-2), pp.49–65, 2008.
- [26] J. Ferber. Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective, InterEditions, pp.499, 1995.
- [27] D.C. Parker, S.M. Manson S-M., M.A. Janssen, M.J. Hoffmann and P. Deadman. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), pp.314–337, 2003.
- [28] P. Deadman, D. Robinson, E. Moran and E. Brondizio. Colonist household decision making and land use change in the Amazon Rainforest : an agent-based simulation. *Environment and Planning*, 31, pp.693–710, 2004.
- [29] J. C. Castella, S. Boissau and T.N. Trung. Agrarian transition and lowland upland interactions in mountain areas in northern Vietnam : application of a multi-agent simulation model. *Agricultural Systems*, 85, pp.312–332, 2005.

- [30] R. Matthews, N. Gilbert, A. Roach, J. Polhill. (2007). Agent-based land-use models: A review of applications. *Landscape Ecology*, 22, pp.1447–1459, 2007.
- [31] G. Dreyfus, J.M. Martinez, M. Samuelides, M. B. Gordon, F. Badran, S Thiria, and L Hérault. Réseaux de neurones: Cartes auto-organisatrices et classification automatique. *Eyrolles* 2ème édition, pp287-335, 2002.
- [32] L. Vacquié. Modélisation prospective et échelles spatiales en montagne. Application aux Pyrénées françaises. Thèse de Doctorat Université Toulouse Jean Jaurès. pp 316, 2015.
- [33] K-C Clarke and L-Y Gaydos. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12, pp.699–714, 1998.
- [34] E. Manfredi, F. Carteni, S. Mazzoleni, and F. Salerno. Solid Waste and Water Quality Management Models for Sagarmatha National Park and Buffer Zone, Nepal. *Mountain Research and Development*, 30(2), pp.127–142, 2010.
- [35] B. Anselme, F. Bousquet, A. Lyet and M. Etienne, B. Fady, and C. Le Page. Modelling of spatial dynamics and biodiversity conservation on Lure mountain (France). *Environmental Modelling & Software*, 25(11), pp.1385–1398, 2010.
- [36] C. Marohn, and G. Cadisch. (2013). A software coupling approach to assess low-cost soil conservation strategies for highland agriculture in Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 45, pp.116–128, 2013.
- [37] S Boissau and J-C Castella. The SAMBA Role Play Game in Northern Vietnam. *Mountain Research and Development*, 24(2), pp.101–105, 2004.
- [38] M. Lippe, T. Thai Minh, A. Neef, T. Hilger, V. Hoffmann, N. Lam and G. Caddish. Building on qualitative datasets and participatory processes to simulate land use change in a mountain watershed of Northwest Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), pp.1454–1466, 2011.
- [39] F. Salerno, E. Cuccillato, P. Caroli, B. Bajracharya, E. Manfredi and G. Viviano .Experience With a Hard and Soft Participatory Modeling Framework for Social-ecological System Management in Mount Everest (Nepal) and (Pakistan) Protected Areas. *Mountain Research and Development*, 30(2), pp.80–93, 2010.
- [40] J. Bourgoïn and J-C. Castella. Plup fiction Landscape Simulation for Participatory Land Use Planning in Northern Lao PDR. *Mountain Research and Development*, 31(2), pp.78–88, 2011.
- [41] B. Prévosto, D. Hill and P. Coquillard. (2003). Individual-based modelling of *Pinus sylvestris* invasion after grazing abandonment in the French Massif Central. *Plant Ecology*, pp.121–137, 2003.
- [42] G. Wallentin, U. Tappeiner, J. Strobl, and E. Tasser. Understanding alpine tree line dynamics: An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218(3-4), pp.235–246, 2008.
- [43] A. Peringer A, S. Siehoff, J. Chételat, T. Spiegelberger, A. Buttler and F. Gillet. Past and future landscape dynamics in pasture-woodlands of the Swiss Jura Mountains under climate change. *Ecology And Society*, 18(3), p.32, 2013.
- [44] N. Bambach, F. Meza, H. Gilabert and M. Miranda. Impacts of climate change on the distribution of species and communities in the Chilean Mediterranean ecosystem. *Regional Environmental Change*, 13(6), pp.1245–1257, 2013.
- [45] P. Harrison, P. Berry, N. Butt and M. New. Modelling climate change impacts on species distributions at the European scale: Implications for conservation policy. *Environmental Science and Policy*, 9, pp.116–128, 2006.
- [46] G. Schroth, P. Läderach, J. Neilson, and C. Bunn, Winner or loser of climate change? A modeling study of current and future climatic suitability of Arabica coffee in Indonesia. *Regional Environmental Change*. 2014.
- [47] M. Mangeas. Propriétés statistiques des modèles paramétriques non-linéaires de prévision de séries temporelles. Application aux réseaux de neurones à propagation directe. Report n° 97NJ00017, Électricité de France, Clamart, France, pp. 205, 1997.
- [48] S. Haykin. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice-Hall, Old Tappan, N. J., pp.350, 1999.
- [49] D. Munroe and D. Müller. Issues in spatially explicit statistical land-use/land-cover change (LUCC) models: Examples from western Honduras and the Central Highlands of Vietnam. *Land Use Policy*, 24(3), pp.521–530, 2006.
- [50] J-C Castella, S. Kam S, Quang, P. Verburg and C. Hoanh. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use / cover change to support public policies : Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy*, 24, pp.531–545, 2007.
- [51] P. Verburg, C. Schulp, N. Witte, and A.Veldkamp. Downscaling of land use change scenarios to assess the dynamics of European landscapes. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 114, pp.39–56, 2006b.
- [52] Mather J. (1991). *Global Change: Geographical Approaches* University of Arizona Press, pp. 289, 1991.
- [53] B. Turner, D. Skole, S. Sanderson, G. Fischer, L. Fresco and R. Leemans. (1995a). LUCC Science Research Plan, *IGBP Report* n°35, Stockholm and Geneva. pp. 20666-20671, 1995a.
- [54] I. Romanenko, V. Romanenkov, P. Smith, J. Smith, O. Sirotenko, N. Lisovoi, L. L. Shevtsova, D. Rukhovich and P. Koroleva. Constructing regional scenarios for sustainable agriculture in European Russia and Ukraine for 2000 to 2070. *Regional Environmental Change*, 7(2), pp.63–77, 2007.
- [55] S. Kerr, S. Liu and R.F. Hughes. Carbon dynamics and use choices: building a regional scale multidisciplinary model, *Journal of Environmental Management*, vol.69 pp. 25-37, 2003.

- [56] F. Ewert, M. D. and A. Rounsevell, I. Reginster and Leemans R. Futur scenarios of European agricultural land use: I Estimating changes in crop productivity, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol, 107. pp 101-116, 2005.
- [57] C. Kamusoko, M. Aniya, B. Adi and M. Manjoro. La durabilité rurale menacée au Zimbabwe - Simulation des changements d'utilisation et de couverture des terres dans le district de Bindura sur la base du modèle des automates cellulaires de Markov. Edition Elsevier, *Géographie appliquée*, Vol.29 No.3 pp.435-447, 2009.
- [58] D. Takou. Modélisation rétrospective de l'agglomération de Lomé: dynamique des paysages a la simulation spatiale. Thèse de Doctorat, Université de de Toulouse le Mirail, pp. 357, 2015.
- [59] R. Aguejdad. "Étalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne : Rennes Métropole. Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 2 Haute Bretagne", pp. 374, 2009.
- [60] A. Delamarre. La prospective territoriale, La Documentation française, Paris, 112p, 2002.
- [61] K. Emsellen, S. Liziard and F. Scarella. La géoprospective: l'émergence d'un nouveau champ de recherche? *L'espace géographique*, 12, pp.154–168, 2012.
- [62] L. Bharati, P. Gurung, P. Jayakody, V. Smakhtin, and U. Bhattarai. The Projected Impact of Climate Change on Water Availability and Development in the Koshi Basin, Nepal. *Mountain Research and Development*, 34(2), pp.118–130, 2014.
- [63] J. Klein, K. Ekstedt, M. Walter and S. Lyon. Modeling Potential Water Resource Impacts of Mediterranean Tourism in a Changing Climate. *Environmental Modeling & Assessment*, 20(2), pp.117-128, 2014.
- [64] E. Manfredi, F. Carteni, S. Mazzoleni, and F. Salerno, Solid Waste and Water Quality Management Models for Sagarmatha National Park and Buffer Zone, Nepal. *Mountain Research and Development*, 30(2), pp.127–142, 2010.
- [65] S. Corgne. Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en Bretagne. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 2 - Haute-Bretagne, pp 226, 2004.
- [66] T. Houet. Usages des modèles spatiaux pour la prospective. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(1), pp. 123-143, 2015.
- [67] J-F Mas, M Kolb, M Paegelow, and T Houet, Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling & Software*, 51, pp.94–111, 2014.