
Intérêt de la simulation paysagère en modélisation géoprospective

Christine Voiron-Canicio¹, Jean-Christophe Loubier², Dominique Genoud³, Daniel Hunacek³, Florian Sant¹

1. Université Nice Sophia Antipolis, UMR 7300 ESPACE
98 Boulevard Edouard Herriot, BP 3209-06204 Nice, France
christine.voiron@unice.fr ; sant.florian@gmail.com
2. Institut IEM, Université des sciences appliquées (HES-SO Vs)
Techno-pôle 3, 3960 Sierre, Suisse
Jchristophe.loubier@hevs.ch,
3. Institut IIG, Université des sciences appliquées (HES-SO Vs)
Techno-pôle 3, 3960 Sierre, Suisse
Daniel.hunacek@hevs.ch ; Dominique.genoud@hevs.ch

RÉSUMÉ. Cet article présente la démarche, et les premiers retours d'expérience, d'une recherche destinée à susciter les réflexions et les réactions de différents types d'acteurs sur les transformations futures de leur territoire de vie. La démarche se décompose en deux temps, tout d'abord, réalisation de différents scénarios de changements de l'occupation du sol, avec, associée à chacun d'eux, une représentation paysagère en 3D. Puis, travail en petit groupe dans un atelier participatif. La réflexion collective partagée porte sur les représentations paysagères en 3D des transformations de l'espace, choisies, testées, par les participants, à partir d'une application conçue à cet effet. Le territoire d'étude, situé sur le littoral des Alpes-Maritimes, est un territoire très menacé par l'urbanisation diffuse galopante.

ABSTRACT. This article presents a new approach and the initial feedback in a research that seeks to provoke reflections and reactions to different stakeholders on future changes in their living territory. This project is divided into two stages. The first is a production of different scenarios of changes in land use, associated with a 3D virtual representation of landscape. The second stage is a participatory workshop in small groups of stakeholders. The shared collective thinking is based on 3D virtual representations of transformations of space that were chosen by the participants from an application designed for this project. The study area,

located on the coastal zone of Alpes-Maritimes, is very threatened by fast and diffuse urbanization.

MOTS-CLES : modèle spatial, automate cellulaire, machine learning, simulation, paysage, 3D, géoprospective, démarche participative,

KEYWORDS: spatial modelling, cellular automata, machine learning, simulation, landscape, 3D, geo-prospective, participatory approach,

1. Introduction

Si déterminer le devenir d'un territoire n'est pas chose aisée, appréhender les changements qui se produiront à travers l'espace, l'est encore moins (Voiron-Cancio, 2012). Les grandes tendances d'évolution sont assez facilement perçues, diffusion du bâti individuel, enrichissement, fragmentation des espaces naturels, par exemple. En revanche, localiser ces changements et les transformations paysagères associées, imaginer le paysage de demain produit par cette dynamique de changement, plus ou moins forte selon les lieux, est difficile sans l'assistance « d'outils » appropriés. Pour ce faire, plusieurs types de méthodes sont traditionnellement mobilisés. Les futurs d'un territoire sont déterminés en choisissant entre deux familles de méthodes, l'une quantitative « le modèle numérique » (Lajoie et Hagen-Zanker, 2007 ; Houet et Hubert-Moy, 2006 ; Voiron-Cancio, 2006), l'autre, qualitative, empirique, «la mise en récit du futur» (Sgard, 2008 ; Vanier 2010). Ces deux méthodes peuvent être couplées, par exemple, dans les démarches de modélisation d'accompagnement (Etienne, 2010 ; Gourmelon *et al.*, 2008). Il en découle des localisations plus ou moins précises et une représentation du changement qui peut prendre la forme de cartes, de dessins, de blocs diagrammes, de maquettes en dur ou numériques, d'objets 3D symbolisant des éléments spatiaux sur une scène (Michelin, 2000 ; Piveteau et Lardon, 2002 ; Chardonnell *et al.*, 2003 ; Loubier, 2006 ; 2013). Une approche participative peut être intégrée au processus de formalisation du changement spatial, la réflexion collective peut accompagner la démarche de modélisation prospective, ou bien intervenir à la phase de restitution des premiers résultats (Etienne, 2010 ; Dodane *et al.*, 2014).

La démarche proposée mobilise ces grandes familles de méthodes mais se distingue des travaux habituels par le parti retenu. Le premier choix concerne la modélisation. Les changements spatiaux futurs ont été déterminés à l'aide d'un modèle spatialement explicite, et prédits par chaînes de Markov (Takada *et al.*, 2010). Mais ce futur projeté est totalement dépendant des trajectoires antérieures, or, d'une part, le futur n'est pas totalement contenu dans le passé, d'autre part, il est à imaginer, à inventer, à tester. Aussi, à côté de la carte du scénario tendanciel, nous avons créé des scénarios alternatifs en introduisant localement des modifications spatiales « à dire d'expert ». Le second choix concerne la représentation des futurs projetés. Les représentations cartographiques en 2 D sont abstraites, peu expressives pour des personnes non familiarisées avec les codes cartographiques de l'occupation

du sol. Nous avons alors choisi de représenter les changements sur une scène en 3D, et d'entrer par le paysage dans la discussion sur les futurs possibles. Enfin, le troisième parti retenu est de donner la possibilité à des personnes réunies dans un atelier de proposer elles-mêmes les changements d'occupation du sol et d'explorer les scènes 3D résultant de leur choix, de naviguer dans la scène et de modifier certains de ses éléments.

Les paragraphes qui suivent exposent les grandes étapes de cette démarche : la modélisation géoprospective et les scénarios des futurs possibles ; l'application embarquée à l'usage du public, couplée aux scénarios ; et enfin, les retours d'expérience des premiers ateliers participatifs. La démarche est appliquée à une zone située à cheval sur deux communes des Alpes-Maritimes, Antibes et Vallauris, qui, du fait de leur forte attractivité, connaissent une urbanisation diffuse mal maîtrisée. Le secteur analysé couvre une zone de 3,2 km², en position rétro-littorale, où les espaces agricoles non encore urbanisés sont extrêmement convoités.

2. La modélisation géoprospective 2D et 3D

La géoprospective est une démarche heuristique d'exploration des changements spatiaux qui repose sur deux principes fondamentaux, d'une part, l'intégration de la dimension spatiale aux différents stades de la démarche, et d'autre part, le couplage de scénarios prospectifs et d'une démarche participative, dont les modalités dépendent du but assigné à la prospective (Gourmelon *et al.*, 2012 ; Voiron-Canicio, 2008 ; Houet, 2015). La modélisation retenue est une modélisation spatialement explicite dont la finalité est de proposer différentes dynamiques de l'occupation du sol de la zone d'étude.

2.1. Matrice de transition 1990-2013 et chaîne de Markov

La dynamique récente de l'occupation du sol de la zone d'étude a été déterminée par la photo-interprétation des orthophotos de l'IGN correspondant aux années 1990 et 2013. Dix natures différentes d'occupation du sol ont été relevées sur la zone d'étude, et expliquent la ventilation en dix classes retenue¹. Puis une matrice de transition a été extraite de la comparaison des 2 années par un simple calcul de fréquence de changement en divisant le total de chaque croisement par le total de chaque ligne (Tableau 1).

¹ Bâti dense ; Bâti discontinu ; Bâti diffus ; Entrepôts, espaces industriels ; Infrastructures publiques et loisirs ; Oliviers, vignes, agrumes ; Agriculture sous serre ; Forêt ; Végétation rase ; Végétation arbustive et arborée.

Tableau 1. Matrice de transition pour la période 1990-2013

	Cla 1	Cla 2	Cla 3	Cla 4	Cla 5	Cla 6	Cla 7	Cla 8	Cla 9	Cla 10
Cla 1	0.48	0.00	0.00	0.21	0.00	0.22	0.00	0.00	0.02	0.07
Cla 2	0.01	0.57	0.00	0.01	0.04	0.05	0.03	0.04	0.18	0.07
Cla 3	0.01	0.26	0.36	0.00	0.01	0.15	0.01	0.01	0.18	0.02
Cla 4	0.41	0.02	0.00	0.21	0.00	0.09	0.00	0.03	0.02	0.21
Cla 5	0.02	0.36	0.00	0.01	0.13	0.12	0.03	0.01	0.26	0.04
Cla 6	0.13	0.04	0.01	0.02	0.00	0.60	0.00	0.01	0.13	0.06
Cla 7	0.01	0.27	0.00	0.00	0.03	0.02	0.28	0.01	0.34	0.03
Cla 8	0.00	0.20	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.44	0.08	0.25
Cla 9	0.03	0.41	0.00	0.01	0.04	0.08	0.04	0.04	0.26	0.08
Cla 10	0.00	0.22	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.20	0.14	0.39

Cette matrice de transition est une chaîne de Markov homogène à états finis d'ordre 1 car :

- elle décrit un processus aléatoire à états finis (les types d'occupation du sol) ;

- et que « si l'instant présent est k , la probabilité pour que le système soit dans l'état j à l'instant $k+1$ ne dépend que de l'état du système à l'instant k » (Coquillard *et al.*, 1997).

L'analyse du graphe d'état de cette matrice montre que celle-ci est ergodique car elle est irréductible et le PGDC des longueurs de circuit est 1. Elle conduit donc à un état global stationnaire. Cette propriété peut être observée expérimentalement en élevant la matrice à des puissances successives. À partir de la 6^{ème} puissance, la matrice devient pseudo-stationnaire avec une précision de 2 décimales. Le rapport de la plus haute valeur propre (3.953) avec la seconde (2.254) donne une vitesse de convergence vers la stationnarité de 1.753.

Ces informations sont intéressantes pour identifier une dynamique de l'évolution du territoire. Le caractère stationnaire montre une tendance d'ajustement optimal du territoire vers un point temporel d'équilibre global au-delà duquel tout serait cristallisé dans un état précis. Il ne serait plus possible de modifier quoi que ce soit sans risquer de perturber gravement l'équilibre du territoire. Cette matrice est donc un bon outil pour expérimenter des déviations qui seraient induites par des changements de probabilités de transition. C'est ce que nous avons fait pour construire les scénarios d'évolution possible.

Les chaînes de Markov sont par nature a-spatiales. Or, la probabilité qu'une portion de territoire soit dans un certain état est influencée par son état initial ainsi que celui des portions de territoire qui lui sont proches. Les automates cellulaires (AC) ont la capacité de permettre cela car l'une des trois propriétés des AC (outre le

fait de discrétiser l'espace sous la forme de mailles) est le principe de localité². C'est-à-dire que le nouvel état d'une cellule ne dépend que de son état initial et celui de ses voisins. Il devient donc intéressant de coupler les chaînes de Markov à des AC pour proposer des cartes prospectives d'occupation du sol (Caloz et Collet, 2011).

Certains Systèmes d'Information Géographique en mode raster proposent maintenant des modules de simulation Markov AC. Le plus connu est sans doute IDRISI qui est également le module que nous avons utilisé (Eastman *et al.*, 1998 ; Eastman, 2009).

2.2. Le scénario tendanciel 2013-2026

Le modèle tendanciel a été obtenu à partir des probabilités de transition tirées de la matrice de transition de l'occupation du sol, entre 1990 et 2013. Ces treize années ont été marquées par l'expansion du bâti diffus au détriment des espaces agricoles et des serres. Les changements prévus pour les treize années suivantes (2013-2026) poursuivent *de facto* la tendance à l'urbanisation diffuse observée au cours de la période précédente, et qui se fait principalement au détriment de l'agriculture et de la végétation (Fig. 1).

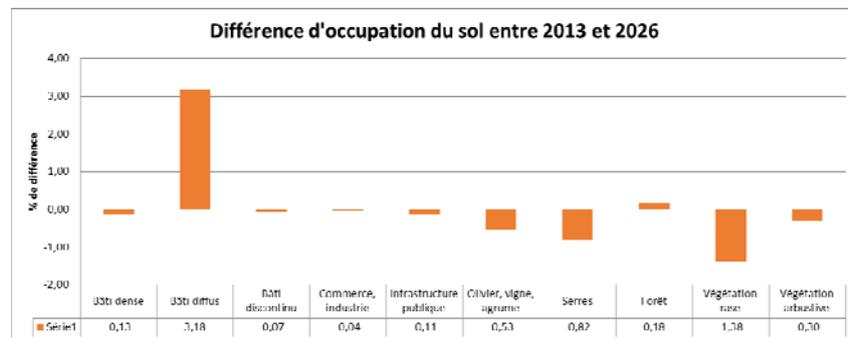


FIGURE 1. Variations des surfaces des types d'occupation du sol entre 2013 et 2026, selon le modèle tendanciel

2.3. Les scénarios alternatifs 2013-2026

L'objectif est ici de se libérer du poids du passé et d'imaginer d'autres dynamiques de changements non seulement plausibles mais aussi possibles, y

2. Les deux autres propriétés sont le parallélisme et l'homogénéité.

compris des changements radicaux reposant sur des politiques d'aménagement opposées aux politiques passées et actuelles.

La démarche retenue a consisté à prendre la carte de l'occupation des sols de 2013 comme point de départ et à modifier directement les types d'occupation du sol en fonction de différents scénarios imaginés. L'objectif est de construire des images (cartes) du futur en amplifiant ou renversant des tendances, et/ou en opérant localement des transformations de l'occupation du sol par suppression ou introduction de protections en certains lieux, et création d'aménagements sur d'autres secteurs.

Une fois la carte de chaque scénario réalisée, la matrice de transition est calculée entre la carte actuelle et celle du scénario. L'objectif est d'obtenir la matrice de probabilité de transition de chaque scénario. La spatialisation s'étant faite sur le logiciel ArcGIS, la même méthode que pour le scénario tendanciel est utilisée. Ce qui revient à extraire la chaîne de Markov correspondant à chaque futur en utilisant les algorithmes d'IDRISI, en comparant les différentes cartes du futur avec celle de 2013. Ainsi, en partant d'une image du futur, on fait ressortir la chaîne qui correspond à ce futur. Cette méthode permet de « créer » aisément des futurs possibles. Pour des non spécialistes, il est plus facile de dessiner des cartes du futur que d'agir sur une matrice de transition. Par ailleurs comparer les probabilités des chaînes issues de ces différentes cartes permet également de vérifier si les propriétés markoviennes sont conservées.

Onze scénarios prospectifs ont ainsi été élaborés. Le parti retenu n'est pas de présenter un scénario souhaitable, ni même des scénarios probables, mais des scénarios correspondant à des devenirs qui pourraient être envisagés. Ces scénarios sont « libres », dans le sens où ils ne sont pas contraints par les documents d'urbanisme existants. En effet, nous considérons que ceux-ci peuvent être remis en question par une politique volontariste. Ils ne le sont pas non plus par les tendances observées par le passé. Aussi, les facteurs de changement introduits peuvent-ils être radicalement différents de la tendance dominante observée, telle une politique en faveur de l'agriculture ou bien l'interdiction du bâti diffus.

Les options pour chacun des 11 scénarios sont les suivantes :

- S1 Tendanciel A : disparition des serres au profit du bâti diffus ;
- S2 Tendanciel B : disparition de toutes les parcelles agricoles (sauf les jardins protégés) au profit du bâti diffus ;
- S3 Protection de l'agriculture et densification des espaces bâtis ;
- S4 Sauvegarde des espaces agricoles, et politique en faveur de nouveaux espaces naturels ;
- S5 Coup d'arrêt de l'urbanisation et renaissance de l'agriculture par une politique volontariste de compensation écologique ;

- S6 Maintien de l’agriculture mais diffusion du bâti sur les parcelles à végétation rase ;
- S7 Envahissement du territoire par du bâti diffus et discontinu, excepté dans les espaces forestiers ;
- S8 Densification du bâti, maintien de l’agriculture et compensation écologique en faveur des espaces boisés ;
- S9 Extension du bâti dense, et propagation du bâti diffus excepté dans les espaces forestiers classés ;
- S10 Extension du bâti dense, et propagation du bâti diffus excepté dans les espaces agricoles et forestiers protégés ;
- S11 Densification du bâti et politique volontariste de reprise de l’agriculture.

La série des scénarios a été construite par l’équipe de chercheurs, puis soumise à des personnes appartenant au milieu associatif, ainsi qu’à l’analyse du responsable de la planification territoriale d’Antibes, qui n’a souhaité se prononcer que sur la partie antiboise de la zone d’étude.

2.4. Construction des scènes 3D de chaque scénario

Le parti de cette recherche est d’anticiper le devenir possible de ce territoire, selon différents scénarios, en ne se limitant pas à la cartographie 2D de l’occupation du sol projetée mais en construisant les paysages virtuels associés à chacun d’eux. En effet, la cartographie des types d’occupation, même avec une nomenclature très détaillée ne peut parvenir à représenter le paysage résultant, la diversité des éléments bâtis et non bâtis, leur volume, leur agencement dans l’espace, et la composition d’ensemble. La figure 2 en est la démonstration. Le paysage de 2013 visible sur la photo est très hétérogène, voire complexe, les objets sont imbriqués.



FIGURE 2. *Paysage observé et cartographie de l’occupation du sol drapée sur le MNT.*

Le niveau d’abstraction représenté par la sémiologie graphique conventionnelle, utilisant des plages de couleur homogène pour représenter le bâti diffus dans un milieu végétalisé, les serres, et les vergers, ne peut rendre compte du paysage correspondant.

La modélisation prospective, telle qu'elle est envisagée, a vocation à être intégrée dans une démarche de géogouvernance³. Nous faisons l'hypothèse qu'un paysage de concertation s'avère grandement utile à tout public cherchant à imaginer la transformation de son espace de vie, et peut aider non seulement les habitants à appréhender le paysage futur de leur territoire, mais également les élus et les gestionnaires à mesurer les impacts visuels des transformations attendues. Chaque scénario cartographié a donc été couplé à une image 3D (Fig. 3). Une fois les scènes 3D construites, il devient possible de se déplacer dans chacune d'elles en temps réel.



FIGURE 3. *Exemples de scènes 3D*

3. « Démarche s'appuyant sur l'utilisation des méthodes et des outils de l'analyse spatiale, et destinée à mettre à la portée de tous les acteurs concernés une information territoriale pertinente, tout au long de la chaîne de construction d'un projet de territoire. Son objectif est de contribuer à rendre intelligible la complexité territoriale, à faire émerger les enjeux socio-spatiaux du territoire, ainsi que ses évolutions à différents horizons temporels » (Masson-Vincent *et al.*, 2012).

3. Conception d'une interface multi supports de sélection de scénarios

L'objectif du système de sélection de scénarios est triple. En premier, il s'agit de permettre à des utilisateurs d'effectuer facilement des choix quantifiés sur les types d'occupation du sol établis par photo interprétation de manière à déterminer un projet individuel de ce que l'utilisateur souhaite voir réaliser sur son territoire (par exemple, plus de bâti dense ; plus de forêts, moins de bâti individuel...) puis de transmettre le choix à un serveur qui va le considérer comme un vote. En second, les choix individuels sont fusionnés pour permettre, en dernier, de sélectionner le scénario pré-construit (parmi les 11 qui ont été élaborés) le plus proche des choix de tous les acteurs qui ont participé au vote. Le but est de visualiser le plus vite possible la maquette 3D qui correspond le mieux aux choix des acteurs de manière à faciliter le processus de concertation. En pratique, il s'agissait donc de développer :

- l'interface logicielle multi supports (ordinateurs, tablettes ; smartphones) et l'infrastructure de gestion des données sur un serveur centralisé,
- la partie logicielle de calcul/machine learning de matrice collaborative,
- l'algorithme de sélection des maquettes virtuelles.

3.1. Interface multi supports

Du point de vue de l'application logicielle exécutée sur les appareils mobiles (Heitkötter *et al.*, 2012), le système se décompose en deux parties : une partie administrateur et une partie utilisateur. L'administrateur peut créer et gérer les différentes sessions ainsi que les droits des utilisateurs, par exemple, autoriser un individu à participer à une session. La partie utilisateur se compose d'un système d'inscription et d'un menu de choix de sessions. Quand il choisit une session, l'utilisateur voit apparaître la fenêtre représentée sur la figure 4.

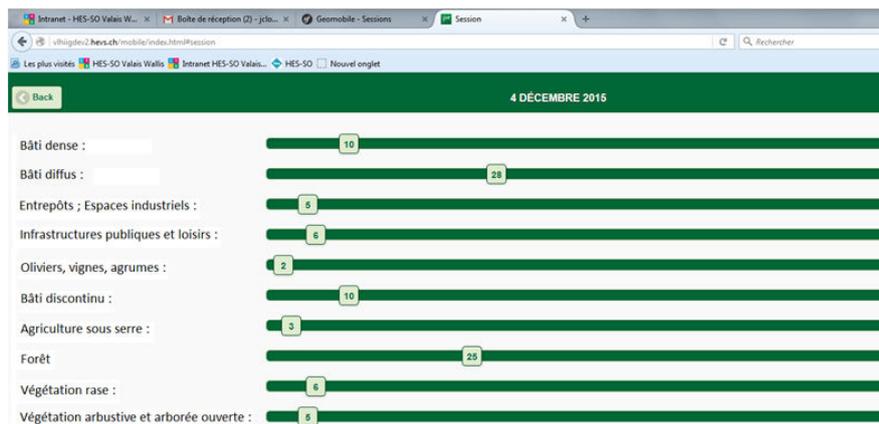


FIGURE 4. L'interface de quantification des types d'occupation du sol. Les curseurs peuvent être déplacés horizontalement.

Le mécanisme est simple. Plus l'utilisateur déplace un curseur vers la droite, plus il souhaite que ce type d'occupation du sol soit valorisé dans l'aménagement du territoire. Le % d'influence est écrit dans chaque curseur. Bien entendu, comme le territoire est borné, les autres curseurs sont influencés en sens inverse de façon à ce que leur somme soit égale à 100%. La valeur inscrite dans le bouton de chaque curseur correspond à la quantité d'occupation du sol (en %) liée à la position du curseur.

Dans la partie basse de l'interface, un graphique représente les variations des pourcentages d'occupation du sol choisis par l'utilisateur. Les droites qui vont de T0 (2013) à T1 (2026), représentent la tendance temporelle attribuée à chaque classe.

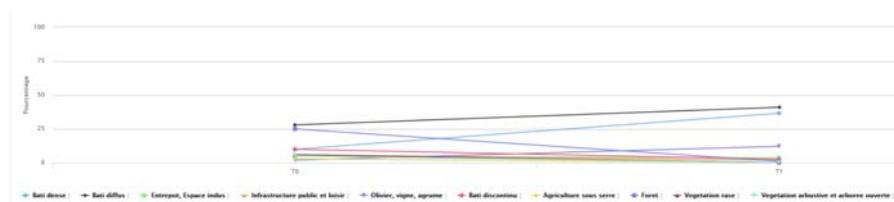


FIGURE 5 : Capture d'écran du graphe situé dans la partie basse de l'interface-utilisateur.

Quand l'utilisateur a validé ses choix, ils sont transmis à l'application de calcul, sur un serveur, où les algorithmes de fusion des choix et de sélection des scénarios seront exécutés.

3.2. Algorithme de calcul du meilleur scénario

Le système embarqué crée une position moyenne - celle des votants - à partir d'un vecteur d'états - les types d'occupations du sol - dans un espace multidimensionnel constitué par la matrice de transition de chacun des scénarios. Il mesure ensuite la distance qui sépare cette position de celle de chacun des scénarios. De multiples possibilités de mesurer ces distances s'offrent à nous comme par exemple celle proposée par Boutsidis *et al.* (2009).

L'algorithme que nous avons développé pour cela est présenté ci-dessous. Il comporte 7 étapes.

1. Soit $M_1 \dots M_n$ les matrices du catalogue de scénarios d'aménagement

2. T_0 : le vecteur initial: transmis aux mobiles (situation de départ)
3. $T_0 * M_1 \dots n = TM_1 \dots 0$: calcul des vecteurs de relation aux matrices selon le vecteur initial
4. T_0 modifié sur chaque mobile devient $T_{0mob1 \dots k}$
5. Calcul du vecteur résultant $T_{res} =$ moyenne ($T_{0mob1 \dots k}$)
6. Donc on calcule $T_{res} * M_i = T_{mires}$ puis distance euclidienne (T_{mires}, T_{mi}) = d_i
 [Preuve : $T_{res} = T_0$ et m_1 matrice de départ donc $T_{res} * m_1 = T_{m1res}$ donc $T_{m1res} - T_{m1} = 0$]
7. On sélectionne le plus petit $d_i \implies i$ l'indice de la matrice la plus proche m_i .

La stabilité des calculs matriciels est assurée par la plateforme de calcul utilisée (Berthold *et al.*, 2007).

Au final, l'administrateur de la session reçoit dans l'interface de gestion, un message lui indiquant quel scénario est choisi. Il ne lui reste plus qu'à l'activer dans l'environnement de visualisation 3D.

De multiples tests ont été réalisés et ils montrent que le système est robuste et qu'il renvoie une solution dans un intervalle de temps compris entre 30 secondes et 2 minutes.

4. Retour d'expérience des premiers ateliers participatifs

Deux ateliers participatifs ont été organisés à Antibes et à Vallauris, avec des ingénieurs de la ville, et avec des membres d'une association de défense de l'environnement et une élue en charge de l'environnement.

Les scènes étaient projetées sur un grand écran. L'animateur de l'atelier opérait les déplacements sur la scène, selon les indications des participants. Pour faciliter la comparaison entre le paysage actuel et le paysage du scénario retenu, un assistant effectuait le même déplacement sur la scène de 2013. Les deux paysages 3D étaient visualisés côte à côte. Les simulations 3D ont été bien reconnues par les acteurs et les navigations se sont effectuées sans problème. Ils reconnaissaient leur territoire et commentaient les maquettes (reconnaissance de certains lieux, discussion et justification sur le futur développement urbain des zones concernées). Cependant, les participants n'ont pas cherché à modifier les maquettes et se sont satisfaits des visualisations de leurs votes. Ceci pourrait être dû au degré de vérisme des scènes. Lors de précédents travaux, il avait été remarqué que le niveau de vérisme des scènes 3D jouait un rôle dans l'interaction proposée aux acteurs. Cela avait conduit l'un des auteurs de cet article à mener une réflexion sur la notion de perception spatiale dans un environnement 3D dans un contexte de prise de décision (Loubier, 2004). Dans le cadre de cette étude, les scènes proposées étaient assez réalistes. Seuls, les bâtiments restaient relativement symboliques. Comme l'essentiel de l'interaction avec les scènes se faisait par des survols, il est probable que le message

délivré par ces scènes ait été suffisant pour que les acteurs puissent construire un point de vue sans entrer dans un processus de négociation, d'autant que les participants présents à chaque séance partageaient un corpus idéologique identique.

Par ailleurs, deux faits sont apparus. Le premier concerne la grande difficulté à appréhender les occupations du sol de type mixte habitat/végétation, caractérisant par exemple le bâti diffus, à partir des cartes résultant des scénarios. En effet, en complément de la projection à l'écran du paysage simulé, la carte correspondant au scénario a été distribuée. Or, cette dernière a davantage dérouté qu'aidé à la compréhension des transformations de l'occupation du sol. Les plages de couleur uniforme, et rouge pour le bâti, ne permettant pas de représenter l'imbrication, à des degrés divers, de la végétation et du bâti. L'avantage de la représentation 3D des scénarios par rapport aux représentations 2D est apparu de façon flagrante.

Le second fait concerne la mise en évidence de certains effets de bord dans la combinaison des critères, notamment dans la perception logique des différentes combinaisons. Les utilisateurs ont voté à un moment donné en privilégiant le bâti dense pour dégager selon leur dire, de l'espace destiné à la forêt. Ce lien qualitatif d'interaction entre les critères de façon à dégager de la place pour un autre critère ne peut pas être pris en compte dans l'algorithme que nous avons développé. Comme il s'agit d'une sélection construite sur l'évaluation d'une distance dans un espace de dimension 10, les critères interviennent comme des mesures quantitatives pures et indépendantes entre elles d'un point de vue mathématique. Cela a engendré la sélection d'un scénario urbain plutôt qu'un scénario forestier, ce qui a surpris les participants. Cette observation nous a amenés à envisager d'intercaler un système expert entre le système de calcul des positions des acteurs et les positions des scénarios dans l'espace. Il est difficile de qualifier mathématiquement ou par des méthodes de traitement systématique un raisonnement logique et qualitatif portant sur l'interaction entre les types d'occupation du sol, et surtout sur le fait que l'utilisateur suppose que la place dégagée pour un critère est destinée à un autre critère bien précis (comme le bâti dense réduit au profit de la forêt). En effet, en supposant que les curseurs se déplacent par cran de 1% comme cela se passe dans notre fenêtre de vote, les combinaisons possibles à traiter par des règles de sélection s'élèvent à $2.6341E+23$ ce qui est impossible à programmer par des méthodes classiques. Il faut donc développer une stratégie de raisonnement et utiliser un langage de programmation logique comme Prolog qui nous permettra à partir d'une base de faits (les positions de différents curseurs des critères) et d'une base de règles (les façons d'utiliser les faits) de reproduire le raisonnement logique d'un humain qui manipule les critères (Blackburn *et al.*, 2007). Cette modification est en cours et ne sera pas présentée dans cet article.

À l'issue de l'atelier, une discussion s'est engagée autour de la pertinence de l'outil. Les deux publics ont réagi différemment vis-à-vis de la démarche.

Globalement, les gestionnaires ont eu beaucoup de mal à faire abstraction du droit du sol existant. La démarche consistant à créer librement un paysage sans contraintes juridiques a gêné certains d'entre eux, alors que d'autres se sont plus vite adaptés à la situation. Aux yeux de certains, l'outil représente un danger pour les

pouvoirs publics (augmentation du nombre de recours possibles sur des projets). Ils doutent qu'il puisse aider la concertation, compte tenu des égoïsmes locaux. Parallèlement, ils ont souligné le fait que cet outil pourrait aider le maire à comprendre les enjeux du territoire pour la construction du PLU, avec, toutefois, quelques hésitations sur les personnes-cibles. Ainsi, un ingénieur a ajouté que cet outil ne devait pas sortir du bureau du maire, alors qu'un autre l'a perçu comme un instrument intéressant destiné à l'éducation territoriale, et qui devrait être diffusé dans les écoles pour modifier les mentalités.

Les membres de la société civile se sont montrés plus ouverts à l'égard de la démarche, appréciant le fait qu'elle permette de comprendre les enjeux territoriaux et paysagers sans avoir de connaissances scientifiques ou techniques particulières. Ils ont déclaré que l'outil devrait être employé dans toutes les séances portant sur les aménagements envisagés du territoire communal ; qu'il devait être proposé comme service sur le site web de la commune, et enrichi de fonctions plus fines comme des simulations d'inondations. À l'inverse des ingénieurs territoriaux, ils battent en brèche l'idée d'un égoïsme local et pensent que cet outil pourrait renforcer la notion d'identité de la commune.

D'une façon générale, le recours aux scènes 3D a aidé les acteurs à mesurer les enjeux spatiaux du territoire étudié. On peut donc estimer que ce type de représentation apporte un avantage au niveau de l'aide à la compréhension des phénomènes territoriaux, comme l'ont déjà souligné d'autres auteurs (Jacquinod et Langumier, 2010). Toutefois, le débat reste ouvert autour de l'apport effectif de ces nouveaux moyens de représenter l'espace qui utilisent massivement la puissance informatique dans le but de produire des expériences les plus immersives possible. Il semble que l'aide apportée par la représentation 3D ne soit pas équivalente, dans l'approche expérientielle, à celle déployée dans les jeux vidéo, notamment quand il s'agit de construire interactivement des paysages négociés entre acteurs aux opinions différentes. Dans ce cas, une maquette respectant les volumes mais pas les textures semble plus facile à modifier qu'une maquette avec un haut niveau de réalisme. Des expérimentations seront effectuées dans de prochains travaux pour tenter d'en mesurer les contours et valider cette hypothèse.

5. Conclusion

La démarche présentée appartient à la famille des méthodes de géoprospective et de géogouvernance. En effet, d'une part, elle est basée sur une modélisation spatialement explicite dont la finalité n'est pas de prédire le futur mais d'anticiper le devenir du territoire, d'autre part, la modélisation est considérée comme un medium facilitant la réflexion et la construction collectives, dans le cadre d'ateliers participatifs. Cependant, cette démarche se distingue des modélisations prospectives habituelles. Son originalité réside dans trois points. Tout d'abord, elle s'inscrit volontairement dans une pratique de modélisation prospective « libérée » pour reprendre l'expression d'Arnaud Banos (2013), qui se situe entre la modélisation

exploratoire et la modélisation normative, entre la perception qualitative et l'appréhension quantitative du changement spatial futur. Elle prend ainsi ses distances vis-à-vis des canons de la modélisation prospective. Les scénarios spatiaux contrastés ne cherchent pas à être probables mais simplement possibles. L'élaboration des scénarios n'est ni contrainte par le passé, ni dépendante des règlements d'urbanisme, néanmoins, elle respecte les principes de vraisemblance, de pertinence et de cohérence. Par ailleurs, la cartographie du changement n'est pas le résultat de la modélisation mais le point de départ. À l'instar du récit par lequel est « apprivoisé le futur » (Sgard, 2008), le tableau du cadre de vie de demain est brossé en deux temps, cartographie de l'occupation du sol, tout d'abord, puis, représentation 3D du paysage fictif qui lui serait associé.

Dans ce contexte, la maquette 3D remplit un rôle important et n'est pas réduite à un simple volet spectaculaire, moderne et technologique. Par sa capacité holophrastique et visuelle, elle s'apparente à une machine à présenter un « énoncé occasionnel sur lequel les membres... [d'une]... communauté peuvent s'accorder sur le champ au vu de la situation » (Van Orman Quine, 1993, 27).

Grace à cela, le paysage du futur n'est pas l'objet de la modélisation mais l'outil de mise en débat du territoire de demain. Le paysage virtuel couplé au scénario a pour intérêt majeur de permettre l'immersion des participants dans le territoire imaginaire de demain. Le protocole adopté couplant la modélisation 3D et l'interface de choix de scénarios est un compromis entre l'interactivité recherchée et la faisabilité de l'exercice en temps réel. Ce protocole est encore au stade expérimental mais les enseignements tirés des tests préliminaires menés lors des deux premiers ateliers, et l'intérêt des participants nous confortent dans la poursuite de cette démarche prospective par la simulation paysagère.

Bibliographie

- Banos A. (2013). *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en SHS*. HDR, Université de Paris I.
- Berthold, M. R., Cebron, N., Dill, F., Gabriel, T. R., Kötter, T., Meinel, T., Wiswedel, B. (2009). KNIME-the Konstanz information miner: version 2.0 and beyond. *AcM SIGKDD explorations Newsletter*, 11(1), 26-31.
- Blackburn, P., Bos, J., Striegnitz, K. (2007). *Prolog, tout de suite!*. College publications.
- Boutsidis C., Mahoney M., Dieneas P. (2009). An improved approximation algorithm for the column subset selection problem. *SODA '09 Proceedings of the twentieth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, p. 968-977.
- Caloz R., Collet C. (2011). *Analyse spatiale de l'information géographique*. PPUR Presses polytechniques.
- Chardonnel, S., Feyt G., Loubier J. C. (2003). La maquette virtuelle comme fond de carte: une vision commune du territoire. *Les figures du projet territorial*, 157-170.

- Coquillard P., Hill D. R., Sime-Ngando T. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes: des modèles déterministes aux simulations à évènements discrets*. Paris, Masson.
- Dodane C., Joliveau T., Rivière-Honegger A. (2014). Simuler les évolutions de l'utilisation du sol pour anticiper le futur d'un territoire. Analyse critique d'une expérience de géoprospective dans un bassin versant périurbain de l'agglomération lyonnaise, *Cybergeo*, <http://cybergeo.revues.org/26483>.
- Eastman J. R., Jiang H., Toledano J. (1998). Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. *Multicriteria analysis for land-use management*. Springer Netherlands, p. 227-251.
- Eastman J. R. (2009). *IDRISI Taiga guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University. Worcester.
- Etienne M. (2010). La modélisation d'accompagnement : une démarche adaptative ? *La Modélisation d'accompagnement. Une démarche en appui au développement durable*. Versailles, Quae coll. « Update Sciences & Technologie », p. 295-303.
- Gourmelon F., Houet T., Voiron-Canicio C., Joliveau T. (2012). La géoprospective, apport des approches spatiales à la prospective. *L'Espace géographique*, n° 2/2012, p. 97-98.
- Gourmelon F., Étienne M., Rouan M., Kerbiriou C., Charles M., Bioret F., Chlous-Ducharme F., Guermeur Y., Levrel H. (2008). Éléments de prospective environnementale dans une réserve de biosphère. *Cybergeo*, article 429. <http://www.cybergeo.eu/index20343.html>.
- Heitkötter H., Hanschke S., Majchrzak T. A. (2012). Evaluating cross-platform development approaches for mobile applications. *Web information systems and technologies*, Springer Berlin Heidelberg, p.120-138.
- Houet T. (2015). Usages des modèles spatiaux pour la prospective. *Revue Internationale de géomatique*, n° 1/2015, p. 123-143.
- Houet T., Hubert-Moy L. (2006). Modelling and projecting land-use and land-cover changes with a cellular automaton considering landscape trajectories: an improvement for simulation of plausible future states. *EARSeL eProceedings*, n° 5, p. 63-76
- Jacquinod F., Langumier J. (2010). Géovisualisations 3D en action dans l'aménagement du territoire. *Géocarrefour*, Vol. 85/4 2010, p. 303-311.
- Lajoie G., Hagen-Zanker A. (2007). La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. *Cybergeo : European Journal of Geography*, <http://cybergeo.revues.org/11882>
- Loubier J-C. (2013). L'intérêt des maquettes virtuelles dans la compréhension des enjeux spatiaux. *Géogouvernance: Utilité sociale de l'analyse spatiale*. Versailles, Quae, p. 119-127.
- Loubier J-C. (2006). Construction interactive de maquettes numériques du territoire. Un moyen d'aider la concertation en aménagement. *Revue Internationale de Géomatique*, 16(1), p. 93-113
- Loubier, J. C. (2004). *Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie)* (Doctoral dissertation).

- Masson-Vincent M., Dubus-Viossat N., Bley D., Voiron-Canicio C., Helle C., *et al.*, (2012). La Géogouvernance : un concept novateur ? *Cybergeo*, article 587, <http://cybergeo.revues.org/25086>
- 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). *Cybergeo*, <http://cybergeo.revues.org/1992>
- Piveteau V., Lardon S. (2002). Chorèmes et diagnostics de territoire : une expérience de formation. *Mappemonde*, n° 4, p. 1-6.
- Sgard A. (2008). Entre rétrospective et prospective, *EspacesTemps.net*, <http://www.espacestemp.net/articles/entre-retrospective-et-prospective/>
- Sgard A. (2010). Le paysage dans l'action publique : du patrimoine au bien commun. Dossier Paysage et développement territorial, *Revue Développement durable & Territoires*, <https://developpementdurable.revues.org/8565>
- Takada, T., Miyamoto, A., and Hasegawa, S.F., (2010) Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications, *Landscape Ecology*, 25, p. 561–572
- Vanier M. (2010). Le choix d'une prospective in Délégation à l'aménagement du territoire et à l'Action Régionale, *Territoires 2040*, Paris, La documentation française, p. 27-31.
- Van Orman Quine W., Clavelin M. (1993). *La poursuite de la vérité*. Ed. du Seuil.
- Voiron-Canicio C. (2012). L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective », *L'Espace géographique*, n° 2012/2, p. 99-110.
- Voiron-Canicio C. (2008). A spatio-morphological modelling for spread predicting, *Computational Science and Its Applications, ICCSA 2008, International Conference, Proceedings, Part I, LNCS, Subseries: Theoretical Computer Science and General Issues*, Vol. 5072, p. 210-220.
- Voiron-Canicio C. (2006). *L'espace dans la modélisation des interactions nature-société*, https://www.researchgate.net/publication/267631509_L%27espace_dans_la_modelisation_de_s_interactions_nature-societe.