

Modéliser les dynamiques d'urbanisation pour accompagner la planification territoriale

Jean-Philippe Antoni ⁽¹⁾, Jérôme Thévenot ⁽²⁾

(1) Laboratoire ThéMA, CNRS, Université de Franche-Comté - 32 rue Mégevand - 25000 Besançon, France.

(2) Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard - 8 Av. des Alliés - 25000 Montbéliard, France.

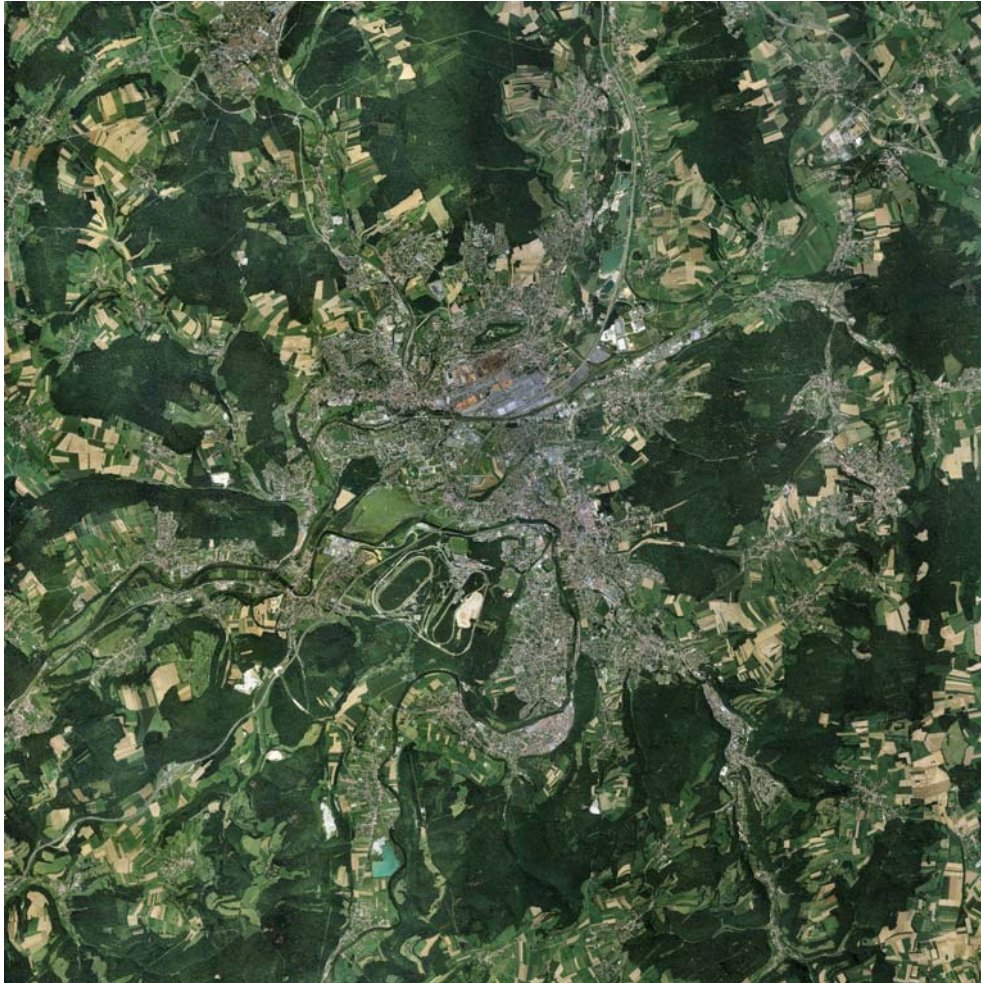
La Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard (CAPM) se compose de 29 communes, qui accueillent 120 000 habitants, réunis depuis 1959 en structure intercommunale. Au carrefour de sept vallées (sur une surface de 180km² environ), elle est géographiquement installée sur la « porte de Bourgogne » entre les Vosges et l'Alsace. Le territoire dispose d'un relief très présent, qui a fortement contraint l'urbanisation au cours du temps : les implantations les plus anciennes se sont faites dans les fonds de vallées, qui ont accueilli les premières activités. Ce sont d'abord les points de passage des rivières qui ont dicté ces localisations, puis, à partir du 19^è siècle, la mobilisation de l'énergie hydraulique pour la production industrielle, qui a rapidement fait la force de l'agglomération et à très largement contribué à son développement. Rapidement, des résidences ont été construites autour de ces centres industriels, sur un modèle paternaliste à l'initiative des grandes familles industrielles, pour accueillir leur main d'œuvre à proximité immédiate des usines, investissant d'abord les plaines alluviales, puis dans un second temps les coteaux proches. Au résultat, 30% des territoires urbanisés sont aujourd'hui concernés par le risque d'inondation délimité dans le Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). Sur le plan de la morphologie urbaine, la configuration héritée est complexe : la forme des vallées, de natures différentes, les nombreuses collines et la présence abondante de forêts lui confèrent une forme étoilée complexe, très différente des modèles radioconcentriques plus classiques (Figure 1).

1. Modéliser pour repenser l'aménagement urbain

Dans ce contexte particulier, l'urbanisme et l'aménagement du territoire prennent une dimension singulière : les considérations nouvelles apportées en France par la loi Solidarité et Renouvellement urbain (SRU, 13/12/2000) et la mise en œuvre des Schéma de Cohérence territoriale (ScOT) qui en découlent ont exigé d'approfondir les réflexions engagées depuis 1996 sur un modèle urbain « souhaitable » pour le Pays de Montbéliard, intégrant toutes ses spécificités.

Figure 1

Situation générale de la Communauté d'agglomération du Pays de Montbéliard



Source : IGN - Scan25, CAPM

1.1. Les enjeux du contexte local

Dans ce cadre assez particulier, la limitation de l'étalement urbain devient un impératif de durabilité pour l'urbanisation, mais se traduit très différemment par rapport à une agglomération concentrique. Les exigences consistent ici à mieux maîtriser les développements futurs de l'Agglomération, avec comme objectif sous-jacent de la « reconstruire sur elle-même », et de la faire évoluer vers un ensemble fonctionnel mieux structuré, apportant un meilleur rendement aux différentes infrastructures implantées, qu'il s'agisse de la voirie, des services de transport en commun, et d'autres types de réseaux. L'un des principaux enjeux du SCoT a alors consisté à définir un meilleur équilibre entre :

- le cœur d'agglomération, assez mal défini du fait de la forme de cette conurbation, qu'il s'agit à la fois de mieux structurer et de densifier entre les principaux noyaux urbains ;
- les bourgs centres dans les vallées, pour lesquels il s'agit de construire ou de consolider de réelles centralités ;

- les villages alentours, qui ne peuvent plus continuer à accueillir spontanément une périurbanisation résidentielle prenant aujourd'hui trop d'ampleur au regard des réserves foncières disponibles.

Parallèlement, l'idée de « projet », très présente dans la loi SRU (Projet d'Aménagement et de Développement Durable) et la LOADDT¹ (un territoire, un projet, un contrat), se base sur une démarche prospective : se projeter dans l'avenir, imaginer les territoires urbains dans le futur est devenu un préalable nécessaire à la planification. C'est en connaissant ce vers quoi l'on veut tendre demain que l'on peut aujourd'hui prévoir et réglementer. C'est donc dans ce cadre également que les enjeux du SCoT ont dû être traités, à travers la mise en oeuvre d'une démarche prospective, appuyée sur une modélisation des dynamiques du territoire.

1.2. La mise en oeuvre d'une démarche de modélisation prospective

La prospective n'est pas un exercice facile : il est extrêmement délicat de tenter une prévision du futur, et de nombreuses expériences montrent que, souvent, le simple prolongement d'une tendance ne fournit qu'une extrapolation médiocre des processus à l'oeuvre, déconnectée des réalités du terrain. Pour dépasser ce stade, la prospective tente aujourd'hui d'intégrer une plus grande complexité dans les paramètres à prendre en compte et les processus qui les lient ; de surcroît, elle s'efforce de ne pas raisonner dans un cadre absolu, mais réfléchit en termes de scénarios, afin de brasser un panel plus large de devenirs possibles. Pour asseoir ces objectifs, une initiative ambitieuse a vu le jour au sein de la Communauté d'Agglomération, afin d'intégrer au mieux la complexité des processus à l'oeuvre dans la dynamique du développement urbain et de répondre à l'idée de M. Blondel : « l'avenir ne se prévoit pas, il se prépare ». Appuyée sur des attentes réelles et portée par une volonté politique forte, la prospective a largement contribué à la rédaction du SCoT de la CAPM.

La mise en oeuvre d'une telle démarche n'est toutefois pas aisée, et nécessite l'utilisation d'outils adaptés pour prendre en compte, gérer et analyser la complexité et l'enchevêtrement des processus, avant de les projeter dans le futur. Parmi ces outils, la modélisation est apparue comme un réel outil d'aide à la décision, en particulier pour des élus ne disposant pas d'une vision intercommunale de l'urbanisation du territoire. Par l'intermédiaire du programme de simulation CWS², qui a constitué le coeur de l'accompagnement de la démarche, elle a présenté un double intérêt : d'une part la modélisation s'est révélée suffisamment fine pour appréhender correctement les processus spatiaux à l'oeuvre dans le développement de l'agglomération (qu'elle a permis de visualiser) ; d'autre part elle s'est révélée assez simple pour que les « non initiés » (élus et techniciens du territoire) associés à la démarche prospective se l'approprient et l'utilisent pour leurs choix. La modélisation et la prospective urbaines sont donc conjointement apparues comme un excellent moyen de médiation,

¹ La LOADDT (Loi d'orientation pour l'aménagement et le développement durable du territoire) de 1999, dite aussi loi Voynet, succède à la Loi Pasqua de 1995 en insistant sur l'idée de Pays.

² Le programme CWS (Cellular World Simulation) a été mise au point par J.P. Antoni et G. Vuidel entre 2004 et 2006, sur la base du programme CamDeus (Cellular Automata to design environmental and urban systems), mis au point par les mêmes auteurs en 2003 à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg (Laboratoire Image et Ville).

permettant de construire, lors de réunions de travail collaboratif, le modèle de développement urbain « souhaitable » qui a finalement été inscrit dans le SCoT.

2. Modéliser pour simuler les possibles

En urbanisme et en aménagement du territoire, modéliser une série de processus (ceux qui conduisent à l'étalement ou au renouvellement urbain par exemple) consiste à les simplifier, de manière à mieux comprendre comment ils interagissent entre eux, mais également à reproduire ou à modifier leur comportement *in vitro*, afin de tester des solutions et leurs conséquences possibles. En quelque sorte, on cherche donc à répondre à des questions du type : « que se passerait-il si je faisais cela ? » ou « que deviendrait ceci si je faisais cela » ? La démarche proposée par CWS, reprend cette idée en l'appliquant spécifiquement à la question du développement urbain. Ici, la complexité du processus d'urbanisation est prise en compte par l'intermédiaire de trois questions plus simples, liées à des modèles mathématiques ou statistiques opérationnels, dont les principes sont faciles à comprendre : combien ? où ? et quoi ?

2.1. Quantifier les changements

Dans un premier temps, la modélisation cherche donc à répondre à la question « combien ? ». Combien d'hectares (qui correspondent ici à des « cellules » d'espace) seront modifiés dans le futur par l'urbanisation ? Si les tendances actuelles continuent à l'identique, par exemple, quelle sera demain la surface des espaces agricoles sur lesquelles la construction urbaine empiètera ? Parallèlement quel sera le rapport entre les surfaces urbaines résidentielles (habitat) et non résidentielles (zones d'activités, etc.) ? Pour répondre à ces questions, le programme CWS utilise un modèle probabiliste de transition basé sur des chaînes de Markov, qui peut se formaliser de la manière suivante :

$$N_l(t+1) = \sum_{k=1}^m p_{kl} \cdot N_k(t)$$

$$\text{où : } p_{kl} = \frac{\Delta N_{kl}(t)}{N_k(t)} = \frac{\Delta N_{kl}(t)}{\sum_l \Delta N_{kl}(t)} \text{ et : } \sum_l p_{kl} = 1$$

avec : $N_l(t+1)$: nombre de cellules de type l au temps $t+1$
 $N_k(t)$: nombre de cellules de type k au temps t ; p_{kl} : probabilité de transition du type k vers le type l

Le modèle CWS permet ainsi de construire automatiquement des matrices contenant les probabilités de transition d'une catégorie d'occupation du sol de départ vers une catégorie d'occupation du sol d'arrivée. Ces matrices s'obtiennent par l'observation des évolutions passées, traduites en probabilités (ramené à l'ensemble du territoire), et peuvent être modifiées ou pondérées à loisir afin de correspondre à un scénario de développement basé sur

des grandes tendances (poursuite voire accélération de la périurbanisation par exemple), ou sur une volonté d'aménagement (renouvellement urbain).

2.2. Localiser les changements

Dans un deuxième temps, le modèle CWS cherche à répondre à la question « où ? ». Où se situent les hectares (les « cellules ») qui devraient être modifiés ? Si l'automobile est toujours le mode de déplacement privilégié des habitants du périurbain, les lotissements de maisons individuelles continueront-ils la poursuite des digitations le long des routes ? Peut-on imaginer qu'ils se déplacent ou qu'ils se « re-centrent » si l'on privilégie les transports en commun ? Dans ce cas, *quid* des localisations industrielles ? Pour répondre à ces questions, cette deuxième étape fait intervenir un modèle de potentiel basé sur deux types de paramètres : la « masse » des espaces et des voisinages considérés, et les distances qui les séparent. Fondé sur l'héritage des modèles dits gravitaires, et plus spécifiquement des modèles d'interaction spatiale, le modèle de potentiel utilisés dans CWS se définit formellement de la manière suivante :

$$P_i = \left(\sum_{j=1; j \neq i}^n \frac{v_j \cdot m_j}{d_{ij}} + \frac{v_i \cdot m_i}{1/2rs} \right) \cdot k_i$$

avec : P_i : valeur de potentiel d'une cellule i donnée ; m : valeur de masse d'une cellule (i ou j)
 d_{ij} : distance entre i et j ; rs : résolution spatiale des cellules ; k : contrainte réglementaire de la cellule i ;
 v_i : pondération de la cellule i

La masse m peut ici globalement s'assimiler à une sorte de « coefficient d'attractivité » : une école ou un parc urbain peuvent par exemple être considérés comme plus attractifs pour l'urbanisation qu'une zone d'activité ou qu'une déchetterie. Ainsi, plus un terrain est proche d'éléments dont l'attractivité est jugée importante, plus son potentiel de changement (potentiel à être bâti par exemple) sera grand. Toutes les combinaisons sont alors testées par le programme, qui détermine les zones aux potentiels les plus forts, celles qui ont le plus de chance d'accueillir les « cellules » d'urbanisation déterminés lors de la première étape.

2.3. Différencier les changements

Enfin, dans un troisième temps, la modélisation cherche à répondre à la question « quoi ? ». Quelle est la nature des surfaces qui ont préalablement été quantifiées (étape 1) et localisées (étape 2) ? Parmi les espaces, intersticiels ou périphériques, voués à l'urbanisation ou au développement urbain, lesquels seront privilégiés, et par quels types d'activités ? Les zones industrielles, par exemple, ont une logique d'implantation qui diffère de celle de l'habitat. Peut-on tenter de discerner les secteurs les plus adéquats pour accueillir chacune de ces catégories d'occupation du sol ? Pour répondre à cette dernière série de questions, le modèle requiert des automates cellulaires. Issus du monde de l'intelligence artificielle distribuée, ces automates associent un certain nombre de règles de transition à chaque zone géographique, de manière à ce qu'elles puissent évoluer vers une catégorie d'occupation du sol déterminée, en

fonction des éléments présents dans leur voisinage. Un automate peut en effet formellement se définir de la manière suivante :

$$S_{i,t+1} = f (S_{i,t}, I_{i,t}^h)$$

avec : S_i : occupation du sol d'une cellule i donnée ; I_i : voisinage de la cellule i ; h : taille du voisinage

Cela étant, cette troisième étape proposée par le modèle CWS n'a pas été utilisée dans le cadre de la démarche prospective mise en œuvre à Montbéliard. En effet, de nombreuses données complémentaires à la modélisation ont permis de qualifier les espaces à urbaniser, en localisant par exemple les grands projets de zones d'activités déjà prévus, différenciés de fait des espaces possiblement ouverts à l'urbanisation résidentielle.

3. Calibrer pour simuler des scénarios

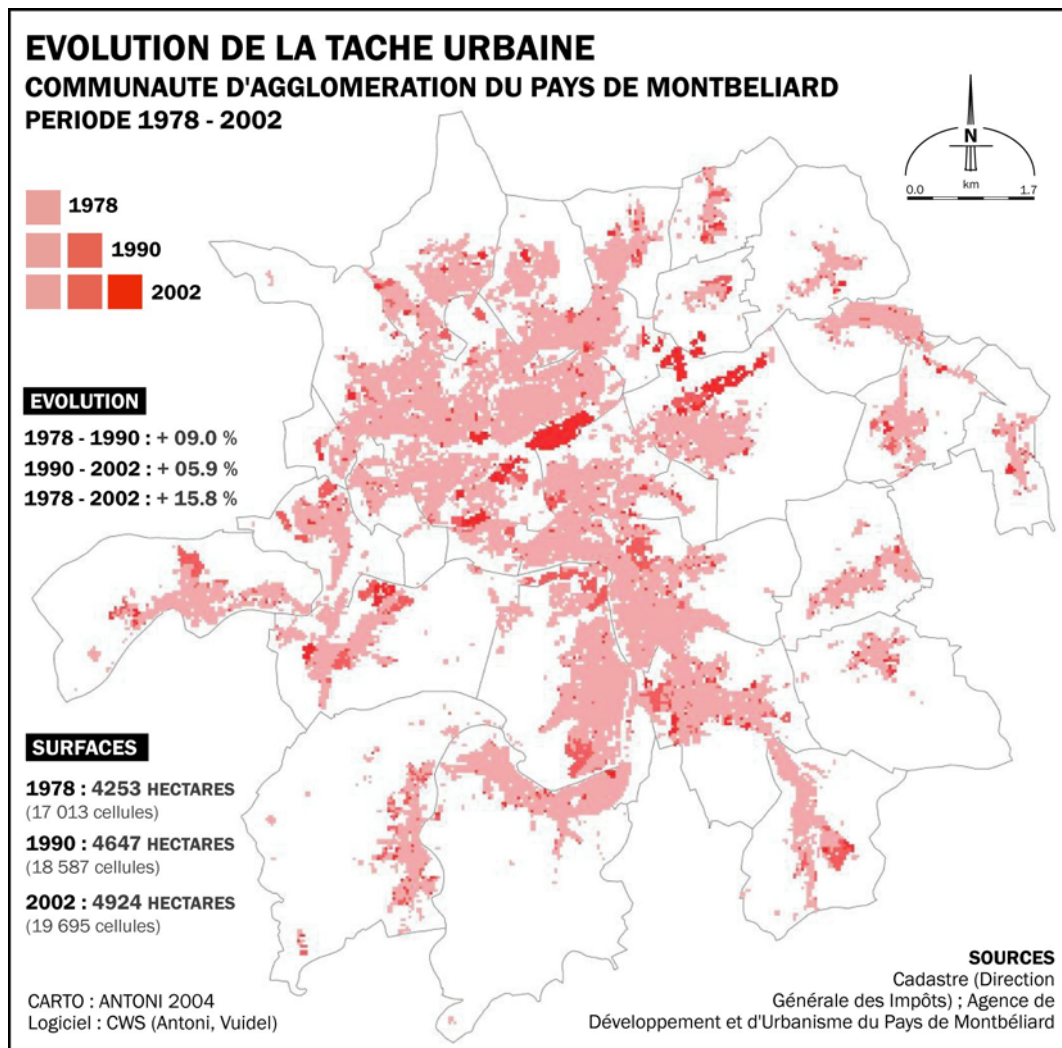
D'évidence, au-delà de l'illustration des tendances en cours et de leurs traductions possibles sur le territoire, la modélisation pose autant de questions qu'elle n'offre de solutions pour prévoir et réfléchir à des scénarios. Le paramétrage du modèle traduit autant d'idées soumises pour simuler l'avenir possible avec de tels desseins. Chacune d'entre elles s'associe en fait à une volonté de développement, qui correspond elle-même à ce que l'on pense que le territoire peut ou doit devenir, c'est-à-dire un scénario. L'étude rétrospective de l'évolution des territoires apparaît alors comme une série d'indications riches et précieuses pour déterminer l'ordre de grandeur avec lequel il est possible de faire levier sur ces paramètres.

3.1. Un exercice de rétrospection et de postdiction

Afin de mieux calibrer les scénarios, la connaissance fine du passé des événements liés au développement urbain constitue dès lors un enseignement nécessaire, qui permet d'en envisager l'avenir. Savoir que, sur une période de référence, la probabilité qu'un champ devienne une maison individuelle est de 5% par exemple permet très facilement de faire des simulations, à court ou à long terme. Mais comment connaître cette probabilité ? La solution proposée par la démarche CWS consiste à comparer plusieurs images passées du territoire (la première se situant au temps t , la seconde au temps $t+1$, la troisième au temps $t+2$, etc.) par l'intermédiaire d'une grille de carroyage, composée de « cellules », dont la taille a été définie à 50 mètres de côté.

Figure 2

Évolution de la tâche urbaine et mesure de l'étalement urbain



Ce carroyage permet aisément de compter le nombre de cellules d'une catégorie d'occupation du sol qui a évolué vers une autre catégorie entre le temps t et le temps $t+1$. A partir de ces résultats, toutes les probabilités peuvent être calculées ; elles correspondent à autant de paramètres « réalistes », dans le cas d'un scénario de continuation de tendance, pour simuler l'occupation du sol de la ville de demain. Pour la plupart des villes pour lesquelles le modèle a été utilisé, ces probabilités ont été calculées en fonction des données en présence, après que les informations disponibles auprès de l'Institut Géographique National (IGN) aient été numérisées et géoréférencées. Dans le cas de la ville de Montbéliard, des fichiers de données sources issus du cadastre et de la Direction Générale des Impôts (DGI), ont permis une prise en compte plus fine des évolutions, fournissant trois images rapprochées de l'évolution urbaine : 1978, 1990, 2002. ». Le traitement des données cadastrales indiquant les dates de construction constatée sur les bâtiments existants³ a permis de recomposer a posteriori ces trois images. Elles fournissent une matrice globale pour évaluer les probabilités de

³ Note : l'approche est légèrement biaisée puisque sous-estimant le renouvellement du tissu par le passé, « masqué » par cette source qui ignore les constructions précédemment démolies

changement et d'évolution de la tâche urbaine (Figure 2). Mais elles peuvent également servir de base à un exercice de postdiction⁴, permettant d'évaluer la qualité du paramétrage du modèle : à partir de l'image de la ville de 1990, par exemple, et des évolutions constatées depuis 1978, on tente de reconstruire celle de 2002. Cette étape constitue alors une phase de validation importante pour le paramétrage et la robustesse de la modélisation.

3.2. Une visualisation dynamique des résultats

Après application des trois étapes de la démarche CWS, les espaces qui devraient être urbanisés dans le futur sont théoriquement quantifiés (a), puis localisés (b) et différenciés (c)⁵. Le scénario-résultat peut alors être cartographié de manière dynamique, offrant une image (qui selon les cas, peut quasiment être produite en temps réel) des conséquences des actions d'aménagement simulées sur l'agglomération étudiée. Chaque scénario s'associe alors à une volonté particulière de développement, qui correspond elle-même à ce que l'on souhaite que le territoire puisse ou doive devenir. Chaque solution peut ainsi jouer à la fois sur des facteurs quantitatifs, limitant volontairement ou au contraire laissant libre cours à la périurbanisation, et sur des éléments qualitatifs, visant soit à renforcer l'attractivité de certains éléments (transport public par exemple), soit à interdire le développement sur certains secteurs (zones naturelles à protéger). Les résultats de ces différentes combinaisons peuvent être comparés pour définir les facteurs optimaux à retenir dans la planification territoriale.

4. Modéliser pour faire émerger une attitude volontariste

Les paramètres résultant de la rétrospection et de la postdiction peuvent ainsi être extrapolés et modifiés pour s'associer à autant de scénarios. Ils fournissent autant d'indicateurs pour mieux saisir ce qui s'est passé depuis 1978, et finalement pour mieux simuler ce qui pourrait se produire à l'horizon 2014 et 2026 (horizons retenus dans le cadre de cette étude, selon un pas de douze ans, conformément à la scansion des images utilisées pour l'étude rétrospective). Les paramètres issus de l'observation du passé n'offrent donc en réalité qu'une « base » pour la construction de scénarios réalistes. Mais ils demandent ici à être complétés par des contraintes complémentaires, pour que les scénarios envisagés ne soient pas seulement la projection d'une continuation de tendance, mais correspondent réellement à une volonté et à un projet d'aménagement.

Figure 3

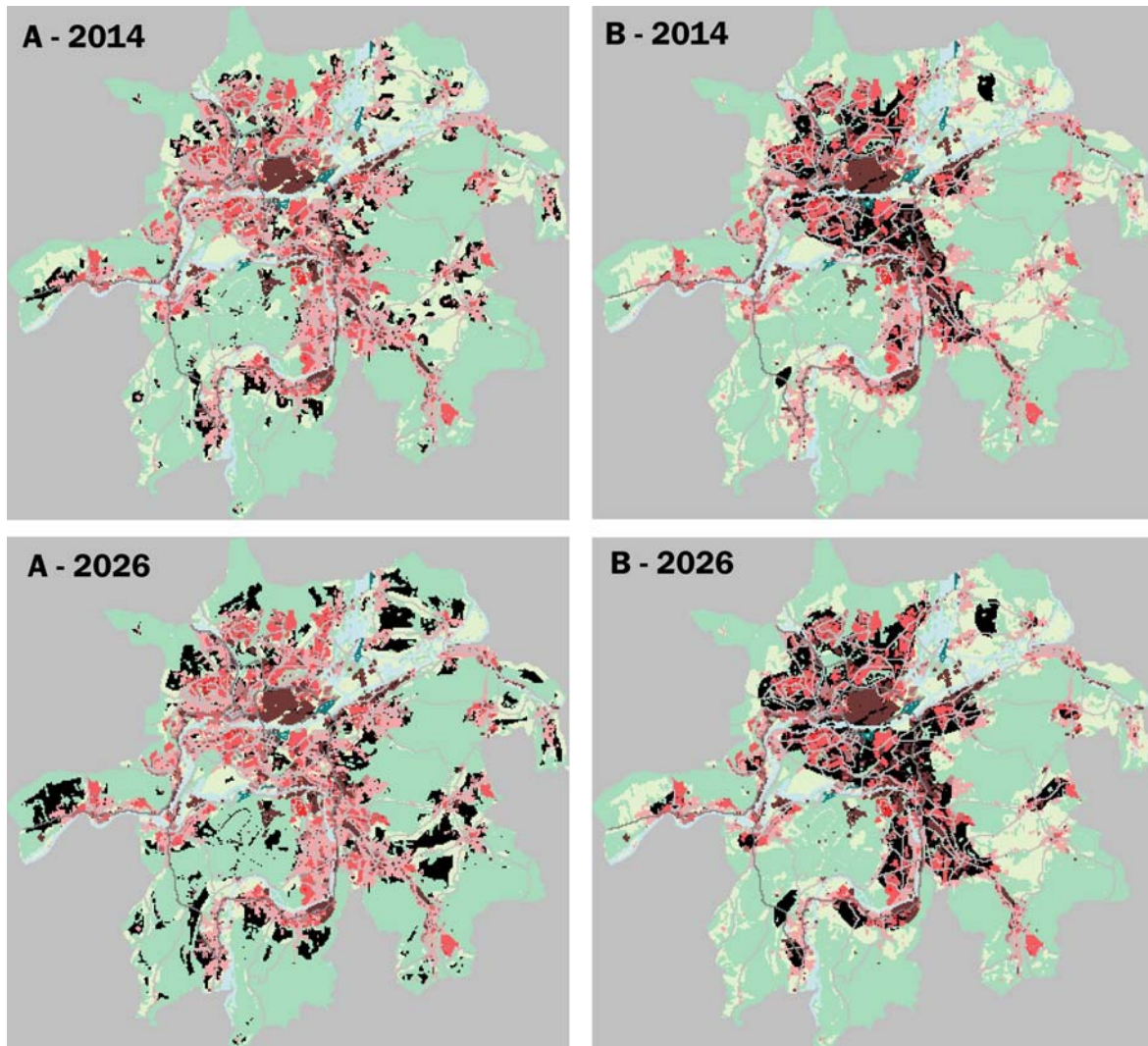
Deux scénarios prospectifs à Montbéliard (en 2014 et 2026).

Les espaces qui seront potentiellement urbanisés sont figurés en noir. Le scénario A, « au fil de l'eau », montre ce qui pourrait se passer si la population actuelle se maintient, sans intervention ni planification : on constate une

⁴ La postdiction est au passé ce que la prédiction est au futur.

⁵ Rappelons que dans le cadre de la modélisation présentée ici, seules les deux premières étapes (quantification et localisation) ont été effectuées.

continuation de l'étalement urbain par digitation et mitage. Le scénario B, à l'inverse, illustre une planification volontariste, centrés sur l'idée de renouvellement urbain et sur les transports en commun en site propre.



4.1. Affiner la connaissance du futur

En effet, si une chose est quasiment sûre concernant le futur, c'est qu'il ne sera pas la stricte reproduction du passé. De nombreuses opérations, en cours ou à venir, sont déjà connues et l'on sait qu'elles orienteront en partie la forme de la ville de demain. De telles informations peuvent être prises en compte dans la modélisation, qui ne doit pas seulement regarder le passé, mais également se tourner vers le futur pour intégrer ces contraintes et ces objectifs. Trois types d'informations peuvent alors contraindre le modèle :

1. Ce sont d'abord les contraintes fortes à l'urbanisation. Les PPRI peuvent être intégrés afin de tenir compte des zones à risque fort d'inondation, et de n'y projeter aucune urbanisation ;

2. Ensuite, les « coups partis » peuvent également être intégrés : certains projets de développement (création de zones d'activités, lotissements résidentiels) sont d'ores et déjà en cours ; ils marquent autant de terrains qui doivent être privilégiés par le modèle dans les scénarios de développement ;
3. Enfin, les exigences environnementales peuvent être intégrées au regard des objectifs du développement durable. A valeur de potentiel égale pour l'urbanisation, le modèle peut tenter de préserver les espaces pour lesquels la valeur environnementale, ou la valeur paysagère, est la plus importante, ou encore de sanctuariser certains secteurs qui feront l'objet de protections strictes (corridors écologiques, réserves).

L'intégration de ces données complémentaires confère alors aux simulations un caractère le plus réaliste possible en fonction des connaissances disponibles. Les résultats fournis par le modèle permettent ainsi de tester la validité, la faisabilité ou la pertinence des objectifs de développement que se fixent les aménageurs. Une série d'exercices itératifs, illustrés par le modèle, permet de considérer les actions qui répondent au mieux aux objectifs voulus, que ce soit par la loi SRU, ou localement dans chacune des communes, et encore globalement à l'échelle intercommunale.

4.2. Faire émerger des scénarios contrastés

Une série d'exercices itératifs accompagnés par le modèle peut alors débiter, afin de déterminer les paramètres, et avec eux les processus qui répondent le mieux aux objectifs voulus, et d'en fournir une visualisation concrète et parlante. La modélisation, et le modèle CWS en particulier, s'envisagent alors réellement comme un service et une aide aux élus. Cinq scénarios de développement ont été élaborés au total :

1. un scénario tendanciel simple, correspondant à une poursuite de la perte démographique sur le territoire (qui ne répond donc pas aux volontés politiques de maintien de la population) ;
2. un second scénario tendanciel, modifié quantitativement dans les surfaces d'urbanisation nécessaire, pour répondre aux besoins en logements calculés pour assurer une stabilisation démographique (mais sans modification qualitative sur la forme d'urbanisation) ;
3. un scénario forçant cette urbanisation dans les grandes zones d'ores et déjà en projet (particulièrement deux grandes zones d'activités) ;
4. un scénario ajoutant certaines exigences de proximité au cœur d'agglomération, conformément aux exigences de densité urbaine de la loi SRU ;
5. un scénario développant fortement le renouvellement urbain, rendant plus facile les mutations du tissu déjà urbanisé, (par exemple du pavillonnaire vers une urbanisation plus dense, ce qui répond mieux aux exigences de structuration de l'agglomération de Montbéliard).

Parmi ces cinq scénarios, nous pouvons en présenter deux ici, qui, sur la base d'un maintien de la population auquel s'associe une consommation d'espace fournie au modèle, montrent des situations très différentes, simulées pour deux périodes de 12 ans à partir de la date de

base de 2002, soit en 2014 puis en 2026 (Figure 3). Le premier scénario (A sur l'image, qui correspond au scénario n°2) montre une situation de laisser-faire, pour laquelle les habitudes d'urbanisation constatées depuis 1978 provoquent un étalement urbain important, qui contribue à diluer la centralité urbaine, et consomment l'espace en faisant fi des contraintes et de la protection des richesses environnementales. Il s'agit en quelque sorte d'un scénario du pire, permettant de prendre conscience des enjeux d'une réelle politique de planification du développement. *A contrario*, le second scénario présenté (B sur l'image, qui correspond au scénario n°5) fournit, pour les mêmes dates, des images très différentes du développement, calculées à partir d'une hypothèse de confortation de la centralité au cœur de l'agglomération, elle-même appuyée sur une simulation intégrant la proximité au transport en commun en site propre (TCSP) actuellement en projet, comme une exigence forte pour l'urbanisation à venir. Ici, l'étalement fait place à la densification et à une image plus compacte de la ville qui correspond globalement aux volontés politiques soutenues par les élus et traduites dans le SCOT.

Conclusion

Si l'état d'aboutissement actuel du modèle permet de générer rapidement des simulations simples et opérationnelles quant à l'avenir des territoires urbains, la démarche mise en œuvre fait l'objet d'évolutions et de développements constants. Deux voies orientent ces recherches en cours. Dans un premier temps, il s'agit de compléter l'outil par des indicateurs nouveaux permettant d'évaluer la pertinence des différents scénarios produits, notamment en termes de coûts (coût social, environnemental, financier, etc.). Ensuite, il s'agit de se servir du modèle comme d'un outil de suivi pour évaluer la conformité entre la réalité observée sur le terrain et les prérogatives du scénario de développement retenu. Le cas échéant, le modèle permettrait alors d'asseoir une démarche itérative de planification, visant à minimiser les écarts constatés, ou à mieux comprendre les éventuelles dérives.

Ainsi, le modèle CWS offre une réelle visibilité rétrospective (il permet de mesurer ce qui s'est passé) et prospective (il permet d'extrapoler ces tendances et/ou de les modifier pour qu'elles correspondent à une volonté) des territoires urbains : « Que risque-t-il de se passer, et à quelle condition ? ». *De facto*, il s'agit donc véritablement d'un outil de réflexion accompagnant les décisions d'aménagement, et permettant d'en évaluer les conséquences. Au service des élus et des non initiés au monde de la planification urbaine, il est la base d'un travail collaboratif organisé autour de débats participatifs, permettant à chacun le même niveau d'appréhension du développement urbain, par une approche très visuelle.

Bibliographie

Agostinho J., 2005, Cellular Automata and Urban Planning Strategies. Using a Cellular Automata Land Use Model to establish different Scenarios of Growth, *Abstracts of the 14th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, September 9-13, Tomar, Portugal.

Antoni J.P., 2003, *Modélisation de la dynamique de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 535 p.

Antoni J.-P., 2007, Jeux de simulation et représentation cartographique. In : *Territoires du futur*, n°7, pp. 49-59.

Berchtold A., 1998, *Chaînes de Markov et modèles de transition. Application, aux sciences sociales*, Hermes, 284 p.

Grasland C., 1994, Limites politiques et barrières migratoires : l'exemple de l'ex-Tchécoslovaquie de 1961 à 1990. In : Gallusser W., 1994, *Political Boundaries and Coexistence*, UGI.

Guérois M. 2003. *Les formes de villes vues du ciel*, Thèse de géographie, Sous la direction de D. Pumain, Université de Paris I, 338 p.

Hagen-Zanker A., Straatman B., Uljee I., 2005, Further developments of a fuzzy set map comparison approach, *International Journal of Geographical Information Science*, volume 19, issue 7, p.769-785

Holm E., Holme K., Mäkilä K., Mattson-Kauppi M., Mörtvik G., *The microsimulation model SVERIGE; content, validation and applications*, SMC, Kiruna, Sweden, 2004 (www.sms.kiruna.se)

King L.J., 1969, *Statistical Analysis in Geography*, Prentice Hall inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 288 p.

Rimbert S., Cauvin C., 1976, *La lecture numérique des cartes thématiques*, Editions Universitaires de Fribourg, Suisse, 172 p.

Salingros N. 2003, *Connecting the Fractal City*, Keynote speech, 5th Biennial of towns and town planners in Europe, Barcelona, April 2003

Sanders L., Objets géographiques et simulation agent, entre thématique et méthodologie, *Revue Internationale de Géomatique*, Numéro spécial « Dynamiques urbaines et mobilités », à paraître.

Weber C., Hirsch J. 1997, Potential model applications in planning issues, Proceedings of the 11th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography, Durham Castle, City of Durham, UK, September 3-7.

White, R., Engelen, G., and Uljee, I., 1997, The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 323-343.