

Roel Plant, Pierre Maurel, Éric Barbe et Jane Brennan (dir.)

Les terres agricoles face à l'urbanisation De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information ?

Éditions Quæ

Chapitre 9 - Modèles et simulations spatio-temporels comme « objets intermédiaires » : le cas de l'étalement urbain à la Réunion

Xavier Augusseau, Jeremy Bourgoïn, Daniel David, Pascal Degenne,
Erwann Lagabriele, Guillaume Lestrelin et Danny Lo Seen

Éditeur : Éditions Quæ
Lieu d'édition : Éditions Quæ
Année d'édition : 2018
Date de mise en ligne : 23 février 2021
Collection : Update Sciences & Technologie
ISBN électronique : 9782759230297



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

AUGUSSEAU, Xavier ; et al. *Chapitre 9 - Modèles et simulations spatio-temporels comme « objets intermédiaires » : le cas de l'étalement urbain à la Réunion* In : *Les terres agricoles face à l'urbanisation : De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information ?* [en ligne]. Versailles : Éditions Quæ, 2018 (généré le 24 février 2021). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/quæ/28445>>. ISBN : 9782759230297.

Chapitre 9

Modèles et simulations spatio-temporels comme « objets intermédiaires » : le cas de l'étalement urbain à la Réunion

XAVIER AUGUSSEAU, JEREMY BOURGOIN, DANIEL DAVID, PASCAL
DEGENNE, ERWANN LAGABRIELLE, GUILLAUME LESTRELIN, DANNY
LO SEEN

Introduction

Les processus de périurbanisation se traduisent par une forte tension sur le foncier agricole et par l'émergence d'une demande en agriculture « de services ». De nouvelles fonctions sont attribuées à l'agriculture, comme la gestion des aménités rurales et environnementales (Beuret et Cadoret, 2009). L'espace agricole devient ainsi le support de multiples fonctions (production primaire et services environnementaux) et fait l'objet de controverses entre acteurs urbains, environnementalistes et acteurs du monde agricole (Bertrand *et al.*, 2006).

Ainsi, l'étalement urbain, qui impacte majoritairement le foncier agricole en France (88 % des espaces artificialisés sont des espaces agricoles (CGDD, 2012)), est devenu un enjeu prioritaire qui s'inscrit désormais dans différents agendas politiques. La loi de modernisation de l'agriculture et de la pêche (2010) et la loi d'avenir pour l'agriculture, l'alimentation et la forêt (2014) offrent différents instruments d'action publique pour mieux protéger le foncier agricole qui est considéré comme un facteur de production. Concomitamment, les différentes lois du Grenelle de l'environnement donnent de nouvelles prérogatives aux intercommunalités pour réguler la consommation par l'urbanisation des espaces agricoles, considérés comme supports d'aménités positives et contribuant au développement durable des territoires.

Les enjeux autour du foncier agricole dépassent donc le champ de la production et nécessitent de considérer les négociations réalisées par l'ensemble des acteurs et des instances de gouvernance (Jarrige *et al.*, 2006). La diversification des questionnements autour de l'agriculture et la prise en compte d'une pluralité d'acteurs et de perspectives dans les négociations et dans la prise de décision nécessitent également des innovations sociales et organisationnelles. Ces nouvelles situations de gouvernance « partagée » rendent plus difficiles les choix et la recherche de consensus (Soucard, 2013).

Le recours à l'information géographique et « l'usage raisonné des représentations spatiales », notamment sous la forme de modèles spatialisés, semblent être une des voies

privilegiées pour mettre en avant différents points de vue, en débattre et, potentiellement, dégager des consensus (Lardon et Piveteau, 2005 ; Maurel *et al.*, 2007).

Dans des situations complexes où les facteurs d'incertitude sont importants, la prise de décision pour la gestion et l'aménagement des terres devient un véritable défi (McCarthy et Possingham, 2006). La modélisation rend possible l'adoption d'une posture de gestion adaptative (Schreiber *et al.*, 2004) en permettant la manipulation du système et l'expérimentation de scénarios contrastés. Ces représentations artificielles sont de plus en plus utilisées pour explorer, apprendre de futurs possibles, et ainsi anticiper le potentiel impact d'instruments politiques avant leur implémentation (Geist *et al.*, 2006). Les démarches de modélisation participative font état d'un besoin d'objectivité et de neutralité dans la gestion des ressources naturelles et soulignent le besoin d'impliquer un grand nombre de parties prenantes dans l'élaboration de scénarios prospectifs (Wollenberg *et al.*, 2000 ; Alcamo *et al.*, 2006 ; Lambin et Geist, 2006 ; Kok *et al.*, 2007). Ces modèles sont ainsi perçus comme des supports de négociations plutôt que comme des outils de prise de décision (Verburg *et al.*, 2006).

Si l'utilisation de modèles comme objets intermédiaires peut jouer un rôle important dans la médiation et les processus d'apprentissage (Vinck, 2000 ; Antona *et al.*, 2005), il est donc nécessaire de promouvoir des démarches de coconstruction itératives pour assurer une bonne appropriation des modèles et leur mise en débat par les acteurs concernés (Van Ittersum *et al.*, 1998 ; Volk *et al.*, 2010).

Ce chapitre présente les premiers résultats de la construction d'un dispositif partenarial qui mobilise un outil de simulation de dynamiques paysagères utilisé comme support d'un exercice de prospective territoriale sur le territoire d'une intercommunalité de l'île de la Réunion. L'exercice vise à explorer différents scénarios d'évolution de l'occupation du sol dans lesquels l'étalement urbain et ses impacts constituent un enjeu central. Après avoir décrit les processus qui contribuent à l'étalement urbain à la Réunion, nous présenterons notre approche de modélisation de ces processus et de mobilisation des modèles comme supports de discussion.

Ce dispositif a été élaboré dans le cadre du projet Descartes de janvier 2013 à décembre 2014. Il a mobilisé un panel assez divers d'une quinzaine d'institutions locales : services de l'État, collectivités territoriales, filières agricoles, gestionnaires d'espaces naturels.

Démarche

Dans un contexte insulaire, le projet Descartes vise à construire une démarche d'élaboration participative d'un diagnostic sur la place et la contribution de l'agriculture à des projets de territoire sur l'île de la Réunion (quel espace agricole ? pour quelle production ? pour quels services ?). Dans la perspective de développer des apprentissages, cette démarche intègre les partenaires institutionnels et la communauté scientifique sur l'ensemble de la mise en œuvre du projet. Le travail en partenariat s'appuie sur un outil de simulation cartographique visant à tester les « conséquences et cohérences », en matière de services (production et services environnementaux), de différents scénarios d'affectation de l'usage des sols dans un projet de territoire. Cet outil est construit comme interface entre les parties prenantes et les bases de données et modèles. Il est ainsi mobilisé comme support de débats et d'apprentissage collectif.

La mobilisation de modèles comme objets intermédiaires doit s'inscrire dans une démarche organisant les interactions entre scientifiques et acteurs concernés par le projet.

Ces interactions sont considérées comme nécessaires à un processus d'apprentissage collectif, gage de l'utilisation des résultats du projet par les acteurs.

La première étape de notre démarche consiste à mettre en place et à consolider une arène qui garantisse la légitimité de l'exercice de prospective et en précise la finalité. Pour cela, nous avons choisi de développer un premier modèle démonstrateur qui représente les processus d'étalement urbain. Ce modèle est mobilisé pour mettre en débat la problématique de l'étalement urbain et plus spécifiquement du mitage agricole. Les interactions avec les partenaires se déroulent, selon une démarche itérative, au cours de forums — ateliers collectifs et groupes de travail plus restreints — durant lesquels le modèle et les simulations sont discutés puis améliorés.

Contexte

Le projet est mené à la Réunion, espace insulaire français de 2 512 km² situé dans l'océan Indien, qui se caractérise par des croissances démographique et économique importantes devant composer avec de fortes contraintes d'espace. La gestion du foncier est source de divergences. Depuis deux décennies, les acteurs du monde agricole tentent de protéger les terres arables, progressivement déclassées pour le développement urbain, tandis que les collectivités territoriales cherchent à assurer les besoins économiques et sociaux d'une population croissante (dans la partie « utile » de l'île, les densités sont proches de 600 hab./ha). L'espace agricole de l'île (environ 50 000 ha) est le support de fonctions de production « primaire », mais devient aussi le support d'une production potentielle de services environnementaux. Les différentes filières agricoles doivent ainsi réaliser leurs propres objectifs (production et surfaces), potentiellement concurrentiels, tout en contribuant au développement durable de l'île. Or, les différentes politiques sectorielles se superposent sans qu'il y ait vraiment de lieux (forums) et d'outils pour diagnostiquer et débattre des interactions. Ainsi, les différents diagnostics territoriaux des projets de planification (comme les Plans locaux d'urbanisme, PLU, ou les Schémas de cohérence territoriale, SCoT) présentent généralement une vision segmentée des différents enjeux du territoire, bien loin de l'intégration nécessaire.

La création récente du Parc national de la Réunion (dont le « cœur de parc » couvre 40 % de l'île) et d'une Réserve naturelle nationale marine sur les récifs coralliens du littoral ouest inscrivent dans l'espace géographique un projet de territoire insulaire orienté vers la conservation et la valorisation du patrimoine naturel (figure 9.1).

Le Territoire de la Côte Ouest (TCO), un Établissement public de coopération intercommunale (EPCI, voir chapitre 1) regroupant cinq communes, a été choisi comme territoire d'expérimentation. Il concentre d'importantes problématiques. Les élus et gestionnaires doivent trouver un équilibre et composer avec une démographie dynamique, des enjeux sociaux de taille (70 % des ménages sont éligibles au logement social) et des espaces agricoles qui ont été, en partie, sanctuarisés (la sole cannière) par des périmètres irrigués³⁴. Le TCO se caractérise également par la présence en aval d'un lagon, situé au nord-ouest du territoire, dont les ressources sont directement impactées par les activités anthropiques en amont, et par le cœur du Parc national dans les Hauts (figure 9.1). Ainsi, d'importants enjeux environnementaux, notamment sur la qualité de l'eau et les risques liés au ruissellement et à l'érosion, viennent se superposer aux conflits d'usage « historiques » sur le foncier. Enfin, pour mettre en œuvre son projet de territoire (c'est-à-dire

34. Un périmètre réglementaire protège la majorité de la sole cannière et des espaces concernés par un vaste projet d'irrigation.

le SCoT), le TCO doit intégrer des politiques élaborées aux échelles régionales et nationales (comme les politiques agricoles) (figure 9.2).

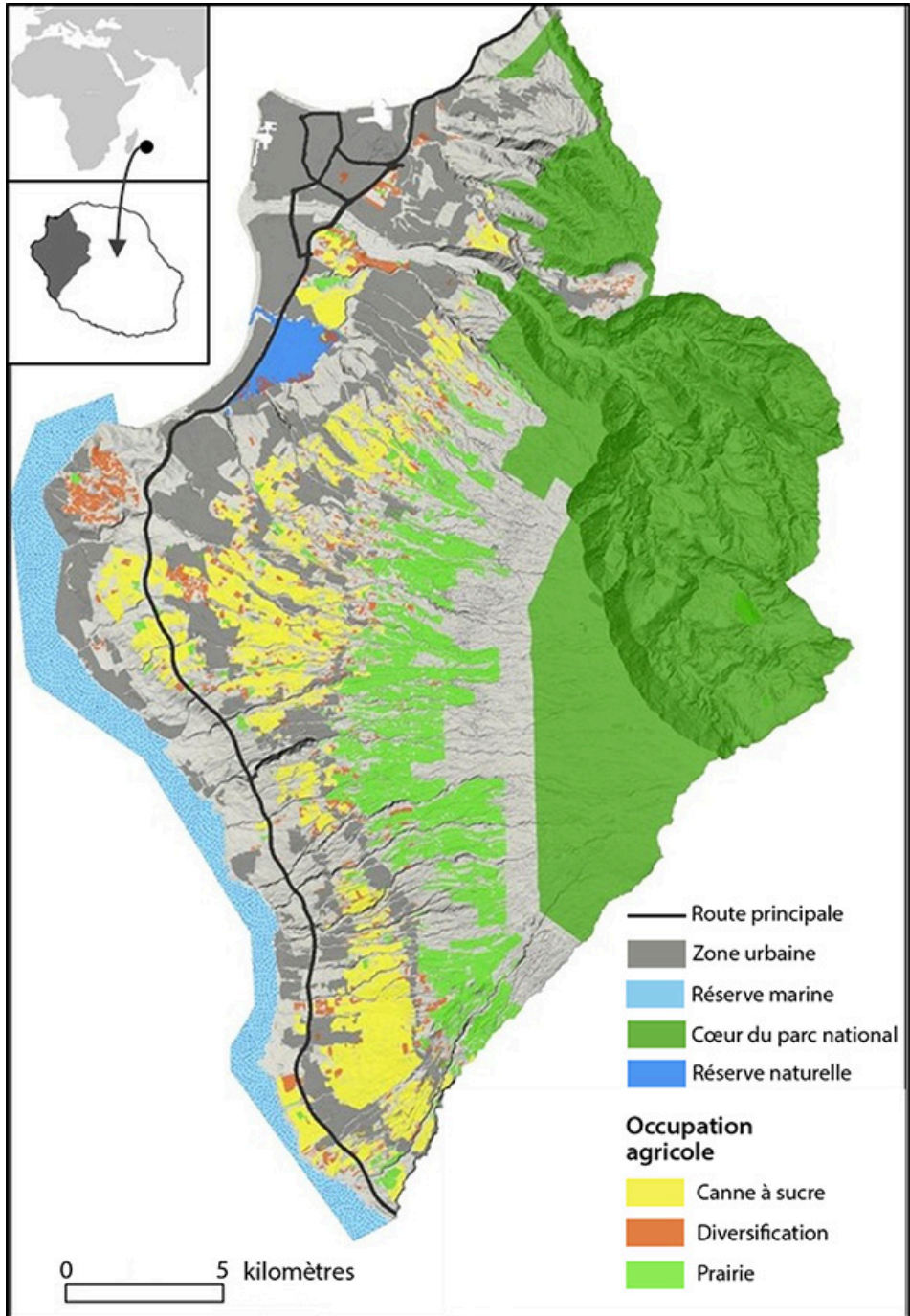


Figure 9.1. L'occupation du sol sur le Territoire de la Côte Ouest.

Réunion

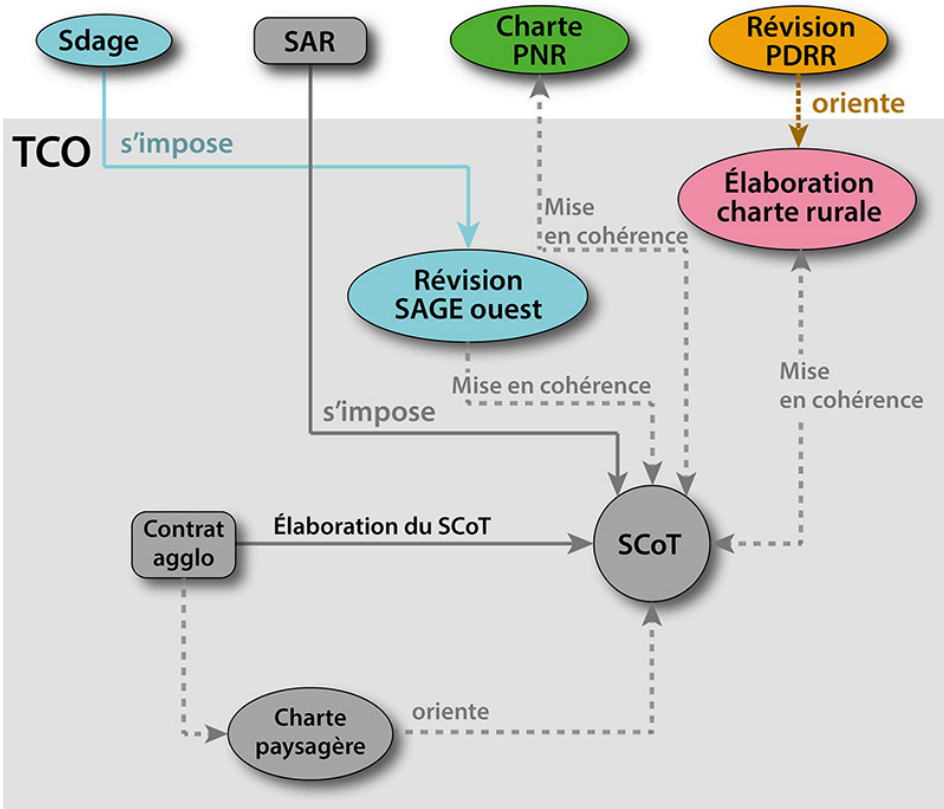


Figure 9.2. Interactions entre les principaux documents de planification territoriale et sectorielle, élaborés à différentes échelles.

Sdage : Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux ; SAR : Schéma d'aménagement régional ; PNR : Parc national de la Réunion ; PDRR : Plan de développement rural réunionnais ; SAGE : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux ; SCoT : Schéma de cohérence territoriale.

Étalement urbain et mitage à la Réunion

L'étalement urbain, une composante principale de l'urbanisation

L'étalement urbain, dans des petits territoires insulaires comme la Réunion, relève de processus d'urbanisation très spécifiques liés à l'histoire de ces îles. Les impacts y sont également beaucoup plus marqués qu'en métropole en raison d'importantes contraintes d'espace. En conséquence, l'équilibre entre les espaces urbains et agricoles représente un des enjeux majeurs pour l'aménagement du territoire et la planification.

L'urbanisation à la Réunion est relativement récente et ne s'est vraiment développée qu'à partir des années 1960, après la départementalisation initiée en 1946. La forte croissance démographique et la transformation rapide d'une société rurale vers une économie tertiaisée ont induit une urbanisation très dynamique dans une logique de

rattrapage en matière de logements et d'infrastructures (Jauze, 1998). Cette dynamique s'est traduite par une expansion spatiale importante (figure 9.3), produisant des agglomérations urbaines (au sens de l'Insee) éloignées du modèle métropolitain. Elles peuvent être assimilées à des « villes jardins », caractérisées par une faible densité d'une moyenne de 10 à 12 logements/ha (Lajoie et Actif, 2001). Dans les années 1990, selon les statistiques de l'Insee, l'urbanisation consommait de 500 à 600 ha de terres agricoles par an, soit près de 1 % des terres agricoles (Insee, 2011). Depuis, l'étalement urbain tend à diminuer sous les effets conjugués de la planification territoriale, qui promeut la densification de projets urbains privilégiant le logement collectif, et du coût financier de l'aménagement (réseaux, etc.) induit par les faibles densités urbaines.

L'étalement urbain fait l'objet d'un suivi régulier, notamment avec la construction d'une tache urbaine réactualisée tous les cinq ans, à partir de la base de données topographique de l'IGN (BD TOPO®) qui est mise à jour tous les cinq ans (Agence d'urbanisme à la Réunion, Agorah). La tache urbaine réunionnaise est essentiellement résidentielle, avec une densité de 11 logements par hectare en moyenne, et sa surface a augmenté entre 1997 et 2008 de 2,2 % en moyenne par an. Elle occupait environ 10 % du territoire en 2008. L'analyse de l'évolution de la tache urbaine (Agorah, 2008a ; 2008b) montre que l'étalement urbain se produit pour moitié sur des espaces agricoles. Outre la consommation de terres cultivées, l'étalement urbain induit une fragmentation des espaces agricoles, au travers du mitage, qui fragilise les filières. Si cette tendance actuelle se poursuivait, près de 5 000 ha de terres agricoles seraient consommés d'ici 2020. Les études prospectives sur l'étalement urbain estiment, en partant d'un besoin de logements évalué à 106 000 résidences en 2020, que la moitié des nouveaux logements sera construite en zone urbaine et que les surfaces d'extensions, qui seront nécessaires, varieront de 4 200 ha pour un scénario tendanciel à 1 200 ha pour un scénario optimal (Coteba et Deal Réunion, 2010).

Le mitage agricole, une composante autonome de l'étalement urbain

Une des caractéristiques de l'urbanisation à la Réunion est qu'elle produit du mitage agricole. Le mitage désigne tout le bâti construit illégalement en zones réglementairement reconnues à vocation agricole et naturelle par les documents d'urbanisme (Plans d'occupation du sol, POS, et PLU). Il représente un phénomène constitutif de l'urbanisation à la Réunion qui peut se rattacher aux dynamiques historiques de peuplement vers les parties hautes de l'île. Mal connu, c'est un processus complexe qui est mû par des stratégies individuelles et se déploie différemment sur le territoire en fonction de facteurs historiques, sociaux et fonciers. Il représente un enjeu territorial important qui a des impacts sur la planification urbaine et le foncier agricole. Il est perçu négativement par les gestionnaires des collectivités et les services de l'État. L'analyse des facteurs à l'origine du mitage et les moyens de le réguler sont source de controverses entre les tenants d'une réglementation plus contraignante et les défenseurs d'une politique urbaine plus ambitieuse pour répondre aux besoins en logements.

L'analyse du mitage et de son impact est réalisée à partir de la mesure de son emprise spatiale, appelée « surface urbanisée » (figure 9.4). Elle prend en compte le voisinage du bâti construit selon la méthode tampon-érosion (Deal Réunion, 2011).



Figure 9.3. L'urbanisation de Saint-Paul (vieux centre-ville) et des planèzes périphériques en 2011 (source : IGN).

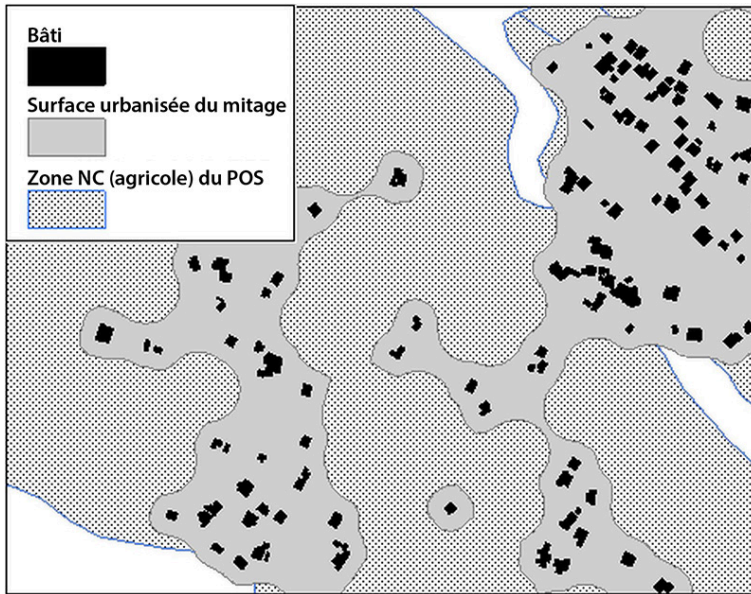


Figure 9.4. Emprise spatiale du mitage sur une planèze de la commune de Saint-Paul en 2009 (NC : zones non constructibles).

À la Réunion, 17 % des surfaces urbanisées mitent les espaces agricoles. Après une forte croissance jusqu'en 2003, le phénomène de mitage a eu tendance à diminuer, voire à se stabiliser dans certaines communes. Différents facteurs favorisant le mitage ont été identifiés, même s'il est difficile de les hiérarchiser :

- la structure parcellaire : taille, forme, processus de division parcellaire ;
- la proximité du réseau routier, de centres urbains ou de zones de mitage préexistantes ;
- la topographie, qui conditionne en partie la structure parcellaire ;
- le potentiel et la dynamique agricole (souvent en contradiction avec la vocation réglementaire des usages des sols) ;
- les documents de planification urbaine (Schéma d'aménagement régional, POS), qui peuvent avoir un impact local sur la dynamique du mitage (pression foncière, conflit avec un projet agricole, etc.).

Les acteurs agricoles, et en particulier la filière de la canne à sucre, ont élaboré un zonage du potentiel agronomique en combinant différents critères agronomiques (type de sol, pente, altitude, pierrosité, etc.). Si sa finalité première est d'orienter les priorités d'aménagement agricole, il est souvent mobilisé lors des révisions des documents d'urbanisme pour remettre en cause certaines décisions de changement d'usage des sols au détriment de l'agriculture.

Le TCO est la région la plus marquée par l'étalement urbain, qui se développe à égalité sur les espaces à urbaniser réglementaires et sur les espaces agricoles et naturels. C'est aussi là que le mitage agricole est le plus important, notamment sur la commune de Saint-Paul, où l'urbanisation occupe près de 20 % des espaces agricoles et naturels (Deal Réunion, 2011). L'analyse de différentes zones mitées sur le TCO montre que le mitage se déploie sur des espaces où l'agriculture est marginale et en déclin. Le potentiel agricole y est souvent faible. Les zones historiques de mitage se caractérisent par des densités de bâti qui sont relativement importantes, au minimum de 2 bat./ha. En zone 2NC (non constructible), à vocation agricole où seul l'habitat agricole est autorisé, ces densités sont

proches de 8 bat./ha (Deal Réunion, 2011). Ces zones constituent de fait de petits bourgs ruraux. Après avoir culminé dans les années 1990, la dynamique de mitage s'est significativement atténuée depuis 2003 sur la majeure partie du territoire du TCO. Malgré tout, il existe une grande disparité en termes de progression, avec des zones de mitage historique stabilisées et des zones à forte dynamique, de +30 à +60 % depuis 1997 (figure 9.5).

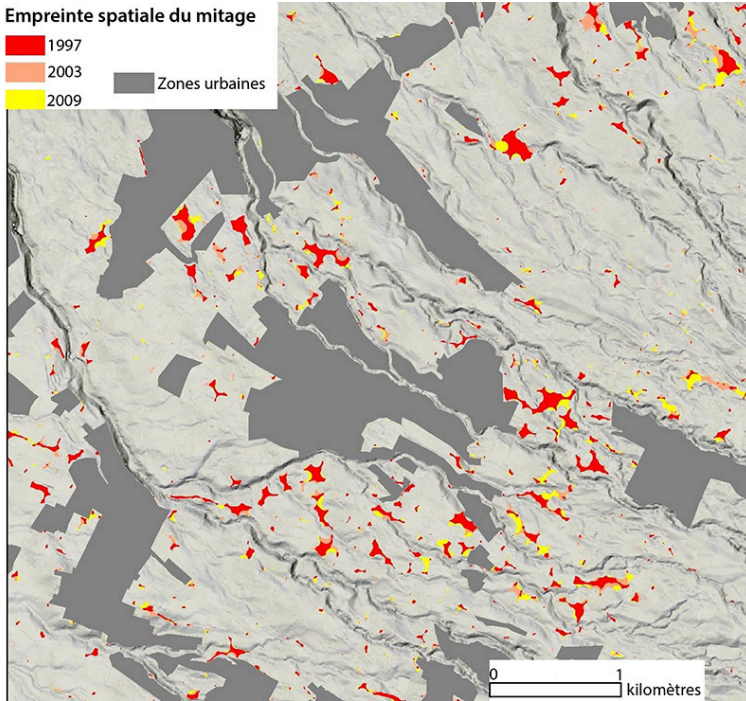


Figure 9.5. Évolution du mitage dans les hauts de la commune de Saint-Paul.

Un mitage agricole pas ou peu pris en compte dans les politiques d'aménagement

Depuis les années 1990, différents projets de planification territoriale tentent de réguler et limiter l'étalement urbain. Dès 1995, le premier Schéma d'aménagement régional (SAR)³⁵ fixe comme objectif prioritaire la préservation des espaces naturels et agricoles (Metzger, 2004). Dans le dernier SAR, révisé en 2011, les espaces urbains, organisés selon une hiérarchie, sont soumis à des objectifs de densification en matière de logement. Les espaces agricoles sont sanctuarisés et l'étalement urbain est strictement encadré par des quotas de surface, alloués aux communes, sur quelques zones agricoles en périphérie des pôles urbains qui ont fait l'objet d'âpres négociations avec la profession agricole.

Néanmoins, l'analyse du SAR de 2011 montre que la plupart des zones mitées du TCO sont situées dans des espaces classés comme agricoles mais où l'activité agricole est en fait relativement marginale. Le classement réglementaire de ces espaces, situés dans l'emprise du Projet d'irrigation du littoral ouest, apparaît ainsi moins guidé par la prise en compte de la réalité de l'usage des terres à l'échelle locale que par l'hypothèse, défendue

35. Dans les départements d'outre-mer, le SAR fixe les grandes orientations en matière d'aménagement qui s'imposent aux documents de planification des communes (POS, PLU).

par le monde agricole, que l'irrigation pourrait améliorer le potentiel agricole et, à terme, induire une dynamique agricole. À l'échelle communale cependant, on commence à observer une prise en compte du mitage historique. Dans le cadre de révisions de PLU, certaines de ces zones bénéficient d'une réglementation spécifique autorisant le bâti sur un périmètre restreint — l'objectif étant de concentrer le mitage sur ces zones.

À l'instar de la planification territoriale, aux échelles intercommunale et communale, les documents de programmation comme le Plan local d'habitat (PLH) en matière de logement sont également censés jouer un rôle dans la régulation du mitage en précisant les moyens de répondre aux besoins en logement de la population. Dans le cas du TCO cependant, les résultats des PLH successifs depuis 2005 se sont avérés assez mitigés. En particulier, l'impossibilité d'atteindre les objectifs de construction de logements sociaux — des objectifs particulièrement élevés sur le territoire du TCO — a probablement eu un impact sur la poursuite du mitage et de l'étalement urbain.

En fin de compte, malgré les moyens mis en œuvre et l'existence de différents outils réglementaires pour réguler la consommation des espaces agricoles et naturels, de fortes incertitudes demeurent sur la capacité des collectivités à répondre à l'ensemble des besoins en logement et à réaliser les objectifs de densification inscrits dans les documents de planification.

Modélisation de l'étalement urbain et du mitage

Le modèle conceptuel

La consommation d'espaces agricoles (et/ou naturels) par l'urbanisation est modélisée comme résultant d'un double processus : d'une part le déclassement de terres agricoles par la planification urbaine, et d'autre part le mitage, qui obéit à des décisions individuelles. Nous avons fait le choix de représenter ces processus en nous basant sur des éléments de planification du SAR qui vont fortement influencer et réguler les dynamiques d'urbanisation à venir. En outre, les objectifs qui y sont assignés (en matière de densification, d'extension spatiale et de structuration des pôles urbains) donnent d'emblée un « scénario » de référence.

La planification urbaine se décline en trois sous-processus qui sont : la densification — le remplissage de « dents creuses » en zone urbaine ; l'extension-déclassement de terres agricoles dans les zones AU (à urbaniser) selon un quota défini par le SAR ; et la construction d'infrastructures — selon des projets planifiés à moyen terme (figure 9.6). Enfin, nous faisons l'hypothèse que le processus de mitage est lié à la non-satisfaction des besoins en logements par la planification urbaine. Autrement dit, le mitage est une réponse individuelle à un manque de logements non pourvus par les politiques publiques qui ont, notamment, en charge de développer le logement social.

La modélisation avec Ocelet

Modéliser un processus selon une approche systémique consiste essentiellement à identifier et à décrire les entités (éléments du système) qui interviennent dans le processus, à décrire les relations (interactions dynamiques) entre ces entités, et enfin, à simuler leurs évolutions selon plusieurs scénarios. Pour réaliser ce modèle, nous utilisons Ocelet, un langage « métier » de modélisation de dynamiques spatiales et paysagères (Degenne et Lo Seen, 2016). Celui-ci est conçu autour d'un ensemble restreint de concepts clés, dont celui central de graphe (objet mathématique constitué d'un ensemble de nœuds dont certains sont connectés par des arcs) d'interaction (la sémantique des interactions est portée par les arcs) pour exprimer les différents types de relations possibles (spatiales,

fonctionnelles, sociales, hiérarchiques) entre les entités du modèle. Ocelet est associé à un environnement logiciel qui permet de construire les modèles et les scénarios, de lancer les simulations, et de sauver les résultats sous diverses formes, dont celle de cartes animées visualisables sous Google Earth.

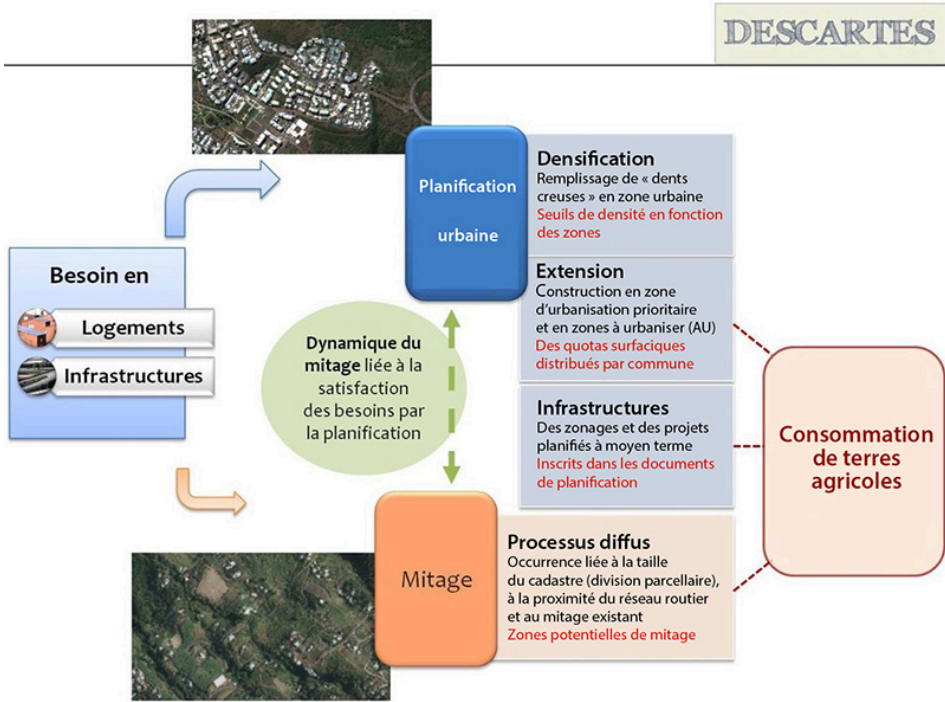


Figure 9.6. Représentation des dynamiques urbaines.

L'intérêt de ce langage est qu'il permet de manipuler aisément de l'information géographique, aussi bien en entrée qu'en sortie des modèles, en créant et en initialisant des entités Ocelet de façon quasi automatique à partir de données géographiques natives.

Un autre avantage que procure le choix d'Ocelet pour implémenter nos modèles découle du positionnement de ce langage au carrefour des approches de modélisation *top-down* (descendantes) et *bottom-up* (ascendantes). Ainsi, si la représentation de l'espace et des entités dans Ocelet est comparable, notamment en termes de granularité, à ce que l'on pourrait obtenir avec des approches de modélisation ascendantes comme les automates cellulaires (White et Engelen, 1993) ou les systèmes multi-agents (David, 2010), la description de son évolution au cours du temps se fait de façon plus globale, à la manière d'approches descendantes héritées du concept de dynamique des systèmes (Forrester, 1968). Ceci permet aux thématiciens d'avoir une plus grande compréhension du fonctionnement des modèles qu'ils ont contribué à coconstruire, dans la mesure où les blocs dictant l'évolution de ces modèles en langage Ocelet peuvent se lire à la manière d'un scénario narratif.

Enfin, afin de faciliter la visualisation des évolutions au cours du temps de notre territoire d'expérimentation (Sheppard et Cizek, 2009), Ocelet permet d'exporter les résultats des modèles dans les formats kml (pour Google Earth) ou shp (pour les systèmes d'information géographique) ayant des attributs temporels et de produire des cartes dynamiques en

3D qui donnent aux utilisateurs une meilleure contextualisation des résultats des simulations sur leur territoire.

La construction itérative du modèle

Un premier prototype — simplifié et volontairement non calibré — a été développé entre chercheurs dans le but explicite d'exposer au TCO notre savoir-faire en matière de modélisation et de simulation cartographique sur une zone test (d'échelle communale). Pour mieux focaliser l'attention de nos interlocuteurs sur les possibilités offertes par notre approche, nous avons choisi de tester ce prototype sur une commune située en dehors du territoire du TCO.

Suite à ce prototype, nous avons enclenché avec les équipes du TCO la démarche de modélisation qui a permis d'aboutir au modèle plus complet dans lequel nous avons conceptualisé, implémenté et couplé deux dynamiques : l'urbanisation planifiée et le mitage. Les échanges avec le TCO et les autres partenaires ont alors permis d'enrichir et d'améliorer le modèle, notamment sur le mitage en distinguant deux processus distincts : le mitage « traditionnel », qui relève de stratégies individuelles et qui est autonome vis-à-vis des dynamiques urbaines, et le mitage qui vise à répondre à des besoins en logements qui ne sont pas résolus par l'urbanisation planifiée et qui correspond à notre première hypothèse. Enfin, parmi les facteurs pouvant favoriser le mitage, nos partenaires ont proposé d'intégrer la notion d'attractivité qui peut être induite par la mise en service de nouveaux équipements ou la recherche de meilleures conditions d'habitat (recherche d'un « effet balcon » sur des hauteurs offrant un panorama exceptionnel).

Le modèle implémenté : entités et processus à l'œuvre

Plusieurs entités spatiales multi-échelles sont représentées et manipulées dans ce modèle, en particulier le TCO lui-même, ses pôles urbains, auxquels sont associés des zones d'extension urbaine, et ses parcelles cadastrales.

Chaque année, dans la dynamique d'urbanisation planifiée, une partie des parcelles cadastrales qui se trouvent au sein des zones d'extension urbaine définies dans les documents de planification (notamment le SCoT) s'urbanise en fonction des objectifs de nombre et de densité de logements associés à chacun des pôles urbains (à l'horizon 2020). En fonction des contraintes et des scénarios de simulation, la part des besoins en logement qui n'est alors pas satisfaite vient enrichir pour partie la dynamique de mitage. Dans cette dernière, des maisons sont construites illégalement sur des parcelles cadastrales se situant en dehors des zones urbaines réglementaires mais qui possèdent un fort potentiel en raison de leur attractivité et de leur proximité au réseau routier, aux pôles urbains et/ou aux zones historiques de mitage des terres agricoles.

La construction du modèle dans Ocelet passe par la définition des entités, des relations et des scénarios exprimant les deux processus présentés en figure 9.7.

Les entités de chaque type sont initialisées à partir d'un fichier SIG (*shapefile*) et sont renseignées par plusieurs propriétés (ex. : identifiant, surface, statut, géométrie, nombre de logements) dont les valeurs pour certaines vont évoluer durant la simulation. Ainsi, par exemple, chaque entité « pôle urbain » est dotée d'objectifs en termes de nombre de logements à bâtir, les entités « zone d'extension urbaine » sont renseignées par une date de mise en service supposée de réseaux d'assainissement, et chaque parcelle cadastrale située hors des zones urbaines se voit affecter des pondérations reflétant sa proximité au réseau routier.

Modèle de consommation de terres agricoles par l'urbain

DESCARTES

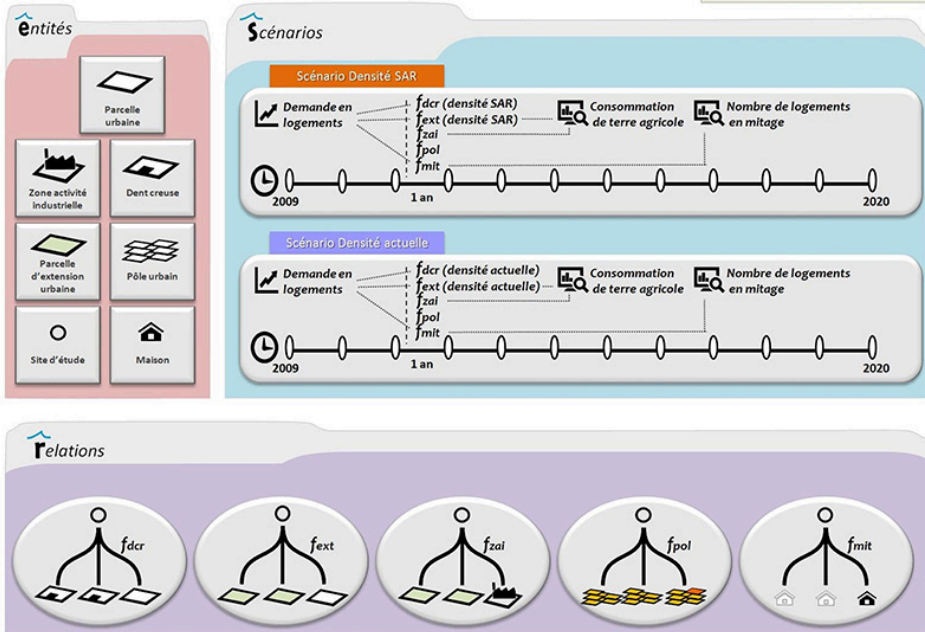


Figure 9.7. Les primitives du modèle de consommation de terres agricoles par l'urbain.

Les relations utilisées sont de type hiérarchique, reliant toutes les entités d'un même type à l'entité « site d'étude ». Ainsi, chaque entité « pôle urbain » est reliée à l'entité « TCO » par une relation d'appartenance, alors qu'une entité « zone d'extension urbaine » est reliée à une entité « pôle urbain » particulière par une relation de dépendance. Chaque relation est un graphe d'interaction, c'est-à-dire un ensemble de nœuds (les entités) reliés par des arcs. Les arcs portent les fonctions d'interaction ; elles décrivent ce qui se passe entre les entités connectées par les arcs. Un tel graphe permet d'accéder individuellement à chaque entité et à chaque pas de temps pour y exécuter des fonctions telles que transformer une entité non construite (ex. : dent creuse ou parcelle d'urbanisation prioritaire) en entité construite à un moment donné de la simulation. Ces fonctions font intervenir des probabilités de changements qui sont aussi des paramètres du modèle.

Les scénarios servent à décrire l'évolution du système à partir d'un état initial, avec une durée et un pas de temps prédéterminés. Différents scénarios expriment alors différentes hypothèses d'évolution. Dans le cas présent, ils prennent en compte l'évolution de la demande en logements, un pourcentage de nouveaux logements sur le bâti existant, la construction de nouveaux logements dans les dents creuses en respectant une densité préconisée, un quota de surface agricole par pôle urbain à urbaniser en priorité, dont un pourcentage à utiliser d'ici 2020, et enfin le mitage pour absorber le décalage entre l'offre et la demande en logements.

Simulation et exemples de sorties

Les résultats des simulations issues de cette version du modèle ont été exportés sous forme de fichiers kml temporels pour comparer les évolutions spatiales associées à des

scénarios tests. Les figures suivantes illustrent trois situations types que nous avons simulées sur une période entre 2010 et 2020, avec un pas de temps annuel.

Sur la figure 9.8, on observe la différence entre un scénario dans lequel nous avons maximisé l'importance du critère de proximité aux zones déjà mitées, ce qui explique que les cercles jaunes (les zones mitées au cours de la simulation) soient concentrés autour des zones rouges (les zones de mitage historique), et un scénario dans lequel nous avons favorisé le critère de proximité au réseau routier. La figure 9.9 illustre les effets sur le mitage de l'attractivité renforcée autour d'un échangeur mis en service sur l'axe routier principal du territoire. Et la figure 9.10 met en évidence le lien entre l'urbanisation planifiée et le mitage, puisque dans un cas l'urbanisation planifiée a su se faire selon de forts objectifs de densification de logements et d'urbanisation dans les zones d'extension urbaine, ce qui a engendré un mitage assez faible (qui correspond uniquement à la part relevant du mitage « traditionnel »), tandis que dans l'autre cas l'urbanisation planifiée n'a pas su tenir les hypothèses de densification ou d'extension qui étaient prévues, et cela s'est traduit par une augmentation du mitage dit « vases communicants » dont la part est venue s'ajouter au mitage « traditionnel ».

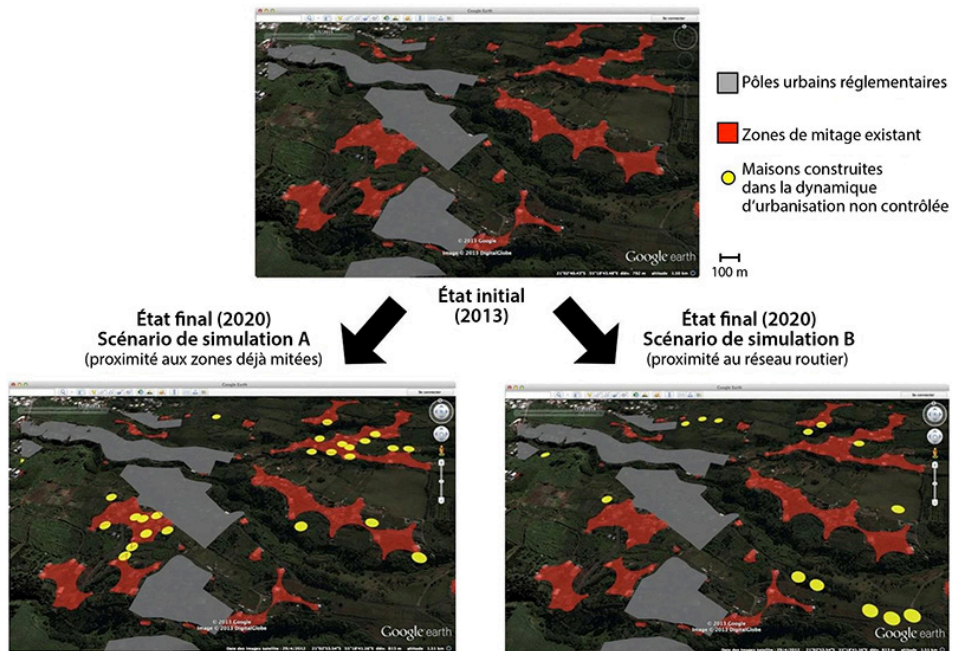


Figure 9.8. Impact de la proximité des zones de mitage existantes et de la proximité au réseau routier sur le mitage.

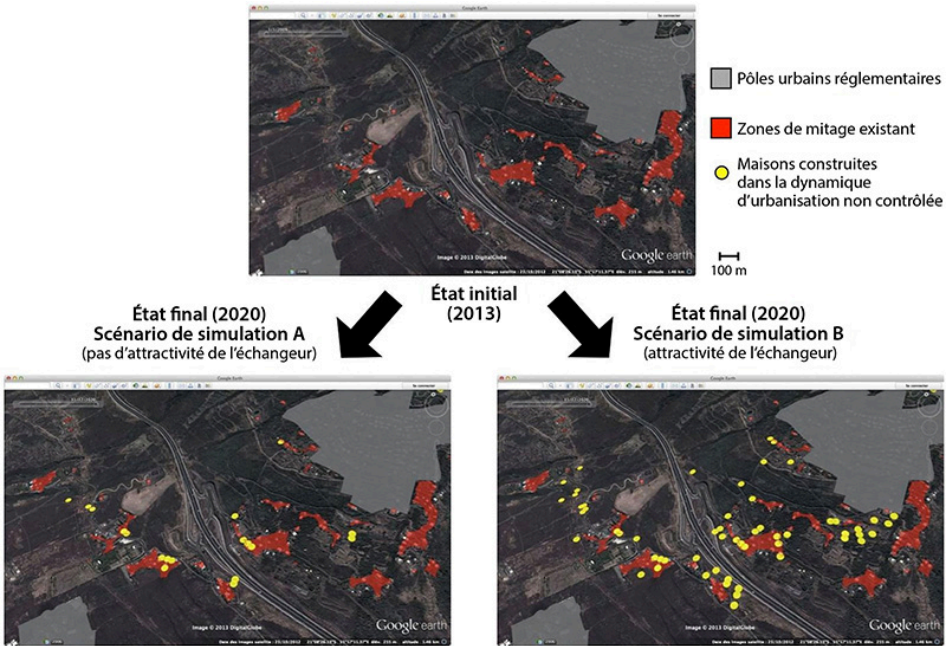


Figure 9.9. Impact de l'attractivité d'une zone particulière (ici un échangeur sur un axe routier majeur) sur le mitage.

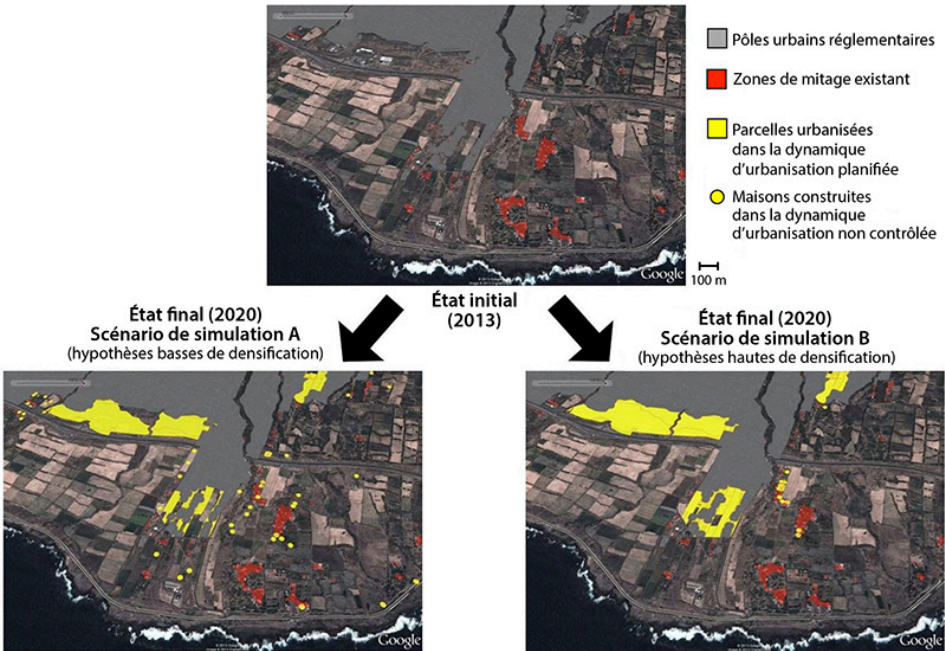


Figure 9.10. Impact des évolutions de l'urbanisation planifiée sur le mitage.

Mobilisation du modèle et de la thématique « mitage »

Au cours de l'atelier de démarrage du projet organisé en mars 2012, il a été demandé aux représentants d'une dizaine d'organisations partenaires (ex. : chambre d'agriculture, services de l'État, filières agricoles, Parc national) de présenter leur vision des principaux enjeux liés à la planification et à l'aménagement du territoire à la Réunion. Les présentations ont été suivies d'une discussion sur les notions de « paysage » et de « services écosystémiques » et les interactions et conflits entre usages des terres. Les participants ont ainsi pu identifier un certain nombre de « propositions de recherche » visant à combler des manques d'informations et/ou organisationnels ayant trait à différents types d'interactions entre usages des terres. Concernant les interactions entre agriculture et développement urbain, il a été proposé d'analyser les dynamiques historiques de mitage, de mettre en évidence leurs moteurs, d'identifier des scénarios d'évolution politiques et socio-économiques réalistes et d'évaluer leurs impacts sur le mitage et la consommation des terres agricoles. Concernant les interactions entre écosystèmes naturels et usages anthropiques, il a été proposé d'identifier des indicateurs et d'évaluer les impacts écologiques des dynamiques agricoles et d'urbanisation (notamment, évaluer le potentiel agricole des zones de continuité écologique du SAR).

Bien que l'atelier ait permis de positionner le projet Descartes relativement aux principales problématiques auxquelles sont confrontés les acteurs de l'aménagement du territoire à la Réunion, la mise au point d'une démarche et de méthodes pour répondre à ces problématiques s'est avérée plus difficile. En cause, la réaction des participants aux propositions de l'équipe de recherche de développer des activités de prospective territoriale qui s'est finalement révélée très variable : certains ont fait montre d'une bonne compréhension et d'un intérêt marqué pour une démarche de modélisation spatiale et d'exploration de scénarios ; d'autres étaient moins convaincus ou avaient une vision plus confuse de la démarche ; d'autres enfin étaient franchement rétifs à toute initiative d'ordre collectif et/ou à visée intégrative. La décision fut donc prise par l'équipe scientifique de se focaliser sur le développement d'un modèle permettant de simuler des dynamiques urbaines, au détriment, dans un premier temps, de la structuration d'une arène de travail collaboratif. Ce faisant, l'équipe faisait l'hypothèse que le développement d'un modèle « démonstrateur » permettrait d'illustrer le potentiel d'intégration et d'investigation de la démarche et, partant, d'accroître l'intérêt et le soutien des acteurs de l'aménagement du territoire.

Le mitage constitue un important sujet de controverse à la Réunion, générant souvent de vifs débats entre conseils municipaux et acteurs du secteur agricole et de la planification urbaine. En effet, les services de l'État et les filières agricoles privilégient une vision « aménagiste » de l'urbanisme et militent pour renforcer la réglementation afin de contraindre les candidats au mitage. À l'inverse, les collectivités et leurs services d'urbanisme argumentent que c'est en faisant de la « bonne ville » qui répond aux besoins des populations que l'on pourra limiter le mitage. Ils mettent donc en avant le projet urbain.

Partant de cette observation, l'équipe de recherche a fait le choix de concentrer le travail de modélisation sur les dynamiques de consommation des espaces agricoles et naturels en lien avec l'urbanisation planifiée et le mitage (cf. partie « Modélisation »). Après avoir passé en revue différents rapports et documents de planification, participé à des ateliers et collecté des données géographiques et statistiques en lien avec ces questions, un premier modèle a été développé et appliqué à la municipalité de Saint-Pierre. Des simulations dérivées de ce modèle et présentées sous forme de cartes dynamiques avec

Google Earth ont ensuite été présentées et discutées au cours de réunions avec différents acteurs (ex. : filières agricoles, services de l'État, mairies et EPCI). Ce processus a permis d'attirer l'attention d'un certain nombre d'acteurs et de les engager dans un processus itératif de débat-amélioration progressive du modèle (ex. : choix des échelles de modélisation et des entités, définition des interactions entre variables). Il a également permis d'identifier l'intercommunalité du TCO comme une organisation partenaire clé, légitime et volontaire pour soutenir l'effort de structuration d'une arène de travail collaboratif.

Cette dernière étape a été grandement facilitée par l'actualité interne de l'équipe technique du TCO, en phase stratégique de redéfinition des grandes orientations de son territoire (ex. : validation du projet de SCoT et révision du SAGE). Des groupes de travail sur la modélisation des dynamiques d'urbanisation et la restitution de simulations sous Google Earth ont notamment permis d'alimenter des discussions entre l'équipe scientifique et le TCO autour du projet de SCoT et des différentes orientations possibles de l'urbanisation, en ciblant localement des incohérences ou des compromis potentiels. Suite à ces échanges, la collaboration a été formalisée par une charte de partenariat, signée par le président de l'EPCI en mars 2013, précisant la finalité du travail de prospective, les modalités d'interaction entre les acteurs du projet, et positionnant l'intercommunalité du TCO au centre d'un dispositif de réflexion et de débats sur l'évolution du territoire.

Dans le même temps, un premier atelier de travail collectif a été organisé, rassemblant des représentants de 15 organisations, pour discuter du modèle appliqué à la zone du TCO et des premières simulations, débattre des impacts sociaux et environnementaux du mitage ainsi que des moyens de régulation et de réduction du processus. Les simulations ont donné lieu à des débats sur les éléments déterminant la progression du mitage (ex. : accès aux réseaux « eau » et « électricité », proximité à la route, aux pôles urbains et aux poches historiques de mitage) et leur importance relative. L'existence et la portée des liens entre besoin en logements, urbanisation planifiée et mitage ont également été questionnées. Enfin, les participants ont insisté sur la nécessité de mettre à l'épreuve et de valider le modèle au travers d'une analyse des dynamiques historiques de mitage, et d'engager une réflexion spécifique sur les indicateurs permettant d'évaluer et de simuler les impacts socio-écologiques du mitage.

L'atelier s'est également révélé une bonne opportunité pour l'équipe technique du TCO, en défaut de communication récurrent avec le secteur agricole, d'exposer ses objectifs en lien avec le projet de recherche : à savoir, répondre à une demande des élus du TCO et développer des moyens techniques et institutionnels permettant d'explorer de manière non sectorielle les futurs possibles du territoire. Enfin, concernant le positionnement des différents acteurs, l'atelier a permis de mettre en évidence l'existence de perspectives divergentes concernant les moyens de gérer la problématique du mitage : un premier groupe de participants mettant l'accent sur la nécessité d'améliorer la réponse aux besoins en logements (c'est-à-dire plus de constructions et une meilleure prise en compte des différenciations socio-économiques) ; un second groupe favorisant plutôt le contrôle et la protection stricte des espaces agricoles et naturels.

Cette réflexion collective autour de la problématique du mitage a servi de fondation pour structurer et établir une arène de travail collaboratif portée par l'intercommunalité du TCO et animée par l'équipe scientifique au travers de forums (ateliers et groupes de travail) sur les dynamiques urbaines, agricoles et environnementales à venir au sein du TCO. Ainsi, entre avril et octobre 2013, une série de consultations et deux ateliers ont été organisés afin d'élaborer collectivement des scénarios contrastés et d'en débattre. Ces

scénarios décrivent à moyen terme (jusqu'en 2025) les interactions possibles entre différentes politiques et dynamiques urbaines et agricoles planifiées ou déjà à l'œuvre sur le territoire du TCO. À terme, la traduction de ces scénarios en simulations dans différents modèles implémentés en Ocelet et la construction d'indicateurs de suivi permettront d'évaluer les impacts socio-économiques et environnementaux possibles.

Discussion et conclusion

Le choix de mobiliser des modèles contextualisés et le développement incrémental du modèle, passant d'une version simple, servant de démonstrateur, à une version plus élaborée pour représenter les processus complexes contribuant à l'étalement urbain, ont largement concouru à faciliter l'émergence d'une arène de travail collaboratif. Nous avons ainsi pu mobiliser un réseau d'acteurs et organiser différents ateliers. En ce sens, les modèles développés ont joué le rôle d'objet intermédiaire, facilitant, notamment, l'échange de points de vue sur les facteurs à l'origine de l'étalement urbain.

La capacité de la plateforme de modélisation Ocelet à produire des cartes dynamiques a aussi permis de donner à voir des résultats tangibles et concrets pour nos partenaires. Ces cartes ont été particulièrement efficaces, au début du projet, pour démontrer l'aptitude de notre équipe à représenter des processus de dynamiques territoriales complexes et, en conséquence, à intéresser nos partenaires. Néanmoins, la représentation cartographique des simulations des différents scénarios a fait l'objet de débats au sein du réseau d'acteurs. En effet, une bonne partie d'entre eux était réticente sur le choix d'une granularité fine, jugée trop précise et susceptible d'être mal interprétée, par les élus notamment.

Le point de vue du réseau d'acteurs sur la démarche a été globalement positif. Néanmoins, deux groupes s'opposent sur l'utilisation de ce type de modélisation. L'un privilégie une fonction de communication mobilisant des modèles très simples au service d'un plaidoyer. L'autre vise clairement à mobiliser ces outils en appui à la décision, ce qui requiert le développement de modèles complexes ayant une portée heuristique.

Les acteurs et gestionnaires du territoire d'expérimentation du projet Descartes ont trouvé un intérêt à la démarche du projet et à l'utilisation de ces outils de simulation. En effet, les gestionnaires de ce même territoire ont initié un projet de Gestion intégrée de la mer et du littoral (GIML). Ce projet, à l'échelle d'un bassin versant, remobilise certains des modèles développés dans le cadre du projet Descartes, dans la perspective d'objectiver les différents scénarios qui auront été construits et mis en débat.

Remerciements

Cette recherche est en partie financée par l'Agence nationale de la recherche à travers le projet Descartes (ANR 11-AGRO-002-01).

Références bibliographiques

- Agorah, 2008a. Tache urbaine et espaces agricoles à la Réunion. Note de travail du groupe étalement urbain, nov. 2006, Agorah, 13 p.
- Agorah, 2008b. Densification de la tache urbaine réunionnaise, tendances actuelles et perspectives 2020. Travaux du groupe « Étalement Urbain », Agorah, 46 p.
- Alcama J., Kok K., *et al.*, 2006. Searching for the future of land: scenarios from the local to global scale. In: *Land-Use and Land-Cover Change* (E.E.F. Lambin, H.J. Geist), Springer Berlin Heidelberg.
- Antona M., D'Aquino P., Aubert S., Barreteau O., Boissau S., Bousquet F., Daré W., Étienne M., Le Page C., Mathevet R., Trébuil G., Weber J., 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés*, (13), 165-168.

- Bertrand N., Souchard N., Rousier N., Martin S., Micheels M.C., 2006. Quelle contribution de l'agriculture périurbaine à la construction de nouveaux territoires : consensus ou tensions ? *Revue d'économie régionale et urbaine*, (3), 329-353.
- Beuret J.-E., Cadoret A., 2009. Une gouvernance territoriale endogène de l'environnement : contours et enjeux. In : *3^{es} Journées de recherches en sciences sociales*, Montpellier.
- Coteba, Deal Réunion, 2010. Éléments de méthode pour une politique de densification à la Réunion. Rapport d'étude, juillet 2010, 255 p.
- Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 2012. *Urbanisation et consommation de l'espace, une question de mesure*. Mars 2012.
- David D., 2010. Prospective territoriale par simulation orientée agent. Phd Thesis, université de la Réunion.
- Deal Réunion, 2011. Étude du mitage à la Réunion. Habitat et société, Fondation des villes. Rapport d'étude, juillet 2011, 166 p.
- Degenne P., Lo Seen D., 2016. Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs. *SoftwareX*, 5, 89-95.
- Forrester J.W., 1968. *Principles of Systems*, Wright-Allen Press Cambridge, Mass.
- Geist H.J., McConnell W., et al., 2006. Causes and trajectories of Land-Use/Cover Change. In: *Land-Use and Land-Cover Change* (E.E.F. Lambin, H.J. Geist), Springer Berlin Heidelberg.
- Insee, 2011. Le Tableau économique de La Réunion 2011, 92 p.
- Jarrige F., Thion P., Nougaredes B., 2006. La prise en compte de l'agriculture dans les nouveaux projets de territoires urbains. Exemple d'une recherche en partenariat avec la Communauté d'agglomération de Montpellier. *Revue d'économie régionale et urbaine*, (3), 393-414.
- Jauze J.M., 1998. L'urbanisation de l'île de la Réunion : évolution et modèles de villes. *Cahiers de géographie du Québec*, 42 (116), 195-221.
- Kok K., Verburg P.H., et al., 2007. Integrated assessment of the land system: the future of land use. *Land Use Policy*, 24 (3), 517-520.
- Lajoie G., Actif N., 2001. Des villes-jardins qui s'étalent depuis dix ans. *Économie de la Réunion*, (108), Dossier : « La ville s'étale », 16-19.
- Lambin E.F., Geist H.J., et al., 2006. Introduction: local processes with global impacts. In: *Land-Use and Land-Cover Change, Local Processes and Global Impacts* (E.E.F. Lambin, H.J. Geist), Springer Berlin Heidelberg.
- Lardon S., Piveteau V., 2005. Méthodologie de diagnostic pour le projet de territoire : une approche par les modèles spatiaux. *Géocarrefour*, 80 (2), 75-90.
- Maurel P., Craps M., Cernesson F., Raymond R., Valkering P., Ferrand N., 2007. Concepts and methods for analysing the role of Information and Communication tools (IC-tools) in Social Learning processes for River Basin Management. *Environmental Modelling and Software*, 22 (5), 630-639.
- McCarthy M.A., H.P. Possingham, 2006. Active adaptive management for conservation. *Conservation Biology*, 21 (4), 956-963.
- Metzger P., 2004. Les enjeux de la question urbaine dans l'aménagement régional à l'île de La Réunion. *Espace populations sociétés*, [en ligne], 2004/2.
- Shepard S.R., Cizek P., 2009. The ethics of Google Earth: Crossing thresholds from spatial data to landscape visualization. *Journal of Environmental Management*, 90 (6), 2102-2117.
- Schreiber E.S.G., Bearlin A.R., Nicol S.J., Todd C.R., 2004. Adaptive management: a synthesis of current understanding and effective application. *Ecological Management and Restoration*, 5 (3), 177-182.

- Souchard N., 2013. Sortie de planification : les voies incertaines de la gouvernance des terres périurbaines. In : *Terres agricoles périurbaines, une gouvernance foncière en construction* (Bertrand N., ed.), éditions Quæ, p. 81-99.
- Van Ittersum M.K., Rabbinge R., van Latesteijn H.C., 1998. Land use studies and their role in strategic policy making. *Agricultural Systems*, 58 (3), 309-330.
- Verburg P.H., Kok K., et al., 2006. Modeling Land-Use and Land-Cover Change. In: *Land-Use and Land-Cover Change*, Springer Berlin Heidelberg.
- Vinck D., 2000. *Pratiques de l'interdisciplinarité. Mutation des sciences, de l'industrie et de l'enseignement*, PUG, Grenoble.
- Volk M., Lautenbach S., van Delden E., Newham L., Seppelt R., 2010. How can we make progress with decision support systems in landscape and river basin management? Lessons learned from a comparative analysis of four different decision support systems. *Environmental Management*, (46), 834-849.
- White R., Engelen G., 1993. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning A*, 25, 1175-1199.
- Wollenberg E., Edmunds D., et al., 2000. Using scenarios to make decisions about the future: anticipatory learning for the adaptive co-management of community forests. *Landscape and Urban Planning*, 47, 65-77.