

La modélisation des changements d'usage et de couverture des sols comme outil d'aide à la planification territoriale

La modélisation et la projection de changements d'usage et de couverture des sols s'est imposée depuis une vingtaine d'années comme un outil majeur dans l'analyse des pressions exercées par l'activité humaine sur les écosystèmes. Cette modélisation constitue de ce fait l'un des outils pertinents d'analyse des politiques de planification territoriale dans le but d'évaluer ou d'anticiper leurs impacts environnementaux, notamment les impacts sur les services écosystémiques. À partir des principaux résultats obtenus en termes de changement de couverture et d'usage des sols, cet article présente la logique d'une modélisation élaborée pour représenter différentes dynamiques du territoire isérois et montre l'utilité de ce genre d'approche pour l'aide à la décision publique dans la planification territoriale.



Les modèles LUCC (*Land Use and Cover Change*) qui font l'objet de cet article sont principalement utilisés dans les sciences de l'environnement. Le terme « couverture des sols » (*land cover*) fait directement référence au type de couvert (végétal ou urbain, par exemple), tel qu'il peut être caractérisé par photographie aérienne ou à partir de données satellitaires ; les « usages des sols » (*land use*) renvoient quant à eux plus directement à leurs modes de gestion.

Les modèles LUCC sont principalement utilisés sur des zones délimitées allant d'entités paysagères de taille de quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres jusqu'à des zones continentales entières comme l'Europe. L'un des usages importants de ces modèles est de quantifier les impacts environnementaux liés entre autres aux politiques publiques locales ou régionales dans le cadre des contraintes imposées par les changements globaux, notamment le changement climatique. Ces modèles sont généralement utilisés à des fins de recherche, mais peuvent aussi informer la décision publique.

Dans ces deux contextes, la notion de service écosystémique¹ constitue l'un des moyens d'appréhension des interfaces entre société et environnement en mettant en lumière l'ensemble des services et fonctions remplis par les écosystèmes au bénéfice de la société. Mais les

changements d'usage et de couverture des sols ne sont que l'un des déterminants des changements de nature ou de qualité des services. Il est donc nécessaire de disposer non seulement d'un modèle LUCC, mais aussi de modèles pour chacun des services écosystémiques d'intérêt sur le territoire d'étude pour évaluer les liens entre changements de couverture et d'usage des sols sur un territoire et fourniture des services écosystémiques sur ce même territoire ; la modélisation des services est un sujet complexe en soi et ne sera pas décrite dans cet article.

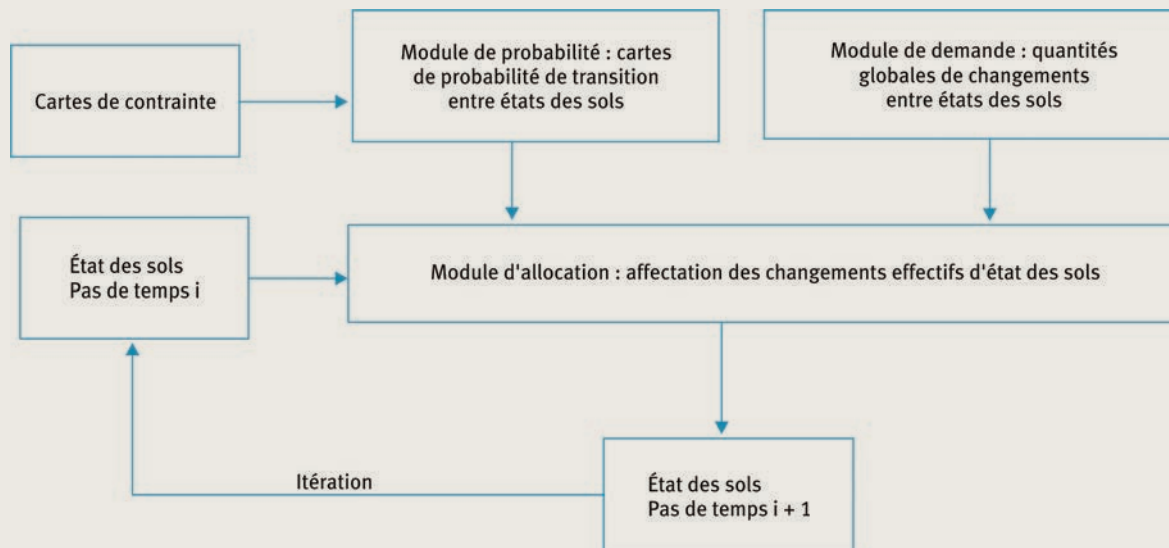
La modélisation de changement de couverture et d'usage des sols

Généralités

Il existe une grande variété de modèles LUCC : dynamiques ou statiques, modèles d'agents ou modèles de grille, globaux ou locaux, etc. (Verburg *et al.*, 2006). Les modèles qui nous intéressent ici sont des modèles de grille spatialement explicites qui présentent à la fois l'avantage de la robustesse, de la versatilité et de la maturité de développement. Ils produisent des cartes d'état futur du territoire à des temps discrets, typiquement à des intervalles – ou pas de temps – de quelques années ; par exemple, dans le cadre du projet ESNET (*Ecosystem Services NETWORKS*), ce pas de temps est de cinq ans entre 2010 et 2040.

1. Pour une définition de cette notion, voir l'article de Lavorel *et al.* (p. 10-17 de ce même numéro).

❶ Schéma de principe de l'architecture des modèles de changement d'usage et de couverture des sols.



Le territoire d'étude est divisé en un grand nombre d'éléments – pixels s'ils sont arbitraires, ou parcelles s'ils correspondent à des unités homogènes réelles du paysage – suffisamment petits pour être caractérisés par un et un seul type de couverture et d'usage des sols (les tailles typiques vont de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres d'extension). Il convient de définir au préalable une typologie des états possibles pris en compte dans le modèle – l'élaboration de cette typologie en fonction des objectifs du projet en constitue d'ailleurs l'une des étapes préliminaires.

Les cartes produites par ces modèles et les informations que l'on en déduit sont l'un des principaux supports d'analyse scientifique des changements d'une part, et de discussion avec les élus et organismes d'aide à la décision de l'autre. L'horizon de temps de ces modèles est limité à quelques décennies dans le futur, du fait de l'imprécision grandissante des projections temporelles qu'ils sont capables d'effectuer.

Parmi les modèles spatialement explicites les plus connus et les plus développés, on peut citer la famille de modèles CLUE (Verburg *et al.*, 2002), le modèle Dinamica EGO (Soares-Filho *et al.*, 2002) ou le modèle LCM (*Land Change Modeler*; Eastman, 2012). Il s'agit en fait d'environnements logiciels permettant à l'utilisateur de créer un modèle spécifique pour un territoire d'étude et une problématique données, à partir de modules élémentaires dont les plus importantes sont décrits ci-dessous.

Architecture des modèles statistiques spatialement explicites

La logique de fonctionnement de ces modèles est d'analyser statistiquement les changements d'usage des sols à partir de trois modules principaux (figure ❶).

Pour ce faire, le premier module (module de probabilité) détermine les probabilités de changement d'un pixel

de territoire d'un état vers un autre, par pas de temps. Ce module produit des cartes de probabilités de changement ; par exemple, un pixel « agricole » très proche des limites urbaines a une probabilité plus élevée qu'un pixel de montagne de devenir un pixel « urbain » au prochain pas de temps. Toutes les contraintes de zonage (notamment zones de protection, par exemple pour des raisons de protection environnementale ou de gestion des risques naturels) sont en général introduites de façon spatialement explicite à cette étape.

Le second module (module de demande) établit les changements totaux (par exemple en ha/an) sur tout le territoire entre les différents types de couverture et d'usage des sols par pas de temps. Ces masses de changement peuvent être déduites des évolutions passées dans le cas de simples extrapolations tendancielle, ou sont déduites de scénarios d'évolution du territoire. Les changements les plus pertinents concernent souvent les changements entre différents types de cultures, les échanges entre espaces forestiers et espaces agricoles (notamment suite à la déprise agricole), et l'urbanisation des terres agricoles.

Le dernier module (module d'allocation) affecte explicitement les changements de couverture et d'usage des sols par pas de temps sur la base des informations des deux premiers modules et d'une carte d'état initial des sols ; les pixels subissant un changement d'état sont sélectionnés statistiquement par un algorithme approprié. Une nouvelle carte d'état est produite au pas de temps ultérieur, qui sert à son tour d'état initial et le processus est réitéré jusqu'à ce que la totalité de la période de projection ait été simulée. Bien que les probabilités de changement soient définies par pixel, les changements sont appliqués par « paquets » de pixels contigus, comme on l'observe dans la réalité.

▶ Limites des modèles

Il convient de noter au préalable que le caractère statistique du modèle implique que les cartes obtenues représentent un état possible du territoire, mais certainement pas une prédiction ; les informations quantitatives issues de ces modèles n'ont qu'une valeur statistique.

Il existe par ailleurs de grandes différences entre les environnements de modélisation mentionnés plus haut, notamment dans la méthode d'allocation finale des changements de couverture et d'usage des sols (troisième module). Celles-ci peuvent conduire à des différences notables de comportement des modèles pour un même problème (Mas *et al.*, 2011). Il convient de garder ce point en tête pour toute application à l'aide à la décision, et dans la mesure du possible, le modélisateur se doit d'évaluer la robustesse des conclusions pour le décideur, ne serait-ce que de façon qualitative.

Par ailleurs, ces modèles souffrent de diverses limites de principe. L'une des plus importantes est que la prise en compte des scénarios est souvent fortement contrainte par la calibration sur les évolutions passées, ce qui empêche la modélisation fiable de changements brutaux ou du moins s'éloignant sensiblement des évolutions tendanciennes. Cette limitation est commune à de très larges catégories de modèles, économiques, environnementaux ou autres.

La modélisation LUCC illustrée par quelques résultats tirés du projet ESNET

Le projet ESNET porte sur le bassin grenoblois au sens large. Il s'agit d'une zone couvrant les deux-tiers du département de l'Isère pour une population d'environ 750 000 habitants. En pratique, cette zone a été définie en adjoignant au périmètre du schéma de cohérence territoriale (SCoT) grenoblois trois territoires connexes, dans une logique de zone d'influence : le plateau Matheysin au sud et les zones des massifs de Vercors et Chartreuse qui sont dans le périmètre d'attraction grenoblois. Le territoire ainsi constitué est très contrasté et englobe des zones de plaine, de vallée et de moyenne et haute montagne, une variété reflétée dans la diversité des activités et des milieux qui y sont représentés².

Brève description des scénarios du projet

L'un des déterminants principaux des projections LUCC concerne les masses totales de changement de couverture et d'usage des sols sur la totalité de la zone d'étude (deuxième module de la section « Architecture des modèles ») ; celles-ci sont en général issues d'une scénarisation des évolutions futures du territoire. De façon générale, l'élaboration de scénarios est un exercice délicat, dont l'objectif est de couvrir un éventail contrasté de futurs possibles. Dans le cadre du projet ESNET, deux documents de planification et de scénarisation ont été sélectionnés pour cet exercice : le document d'orientation et d'objectifs (DOO) de l'établissement public du SCoT grenoblois, et les scénarios élaborés à l'instigation de la région Rhône-Alpes tels qu'ils sont présentés dans

le document de prospective « Montagne 2040 ». Ces documents ont été complétés à dire d'experts sur les évolutions peu ou pas couvertes, notamment les évolutions de successions agricoles. Tous les scénarios finaux ont par ailleurs été évalués et éventuellement modifiés en interaction avec une large palette d'acteurs, d'élus et de techniciens du territoire au cours de séminaires dédiés³.

Quatre scénarios ont été retenus dans le cadre du projet : les deux premiers sont des scénarios de continuité, les deux suivants des scénarios de rupture ; les trois derniers sont partiellement ou largement tirés de la prospective « Montagne 2040 ». Le premier scénario est très largement tiré du document du SCoT, et constitue le scénario de référence. Ce scénario est caractérisé par deux grandes tendances : une protection environnementale renforcée et une volonté de rapprocher les lieux de résidence des lieux de travail des habitants du territoire, en orientant de façon différenciée le développement des différentes zones d'habitat et d'activité industrielle et commerciale. Le second scénario inclut de plus un élément fort de développement des zones de moyenne montagne. Le troisième scénario décrit une perte importante d'attractivité du territoire grenoblois par rapport au scénario de référence, combinée à une protection accrue des zones de montagne. Le dernier scénario se traduit par une forte dérégulation environnementale et une libéralisation économique extrême, avec pour conséquence un fort développement des activités touristiques de plaine et de montagne.

Résultats

Les scénarios les plus contrastés sont le scénario de référence (premier scénario) et le scénario de libéralisation économique (quatrième scénario). Deux points attirent l'attention dans les projections à 2040 : le mitage du territoire et la déprise agricole, le second étant nettement plus notable que le premier. Ces deux évolutions sont pratiquement inexistantes dans le premier scénario, mais très sensibles dans le dernier (figures 2 et 3).

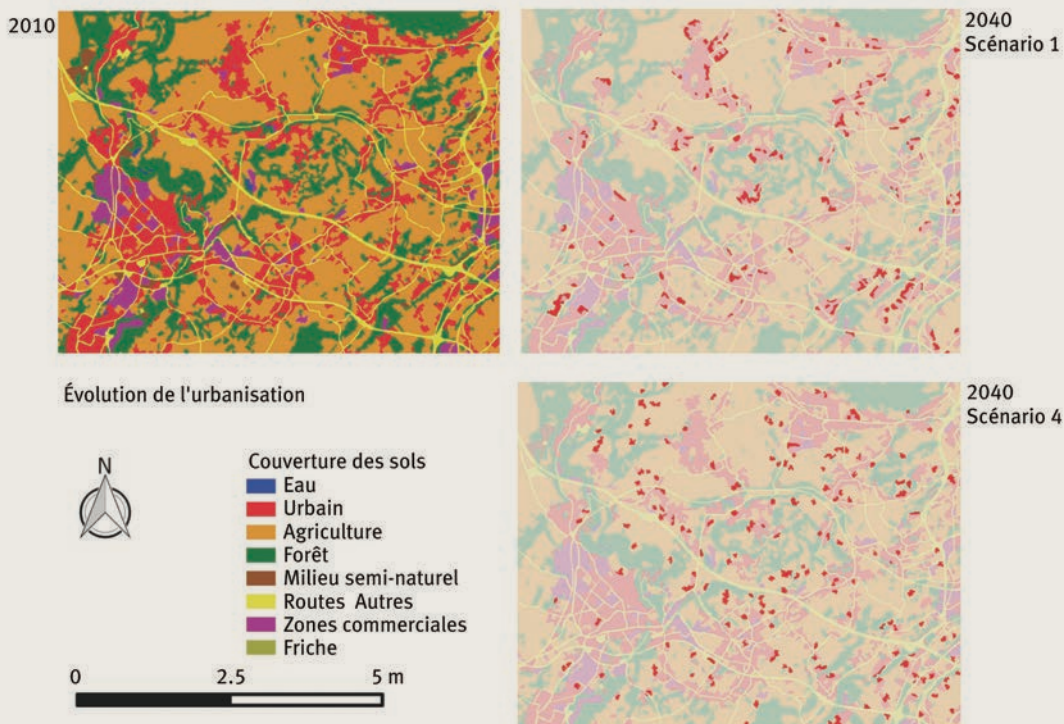
Le projet ESNET étant centré sur l'évaluation des services écosystémiques, il est utile de discuter brièvement les impacts potentiels de ces deux évolutions dans ces termes. Il a été indiqué plus haut que ce genre d'évaluation nécessite un couplage entre les projections du modèle de changement de couverture et d'usage des sols d'une part, et des modèles spécifiques développés dans le cadre du projet pour chacun des services étudiés. Ces couplages et projection sont en cours d'exploitation, et seules quelques conséquences de premier ordre sont donc soulignées ici.

Le mitage du territoire résulte de la dérégulation des normes environnementales et donc de pertes de contraintes des plans locaux d'urbanisme (PLU) sur la localisation et les modalités de l'étalement urbain par rapport au scénario de référence. La conséquence la plus immédiate de ce phénomène est la fragmentation du paysage qui en résulte, ainsi que la perte de terres agricoles. Une telle fragmentation impacte notamment sur la connectivité des milieux agricoles et semi-naturels,

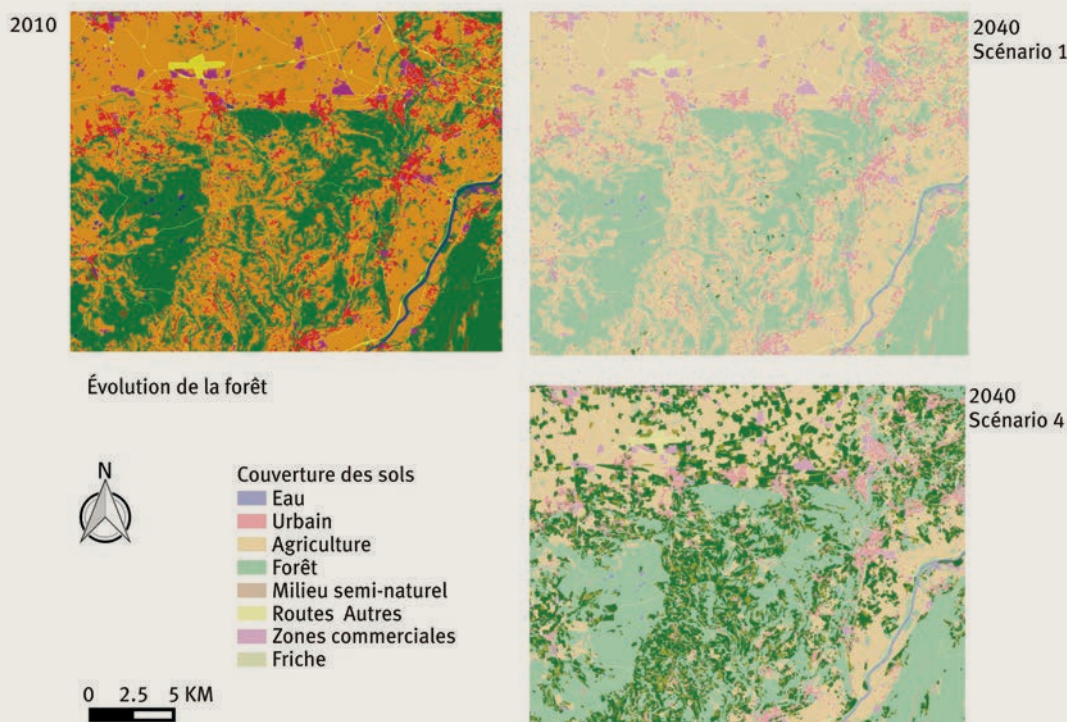
2. Une carte d'ensemble et une description plus détaillée de ce territoire sont fournies dans l'article de Vannier *et al.* (p. 26-31 de ce même numéro).

3. Voir l'article de Bierry et Lavorel (p. 18-23 de ce même numéro).

② Couverture des sols en 2010 (en haut à gauche), pour un zoom du territoire d'étude dans le secteur de la ville de Voiron. Progression de l'urbain en 2040 dans le scénario 1 (en haut à droite) et en 2040 dans le scénario 4 (en bas à droite); la couverture en 2010 est reprise en couleurs pâles dans ces deux dernières cartes. L'urbain se développe en continuité de l'existant dans le scénario 1, contrairement au scénario 4 où un mitage important est présent au détriment des zones agricoles.



③ Couverture des sols en 2010 (en haut à gauche), pour un zoom du territoire d'étude dans le secteur des Chambarans et de la plaine de la Bièvre. Progression forestière et friches en 2040 dans le scénario 1 (en haut à droite) et dans le scénario 4 (en bas à droite); la couverture des sols en 2010 est reprise en couleurs pâles dans ces deux dernières cartes. La déprise agricole au profit de la forêt est très marquée dans le scénario 4, alors qu'on n'observe pratiquement aucune évolution dans le scénario 1.



et donc sur la biodiversité. Cette évolution n'est pas très marquée sur une échelle de temps relativement courte des projections effectuées (trente ans), mais les conséquences de long terme sur la biodiversité peuvent être notables. Le second type de service affecté par le mitage est le service dit de « récréation » c'est-à-dire l'usage et la valeur accordée à la nature pour des raisons touristiques, esthétiques ou autres.

La déprise agricole quant à elle a en premier lieu un effet négatif évident sur la production agricole, mais un effet positif tout aussi clair sur la séquestration du carbone (de par la croissance forestière accrue). En termes de biodiversité, un bilan fin doit être établi, les espèces caractéristiques des zones de prairie ou de culture étant différentes des espèces forestières, en notant toutefois que le retour de la forêt ne signifie pas à court terme un retour rapide d'une biodiversité caractéristique des forêts anciennes et de tous les services que celles-ci remplissent. Il y a également un impact sur les services de régulation (par exemple, régulation des régimes hydriques de surface).

Ce second exemple illustre l'existence de compromis (*trade-offs*), souhaités ou non, mis en évidence dans les projections de couverture et d'usage des sols et de services écosystémiques que l'on peut effectuer en fonction des scénarios. C'est l'analyse quantifiée de ces compromis qui probablement présente le plus d'intérêt en termes d'aide à la décision publique pour la planification territoriale⁴, notamment en termes de compensation écologique. De tels compromis sont implicitement présents à l'intérieur d'un même scénario (préférence donnée à certains types de services) ou entre scénarios.

Discussion : modélisation LUCC et aide à la décision publique

La modélisation LUCC est un outil à la fois puissant et limité d'analyse des évolutions d'un territoire sous contrainte de changements globaux tel que le changement climatique, et de scénarios de planification territoriale. Puissant parce qu'il illustre à l'aide d'une cartographie spatialement explicite la nature des changements résultants, et permet non seulement de les appréhender de façon plus concrète par ce moyen, mais également dans les cas les plus favorables de mettre en lumière des conséquences inattendues. Limité parce qu'il ne s'agit en aucun cas de prédictions de l'état futur du territoire, même si le scénario envisagé est effectivement réalisé dans les faits, du fait d'un certain nombre d'approximations et d'imprécisions dans la modélisation elle-même, qu'il s'agisse du modèle LUCC utilisé ou des modèles auxquels il peut être couplé pour des évaluations spécifiques.

Ce genre d'évaluation présente plusieurs avantages pour la décision publique lorsqu'il est réalisé en concertation étroite avec les élus et/ou les organismes d'aide à la décision publique et les services compétents d'aménagement du territoire, tant dans la définition des objectifs que dans l'exploitation des résultats⁵. C'est par exemple le cas pour les questions de compensation écologique⁶, qui nécessitent de définir en amont de l'étude la nature des services écosystémiques qui devront être compensés en conséquence des pertes de services impliqués par les politiques d'aménagement du territoire ainsi que le

mode de compensation qui sera adopté en aval ; les projections issues de modèles LUCC peuvent s'avérer d'une aide précieuse sur ces deux fronts.

La modélisation LUCC peut être mise en œuvre sur une grande variété de territoires et pour une large palette d'évaluations de politiques publiques présentes ou futures, en gardant à l'esprit les deux difficultés suivantes :

- si la mise en place du modèle lui-même est relativement aisée avec une aide experte, l'exigence en termes de données croît exponentiellement avec la variété des types d'usage des sols que l'on souhaite représenter (par exemple, les différents types de forêts ou de cultures) et avec le degré de finesse spatiale que l'on souhaite atteindre. Il convient donc de d'établir en amont un inventaire des données disponibles et du travail nécessaire à leur mise en forme, en fonction des objectifs visés pour l'évaluation (scientifique ou politique) du territoire visé ;

- s'il est également relativement aisé de distinguer et quantifier différentes options de planification en termes de pressions environnementales, il est beaucoup plus délicat de les quantifier en termes d'impacts. Les pressions sont constituées par exemple par les types et la répartition des changements culturels. Les impacts portent sur les conséquences chiffrées sur les écosystèmes (par exemple, eutrophisation des eaux de surface) et les services qu'ils rendent à la société. C'est cette traduction des pressions anthropiques en impacts écologiques qui nécessite un couplage entre modèles des services écosystémiques et modèles de changements d'usage des sols.

De façon générale, néanmoins, l'utilisation de ce genre d'outil favorise la structuration du débat entre les différents acteurs du territoire et l'analyse de compromis entre services écosystémiques, considérations économiques et considérations environnementales, et plus généralement entre intérêts divergents. ■

Les auteurs

Pierre-Yves LONGARETTI

1. UGA/CNRS-INSU, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble (IPAG), UMR 5274, BP 53, F-38041 Grenoble Cedex 9, France.

✉ pierre-yves.longaretti@univ-grenoble-alpes.fr

2. INRIA Grenoble Rhône-Alpes, STEEP, 655 Avenue de l'Europe, F-38330 Montbonnot, France

✉ pierre-yves.longaretti@inria.fr

Clémence VANNIER, Rémy LASSEUR et Sandra LAVOREL

UGA/CNRS, INEE, Laboratoire d'écologie alpine, UMR 5553, BP 53, F-38041 Grenoble Cedex 9

✉ vannier.clemence@gmail.com

✉ remy.lasseur@univ-grenoble-alpes.fr

✉ sandra.lavorel@univ-grenoble-alpes.fr

4. Voir l'article Lavorel *et al.* (p. 10-17 de ce même numéro).

5. Voir l'article de Bierry et Lavorel (p. 18-23 de ce même numéro).

6. Voir notamment l'article de Vaissière *et al.* (p. 64-69 de ce même numéro).

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **EASTMAN, J.R.**, 2012, *Idrisi Selva, Guide to GIS and Image Processing, manual version 17*, Clark University.
- 📖 **MAS, J.-F., KOLB, M., HOUET, T., PAEGELOW, M., CAMACHO OLMEDO, M.**, 2011, Éclairer le choix de modèles de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols, *Revue Internationale de Géomatique*, v. 21, n° 3, p. 405-430, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00642139/document>
- 📖 **SOARES-FILHO, B.S., PENNACHIN, C., CERQUEIRA, G.C.**, 2002, DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier, *Ecological Modelling*, n° 154, p. 217-235.
- 📖 **VERBURG, P.H., KOK, K.R., PONTIUS, R.G., VELDKAMP, A.**, 2006, Modeling Land Use and Land Cover Change, in : *Lambin and Geist, Land Use and Land Cover Change*, IGBP series, Springer Verlag, p. 177-135.
- 📖 **VERBURG, P.H., SOEPBOER, W., VELDKAMP, A., LIMPIADA, R., ESPALDON, V., MASTURA, S.A.M.**, 2002, Land use change modeling at the regional scale: the CLUE-S model, *Environmental Management*, n° 30, p. 391-405.

Territoire contrasté qui englobe des zones de plaine, de vallée et de moyenne et haute montagne.