



HAL
open science

**Usage de modèles dynamiques et spatialement explicites pour
la spatialisation de scénarios prospectifs normatifs.
Application à la dynamique des plantations forestières
industrielles dans le sud chilien**

Nicolas Maestriperi, Thomas Houet, Martin Paegelow

► **To cite this version:**

Nicolas Maestriperi, Thomas Houet, Martin Paegelow. Usage de modèles dynamiques et spatialement explicites pour la spatialisation de scénarios prospectifs normatifs. Application à la dynamique des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. Conférence internationale de géomatique et d'analyse spatiale, Sep 2013, Brest, France. pp.453-466. <hal-01092752>

HAL Id: hal-01092752

<https://hal.science/hal-01092752v1>

Submitted on 9 Dec 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Usage de modèles dynamiques et spatialement explicites pour la spatialisation de scénarios prospectifs normatifs.

Application à la dynamique des plantations forestières industrielles dans le sud chilien.

Nicolas Maestripiéri¹, Thomas Houet¹, Martin Paegelow¹

1. Laboratoire GEODE, UMR 5602 CNRS, Université de Toulouse 2 Le Mirail
5 allées A. Machado, 31058 Toulouse cedex 9
nicolas.maestriperi@univ-tlse2.fr

RESUME. Caractéristiques de la géoprospective, la simulation et la spatialisation des scénarios prospectifs permettent aux sociétés d'anticiper et de réduire leurs incertitudes face aux changements futurs d'occupation et d'utilisation du sol. Malgré une diversité d'approches et de techniques, la construction des scénarios prospectifs suit deux cheminements temporels (exploratoire et normatif). Cet article s'intéresse spécifiquement à la spatialisation des scénarios normatifs et à la pertinence d'une approche exploratoire (dynamique) face à l'application systématique d'une démarche rétrospective (synchronique). Ces scénarios sont appliqués dans un contexte de gestion forestière dans le sud chilien. Ils mettent en évidence deux images contrastées du futur, avec, d'un côté, la préservation de la forêt native et, de l'autre, l'invasion de plantations industrielles exotiques.

ABSTRACT. Simulation and spatialization of prospective scenarios are characteristics of geopropective. They allow societies to anticipate and to reduce their uncertainties regarding future land use and land cover changes. Despite a diversity of approaches and techniques, the construction of scenarios follows two temporal courses (exploratory and normative). This paper specifically focuses on the spatialization of normative scenarios and the relevance of exploratory (dynamic) approach faced with the systematic use of retrospective (synchronic) process. These scenarios are applied in the framework of forest management in southern Chile. They highlight two contrasting images of the future, with, on one hand, the preservation of native forest and, on the other hand, invasion of exotic timber plantations.

MOTS CLES : Géoprospective, scénarios normatifs, modèle spatialement explicite, approche exploratoire, sud chilien

KEYWORDS : Géoprospective, normative scenario, spatially explicit models, exploratory approach, southern Chile

1. Introduction

Une prise de décision, quelle soit d'ordre privé ou public, se confronte au niveau de connaissance acquise et à la confiance que nous lui accordons (Sigel *et al.*, 2010). Cet état détermine le degré d'incertitude qu'un individu ou une société dispose et mobilise pour, *a posteriori*, faire face aux problématiques environnementales et socio-économiques (aléas climatiques, changements d'occupation et d'utilisation du sol, crise économique, rendements agricoles, etc.). L'incertitude amène la société à chercher des points de repères et à se projeter dans le futur pour mieux maîtriser son présent et optimiser ses choix/stratégies pour l'avenir. De fait, l'appréhension de futurs possibles (Phdungsilp, 2011), plausibles (Wilkinson, 2009 ; Amer *et al.*, 2013) ou désirables (Godet, 2010) permet de mieux faire face à des événements incertains (extrêmes ou non) dans la mesure où chaque futur, une fois caractérisé, pourra s'accompagner de mesures d'adaptation ciblées. Il est question de plusieurs futurs -appelés *scenario development* (Bishop, 2007), *strategic foresight* ou prospective (Godet, 2010)-, et non d'un futur probable -équivalent aux *foresight studies*- où le degré d'incertitude est faible. L'élaboration de scénarios s'est généralisée à travers le monde afin de s'adapter à des phénomènes complexes et incertains. Il existe trois grandes écoles de construction de scénarios. Les deux premières sont anglo-saxonnes avec l'approche de la logique intuitive proposée par Kahn dans les années 1950, et la *probabilistic modified trends (PMT) school* développée par Helmer et Gordon en 1966. La prospective, en tant que spécificité française (Roubelat, 1994), remonte aux années 1950 avec la création par Gaston Berger du Centre International de prospective et du World Futures Studies Federation par Bertrand de Jouvenel dans les années 1960. Cette approche permet de mettre en lumière des enjeux environnementaux et socio-économiques à de multiples échelles spatiales. Elle considère l'avenir comme un « espace » d'action, exploratoire ou normatif, qui se bâtit par et pour un individu (ou des groupes d'individus). Or, si ces scénarios peuvent s'appliquer à plusieurs échelles spatiales, ils ne permettent pas de modéliser et de localiser ces processus. De fait, la géoprospective (Gourmelon *et al.*, 2012 ; Voiron-Canicio, 2012 ; Houet et Gourmelon, 2013) donne la capacité aux sociétés de s'organiser et de s'adapter face à un environnement complexe et dynamique.

L'objectif de cet article est de démontrer la pertinence et la performance d'un modèle dynamique et spatialement explicite, suivant un cheminement temporel exploratoire (contrairement à une approche synchronique), pour spatialiser des scénarios prospectifs normatifs. L'utilisation de chaînes markoviennes couplées à une évaluation multicritères (EMC) permettra de mener à terme notre raisonnement. A la suite de cette introduction, la section 2 se penche sur la typologie des scénarios et leur méthode de construction. L'aire d'étude, le contexte de la recherche et la méthode de spatialisation utilisées sont exposées dans une troisième section. Les résultats sont présentés dans la section 4, puis sont comparés et discutés dans une dernière section.

2. De la construction des scénarios à leur spatialisation

2.1. Typologie des scénarios : exhaustivité et confusion sémantique

La littérature scientifique traitant des scénarios rend complexe l'élaboration d'une typologie claire et univoque. De nombreux auteurs expriment cette confusion sémantique : Bishop *et al.* (2007) et van Notten et Rotmans (2003) remarquent que la catégorisation des scénarios est large et qu'une variété de scénarios est souvent regroupée au sein d'une même catégorie. Certains parlent même de « *methodological confusion* » (Wilkinson, 2009) voire de « *methodological chaos* » (Stewart, 2008). L'élaboration de typologies synthétiques des différentes écoles (ou approches), et surtout des méthodes et techniques, expliquent en partie ce « chaos » méthodologique. Ces synthèses proposent généralement un état de l'art exhaustif pour *in fine* présenter une typologie issue du croisement des différents auteurs. De fait, plus le spectre sémantique s'élargit et s'approfondit plus les confusions se multiplient. Ces confusions doivent être résolues afin de créer une cohésion au sein de la communauté scientifique et d'amener, auprès du grand public, les valeurs issues du développement et de l'analyse des scénarios (Bishop *et al.*, 2007).

Fabrice Hatem (1993) distingue quatre approches en *opposition* pour construire un scénario :

- *Forecasting vs backcasting*. Börjeson *et al.* (2006)¹ fait respectivement référence aux scénarios exploratoires (avec deux sous-catégories – *external* et *strategic*) et aux scénarios normatifs (*transforming* et *backcasting*). La typologie de van Notten *et al.* (2003) distingue les scénarios descriptifs des scénarios normatifs, et affine son analyse selon le cheminement temporel : *exploratory* ou *forecasting* scenarios vs *anticipatory* ou *backcasting* scenarios.

- variantes vs scénarios synthétiques,

- scénarios « sans surprise » vs contrastés [ou tendanciels vs contrastés (Masini et Médina Vasquez, 2000)]

- approche littéraire vs formalisée [ou qualitative vs quantitative (European Environment Agency, 2000)].

Si la typologie des scénarios prospectifs ne fait pas consensus, leur méthode de construction, bien que variable selon les auteurs, s'appuie :

« *sur une base méthodologique commune (ou « méta-méthode ») qui a été synthétisée sous l'impulsion de Godet (1992) et dénommée « la méthode des scénarios »* » (Houet *et al.*, 2008).

¹ Les scénarios ne sont pas des prédictions (Wilkinson, 2009; Amer *et al.*, 2013) mais Börjeson *et al.* (2006) inclut dans sa typologie des scénarios un volet *predictive* qui s'oppose à la prospective d'une part, car il ne s'intéresse pas à l'appréhension des multiples futurs et à leurs incertitudes, et d'autre part parce que le raisonnement porte sur le court terme. D'après Médina Vásquez et Ortegón (2006) l'objectif de la prédiction au sens strict du terme est d'aboutir à une déclaration non probabiliste avec un degré de confiance absolue sur le futur.

2.2. La Prospective et la méthode des scénarios

Pour Godet (1986) la méthode des scénarios fait consensus pour appréhender les futurs possibles (*les futuribles*). Cependant, ces derniers ne sont pas le seul intérêt de la prospective car ils mettent de côté les alternatives stratégiques ou les futurs souhaitables (*futurables*) (Godet, 2010). La méthode générale de construction de scénarios de Godet se décline en deux grandes phases : la construction de la « base » et la construction des scénarios (Hatem, 1993).

Construire la « base » consiste dans un premier temps à définir le système, c'est-à-dire à identifier les principales variables (économiques, politiques, sociales, techniques) qui le composent. Il y a les variables externes (caractérisant l'environnement du système) et les variables internes (caractérisant le système étudié *stricto sensu*). Le prospectiviste doit ensuite analyser les relations causales entre chacune des variables et déterminer celles qui sont susceptibles d'évoluer dans le futur avec certitude et incertitude. Enfin, la dynamique du système doit être étudiée, en menant (i) une analyse rétrospective afin de comprendre les dynamiques passées et d'identifier les acteurs et les variables qui ont joué un rôle ; et (ii) une analyse du « jeu des acteurs » pour mettre en exergue leurs stratégies, leurs interrelations et la génération possible de conflits ou d'alliances. Une fois que l'image de l'état actuel du système est établie, la construction des scénarios est mise en œuvre.

Cette phase passe tout d'abord par la considération et l'élaboration de dimensions d'incertitudes (des risques de ruptures, des signaux faibles de changements, etc.). La dimension d'incertitude est définie par Hatem (1993) comme :

« une incertitude considérée comme décisive pour l'avenir du système, et dont les réalisations possibles seront utilisées comme hypothèses de base pour la construction des scénarios ».

Chaque élément sera constitué en suite logique qui permettra de lier le présent au futur (*horizon temporel*).

2.3. Cheminement temporel : *backcasting* vs *forecasting*

En faisant abstraction du large spectre sémantique susmentionné, la géoprospective (et la recherche scientifique en général) construit des projets et cherche à atteindre des objectifs spécifiques qui renvoient aux grands principes de l'inférence scientifique : la déduction, l'induction et l'abduction. Ces inférences correspondent au cheminement temporel des prédictions et des scénarios.

La déduction, qui appartient au monde de la rationalité et de l'exactitude (Blecic, 2008), est caractéristique de la prédiction. Si la conclusion d'une inférence déductive découle des prémisses alors une simulation prédictive sera la résultante d'observations passées. L'optimisation de ces résultats passe par une calibration rigoureuse du modèle, en cherchant à reproduire une situation connue (passé ou présent) (Batty et Torrens, 2005).

Un scénario n'étant pas une prédiction, notre intérêt porte sur l'inférence abductive et inductive (figure 1). La première, qui définit les scénarios prospectifs exploratoires (*forecasting*), est proche de la déduction mais se différencie de par sa

nature incertaine. Des hypothèses plausibles sont construites à partir d'observations et sont susceptibles d'être vérifiées *a posteriori* (Catellin, 2004). Le scénario part d'une situation présente, connue, et progresse vers le futur en cherchant à répondre à la question : que pourrait-il arriver ?

L'induction ou homo-constructivisme (Wilkinson, 2009) correspond au scénario normatif (*backcasting*) qui décrit un futur préférable, désirable ou non, et remonte de manière rétrospective jusqu'au présent. L'attitude est proactive (Godet, 2010) et cherche à atteindre des objectifs prédéfinis par le biais de planification stratégique. Ainsi, la question qui se pose alors au prospectiviste est : comment une cible spécifique peut être atteinte ?

Inférence	Abductif		Inductif	
Méthode de scénario	Exploratoire (<i>forecasting</i>)		Normatif (<i>backcasting</i>)	
Cheminement temporel	★ FORECASTING →		← BACKCASTING ★	
	Présent	Futur	Présent	Futur
Méthode de spatialisation	Exploratoire		Rétrospectif	
	Hypothèse → Image du futur		Hypothèse ← Image du futur	
	Hypothèse → Image du futur		SIG	
	Chaîne markovienne et évaluation multicritères		Exploratoire	
			Hypothèse → Image du futur	
			Chaîne markovienne et évaluation multicritères	

Figure 1. Inférence, cheminement temporel et spatialisation des scénarios prospectifs

2.4. Spatialisation des scénarios: la place des modèles

Une fois le scénario définit, l'objectif du modélisateur est de retranscrire spatialement l'ensemble des hypothèses, en simplifiant les composantes du système étudié, sans pour autant perdre toute complexité. Plusieurs approches de modélisation existent et leur diversité dépend de la grande variété des questions de recherche. Verburg *et al.* (2006) présentent plusieurs types de modèles :

- dynamiques et statiques (mise à jour des variables modélisées au cours du temps vs pas de modification des données introduites au cours de la simulation) ;
- descriptifs et normatifs (simulation exploratoire basée sur les dynamiques passées vs optimisation des configurations spatiales en fonction d'objectifs) ;
- déductifs et inductifs (identification théorique des relations entre processus et facteurs vs corrélation statistique entre les changements d'occupation du sol et les variables explicatives).

Les scénarios exploratoires sont généralement dynamiques et peuvent se baser sur une approche quantitative et qualitative. L'intérêt est de pouvoir simuler des changements d'occupation du sol tout en paramétrant les probabilités de transitions entre plusieurs états, ce que permettent les modèles stochastiques et ceux à base d'intelligence artificielle. Cependant, l'approche quantitative est parfois critiquée de par son incapacité à se détacher des données historiques, et parce qu'elle laisse supposer que les mêmes tendances prévaudront dans le futur (Amer *et al.*, 2013). Or,

il est possible de mettre en œuvre des scénarios exploratoires contrastés, afin de créer une rupture avec les tendances passées.

Les scénarios normatifs sont dans l'ensemble narratifs, qualitatifs et la représentation cartographique des hypothèses se fait de façon synchronique. Par exemple, dans le cadre du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) en Bretagne, Houet *et al.* (2008) ont utilisé un Système d'Information Géographique afin de spatialiser un scénario normatif. D'après les auteurs les SIG, en plus de faciliter la transmission d'information avec les parties prenantes et les gestionnaires, permettent de localiser et représenter les changements d'occupations du sol et les structures paysagères à l'aide de requêtes multicritères, attributaires et/ou spatiales.

La section suivante montre que les scénarios normatifs (*backcasting*) peuvent être spatialisés en suivant la même approche que celle utilisée pour les scénarios exploratoires.

3. Matériel et méthode

3.1. Site d'étude et contexte

La forêt native, intégrée à l'Ecorégion Valdivienne (35°S–48°S), fait partie de ces écosystèmes ayant la plus haute priorité de conservation dans le monde. L'application du Decreto-Ley 701 (D.L. 701) en 1974, sous la dictature d'Augusto Pinochet, généra l'expansion de monocultures de pins et d'eucalyptus de la 8^{ème} Région du Bio-Bio au sud de la 10^{ème} de Los Lagos (figure 2) mettant en exergue un gradient nord-sud. L'intensification des pratiques sylvicoles, combinée à la substitution des écosystèmes forestiers natifs, soulève de nombreuses inquiétudes d'ordre environnemental et socio-économique. Ainsi, aux problèmes de compaction des sols, de perte de fertilité, d'acidification des sols et de l'eau, de perte de biodiversité et d'augmentation des flux de sédiments suite aux coupes rases, s'ajoutent des inquiétudes en matière de développement local, de chômage, de déscolarisation et de pauvreté.

Ces pratiques ont cours, depuis le début des années 1990, dans la commune de San Juan de la Costa. Elle se localise au nord-ouest de la 10^{ème} Région de Los Lagos (figure 2), entre les parallèles 73°47'30"–73°18'50" (longitude ouest) et 40°14'14"–40°44'54" (latitude sud). Bien que le taux de plantations soit nettement inférieur à celui des communes de la 8^{ème} et 9^{ème} Région, les équilibres écologiques y sont menacés. En effet, plus de 70% de la superficie communale est couverte par de la forêt native. De plus, la question du foncier prend une importance considérable. Cette commune assiste à un rachat progressif par de grands propriétaires terriens et des entreprises forestières engendrant une concentration et une capitalisation des terres. Les plantations exotiques sont essentiellement exploitées par quatre grandes entreprises : la Forestal Tornagaleones S.A. (Groupe Nueva), la Forestal Anchile Ltda. (Daio Paper Corporation), la Forestal Valdivia S.A. et la Forestal Los Lagos S.A. (Groupe Angelini). Elles se partagent plus de 14 000 hectares alors que les 880 petits propriétaires vivent sur 7 430 hectares de terres morcelées.

La question foncière, l'absence de projet communal, de développement territorial et l'incitation au boisement via le D.L. 701 dégradent les conditions de vie des petits propriétaires et des communautés autochtones Mapuche. La commune est

qualifiée comme l'une des plus pauvres du Chili et affiche l'Indice de Développement Humain le plus faible en 2003 (0,510) (PNUD, 2004).

L'objectif est de sensibiliser et d'aider à la prise de conscience le grand public, les décideurs et les acteurs du secteur forestier, en leur donnant la possibilité de se projeter dans le futur, et ainsi de mieux comprendre l'impact des prises de décisions actuelles sur l'évolution du couvert forestier.

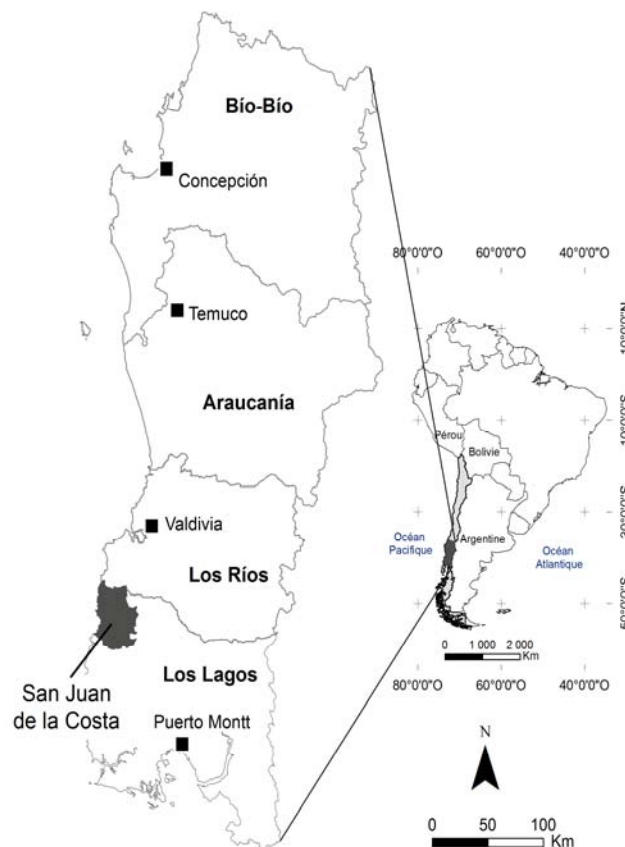


Figure 2. La commune de San Juan de la Costa (10^{ème} Région de Los Lagos - Chili)

3.2. Approche méthodologique

3.2.1. Les trajectoires d'évolution et les facteurs de changements

La compréhension du système forestier dans le sud chilien passe au préalable par le suivi des plantations forestières industrielles et de la forêt native à plusieurs échelles spatio-temporelles. Bien que les scénarios soient construits à l'échelle communale, il est nécessaire de situer ces dynamiques locales dans un contexte régional et national, impliquant de fait des images satellites à moyennes (MODIS) (Paegelow *et al.*, 2012) et haute résolution spatiale (LANDSAT). En effet, les grandes tendances d'évolution observables à l'échelle régionale ne permettent pas d'appréhender la multiplicité et la complexité des variables qui influencent la

dynamique de ces monocultures (propriété foncière, topographie, qualité et aptitude du sol, habitat, occupation du sol, réseau routier, etc.) à l'échelle locale.

Les principaux résultats obtenus révèlent une concentration remarquable des plantations industrielles à l'ouest de la route Panaméricaine et à proximité de la côte Pacifique par la présence de ports d'embarcations. L'expansion des monocultures suit également un gradient nord-sud principalement sur la précordillère côtière, avec un rythme de changement soutenu mis en valeur par l'analyse des rotations sylvicoles à l'échelle sous-régionale.

A l'échelle de la commune de San Juan de la Costa, la dynamique des plantations industrielles résulte de processus multiformes opérant à plusieurs échelles. Ces processus sont alimentés par l'interrelation de facteurs de nature économique, sociale, environnementale, technique et politique. Une analyse systémique couplée à des entretiens participatifs a permis d'identifier et de hiérarchiser ces facteurs. Entre autres, la promulgation du D.L. 701 a engendré l'explosion du secteur forestier et s'est accompagné, lors de son actualisation en 1998, de la mise en place de mécanismes de financements destinés aux petits propriétaires et d'assurances forestières. Sur un plan économique, la faible rentabilité de la forêt native en tant que ressource commercialisable, les coûts de boisement, le coût du foncier jouent aussi un rôle important, dans la mesure où ils influent (directement ou indirectement) sur la vente et/ou la location de petites et moyennes propriétés par des entreprises forestières.

3.2.2. *Les scénarios*

Deux scénarios normatifs et contrastés (état futur du système) sont présentés et mettent en exergue des situations extrêmes, faites de ruptures, avec un degré de probabilité faible. Chacune des hypothèses est élaborée sur plusieurs critères : (i) la connaissance du terrain et du secteur forestier chilien, (ii) des entretiens participatifs avec les acteurs du secteur forestier, (iii) des analyses d'experts, (iv) des discussions informelles ponctuées de rumeurs et (v) d'imagination tempérée. Si les scénarios sont construits en partie avec les acteurs, l'étape de spatialisation est réalisée exclusivement par le scientifique.

Le scénario normatif « éco-centré » est un scénario qualifié de préservation. Le système forestier tel qu'il existait en 2008 est révolu. Une récession économique à l'échelle internationale et nationale engendre une chute du secteur forestier marquée par une explosion des prix des produits forestiers. Les très grands propriétaires terriens (entreprises forestières) vendent leurs terres qui seront redistribuées aux communautés autochtones Mapuches. Les zones boisées par des espèces natives s'accroissent sur l'ensemble de la commune et sont, pour la grande majorité, soumises à une gestion soutenable. Seuls des fragments de plantations exotiques occupent la précordillère côtière. Dans ce scénario, l'horizon temporel est fixé à 2035 afin de prendre en compte la croissance des espèces végétales arborées natives (30 ans pour le *Nothofagus dombeyi*).

Le scénario normatif intensif. Le secteur forestier à l'échelle internationale est en plein boom et les politiques forestières (D.L. 701) incitent les propriétaires (du petit propriétaire à la multinationale) à intensifier leur production. La 10^{ème} Région de Los Lagos voit la mise en service de la Ruta Costera et la construction d'une nouvelle usine de cellulose. La Ruta Costera est un projet qui permettrait, selon le Ministère des Travaux Publics (MOP), de générer d'importants avantages sociaux,

tels que l'intégration des zones isolées, des temps de déplacement réduit et le développement de nouvelles zones d'attraction touristique. La route est un agent potentiel de déforestation sur le piémont occidental de la Cordillère de la Côte (Maestriperi et Paegelow, 2013). De plus, elle joue un rôle majeur dans les dynamiques d'occupation du sol et notamment sur l'implantation des monocultures. En d'autres termes, son absence est aussi une des principales raisons pour laquelle (i) le couvert végétal natif reste relativement peu exploité et dégradé et (ii) les plantations industrielles ne progressent pas sur la Cordillère de la Côte.

Dans ce scénario, la surface attribuée aux plantations explose littéralement alors que la forêt native est dégradée systématiquement et n'évolue pas. L'horizon temporel est fixé à 2026, ce qui correspond à deux cycles de rotations d'eucalyptus à partir de la dernière date connue (2008).

3.2.3. Spatialisation des scénarios

Si les scénarios normatifs sont d'inférence inductive, la façon de restituer le scénario répond à une inférence abductive. L'ensemble des scénarios sont modélisés de façon exploratoire (du présent vers le futur) avec CA-Markov, suite à une phase de calibration du modèle (Maestriperi et Paegelow, 2013).

CA-Markov est un modèle prédictif (ici utilisé à des fins prospectives) combinant chaînes de Markov (quantité), évaluation multicritère (EMC) (localisation) et filtrage, une procédure qualifiée par les éditeurs du logiciel d'automate cellulaire (AC) (Eastman, 2006). Les quantités de changements futurs sont déterminées par les chaînes markoviennes par la production de matrices de transition et un ensemble d'images de probabilité conditionnelle issues d'observations passées. La spatialisation des hypothèses s'ajuste à la disponibilité des données, et s'appuie sur l'évaluation multicritère pour pondérer les facteurs. La variation du poids des facteurs, de même que la détermination surfacique, va dépendre de l'interprétation des hypothèses. L'objectif de l'EMC est de construire des cartes d'aptitude ou de probabilité en intégrant un ensemble de critères mesurables et cartographiables. Ces cartes pouvant ainsi servir à l'élaboration de choix stratégiques d'intervention. Le modélisateur contrôle le processus en identifiant et en caractérisant les facteurs explicatifs grâce à une approche experte.

La pondération des facteurs s'est appuyée sur la technique de comparaison par paires (*pairwise comparison*) dans le contexte de processus décisionnel appelé Analytical Hierarchy Process (AHP) (Saaty, 1977). Chaque type d'occupation du sol (plantations industrielles, forêt native et autre) correspond à un objectif et chaque facteur se voit attribuer un poids allant de 0 (aptitude nulle) à 255 (aptitude forte). Ces derniers traduisent l'importance d'un facteur par rapport à tous les autres et contrôlent comment les facteurs se compensent entre eux (Eastman, 2006). Le poids relatif de chaque facteur est calculé par la méthode des vecteurs propres (*eigenvalue method*), « indiquant le niveau de priorité pour chaque élément dans la hiérarchie » (Wolfslehner *et al.*, 2005). Enfin, une pondération selon les poids d'ordre est appliquée. Cette technique permet un double choix – celui de la compensation entre facteurs et la prise de risque – et donne, par conséquent, le contrôle sur le degré d'optimisme (attitude face au risque)². La pondération s'applique différemment à

² L'attitude face au risque s'échelonne de 1 (prise de risque nulle et pas de compensation) à 5 (prise de risque maximale et pas de compensation), en passant par une prise de risque

chaque pixel selon le classement des aptitudes, de la plus faible (1^{er} rang) à la plus forte (dernier rang) (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005).

4. Résultats

4.1. L'approche exploratoire

4.1.1. Le scénario de préservation

Ce scénario (figure 3) exclut la création de nouvelles plantations exotiques ainsi que le reboisement des superficies existantes après la coupe. Les entreprises forestières sont inaptes à l'apparition de plantations (aptitude nulle) et les autres propriétaires ont une aptitude très faible (75 pour les grands propriétaires et 20 pour les moyens et petits). La stratégie « pessimiste » est choisie pour l'objectif PLANTATION. Une superficie de 5 400 ha est attribuée aux plantations en 2035. La forêt native n'évolue pas à l'intérieur des (très) grandes propriétés (aptitude de 25), mais peut apparaître chez les moyens et petits propriétaires (aptitude de 255). L'objectif FORET NATIVE opte pour une stratégie « optimiste » (avec une prise de risque élevée et peu de compensation) en donnant un poids d'ordre plus important aux pixels ayant une valeur d'aptitude élevée, telles que les propriétés et la distance aux forêts native existantes. Enfin, l'objectif AUTRE³ intègre les propriétés et donne une aptitude élevée aux entreprises forestières afin de favoriser l'apparition de zones non-boisées. La stratégie n°4 est appliquée pour donner plus de poids aux facteurs propriétés.

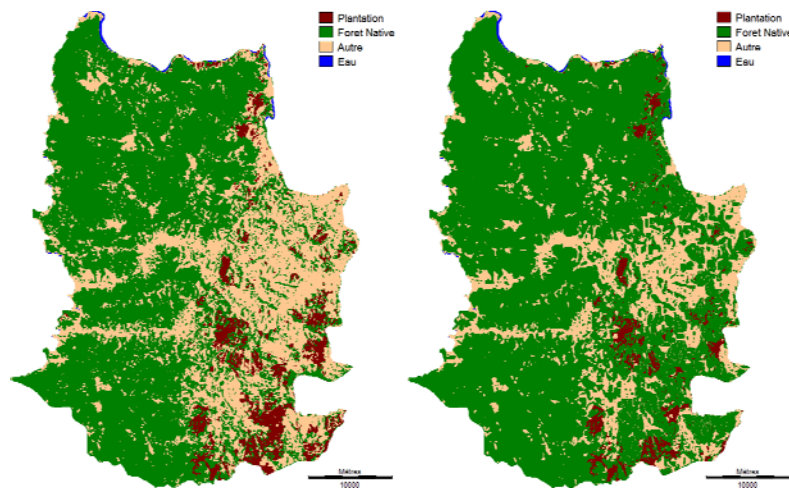


Figure 3 : Occupation du sol en 2008 (à gauche) et scénario normatif de préservation en 2035 (à droite)

moyenne et une compensation totale entre les facteurs (entre le ET et le OU booléen) (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005; Makropoulos et Butler, 2006).

³ Afin de simplifier le processus de simulation prospective et de mettre en évidence la dynamique des plantations industrielles, les entités « forêts de seconde génération, prairies, buissons et sols nus » sont fusionnées sous l'entité « Autre ».

4.1.2. Le scénario de production intensive

Dans ce scénario (figure 4) l'objectif PLANTATION donne une aptitude maximale à tous les types de propriétés et opte pour une stratégie optimiste, c'est-à-dire en donnant un poids d'ordre aux pixels ayant une valeur d'aptitude élevée. La détermination surfacique se fonde sur le taux de variation annuelle moyenne des plantations entre 1999 et 2008 (9,98 %/an), variation qui sert à projeter leur superficie 18 ans plus tard (2026). Les plantations exotiques atteignent 54 973 ha en 2026. La même opération est effectuée en intégrant le facteur « Ruta Costera » dans le modèle et en lui affectant un poids très élevé. A titre d'exemple, les propriétés ont un vecteur propre de 0,27 alors que celui de la Ruta Costera est de 0,19. L'objectif FORET NATIVE attribue une aptitude plus faible à la catégorie d'occupation du sol « autre », réduisant la probabilité d'y voir apparaître de la forêt native.

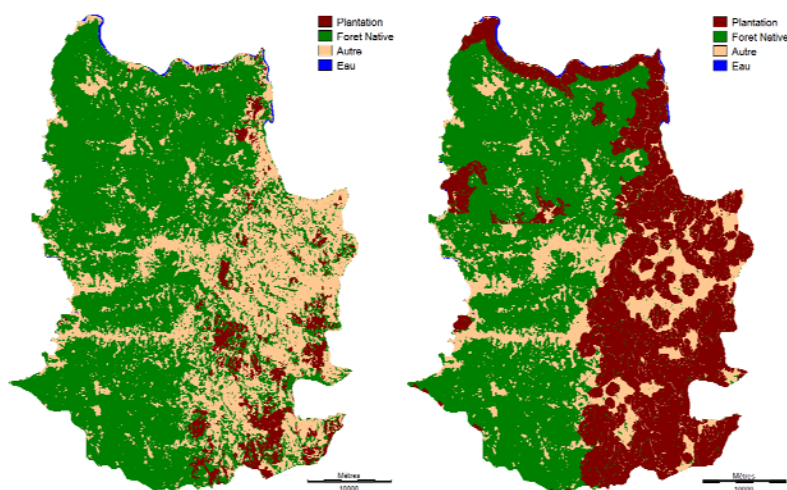


Figure 4. Occupation du sol en 2008 (à gauche) et scénario normatif intensif en 2026 (à droite)

4.2. Analyse des scénarios

Le scénario de préservation montre que la forêt native se développe sur la précordillère côtière (à l'est) et remplace principalement les zones catégorisées comme « autre ». Une partie des plantations exotiques est remplacée par des espèces natives. Les communautés autochtones, après avoir récupérées leurs terres, ont systématiquement boisé leur parcelle en espèces natives et y ont appliqué une politique de gestion soutenable afin de valoriser la ressource.

Au contraire, le scénario intensif traduit parfaitement l'invasion de la précordillère côtière par les plantations industrielles, laissant quelques îlots de terres non boisées. La construction de la *Ruta Costera* à l'ouest de la commune renforce le réseau routier existant en 2008 et facilite l'accessibilité des entreprises dans les terres, générant par conséquent l'apparition de grandes plantations au sein même de

la Cordillère. Ce scénario met en évidence les répercussions (environnementales et sociales) qui pourraient être engendrées.

La place occupée par le facteur foncier est déterminante dans les deux scénarios. Les données numériques disponibles font état d'une concentration des propriétés sur la précordillère ce qui explique la part occupée par la forêt native et les plantations dans cette zone. A l'inverse, la Cordillère de la côte est très faiblement affectée par cette variable mais reste tributaire du développement de nouveaux axes de communications.

5. Discussion et conclusion

Les images obtenues correspondent, dans une certaine mesure, aux hypothèses émises dans chacun des scénarios, néanmoins plusieurs limites ont été identifiées.

La mise en place d'une approche exploratoire afin de spatialiser un scénario normatif ne remet pas en cause sa pertinence. Cependant il peut être légitime de considérer ce scénario comme un scénario exploratoire en situation extrême qui ne se détache pas des tendances observées. Selon Börjeson *et al.* (2006) un ajustement marginal du développement actuel n'est pas suffisant, et il est nécessaire de rompre la tendance afin d'atteindre l'objectif fixé.

Dans ce sens, la limite de l'approche exploratoire se traduit par la dépendance du modélisateur face à la capacité du modèle à faire varier les paramètres de simulation (prise en compte des cycles de rotation et de déboisement par exemple). Nous avons vu que l'évaluation multicritère permet de pondérer les facteurs afin d'intégrer les hypothèses émises mais surtout pour tendre au plus près d'une image souhaitée. Bien que l'image du couvert forestier en 2035 soit riche d'enseignement elle ne rompt pas totalement avec la logique d'occupation du sol observée en 2008. Si les scénarios normatifs ne posent pas de réelles contraintes de conception, leur spatialisation (exploratoire) reste tributaire des données disponibles et de la performance du modèle employé.

Par conséquent, cette approche peut se concevoir comme une combinaison de l'approche normative (synchronique) dans la construction du scénario (image du futur) et de l'approche exploratoire dans le processus de spatialisation des hypothèses (du présent vers le futur).

Le choix du modèle dans une démarche prospective est une étape importante et doit prendre en compte plusieurs critères. Ainsi, après avoir élaboré l'image d'un futur souhaité et présenté les différentes hypothèses, le modélisateur doit s'assurer d'avoir à disposition une base de données complète qui permette de retranscrire spatialement chacune des hypothèses énoncées. Au cours du processus de simulation, le modèle doit être développé de sorte à ce qu'il rompe avec l'occupation du sol observée à la dernière date connue, afin de se démarquer des scénarios exploratoires contrastés. Cela implique de pouvoir intervenir en « temps réel » dans le modèle pour faire varier les paramètres. De plus, il est important de pouvoir intégrer de nouvelles variables ou des variables actualisées (parcelles cadastrales par exemple) à des instants clés de la simulation et qui auront été prédéterminés.

Remerciements

Les auteurs sont reconnaissants au projet ECOS-Sud Chili n° C07H03 intitulé "La forêt de la cordillère côtière continentale dans le sud du Chili : Dynamiques contemporaines et modélisations prospectives".

Bibliographie

- Amer M., Daim T.U. et Jetter A. (2013). A review of scenario planning. *Futures*, vol. 46, p. 23-40.
- Batty M. et Torrens P.M. (2005). Modelling and prediction in a complex world. *Futures*, vol. 37, p. 745-766.
- Bishop P., Hines A. et Collins T. (2007). The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight*, vol. 9, n° 1, p. 5-25.
- Blecic I. et Cecchini A. (2008). Design beyond complexity: Possible futures—Prediction or design? (and techniques and tools to make it possible). *Futures*, vol. 40, p. 537-551.
- Börjesson L., Höjer M., Dreborg K-H, Ekvall T. et Finnveden G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, vol. 38, n° 7, p. 723-739.
- Catellin S. (2004). L'abduction : Une pratique de la découverte scientifique et littéraire. Critique de la raison numérique. HERMÈS n°39, CNRS Editions, Paris, p. 179-184.
- Eastman J.R. (2006). *IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing*, Clark University, Worcester.
- European Environment Agency (2000). Scenarios as tools for international environmental assessments. Environmental issue report, n° 24, 31 p.
- Godet M. (1986). Introduction à la Prospective. Seven key ideas and one scenario method. *Futures*, p. 134-157.
- Godet M. (1992). *De l'anticipation à l'action*, Dunod, Paris.
- Godet M. (2010). Future memories. *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 77, p. 1457-1463.
- Gourmelon F., Houet T., Voiron-Canicio C. et Joliveau T. (2012). La géoprospective. Points de vue conceptuels et applicatifs de l'apport du spatial à la prospective. *L'Espace Géographique*, n°2, p. 97-98.
- Hatem F. (1993). *La Prospective. Pratiques et Méthodes*, Economica, Gestion, Paris.
- Houet T., Hubert-Moy L. et Tissot C. (2008). Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 18, n°3, p. 345-373.
- Houet T. et Gourmelon F. (2013) (accepté). La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux approches prospectives. *Cybergéo. European Journal of Geography*.
- Maestripietri N. et Paegelow M. (2013) (accepté). Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili. *Cybergéo : European Journal of Geography*.
- Makropoulos C.K. et Butler D. (2006). Spatial ordered weighted averaging: incorporating spatially variable attitude towards risk in spatial multi-criteria decision-making. *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, p. 69-84.

- Masini E.B. et Médina Vasquez J. (2000). Scenarios as Seen from a Human and Social Perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 65, p. 49–66.
- Medina Vásquez J. et Ortegón E. (2006). *Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América Latina y el Caribe*, CEPAL, Santiago.
- Paegelow M. et Camacho Olmedo M.T. (2005). Possibilities and limits of prospective GIS land cover modelling—a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, n° 6.
- Paegelow M., Maestriperi N., Sáez Villalobos N. et Toro Balbotín D. (2012). Détection des plantations forestières par imagerie satellite MODIS dans le Sud du Chili, <http://mappemonde.mgm.fr/num34/articles/art12204.html>
- Phdungsilp A. (2011). Futures studies' backcasting method used for strategic sustainable city planning. *Futures*, vol. 43, p. 707-714.
- Roubelat F. (1994). *La prospective aux Etats-Unis. De la rigueur au divertissement*.
- Saaty T. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, vol. 15, n° 3, p. 234-281.
- Sigel K., Klauer B. et Pahl-Wostl C. (2010). Conceptualising uncertainty in environmental decision-making: The example of the EU water framework directive. *Ecological Economics*, vol. 69, n°3, p. 502–510.
- Stewart C.C. (2008). Integral scenarios: Reframing theory, building from practice. *Futures*, vol. 40, p. 160–172.
- van Notten P.W.F. et Rotmans J. (2003). An updated scenario typology. *Futures*, vol. 35, p. 423-443.
- Verburg P.H., Kok K., Pontius Jr. R.G. et Veldkamp A. (2006). *Modeling Land-Use and Land-Cover Change. Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*. New York/Berlin, Springer, p. 117-135.
- Voiron-Canicio C. (2012). L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective. *L'Espace géographique*, n°2, p. 99-110.
- Wilkinson A. (2009). Scenarios Practices: In Search of Theory. *Journal of Futures Studies*, vol. 13, n°3, p. 107-114.
- Wolfslehner B., Vacik H. et Lexer M.J. (2005). Application of the analytic network process in multi-criteria analysis of sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, vol. 207, p. 157-170