



HAL
open science

Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective

Nicolas Maestriperi

► **To cite this version:**

Nicolas Maestriperi. Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective. Géographie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2012. Français. NNT : . tel-00794688v1

HAL Id: tel-00794688

<https://theses.hal.science/tel-00794688v1>

Submitted on 26 Feb 2013 (v1), last revised 15 Jul 2013 (v2)

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)

Cotutelle internationale avec :

Présentée et soutenue par :
Nicolas Maestriperi

Le mardi 11 décembre 2012

Titre :

Dynamiques spatio-temporelles des plantations forestières industrielles dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation prospective.

ED TESC : Géographie et aménagement

Unité de recherche :

Laboratoire GEODE - UMR 5602/CNRS

Directeur(s) de Thèse :

Martin Paegelow (Professeur, GEODE, Toulouse)

Gilles Selleron (Chargé de recherche CNRS, GEODE, Toulouse)

Rapporteurs :

Thierry Joliveau (Professeur, Université de St-Etienne, ISTHME - UMR 5600/CNRS)

Michel Etienne (Directeur de recherche, INRA, Avignon)

Autre(s) membre(s) du jury :

Jean-Paul Métaillé (Directeur de recherche, GEODE, Toulouse)

Claude Monteil (Maître de conférences - HDR, INP-ENSAT, Toulouse)

Juan Sanchez Alvarez (Directeur de recherche, CEDER, Universidad de los Lagos, Osorno)



"Continuum" by Dan McCarthy – February 2012
www.danmccarthy.org

A Philippe
A Hana

« L'histoire d'un ruisseau, même de celui qui naît et se perd dans la mousse, est l'histoire de l'infini »
Elisée Reclus (1830 – 1905)

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans la présence et la rencontre de nombreuses personnes à travers le Chili, la France et le reste de l'Europe. Malgré tous mes efforts, la liste n'est pas complète.

Tout d'abord je tiens à remercier Martin Paegelow, Professeur de Géographie à l'Université de Toulouse 2 Le Mirail pour avoir su lier la rigueur du travail et la sympathie tout au long de cette thèse. Je ne le remercierai jamais assez pour avoir partagé et suivi mes recherches sur le Chili depuis mon Master 1 (ça commence à dater).

Un grand merci à Gilles Selleron, chargé de recherche au CNRS et co-directeur de ce travail, pour son amitié et pour toutes les discussions extra-thèses qui, malgré tout, restaient focalisées sur le Chili.

A mon comité de thèse, pour leur disponibilité et leurs nombreux conseils. Ainsi j'exprime ma reconnaissance à Martine Guibert, à qui je dois ma passion pour l'Amérique Latine, à Thomas Houet pour son aide et son amitié et enfin à David Shereen.

Muchas gracias al equipo del CEDER y a la Universidad de Los Lagos (Osorno). Mi sincero agradecimiento a Juan Sánchez Álvarez (director), Nicolas Sáez, Arturo Vallejos Romero, Susan Avila Ñirril, James Park Key, Margarita Oyarce Igor, Alex y Sandra Ríos (ahora te mando frutas). Por supuesto no olvido mi amigo Diego y mis amigas Verónica y Karin.

A María Verónica Oyarzún Acosta, ingeniero forestal y jefe del departamento de prospección sectorial de la Corporación Nacional Forestal (Gerencia desarrollo y fomento forestal). A los miembros del Gobierno Regional de Los Rios, particularmente a Patricio Romero Peña. A Ricardo Melillanca y Manuel E. Maragaño de la CONADI.

A Marcelo Oglietti, Director General para las relaciones institucionales y a Santiago Espeche, de la COMisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE - Argentina).

Je tiens à exprimer ma gratitude à l'équipe du laboratoire GEODE-UMR 5602 CNRS, et particulièrement aux enseignants-chercheurs qui m'ont formé à la passionnante discipline qu'est la géographie. Et parce qu'oublier ces personnes me condamnerait pour le restant de mes jours, j'adresse un grand merci à Hugues, pour ses aides techniques, pour ses talents de cuisinier, pour son coup droit et son fameux nœud de huit ! A Sandrine, pour son amitié, sa bonne humeur et son café ☺. Jamais deux sans trois, et pas des moindres, merci à Franck, pour son lot de blagues hebdomadaires et ses conseils avisés (*Death by PowerPoint*)

Je tiens à remercier ma famille d'accueil à Osorno, c'est-à-dire à Patricia, Victor (gracias por el pisco puro), Alexandra y Daniel (el mejor jugador de pimpón...lo crees). J'ai également eu le privilège de rencontrer Dario Toro Balbotín et son épouse Marcela qui m'ont si gentiment reçu chez eux à Pucón. C'est un plaisir de pouvoir continuer à les cotoyer à Toulouse.

Je tiens à exprimer mon amitié (et je pèse mes mots) à ma seconde famille d'accueil à Santiago. A Teresa – muchas gracias por mi cumpleaños, a Sandy, y *-last but not least-* a Alfonso y los bomberos de En Mi Defensa (te paseo en la lewa), a las tías de Santiago, Dali, Vero y Kris.

A tous mes ami(e)s de Mazamet, de Toulouse et à travers la France et l'Europe (la liste est beaucoup trop longue). Mes sincères salutations à Julien aka « personal coach », Djamel, à Wilo et THS, à Rémy et ETS, A Bridge to Many, WoodWork, les karatékids de St Sernin et Clément (LE représentant des doctorants).

Bien évidemment je n'oublierai jamais les thésard(E)s du laboratoire : Fanny, France, Elodie, Carole, Anja, Nafissa, Laurie, Chahrazed, Ivaldo, Do Long, Raquel, Jérôme, Bénédicte, Marietou...et les autres : Marie, Emilien, Laure, Candy, Jeronimo...Un grand merci à celles et ceux qui ont relu ce travail (Buddy, Emma, Jenny, Susy, Alice et Pauline).

Enfin, j'adresse une pensée à Pauline et à ma famille, pour m'avoir soutenu, encouragé et supporté pendant ces quatre années. Je vous aime.

LISTE DES SIGLES

| | |
|-----------|---|
| AAUs | Assigned Amount Units |
| AHP | Analytical Hierarchy Process |
| AC | Automate Cellulaire |
| BCN | Banco Central de Chile |
| BIRF | Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento |
| BIT | Bureau international du Travail |
| CDM | Clean Development Mechanism |
| CEDER | Centro de Estudios del Desarrollo Local y Regional |
| CLP | Combinaison Linéaire Pondérée |
| CLUE | Conversion of Land Use and its Effects |
| CMED | Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement |
| CMPC | Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones |
| CMPFE | Conférence Ministérielle sur la Protection des Forêts en Europe |
| CNRS | Centre National de la Recherche Scientifique |
| CO2 | Dioxyde de carbone |
| CODEFF | COmité nacional pro DEfensa de la Fauna y Flora |
| CONADI | COrporación NAcional de Desarrollo Indígena |
| CONAF | Corporación Nacional Forestal |
| CONAMA | Comisión Nacional del Medio Ambiente |
| CONICYT | COmisión Nacional de Investigación Científica Y Tecnológica |
| COPEC | COmpañía de PEtróleos de Chile |
| CORFO | COrporación de FOmento de la producción de Chile |
| CORMA | COrporación de la MAdera |
| DATAR | Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale |
| DL 701 | Decreto Ley 701 |
| DNA | Designated National Authority |
| DS | Développement Soutenable |
| ECOS | Evaluation-orientation de la COopération Scientifique |
| EMC | Evaluation MultiCritère |
| ETM | Enhanced Thematic Mapper |
| EVI | Enhanced Vegetation Index |
| FAO | Food and Agriculture Organization |
| FMI | Fond Monétaire International |
| FSC | Forest Stewardship Council |
| GES | Gaz à Effet de Serre |
| GEODE | GEOgraphie De l'Environnement |
| GLP | Global Land Project |
| GOFC-GOLD | Global Observation for Forest and Land Cover Dynamics |
| ICEFI | Iniciativa Chilena de Certificación Forestal Independiente |
| IGM | Instituto Geográfico Militar |
| INDAP | Instituto de Desarrollo Agropecuario |
| INE | Instituto Nacional de Estadísticas |
| INFOR | INstituto FOrestal |
| INSEE | Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| IREN | Instituto nacional de investigación de REcursos Naturales |
| ISO | International Organization for Standardization |
| IV | Indice de Végétation |
| LUC | Land Use Change |
| LUCC | Land Use and Cover Change |

| | |
|--------|---|
| LULUCF | Land Use, Land-Use Change and Forestry |
| MDF | Medium Density Fibreboard |
| MIR | Moyen InfraRouge |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| MLP | Multi Layer Perceptron |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain |
| MODIS | MODerate resolution Imaging Spectroradiometer |
| MOLA | MultiObjective Land Allocation |
| MOP | Ministerio de Obras Públicas |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| OCDE | Organisation de Coopération et de Développement Economiques |
| OIT | Organisation Internationale du Travail |
| OMC | Organisation Mondiale du Commerce |
| ONU | Organisation des Nations Unies |
| OWA | Ordered Weighted Averaging |
| PEFC | Pan European Forest Council |
| PED | Pays En Développement |
| PIB | Produit Intérieur Brut |
| PIR | Proche InfraRouge |
| PNUD | Programme des Nations Unies pour le Développement |
| PwC | PriceWaterhouseCoopers |
| RMS | Root-Mean-Square |
| RMU | Removal Unit |
| SII | Servicio de Impuesto Interno |
| SMA | Systèmes Multi-Agents |
| SNASPE | Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado |
| SPOT | Satellite Pour l'Observation de la Terre |
| TM | Thematic Mapper |
| UMR | Unité Mixte de Recherche |
| UACH | Universidad Austral de CHile |
| UNCED | United Nations Conference on Environment and Development |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| UNEP | United Nations Environment Programme |
| USGS | U.S. Geological Survey |
| WGS | World Geodetic System |
| WRI | World Resources Institute |
| WRM | World Rainforest Movement |
| WWF | World Wildlife Fund |

SOMMAIRE

| | |
|---|------------|
| INTRODUCTION GENERALE | 11 |
| PREMIERE PARTIE – Dynamique spatio-temporelle des forêts et leur modélisation prospective dans le centre sud chilien : enjeux et méthodologie | 17 |
| CHAPITRE 1 – Le système forestier chilien dans le contexte mondial | 19 |
| CHAPITRE 2 – Positionnement conceptuel et méthodologique : développement soutenable, étude des changements d’occupation et d’utilisation des sols et simulation prospective --- | 67 |
| CHAPITRE 3 – L’aire d’étude et les données. Approche multi-scalaire : du régional au local | 121 |
| DEUXIEME PARTIE – La dynamique forestière du régional au local. De la structure du système à la distinction des facteurs | 151 |
| CHAPITRE 4 – Détermination des dynamiques paysagères et trajectoires d’évolutions - | 153 |
| CHAPITRE 5 – Identification et hiérarchisation des facteurs de changements | 191 |
| TROISIEME PARTIE – Simulation prospective à l’échelle communale | 217 |
| CHAPITRE 6 – Le choix des modèles : mise en œuvre et calibration pour 2008..... | 219 |
| CHAPITRE 7 – Les scénarii tendanciels et normatifs spatialisés | 257 |
| CONCLUSION GENERALE | 293 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 297 |
| ANNEXES | 327 |
| LISTE DES FIGURES | 341 |
| LISTE DES TABLEAUX | 345 |
| LISTE DES PHOTOS | 347 |
| TABLE DES MATIERES | 349 |

INTRODUCTION GENERALE

"La transformation des terres englobe une grande variété d'activités qui varient considérablement dans leur intensité et leurs conséquences" (Vitousek, 1997). Le développement remarquable de la sylviculture intensive à travers le monde depuis les années 1960 (Bull, 2006) constitue une des manifestations les plus répandues de la mondialisation (Arroyo *et al.*, 2000). La demande croissante en fibres par les industries de pâte à papier (Evans et Turnbull, 2004) et les politiques d'incitation au développement des plantations industrielles n'ont fait que renforcer ce processus d'intensification des pratiques sylvicoles.

Entre la fin du 19^{ème} et la première moitié du 20^{ème} siècle, le Chili connut une augmentation de sa population, une subdivision des terres et la destruction de vastes forêts destinées au développement de l'activité agro-pastorale (Donoso et Otero, 2005). Corrélativement à cet épuisement de la ressource bois et afin de répondre à une demande nationale croissante, les premières plantations exotiques furent implantées dans la zone de Concepción (8^{ème} Région du Bío-Bío) en 1907, et devinrent ainsi une nouvelle source d'approvisionnement qui s'étendra progressivement à tout le centre sud chilien. L'expansion des plantations industrielles s'accéléra à la suite d'une évaluation de l'état des sols et de l'érosion dans les années 1960. L'état alarmant des sols contraignit le gouvernement chilien de mettre en place une stratégie de préservation des sols en favorisant le développement de plantations monospécifiques à croissance rapide. L'application du Décret-Loi 701¹ en 1974 provoqua l'intensification des pratiques sylvicoles, voyant les aspects productifs supplanter la stratégie de protection des sols. Entre 1975 et 2007 la superficie forestière moyenne annuelle plantée (boisement et reboisement) à l'échelle nationale était de 95 141 hectares, pour atteindre une superficie de 2,2M d'hectares en 2007 (INFOR, 2008).

Malgré la reconnaissance de la durabilité des activités sylvicoles chiliennes par l'OCDE en 2005 (Arana Silva, 2009), la communauté scientifique s'accorde sur les limites environnementales et socio-économiques engendrées par de telles pratiques. Aux problèmes de pauvreté et d'exode ruraux et d'expulsion de minorité ethnique Mapuche (Lara, 1985 ; Leyton Vasquez, 2009), s'ajoutent la perte de biodiversité (Sheldon, 1989 in Winjum, 1997 ; Donoso et Otero, 2005), ainsi que la perturbation des cycles hydrologiques et l'acidification des sols (Cannell, 1999). En outre, la substitution des forêts natives par des monocultures a été reconnue comme l'une des principales menaces observées dans cette zone (Lara, 1996 ; Cavelier et Tecklin, 2005 ; Donoso et Otero, 2005 ; Echeverria *et al.*, 2006 ; Altamirano et Lara, 2010). L'enjeu est de taille car la majorité de cette exploitation forestière se situe au sein même de l'Ecorégion des Forêts Tempérées Humides Valdivienne qui fait partie des 238 Ecorégions identifiées par le WWF au niveau mondial. Elle fait l'objet d'une des plus fortes priorités de conservation et de restauration dans le monde et fait partie des 25 *hotspots* pour la conservation de la biodiversité (Myers, 2000).

¹ Ce décret incite au boisement sur des terrains d'aptitudes préférablement forestières, dépourvus de couverture arborée et dans la plupart des cas fortement érodés. Il permet de subventionner entre 75 et 90% des coûts de plantation et d'exempter d'impôts les plantations effectuées sur des terrains classés d'aptitude forestière (Barrué Pastor, 2004).

On constate enfin une asymétrie du secteur forestier, dans la mesure où les plantations industrielles (2,2 M d'hectares) assurent la majeure partie des intrants économiques, alors que le patrimoine forestier natif (13,4 M d'hectares) est dévalorisé et n'est pas considéré comme un levier permettant de résoudre l'extrême pauvreté qui touche les communautés autochtones et les petits propriétaires forestiers qui peuplent la zone d'étude.

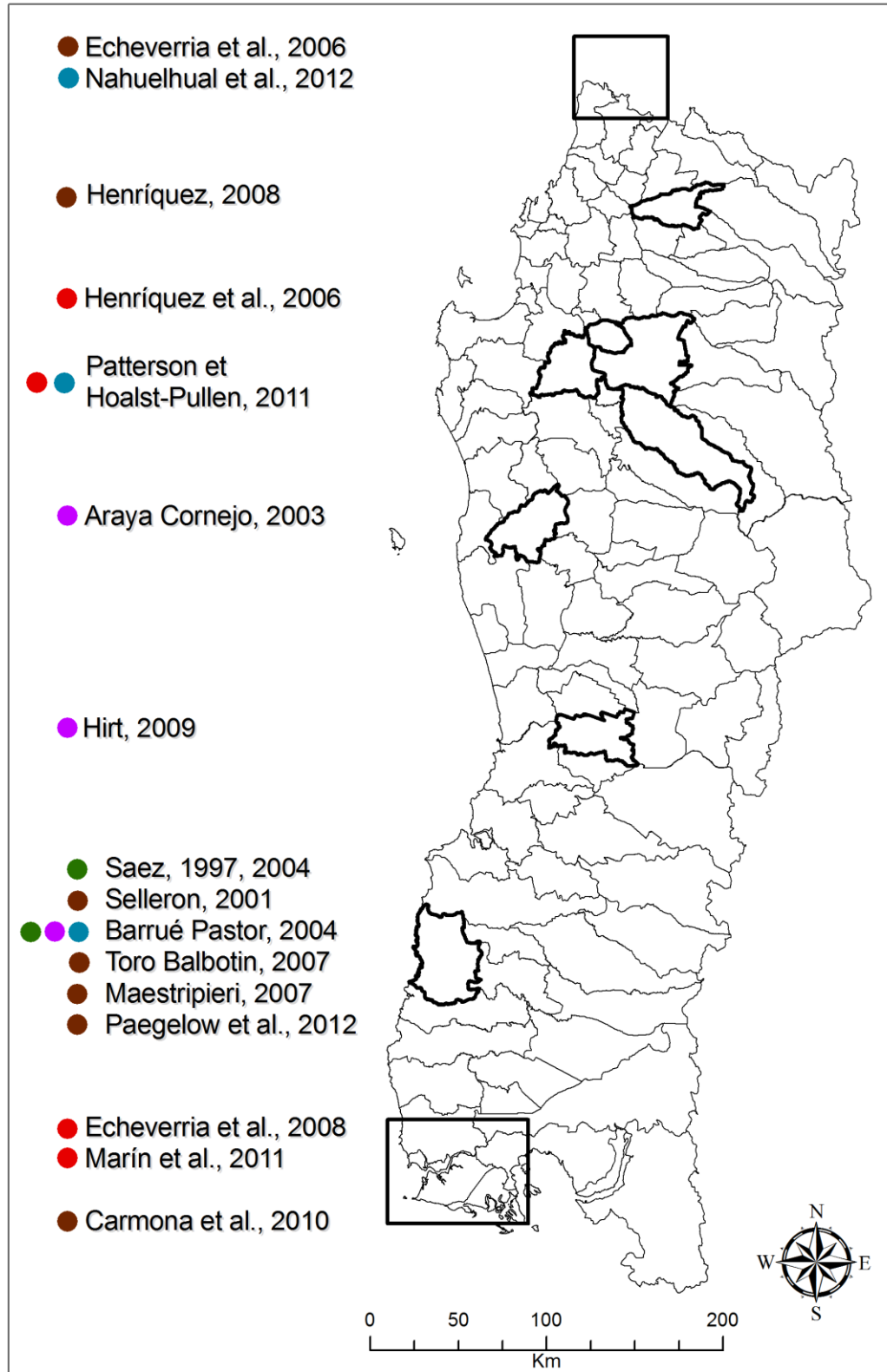
CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La science forestière, aussi bien dans le domaine de la recherche que celui de l'enseignement, occupe une place centrale au Chili. Elle répond, depuis une quarantaine d'années, à des demandes « *que den solución no sólo a problemas relacionados con el manejo de los bosques, sino que también ellas abarcan todo el ámbito de su influencia, de tal manera que la sustentabilidad de los bosques vaya más allá de lo económico, incluyendo aquellos aspectos sociales y ambientales* » (Hernández *et al.*, 2007).

Les enjeux soulevés par l'expansion des plantations industrielles sont clairement identifiés par la communauté scientifique. Les études sur l'organisation spatiale des essences forestières (natives et exotiques), la planification et la gestion sylvicole, les caractéristiques écologiques, la productivité forestière, le cadre législatif, les finalités productives, les coûts environnementaux, etc., reposent sur des recherches pluridisciplinaires. Or, si les connaissances acquises par la science forestière sont remarquables à l'échelle nationale, les projets portant sur l'analyse des dynamiques spatio-temporelles des plantations industrielles sont récents, très peu développés et appliqués à l'échelle communale. La simulation prédictive/prospective est utilisée depuis six ans dans la zone (Los Angeles – 9^{ème} région et dans le sud continental de la 10^{ème} région), mais reste inexistante dans la commune de San Juan de la Costa, malgré les nombreuses études effectuées. La figure 1 synthétise les principales recherches menées entre la 7^{ème} Région du Maule et la 10^{ème} Région de Los Lagos.

LA QUESTION DE RECHERCHE

La « conquête » de nouveaux espaces et la concentration/monopolisation des propriétés terriennes par un groupe restreint d'acteurs génèrent un ensemble de relations complexes entre les différentes composantes du milieu biophysique et les sociétés humaines. La dynamique spatio-temporelle des plantations forestières industrielles est un processus multiforme, évoluant à une fréquence élevée et ayant des conséquences environnementales et socio-économiques majeures. Le besoin d'une vision à long terme de l'occupation du sol, pour optimiser la définition de politique forestière soutenable et pallier aux problèmes de concertation à l'échelle locale, est primordial. Ainsi, deux problématiques se posent. La première (i), basée sur la rétrospective, est de savoir comment ont évolué les plantations industrielles (rythmicité et facteurs explicatifs) et de connaître leurs trajectoires d'évolutions afin de déboucher (ii) sur de la modélisation prospective, pour déterminer leur dynamique spatio-temporelle à moyen terme.



Légende

- Land Use and Cover Change
- Drivers
- Mapuche
- Simulation prédictive - prospective
- Forêt Native
- Zones étudiées par les auteurs

Figure 1 : Etat de l'art synthétique sur la question forestière dans le centre-sud chilien. Les auteurs sont placés en face des zones qu'ils étudient.

HYPOTHESES

La dynamique spatio-temporelle de l'occupation et de l'utilisation des sols a un impact sur les sphères environnementales, sociales et économiques. La première hypothèse (**H1**) énoncée considère que la continuité des pratiques sylvicoles intensives, telles qu'elles sont actuellement appliquées au Chili, couplée à l'expansion de monocultures se substituant aux espèces autochtones est problématique.

La dynamique d'organisation spatiale² des plantations industrielles (choix des espèces, choix du site d'implantation, de leur répartition et de leur surface) est déterminée par de multiples facteurs : (i) climat et topographie, (ii) propriété foncière, (iii) accessibilité (distance aux routes, pente, altitude), (iv) occupation du sol, (v) climat social (conflits), (vi) objectif économique, etc. Ce processus résulte d'une agrégation de dynamiques à l'échelle régionale, elles-mêmes déterminées par un agglomérat d'éléments agissant localement. Les impacts des changements d'occupation et d'utilisation des sols suivent aussi cette logique ascendante (du local au global). A contrario, les facteurs de changements suivent une logique descendante (du global au local). Même s'il existe des déterminants analogues entre chaque région, leur importance diffère en fonction de la situation politico-économique et sociale propre à chaque région. Dans ce sens, même si on peut dégager une logique d'organisation spatiale commune à l'ensemble des Régions, nous supposons que des disparités peuvent apparaître lorsque l'échelle d'analyse s'affine (**H2**). Ainsi, le suivi spatio-temporel à plusieurs échelles par télédétection permet une meilleure compréhension des processus étudiés en déterminant leurs principales trajectoires d'évolution (**H3**). D'après Constanza et Voinov (2004) « *understanding and modeling the spatial patterns of landscape processes and changes over time at several different scales is critical to effective environmental management* ».

L'hypothèse suivante (**H4**) estime que cette dynamique tend continuellement à se généraliser en gagnant de nouveaux territoires, tout en suivant une logique nord-sud. Environ 45% de la superficie continentale chilienne est apte à l'activité forestière. A l'heure actuelle, le couvert forestier n'occupe que 21% de cet espace (18% par les forêts natives et 3% par les plantations industrielles), laissant ainsi un potentiel considérable aux monocultures. Les terres destinées anciennement aux activités agro-pastorales, dépourvues de végétation, deviennent des espaces potentiellement colonisables, en tenant compte des facteurs cités précédemment. « *Osorno pone sus ojos en el oro verde* » titre el Diario austral de Osorno du 18 mars 2007, en annonçant le rachat de 5 000 hectares de terres à Hacienda Rupanco par l'une des deux plus grandes entreprises chiliennes du secteur forestier : Forestal Mininco, sans oublier l'annexion de 8 000 hectares supplémentaires, conférant à celle-ci une aire d'approvisionnement en plein cœur de la province d'Osorno (10^{ème} Région de Los Lagos). Ces chiffres ont été confirmés dans le même périodique, datant du 17 juin 2007, suite à une rencontre entre des représentants de l'entreprise Mininco (Alvaro Espina et Jaime Ormazábal) et le maire de Puerto Octay (province d'Osorno). Les dits représentants « *durante su entrevista con el jefe edilicio, dieron*

² L'organisation de l'espace définit l'objet de la géographie comme la structuration des aménagements humains à l'interface terrestre (Pumain, Hypergéométrie).

a conocer que tanto en Osorno como Puerto Octay y otros lugares de la zona se está en un programa de compra de fundos para ir formando una masa forestal ».

Ces rachats massifs, associés à la poursuite des pratiques sylvicoles intensives, s'affirment en dehors de toutes perspectives de développement soutenable. La vision à moyen et long terme, nécessaire à la gestion soutenable de ressources forestières, est altérée par une vision à court terme. Les acteurs (directs et indirects) du secteur forestier chilien font également face à un manque de lisibilité (spatiale) par rapport à l'évolution future des plantations. Dans cette optique, la modélisation prospective permet de répondre à ces hypothèses dans la mesure où elle embrasse à la fois, les concepts de spatialisation, de temporalité (passé-présent-futur), mais aussi d'intentionnalité des acteurs **(H5)**. Elle se focalise par conséquent sur la complexité des interactions qui affectent et qui sont affectées par le paysage. La modélisation s'envisage dans cette thèse comme un outil d'aide à la décision capable, en comprenant et en agissant sur les dynamiques spatio-temporelles des types d'occupation du sol, d'atténuer leurs impacts sur les sphères environnementale et socio-économique.

OBJECTIFS DE RECHERCHES

L'objectif central de cette thèse est de retracer spatio-temporellement la dynamique des plantations forestières dans un gradient nord-sud, allant de la 8^{ème} Région du Bío-Bío à la 10^{ème} Région de Los Lagos. La compréhension des caractéristiques des changements d'utilisation et d'occupation des sols et leur simulation prédictive et prospective à court et moyen termes, constituent une étape fondamentale à l'élaboration de nouvelles stratégies de développement.

Le premier objectif est de suivre la dynamique des plantations industrielles à plusieurs échelles spatiales et temporelles par télédétection, en ayant recours à de l'imagerie satellitale à moyenne (MODIS) et haute résolution (LANDSAT), complétée par des recensements statistiques et des relevés de terrain. Il s'agit d'améliorer la compréhension de cette dynamique d'occupation du sol en tant que système couplé homme–environnement.

Le second objectif est de simplifier la complexité du système étudié à l'échelle locale, tout d'abord, en modélisant l'occupation du sol à plusieurs dates et en mettant en évidence les principales transitions, puis en identifiant les *drivers* explicatifs.

Fort des résultats répondant à ces deux premiers objectifs, le troisième et dernier objectif est de produire des scénarii prospectifs spatialisés (tendanciel et contrastés) afin de proposer une gamme de futurs possibles destinés à éclairer les acteurs du secteur forestier.

A l'échelle régionale la zone d'étude s'étend de la 8^{ème} Région du Bío-Bío au sud continental de la 10^{ème} Région de Los Lagos. L'application des scénarii prospectifs s'effectue dans la commune de San Juan de la Costa (province d'Osorno – 10^{ème} Région de Los Lagos). A cette échelle les enjeux sont majeurs car la commune connaît un taux de pauvreté très élevé, est habitée par une majorité ethnique Mapuche-Huilliche (60 % de la population) et abrite les forêts valdiviennes de *Nothofagus* et d'alerce (*Fitzroya cupressoides*).

CETTE THESE EST STRUCTUREE EN TROIS PARTIES.

La **PREMIERE PARTIE** présente les enjeux et la méthodologie adéquate à l'étude de la dynamique spatio-temporelle des plantations industrielles dans le sud chilien. Le premier chapitre resitue la problématique dans son contexte international pour détailler ensuite les principales caractéristiques du secteur forestier à l'échelle nationale. Les enjeux soulevés par le développement soutenable sont évoqués dans le second chapitre. Ainsi, après avoir mis en évidence la dimension spatiale et temporelle de ce concept, une présentation des méthodes de suivi des dynamiques environnementales et de l'approche prospective est réalisée. Le troisième chapitre présente l'aire d'étude et les données mobilisées, en suivant une logique descendante (*top-down*).

La **DEUXIEME PARTIE** caractérise la dynamique des plantations industrielles à de multiples échelles spatiales et temporelles. Le quatrième chapitre retrace l'évolution du couvert forestier de l'échelle régionale à l'échelle locale où sont reconstituées et quantifiées les trajectoires d'évolution. Le cinquième chapitre se concentre sur l'identification des facteurs explicatifs et exprime, par l'approche systémique, la complexité du système forestier à l'échelle communale.

La **TROISIEME PARTIE** se focalise sur la modélisation et la spatialisation des scénarii prédictifs et prospectifs et présente les résultats obtenus. La phase préparatoire à la spatialisation des scénarii est développée dans le sixième chapitre, où deux modèles de simulation sont expérimentés et comparés. La dernière étape de ce travail présente les hypothèses et la spatialisation des scénarii exploratoires et normatifs.

Cette thèse s'intègre dans le cadre du programme ECOS-*sud*-CONICYT (01/2008 à 12/2010, n° C07H03) intitulé « *La forêt de la cordillère côtière continentale et insulaire dans le sud du Chili : Dynamiques contemporaines et modélisations prospectives* », dont l'objectif est de retracer les changements d'occupation du sol intervenus dans les deux dernières décennies, pour ensuite modéliser leur dynamique à moyen terme. Trois missions de terrains ont été effectuées dans la commune de San Juan de la Costa, en collaboration avec le CEDER (Centro de Estudios Regionales – Universidad de los Lagos).

PREMIERE PARTIE – DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES FORETS ET LEUR MODELISATION PROSPECTIVE DANS LE CENTRE SUD CHILIEN : ENJEUX ET METHODOLOGIE

CHAPITRE 1

Le système forestier chilien dans le contexte mondial

CHAPITRE 2

Positionnement conceptuel et méthodologique: développement soutenable, étude des changements d'occupations et d'utilisation des sols (LUCC) et simulation prospective

CHAPITRE 3

L'aire d'étude. Approche multi-scalaire : du régional au local et données

CHAPITRE 1 – Le système forestier chilien dans le contexte mondial

INTRODUCTION

L'appréhension et la compréhension des enjeux soulevés par le secteur forestier dans le centre-sud chilien ne peuvent se faire sans s'intéresser au préalable à l'évolution et au fonctionnement du territoire dans lequel il s'inscrit. S'agissant d'un système complexe³ imbriqué à de multiples échelles, il est fondamental de percevoir la problématique dans sa totalité. Sans prétendre à une retranscription exhaustive, l'analyse suivra une logique descendante, c'est-à-dire de la sphère mondiale à la sphère locale.

Ce chapitre a, par conséquent, une double visée. Dans un premier temps il sera question de la situation forestière à l'échelle mondiale et sous régionale (Amérique Latine). L'intérêt ici est de retracer l'évolution du couvert forestier dans ses grandes lignes et de présenter les principaux enjeux qui en découlent (**section 1**). Par la suite, l'analyse se focalisera sur la situation forestière chilienne en décrivant les principales caractéristiques de la forêt native et l'essor des plantations industrielles exotiques (**section 2**). Ce chapitre se conclura par la présentation des acteurs concernés (**section 3**) et les enjeux environnementaux et socio-économiques soulevés par le secteur forestier chilien (**section 4**).

1.1. Etat des lieux à l'échelle mondiale et régionale

1.1.1. Forêts et plantations (définition)

L'estimation des ressources forestières et l'analyse de la dynamique des plantations nous contraignent, dans un premier temps, à poser des bases étymologiques claires et univoques. Bien que la définition de « forêt » soit acceptable pour un suivi du couvert forestier à l'échelle mondiale, son sens change totalement lorsque l'on affine l'échelle d'analyse et qu'il devient possible, grâce au moyen de la télédétection, de la discriminer en « sous-unités ».

« Scale relevant to the resource definition process range from the very fine scale of a tree (for the allocative aspect⁴) or a person (for the authoritative aspect) to the very coarse global scale of all tropical forests (for the allocative aspect) or international alliances (for the authoritative aspects) » (Geores, 2003, p.80)

Il n'existe pas de définition faisant consensus au niveau des instances internationales. Malgré tout, la hauteur minimale, la superficie minimale ainsi que la densité de couverture restent des paramètres communs.

³ Nous renvoyons le lecteur au chapitre deux.

⁴ Selon Giddens (1984) dans (Geores, 2003, p.79) il existe deux types de ressources: *allocative* (matérielle) et *authoritative* (pouvoir). La première inclue des éléments matériels (champignons, bois de chauffe, fourrage, etc.) alors que la seconde caractérise les personnes ou entités qui contrôlent l'accès à la forêt, ou qui déterminent l'usage qui lui revient.

D'après la dernière Estimation des Ressources Forestières (*Forest Resources Assessment*) réalisée par la Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), une forêt est une portion de terre occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres ayant une hauteur supérieure à cinq mètres et un couvert arboré de plus de dix pour cent, ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils *in situ* (FAO, 2010).

Selon le United Nations Framework Convention on Climate Change⁵ (UNFCCC) une forêt est une portion minimale de terre de 0,05 à 1,0 hectare avec un couvert arboré (ou peuplement équivalent) de plus de 10-30 pour cent avec des arbres ayant le potentiel d'atteindre une hauteur minimale de 2-5 mètres à maturité *in situ*. Les jeunes peuplements naturels et toutes les plantations qui n'ont pas encore atteint une densité de couverture de 10-30 pour cent ou une hauteur de 2-5 mètres sont classés en tant que forêt (UNFCCC, 2002, p.58).

L'UNFCCC ne se limite pas, contrairement à la FAO, à une définition rigide et applicable au monde entier. Il existe, dans le cadre de ce traité, un responsable⁶ dans chaque pays en développement chargé d'apporter des modifications à la définition de la forêt (GOFC-GOLD, 2010, p.1-4). Ces modifications doivent être apportées dans le cadre d'un projet d'activité de reforestation visant à la réduction des émissions de Gaz à Effets de Serres (GES). Un exemple de procédure de modification est présenté dans l'annexe 1 (page 328).

Le Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD) note qu'un changement de densité de couverture qui n'est pas suivi d'un changement d'utilisation du sol, telle qu'une récolte de bois suivie d'une régénération, reste répertorié en tant que forêt.

On remarque qu'aucune distinction claire n'est faite entre les forêts (naturelles) et les plantations productives. Par défaut, les plantations sont définies comme une sous-catégorie des forêts.

L'UNFCCC considère les plantations en tant que telles au-delà des paramètres cités précédemment, c'est-à-dire au niveau des critères minimums accordés aux forêts. En deçà, une plantation reste une forêt même si l'objectif vise une production intensive. La FAO quant à elle considère les plantations comme des forêts lorsqu'elles sont utilisées principalement à des fins forestières ou de protection, tels que les plantations d'hévéas et les peuplements de chênes-lièges (FAO, 2005). Au contraire, les plantations productives sont des terres boisées par des espèces introduites et dans certains cas des espèces indigènes, établies par plantation ou semis, principalement pour la production de bois ou de produits non ligneux (FAO, 2005).

A cette détermination, l'agence de l'ONU apporte deux définitions supplémentaires :

Forest plantation (FAO, 2005)

Peuplements forestiers établis par plantation et / ou semis dans un processus de boisement ou de reboisement. Il peut s'agir soit d'espèces introduites (tous les peuplements plantés), ou d'une gestion intensive d'espèces indigènes, qui réunissent tous les critères suivants: une ou deux espèces par plantation, classe équienne, espacement régulier.

⁵ UNFCCC, 2011 : <http://unfccc.int/>

⁶ The Designated National Authority (DNA)

Plantation forest (FAO, 2005)

Forêt / autres terres boisées où les arbres ont été établis par plantation ou semis. Inclut tous les peuplements d'espèces introduites, établis par plantation ou semis. Peut inclure des zones d'espèces indigènes caractérisées par des espèces rares, un même espacement et/ou des peuplements équiennes.

Le World Rainforest Movement⁷ (WRM) a, à de nombreuses reprises, pointé du doigt ce flou sémantique, en présentant notamment une déclaration aux fonctionnaires des services forestiers de la FAO. Cette *Déclaration des professionnels et étudiants forestiers* publiée le 6 octobre 2008, mais précédant une étude plus exhaustive (WRM, 2003), incite la communauté internationale à adopter une différenciation explicite entre les plantations industrielles d'arbres et les forêts.

« *Dans le monde entier, les gouvernements sont en train de promouvoir activement l'expansion des plantations industrielles d'arbres, en dépit des graves répercussions qu'elles ont sur la société et l'environnement, comme on a déjà pu le constater. Les promoteurs de ce modèle affirment que les plantations d'arbres sont des forêts, mais cela n'est pas vrai. Les plantations ne sont pas des forêts. Malheureusement, nombre de nos collègues sont d'accord avec eux et nos institutions d'enseignement continuent de préparer de nouvelles générations de professionnels forestiers formés pour perpétuer et élargir ce modèle forestier qui prétend voir des forêts là où il n'y en a pas.* » (WRM, 2008).

Nous ferons également cette distinction entre forêt (native ou naturelle) et plantation (dans le cas de notre aire d'étude : monospécifique) considérant que les plantations de pins et d'eucalyptus (cf. 1.2.2.), de par : (i) leur uniformité génétique, (ii) le recours à des pesticides, (iii) leur impact sur l'environnement, (iv) la durée des rotations, etc., se rapprochent plus de considérations d'ordre de productions agricoles (intensives⁸ ou raisonnées⁹) que du simple domaine de la sylviculture (Lefèvre, 2004 ; Geist et Lambin, 2006). Dans ce sens, la FAO ne considère pas que l'établissement d'arbres à des fins de production agricole soit caractéristique d'une forêt.

⁷ <http://www.wrm.org.uy/index.html>

⁸ L'agriculture intensive se définit comme « *un système de production agricole caractérisé par l'usage important d'intrants, et cherchant à maximiser la production par rapport aux facteurs de production, qu'il s'agisse de la main d'oeuvre, du sol ou des autres moyens de production, tel que le matériel agricole. Elle se caractérise par un ensemble de pratiques au niveau parcellaire, dont notamment l'augmentation des intrants chimiques (engrais, pesticides), l'introduction de nouvelles cultures et un recours important à la monoculture, l'évolution du travail du sol et des calendriers de travaux* » (Burel et Garnier, p.4-5)

⁹ « *Pour ses promoteurs, l'agriculture raisonnée est une agriculture qui veut prendre en compte de manière équilibrée les objectifs économiques des producteurs, les attentes des consommateurs et le respect de l'environnement. [...] Elle vise à améliorer la qualité des produits alimentaires et la rentabilité économique des exploitations* » (Roger, 2001, p.3)

La caractérisation des dynamiques de changement d'occupation du sol et d'utilisation du sol (déforestation, boisement, reboisement) requiert elles aussi une brève révision.

La déforestation est un processus anthropique qui consiste à convertir des terres boisées en terres non forestières (UNFCCC, 2002, p.58). Considérant que le processus de déforestation est un changement d'utilisation du sol et d'occupation du sol, celui-ci inclut les conversions de forêts en cultures annuelles, en plantes pérennes (huile de palme, buissons) et les conversions en terres urbaines ou en d'autres infrastructures humaines (GOFC-GOLD, 2010). Poursuivant cette logique nous sommes en mesure de qualifier le processus de substitution comme partie intégrante de la déforestation, dans la mesure où les forêts natives sont converties à terme en monocultures d'espèces exotiques, que nous avons précédemment distinguées.

A l'inverse, le boisement est un processus anthropique qui consiste à convertir des terres qui n'ont pas été boisées pendant une période de 50 ans en terres forestières, via des plantations, des ensemencements et/ou la promotion par l'homme d'un ensemencement naturel (UNFCCC, 2002, p.58). La FAO (2005) qualifie ce procédé comme l'établissement de plantations forestières sur des terres qui, jusque-là, n'ont pas été classées comme forêt. Cela implique une transformation de zones non-forestières en zones forestières. Ici encore on note une divergence dans les termes employés par les deux organismes. La reforestation (ou reboisement) est définie par la FAO (2005) comme l'établissement de plantations forestières sur des terres temporairement déboisées considérées comme forêts.

Les monocultures sont comprises à la fois dans ce processus de boisement et de reboisement.

Malgré tout, il existe de nombreuses difficultés à définir et à distinguer les divers processus évoqués précédemment. Bull (2006), citant Kanoski (1997), remarque que la distinction entre boisement et plantations forestières est délicate. De même qu'entre boisement et réhabilitation des écosystèmes forestiers dégradés, entre les plantations forestières et les multiples formes d'arbres de fermes (*trees on farms*). « *Enfin, bien que les plantations industrielles sont établies pour fournir du bois pour l'industrie, il n'est pas toujours possible de tracer une ligne de démarcation rigide entre les zones de plantations industrielles et non industrielles* » (Bull, 2006, p. 14).

1.1.2. L'état des forêts à l'échelle mondiale

1.1.2.1. Principales dynamiques du couvert forestier

En 2010 la superficie forestière à l'échelle du globe dépassait les 4 milliards d'hectares, soit 31% de la superficie totale des terres (FAO, 2010). L'Europe et l'Amérique du Sud possèdent un patrimoine forestier conséquent en regroupant près de la moitié de la superficie totale des forêts mondiales avec 46%. Le pourcentage élevé pour l'Europe (25%) s'explique par l'intégration de la Fédération de Russie à l'Europe dans les données de la FAO. Avec 809 millions d'hectares elle est le pays ayant la plus grande étendue de forêt¹⁰. Les deux sous-continentes sont suivis de l'Afrique (17%), de l'Amérique du Nord et centrale (17%), de l'Asie (15%), de l'Océanie (5%) et des Caraïbes (0,2%) (figure 2).

¹⁰ Suivie du Brésil, du Canada, des Etats Unis d'Amérique et de la Chine

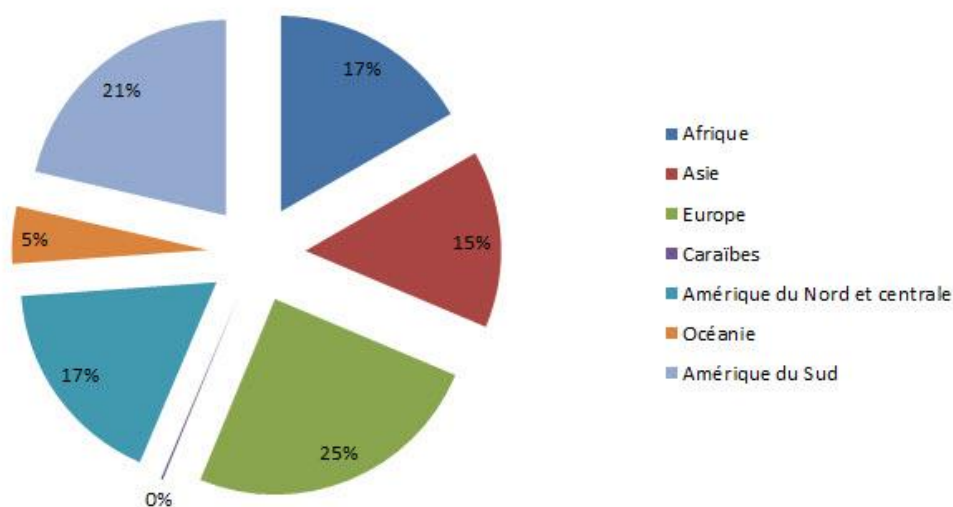


Figure 2 : Part du couvert forestier par zone sur le total mondial en 2010 (%) – Source (FAO, 2010)

L'estimation des surfaces boisées tient compte de deux processus bien distincts, à savoir la déforestation et la reforestation. Bien que la déforestation se poursuive à un rythme alarmant à l'échelle de nombreux pays – quelques 13 millions d'hectares par an dans les années 2000 –, son rythme diminue progressivement à l'échelle globale. Dans les années 1990 ce résultat atteignait les 16 millions d'hectares. On remarque que les pertes se concentrent essentiellement dans les pays de l'hémisphère sud (figure 3) tels que l'Australie, l'Indonésie, le Brésil et les pays d'Afrique équatoriale.

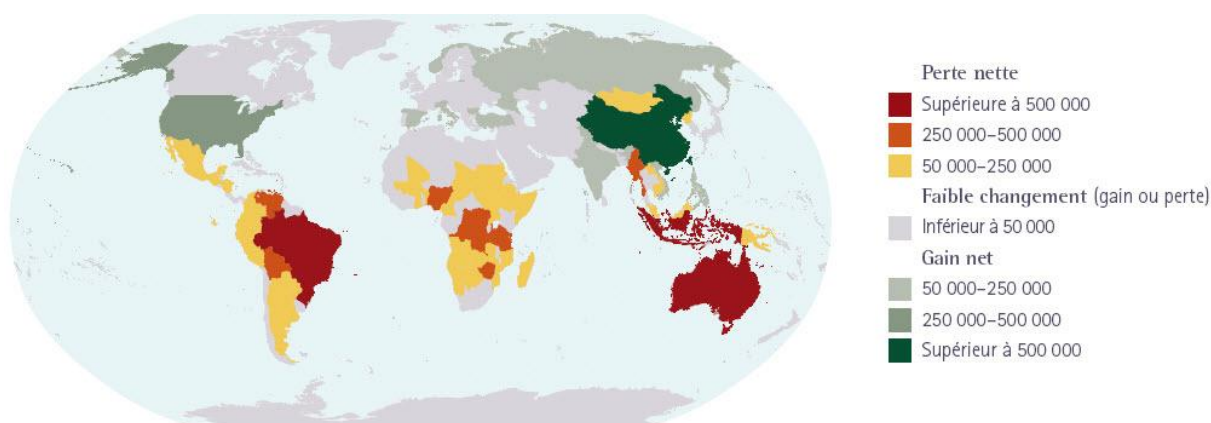


Figure 3 : Changement net de superficie forestière par pays, 2005-2010 (ha/an) – Source (FAO, 2010)

Malgré un couvert forestier conséquent et regroupant 21% des forêts à l'échelle planétaire, l'Amérique du Sud a subi la perte nette de forêts la plus importante entre 2000 et 2005 (tableau 1) – environ 4,3 millions d'hectares par an – suivie de l'Afrique avec 4,0 millions d'hectares par an (FAO, 2005). Cette tendance se poursuit en 2010 selon le rapport de la FAO (tableau). Si les forêts primaires sont fortement dégradées, on remarque que la part des forêts plantées connaît une nouvelle impulsion en 2010 après avoir enregistré une légère diminution (moins 0,16 points de pourcentage) entre 1990 et 2005.

| | Forêts primaires (%) | | | | Forêts plantées (%) | | | |
|-------------------------------------|----------------------|--------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--------|
| | 1990 | 2000 | 2005 | 2010 | 1990 | 2000 | 2005 | 2010 |
| Afrique | 4.00 | 3.43 | 3.27 | 3.13 | 6.76 | 6.00 | 5.78 | 5.81 |
| Asie | 4.48 | 8.16 | 8.08 | 8.11 | 41.37 | 43.27 | 45.14 | 46.51 |
| Europe | 18.28 | 19.00 | 19.02 | 19.35 | 33.95 | 30.43 | 28.19 | 26.26 |
| Caraïbes | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.23 | 0.18 | 0.18 | 0.21 |
| Amérique du Nord et centrale | 20.70 | 19.98 | 20.34 | 20.65 | 11.48 | 13.88 | 14.55 | 14.44 |
| Océanie | 2.48 | 2.28 | 2.76 | 2.62 | 1.48 | 1.55 | 1.58 | 1.55 |
| Amérique du Sud | 50.04 | 47.14 | 46.51 | 46.12 | 4.74 | 4.69 | 4.58 | 5.24 |
| Monde | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

Tableau 1 : Etendue des forêts primaires et plantées sur le total mondial entre 1990 et 2010 (%)
- Source (FAO, 2010)

1.1.2.2. Les facteurs de changements

Les causes pouvant expliquer ce processus ont été largement étudiées par la communauté scientifique internationale se focalisant essentiellement sur les zones tropicales (pour un inventaire complet de ces recherches depuis les années 1980, voir Geist et Lambin, 2001, p.1). Pendant de nombreuses années beaucoup d'importance a été accordée à la croissance démographique et à l'expansion des terres liées à l'agriculture en tant que variables explicatives. Cette dernière étant considérée comme un des principaux, sinon le facteur principal de la déforestation. « *Il a été estimé que plus de 70% de la déforestation était due à l'expansion des terres agricoles à proximité des zones boisées* » (UNEP, 2003 cité dans Damette, 2011). Ce processus a été reconnu comme étant l'un des principaux responsable de l'augmentation des GES (Ellis et Pontius, 2010)¹¹. Environ 20% des émissions de CO₂ d'origine anthropique à l'échelle planétaire proviennent de la déforestation et de la dégradation des forêts caractérisées par la combustion de biomasse forestière, la décomposition de la matière végétale restante et du carbone présent dans le sol (Van der Werf *et al.*, 2009). Geist et Lambin (2001), sans pour autant négliger ces conclusions, expliquent que la déforestation tropicale est entraînée par des variations régionales identifiables, issues de combinaisons synergétiques de cause *et/ou driver*, dans lesquelles les facteurs économiques, les institutions, les politiques nationales et des influences à distance sont importants.

Le fléchissement de la déforestation s'explique notamment par l'expansion naturelle des forêts, ainsi que le développement des politiques de reforestation. L'évaluation des ressources forestières mondiales (FAO, 2005) publiée par la FAO estime la proportion des plantations forestières – sous ensemble de forêts plantées - à 4% des ressources forestières mondiales. Dans son dernier rapport (FAO, 2010), il est question de 7% de forêts plantées soit

¹¹ Erle Ellis (Lead Author); Robert Pontius (Topic Editor) "Land-use and land-cover change". In: Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). [First published in the Encyclopedia of Earth April 18, 2010; Last revised Date May 11, 2011; Retrieved February 20, 2012 <http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change>

264 millions d'hectares, sans précision sur la part occupée par les plantations forestières. Il apparaît simplement que les trois quarts des forêts plantées consistent en espèces indigènes (4,95%) et un quart en espèces introduites (1,65%).

Les plantations forestières de production, destinées principalement à la production de bois et de fibres, contribuent pour 78% de la superficie en 2005. La superficie des plantations forestières s'est accrue d'environ 14 millions d'hectares entre 2000 et 2005, soit 2,8 millions d'hectares par an dont 87% sont des plantations forestières de production (FAO, 2005). Cette proportion va croître rapidement pour atteindre près de la moitié de la production industrielle mondiale de bois d'ici à 2040. C'est dans l'hémisphère sud que vont se localiser la plupart des plantations à croissance rapide, notamment dans les pays où le climat est favorable et les investissements bienvenus, et où beaucoup de terres sont disponibles (OIT, 2001).

L'argument de la fixation du dioxyde de carbone (CO₂) par les plantations industrielles appuie sans contexte les politiques d'incitation au boisement. La question du changement climatique liée aux activités humaines et plus particulièrement aux émissions de CO₂ a fait l'objet de nombreux débats au sein de la communauté internationale, notamment lors du Protocole de Kyoto le 11 décembre 1997 au Japon¹². Le Protocole de Kyoto est un accord international lié à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. La caractéristique majeure de ce protocole est qu'il fixe des objectifs contraignants pour 37 pays industrialisés et de la communauté européenne en termes de réduction des GES. Il offre aux pays un moyen supplémentaire d'atteindre leurs objectifs par le biais de trois mécanismes de marché : (i) emission trading (droits d'émissions), (ii) Clean Development Mechanism¹³ (mécanisme de développement propre) et (iii) joint implementation (mise en œuvre conjointe). Dans le cadre des droits d'émissions, ces contraintes ont été traduites en tant qu'objectifs de réductions des émissions, exprimés en niveaux d'émissions autorisées (ou « quantités assignées »), eux-mêmes divisés en « unités de quantités attribuées » (AAUs) (UNFCCC, 2011¹⁴). Les pays ont la possibilité de vendre leurs unités à d'autres pays. Le carbone devient ainsi une simple marchandise qui s'échange sur le « *marché du carbone* ».

Les pays signataires ont d'autres possibilités qui s'offrent à eux en transférant leurs « unités de quantités attribuées » en « unité d'élimination » (RMU). Le RMU est particulièrement intéressant dans notre cas, car il se base sur l'utilisation des terres, les changements d'occupations des sols et la foresterie (LULUCF) tel que le reboisement.

Le LULUCF repose sur le constat que « *le taux d'accumulation de CO₂ peut être réduit en prenant avantage du fait que le carbone peut s'accumuler dans la végétation et les sols des*

¹² Le Protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 Février 2005.

http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

¹³ Le CDM permet à un pays qui s'est engagé à réduire ou à limiter ses émissions au titre du Protocole de Kyoto à mettre en œuvre un projet de réduction des émissions dans les pays en développement. Le Trupan Biomass Power Plant in Chile est un exemple de CDM proposé par la multinationale du secteur forestier chilien Celulosa Arauco y Constitución S.A. Le projet est consultable à cette adresse :

http://cdm.unfccc.int/filestorage/6/V/K/6VKB0DJ63ISX7C0HKLOG33PIYHGVP5.1/PDD_Trupan_v03_2006-01-05.pdf?t=UzB8bWJsaTNhfDB9JGNubGs-sSIczgddsrpv

¹⁴ http://unfccc.int/kyoto_protocol/mechanisms/emissions_trading/items/2731.php

écosystèmes terrestres. Tout processus, activité ou mécanisme qui élimine un gaz à effet de serre de l'atmosphère est désigné comme un « puit » » (UNFCCC, 2011). D'après FAO 2010, les forêts du monde renferment 289 gigatonnes (Gt) de carbone dans leur seule biomasse (FAO, 2010).

1.1.3. L'état des forêts à l'échelle de la sous-région sud-américaine

Comme nous l'avons constaté, la superficie forestière en Amérique du Sud n'a fait que diminuer entre 1990 à 2005. La totalité des pays ont connu une perte nette de forêt, à l'exception du Chili et de l'Uruguay qui ont tiré profit de leur programme de boisement industriel. A l'échelle internationale, le Chili fait partie des six premiers pays à avoir connu un gain net annuel de superficie forestière le plus élevé entre 2000 et 2005, avec une évolution positive de 57 000 hectares par an (FAO, 2005).

| Pays | Accroissement annuel (1 000 ha/an) |
|------------|------------------------------------|
| Chine | 4 058 |
| Espagne | 296 |
| Vietnam | 241 |
| Etats-Unis | 159 |
| Italie | 106 |
| Chili | 57 |

Tableau 2 : Accroissement annuel de la superficie forestière en milliers d'hectares

1.2. Caractérisation des forêts natives et apparition progressive des plantations industrielles exotiques

1.2.1. La forêt tempérée humide (caractéristiques, enjeux)

1.2.1.1. Caractéristiques de la selve valdivienne

« The forests of Valdivia represent a unique assemblage of ancient species, both floral and faunal, which today persist as relicts of Gondwanaland » (Smith, 2001)

Couvrant depuis près de 3000 ans la région sud de l'Amérique du Sud, les forêts tempérées pluvieuses présentent des caractéristiques uniques au monde (Donoso, 1998). Elles sont les deuxièmes plus grandes forêts dans le monde, après les forêts tempérées pluvieuses du Pacifique, situées en Amérique du Nord. Selon le Cadastre et Evaluation des Ressources Végétales Natives du Chili publié en 1999, leur superficie était de 13,4 millions d'hectares (tableau 3), soit 85% de la superficie totale des forêts à l'échelle nationale. Les plantations représentant 14% et les forêts mixtes 1%.

| Type et structure de forêt | Superficie (ha) | % |
|----------------------------|-----------------|-------|
| Forêt adulte | 5 977 839 | 44,5 |
| Forêt secondaire | 3 585 746 | 26,7 |
| Forêt secondaire adulte | 861 925 | 6,4 |
| Forêt basse | 3 005 092 | 22,4 |
| TOTAL | 13 430 603 | 100,0 |

Tableau 3 : Superficie nationale de forêt native en 1999, par type et structure de forêt (CONAF-CONAMA-BIRF, mars 1999)

Le *Nothofagus* (faux hêtre ou hêtre austral) est le genre dominant, couvrant une superficie supérieure à 8,6 M d'hectares (75,4%). Il regroupe des arbres caducs qui totalisent 5,9 M d'hectares (55,2%) (tableau 4) et sempervirents tels que le Coigüe de Chiloé (*Nothofagus nitida*) et le Coigüe de Magallanes. Le Coigüe de Chiloé représentant à lui seul 2,7 M d'ha.

Parmi les types forestiers sempervirents on retrouve un des arbres emblématiques des forêts humides d'Amérique du Sud : l'alerce (*Fitzroya cupressoides*). Cet arbre se distribue entre les 39°50' et 43°30'S (Donoso, 1993 in Neira et Lara, 2000). Il peut atteindre les 50 mètres de hauteur et une durée de vie de plus de 3000 ans (WWF, 2005), voire même 3 500 - 4 000 ans dans la Cordillère de la Côte valdivienne sur le «*Sendero Alerce Milenario*¹⁵» (Pérez Muñoz, 2005). La croissance de l'alerce est généralement lente et variable selon les sites. Antonio Lara (1998) explique que sa croissance moyenne oscille entre 0,6 et 1,6 mm par an et qu'il faut en moyenne «*mil año para que el árbol alcance un diámetro de 60 cm, lo cual se reduce a 730 años en la Cordillera de la Costa y 375 años en la Depresión Intermedia*». Son bois est de couleur rouge et présente une qualité exceptionnelle, notamment pour son imputrescibilité.

| Type forestier | Nom scientifique | Superficie (ha) | % |
|-------------------------|---|-----------------|-------|
| Alerce | <i>Fitzroya cupressoides</i> | 263 192 | 2,0 |
| Ciprés de las Guaitecas | <i>Pilgerodendron uviferum</i> | 70 326 | 7,2 |
| Araucaria | <i>Araucaria araucana</i> | 261 073 | 1,9 |
| Ciprés de la Cordillera | <i>Austrocedrus chilensis</i> | 44 996 | 0,3 |
| Lenga | <i>Nothofagus pumilio</i> | 3 391 552 | 25,3 |
| Coihue de Magallanes | <i>Nothofagus betuloides</i> | 1 793 097 | 13,4 |
| Roble – Hualo | <i>Nothofagus glauca</i> | 188 323 | 1,4 |
| Roble – Rauli – Coihue | <i>Nothofagus antartica</i> <i>Nothofagus alpina</i> <i>Nothofagus dombeyi</i> | 1 460 531 | 10,9 |
| Coihue – Rauli – Tepa | <i>Nothofagus dombeyi</i> <i>Nothofagus alpina</i> <i>Laureliopsis philipiana</i> | 563 519 | 4,2 |
| Esclerofilo | | 345 089 | 2,6 |
| Siempreverde | | 4 148 905 | 30,9 |
| TOTAL | | 13 430 603 | 100,0 |

Tableau 4 : Superficie nationale de forêt native par type forestier (ha) (CONAF-CONAMA-BIRF, mars 1999)

¹⁵ Sentier de l'Alerce Millénaire

1.2.1.2. L'Ecorégion valdivienne

Le world wildlife Fund (WWF) définit une Ecorégion comme un grand secteur de terre ou d'eau qui contient un assemblage géographiquement distinct de communautés naturelles qui (i) partagent une grande majorité de leurs espèces et de leurs dynamiques écologiques, (ii) partagent des conditions environnementales semblables, et (iii) qui interagissent écologiquement de façon à assurer leur persistance sur le long terme¹⁶.

Le Global 200 du WWF est une première tentative qui vise à identifier un ensemble d'Ecorégions dont la conservation permettrait de sauver une large diversité des écosystèmes terrestres. Ces écorégions se réfèrent à celles ayant un niveau exceptionnel de biodiversité, c'est-à-dire une haute richesse d'espèce ou endémisme, ou celles ayant des phénomènes écologiques ou évolutifs inhabituels.

L'Ecorégion des Forêts Tempérées Humides Valdivienne (figure 4) fait partie des 238 Ecorégions identifiées par le WWF au niveau mondial. Elle s'étend le long d'une étroite bande Nord-Sud (Chilienne et Argentine) partant du 35°S (7^{ème} Région du Maule) au 48°S (11^{ème} Région d'Aysen) et couvre environ 270 000 km².

L'extension latitudinale du Chili s'accompagne naturellement, grâce aux variations climatiques, topographiques et hydrographiques, d'une grande diversité faunistique et floristique, avec à certains endroits un fort taux d'endémisme (90% au niveau des espèces et 34% au niveau du genre pour les espèces ligneuses) (Smith, 2001). D'après Pablo Camus (2003, p.44) la forêt tempérée abrite 38 espèces de mammifères, 60 d'oiseaux, 14 de reptiles, 30 d'amphibiens. Vis-à-vis de la flore, on compte près de 443 espèces de plantes vasculaires qui incluent 44 espèces d'arbres, 81 d'arbustes et 22 de lianes. Enfin, elle possède entre 300 et 400 espèces d'insectes, plus de 80 espèces de lichens et 70 de mousses. De fait cette écorégion connaît une des plus fortes priorités de conservation et de restauration dans le monde et fait partie des 25 hotspots pour la conservation de la biodiversité (figure 6) (Myers, 2000 ; Smith, 2001 ; Echeverria *et al.*, 2006 ; Nahuelhual, 2007).

On note une dizaine de zones prioritaires (figure 5) sur la frange ouest de l'écorégion (Cordillère de la Côte). Ces zones sont répertoriées selon leur degré de priorité (niveau 1 - le plus élevé, niveau 2 - très élevé, niveau 3 - élevé et niveau 4 - important). Les secteurs de Nahuelbuta – Caramavida (A14 – Parc National Nahuelbuta dans les 8^{ème} Région du Bío-Bío et la 9^{ème} Région de la Araucanía) et de la Cordillera Pelada – Los Espejos – Sarao au niveau de la ville d'Osorno (B4) sont de priorité maximale.

¹⁶ <http://www.worldwildlife.org/science/ecoregions/item1847.html>

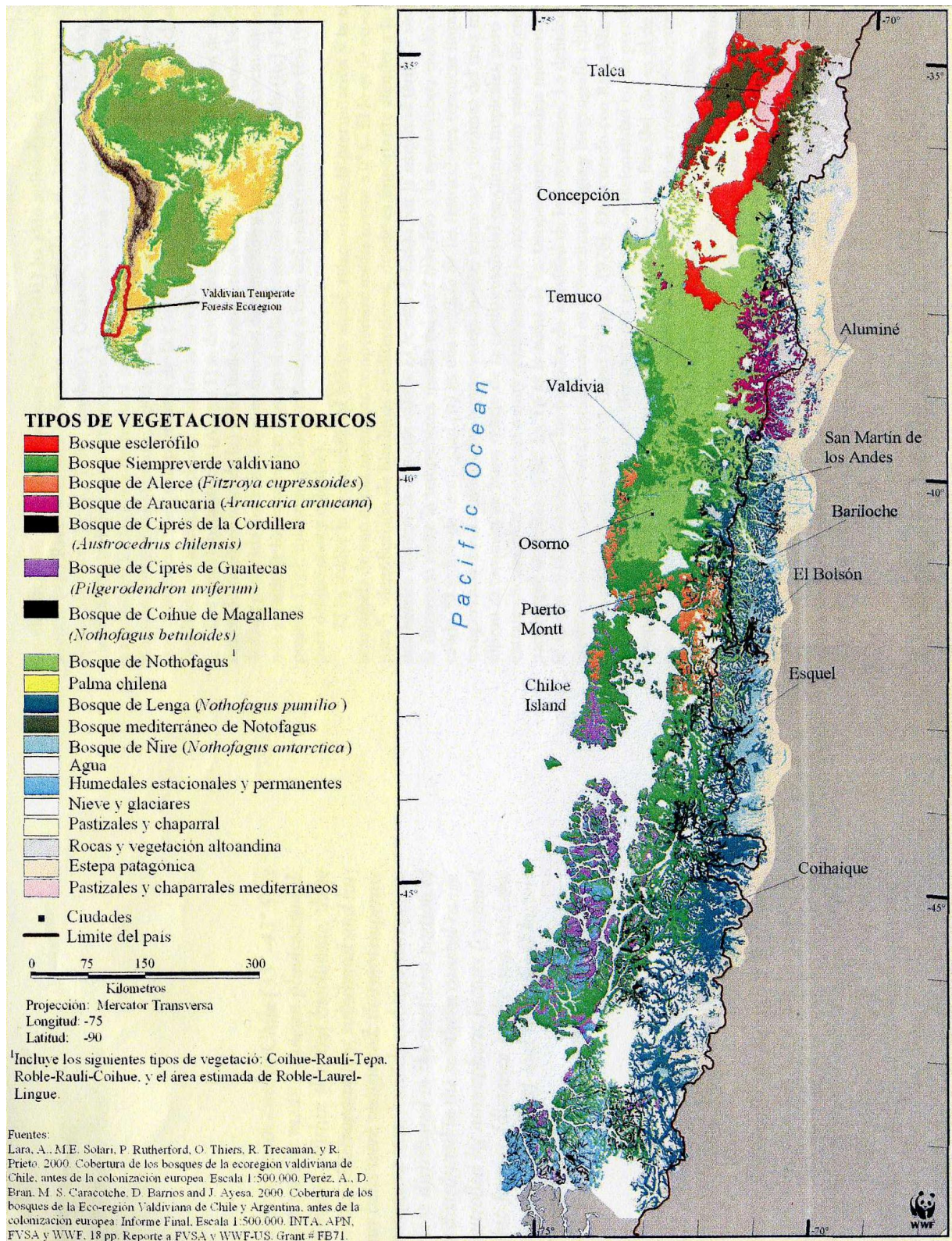


Figure 4 : Ecorégion Valdivienne – Type de végétation historique. Source : WWF, 2001



Figure 5 : Ecorégion Valdívienne – Sites prioritaires. Source : WWF, 2001

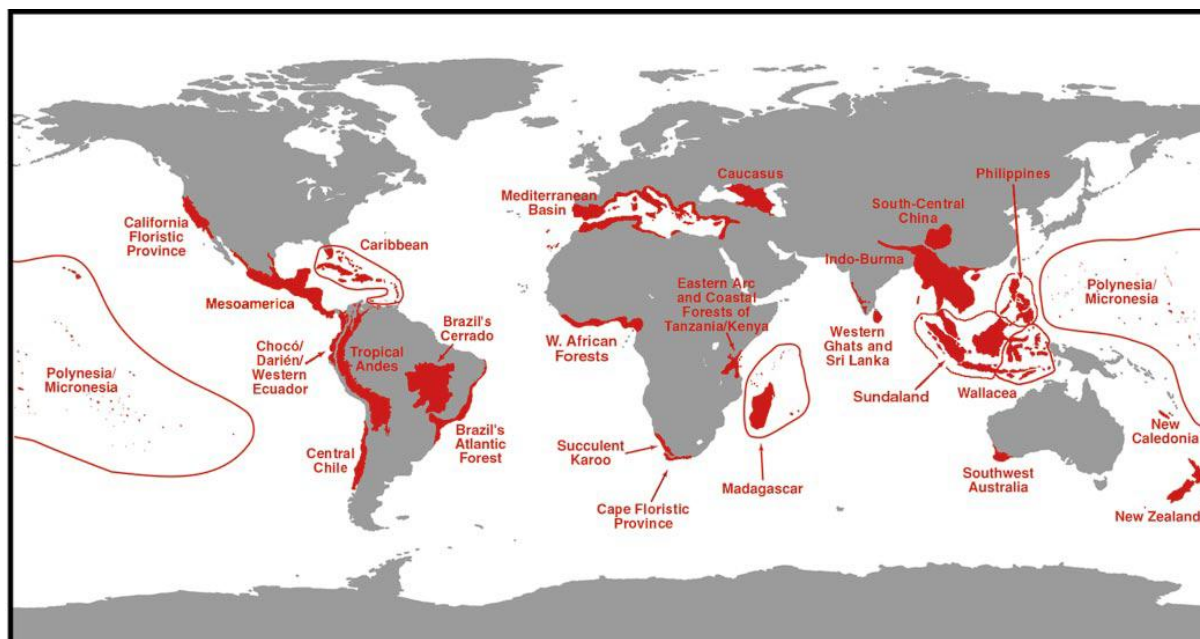


Figure 6 : 25 hotspots de biodiversité – (Myers, 2000)

1.2.1.3. Usages de la ressource forestière native

Sur les 13,4 millions d'hectares de forêts natives environ 77,6%¹⁷ (forêts adultes, forêts secondaires et forêts secondaires adultes) ont un potentiel pour la gestion sylvicole à des fins de production. Les forêts courtes et touffues (*achaparrado*) ne peuvent y répondre dans la mesure où il s'agit de forêts basses, n'excédant pas les 8 mètres, situées à la limite altitudinale de la végétation arborée (Cruz et Schmidt, 2007). Le bois obtenu de la récolte se classant selon son usage final, Guillermo Guerra (2007) répertorie trois catégories d'usage: bois de construction, bois de chauffage et bois pour l'industrie.

Au 19^{ème} siècle deux espèces furent notamment exploitées pour la qualité de leur bois : l'alerce et le cyprès des Guaitecas¹⁸ (*Pilgerodendron uviferum* (lat.) – Cupressacées (fam.)). L'alerce, aujourd'hui espèce protégée et classée comme monument national en 1976 par le Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado¹⁹ (SNASPE), constituait une ressource abondante et fut l'espèce la plus commercialisée. Son bois fut utilisé pour la confection de planches, de poutres et représenta une source de revenu pour les communautés indigènes Mapuches telles que les communautés huilliches isolées dans les secteurs côtiers de la province d'Osorno (10^{ème} Région de los Lagos) (Smith Ramirez, 1996 in Smith Ramirez, 2005).

Il fut principalement utilisé en tant que bois de service notamment pour les constructions civiles et navales, et servit à la construction de traverses de chemins de fer. A titre d'exemple, durant la seconde moitié du 19^{ème} siècle, l'objectif de l'Etat chilien fut de

¹⁷ Auxquels ils font soustraire les forêts interdites de coupes, les zones incluent au Sistema Nacional de Áreas Silvestres (SNASPE), et les restrictions dues à l'altitude, la pente et la proximité aux cours d'eau (Cruz et Schmidt, 2007).

¹⁸ Guaitecas est une commune située dans la Province de Aisén (11^{ème} Région de Aisén)

¹⁹ Traduction : Système National des Aires Sylvestres Protégées

construire près de 3 300 kilomètres de voies ferrées, reliant Santiago à Puerto Montt. Environ 1 700 traverses furent nécessaires pour chaque kilomètre de voie (Otero, 2006).

Le cyprès des Guaitecas, deuxième espèce d'importance commerciale, fut destiné aux constructions civiles et navales ainsi qu'à l'exportation. Selon Luis Otero (Otero, *op. cit.*), l'exploitation irrationnelle de ces forêts ne provoqua pas seulement la destruction de la ressource forestière des îles Guaitecas, mais aussi d'importants sacrifices humains. La demande en matières premières forestières ne fut pas exclusive à l'alerce et au cyprès. Le coihue (*Nothofagus dombeyi* - Fagacées), l'araucaria (*Araucaria araucana* - Conifères), roble (*Nothofagus antarctica* - Fagacées), lingue (*Persea lingue* - Lauracées), canelo (*Drimys winteri* - Winteracées), mañíos (*Podocarpus nubigena* - Podocarpaceés) (*Podocarpus saligna* - Podocarpaceés) et (*Saxegothaea conspicua* - Podocarpaceés), rauli (*Nothofagus alpina* - Fagacées), quillay (*Quillaja saponaria* - Rosacées), palma (*Luzuriaga radicans* - Filisiacées) et espino (*Acacia caven* - Légumineuses) furent également exploités, conduisant à une déforestation progressive de la Cordillère de la Côte.

Le 20^{ème} siècle, marque la transition d'une économie forestière de service à une économie forestière industrielle tournée vers l'exportation. La ressource bois se destine au marché du bois d'œuvre (181 000 m³), de planches et placages (73 000 m³), de bois de scierie d'exportation et d'extraction de pulpes (4 800 m³), et de copeaux de bois (INFOR, 2007).

Les copeaux de bois (*astillas*) sont utilisés principalement dans la préparation de panneaux de particules et de pâte pour la fabrication de papier. En 1986, le Chili commença à exporter des copeaux de *Pinus radiata*, espèce qui remplaça le bois natif à partir de 1988 (Lanfranco *et al.*, 2002). La consommation de ce bois atteignit un maximum de 2,9 millions de m³ en 1995. Depuis 1999 les forêts natives n'alimentent plus ce marché en raison du développement soutenu des exportations de copeaux d'*Eucalyptus globulus*, arrivant ainsi à des valeurs proches de zéro ces dernières années. Le volume des exportations de copeaux de bois natifs s'effondra entre 1998 (1,23 millions de tonnes) et 2003 (en volume quasi nul), alors que celui de l'*Eucalyptus globulus* passa de 990 000 à 1,452 millions de tonnes durant la même période, dépassant la barre des 2,5 millions de tonnes en 2006 (INFOR, 2007). L'INFORME País de 2002 note que les copeaux de bois (*astillas*) d'exportation (pour la 10^{ème} Région) continuent d'être le principal produit industriel provenant des forêts natives, représentant 66,5% de la consommation industrielle de bois natif au niveau national.²⁰ Cette production est suivie par celle de planches et de plaques.

La forêt native alimente un autre type de marché, celui du bois de chauffe (*leña*) (photo 1). La consommation pour la production de bois de chauffe a toujours été supérieure à celle des copeaux. Pour l'année 2002 ce rapport était de 30 : 1 (Cruz, Schmidt, 2007). Selon l'INFOR (2007), le volume de bois de chauffe passa d'environ 4 millions de m³ en 1975 à 13,5 millions en 2006²¹. La part du volume des forêts natives dans la distribution du bois de chauffe, selon une précédente étude de l'INFOR réalisée en 1992 (*ibid*, 2007), était de 61%. En extrapolant ce pourcentage, ce volume serait de 2,4 millions de m³ en 1975 et de 8,2 millions de m³ en 2006.

²⁰ La production d'*astillas* vient de la vente de rondin (*rollizo*)

²¹ Ces données incluent les forêts natives, l'eucalyptus, le pin et les buissons.

La récolte de bois natifs en tant que matière énergétique est l'activité qui extrait la plus grande quantité de bois de la forêt native (figure 7). Cruz et Schmidt (2007) remarquent que cette situation est difficile à quantifier, du fait qu'une grande partie de cette production se réalise sous forme d'autoconsommation. En effet, cette ressource est principalement utilisée par les paysans Mapuches, de manière informelle et sans réelle pratique soutenable (Smith Ramirez, 2005). La 10^{ème} Région avec une moyenne de 4,1 millions de m³ sur une période allant de 1985 à 2001, est la première région utilisatrice de bois de chauffe. Elle est suivie de la 13^{ème} Région et la 9^{ème} Région avec respectivement 1,9 et 1 millions de m³ (INFORME País, 2002).



Photo 1 : Bois de chauffe natif (à gauche) et exotique (à droite). San Juan de la Costa – octobre 2008 ©

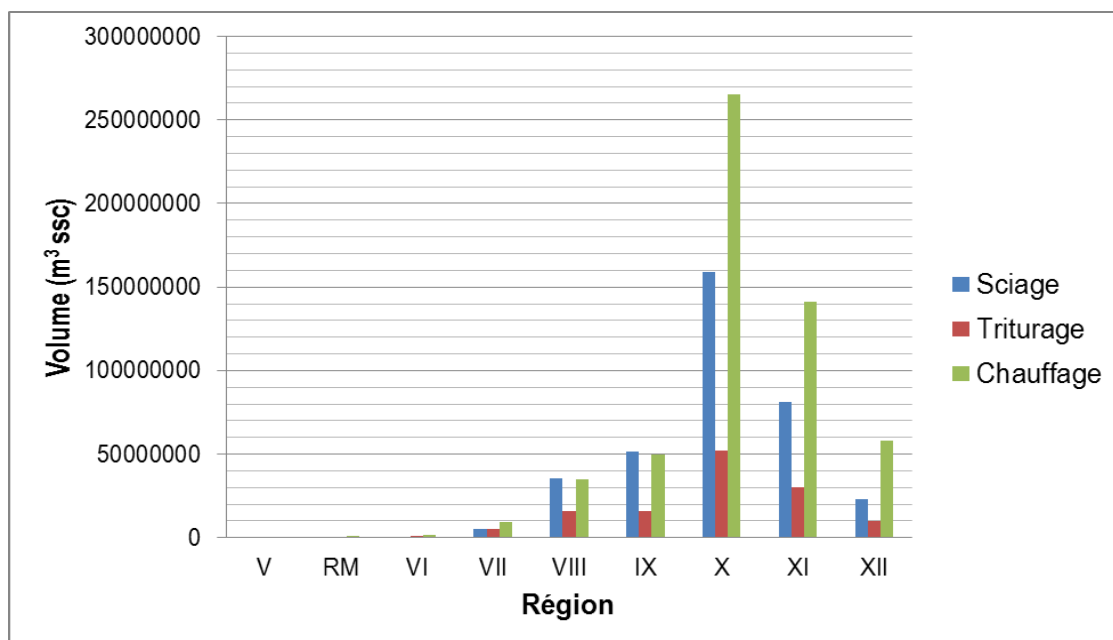


Figure 7 : Volume total (m³ ssc) de bois natif par Région.
Source : CONAF-CONAMA-BIRF, décembre 1999

1.2.1.4. Perturbations et dégradations

Les processus anthropiques et naturels, responsables de l'état actuel de la végétation native, agissent à des échelles spatio-temporelles et ont des degrés d'impacts variables. Le

déclin des forêts natives à l'échelle nationale résulte de plusieurs facteurs. D'après Emanuelli (1997, in : Wilken, 1998) la perte de 221 990 hectares de forêts natives entre 1985 et 1994 est due pour 3% à des coupes illégales, pour 16% à des incendies, pour 18% à l'habilitation, et pour 63% à la substitution. Associées à une extraction dépourvue d'intention sylvicole (*floreo*²²) (Lara, 1996 ; Saez, 2005), à la consommation de *leña* et à la forte consommation de bois natifs à des fins industrielles, ces perturbations ont eu notamment pour effet direct la fragmentation (figure 8) et la fragilisation de ces espaces (Armesto *et al.*, 2005, p.587 ; Vergara et Armesto, 2009). Cristián Echeverría (2006) insiste notamment sur les conséquences négatives engendrées par la tendance croissante à la fragmentation sur la faune et la flore peuplant les espaces boisés.



Photo 2 : Paysage fragmenté dans le centre-sud chilien. Source : Cristián Echeverría (s.d.)

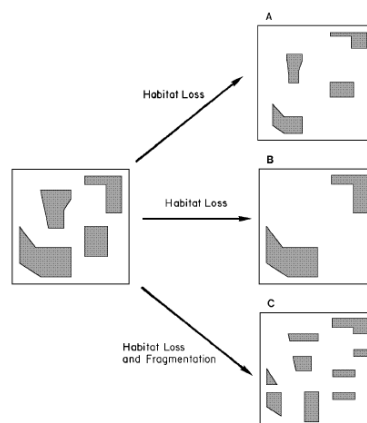


Figure 8 : Processus de fragmentation (Grez *et al.*, 1998)

a) Les incendies forestiers

Bien qu'ils ne représentaient que 16% des pertes en forêts natives entre 1985 et 1994, il a été récemment démontré, via une approche dendrochronologique, que les incendies seraient la principale perturbation dans le paysage forestier d'*Araucaria-Nothofagus*

²² Le « *floreo* » est l'exemple type d'extraction dépourvu d'intention sylvicole, ayant conduit à un stade avancé de dégradation. Cette pratique consiste à couper des arbres ayant une valeur commerciale (densité volumétrique importante), sans se soucier des arbres de faible qualité.

(Gonzalez, 2005 in Godoy et Paulino, 2009, p.33). La végétation arborée n'est pas exclusivement affectée par ces incendies. Les statistiques de la CONAF²³ révèlent que la superficie nationale des terres touchées par des incendies entre 1985 et 2011 s'élève à 316 709 ha pour la végétation arborée (30,7%), 334 439 ha pour la végétation arbustive (32,4%) et 379 530 ha pour le pacage (36,8%).

Sans exclure la part des incendies naturels (volcanisme), la très grande majorité des feux est d'origine anthropique, à hauteur de 99% (Knockaert Pasquali, 2007). L'amélioration des pâturages couplée à l'habilitation des terres pour l'agriculture et l'élevage ont fortement impacté la forêt native à partir du 16^{ème} siècle avec l'arrivée des colons espagnols dans un premier temps, puis par l'arrivée des colons allemands vers le milieu du 19^{ème} siècle (1846-1880) (Le Quesne, 2000 ; Castillo *et al.*, 2003 ; Cruz et Schmidt, 2007 ; Knockaert Pasquali, 2007). « *Los colonos alemanes quemaron extensas áreas forestadas en la zona de los lagos. Se contrató indígenas par quemar grandes áreas y los incendios de bosque afectaron cientos de miles de hectáreas, incluyendo bosques de maderas valiosas como el alerce, del cual en este periodo se quemaron 27 000 hectáreas entre Puerto Varas y Puerto Montt* » (Armesto *et al.*, 1994, p.69).

Enfin, les incendies ont permis et permettent encore aux propriétaires de nettoyer leurs parcelles de chaume suite à une récolte ou de nettoyer la végétation afin de préparer le terrain à de futures plantations forestières (Defensores del bosque chileno, 1998).

b) L'habilitation des terres pour l'agriculture et l'élevage

Les facteurs identifiés comme responsables de la déforestation à l'échelle mondiale s'observent également à l'échelle du Chili (cf.1.1.2.2.). Selon les Defensores del bosque chileno (1998) « *l'ouverture du champ* » pour l'élevage de bétail est la principale raison pour raser les forêts natives en Amérique Latine. La production de viande contribuant entre 4,6 et 7,1 milliards de tonnes de GES/an, dont la grande majorité est imputable au déboisement de terres destinées au pâturage (Fiala, 2007).

L'habilitation des terres a été une pratique très répandue au 19^{ème} siècle et à la première moitié du 20^{ème} siècle. Gustavo Cruz et Harald Schmidt (2007) expliquent que cette pratique s'est généralement réalisée sur des sols d'aptitudes forestières, et qu'en l'absence d'usage économiquement soutenable celle-ci favorisa leur dégradation et leur improductivité²⁴.

Il existe peu de résultats qui quantifient l'ampleur et les effets du déboisement à des fins agropastorales (Le Quesne, 2000). D'après le rapport émis par la Banque Centrale du Chili (2001 in Cruz et Schmidt, 2007) 5 000 hectares de forêts natives furent habilités chaque année entre 1985 et 1996, alors que Paulina Beatriz Emanuelli (1997²⁵ in Wilken, 1998) observa près de 40 509 ha à l'échelle nationale pour la période 1985-1994.

²³ <http://www.conaf.cl/proteccion/seccion-estadisticas-historicas.html>

²⁴ Le lecteur peut se référer au chapitre 5 où il trouvera une schématisation du système forestier et notamment le système de culture rotative (coupe-feu-culture).

²⁵ Emanuelli P., *Las cosas por su nombre: la realidad del bosque nativo de Chile*, Chile Forestal, 1997

c) La substitution de la forêt native

La substitution de forêts naturelles par des monocultures de pins et d'eucalyptus représente une des principales causes de destruction de la forêt à l'échelle du pays (Lara, 1996) (figure 9 et 10). L'application en 1976 du Decreto Ley 701 (1.2.2.3. b)) généra indirectement, par l'expansion de plantations industrielles, la perte de centaines de milliers d'hectares de forêts natives. Il existe de nombreuses estimations très hétérogènes, entre les différents organismes entrepreneuriaux, gouvernementaux et écologistes, dues à des divergences méthodologiques et conceptuelles (Cruz et Schmidt, 2007 ; Toro Balbotín, 2007).

En 1995, la Banque Centrale du Chili publia une étude²⁶ faisant état du remplacement des forêts natives pour la période 1985-1994 entre la 7^{ème} et la 10^{ème} région. Selon le scénario envisagé les pertes auraient atteint, pour l'ensemble des régions, 195 342 ha (scénario optimiste), 383 917 ha (scénario intermédiaire) et 585 276 ha (scénario pessimiste).

D'après la CONAF-CONAMA (1997, cité dans Cavelier et Tecklin, 2005) en 1990 81% des pertes en forêts natives dans la 8^{ème} Région et 41% dans la 10^{ème} Région correspondraient à une substitution. En 1993, Antonio Lara et Thomas T. Veblen²⁷ estimaient « *qu'entre 10% et 20% des plantations de pins ont été établies en remplacement direct de forêts natives* ». L'actualisation du Cadastre de la CONAF (CONAF/CONAMA/UACH, 2006) réalisée par le laboratoire de géomatique de l'Université Australe de Valdivia permet d'estimer la part des plantations qui se sont substituées aux forêts natives entre 1998 et 2006 dans la 14^{ème} Région de Los Ríos. On recensait 116 083,1 hectares de plantations en 1998 et 179 543 ha en 2006. Cette augmentation s'est faite au détriment de 20 121,6 ha de forêts natives et de 40 238,3 ha de prairies et buissons. Dans la 10^{ème} Région de Los Lagos, 3 638,9 ha de forêts ont été convertis.

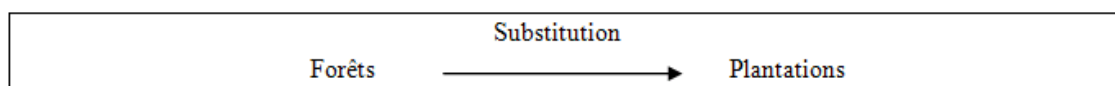


Figure 9 : Substitution directe

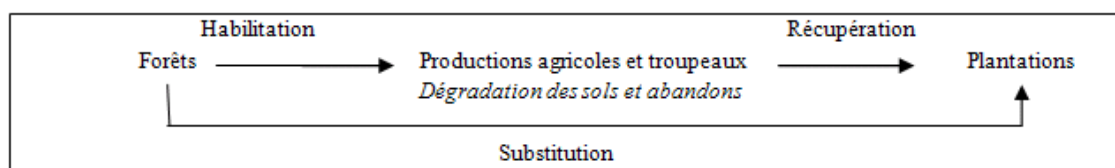


Figure 10 : Substitution indirecte

1.2.2. L'essor des plantations industrielles

« *L'emploi fructueux de cet arbre par l'industrie de la pâte et du papier au Chili, annonce dans ce domaine un développement considérable et un avenir brillant* » (Scott, 1954). L'enthousiasme porté par les professionnels du secteur forestier, à travers cette citation de C.W. Scott, est révélateur du potentiel productif des plantations exotiques au Chili. Au-

²⁶ Banco Central de Chile, Proyecto de cuentas ambientales y bosque nativo, 1995 (Wilken, 1998)

²⁷ Cités dans Estades et Escobar (2005, p.601)

delà de cette exaltation, la nécessité d'assurer cet *avenir brillant* est clairement exprimée. « *Pour que tous ceux qui s'en occupent, y compris les nombreux petits propriétaires forestiers, et qui veulent en tirer profit, il est urgent d'activer la construction de scieries, de papeteries, d'usines à pâte, de routes, de ports et de tout ce qui est nécessaire pour assurer la fabrication de produits de qualité et leur vente sur tous les marchés que l'on peut trouver et conserver en donnant satisfaction aux consommateurs* » (Scott, 1960).

Nous allons voir que la dynamique spatio-temporelle des plantations industrielles en pins et eucalyptus dans le sud chilien est liée aux politiques économiques nationales et à une conjoncture favorable pour l'économie forestière internationale. Avant de présenter plus en détail les caractéristiques de ces espèces exogènes, il convient de resituer le contexte politico-économique du Chili dans lequel sont apparues les premières plantations.²⁸

1.2.2.1. L'apparition des premières plantations industrielles

Les premières plantations en espèces exotiques apparurent en 1895. Leur développement s'accéléra au début du 20^{ème} siècle grâce à l'industrie carbonifère de Lota (Compañía Carbonífera e Industrial Lota), laquelle avait besoin de grandes quantités de bois pour les poteaux et les revêtements des tunnels dans les puits d'accès²⁹. L'épuisement des forêts natives dans la zone de Concepcion (8^{ème} Région) obligea l'entreprise à se tourner vers le pin et l'eucalyptus en 1907 (Corma, 2002, in : Otero, 2006).

La demande en bois n'est pas la seule explication à l'expansion du patrimoine forestier. Le développement remarquable du secteur céréalier (blé) lors de la période *primaria-exportadora* entre 1830 et 1930, et ses répercussions sur l'état des sols, a été l'élément déclencheur.

a) Activité agropastorale et érosion

L'exploitation intensive de blé se développa principalement dans la Cordillère de la Côte, ce qui engendra un processus progressif de dégradation du sol. Maria Mardones (2005, p.46) citant les recherches de Carmagnani (1973) explique que cette phase d'agriculture céréalière « *atteignit des niveaux exceptionnels de production et de rentabilité, particulièrement au 19^{ème} siècle, dû à la grande demande de blé depuis les marchés de Californie, d'Australie et du Norte Grande au Chili. L'éclat céréalier s'estompa à la fin du 19^{ème} siècle, mais la culture du blé laissa de vastes territoires dégradés par une sévère érosion des sols, aussi bien de type laminaire (érosion en manteau), que de type linéaire (érosion en cárcavas), qui se maintiennent de nos jours* ». Elizalde (1970) cité par Schlatter (1977) ajoute à cela une gestion irrationnelle des terres, telle que la mise en jachère sur des pentes excessives ou le surpâturage. L'ensemble de ces facteurs auraient provoqué l'érosion d'environ 19 millions d'hectares, se répercutant directement sur la capacité productive des régions concernées. D'après l'étude réalisée par l'IREN en 1979 sur une superficie de 34,5

²⁸ Cristian Henríquez Ruiz lors du X^{ème} Coloquio Internacional de Geocrítica réalisa une synthèse sur l'évolution des paradigmes économiques qui ont marqué le Chili depuis l'époque coloniale (Henríquez Ruiz, 2006).

²⁹ Ces puits d'accès sont des trous profonds pour exploiter le charbon.

millions d’hectares³⁰, 6,9% présentaient un niveau très grave d’érosion, 26,5% un niveau grave et 45,1% un niveau modéré.

C’est à partir du tremblement de terre de 1960 que l’Etat entreprit les premières évaluations de l’état des sols et de l’érosion. « *Les résultats furent alarmants* » (Otero, 2006, p.130). Afin de stopper ce processus, l’Etat chilien mit en place une stratégie de préservation des sols favorisant le développement de plantations monospécifiques de *Pinus radiata* (près de 91% des plantations établies en 1990 y étaient destinées) (Toro et Gessel, 1999).

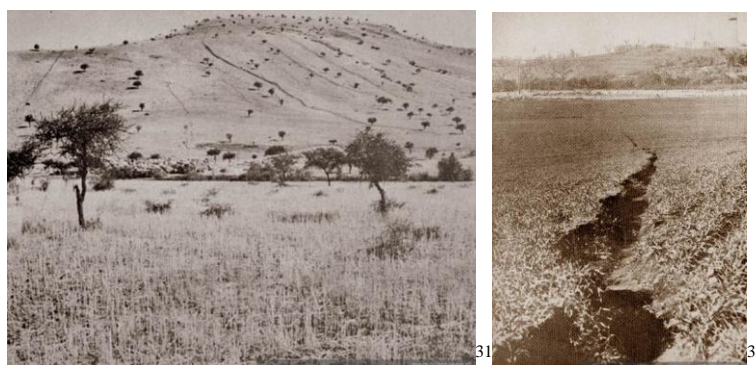


Photo 3 : Zones érodées par les activités agropastorales

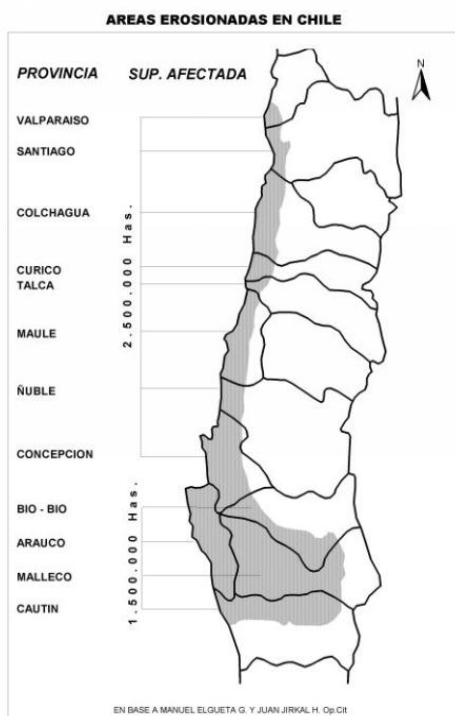


Figure 11 : Carte des zones érodées à l’échelle régionale

Source : http://www.memoriachilena.cl/temas/index.asp?id_ut=laerosiondesuelosylasupervivenciadechile

³⁰ La superficie nationale est de 75,66M d’hectares

³¹ Erosion causée par le surpâturage © - Copyright 2004© MEMORIA CHILENA ®. Todos los Derechos Reservados

³² Champ de blé avec une petite frange d’érosion, 1^{ère} moitié du 20^{ème} siècle ©

b) Le modèle industriel de substitution des exportations

Le modèle économique chilien se caractérisa pendant plus de cinquante ans (1919-1973) par une politique d'industrialisation par substitution des importations. L'objectif de cette politique consistait à recentrer la production de biens, qui autrefois étaient importés, vers une production locale, afin de redynamiser l'économie nationale. De la fin des années 1960 au coup d'Etat de 1973, le processus d'industrialisation et d'accumulation déclina malgré la tentative de relance par la consommation populaire sous l'expérience socialiste de Salvador Allende (1970-1973). Cette période fut caractérisée par la nationalisation des banques, des mines et de nombreuses autres entreprises, par l'auto-gestion des travailleurs dans certaines entreprises et par le contrôle des prix (OCDE, 2003³³). Cependant, et d'après Ominami (1986, p.120) « *le régime d'accumulation capitaliste n'a pas été à même d'assurer aucune des conditions du fameux carré magique [croissance, taux de chômage, stabilité des prix et équilibre extérieur de la balance commerciale]. Au contraire, ce sont la croissance globalement faible, l'inflation forte, le chômage relativement élevé et les tendances au déséquilibre extérieur qui finalement l'emportent* ».

Ce modèle se traduisit par l'abandon de l'expansion de la frontière agricole, mais en privilégiant la technification de l'agriculture à des fins d'autosuffisance alimentaire, et enfin par l'expansion des plantations pour l'industrie forestière (Otero, 2006, p. 135).

1.2.2.2. Caractéristiques botaniques et distribution du *Pinus radiata* et de l'*Eucalyptus globulus*a) *Pinus radiata* D.Don ou Pin de Monterrey

Cette espèce originaire des Etats-Unis d'Amérique (figure 12), plus précisément de Californie³⁴ (Scott, 1954), présente des attributs écologiques lui permettant de faire face à une gamme étendue de conditions climatiques, topographiques et édaphiques. En effet, son système racinaire lui permet d'obtenir de l'eau en profondeur et ainsi faire face à des déficits hydriques. Elle peut enfin se développer sur des sols présentant des déficiences nutritionnelles. D'après Lyn van de Hoef (2003), le *Pinus radiata* a besoin d'un minimum annuel de précipitations de 600 mm, avec un bon développement sur site présentant au moins 750 mm de précipitations annuelles. Cette espèce n'est pas adaptée pour des plantations situées à plus de 900 m d'altitude.

Elle appartient à un groupe de pins appelés sérotineux (sous-genre botanique *Diploxydon*) pour leur résistance aux conditions de sécheresse, on parle de végétaux xérophytes, ces derniers ayant une aire de distribution naturelle restreinte. Le *Pinus radiata*, au-delà de sa résistance aux conditions environnementales défavorables, a une croissance volumétrique de 30 m³/ha/an (un maximum de 50 m³/ha/an a été observé en Nouvelle-Zélande), alors que celle de la majorité des forêts natives est comprise entre 4 et 7,5 m³/ha/an. Les rotations de culture oscillent entre 25 et 35 ans (Van de Hoef, 2003).

³³ Études économiques de l'OCDE : Chili 2003, Volumes 2003-2017, 238 p.

³⁴ L'aire naturelle de *Pinus radiata*, également appelé *Pinus insignis*, est située à 160 kilomètres environ au sud de San Francisco, dans le comté de Monterey (Californie).

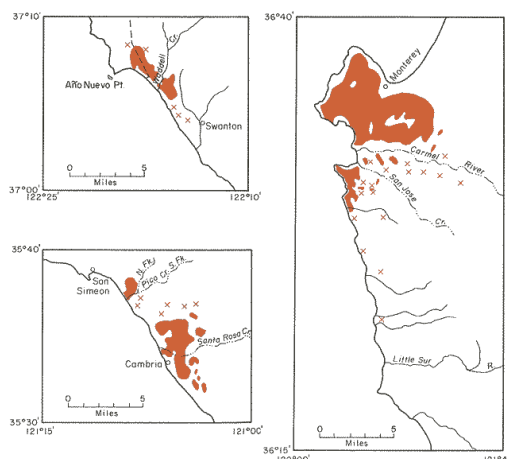


Figure 12 : Distribution naturelle du *Pinus radiata* (Griffin and Critchfield 1972)³⁵

Introduite en 1885 au Chili en tant qu'espèce ornementale, elle servit à la réalisation de la première plantation de M. Arturo Junge sur la colline Caracol de la ville de Concepción (8ème Région), ce dernier ayant rapporté des graines de Californie en 1887 (Guerra, 2007). Ces caractéristiques en ont fait la principale espèce en reforestation dans les années 1960, au service de la protection des sols dégradés mais aussi au profit de l'expansion des plantations industrielles.

b) L'*Eucalyptus globulus* Labill. ou Eucalyptus commun

Il existe plusieurs versions au sujet de l'introduction de l'eucalyptus au Chili. L'une d'entre elles raconte qu'en 1893 un voilier anglais à destination du Pérou, transportant 27 plantules de *globulus*, fit escale à Valparaiso et en laissa quelques exemplaires, desséchés par la traversée (Guerra, 2007). Le genre *Eucalyptus* correspond botaniquement à la classe des Angiospermes, sous classe des *dicotylédones* et famille des *Myrtaceae*; il existe plus de 500 espèces, principalement originaires d'Australie. Ces espèces prospèrent sous une grande diversité de conditions climatiques, du nord de l'Australie, avec des climats tropicaux et subtropicaux aux pluies estivales, jusqu'au sud et l'île de Tasmanie, aux climats tempérés et aux précipitations hivernales (figure 13). On les rencontre généralement jusqu'à 2000 m d'altitude (Prado, Antonio, 1991).

L'eucalyptus est considéré comme une couverture végétale inappréciable pour les versants des vallées hydrographiques. Ses capacités à retenir les eaux de pluie sont minimes, en effet les expériences montrent que les sols se trouvant sous des eucalyptus, reçoivent environ 82% des eaux de pluie contre 32% dans le cas des conifères (Hartwig Carte, 1991). Entre autres, elle augmente le taux de dioxyde de carbone du sol par l'action de la partie blanche de ses racines. Elle permet cependant de fournir une eau claire et pure, et de par la coagulation des particules d'argile, de maintenir les sols. Généralement, son accroissement annuel est de 45m³/ha, voire 50m³/ha pour l'*Eucalyptus nitens* (H.Deane & Maiden) Maiden. En site expérimental, l'accroissement peut atteindre les 60m³/ha/an. Les rotations de culture sont de 10-12 ans.

³⁵ http://www.conifers.org/pi/Pinus_radiata.php

Largement adopté par les grandes sociétés forestières internationales (GIT Forestry Consulting – annexe 2 - page 329), le bois d'eucalyptus est devenu l'or vert de l'industrie papetière (Martin 2002) et attire toujours plus d'investisseurs, y compris du secteur financier (Neilson 2000 *in* Martin, 2003).

Un tableau comparatif des espèces natives et exotiques selon la croissance annuelle, la durée de rotation, la fréquence des récoltes, etc. est placé en annexe 3 – page 330.

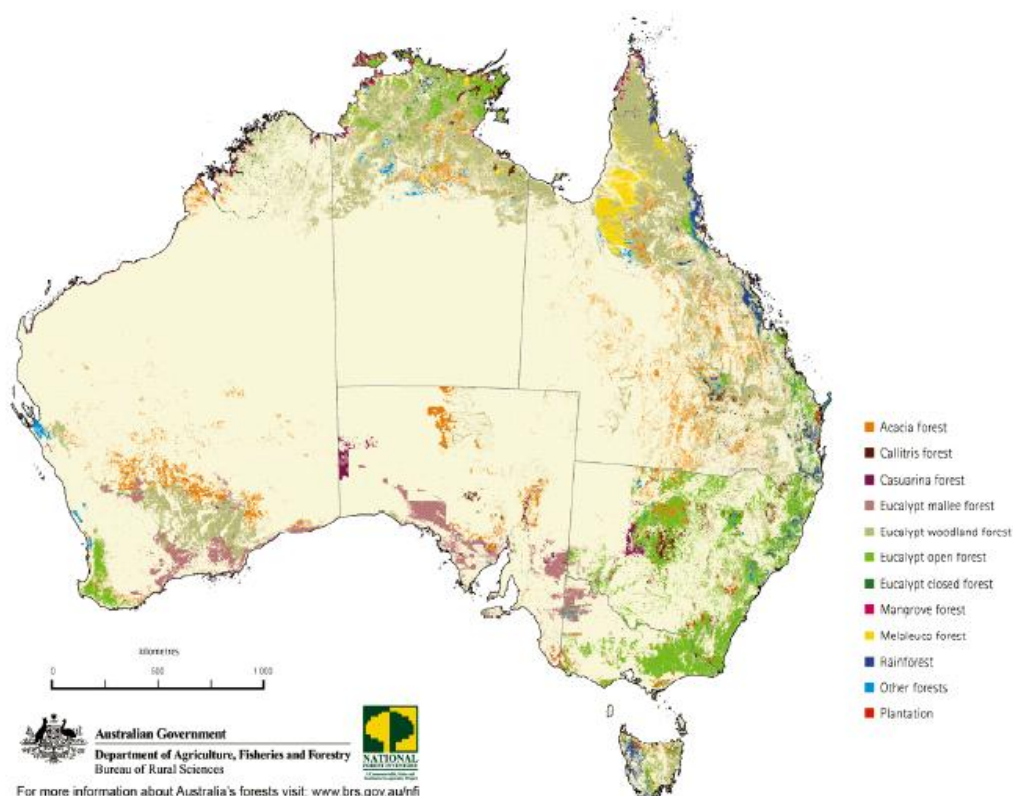


Figure 13 : Couvert forestier en Australie – Source : <http://www.daff.gov.au/forestry>

1.2.2.3. Evolution des plantations et tendance future : les effets de l'économie de marché

L'arrivée de Pinochet au pouvoir en 1973 marque le début de la phase économique néolibérale et l'explosion du secteur forestier (Clapp, 1995 ; Sarget, 1996 ; Altieri, 1999 ; Vallejos Romero, 2005 ; Silva, 2006 ; Cypher, septembre 2007). Le Chili passa en moins d'une dizaine d'années à une économie de marché ne donnant qu'un rôle secondaire à l'Etat (Constitution chilienne de 1980). Cypher (janvier 2007) analysa l'évolution de la pensée économique chilienne, de l'arrivée des premiers *Chicago Boys* au sein du gouvernement dirigé par Augusto Pinochet, à la Concertación marquée par un Néolibéralisme « démocratique » (1990-2004). L'école de Milton Friedman, soutenue par le Fond Monétaire International (FMI) et la Banque Mondiale, modifia la politique économique en proposant, dès 1975, « d'imposer un « traitement de shock » consistant en une réduction drastique de l'offre monétaire, une politique de privatisation, l'ouverture au marché international, la dérégularisation et la réduction du secteur public » (Cypher, janvier 2007, p.144).

Ces prérogatives accompagnées de clientélisme et de spéculation financière ont favorisé et maintenu la concentration d'un grand nombre d'entreprises aux mains d'une quantité restreinte de groupes financiers³⁶, renforçant également le rôle des Etats-Unis dans l'économie chilienne (entre 1974 et 1980, 80% des investissements étrangers provenaient des Etats-Unis) (Bernal-Méza, 1997). A partir de 1984, les aides financières destinées à encourager les exportations se multiplièrent permettant aux entrepreneurs de s'insérer sur le marché international. « *Las asociaciones empresariales más importantes buscaron y recibieron formas de intervención del Estado ampliamente utilizadas en la era de la ISI: esquemas de excepción tarifaria “desventajosos” (reembolso de los derechos de aduana) para facilitar la nueva orientación hacia las exportaciones basadas en producción de mercancías del nuevo y emergente sector industrial; [...] precios mínimos para los ex hacendados y medianos productores [...]»* (Cypher, 2007, p.146).

a) Le rôle de la CONAF

Le développement du secteur forestier et des plantations industrielles n'aurait pu avoir lieu sans un appui institutionnel fort. Nous nous focalisons sur la CONAF, bien que d'autres institutions aient contribué au renforcement des activités forestières telles que : (i) l'INstituto FOREstal (INFOR)³⁷ créée en 1965 qui dépend du Ministère de l'Economie et du Développement, (ii) la CORPORACIÓN de la MADERA (CORMA) créée en 1952, entité qui réunit les industries et entreprises forestières et qui joua un rôle déterminant dans l'élaboration du Decreto Ley 701 en 1974.

La CONAF est une entité de droit privé qui dépend du Ministère de l'Agriculture. Lors de sa création en 1972, son objectif était de répondre, selon Juan Sánchez Álvarez, au « *développement du système foncier appliquant la loi de 1931 et le Décret-Loi 701, à travers des intérêts de production, la reforestation et la protection des terres forestières du pays* » (2004, p.58). Son rôle est de faire appliquer le D.L. 701 notamment par la bonification des plantations réalisées par des propriétaires, et est en charge d'y apporter des modifications en tenant compte des attentes des acteurs du secteur forestier.

Les objectifs stratégiques de la *corporación*, consultables sur son site³⁸, se divisent en trois points :

- 1) Contribuer à la création et au développement soutenable de la ressource forestière, pour la production de biens et de services en mettant l'accent sur l'atténuation et/ou la compensation environnementale. Favoriser le développement économique, environnemental et social du pays, au travers de l'établissement et de la gestion de plantations, de la récupération et de la promotion des forêts natives ainsi que des arbres en zone urbaine.

³⁶ En 1974, los dos grupos más importantes fueron Cruzat-Larraín y BHC, que abarcaban 11 y 18 empresas, respectivamente. Para 1977 estos conglomerados poseían 85 y 62 empresas. Entre estos dos grupos poseían 37% de los activos de las 250 empresas más importantes en 1978, mientras que la inclusión de los dos siguientes grupos más importantes (Matte y Luksic) llevó el nivel de concentración de los cuatro grupos a 49% de los activos de las 250 principales empresas (Silva, 1997: 160).

³⁷ <http://www.infor.cl/es/quienes-somos/30-historia.html>

³⁸ <http://www.conaf.cl/conaf/seccion-seccion-mision-lineamientos.html>

- 2) Protéger les écosystèmes forestiers et son patrimoine environnemental, des agents biotiques et abiotiques, et des processus nuisibles tels que les ravageurs, les pratiques illégales de gestion forestière, les incendies et la désertification.
- 3) Gérer efficacement le Système National des Aires Sylvestres Protégées de l'Etat, afin de maximiser leurs potentiels environnementaux, sociaux et économiques.

b) La réforme du secteur forestier : le Decreto Ley 701

La communauté scientifique s'accorde sur le rôle déterminant joué par la promulgation du Decreto Ley n°701 de 1974 sur l'évolution des plantations exotiques industrielles dans le centre sud chilien (Wilken, 1998 ; Toro, 1999 ; Barrué-Pastor, 2004 ; Modrego *et al.*, 2004 ; Sánchez, 2004 ; Consultorías Profesionales Agraria, 2005 ; Donoso et Otero, 2005 ; Saez Villalobos, 2005 ; Valdebenito, 2005 ; Astorga, 2006 ; Bull *et al.*, 2006 ; Otero, 2006 ; Toro Balbontin, 2007 ; González, 2008 ; Ruiz, 2008 ; Galdames, 2009 ; Armesto, 2010 ; FAO, 2010 ; Schulz, 2010 ; Valdebenito, 2010). Ce décret incite au boisement sur des terrains d'aptitudes préférablement forestières, dépourvus de couverture arborée et dans la plupart des cas fortement érodés. Il permet de subventionner entre 75 et 90% des coûts de plantation et d'exempter d'impôts les plantations effectuées sur des terrains classés d'aptitude forestière³⁹ (Barrué Pastor, 2004).

Titulo preliminar - Article 1° - Esta ley tiene por objeto regular la actividad forestal en suelos de aptitud preferentemente forestal y en suelos degradados e incentivar la forestación, en especial, por parte de los pequeños propietarios forestales y aquella necesaria para la prevención de la degradación, protección y recuperación de los suelos del territorio nacional.

Pour des raisons sociales, économiques et technologiques l'incitation a été accaparée par les moyennes et grandes entreprises, et laissa en marge de ces bénéfices les petits propriétaires ruraux, qui n'ont pu planter entre 1974 et 1995 que 3% du total planté, équivalent à 55 991 hectares. [...] Dans ce contexte surgit un large accord sectoriel afin de promouvoir la génération d'un nouveau corps légal qui permettra la promotion des plantations forestières, cette fois avec une forte orientation vers les petits propriétaires ruraux (Valdebenito, 2005, p. 3-4). Ainsi l'actualisation du DL 701 en 1998 voit une nouvelle logique dans la dynamique des plantations. Citant des études réalisées par l'INFOR, l'auteur remarque que les petits propriétaires représentent 300 000 familles et occupent une superficie de 8,2 M d'hectares, sur lesquels 4,7 M ont un potentiel pour le développement de l'activité forestière.

La figure 14 reflète l'effet provoqué par le D.L 701 et son actualisation sur la superficie des plantations exotiques entre 1915 et 2007. Il s'agit d'une compilation de données statistiques (INFOR, 2008) et bibliographiques (Otero, 2006, p.162; Ruiz, 2008 ; Valdebenito, 2010). L'évolution entre 1915 et 1980 est issue des travaux de Luis Otero, se référant lui-même aux données de l'INFOR, 1982 et de la CORFO, 1960. Les données de

³⁹ Ce type de subvention a été largement appliqué à travers l'Amérique Latine, l'Océanie et l'Asie. Les programmes de plantations payent plus de 75% des coûts d'établissement avec des indemnités supplémentaires pour la terre, l'entretien et divers coûts annexes (Brown, 2000 cité dans Bull *et al.*, p.14)

l'INFOR (2008) correspondent à la superficie annuelle de forêts plantées⁴⁰ par région et par an entre 1975 et 2007. Afin d'homogénéiser les données entre elles, les superficies annuelles ont été additionnées à partir de la dernière superficie connue (1980) pour aboutir à une superficie nationale.

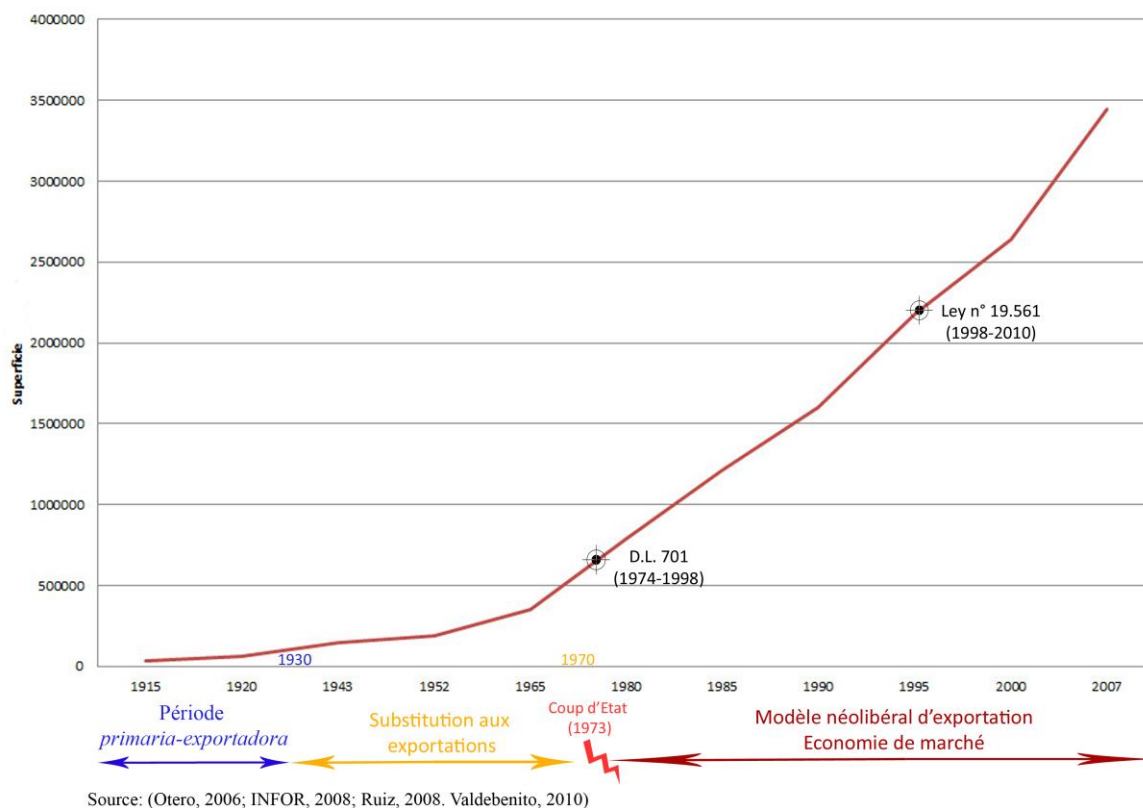


Figure 14 : Evolution des plantations exotiques (1915-2007) et du cadre politico-législatif

Selon Wisecarver (1992, in : González, 2008) la superficie des plantations était de 370 000 hectares en 1973. Si le DL 701 a favorisé l'expansion des monocultures au sein des entreprises forestières, González précise qu'il s'agit d'un élément explicatif parmi une combinaison de plusieurs variables telles que les incitations économiques⁴¹, les politiques commerciales et sectorielles, et les politiques de stabilisation (González, 2008). L'auteur note que « *les incitations économiques qui touchent la rente foncière des plantations forestières ont besoin des conditions nécessaires de sécurité des droits de propriété ainsi que des règles du jeu stable pour être efficace* » et que la décision des petits propriétaires sur l'utilisation de leurs terres « *dépend de leurs propres caractéristiques tels le niveau de revenu, l'éducation, l'adoption de technologies, de l'état de subsistance, entre autres* ». Hector Adriaola (chargé provincial de la gestion des incendies à la CONAF) insiste également sur l'influence minimale jouée par ce Décret comparativement aux considérations économiques qui impactent directement le choix des acteurs.

⁴⁰ Boisement et reboisement confondus

⁴¹ L'exonération sur les taxes foncières et d'héritages sur les terres boisées (Brown, 2000 cité dans Bull *et al.*, 2006).

1.2.3. L'industrie forestière

L'industrie forestière est basée sur la production de cinq groupes de produits : la pulpe chimique, le bois débité, les panneaux de bois, les pâtes et papiers et les copeaux de bois pour la pâte à papier. Cette section se focalise essentiellement sur la pulpe chimique et les copeaux de bois dans la mesure où ils ne concernent que les plantations exotiques.

1.2.3.1. Importance du secteur forestier dans l'économie chilienne

Le PIB forestier est en constante augmentation. En effet, entre 1996 et 2007, ce PIB passa de 2,5 milliard de dollars (\$USD)⁴² à 4,15 milliard de dollars, soit une évolution de 66,5% en 11 ans. Parallèlement, le PIB national chilien connu une augmentation d'environ 54%. Le nombre total de personnes employées dans l'industrie forestière atteignait les 134 006 personnes en 2007 (INFOR, 2008) avec « *un effet multiplicateur élevé qui permet de générer un total de 300 000 emplois* » (CORMA). Selon la Aldea Forestal⁴³ le secteur aurait permis la création d'environ 220 000 emplois directs et indirects permanents, ainsi que 200 000 emplois dans la sylviculture et l'extraction. Bien que ce secteur contribue incontestablement à la stabilité économique du Chili, il ne participe seulement qu'à 2,8% du PIB en 1996 et à 3% en 2007, comparativement aux secteurs de la construction avec (7,2% en 2007), de l'industrie minière (7,3%), et de l'industrie manufacturée (16,1%). Cependant, ces derniers ont vu leur part diminuer sur le total national, à l'exception de la construction (INFOR, 2008). La position de ce secteur à l'échelle nationale reste malgré tout très dynamique si on le compare à ses homologues internationaux. Le secteur forestier français, par exemple, avec un patrimoine forestier comptant parmi les plus importants de l'Union Européenne, « *occupe une position très marginale dans l'économie nationale : 0,8% du PIB en 2005* » (CMPFE, 2007 cité dans Montagne-Huck et Niedzwiedz, 2010, p.2). De son côté, l'industrie forestière australienne contribuait à hauteur de 1% du PIB en 2004/2005.

1.2.3.2. Les exportations

Les exportations de produits forestiers enregistrèrent un montant de 4,9 milliards de dollars en 2007, soit 7,3% des exportations chiliennes⁴⁴. Leur impressionnante évolution montre la force du secteur forestier et son potentiel économique à venir. En 1964 le montant des exportations était d'environ 27 millions (M) de dollars, de 127 M\$ en 1974, 577 M\$ en 1987, de 2,3 milliards (MM) en 2000. Elles connurent une augmentation de 27,3% pour la période 2006-2007 et de 41,7% pour la période 2005-2007 (INFOR, 2008).

On compte près d'une centaine de marchés sur les cinq continents. Les Etats-Unis sont le client principal, suivi de la Chine et du Japon (CORMA, 2010), bien qu'historiquement ce dernier soit le principal importateur de produits forestiers chiliens. Les Etats-Unis ont ainsi dépassé le Japon en 1998 (358 M\$ contre 253.3 M\$) alors que la Chine y parvint en 2004

⁴² Soit 1,7 milliard d'euros

⁴³ <http://www.laaldeaforestal.cl/#> - 2011

⁴⁴ Calculé sur la base de données de la Banco Central de Chile

(354,1 M\$ contre 298,4 M\$) (figure 15). Les exportations en direction de la Chine ont fortement augmenté entre 2006 et 2007, passant de 364 M\$ à plus de 737 M\$ (INFOR, 2008). La demande en pulpe blanchie en Chine explique ce revirement de situation. Alors que le montant ces exportations étaient de 286,4 M\$ en 2006, celui passait à 653 M\$ l'année suivante.

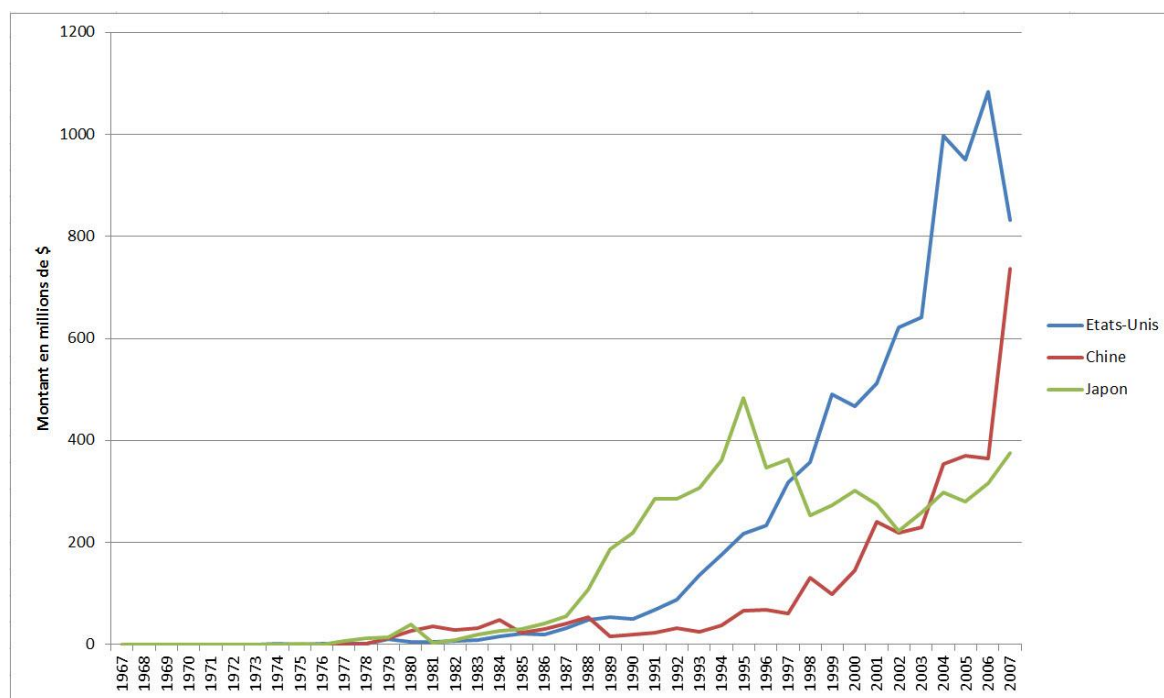


Figure 15 : Montant des exportations forestières (M\$) de en direction des Etats-Unis, de la Chine et du Japon (1967-2007)

Les données de l'INFOR ne couvrant que la période 2001-2007, il est difficile de déterminer et de quantifier la nature des produits importés entre 1967 et 2000. Cependant on constate que les Etats-Unis n'importent pas les mêmes produits que la Chine et le Japon. Alors que le marché nord-américain se tourne vers les boiseries (*molduras de madera*), les *moules* MDF (*Medium Density Fibreboard*) (*molduras mdf*), les planches de bois (*madera aserrada tablonas*), le contreplaqué (*tablero contrachapado*) et le bois raboté (*madera cepillada*), le marché chinois privilégie par ordre d'importance la pulpe blanchie, la pulpe crue, les planches de bois, le bois raboté et les planches en MDF. Enfin le Japon s'oriente vers les copeaux de bois⁴⁵, la pulpe blanchie, les planches de bois, le bois raboté et la pulpe crue.

Cette croissance des exportations chiliennes est donc principalement liée à trois sous-secteurs (figure 16⁴⁶) : (i) la cellulose, (ii) le bois de scierie et (iii) les bois de placage (Galdames, 2009, p.66). Seule l'industrie de la cellulose sera analysée, d'une part à cause de son dynamisme et, d'autre part, à cause de son lien étroit avec les plantations industrielles.

⁴⁵ Entre 1989 et 2007 le volume de copeaux de bois exporté vers le Japon passa de 1 594,5 (milliers de tonnes) à 3 546,6 (INFOR, 2008, p.102).

⁴⁶ Transformations secondaires du bois (incohérence des données INFOR, ok à partir de 2004)

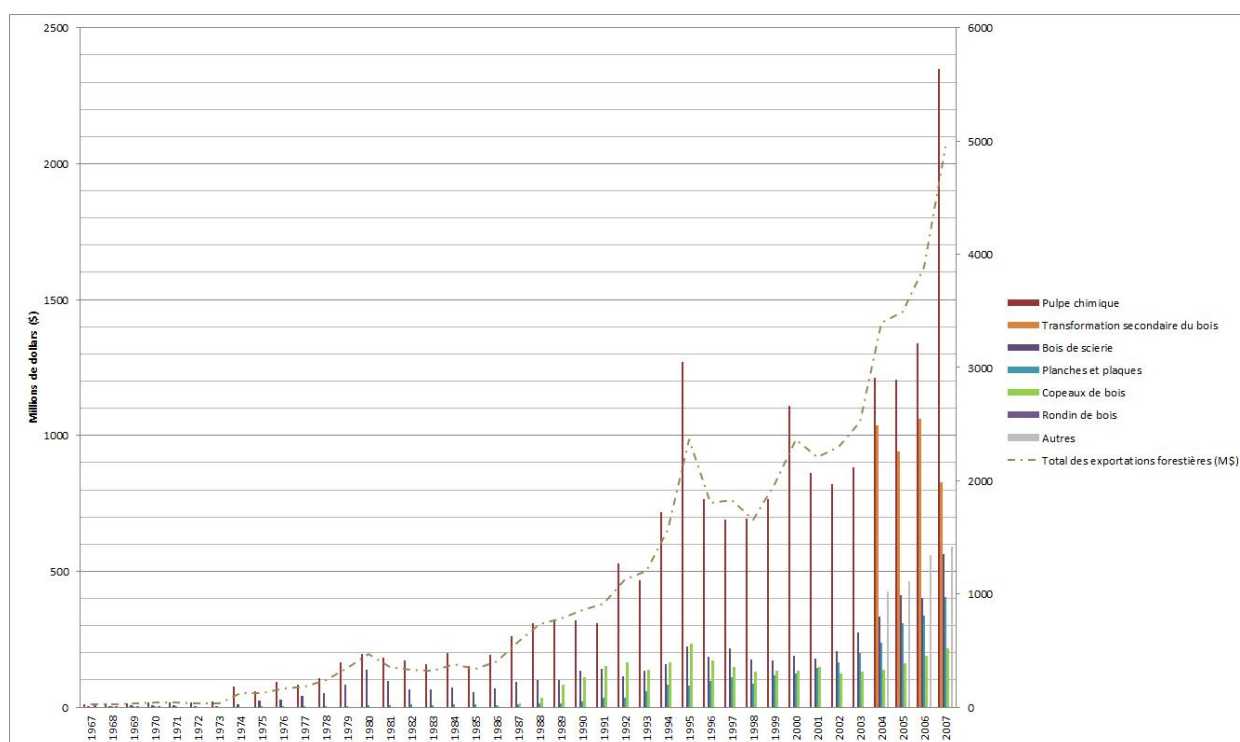


Figure 16 : Exportations forestières entre 2004 et 2007 (valeur en millions de \$) – (INFOR, 2008)

1.2.3.3. Le sous-secteur de la cellulose : le moteur de l'industrie forestière

L'industrie chilienne de la pulpe est la plus développée d'Amérique Latine derrière le Brésil. D'après un rapport technique de la CORMA du Bío-Bío (2005) le Chili était en 2005 le 5^{ème} exportateur de cellulose dans le monde derrière le Canada, les Etats-Unis le Brésil, la Suède, et le 10^{ème} producteur. En 2009, il occupait la 4^{ème} place des principaux producteurs mondiaux de cellulose BKP (*bleached kraft pulp*), avec 4,2 M de tonnes soit 8,3% de la capacité industrielle mondiale (Mullins, 2009).

Il existe actuellement douze centres de cellulose qui opèrent sur 17 lignes de production, dont 11 lignes fabriquant de la cellulose kraft⁴⁷ et 6 produisant de la pulpe mécanique⁴⁸. Ce sous-secteur, caractérisé par son ouverture sur le marché international, repose sur un environnement économique national et international stable, dépendant lui-même des niveaux de politique macroéconomique, monétaire et fiscale (Galdames, 2009).

Sa forte demande en capital génère peu d'emplois directs et requiert un degré de spécialisation élevé. Il possède cependant un remarquable effet multiplicateur d'emploi. Mullins (2009) souligne le fait que chaque emploi direct génère 2,8 emplois indirects dans le reste des industries qui soutiennent ses opérations.

Répertoriées depuis les années 1990, les statistiques chiliennes distinguent la pulpe chimique à fibre longue (*softwood*) extraite du pin de celle à fibre courte (*hardwood*)

⁴⁷ La cellulose kraft est la plus résistante et de fait le mot allemand "kraft" signifie force.

⁴⁸ <http://www.papelnet.cl/celulosa/12.html>

provenant des essences feuillues comme l'eucalyptus. Les deux fibres totalisent 88% du marché de la pulpe, avec 45% pour la fibre longue, et 43% pour la fibre courte.

Le bois est constitué de polysaccharides comme la cellulose (environ 45%) et l'hémicellulose, ainsi que la lignine (environ 25%). La fabrication de la pâte à papier consiste à extraire les fibres du bois en éliminant la lignine qui les unie. Il existe une voie mécanique (rendement de 95%), thermo-mécanique (traitement à la vapeur) et chimique (à l'aide de sulfite de sodium et de soude) (Naef, 2011)

La pulpe chimique est issue d'un « *procédé alcalin, appelé procédé au sulfate ou encore procédé kraft, qui consiste à dissoudre complètement la lignine à l'aide d'une cuisson à 170°C en présence de soude et de sulfure de sodium* » (Naef, 2011). Elle est la plus diffusée au Chili ainsi que sur le marché international de la pulpe « *market pulp* ». La cellulose kraft blanchie (photo 4) à fibre longue est utilisée comme matière première pour la fabrication de papiers et de cartons blancs pour les emballages alors que la cellulose kraft blanchie à fibre courte, grâce à ses propriétés biométriques, est parfaitement appropriée à la production de papiers-tissus de haute qualité, de papiers fins pour l'impression, l'écriture, la photocopie et le papier peint stuc.



Photo 4 : Pulpe chimique blanchie – Source : Mullins, 2009

Avec des projets de production à grande échelle, le secteur de la cellulose est la principale activité économique du secteur forestier (CORMA, 2010) comme en témoigne la constante augmentation de la production entre 1990 et 2006 pour les fibres longues (de 614,3 t. à 2018,3 t.) et les fibres courtes (de 30 t. à 952 t.). Sur les 2,530 millions de tonnes de cellulose de pin (mécanique, thermo-mécanique et chimique confondues), 73% ont été exportées en 2006 ; 78% des 952 000 t. pour l'eucalyptus (INFOR, 2007).

Cette production suit la tendance mondiale en consommation de pâte à papier. La demande mondiale de papiers et cartons pour l'impression et l'écriture a évolué entre 1970 et 2000 à un taux de croissance annuel de 4,4%, de 3% pour l'usage industriel et l'emballage et de 2% pour le journal (figure 17). Les prévisions faites à l'horizon 2015 révèlent une légère diminution de la demande internationale.

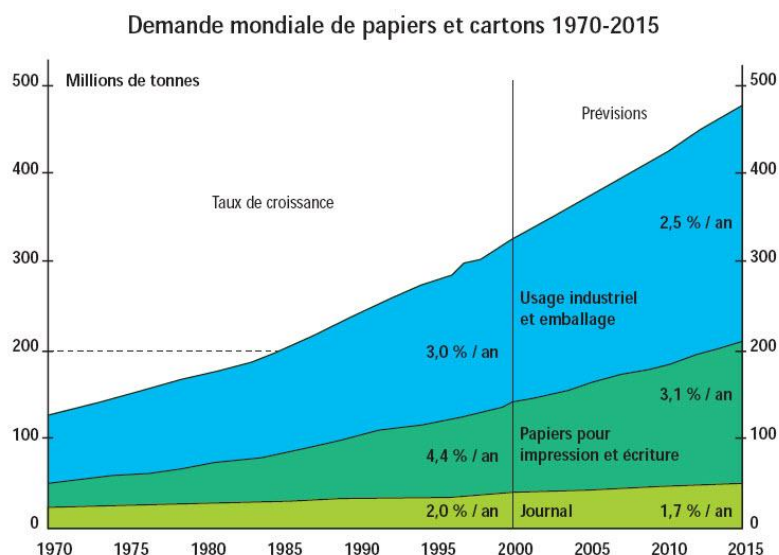


Figure 17 : Demande mondiale de papiers et cartons 1970-2015. Source : Lachenal, 2003

Le secteur forestier chilien ne se définit pas exclusivement par ses exportations. Entre 2004 et 2007 ses importations passèrent de 742M\$ à 1,1 MM\$ soit une augmentation de 50%. Le poids joué par les exportations favorise une balance commerciale forestière excédentaire avec un surplus de 3,8 MM\$ en 2007 (INFOR, 2008). Cette situation économique se traduit également sur la balance commerciale nationale. En effet, entre 2003 et 2008, le compte extérieur courant du Chili a dégagé un solde positif principalement attribuable à l'excédent de la balance commerciale. Les exportations ont été dominées par les produits primaires, qui représentaient en 2008 environ 87% des exportations totales de marchandises (OMC, 2009⁴⁹). Selon la Banco Central de Chile (BCN, 2010), la balance commerciale a atteint en au 1^{er} trimestre 2010 un excédent de 15,8 MM\$, soit 1,7 MM\$ de plus que l'année précédente (figure 18). L'augmentation a été remarquable aussi bien du côté des exportations (31,5%) que des importations (38,3%).



Figure 18 : Balance commerciale chilienne entre 2008 et 2011. Extrait de Banco Central de Chile, 2010

⁴⁹http://docsonline.wto.org/GEN_highLightParent.asp?qu=%28+%40meta%5FTitle+Chile%29+and+%28+%28+%40meta%5FSymbol+WT%FCTPR%FCS%FC%2A+%29%29&doc=D%3A%2FDDFD%2FDOCUMENTS%2FU%2FWT%2FCTPR%2FS220R1%2D00%2EDOC%2EHTM&curdoc=3&popTitle=WT%2FCTPR%2FS%2F220%2FRev%2E1

Le Chili a incontestablement surmonté les difficultés financières auxquelles il devait faire face au cours des années 1990. Jean-Paul Boudraux, par une analyse du marché du travail du secteur forestier chilien, explique qu' « *au cours des 10 dernières années, la valeur annuelle totale des exportations chiliennes a toujours été inférieure à celle des importations, créant un déficit permanent au niveau du commerce extérieur, qui, entre autres, contribue à affaiblir la valeur de la monnaie chilienne. Il arrive que pour améliorer sa position commerciale au niveau international, le Chili a intérêt non seulement à augmenter l'importance de ses exportations totales, mais aussi la productivité et l'efficacité des activités économiques d'exportations, mais aussi de diversifier ses produits d'exportation, de sorte d'être moins vulnérable aux fluctuations des prix des matières premières sur les marchés internationaux, comme cela a été le cas dans le passé* » (Boudraux, 2002, p.10).

1.3. Complexité et rôle déterminant des relations entre acteurs

1.3.1. Acteurs et propriétés foncières : entre inégalité spatiale et conflit d'usage

La possession de la terre, conjointement à l'accès aux ressources naturelles, reste un point névralgique en Amérique Latine aboutissant systématiquement à des conflits opposant les populations locales à des entreprises multinationales. « *Le régime foncier est un élément important des structures sociales, politiques et économiques. Il est multidimensionnel puisqu'il fait entrer en jeu des facteurs sociaux, techniques, économiques, institutionnels, juridiques et politiques qui sont souvent négligés mais doivent être pris en considération. Les rapports régis par le régime foncier sont parfois clairement définis, et leur respect peut être assuré par un tribunal officiel ou par des structures coutumières au sein d'une communauté. Mais il arrive aussi qu'ils soient relativement mal définis et entachés d'ambiguïtés que certains peuvent chercher à exploiter* » (FAO, 2003, p.9). Ceci est caractéristique de la situation chilienne, où l'accès à la terre crée depuis plus de deux siècles des tensions entre le peuple indigène Mapuche et les propriétaires privés.

1.3.1.1. Le peuple Mapuche

Les communautés Mapuches ou « *les gens de la terre* » (de mapu : terre et che : gens) sont au centre de cette problématique forestière, de par leur conception du territoire et des rapports culturels qu'elles entretiennent avec lui et leurs relations avec les acteurs forestiers. En effet, insister sur le rapport des Mapuches à leur territoire est fondamental puisque nombre de conflits liés au secteur forestier dans le centre-sud chilien y sont liés.

La terre est effectivement un élément central dans la Cosmvision Mapuche, car elle synthétise et constitue le socle sur lequel se projette selon Grebe, Pacheco et Segura (1972) la rencontre du bien et du mal, dans leur conception verticale du cosmos. D'un point de vue plus « déterministe » cette vision perçoit le cosmos de manière horizontale, c'est-à-dire qu'il est orienté selon les quatre points cardinaux. Le *kultrún* étant la synthèse de ces composantes cosmiques et terrestres (figure 19)⁵⁰.

⁵⁰ Nous renvoyons le lecteur sur cette étude disponible à cette adresse :

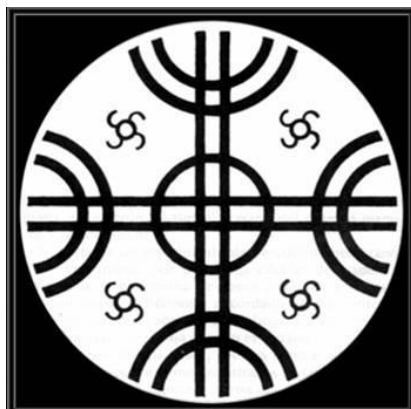


Figure 19 : Dessin du kultrún

L'ethnie Mapuche, revendiquant le statut de nation, vit en Argentine (provinces de Buenos Aires, La Pampa, Neuquén, Río Negro et Chubut) ainsi que dans le centre-sud du Chili et plus particulièrement les provinces du Bío-Bío, Arauco, Malleco, Cautín, Valdivia, Osorno, Llanquihue et Chiloé. En fonction de leur origine territoriale les Mapuches s'autodéfinissent comme: Puelche : gens de l'est; Pikunche: gens du nord; Williche: gens du sud; Pewenche: gens du pewen (*araucaria imbricata*⁵¹); Lafkenche: gens de la mer; Nagche: gens de la plaine; Wenteché: gens des vallées. (Mariqueo, Calbucura, 2002). Ce schéma se complexifie car il existe une nomenclature selon l'assise territoriale des Mapuches. Dans le cas des Williches ou Huilliches, le territoire connu génériquement comme « huilliche » correspondrait à différents groupes indigènes situés dans plusieurs secteurs : à Valdivia les huilliches, à Osorno les indigènes cuncos, et à Chiloé les poyas (Molina, Correa 1998).

La superficie ancestrale occupée par les Mapuches à l'arrivée des « espagnols » atteignait les 10 millions d'hectares, pour une population estimée à un million de personnes (Foerster, 2001). Leur territoire varia en fonction de leur résistance face aux armées de la couronne espagnole mais aussi par les nombreux épisodes juridiques post coloniaux.

1.3.1.2. La construction du régime foncier

L'histoire de cette *aliénation-récupération* de terre fut étudiée en détail par Raul Molina et Martin Correa (1998) pour la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI)⁵². Les auteurs comptent quatre grandes phases : (i) la concession des *Titulos del Comisario*, (ii) la distribution des *Titulos de Merced*, (iii) les expropriations et les l'établissement des Fonds Fiscaux et (iv) la période militaire.

<http://meli.mapuches.org/spip.php?article95>

⁵¹ Ou *Araucaria araucana*. Nom scientifique de l'arbre araucania

⁵² Corporation Nationale du Développement Indigène (<http://www.conadi.cl/>)

a) Les Títulos del Comisario

Les Titres du Commissaires énoncés par la loi du 10 juin 1823 furent octroyés aux Mapuches entre 1824 et 1832. La raison de l'attribution de ces Titres s'explique par la résistance du peuple Mapuche face aux Espagnols et au maintien des terres situées au sud. L'Etat chilien succédant à la couronne espagnole en 1820 voulut saluer cette « action » et entrepris la délimitation des terres en concertation avec les caciques (chefs indigènes), leur octroyant des documents écrits pour confirmer l'existence et la reconnaissance desdits domaines (Barrué-Pastor, 2004, p. 198). Durant cette période, de nombreux propriétaires acquièrent frauduleusement des terres en rachetant des actions et des droits aux indigènes, leur permettant de se constituer de grandes propriétés (Molina et Correa, 1998, p.37).

b) Les Títulos de Merced

La distribution de 3078 *Títulos de Merced* s'effectua entre 1884 et 1929 auprès de 77 751 indigènes (Bengoa, 1999)⁵³. Ce fut près de 475 000 hectares⁵⁴ de terres qui ont été attribués et reconnus sous forme communautaire, représentant environ 5% du territoire ancestral mapuche (Aylwin, 2000). Cette période connue sous le nom de « enracinement mapuche » est caractérisée par la volonté de l'Etat d'établir les Mapuches en petites extensions de terrain permettant ainsi de libérer les terres restantes et de procéder à leur colonisation. L'Etat assigna près de neuf millions d'hectares aux colons chiliens et étrangers, le reste passa aux mains de l'Etat constituant les premiers *latifundios* au Chili (Jeannot, 1972, in : Aravena, 2002, p.363). Andrea Aravena (2002) considère cette phase comme le début de la sédentarisation définitive des Mapuches, et « *la perte de l'élevage comme première source de son économie et sa progressive transition vers la petite agriculture paysanne d'autosubsistance* ».

c) La division des Titres

La loi 4.169 de *División* des Titres promulguées le 29 août 1927 est à l'origine de nombreux conflits dans la région, car comme son nom l'indique elle cherchait à diviser les terres indigènes. Selon Aylwin (2000) près de 60 000 ha de terres occupées par les entreprises forestières dans la province d'Arauco (8^{ème} Région) et 3 000 ha dans la zone de San Juan de la Costa (10^{ème} Région) sont réclamées par les communautés. Entre 1927 et 1972 (date de la Ley Indígena) « *se caracterizaron por un empeoramiento de la situación política, económica, social y cultural de los autóctonos. [...] A nivel de tierras, el total de comunidades divididas entre 1931 y 1971 fue de 832. Dadas las frágiles protecciones otorgadas por las distintas leyes, se calcula que alrededor de 100.000 hectáreas de las antiguas comunidades pasaron a manos de particulares no-indígenas* » (Boccaro et Boccaro, 2005).

Durant la même période fut proclamée la loi de Propriété Austale (1930). Cette loi permit aux propriétaires de faire « valider » une nouvelle fois, auprès du Fisc, les terres acquises auprès des communautés indigènes avec des Titres du Commissaire. D'après Raul

⁵³ Foerster (2001) dénombre 2 918 Titres pour une population mapuche de 82 629 personnes.

⁵⁴ En se basant sur le système de mesure de l'époque (Bengoa, 1999)

Molina et Martin Correa (1998, p.438) cette loi « *tendió a sanear títulos constituídos en base a compras de acciones y derechos de tierras indígenas reconocidas y otorgadas por el Estado, y no sobre tierras fiscales* ». Les communautés indigènes subissent ainsi deux phénomènes, la division de leur terre et l’incapacité de récupérer les terres usurpées.

d) La période militaire

La Réforme Agraire de 1967 (ley 16.640) promulguée par le gouvernement de Frei et prolongée par l’Unité Populaire (Goussault, 1972) visait à « briser le *latifundio* » par l’expropriation. Celle-ci permit entre 1970 et 1973, conjointement à la nouvelle loi indigène, de récupérer et de redistribuer près de 100 000 hectares aux communautés.

Ces avancées furent rapidement stoppées par le coup d’Etat d’Augusto Pinochet en 1973, marquant la période de « liquidation des communautés » (Boccarra et Boccarra, 2005). La Junte Militaire s’efforça, via les décrets de loi 2.568 et 2.750 de 1979, de renverser le processus d’expropriation tout en division une nouvelle fois les communautés⁵⁵. Jusqu’en 1986 « *el total de reducciones divididad entre Arauco y Osorno era de 1739, con 259.227,21 hectáreas divididas en 48.436 hijuleas [...]* » (González, 1986, cité dans Muñoz, 1999, p.16).

A l’heure actuelle les terres indigènes sont régies par la loi indigène 19.253 d’octobre 1993. Selon le Titre II relatif à la reconnaissance, protection et développement des terres indigènes, paragraphe I – Article 12, les terres indigènes sont reconnues en tant que telles si les communautés et personnes indigènes y vivent ou sont en possession de : a) Títulos de Comisario selon la loi du 10 juin 1823 ; b) Títulos de Merced conformément aux lois du 4 décembre 1866, du 4 août 1874 et du 20 janvier 1883 ; c) Transfert gratuits de domaine en vertu de la loi N°4.169, de 1927 ; loi N°4.802, de 1930 ; décret suprême N°4.111, de 1931 ; loi N° 14.511, de 1961, et loi N°17.729, de 1972, et ses modifications postérieures⁵⁶.

La dénomination de propriétés indigènes n’exclut cependant pas la génération de conflits entre lesdites communautés et des propriétaires. Les communautés Mapuches revendiquent toujours la récupération de leurs terres perdues depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle.

1.3.1.3. Etat des lieux du régime foncier

Graciela Moguillansky et Verónica Silva synthétisent le secteur forestier en distinguant deux mondes: « *el primero compuesto por los conglomerados y grandes empresas orientadas a la exportación, que han podido desarrollar una articulación en cuanto a procesos, mercados y servicios. El segundo, conformado por los medianos y pequeños empresarios ligados a actividades forestales (aserraderos, artesanos en muebles, venta de madera para construcción) que actúan en forma desarticulada, sin economías de escala y de*

⁵⁵ Le lecteur pourra prendre connaissance des objectifs de ces décrets grâce aux travaux de Mylène Valenzuela cités par Bernardo Muñoz (1999, note de bas de page, p.16) -

<http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/0/4630/LCL1257P.pdf>

⁵⁶ <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30620>

integración, con bajo nivel tecnológico, baja calidad de los productos, orientados al mercado interno » (2001, p.128). Si les auteurs résumant parfaitement l'état actuel du secteur forestier, caractérisé par un déséquilibre des forces de productions, il faut préciser que celles-ci s'accompagnent de fortes discordances spatiales, et se répartissent en trois catégories de propriétés privées (petites, moyennes et grandes) (Errázuriz, 1998 ; Leyton Vasquez, 2009). Patricio Pliscoff, David Tecklin, Aldo Farías et Jorge Saéz (2005) en dénombrent quatre en fonction de leur aire d'étude, différenciant les grandes propriétés des très grandes propriétés (*propiedad mayor*)⁵⁷.

a) Les petites propriétés

Les deux principales lois forestières en vigueur (Ley 20.283 del Bosque Nativo, 2008, art.2° - 17 ; et la Ley 19.561 - D.L. 701, 1998, 2-c)) définissent une petite propriété comme une parcelle, ou un ensemble de parcelles rustiques appartenant au même propriétaire, dont la superficie n'excède pas l'équivalent de 12 hectares d'irrigation de base, ce qui correspond à 200 ha. Selon les conditions agro-écologiques et socio-culturelles la petite propriété regroupe des petits propriétaires (propriété privée individuelle), des paysans forestiers et des communautés mapuches (propriété privée communautaire) (Movimiento unitario campesino y etnías de Chile, 1997 cité dans Valdebenito Rebolledo, 2005, p.11).

Il faut mettre en avant la difficulté à donner une délimitation surfacique univoque à chacune des catégories. Si la petite propriété est comprise entre 0 et 200 ha comme le décrit la législation forestière, certains auteurs considèrent qu'elle se situe entre 0 et 50 ha (Ortega Martínez, 2005, p.175).

b) Les propriétés de taille moyenne

La législation forestière ne donne aucune indication sur leurs superficies, de même pour les grandes et très grandes propriétés. D'après la typologie avancée par l'INE dans le VI Censo agropecuario de 1997, Patricio Pliscoff *et al.* (2005) considèrent que la superficie d'une moyenne propriété est comprise entre 200 et 2 000 ha. Le recensement agropastoral de 1997 et de 2007 n'apportent cependant aucune indication sur les catégories de propriétés, seule la taille des exploitations est présentée (inférieure à 1 ha., de 1 à 5 ha., [...] de 200 à 500 ha., de 500 à 1 000 ha., de 1 000 à 2 000 ha. et supérieur à 2 000 ha.).

c) Les grandes et très grandes propriétés

D'après les auteurs, les grandes propriétés sont celles qui possèdent une superficie comprise entre 2 000 et 10 000 ha. Les très grandes propriétés, qui peuvent regrouper divers propriétaires, communautés indigènes, particuliers et des zones de protection privées, sont supérieures à 10 000 ha.

⁵⁷ James Cavelier et David Tecklin (2005, p.637) comptent six types de propriétés dans la Cordillère de la Côte (10^{ème} Région de Los Lagos : (i) les aires protégées publiques et privées, (ii) les terres de l'Etat (non protégées), (iii) les petits et moyens propriétaires privés, (iv) les grands propriétaires privés, (v) les terres à forte influences indigènes et (vi) les terres en processus de subdivision intensive.

Il existe enfin la propriété fiscale qui appartient à l'Etat. Ce type de propriété publique est principalement représenté par le Sistema Nacional de Areas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)⁵⁸. Le SNASPE regroupe 35 *Parques Nacionales*, 49 *Reservas Nacionales*, et 16 *Monumentos Naturales*. D'après le Cadastre de la CONAF (1999), sa superficie est de 13,9M d'hectares dont 27,8% de forêt native (3,8M d'ha).

La taille des petites propriétés que nous avons déterminées à l'échelle de la commune de San Juan de la Costa ne s'accorde pas avec la nomenclature présentée ci-dessus. Bernardo Antriao (ex-président de la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI) remarque que la petite propriété indigène sur la précordillère de la côte varie entre 2 et 20 ha. Sachant que la population mapuche est majoritaire dans la commune nous avons adapté la nomenclature afin de mettre en exergue la petite propriété indigène.

Ainsi, la petite propriété est comprise entre **0 et 20 ha**, la moyenne entre **20 et 100ha**, la grande entre **100 et 2 000 ha** et la très grande propriété est **supérieure à 2 000 ha**. Cette dernière a été établie en tenant compte de la superficie de la plus petite des grandes propriétés identifiées (2734 ha) et de recensement agropastoral de l'INE (2007).

1.3.2. Les principaux acteurs du secteur forestier

Le secteur forestier est clairement soumis à un système de concurrence oligopolistique regroupant le Groupe Nueva (Forestal Tornagaleones S.A.), le Groupe Matte (Forestal Mininco) et le Groupe Angelini (Forestal Arauco).

1.3.2.1. Le Groupe Angelini

Le Groupe Angelini du nom de son fondateur Anacleto Angelini est un des groupes sinon le groupe le plus compétitif à l'échelle nationale, avec des secteurs de production performant, tels que la farine et l'huile de poisson (Pesquera Eperva S.A., Pesquera Indo S.A., Pesquera Iquique et Pesquera Chilemar S.A.), le combustible avec la Compañía de Petróleos de Chile (COPEC) ainsi que la foresterie (Forestal Arauco). Les intérêts du groupe furent portés très tôt sur l'entreprise COPEC (1985-1986) en rachetant des actions et en devenant l'actionnaire majoritaire. La COPEC, qui fut la principale holding chilienne à la fin des années 80, se focalisa dans les années 1970-1980 sur le secteur forestier. En effet, les familles Cruzat and Larraín, propriétaire de ladite entreprise rachetèrent en 1977 la Empresa Forestal Arauco Ltda. et Industrias de Celulosa Arauco S.A. pour un montant 90,63 millions de dollars à la Corporación de Fomento de la producción (CORFO). Cette privatisation fut suivie par le rachat en 1979 de la Celulosa Constitución S.A. pour constituer in fine la Celulosa Arauco y Constitución S.A.⁵⁹. Actuellement les produits forestiers représentent près de 77% des ventes de la COPEC⁶⁰, contre 21% pour la distribution de combustible.

⁵⁸ <http://www.conaf.cl/parques/index.html>

⁵⁹ <http://www.arauco.cl/default.asp?idioma=21>

⁶⁰ <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/Empresas-Copec-SA-company-History.html>

La privatisation est une politique de plus en plus en vogue parmi les gouvernements depuis le milieu des années 70. La mondialisation, l'intensification des pressions en faveur du libre-échange, les efforts accomplis pour équilibrer les finances publiques et l'idée que l'on peut améliorer la rentabilité des ressources en ouvrant la porte aux compétences de gestion et aux investissements du secteur privé, ont conduit un certain nombre de gouvernements à remettre en question les raisons de leur intervention dans les secteurs productifs de l'économie. En général, ceci les a amenés à vendre quelques industries nationalisées « non stratégiques ». Les forêts n'ont pas échappé à cette tendance, même si les ventes de forêts publiques sont restées relativement rares. (Brown, 2002, p.84)

Le patrimoine forestier de la Celulosa Arauco, qui est actuellement une des principales entreprises forestières d'Amérique Latine, est de 1,48 millions d'hectares dont 931 720 hectares à travers l'Argentine, l'Uruguay, le Brésil et le Chili qui concentre 48,77% de ce patrimoine. Son activité s'organise en quatre branches à savoir la foresterie, la cellulose, le bois d'œuvre et les panneaux, disposant d'une capacité de production de 2791 millions de t./an pour la cellulose Kraft. D'après les statistiques de l'INFOR (2008) la holding est la principale exportatrice de produits forestiers avec plus de 500 M\$ d'exportations en 2001, pour atteindre les 1,4 G\$ en 2007, soit une augmentation de 179,5% en six ans.

Enfin la compagnie dispose de cinq entreprises d'exploitation forestière à l'échelle nationale avec : (i) la Forestal Arauco S.A. avec un Pourcentage de Participation (PP) de 99,92% ; (ii) la Forestal Celco S.A. (PP: 99,92%); (iii) la Forestal Cholguán S.A. (PP: 97,43%); (iv) la Forestal Valdivia (PP: 99,93%) et (v) la Forestal Los Lagos⁶¹ rachetée à hauteur de 80% en 2005 via la Forestal Valdivia. Ces deux entreprises exercent essentiellement leurs activités d'exploitation dans la 14^{ème} Région de Los Rios et la 10^{ème} Région de Los Lagos. N'ayant pas de données fiables concernant la Forestal Valdivia, nous pouvons apporter des précisions sur la Forestal Los Lagos. Les 18 651 ha de plantations qui constituent le patrimoine forestier de l'entreprise se concentrent exclusivement dans la 10^{ème} Région de Los Lagos, dans les provinces de Llanquihue et Osorno. Il s'agit pour la grande majorité de plantations d'*Eucalyptus globulus*, avec un total de 12 385 ha soit 66,4%.

1.3.2.2. Le Groupe Matte

Le groupe Matte⁶² est un conglomérat présent dans de nombreux secteurs d'activités tels que l'industrie, l'électricité, l'infrastructure, l'immobilier, la télécommunication, la finance et la foresterie. L'origine du groupe remonte aux années 1950 lorsque Eliodore Matte Ossa intègre progressivement la propriété de la « Papelera » actuelle Empresas Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones S.A. (Empresas CMPC S.A.).

La CMPC S.A., constituée en 1920, est une holding forestière divisée en cinq filiales, la Forestal Mininco qui administre le patrimoine forestier et soutient le développement industriel de CMPC, la CMPC Cellulosa, la CMPC Papeles et la CMPC Tissue y CMPC Productos de Papel. Sa capacité de production s'élève à 2383 M de t. /an de cellulose kraft et mécanique confondues⁶³. La CMPC Cellulosa est la deuxième entreprise exportatrice de produits forestiers à l'échelle nationale avec 371,4 M\$ en 2001 et 960,4 M\$, soit une augmentation de

⁶¹ <http://www.forestalloslagos.cl/>

⁶² <http://www.cmpc.cl/>

⁶³ http://www.papelnet.cl/celulosa/plantas_celulosa_chile.htm

158,5 %. Elle reste malgré la remarquable augmentation de ces exportations, loin derrière la Celulosa Arauco. Le rapport des exportations des deux entreprises révèle un renforcement de cet écart.

Le patrimoine forestier de la Forestal Mininco, en tenant compte de divers accords, était de 498 872 ha selon le rapport annuel de l'entreprise (CMPC, 2009) avec une proportion importante de *Pinus radiata*. L'entreprise dispose aussi de 33 326 ha aptes aux boisements et de 185 264 ha pour d'autres usages, le tout réparti entre les régions du Maule et d'Aysen.

1.3.2.3. Le Groupe Nueva

Le Groupe Nueva, créé par Stephan Schmidheiny, un entrepreneur suisse, est une holding d'investissements et d'opérations spécialisées dans la foresterie et des dérivés de bois. A travers la multinationale Masisa (nommée Unidad de Negocio Forestal), dont il est l'actionnaire contrôleur à hauteur de 69,5%, le groupe possède un patrimoine forestier de plus de 243 millions d'hectares de plantations de pins et d'eucalyptus qui se distribuent au Chili, au Brésil, en Argentine et au Vénézuéla. S'ajoutant à cela 146 000 hectares de terrains aptes au boisement et de forêts natives.

La Forestal Masisa, créée en 1994 à Valdivia, a su conquérir de nombreux marchés en Amérique du Sud et à s'y implanter au travers de ses filiales Masisa Argentina S.A., Madeiras e Sintéticos do Brasil Ltda., Maderos y Sintéticos del Perú S.A., et au Chili par ses filiales Químicos Coronel S.A., Aserraderos Aragón S.A., Portuaria Corral S.A. y Transportes Fluviales S.A., et la Forestal Tornagaleones S.A.⁶⁴

Cette dernière se dédie à l'identification et au développement d'opportunités pour créer des forêts à croissance rapide en Amérique du Sud. Elle cherche à répondre simultanément à la nécessité croissante de produits forestiers, et l'intérêt de conservation de la nature. La Forestal dispose d'un patrimoine forestier de 92 390 hectares répartis entre le Chili et l'Argentine⁶⁵ avec respectivement 44 410 ha et 47 980 ha.

Le rayonnement international de ces trois holdings forestières leur permet d'intégrer le ranking des cent premières entreprises. Le rapport publié en 2007 par PriceWaterhouseCoopers (PwC)⁶⁶ classe la Celulosa Arauco en 36^{ème} position devant la CMPC (41^{ème}) et Masisa (87^{ème}) (tableau 5). La variation des ventes des entreprises chiliennes entre 2005 et 2006 se démarque nettement de celle de leur concurrente. Leur productivité est telle que la Celulosa Arauco passa à la 25^{ème} place du classement, et la CMPC à la 30^{ème} place, d'après la revue LIGNUM⁶⁷ se référant à la 11^{ème} Révision Annuelle de l'Industrie Forestière réalisée par la PwC en 2007.

Selon Ricardo Araño, membre de la PwC et analyste de l'industrie forestière: "*Las dos compañías están cosechando los frutos de las fuertes inversiones que han hecho en el pasado, tanto en masa forestal y construcción de plantas de celulosa, aserraderos y paneles de última*

⁶⁴ http://www.forestaltornagaleones.cl/socios_masisa.htm

⁶⁵ Le patrimoine forestier argentin est géré par la Forestal Argentina S.A. Il s'agit d'une entreprise subsidiaire de la Forestal Tornagaleones S.A. actionnaire à hauteur de 50,10%.

⁶⁶ PwC est un cabinet d'audit, de conseil/marketing et d'expertise comptable. <http://www.pwc.com/>

⁶⁷ <http://www.lignum.cl/noticias/?id=12864>

generación. Ambas se han visto beneficiadas por tener menores costos de producción que las europeas y americanas, tanto en mano de obra como el principal insumo, la madera” (source: LIGNUM).

| Rang | | Entreprise | Pays | Vente (milliers de \$) | | Variation (%) |
|------|------|---------------------|----------|------------------------|--------|---------------|
| 2006 | 2005 | | | 2006 | 2005 | |
| 1 | 1 | International Paper | USA | 21 995 | 21 700 | 1,4 |
| 2 | 2 | Weyerhaeuser | USA | 18 561 | 19 131 | -3 |
| 3 | 3 | Stora Enso | Finlande | 18 330 | 16 441 | 11,5 |
| 4 | 4 | Kimberly-Clark | USA | 16 746 | 15 903 | 5,3 |
| 5 | 5 | Svenska Cellulosa | Suède | 13 796 | 12 896 | 7,0 |
| 6 | 7 | UPM | Finlande | 12 588 | 11 633 | 8,2 |
| 7 | 6 | Procter & Gamble | USA | 11 972 | 11 890 | 0,7 |
| 8 | 9 | Metsälitto | Finlande | 11 644 | 10 755 | 8,3 |
| 9 | 8 | Oji Paper | Japon | 10 439 | 10 762 | -3 |
| 10 | 10 | Nippon Unipac | Japon | 9 908 | 10 713 | -7,5 |
| 36 | 39 | Arauco | Chili | 2 850 | 2 374 | 20,1 |
| 41 | 44 | CMPC * | Chili | 2 260 | 1 991 | 13,5 |
| 87 | 87 | Masisa | Chili | 887 | 744 | 19,2 |

Tableau 5 : Principales entreprises forestières mondiales selon les ventes – Source : LIGNUM, PwC Top 100: 2007

1.3.2.4. La Daio Paper Corporation

La Daio Paper Corporation connue jusqu'à la fin des années 1980 comme la Taio Paper Mfg. Corporation, est le troisième plus grand fabricant de papier japonais et le 24^{ème} à l'échelle internationale. Fondée en 1943 par la famille Ikawa, la société fonctionne avec une trentaine de filiales⁶⁸ et oriente sa production vers le papier, le carton, la pâte à papier, ainsi que des produits transformés tels que les journaux⁶⁹. Elle créa en 1989 la Forestal Anchile « avec l'objectif d'assurer l'approvisionnement de bois pour ses industries de cellulose et de papier situées au Japon ». L'entreprise dispose d'un patrimoine forestier de 61 069,1 hectares (SmartWood, 2004), avec 28 043,8 ha de plantations en pins (*Pinus radiata*) et eucalyptus (*E. nitens et globulus*) et 24 000 ha destinés à la conservation de forêt native, à la protection des sols et des ressources hydriques.

La totalité de la production de la Forestal Anchile est transférée à l'entreprise Maderas Anchile Ltda. qui commercialise les produits sur le marché national et extérieur. Le montant des exportations en 2001 était de 2,2 M\$ et atteignait les 39,6 M\$ en 2007, soit une augmentation de 1658%, la faisant passer de la 33^{ème} à la 15^{ème} position sur les 46 premières entreprises exportatrices chiliennes (INFOR, 2008).

⁶⁸ Nos recherches ne permettent pas d'établir une liste des filiales de la société, le site de Daio Paper Corp. étant en japonais. Un complément d'information peut être consulté sur ce site :

http://www.encyclopedia.com/topic/Daio_Paper_Corp.aspx

⁶⁹ <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/DAIO-PAPER-CORPORATION-Company-History.html>

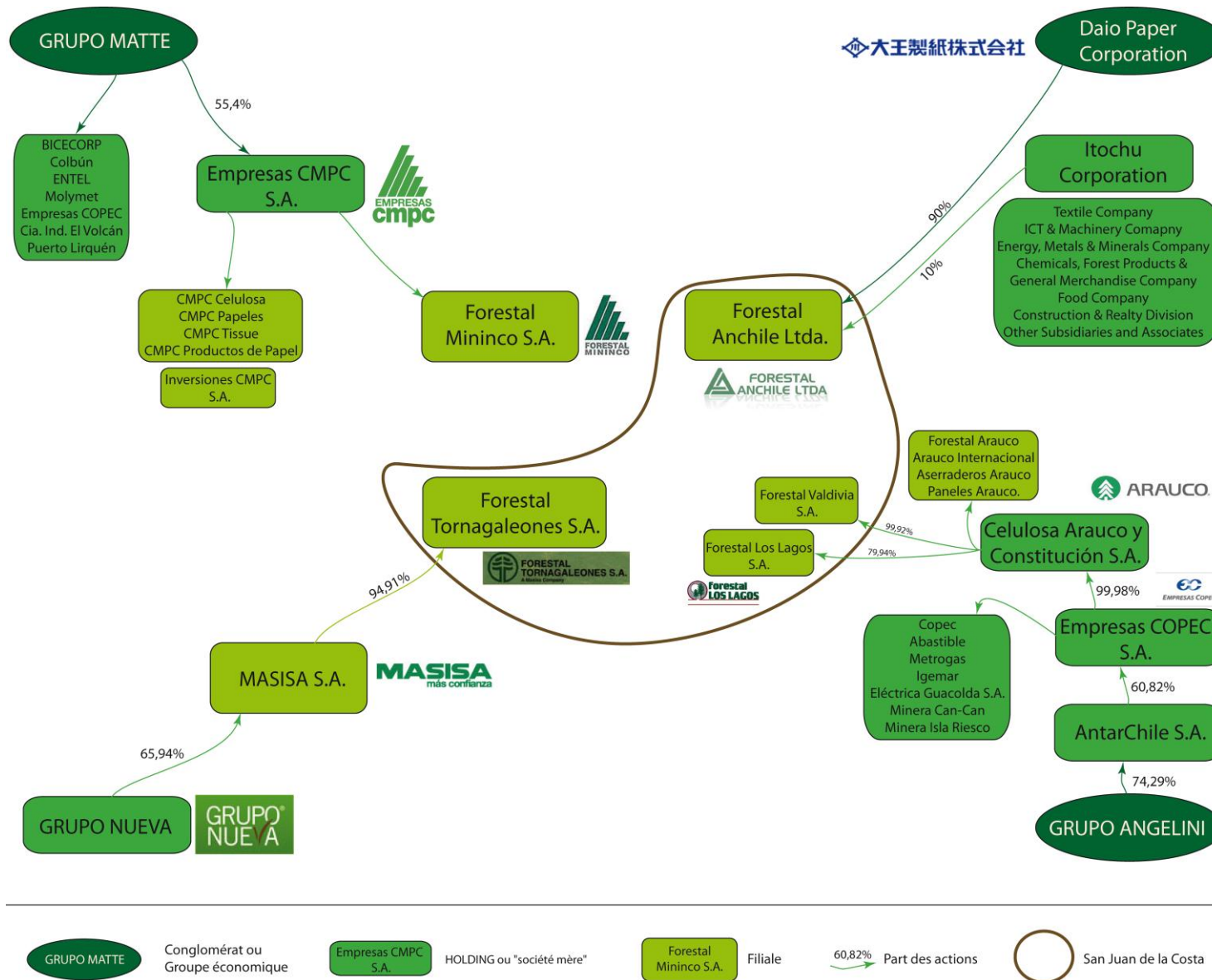


Figure 20 : Vision d'ensemble des principaux acteurs du secteur forestier

1.4. Les conséquences environnementales, sociales et économiques des plantations industrielles exotiques

Les modifications d'écosystème génèrent en général des avantages pour certaines personnes et engendrent des coûts pour d'autres qui peuvent, soit perdre l'accès à des ressources ou à des moyens d'existence, soit être affectées par des externalités associées à ces changements (Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire – Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La sylviculture monofonctionnelle soulève de nombreux questionnements d'ordres socio-économiques et environnementaux à l'échelle mondiale, en témoigne cette citation de François Ramade soulignant que « *depuis plusieurs années, se développe l'ultime degré d'artificialisation des forêts « aménagées » par la sylviculture contemporaine, productiviste par essence, qui n'a cure des impératifs concernant la conservation de la biodiversité des écosystèmes forestiers, voire même de la pérennité des processus écologiques fondamentaux dont la biocénose forestière est à la fois le moteur et le garant à long terme* » (Ramade, 2005).

L'identification de ces questionnements ou impacts engendrés par ce type de pratique ne peut se faire sans tenir compte du contexte spatial (localisation géographique) et temporel (durée de rotation par exemple) dans lequel ils s'inscrivent, en témoignent la double « spécificité » de certains (perte/gain en biodiversité, réduction/augmentation du taux d'érosion, etc.) (tableau 6). Ainsi, de leur localisation géographique va dépendre leur intensité. Leur description sera non exhaustive, seuls seront détaillés les impacts les plus récurrents dans la littérature scientifique⁷⁰ chilienne.

1.4.1. L'environnement

La perte d'intégrité⁷¹ et la fragilité des écosystèmes forestiers par l'uniformisation des habitats, la perte de biodiversité, la menace d'incendies et de maladies sont caractéristiques de ce type de pratique. Cependant, les plantations industrielles ont été reconnues comme étant un facteur permettant de réduire l'intensité des prélèvements de ressources forestières natives (Donoso et Otero, 2005 ; Raga, 2005).

1.4.1.1. La pression sur la forêt native

La consommation de copeaux de bois natif dans l'industrie chilienne a fortement chuté entre 1990 et 2007, 1,32M de m³ à 0,17M de m³, alors que celle de l'eucalyptus passa de 0,54M à 3,82M (INFOR, 2008). Des études scientifiques, citées dans Cubbage *et al.* (2007, p.239), ont nuancé ce postulat. Celles-ci démontrent que l'accroissement de la production issue des monocultures n'a qu'un impact minime sur ces prélèvements dans la

⁷⁰ Les enjeux essentiellement économiques générés par ce type de sylviculture créent une dualité parmi la communauté scientifique (type de revue) et les professionnels du secteur (ONG, organismes privés). Il n'existe pas de consensus quant aux conséquences environnementales et socio-économiques, voyant même des antagonismes.

⁷¹ Il y a « *intégrité écologique* » lorsque toutes les composantes de l'écosystème sont normalement et fonctionnellement actives et préservées.

mesure où « *they were unlikely to be able to provide all the wood supply needed in developing countries, usually provided few local community benefits, and often were not useful for forest conservation* ». En effet il serait réducteur de conclure que la diminution de la consommation industrielle de bois natifs est imputable à l'accroissement des monocultures. Ces dernières ont au contraire largement contribué à la destruction de centaines de milliers d'hectares de forêts natives, affectant la flore et la faune locale (1.2.1.4. c)).

1.4.1.2. La biodiversité

La perte de biodiversité a été largement étudiée au Chili (Wilken, 1998 ; Altieri et Rojas, 1999 ; Donoso et Otero, 2005 ; Navarro *et al.*, 2005). Luis Otero (1998, p.296) remarque une perte de diversités arbustives et herbacées à l'intérieur des plantations, fluctuant entre 10 et 58% lors de la première rotation, et pouvant atteindre les 70% lors du deuxième cycle. La faune subit le même constat, avec une diversité réduite de moitié dans les plantations de pins comparativement à des formations natives. Se référant au programme biodiversité élaboré par le Comité nacional pro DEFensa de la Fauna y Flora (CODEFF)⁷², Petra Wilken énumère un certains nombres d'espèces animales menacées par l'extension des monocultures, on retrouve le Pudú (*Pudu pudu*), Güiña (*Felis guigna*), Gato colo colo (*Felis colo colo*), Zorro chilote (*Canis fulvipes*), etc.

Brockeroff *et al.* (2008) remarquent cependant qu'allier plantations forestières et biodiversité n'est pas incompatible à condition de respecter certaines « règles » de bonnes conduites. Au-delà de fournir un habitat et de créer des zones de connections entre les écosystèmes indigènes, les plantations peuvent garantir le maintien de la faune et de la flore autochtones à l'unique condition que les forestiers envisagent d'utiliser une plus grande diversité d'espèces à planter. Dans ce sens, l'auteur remarque que les plantations en espèces endémiques garantissent un meilleur habitat pour la biodiversité que des plantations exotiques. Enfin, la durée des rotations entre les récoltes est un facteur important à respecter, ainsi que la variété des techniques de récoltes.

1.4.1.3. La ressource hydrique

Robert Hofstede *et al.* (1998) procédèrent à une révision de la littérature internationale consacrée aux impacts écologiques des plantations forestières. Les répercussions sur l'hydrologie sont considérables et préoccupantes, avec une évapotranspiration importante associée à une réduction remarquable des eaux de ruissellement. Les conséquences portent aussi sur la dynamique de la matière organique et sur la modification des processus de décomposition et de formation des sols. Enfin, les périodes de récoltes ont une incidence écologique avec, dans le cas de coupes rases, une augmentation des flux de sédiment, une perte de nutriments pouvant atteindre 60% et une disparition totale du sous-bois.

L'assèchement des nappes phréatiques causé par des plantations d'eucalyptus et/ou de pins est un phénomène largement observé au Chili. Une étude menée sur deux bassins versants de la 7^{ème} Région du Maule révèle que l'expansion de monoculture a un effet direct

⁷² <http://www.codeff.cl/>

dans la réduction du ruissellement estival (Little *et al.*, 2009). Les auteurs étayent leur analyse en se référant aux travaux d'Antonio Lara *et al.* (2009)⁷³ qui démontrent qu'une augmentation de 10% en surface de plantation exotique provoque une diminution de 20,4% du ruissellement estival.

Cette situation soulève le problème de l'approvisionnement. Dans la commune de San Juan de la Costa (10^{ème} Région de Los Lagos) la situation est telle qu'il a été nécessaire de créer des micro-réservoirs afin d'alimenter une soixantaine de famille huilliches dans le secteur Lafquenmapu⁷⁴ (Herrera, 2011). L'ONG forestière Bosque Nativo constate également une dégradation de cette ressource dans la province de Valdivia. Les répercussions auprès des communautés locales sont inquiétantes dans la mesure où « *muchas de las microcuencas que abastecen de agua a las comunidades locales del sector norte de la Región de Los Ríos son de propiedad de las empresas forestales* » (Observatorio Ciudadano, 2011)⁷⁵.

1.4.2. Impact sur le développement rural

Les conséquences socio-économiques observables aussi bien à l'échelle chilienne qu'à l'échelle internationale, sont révélatrices de l'inadéquation entre le développement de l'économie chilienne basée sur les préceptes du capitalisme et du néolibéralisme et une logique économique de subsistance. L'expansion des plantations industrielles en milieu rural se doit tout d'abord à l'absence de planification rurale (Barrué-Pastor, 2004 ; Cavelier et Tecklin, 2005), à des défaillances dans la gestion municipale (Sánchez Alvarez, 2001), à la centralisation du pouvoir et à une décoordination des acteurs locaux (PNUD, 2008).

1.4.2.1. L'Indice de Développement Humain (IDH)

Dans les 7^{ème} Région du Maule, 8^{ème} Région du Bío-Bío, 9^{ème} de la Araucanía et 10^{ème} Région de Los Lagos toutes les communes augmentèrent leur niveau de développement humain entre 1994 et 2003, bien que l'on observe de fortes disparités intercommunales. Ces quatre Régions, qui concentrent la quasi-totalité des plantations industrielles du pays, sont celles qui indiquent les plus faibles IDH. La 7^{ème} Région affichait un IDH de 0,675 en 2003, pour la 8^{ème} Région (IDH : 0,686), pour la 9^{ème} Région (IDH : 0,679) et pour la 10^{ème} Région (IDH : 0,681). En 1994 la commune de Tirúa (8^{ème} Région) présentait l'IDH national le plus faible (0,450) laissant la place à San Juan de la Costa (10^{ème} Région) en 2003 avec un IDH de 0,510 (PNUD, 2004). Comme le remarquent à juste titre Pablo Donoso et Luis Otero (2005), il serait mal approprié d'attribuer les problèmes susmentionnés exclusivement au secteur forestier. Les données du PNUD expriment le fait que son développement n'a aucunement contribué à améliorer la situation socio-économique régionale, ni même rurale.

⁷³ doi:10.1016/j.foreco.2009.01.004

⁷⁴ Investissement de 176 millions de pesos chilien (environ 260 000 euros)

⁷⁵ <http://www.observatorio.cl/node/1922>

1.4.2.2. L'exode rural

Plusieurs études montrent que le secteur forestier s'est totalement désintéressé des problématiques de développement local, favorisant même l'augmentation du taux de chômage, la déscolarisation (Unda et Stuardo, 1996), et *in fine* l'exode rural⁷⁶. Roberto Santana (2004, p.142) met en exergue les pratiques de deux entreprises forestières dans la commune de San Juan de la Costa et leur volonté explicite de s'orienter vers une main d'œuvre extérieure : « *la Forestal Valdivia observe la même pratique, mobilisant des travailleurs venus d'ailleurs à qui l'entreprise fait plus confiance qu'aux autochtones* ». L'auteur remarque que la difficulté à trouver de la main d'œuvre paysanne était dû à l'exode, cette dernière « *en partie stimulée par la vente aux entreprises des petites et moyennes propriétés* » (Santana, 2004, p.142). Les raisons de ces ventes sont multiples et relèvent aussi bien de problème d'improductivité des sols marqués par des cultures rotatives (Cruz et Schmidt, 2007), que de l'incapacité des petits propriétaires de plantations de pins/eucalyptus à obtenir des bénéfices de leurs récoltes. Ces propriétaires sont dans une situation d'oligopsonne (qualifié de monopsonne local par José Ignacio Leyton Vásquez, 2009), c'est-à-dire qu'ils dépendent totalement de la demande d'un petit nombre d'industrie de transformation appartenant aux grands groupes forestiers.

⁷⁶ Dans certains cas les entreprises ont provoqué l'expulsion de familles indigènes. « *The expulsion of thousands of rural residents from their land, many of whom remain impoverished and without alternative livelihoods* » (Siebert, 2003, p.26, in : Bradshaw et Marquet)

| LEGENDE | BIODIVERSITE | PAYSAGE | EAU | SOCIO-ECO | SOL | AIR | |
|--|--|---|--|--|---|--|--|
| CHILI | | | | | | | |
| (Altieri et Rojas, 1999) | Substitution aux forêts natives | Réduction des espèces endémiques (Wilcox, 1995) | Réduction des cours d'eau et des nappes phréatiques (Wilcox, 1995) | Expulsion des petits paysans (Wilcox, 1995) | Erosion des sols (Wilcox, 1995) | | |
| (Toro et Gessel, 1999) | Amélioration de la qualité de vie dans les zones rurales | | Augmentation du taux d'emploi | Réduction de l'exode rural | Protection face à l'érosion des sols | | |
| (Araya Conejo, 2003) | Diminution de la ressource hydrique | | Contamination de l'eau | Migration rurale | | | |
| (Donoso et Otero, 2005) | Perte de biodiversité | Réduction de la pression sur la forêt native | Augmentation du chômage | Migration rurale | Diminution de la productivité des sols par érosion | Capture de CO ₂ | |
| (Estades et Escobar, 2005) | Diminution des réserves hydriques | | Sédimentation et turbidité (Otero <i>et al.</i> , 1994) | Réduction du niveau d'érosion | Augmentation du taux d'érosion (Francke, 1993 ; Mardones, 2005) | Acidification du sol (Bocic, 1972) | |
| (Navarro <i>et al.</i> , 2005) | Destruction de la forêt native | Diminution de la biodiversité | Diminution de la ressource en eau surfacique et souterraine | Contamination de l'eau | Génération de problème de santé sur les communautés environnantes | Répercussion sur la culture indigène Mapuche Dégradation des sols | |
| (Raga, 2005) | Diminution de la pression sur les forêts primaires | Contribution paysagère | Contribution à la vie sylvestre | Régulation des bassins versants (<i>cuencas</i>) | Compensation de la concentration dans les grandes villes | Récupération des sols Contrôle de l'érosion Capture de CO ₂ | |
| (Toral, 2007) | Formation d'habitat | Régulation des eaux | Ecotourisme | Protection des sols | Capture de CO ₂ | Atténuation du bruit Valeurs culturelles | |
| (Leyton Vásquez, 2009) | Dégradation des cours d'eau | Augmentation de la pauvreté locale | Difficulté de circulation pour les populations locales (grillages) | | Dénaturation du marché du travail - Discontinuité de l'emploi | Ne génère aucun revenu municipal Dégradation des chemins | |
| INTERNATIONAL | | | | | | | |
| (Winjum et Schroeder, 1997) Synthèse de littérature scientifique | Réduction de la pression sur la forêt native (Kanowski <i>et al.</i> , 1992) | | Diminution de la biodiversité (Sheldon, 1989) | Favorise la biodiversité (Sedjo, 1983) | Rajeunissement des paysages (Wiersum, 1984) | Amélioration de la productivité forestière (Laarman et Sedjo, 1992) | Mortalité des jeunes plants (Cleary <i>et al.</i> , 1978) |
| | Perturbation naturelle (Laarman et Sedjo, 1992) | | Attaque de parasites (Rosoman, 1994) | Invasion des écosystèmes adjacents (Bliss, 1997) | | Protection des bassins versants (Buckman, 1997) | Pollution chimique (Rosoman, 1994) |
| | Stabilise et réduit l'érosion des sols (Brown et Lugo, 1994) | | Réduction des nutriments et de l'humidité du sol (Adlard, 1979) | | Capture du CO ₂ (Winjum <i>et al.</i> , 1997) | Amélioration le microclimat (Kanowski <i>et al.</i> , 1992) | Restauration et maintien des cycles biogéochimique (Sedjo, 1983 ; FAO, 1967) |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|--|--|--|--|---|--------------------------------|
| (Hofstede <i>et al.</i> , 1998) | Impact sur la végétation native | Impact sur l'hydrologie | | Impact sur la dynamique de la matière organique | | Impact sur les aspects physico-chimique des sols | | |
| (Cannell, 1999) | Faible diversité faunistique et floristique | | Forte « consommation » en eau | | Acidification du sol et de l'eau | | Capture de CO ₂ | |
| (Sadanandan Nambiar, 1999) | Amélioration de la qualité de l'eau et du sol | | Capture de CO ₂ | | | | | |
| (Putuhena et Cordery, 2000) | Perturbation du débit et de la balance hydrique | | | | | | | |
| (Binkley et Stape, 2004) | Augmentation des insectes nuisibles et pathogènes | Compaction du sol | | Perte de fertilité | | Impact chimiques (?) | Disparition de nutriment dans la biomasse | |
| (Cubbage <i>et al.</i> , 2007) | Réduction de la pression sur les forêts natives (Sedjo, 1983 ; Binkley, 1997 ; Sedjo et Botkin, 1997) | | Perte de biodiversité (Carrere et Lohman, 1996 ; Oyarzún <i>et al.</i> , 2006) | | Perturbation des processus hydrologique (Carrere et Lohman, 1996 ; Oyarzún <i>et al.</i> , 2006) | | | |
| | Impacts sur les populations autochtones (Carrere et Lohman, 1996 ; Oyarzún <i>et al.</i> , 2006) | | Capture de CO ₂ et réduction du réchauffement climatique (Carle <i>et al.</i> , 2002) | | | | | |
| (Bull <i>et al.</i> , 2006) | Réduction de la pression sur la forêt native (White, 2003) | | Restauration des paysages dégradés (White, 2003) | | | Contribution au développement rural (White, 2003) | | |
| Synthèse de littérature scientifique | Altération de la composition spécifique de la faune/flore | Destruction de la faune/flore | Nouvel habitat pour la vie sylvestre | Altération des formes, couleurs du paysage | Modification de la qualité de l'environnement | Altération des humedales | Possibilité d'amélioration de l'apparence paysagère | |
| | Sédimentation | Altération des patrons de drainage superficiels | Contamination des sols et des eaux | Variation du débit | Turbidité | Création d'eaux stagnantes | Variation du niveau phréatique | |
| | Meilleure infiltration et réduction de l'écoulement superficiel | Débit annuel plus régulier | Stabilité des versants et des rives | Erosion/ destruction du sol | Compaction | Variation du taux d'infiltration | Glissement | |
| | Perte de fertilité | Altération du pH | Altération de la continuité du sous-sol | Réduction de l'érosion des sols et de la sédimentation | Réduction de la t° des sols | Plus grand contenu organique des sols | Meilleure structure du sol | Variation de l'oxygène dissous |
| | Augmentation du niveau de bruit | Augmentation des particules totales en suspension | | Variation dans la concentration de gaz et fumée | | Humidité atmosphérique importante | Réduction de la poussière atmosphérique | |
| | Création de résidus | Variation du nombre d'individus | Altération du niveau sanitaire | Meilleur échange de cations | | Possibilité d'augmenter la distribution d'aliments, de matériels de construction, etc. | | |
| (Brockerhoff, 2008) | Nouvel habitat pour une large gamme de plantes, animaux et champignons natifs | | Contribution à la connectivité entre des vestiges de forêts natives | | Favorise la biodiversité, par réduction de la pression sur les forêts native (Hartley, 2002) | | Perte de biodiversité (Clapp, 2001) | |

Tableau 6 : Etat de l'art des conséquences socio-économiques et environnementales de la sylviculture intensive

CONCLUSION

Le développement industriel des plantations monospécifiques, soutenu par un cadre politico-législatif volontariste (Decreto Ley 701), a activement participé à l'efficacité du secteur forestier sur le marché international. Les objectifs de productivité et de rentabilité étant les maîtres mots dans un contexte économique concurrentiel. Malgré la reconnaissance de la soutenabilité des activités sylvicoles chiliennes par l'OCDE en 2005 (Arana Silva, 2009), la communauté scientifique s'accorde sur les limites environnementales et socio-économiques engendrées par de telles pratiques. Pablo Donoso et Luis A. Otero (2005) remettent en cause ces conclusions de l'OCDE en démontrant que l'Etat chilien poursuit une croissance économique sans aucune volonté d'atteindre des objectifs de développement soutenable.

Ces répercussions s'inscrivent dans une perspective éminemment spatiale mais aussi temporelle. Spatiale car les ressources (renouvelables et non renouvelables), les acteurs (directs et indirects) et l'utilisation qui en résulte sont des parties intégrées et intégrantes d'un territoire. Temporelle car l'identification des impacts (positifs et/ou négatifs) passés et présents doit permettre de déterminer, notamment grâce à la prospective, de leur (non-) reproduction dans le futur, en considérant le temps du politique, de l'économie, de la nature et du social.

CHAPITRE 2 – Positionnement conceptuel et méthodologique : développement soutenable, étude des changements d'occupation et d'utilisation des sols et simulation prospective

"Le triomphe de la rationalité économique, permis par les rapports sociaux capitalistes et par le développement de la techno-science, a, en cette fin de siècle, achevé de marchandiser le monde entier sur le plan spatial, et poursuit la marchandisation de toutes les activités humaines, des plus matérielles aux plus spirituelles, voire même aux plus intimes" (Harribey, 1996, p.161)

INTRODUCTION

« *Land transformation encompasses a wide variety of activities that vary substantially in their intensity and consequences* » (Vitousek, 1997, p. 494). Le développement remarquable de la sylviculture intensive à travers le monde depuis les années 1960 (Bull, 2006) constitue même une des manifestations les plus répandues du changement global (Arroyo *et al.*, 2000). La sylviculture dans le centre-sud chilien doit être resituée dans le contexte plus général du développement soutenable et des enjeux spatio-temporels qu'il soulève (**section 1**). Le suivi de l'occupation et de l'utilisation du sol (LUC), et plus spécifiquement des dynamiques forestières, requiert l'emploi d'outils spécifiques tels que la télédétection. L'analyse diachronique des LUC ne peut se défaire de la détermination des facteurs qui l'engendrent et qui mettent en exergue leurs complexités (**section 2**). Afin de simplifier la vision du système étudié, la construction de modèles s'avère être indispensable, notamment lorsqu'il est question de proposer des aides à la décision et à la gestion (**section 3**). Enfin, le développement soutenable induit un questionnement sur le futur et sur sa construction à moyen et long terme, basé sur une analyse des réalités du passé et du présent, dans un souci d'équité intergénérationnelle. Dans ce sens il s'accorde avec la réflexion et la démarche prospective par (i) sa vision systémique, (ii) la prise en compte du temps (passé-présent et futur) et (iii) son caractère résolument « activiste » (**section 4**).

2.1. Développement soutenable et sylviculture

D'après Gilbert Rist (2007, p.34-44) « *le « développement » est constitué d'un ensemble de pratiques parfois contradictoires en apparence qui, pour assurer la reproduction sociale, obligent à transformer et à détruire, de façon généralisée, le milieu naturel, et les rapports sociaux en vue d'une production croissante de marchandises (biens et services) destinées, à travers l'échange, à la demande solvable* ». La dégradation du milieu naturel imputable aux activités humaines doit obliger la société à reconsidérer ses pratiques. J.P. (Hamish) Kimmins *et al.* (2010, p.3) considèrent dans ce sens que la sylviculture fait face aujourd'hui à deux responsabilités contradictoires : « *(i) to change the way in wich forests are managed as the balance of values and environmental services desired from those forests changes; and (ii) to reject current practices and resist proposed new practices that are*

inconsistent with the ecology and sociology of the new desired balance of values and services over ecologically appropriate temporal and spatial scale ».

2.1.1. Le développement : définition

Les auteurs qui se sont penchés sur ce phénomène, et les définitions qui en découlent, sont nombreux. Les définitions ci-dessous, sont agencées de manière graduelle, c'est-à-dire que l'on s'achemine de visions conventionnelles de la notion vers des regards et des jugements critiques, ce qui permettra de poursuivre notre raisonnement et de le faire aboutir au concept de développement soutenable.

- D'après Jean-Yves Capul et Olivier Garnier (1998, p. 84) le développement « *est l'ensemble des transformations techniques, sociales, et culturelles qui permettent l'apparition et la prolongation de la croissance économique ainsi que l'élévation des niveaux de vie. [...] C'est un phénomène qualitatif, irréversible et qui ne peut s'observer que sur une très longue période* ». Le développement se traduit ici comme un vecteur de l'épanouissement de la croissance économique, sur une échelle de temps long ; sans préciser toutefois ce qu'est une longue période. Il constitue la trame de fond qualitative de la croissance qui est par essence quantitative, au sens de mesurable par des indicateurs (Produit Intérieur Brut). La croissance se traduit par une augmentation de la production. Ainsi le terme développement suggère que la croissance économique ne peut s'épanouir qu'à condition de remplir des exigences fondamentalement basées sur la satisfaction des besoins humains.
- François Perroux le définit comme étant : « *la combinaison des changements mentaux et sociaux d'une population qui la rendent apte à faire croître, cumulativement et durablement, son produit réel global* » (Perroux, 1974). Sans remettre en question la finalité du développement, à savoir l'épanouissement de la croissance, François Perroux affine encore plus son caractère qualitatif, en mettant en avant l'individu, ses modes de pensées, et sa capacité d'agir et de décider en société. Ici c'est la population qui rend apte, contrairement à la première définition où la dynamique est guidée par des processus intrinsèques. Cette interprétation se rapproche fortement de celle donnée par le PNUD sur le développement humain.
- Pour le PNUD (2008) : Le développement humain est un paradigme qui signifie bien plus que l'augmentation ou la diminution du revenu national. Il s'agit de la création d'un environnement dans lequel les populations peuvent développer leur plein potentiel et orienter leur production, en accord avec leurs besoins et leurs intérêts. Les habitants sont la réelle richesse des Nations. Par conséquent il s'agit bien plus que la croissance économique, qui est seulement un moyen, aussi important soit-il, à l'élargissement des choix des populations.

La plus basique des aptitudes pour le développement humain est d'avoir une vie durable et saine, d'être instruit, d'avoir accès aux ressources nécessaires pour répondre aux besoins fondamentaux de la vie, et d'être capable de participer à la vie de la communauté⁷⁷.

- Adoptant une approche plus pragmatique et critique, Franc Dominique Vivien (2003), le considérant comme une norme implicite, remarque que : « *dans le domaine social, cette norme est représentée par la révolution industrielle anglaise et, plus largement, par l'évolution des sociétés occidentales. Utilisée sans précaution particulière, la notion de développement devient ainsi une simple figure de l'évolutionnisme social et acquiert un caractère naturel et obligatoire* » (Vivien, 2003, p.6). Au-delà d'un simple phénomène économique et social, le développement est vu ici comme une norme, façonnée par un système idéologique occidental, dont la pérennisation au fil des siècles a conduit à son acceptation en tant que rouage essentiel à l'épanouissement des civilisations.

Pour conclure, et « *car il ne suffit pas d'affirmer que le « développement » se réduit au changement social* », Gilbert Rist (2007, p.34) donne une définition à la fois ancrée dans un processus évolutif, c'est-à-dire dans la dimension historique du développement, mais aussi synthétique, aux vues des nombreuses variables qui alimentent ce phénomène. La finalité du développement reste inchangée, mise à part les processus qui y conduisent. L'environnement et le social deviennent « victimes » de cette finalité. En effet, Rist n'hésite pas à employer les termes de transformation et de destruction pour qualifier ces pratiques. Cette vision critique du développement se rapproche des aspirations du développement soutenable, même si Rist n'en demeure pas moins critique.

2.1.2. Le développement soutenable

2.1.2.1. Avant-propos

Sustainable development pour les anglophones, *desarrollo sustentable* pour les hispanophones, la traduction française s'est rapidement formalisée sur l'expression de « développement durable » et dans une moindre mesure sur celle de développement soutenable. S'ajoute à celles-ci l'emploi de multiples adjectifs, bien que très rarement employés, tels que -viable, compatible, supportable, etc. Si sur le plan idéologique les adjectifs *durable* et *soutenable*, accolés au développement, traduisent la même logique⁷⁸, cette convergence s'arrête dès lors qu'on s'intéresse à leur terminologie.

⁷⁷ Human Development is a development paradigm that is about much more than the rise or fall of national incomes. It is about creating an environment in which people can develop their full potential and lead productive, creative lives in accord with their needs and interests. People are the real wealth of nations. Development is thus about expanding the choices people have to lead lives that they value. And it is thus about much more than economic growth, which is only a means —if a very important one —of enlarging people's choices. The most basic capabilities for human development are to lead long and healthy lives, to be knowledgeable, to have access to the resources needed for a decent standard of living and to be able to participate in the life of the community (PNUD, 2008).

⁷⁸ Bertrand Zuindeau note que cet ensemble de vocables désignent ensemble, à quelques nuances près, « *une nouvelle problématique de développement, plus respectueuse de l'environnement, mais aussi censée satisfaire un*

- *Durable adj. 1. Qui dure longtemps, stable.*
- *Stable adj. 1. Qui se maintient, reste dans le même état.*

La durabilité suppose la continuité d'un système en l'aménageant (viabilité). Les confusions entre croissance et développement, c'est-à-dire, appliquer à l'un ce que l'on a initialement prévu d'appliquer à l'autre, change fondamentalement la donne en matière de protection de l'environnement et d'équité sociale. Dans la pratique c'est bien la croissance économique qui est poursuivie au nom du développement (Rist, 2007). La durabilité est un continuum entretenant une idéologie libérale. En effet Franck-Dominique Vivien remarque que « *l'un des tout premiers objectifs de l'Agenda 21 est la libéralisation du commerce* » (2005, p. 45), en se penchant sur la vision des théoriciens néoclassiques de la croissance économique. La temporalité est prégnante, en reliant le développement économique aux attentes des générations futures par « *un axe de temps unique et linéaire, orienté vers l'avenir* » (Clément, 2004). Le problème n'étant pas d'inscrire le développement dans la durée mais bien de l'articuler à des objectifs relevant du domaine de l'éthique.

- *Soutenable adj. 1. Qui peut être supporté, enduré. 2. Qui peut être défendu par des raisons solides*

Aux vues des problématiques soulevées, la première définition de soutenable a été retenue. Ce choix se justifie par les critiques dont le « développement » fait l'objet, d'une part par ses répercussions sur l'environnement, et d'autre part sur les inégalités sociales et économiques qu'il engendre. Par conséquent, il serait antinomique de considérer le développement comme un phénomène qui peut être défendu pour des raisons solides. Au contraire, le qualifier comme un phénomène qui peut être supporté ou enduré, suppose qu'il présente des défaillances auxquelles il faut apporter des solutions.

- *Endurer v.t. Supporter ce qui est dur, pénible*

Effectivement, la soutenabilité corrélée au développement induit que ce dernier présente des faiblesses, préjudiciable aux sociétés, à l'environnement et intrinsèquement à l'économie (crise économique). Etymologiquement le développement soutenable traduit la pénibilité rencontrée face aux modes de production et d'exploitation, et qu'il convient là aussi d'aménager pour rendre supportable la combinaison des facteurs composant le triptyque. La temporalité n'est plus l'axe majeur, contrairement à la durabilité, mais n'en demeure pas moins une composante essentielle.

Pour conclure cette réflexion, Michel Danais (ingénieur en écologie) remarque que « *l'emploi du terme durable ou durabilité entretient une confusion avec le sens commun de ce mot qui peut être mobilisé à tout moment pour caractériser la simple propriété de non-*

objectif d'équité – sur un plan intergénérationnel et également, de manière plus novatrice, dans une perspective intergénérationnelle -, et sans remettre en cause la nécessité de l'efficacité économique » (Zuindeau, 2000, p.11)

obsolescence ou de pérennité d'un objet ou d'une action, sans qu'il soit pour autant démontrer que l'objet ou l'action en question intègrent toute la richesse d'objectifs du développement soutenable [...] » (Danais, 2001, p. 255).

Cette recherche n'ayant pas pour vocation première d'entreprendre une analyse terminologique comparative exhaustive, notre choix s'orientera, comme d'autres (Harribey, 1996 ; Vivien, 2005 ; Berr, 2008), sur l'emploi de l'expression « développement soutenable » considérant que la communauté scientifique emploie indistinctement durable ou soutenable, et en tenant compte de propos susmentionnés. Cependant, le terme *durable* apparaîtra lorsqu'un auteur cité en fera l'usage. Enfin, la répétition de l'expression au cours de ce travail verra apparaître l'emploi de l'acronyme DS afin « d'alléger » la lecture.

2.1.2.2. L'émergence du concept

a) Politique économique et développementiste

Faisant suivre des idées modernistes, le développement est un processus positif, et difficilement réfutable et refusable, en particulier pour des pays en quête de croissance économique. Les Etats engagés dans le projet *développementiste* ne pouvaient, en conséquence, ni refuser d'introduire, ni réussir à acclimater tout ce qui participe à la modernisation : l'éducation, la santé, la justice, l'administration, la technique occidentale (Latouche, 2004).

L'approche « développementaliste » essuie de nombreuses critiques, « *notamment par le mouvement tiers-mondiste dans les années 1960-1970, qui avance l'idée que le sous-développement est la conséquence de la domination des pays capitalistes développés sur les pays du tiers-monde, ce qui rend tout rattrapage impossible. C'est à cette époque que s'affirment les théories de la dépendance, basées sur une analyse centre-périphérie (Baran, 1957 ; Frank, 1969 ; Amin, 1970 ; Furtado, 1970), et les théories néo-marxistes de l'échange inégal (Emmanuel, 1969). Ce courant radical considère que le sous-développement est le produit de l'expansion du capitalisme à l'ensemble de la planète et de la domination exercée par les pays du Nord, d'où la nécessité de rompre avec ce modèle » (Berr, 2008, p.1).*

La fin des années 1970, marquée par l'avènement de la doctrine économique néolibérale, et le début des années 1980, avec la crise de la dette amorcée dans les Pays En Développement (PED), va changer la façon d'appréhender le développement. Opposés à des réformes nationales pour régler les problèmes de dettes nationales, les néolibéraux considèrent que les problèmes viennent de pays qui ont fait de mauvais choix, qui se sont écartés de la voie devant leur permettre de rattraper leur retard. C'est dans le but de rectifier la trajectoire, qu'est apparu le consensus de Washington⁷⁹.

⁷⁹ Le consensus de Washington (années 1980) se différencie du consensus Keynésien (années 1960) pour deux raisons. D'une part, le CK considère que le mouvement international des capitaux est indispensable si l'on tient à éviter que la marge de manœuvre politique des Etats interventionnistes soit sapée par des flux de capitaux spéculatifs aux effets très déséquilibrants ; de plus il veut le maintien du *welfare state*. D'autre part on trouve les

A la fin des années 1980, la presse américaine considérait que les pays d'Amérique latine n'étaient pas disposés à entreprendre les réformes qui pouvaient les aider à surmonter la crise de la dette. Pour pallier à cette crise, John Williamson déclara dans la revue *Finances et Développement* de septembre 2003 qu'« *afin que tous réfléchissent à la même série de questions, je préparai un document de référence énumérant dix réformes qui, selon moi, étaient considérées par tous à Washington, ou presque, comme nécessaires à l'époque en Amérique latine* » (Williamson, 2003, p. 10). Le tableau 7 reprend les dix propositions faites par John Williamson, et qui ont accompagné les politiques de développement des PED ces vingt dernières années.

| Le consensus de Washington |
|---|
| 1. La discipline budgétaire. Les déficits budgétaires engendrent inflation et fuite des capitaux ; |
| 2. La réforme fiscale. Le système fiscal doit tendre à avoir l'assiette la plus large et des taux marginaux de prélèvement modérés ; |
| 3. La politique monétaire doit conduire à des taux d'intérêt positifs et rémunérateurs en termes réels. Les taux doivent être réglementés pour décourager la fuite des capitaux et stimuler l'épargne ; |
| 4. Le taux de change doit être flexible, compétitif et favoriser l'accumulation d'excédents commerciaux ; |
| 5. La politique commerciale. Ouverture et libéralisation des importations. Les restrictions quantitatives doivent être éliminées et les droits de douane modérés ; |
| 6. L'investissement direct étranger ne doit subir aucune entrave à l'entrée (politique d'attractivité) ; |
| 7. La privatisation ; |
| 8. La dérégulation : levée des différentes réglementations sur l'investissement, les prix, le crédit... et suppression des rentes de situations ou institutionnelles ; |
| 9. La suppression des subventions publiques aux activités productives au profit des seules activités sociales et éducatives ; |
| 10. La promotion des droits de propriété. |

Tableau 7 : Principes fondamentaux du consensus de Washington

QU'EST-CE QUE LE CONSENSUS DE WASHINGTON ?

« *Tout d'abord, c'est une conception autre du développement qui est revendiquée. Le consensus de Washington remet en cause toute forme d'intervention de l'Etat jugée créatrice de distorsion, le marché étant considéré comme le mode optimal et efficient d'allocation des ressources. Le consensus de Washington fait du développement un problème technique d'allocation des ressources. L'objectif est dès lors l'amélioration de l'efficacité des systèmes de prix. La logique de l'intégration au marché mondial, c'est-à-dire l'endogénéisation du système de prix mondial, censé être plus efficient que celui du marché national, est une composante centrale du consensus et des politiques d'ajustement structurel qui l'accompagnent* » (Abbas, 2004, p.11).

Les politiques d'ajustements structurels permettent de mieux comprendre la stratégie de ce consensus. Elles sont construites sur trois objectifs fondamentaux: retour à l'équilibre budgétaire, à l'équilibre de la balance commerciale et à l'équilibre de la balance des paiements. Pour cela, ils s'appuient sur les trois principes suivants: (i) une restructuration de

« financiers » (CW), soucieux de ne rien faire qui puisse affaiblir la position de New York comme place financière internationale, en passant par un laisser faire en matière de spéculation financière (Dezalay, Garth, 1998).

la demande par une politique budgétaire de réduction des dépenses publiques; (ii) une libéralisation de l'économie par une réduction des interventions de l'Etat, la privatisation des entreprises, la libéralisation des prix, etc.; et (iii) une ouverture sur le marché international, fondée sur le principe des avantages comparatifs.

Elles se destinent également à répondre à la crise de la dette par le moyen de prêts (structurel ou sectoriel).

- Les *prêts d'ajustement structurel* qui visent plus particulièrement trois objectifs: (i) atténuer la crise de la dette en réduisant le déficit et les dépenses; (ii) augmenter les exportations en convertissant les ressources naturelles du pays en produits exportables, dans un contexte de mondialisation et de remboursement de la dette; et (iii) favoriser l'implantation de firmes multinationales dans des économies jugées trop repliées sur elles-mêmes;
- Les *prêts d'ajustement sectoriel* qui s'attaquent, un à un, à des secteurs entiers de l'économie nationale, comme l'énergie, l'agriculture, l'industrie et, plus récemment la santé. Les conditions attachées à ces prêts déterminent les politiques et les priorités nationales dans le secteur concerné (Gélinas, 1995).

Le consensus est véhiculé par la doctrine néolibérale et joue un rôle déterminant dans le « nouvel ordre mondial ». « *L'Etat doit « rester à l'écart »*-, [bien qu'il doive assurer les tâches régaliennes (armée, justice, etc.)], *et donc (conclusion implicite) la population aussi, dans la mesure où il est démocratique* » (Chomsky, 2003, p. 54).

b) Emergence du concept

Bien qu'institutionnalisé en 1987 par le rapport Brundtland suite à de nombreux travaux réalisés par la Commission Mondiale pour l'Environnement et le Développement (CMED), les premières réflexions apparaissent dans les années 1970⁸⁰ grâce notamment au rapport remis au Club de Rome en 1972 par Dennis L. Meadows et son équipe du Massachusetts Institute of Technology (MIT) : *The limits to growth* (littéralement : *les limites à la croissance*, traduit en français par : *Halte à la croissance ?*). « *Nous avons la conviction, écrivent-ils, que la prise de conscience des limites matérielles de l'environnement mondial et des conséquences tragiques d'une exploitation irraisonnée des ressources terrestres est indispensable à l'émergence de nouveaux modes de pensée qui conduiront à une révision fondamentale, à la fois du comportement des hommes, et, par suite, de la structure de la société actuelle dans son ensemble* » (Meadows, 1972, p.293-294).

La publication de ce rapport fut l'élément déclencheur et central de nombreuses conférences internationales, organisées dans le but d'apporter des pistes de réflexions et

⁸⁰ Les préoccupations environnementales, et plus particulièrement de gestion (forestière), remontent selon nos sources au XIV^{ème} siècle: « *En 1346, Philippe VI édicte une ordonnance sur l'administration des forêts qui interdit de « forer » au hasard et prescrit la généralisation des coupes réglées avec planification de l'emplacement et de l'importance des prélèvements. Les ordonnances de 1376 de Charles V confirmaient ces dispositions et se proposent de réglementer des droits d'usage* » (Larrere, Nougadere, 1993, p.39). Evidemment ces préoccupations n'avaient pas la même ampleur médiatique que le développement soutenable.

d'actions relativement aux dégradations environnementales causées par les activités humaines. En 1972, la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain de Stockholm a focalisé l'attention publique sur la préoccupation pour l'environnement, ce qui a conduit à créer un grand nombre de ministères de l'environnement et d'organisations Non Gouvernementales (ONG) chargés de protéger les ressources de la planète. C'est bien la vulnérabilité de la planète et l'interdépendance des phénomènes qui s'y déroulent qui sont en question (Vivien, 2005).

La même année apparaît la notion d'écodéveloppement. Proposé par Maurice Strong, secrétaire général de la conférence de Stockholm, cette notion prendra sa valeur théorique par les réflexions d'Ignacy Sachs. Destiné à concilier les divergences rencontrées lors de la conférence de Stockholm, l'écodéveloppement subira les remous des années 1970 (guerre froide, guerre du Vietnam) caractérisées par des impératifs de croissance économique et de libéralisation du commerce international. Cette situation marginalisa la notion d'écodéveloppement au profit de celle du développement soutenable. La réaction de Henry Kissinger et de l'administration étasunienne à la conférence de Cocoyoc (1974) ayant favorisé cette substitution sémantique⁸¹.

En 1983 est créée la CMED. Le développement et l'environnement sont considérés comme complémentaires et interdépendants, la dégradation de l'un entravant l'épanouissement de l'autre. Assignée d'un triple mandat⁸², la CMED publia, après cinq années de travail, *Notre avenir à tous* (1987) (*Our common future*), appelé aussi rapport Brundtland. Les questions soulevées par ce rapport n'ont rien d'innovant, on retrouve en effet les problèmes d'érosion de la biodiversité, de pollution, d'énergie, de sécurité alimentaire. Le point important réside dans le maintien d'une croissance économique mais dont le contenu diffère. Cette « *nouvelle ère de croissance* » devra respecter la « non-exploitation d'autrui » et recourir à des techniques moins consommatrices d'énergies et de matières.

Le rapport Brundtland définit le développement durable comme : « *Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs* » (CMED, 1987). Une autre définition lui a été attribuée: « *Le développement soutenable, n'est pas un état d'équilibre, mais plutôt un processus de changement dans lequel l'exploitation des ressources forestières, le choix des investissements, l'orientation du développement technique ainsi que le changement institutionnel sont déterminés en fonction des besoins tant actuels qu'à venir* » (CMED, 1987). Il repose sur trois piliers : l'économie, le social et l'environnement, en tentant d'équilibrer les liens existants entre le développement (ou la croissance⁸³), les rapports sociaux et la

⁸¹ La déclaration de Cocoyoc demandait entre autres « *de lutter contre le sous-développement en arrêtant le surdéveloppement des riches, inciter les pays en développement à s'appuyer sur leurs propres forces, à prendre confiance en eux et apprendre à ne plus être dépendant des pays riches* » (Berr, 2008-24, p.5).

⁸² Faire le point sur les problèmes d'environnement et de développement et formuler des propositions pour une action novatrice, concrète et réaliste; proposer de nouvelles modalités de coopération internationale susceptibles de provoquer les changements souhaités; viser à la prise de conscience et à la mobilisation de l'ensemble des acteurs.

⁸³ « *Il ne s'agit pas vraiment de remettre en question l'accumulation capitaliste, tout au plus songe-t-on à adjoindre à la croissance économique un volet social comme on a pu naguère lui ajouter une dimension culturelle, et aujourd'hui une composante écologique* » (Latouche, 2003, p.23).

préservation des ressources naturelles. L'objectif central étant de repenser les rapports entre la société et l'environnement.

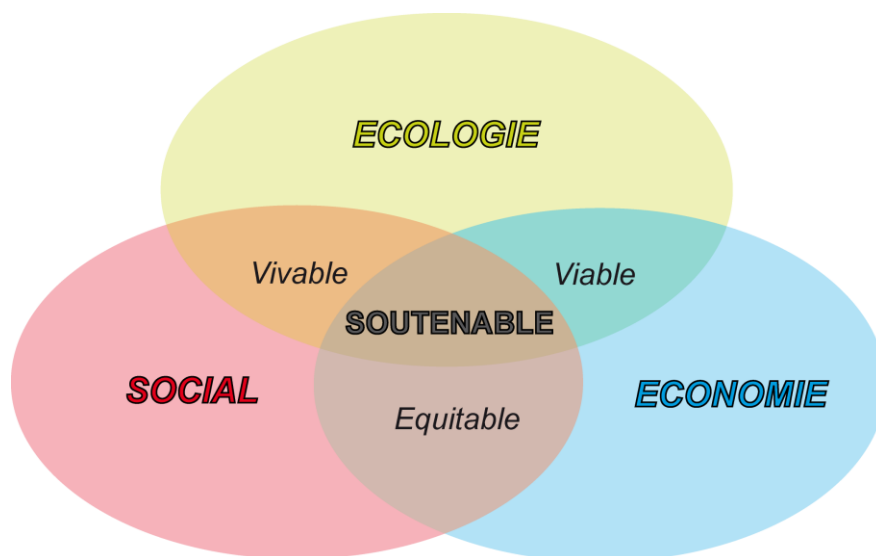


Figure 21 : Triptyque du développement soutenable

Il existe deux conceptions de la soutenabilité (Berr, 2008-4, p.2-3) :

La soutenabilité faible, d'inspiration néoclassique vise, au niveau microéconomique, à valoriser monétairement les éléments naturels afin de les intégrer dans un calcul coûts-bénéfices. Au niveau macroéconomique, la croissance économique et la qualité environnementale s'insèrent dans une logique de relation vertueuse, à l'image de la courbe de Kuznet⁸⁴. Le sommet de la terre de Rio en 1992, avec l'adoption de l'agenda 21, et le sommet mondial sur le développement durable de Johannesburg en 2002 vont confirmer cette approche. *A contrario*, la soutenabilité forte n'admet pas que le capital naturel soit amputé au détriment des générations futures, ce que la soutenabilité faible admet. Elle encourage la complémentarité des facteurs de production. La soutenabilité économique (forte) dépend d'un flux constant d'investissements, tant privés que publics, destinés à moderniser l'appareil de production afin d'économiser les ressources naturelles et la peine des êtres humains.

c) La remise en cause du Consensus de Washington

« Pour Stiglitz [1998, a], [1998, b], l'échec du consensus de Washington s'explique par le faible nombre d'instruments utilisés et par une vision étroite du développement, centrée sur la seule croissance économique ». La critique vise essentiellement une vision occidentalocentrée du développement et de la croissance, suivant une logique descendante ou *top-down*, déconnectée des réalités locales. « [...] Dès lors, il convient de substituer au remède général et unique proposé par le consensus de Washington, ce que Rodrik appelle la politique du « *One size fits all* », un diagnostic personnalisé permettant de mettre en évidence les

⁸⁴ « Kuznets's observation is summarized in a bell or an inverted-U shaped curve, called the Kuznet's Curve, suggesting that income inequality will rise, peak and eventually decline as per capita income levels rise » (Peterson, 2005). D'après la soutenabilité faible, plus la croissance économique est forte plus la qualité environnementale s'accroît.

principales contraintes qui pèsent sur chaque PED afin de les dépasser » (Berr, 2008-4, p.15). Ainsi les Etats retrouvent leur rôle de régulateur, en promouvant la cohésion sociale, sans pour autant se déconnecter des lois du marché (tableau 8). Des institutions publiques adaptées au contexte local sont mises en place conjointement à des politiques sociales destinées à contrer les impacts négatifs de la libéralisation. Cette crise offre un environnement favorable à la mise en place de politique de développement soutenable, en valorisant notamment la sphère économique et sociale.

| La crise du consensus de Washington (fin des années 1990) | Etat et marché: une complémentarité au sein d'arrangements institutionnels variés (début du XXIème siècle) |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> 1- Instabilité ou crises politiques 2- Chômage / croissance des inégalités, conséquence des ajustements de marché 3- Fragilité des institutions financières et sociales et faiblesse de certains acteurs 4- Sous-investissement dans les infrastructures collectives 5- Forte dépendance par rapport à l'environnement international 6- Destabilisation des régimes de croissance par les mouvements de capitaux | <ul style="list-style-type: none"> 1- Re-légitimation de l'Etat: promoteur de la croissance et de la justice 2- Au marché la coordination des décisions au jour le jour, à l'Etat les décisions stratégiques 3- Favoriser la densité des arrangements institutionnels et la capacité d'organisation des acteurs 4- Le secteur public assure la cohésion sociale et les infrastructures collectives 5- Maintien d'un équilibre entre besoins domestiques et compétitivité extérieure 6- Ouverture internationale différenciée en fonction des objectifs nationaux et des domaines |

Tableau 8 : Une conception du développement fondée sur l’innovation institutionnelle
 Source : Boyer, 2001 in Berr, 2008-4, p. 16

2.1.2.3. La dimension spatio-temporelle du développement soutenable

a) La dimension temporelle

« L’environnement ne peut être appréhendé dans une unique échelle de temps mais bien dans un croisement systémique de multiples temporalités » (Bertrand, 2002).

Sans aborder la question de la responsabilité des générations présentes envers les générations futures, ni de la justice intergénérationnelle (Streeten, 1986), c’est la caractérisation même des « générations futures » qui importe, principalement par la délimitation de l’horizon temporel dans lequel elles devraient se situer. Or, si la majorité des études qui se focalisent sur le développement soutenable emploient la notion de « générations futures », peu d’entre-elles se posent cette question (Miossec, Arnould et Veyret, 2004 ; Mancebo, 2007).

Qu'attendent de nous les générations futures?⁸⁵ Allen Tough (1993) propose de répondre à cette question en mettant en place des jeux de rôles où chaque individu se projette dans le futur et discute du message qu'il souhaiterait envoyer dans le présent. Voici l'un des messages: « *in your major decisions and actions, please consider our perspective and welfare along with your own. Our needs and rights are not inferior to yours: please regard your generation and ours as equals* » (Tough, 1993, p.1044). Cela laisse supposer une linéarité temporelle intergénérationnelle, déconnectée de la complexité des relations caractéristiques de tout système dynamique, qu'il soit stable ou en changement. Les temporalités de la nature et des sociétés sont discordantes, car elles s'inscrivent, pour les premières, sur des longues durées ou des évolutions brèves (Robic et Mathieu, 2001), et sur des échelles temporelles plus restreintes pour les secondes. « *Un âge de glace est un incident à l'échelle de l'histoire de l'Homme, mais un phénomène régulier pour l'histoire de la planète* » (Fresco et Salomon, 1992, p.160). L'intérêt réside alors dans la capacité des sociétés à faire face à ces évolutions, à la capacité d'adaptation des territoires aux changements, « *à la capacité des hommes d'anticiper et planifier le futur* » (Resilience Alliance⁸⁶), en somme à leur résilience.

Comment décider alors du bien-fondé des décisions actuelles en les projetant dans le futur ? « *Personne ne semble savoir comment mesurer le bien-être ou l'utilité [les besoins] des générations futures, il n'y a même pas de consensus pour la génération actuelle, comme le montrent les difficultés à définir un bien-être économique net* »⁸⁷ (Rabl, 1996, p.138). En effet cet état doit faire face à de fortes divergences, qu'elles soient socio-économiques, géopolitiques, etc., en fonction des régions du globe. La détermination et la mesure des besoins ne seront pas les mêmes si l'on se penche sur la situation de l'Union Européenne (où des disparités sont observables) ou sur le cas du Proche-Orient. La dimension spatiale du développement soutenable est centrale car ce dernier « *se fonde obligatoirement sur des interactions entre de multiples lieux, appréhendables à toute gamme d'échelles allant du local au planétaire, se situant les uns par rapport aux autres dans des rapports de domination ou de concurrence, ce qui signifie conflits, choix collectifs, arbitrages...* » (Robic et Matthieu, 2001, p. 179).

b) La dimension spatiale

Introduisant leur réflexion sur la place occupée par la dimension temporelle dans le concept de développement durable, Richard Laganier, Bruno Villalba et Bertrand Zuideau (2002) s'intéressent à l'apport de la dimension territoriale. Pour ce faire, les auteurs analysent la notion d'interdépendance et d'équité, considérant la première comme un « *principe objectif premier du développement durable* » (2002, p.5). Cette notion agit sur trois plans et montre la place centrale jouée par le territoire : (i) l'interdépendance dans le temps (passé-présent-futur) où chaque prise de décision se doit de considérer l'impact sur les générations futures, tout en

⁸⁵ What future generations need from us (Tough, 1993)

⁸⁶ <http://www.resalliance.org/>

⁸⁷ « *But nobody seems to know how to measure well-being or utility of future generations; even for the present generation there is no consensus, as shown by the difficulties of defining a net economic welfare* »

considérant que l'état actuel est la résultante des décisions passées ; (ii) l'interdépendance des domaines (social-économique-environnemental) dans la mesure où chaque domaine va avoir une influence sur les autres, et générer des rétroactions ; enfin (iii) l'interdépendance spatiale (relation entre les territoires) considérant qu'un évènement peut avoir des répercussions sur des territoires voisins, au-delà des objectifs et de la zone d'action prévu initialement.

Même si le territoire joue un rôle central, la prise en compte de l'échelle spatiale reste incontournable et suscite de nombreux questionnements, notamment celui des échelles d'applications du DS que l'on retrouve dans le slogan de l'Agenda 21 : « *Penser globalement, agir localement* ». Vincent Clément (2004) remarque que ce slogan « *s'émancipe allègrement du jeu complexe des échelles et semble imposer une pensée unique à l'ensemble du monde* ». La tendance de cet Agenda est de regrouper la multitude d'acteurs dans le même panier, sous une pensée unique. Agir localement laisse apparaître une certaine indépendance des acteurs locaux face aux actions régaliennes et internationales. Cette devise tente d'unifier la population, face à la problématique du DS, en laissant les acteurs locaux une certaine autonomie dans leur politique d'intervention, sous peine malgré tout d'occulter (avec le penser globalement) les particularités locales.

Francis Mancebo note que les problèmes de fond liés aux crises actuelles proviennent de la place de chacun dans une société complexe, des modes de vie et du lien social. « *La tentation est forte d'évacuer les difficultés à faire coïncider ces différents aspects en imposant des démarches normatives, des critères arbitraires au mépris des réalités locales et au prétexte de leur « objectivité »* » (Mancebo, 2007). Il poursuit son raisonnement en mentionnant les interventions de la Banque Mondiale et du Fond Monétaire International (FMI) sur des pays aux administrations rigides ainsi que sur des collectivités locales, dans l'optique d'un développement soutenable.

« Ainsi, la Banque Mondiale intervient directement dans les projets de développement durable des pays pauvres en leur allouant des fonds qui impliquent la collaboration du pays emprunteur à des directives édictées unilatéralement par la Banque Mondiale. [...] Une telle situation alimente la critique selon laquelle le développement durable reflète le point de vue élitiste des pays riches sur les problèmes environnementaux avec une insistance trop unilatérale sur la liberté des marchés, sur la croissance démographique et sur la survie des espèces en voie d'extinction » (Mancebo, 2007, p.9)

Inversement, Vincent Clément (2004) propose : « *penser localement, pour agir globalement* ». La volonté est de définir des politiques et des pratiques locales du DS⁸⁸. Michel Danais (2001, p.262) remarque que « *c'est à ce niveau que se réalisent nombre de processus couplés « acteurs-environnement » et que se franchissent des étapes du développement* ».

⁸⁸ « [...] la géographie se donne aussi comme objectif premier l'analyse des localisations, de la répartition des activités et de la manière dont l'Homme gère durablement son espace [...]. Elle prône alors un développement qui vient d'en bas et non d'en haut, c'est-à-dire un développement pensé par les populations, qui naît de leurs réelles exigences, et non par des actions imposées par l'Etat sans aucune consultation préalable des populations concernées. [...] Il convient d'envisager une approche comme une lutte à l'échelle mondiale avec des interventions spécifiques au niveau local » (Elamé, 2002, p.39)

Comment alors agir globalement par la simple réflexion locale ? Cette proposition sous-entend que la combinaison de ces réflexions particulières serait en mesure d'apporter un modèle d'action à l'échelon mondial.

Pour Michel Danais, l'analyse comparative d'un échantillon de systèmes locaux devrait permettre d'expliquer les tendances, les interactions et les besoins à l'échelle globale, même si une somme d'évolutions locales soutenables ne fait pas *ipso facto* un DS. Le problème provient de la réflexion en système binaire, c'est-à-dire penser à telle échelle et agir à une autre échelle. Un système complexe ne peut être appréhendé de cette manière. Le « penser » et l' « agir » doivent s'appliquer à toutes les échelles, qu'elles soient spatiales ou temporelles. Reste à déterminer quels peuvent être les liens entre les différentes échelles et les différents pas de temps. Le comportement du système analysé étant spécifique à l'échelle d'organisation où il se situe.

Qu'importe l'échelle d'analyse et d'application de politiques publiques, tant que la vision technocratique laisse progressivement place à une démarche participative centrée sur la stratégie et l'action. Thierry Joliveau (2001) remarque que « *si les objectifs à long terme divergent évidemment [...], la participation, en son sens social et politique, est perçue comme largement positive* ». Ignacy Sachs met en exergue, avec la doctrine de l'écodéveloppement, le fait que « *l'autonomie des décisions (self-reliance) doit prévaloir aux niveaux individuel et collectif [...] et que chaque communauté définisse par elle-même un projet social global qui apparaisse comme son propre style de développement* » (Vivien, 2005, p. 87). Ce projet social s'appuie sur la planification participative qui se veut être, par l'intermédiaire d'un planificateur, un outil essentiel pour la prospective et l'exploration des options de développement à l'échelle locale. Dans la logique d'un dépassement de la sphère technocratique dans les prises de décisions, afin de valoriser le local, Patrice Mann (1991, p.50) remarque que le consensus nécessaire à l'action collective ne se réalise pas toujours autour d'enjeux communs à l'ensemble des groupes sous le guidage d'une unité centralisatrice : il se construit parfois au niveau de chaque unité d'action puis, progressivement, par rapport aux opportunités qui s'ouvrent à d'autres unités d'action compte tenu de la trajectoire prise par le ou les mouvements.

Enfin l'enjeu réside dans la prise en compte des crises, des bifurcations, des réajustements (Miossec, Arnould et Veyret, 2004) c'est-à-dire considérer l'histoire comme un processus discontinu, comme « *une alternance de phases plus ou moins stationnaires et de ruptures brutales porteuses de développement, indéterminables à l'avance* » (Mancebo, 2007). L'incertitude devient alors un fil conducteur des réflexions prospectives.

2.1.3. La sylviculture : état de l'art

La sylviculture (appelée aussi *foresterie*) se définit étymologiquement comme la *culture des forêts* (du latin *silvae* : les forêts). Reconnue comme un art et une science⁸⁹⁹⁰, sa

⁸⁹ *Forestry is the art (skill), practice, science and business of managing forested landscapes to sustain a desired balance of values and environmental services from those landscapes* (Modified after Dunster and Dunster 1996, in : Kimmins, 2002, p.264)

caractéristique première est la production de biens et de services pour les sociétés (Dunster and Dunster 1996, in : Kimmins, 2002 ; FAO, 2004) tout en donnant « *la priorité aux fonctions que remplit la forêt afin d'éviter des interventions négatives qui cherchent seulement à atteindre des objectifs économiques* » (Saez, 2005, p.231). Cette remarque avancée par Nicolas Saéz suggère une variété de pratiques sylvicoles ayant, à des degrés divers, un impact sur l'environnement et les sociétés.

2.1.3.1. Plusieurs types de sylviculture

« *La sylviculture commença à des moments et des lieux différents à travers le monde à mesure que la demande en bois par les sociétés dépassait le volume obtainable par l'exploitation de la forêt naturelle* » (Seymour et Hunter, 1999, p.22). Ces auteurs recensent six modèles de sylviculture : (i) sylviculture de préservation (*custodial forestry*), (ii) sylviculture de rendement soutenable de production de bois (*sustained-yield timber production forestry*), (iii) sylviculture multi-usage (*multiple-use forestry*), (iv) sylviculture de production (*production silviculture*), (v) sylviculture extensive (*extensive forestry*) et (vi) sylviculture écologique (*ecological forestry*). En tenant compte de l'état des pratiques sylvicoles au Chili, nous nous référerons aux trois catégories proposées par J.P Schutz (1990) dans son *Principe d'éducation des forêts*.

Tout d'abord la sylviculture écologique qui se rapproche de l'*ecological forestry* voire de la *custodial forestry*⁹¹, renonce totalement et par principe à la production de bois. Les zones protégées faisant partie du Sistema Nacional de Areas Silvestres Protegidas del Estado⁹² (SNASPE) et gérées par la CONAF en font partie. Cette sylviculture « *met l'accent sur les patrons et les processus naturels : l'objectif est de les comprendre, de travailler en harmonie avec eux, de maintenir leur intégrité, même si cela devient difficile ou gênant de le faire* » (Seymour et Hunter, 1999, p.29).

La sylviculture multifonctionnelle perçoit la forêt comme un écosystème naturel qu'il convient d'utiliser sans abuser, c'est-à-dire en respectant son intégrité et son renouvellement. Son but réside dans une utilisation aussi rationnelle que possible de toutes les ressources matérielles et immatérielles que fournit la forêt (Schütz, 1990). Elle se rattache au courant de pensée de l'économie écologique qui réfléchit à une possible coévolution entre les écosystèmes et les systèmes économiques, et aux modèles bioéconomiques. Ici la ressource biologique est considérée comme une sorte de capital naturel (vision très économiciste de la nature) dont il importe d'optimiser la gestion dans le long terme. Un des objectifs à atteindre

⁹⁰ *The art and science of controlling the establishment, growth, composition, health and quality of forest and woodlands to meet the targeted diverse needs and values of landowners and society on a sustainable basis* (FAO, 2004, p.33)

⁹¹ Cette sylviculture se focalise sur la protection des incendies, sur de faibles niveaux de récoltes et sur la régénération naturelle. Cette vision se rapproche des études réalisées par le groupe de travail ANW (Arbeitsgemeinschaft Naturgemasse Waldwirtschaft) principalement sur la valorisation de la ressource forestière en tant que biens de production.

⁹² Créé par la loi n ° 18362 de 1984, ce système vise à la protection et à la conservation des milieux naturels, terrestres ou aquatiques et regroupe des parcs naturels.

est celui de rendement maximum soutenable (*maximum sustainable yield*), autrement dit la quantité maximale de ressources susceptibles d'être exploitée à chaque période sans remettre en question leur capacité à se régénérer (Vivien, 2005).

Enfin la sylviculture monofonctionnelle (intensive), qui se fonde sur l'efficacité productive, nous intéresse plus particulièrement car elle concerne directement les plantations industrielles. Elle est « *fondée sur la plantation d'essences à haut rendement, à croissance rapide, en monocultures réalisables à relativement courtes révolutions, qui n'hésite pas à utiliser la panoplie de mesures artificielles d'amélioration de la production propre à l'agriculture, à savoir : l'assolement, l'application de pesticides et l'utilisation des améliorations génétiques de pointe* » (Schütz, 1990, p.19). Ces moyens priment ainsi sur la préservation de la dynamique naturelle de l'écosystème forestier.

2.1.3.2. La sylviculture intensive

La communauté scientifique emploie communément le terme de sylviculture intensive afin de caractériser ce type de pratique (Dumouchel, 2010) pour la France, (Dallaire, 2009) pour le Québec, (Du Toit, 2009) pour l'Afrique du Sud, (Soekotjo, 2009) pour l'Indonésie, (Brockerhoff, 2008) pour la Nouvelle-Zélande, (Sadanandan, 1999) pour l'Australie, (Binkley et Stape, 2004 ; Evans, 2009) pour les Etats-Unis, (Schlatter, 1998, Vergara J.T., 2004, Donoso et Otero, 2005, Toral, 2007) pour le Chili, ce dernier parlant même de sylviculture intégrée. Cependant, avec des plantations monospécifiques et les nombreuses interventions qui tendent continuellement à une optimisation des espèces et des cultures, de nouvelles terminologies émergent telles que la sylviculture dite *élite* (Dumouchel, 2010, p.13), qui correspond à une « *sylviculture intensive à laquelle on ajoute l'élagage des tiges, l'amélioration de la productivité du site et l'utilisation d'essences exotiques* ». D'autres auteurs font référence à la *ligniculture* qui caractériserait « *une plantation plus ou moins homogène d'espèces à croissance rapide et à fort potentiel de valorisation* » (SASFQ, 2007d, in : Dallaire, 2009, p.34), voire la « *culture intensive des arbres en plantation de courte révolution en vue d'obtenir le maximum de rendement de matière ligneuse* » (Morissette - Réseau Ligniculture Québec, 2010). C.P. Mitchell, E.A. Stevens et M.P. Watters (1999) emploient le terme de sylviculture à courte rotation (*short-rotation forestry*) pour désigner les activités qui se destinent à la production de matières premières lignocellulosiques pour la pulpe⁹³.

Indépendamment de son appellation, cette sylviculture s'identifie clairement par une recherche d'accroissement de la productivité, c'est-à-dire par l'augmentation du rapport entre la production forestière et les facteurs mis en œuvre pour la réaliser (travail et capital). L'accroissement de la production est également un objectif majeur, car elle permet aux entreprises d'être compétitives en proposant des produits à moindres coûts, par le biais d'économie d'échelle. La manipulation génétique et la coupe rase (*clear-cutting* ou *clearfelling*) sont deux des principaux facteurs qui contribuent à ces objectifs.

⁹³ Short-rotation forestry (SRF) en Suède, short-rotation intensive culture (SRIC) aux Etats-Unis et short-rotation coppice (SRC) en Angleterre.

LA MANIPULATION GENETIQUE

L'amélioration des espèces végétales par la génétique « *a pour but de développer des variétés qui augmentent la quantité et la qualité des produits récoltés* »⁹⁴ (White, Adams et Neale, 2007, p.1). Par cette maximisation de la productivité s'exprime la dimension temporelle de la sylviculture intensive en faisant directement référence à la résilience des plantations et à leur croissance accélérée. Manuel Torral Ibáñez (2007) observe que les espèces forestières (pins et eucalyptus) présentent de grandes capacités de résistance face à certaines perturbations⁹⁵ externes telles que les insectes et champignons, les bactéries et quelques produits chimiques.

CLEAR-CUTTING

La coupe rase est une zone de forêt qui a été complètement rasée de ses arbres, autres que des semis ou que d'occasionnels jeunes arbres. J.P. -Hamish- Kimmins (1997, p.75-76) explique que la définition de coupe rase ne se limite pas à de simples activités de coupes. L'altération des conditions microclimatiques (ombre, température de l'air diurne et nocturne, température du sol, humidité de l'air) engendrée par la superficie et la géométrie de la coupe est à prendre en considération. L'inscription spatiale de ces deux éléments facilite la caractérisation, la détection d'une coupe rase (figure 22) et sa distinction face à d'autres formes d'occupation du sol.

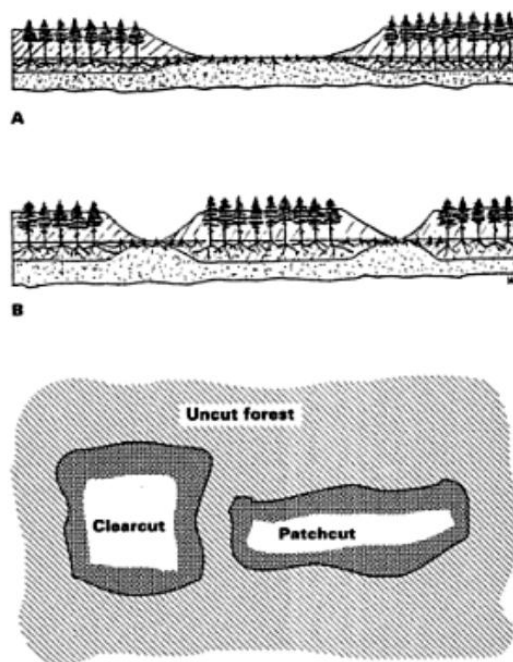


Figure 22 : Comparaison entre une coupe rase (A) et un patchcut (B). La coupe rase dépend plus de la forme que de la superficie. Source : Kimmins, 1997

⁹⁴ « *Like breeding programs for crops and farm animals, tree improvement aims to develop varieties that increase the quantity and quality of harvested products* ».

⁹⁵ D'après Louise Fresco et Salomon Kroonenberg (1992, p.159) « *les perturbations peuvent être des interruptions dues à des processus externes d'une magnitude plus importante que les limites de stabilité de la soutenabilité (ex : catastrophes naturelles)* »

2.1.4. Sylviculture et développement soutenable

2.1.4.1. L'avènement de la soutenabilité des pratiques sylvicoles

« *Les années 1980 ont vu une crise environnementale se développer dans le secteur forestier. De fait, au cours de ces années, la dégradation de l'état des forêts ainsi que l'aggravation de la déforestation sont devenues des préoccupations majeures pour l'opinion publique et certains gouvernements et organisations* » (Cashore, 2003 in Lafrance, 2007). C'est dans cette optique que la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement (UNCED), qui s'est déroulée à Rio De Janeiro en juin 1992, a cherché à aider les gouvernements « *à repenser le développement économique et trouver des moyens pour enrayer la destruction de ressources naturelles irremplaçables ainsi que la pollution de la planète* » (UNCED⁹⁶). Les enjeux soulevés par l'usage des forêts au cours du sommet ont débouché sur l'approbation et l'adoption de Principes relatifs aux Forêts⁹⁷ (Sizer, 1994) officiellement appelés « *Déclaration de Principes juridiquement non-contraignants mais faisant autorité, pour un consensus mondial sur la gestion, la conservation et le développement durable de tous les types de forêts* »⁹⁸. Si l'objectif est clairement explicité dans l'appellation, l'UNCED incite les gouvernements à la coopération internationale dans le but d'appliquer des politiques nationales et appelle à un soutien technique et financier supplémentaire pour les pays en développement pour promouvoir l'utilisation durable des forêts (Sizer, 1994) notamment par la mise en place de critères communs de sylviculture soutenable.

C'est ainsi que furent créés des groupes de travail destinés à mettre en place un ensemble de critères et d'indicateurs (C&I), à l'image du Processus de Montréal (1994) qui travailla sur des C&I de la conservation et de l'aménagement soutenable des forêts des régions tempérées et boréales⁹⁹. Il s'étend aux pays des hémisphères nord et sud, mis à part les forêts d'Europe, visées, quant à elles, par le processus d'Helsinki (1993).

De juin 1994 à février 1995, les pays du Processus de Montréal se sont rencontrés cinq fois afin de poursuivre l'élaboration de critères et d'indicateurs reconnus mondialement. À la sixième réunion du Groupe de travail à Santiago du Chili, en février 1995, les 10 premiers pays participants ont avalisé un énoncé d'engagement politique connu sous le nom de Déclaration de Santiago, puis un ensemble exhaustif de critères et d'indicateurs pour la conservation et l'aménagement durable des forêts boréales et tempérées, destinés à leurs décideurs respectifs au niveau national (Buchanan, 2005, p.25).

Un critère est une catégorie de conditions ou de processus essentiels qui permettent d'évaluer l'aménagement forestier durable. « *Le critère se caractérise par un ensemble d'indicateurs connexes, contrôlés périodiquement afin d'évaluer un changement* » (Buchanan, 2005, p.21), mais ne comprennent pas les enjeux industriels pour la fabrication de

⁹⁶ <http://www.un.org/geninfo/bp/enviro.html>

⁹⁷ The Forest Principles

⁹⁸ <http://www.un.org/documents/ga/conf151/aconf15126-3annex3.htm>

⁹⁹ Les pays membres du Groupe de travail du Processus de Montréal sont l'Argentine, l'Australie, le Canada, le Chili, la Chine, le Japon, la République de Corée, le Mexique, la Nouvelle-Zélande, la Fédération de Russie, les Etats-Unis d'Amérique et l'Uruguay.

papier ou de produits en bois massif (Brand, 1997). Ces indicateurs sont au nombre de 67 (Buchanan, 2005, p.45-50).

Voici les sept critères qui ont été mis en place suite à la déclaration de Santiago :

1. Maintien de la diversité biologique;
2. Préservation de la capacité de production des écosystèmes forestiers;
3. Maintien de la santé et de la vitalité des écosystèmes forestiers;
4. Conservation et maintien des ressources pédologiques et hydriques;
5. Maintien de la contribution des forêts au cycle planétaire du carbone;
6. Maintien et accroissement des avantages socio-économiques à long terme pour répondre aux besoins de la société;
7. Cadre juridique, institutionnel et économique pour la conservation et l'aménagement durable des forêts.

2.1.4.2. La certification forestière

L'adoption de ces C&I a rapidement vu apparaître des industriels de la forêt ainsi que des ONG désireux de construire leurs propres critères de certification forestière. La certification d'aménagement forestier soutenable consiste en la « *délivrance, par un organisme indépendant, d'un certificat garantissant le respect d'un certain nombre de critères de gestion des ressources naturelles d'où sont issus les produits commercialisés. Ces derniers peuvent ensuite être identifiés par les consommateurs grâce à un étiquetage spécifique, donnant une visibilité à la certification* » (Guéneau, 2001 in Lafrance, 2007). La certification peut suivre soit des critères substantifs, soit des critères procéduraux ou les deux (Lafrance, 2007, p. 23). Cependant les critères des différents systèmes de certifications ne sont pas nécessairement communs. Il existe quatre types de certification forestière au Chili. La certification Forest Stewardship Council (FSC), FSC Chile, le CERTFOR Chile et l'ISO 14.001¹⁰⁰.

a) Forest Stewardship Council (FSC) et le FSC Chile

Le FSC a été créé en 1993 en tant qu'association à but non lucratif composée de membres du secteur forestier, à l'exception des instances gouvernementales, en raison de l'« inefficacité » des gouvernements à réagir aux problèmes des forêts et de l'inévitable ralentissement dans les négociations que la présence de gouvernements aurait entraîné. Cette ONG est dirigée par le WWF et le World Resources Institute (WRI).

Les membres du FSC ont développé des principes et critères¹⁰¹ de gestion durable. Dans le cadre du FSC ces derniers touchent des aspects tels le respect des lois, les droits et responsabilités foncières et usages, les droits de peuples indigènes, les droits des travailleurs, les relations avec les communautés, les impacts sur l'environnement, le plan d'aménagement et le maintien des forêts ayant une grande valeur de conservation (FSC, 2004¹⁰²).

¹⁰⁰ Il existe aussi, mais dans d'autres pays, le PEFC (Pan European Forest Council), le SFI (Sustainable Forestry initiative) d'origine américaine, le Malaysian Timber Certification Council, ect.

¹⁰¹ Ces principes sont consultables sur ce site : http://www.canopees.org/fsc_qc/fr/principes.html

¹⁰² <http://www.fsc.org/>

Cette association n'émet pas de certificat. Son rôle est plutôt de « certifier des certificateurs », c'est-à-dire des organismes indépendants qui seront en charge d'effectuer des audits auprès des opérations forestières désirant se certifier (MacMahon, 1999 ; Lafrance, 2007).



Figure 23 : Logo du Forest Stewardship Council. Source: FSC, 2011

Le FSC Chile a été créé en 1998 au Chili par un groupe de personnes liées au secteur forestier, pour lancer le processus de certification FSC. En 2002 ce groupe forma l'initiative Chilena de Certificación Forestal Independiente (ICEFI) avec pour objectif de développer les standards nationaux de certification basés sur les principes et critères du Conseil de Gestion Forestière (FSC) pour les forêts natives et les plantations commerciales. Elle a aussi comme objectif de promouvoir le système de certification FSC et d'évaluer l'application de ses standards.

b) Sistema Chileno de Certificación de Manejo Forestal Sustentable (CERTFOR)

Le CERTFOR est né au Chili en 2002 (et homologué par le PEFC¹⁰³ en octobre 2004) par la volonté des entreprises forestières désireuses d'être soutenues dans leur production. La mission clairement définie est de devenir « *un référent institutionnel de classe mondiale pour la promotion de la durabilité de la forêt, en établissant les bases d'un processus participatif qui donne naissance à un nouveau système de gestion publique et privée, visant à exploiter le potentiel national en matière d'utilisation, d'entretien, d'enrichissement et de préservation des ressources forestières nationales* ». Pour CERTFOR, l'important est de faciliter les échanges commerciaux de produits forestiers par l'ouverture de nouveaux marchés ou par le renforcement de ceux qui existaient déjà. La superficie forestière certifiée est en constante évolution, de 930 000 hectares en 2003 elle atteint en 2010 les 1,9M d'ha (figure 25).



Figure 24 : Logo CERTFOR Chile. Source : CERTFOR Chile, 2011

¹⁰³ Program for the Endorsement of Forest Certification. Cette organisation a été créée en 1999 une association de propriétaires forestiers européens. Elle compte aujourd'hui près de 234 millions d'hectares de forêts certifiées (données publiquement consultables sur le site internet du PEFC, août 2011).

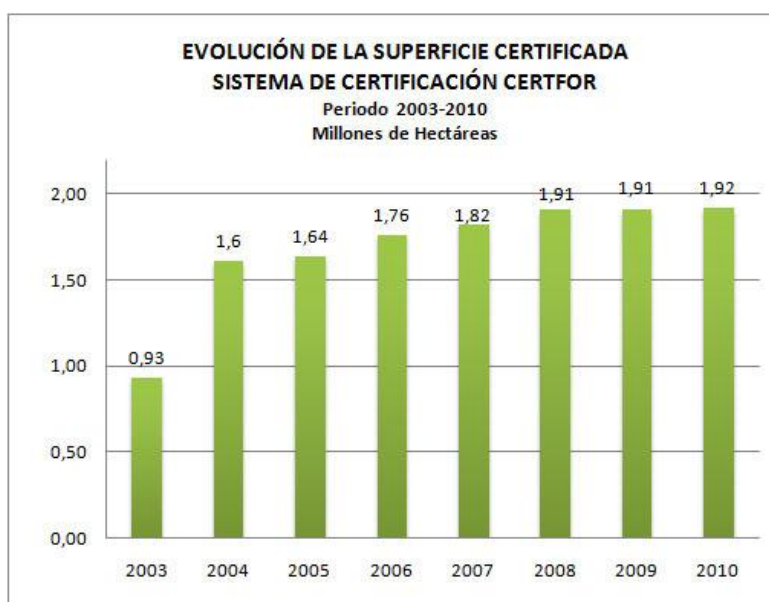


Figure 25 : Evolution de la superficie forestière certifiée par le système de certification CERTFOR.
Source : CERTFOR. <http://www.certfor.org/index.html>

c) ISO 14.0001

Enfin l'ISO 14 001 a été réalisée par l'Organisation internationale de normalisation, désignée internationalement sous son sigle d'origine ISO (International Organization for Standardization) en 1996. Elle prescrit les exigences relatives à un système de Management Environnemental (S.M.E.) permettant à un organisme de formuler une politique et des objectifs prenant en compte les exigences législatives et les informations relatives aux impacts environnementaux significatifs. *L'ISO 14001 n'impose aucun seuil réglementaire en matière d'environnement. Une entreprise peut être certifiée même si elle n'est pas en totale conformité avec la réglementation. Toutefois, cela ne doit pas concerner un risque majeur pour l'environnement, la non-conformité doit avoir été détectée et un plan d'actions doit être prévu pour remédier dans des délais raisonnables à la situation* (CCIP, 2008)¹⁰⁴.



Figure 26 : Logo ISO. Source : ISO, 2011¹⁰⁵

2.1.4.3. Etat des lieux de la situation chilienne

Selon les statistiques de l'INFOR (2005), 91,3 % des plantations sont certifiées, sachant que la surface occupée par les plantations atteint les 2,07 millions d'hectares. L'ISO 14.001 et le CERTFOR/ISO 14.001 sont les deux principaux systèmes de certification en termes de surfaces couvertes avec respectivement 1,69M d'ha (81,7%) et 1,57M d'ha (75,5%). Le FSC ne

¹⁰⁴ <http://www.entreprises.ccip.fr/web/environnement/developpement-durable/demarche-environnementale/certification-internationale-iso-14001>

¹⁰⁵ <http://www.iso.org/iso/fr/>

compte que 368 667 ha de plantation soit 10% de la superficie totale (figure 27)¹⁰⁶. La prédominance de l'ISO 14.001 s'explique par sa flexibilité et les avantages qu'elle procure aux entreprises forestières en matière de gestion environnementale, ainsi que par sa recherche de « *standardisation à l'échelle internationale pour favoriser le commerce et les interrelations multilatérales* » (Rodríguez et Luz de la Maza, 2007, p.82).

La faible part de plantations certifiées par le FSC est révélatrice des directives édictées par ces organismes (FSC et CERTFOR-PEFC). Olivier Damette et Philippe Delacote (2011) remarquent que le FSC est un mécanisme basé essentiellement sur la performance (*performance-based*) et dont le haut niveau d'exigences peut être pris comme un manque de flexibilité, limitant l'intégration des gestionnaires forestiers les moins performants au système. Le PEFC se base quant à lui sur le système (*system-based*) (avec des critères de conception de gestion forestière pour atteindre la performance environnementale)¹⁰⁷. Ces critères provenant des industriels (« *self-certification* ») sont beaucoup plus flexibles et donc moins contraignants que ceux du FSC. Ce manque de flexibilité est également mis en avant par Benjamin Cashore *et al.* (2004), en illustrant (tableau 9) les différentes conceptions au sujet des procédures et des règles qui régissent la gestion soutenable des écosystèmes forestiers. Ce tableau montre clairement que les directives qui émanent du FSC sont beaucoup plus restrictives et contraignantes que celles émanant du PEFC (pas de création de nouvelles plantations, pas de manipulation génétique).

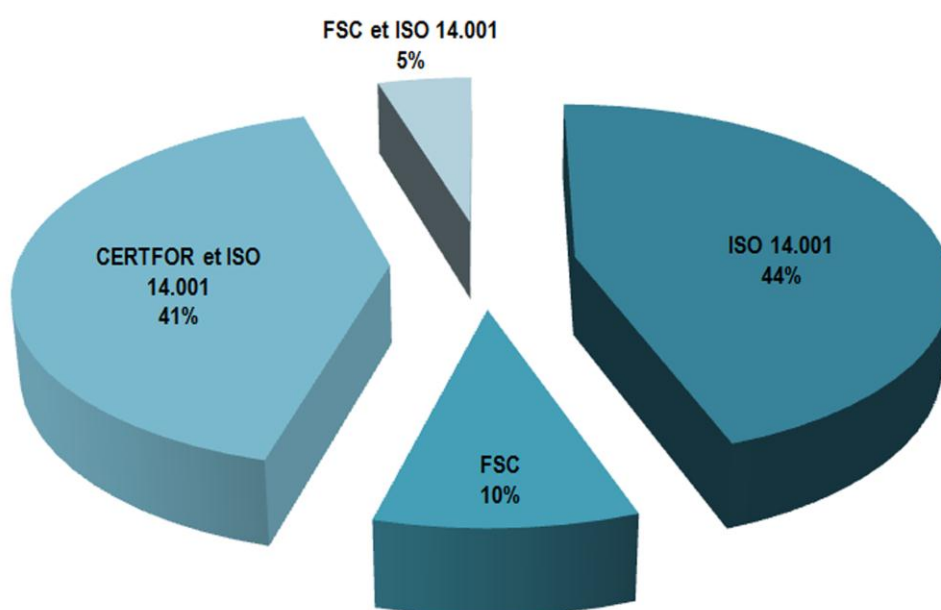


Figure 27 : Part des plantations industrielles selon le système de certification. Source : INFOR, 2005

¹⁰⁶ Manuel Rodríguez *et al.* (2007, p.89) explique qu'il est possible de présenter « *une double certification, ISO 14.0001 et FSC, afin de satisfaire la demande des consommateurs qui exigent la certification du produit et une chaîne de traçabilité* ». La figure présente une deuxième double certification (CERTFOR et ISO 14.001).

¹⁰⁷ Les auteurs expliquent que le PEFC dispose d'un cadre pour le développement de systèmes de certification nationaux et locaux. Ces différents systèmes peuvent créer des incohérences dans l'hétérogénéité et la qualité réelle des produits certifiés PEFC.

En ce qui concerne les forêts natives, leur part dans le système de certification est moindre vis-à-vis des plantations exotiques¹⁰⁸. Sur un total national de 13,4M d’hectares, seuls 47 943 sont certifiés FSC, soit 0,35%. Les déséquilibres en termes de certification sont révélateurs de l’importance accordée à ce type de ressource forestière. De plus, certains auteurs ont remis en question les objectifs du système de certification, en se demandant s’il existe aujourd’hui une convergence forte entre les discours et les pratiques. « *La féroce bataille de communication que se livrent les différents systèmes de certification, [...], démontre aisément que les enjeux financiers éclipsent bien souvent les préoccupations sociales ou environnementales* » (Arnould et Clément, 2004).

| Problème | PROGRAMME | |
|-----------------------------------|--|---|
| | FSC | PEFC* |
| Plantation | Limite l’établissement de nouvelles plantations ; certaines plantations existantes ne sont pas admissibles | Pas spécifiquement abordé |
| Produit chimique | Minimiser et contrôler l’utilisation ; certains produits sont bannis | Utilisation réduite |
| Coupe rase | Taille et localisation limitées (varie selon les régions) | Pas de politique spécifique (varie en fonction des initiatives nationales) |
| Organismes Génétiquement Modifiés | Interdit | La plupart des initiatives nationales n’interdisent pas son usage (UK et la France sont des exceptions) |
| Exotiques | Permis, mais pas encouragé ; utilisation contrôlée | Permis, mais pas encouragé |
| Réserves | Identifie les sites importants et s’assure de la protection | Identifie les sites importants ; gestion à la discrétion des entreprises/propriétaires |
| Zone lacustre | Récoltes limitées ou interdites selon les zones ; règles plus stricts lorsque les récoltes sont permises | Suit les directives gouvernementales, développe des programmes (varie en fonction des initiatives nationales) |

Tableau 9 : Comparaison des programmes de certification du FSC et du PEFC (été 2002).

Source : Cashore et al., 2004, p.18-19.* *Le PEFC est difficilement comparable avec les autres programmes car il dépend de directives nationales. Dans certains pays (Suède, Angleterre), ces règles sont semblables à celles du FSC, alors qu’elles se différencient fortement en Allemagne ou en Finlande (note de l’auteur).*

2.2. Land-Use and Cover Change (LUCC) et « drivers »: état de l’art

L’anthropisation des milieux naturels n’est pas un phénomène nouveau, mais son intensité et ses conséquences à travers le monde, aussi bien à l’échelle locale que planétaire, questionnent la communauté scientifique. La capacité des sociétés à modifier les équilibres planétaires, caractéristique de la révolution cybernétique décrite par P. Dansereau et W. Sassin, (Demangeot, 2000, p.5), prit effet à partir de 1968. Or la compréhension des processus d’utilisation et de transformation des sols reste bien souvent en retard face à cette capacité de transformation¹⁰⁹ (Vitousek et al., 1997). Depuis la publication de Peter M. Vitousek et al.

¹⁰⁸ Les espèces incluses dans l’appellation « plantations » sont : l’Atriplex, l’Algarrobo/Tamarugo, Alamo, Eucalyptus, Pin contorta, P. oregon, P. ponderosa, P. radiata, et autres espèces. (INFOR, 2005)

¹⁰⁹ « *We are changing Earth more rapidly than we are understanding it* » (Vitousek, 1997, p.498)

« *Human Domination of Earth's Ecosystems* » dans la revue *Science*, de nombreuses études ont alimenté la connaissance desdits processus. « *Over the last few decades, numerous researchers have improved measurement of land-cover change, the understanding of the causes of land-use change, and predictive models of land-use/cover change, in part under the auspices of the Land-Use and Land-Cover Change (LUCC) project of the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) and International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP)* » (Lambin, Geist et Rindfuss, 2006, p.1). Ces avancées permettent d'appréhender avec une plus grande précision la complexité des dynamiques spatio-temporelles des problématiques soulevées par le DS, et plus spécifiquement les pratiques sylvicoles intensives dans le centre-sud chilien, en apportant des pistes de réflexion pour les décideurs. LUCC « *has been indicated as one of the high priority concerns for research and for the development of strategies for sustainable management* » (Turner, Moss, & Skole, 1993; Vitousek, 1994, in : Schultz, 2010, p.437).

2.2.1. Land Use and Cover Change

Dans un article du *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), B. L. Turner II, Eric F. Lambin et Anette Reenberg (2007) se focalisent sur l'émergence de la science des changements d'utilisation¹¹⁰ et d'occupation du sol (LUCC). Au-delà d'une date d'apparition, c'est à travers le contexte environnemental à l'échelle internationale, et par la volonté des décideurs, que l'étude des LUCC prend tout son sens. La publication du rapport Brundtland en 1987 fut suivie, la même année, par la création de l'IGBP. L'objectif est d'apporter aux sociétés une vision scientifique du système terrestre et de favoriser l'émergence de politiques de développement soutenable. L'IGBP compte actuellement douze projets internationaux (IGBP – PHASE II), alors que la première phase en dénombrait six avec : (i) BAHC – Biosphere Aspects of the Hydrological Cycle (1991-2003), DIS – Data and Information Systems (1993-2001), GAIM – Global Analysis Integration and Modelling (1993-2004), GCTE – Global Change and Terrestrial Ecosystems (1992-2003), JGOFS – Joint Global Ocean Flux Study (1988-2003) et LUCC – Land Use and Cover Change¹¹¹ (1994-2005).

Avec ce projet, la science des LUCC vise à améliorer : (i) l'observation et le suivi des changements d'occupation/utilisation du sol en cours à travers le monde (SIG - télédétection), (ii) la compréhension de ces changements en tant que système couplé homme–environnement (identification des facteurs explicatifs), (iii) la modélisation spatialement explicite du changement d'occupation/utilisation du sol (modèles et scénarii), et (iv) l'estimation des

¹¹⁰ Roger Brunet (1992) définit l'utilisation du sol comme « *l'affectation du sol et des parcelles à des usages déterminés (agriculture, habitation, industries, circulation)* » et l'occupation du sol comme « *un mode d'affectation de l'étendue à des usages, des activités déterminées, à un moment donné* », ce qui rend les deux définitions similaires. Au contraire Peter H. Verburg *et al.* (2009, p.1328) considèrent que: « *land cover addresses the layer of soils and biomass, including natural vegetation, crops and human structures that cover the land surface. Land use in contrast refers to the purposes for which humans exploit the land cover and includes the land management practices* ».

¹¹¹ <http://www.igbp.net/4.1b8ae20512db692f2a680009062.html>

conséquences engendrées par le système, telles que la vulnérabilité, la résilience, ou la soutenabilité (évaluation) (Turner *et al.*, 2007, p. 20666). De tels objectifs obligent la communauté scientifique à privilégier une approche interdisciplinaire afin d’optimiser les méthodes d’analyses qui permettront d’appréhender la complexité caractéristique de chaque système (De Rosnay, 1975, p.101). D’après Peter M. Vitousek *et al.* (1997, p.495) « *this interdisciplinary approach is essential to predicting the course, and to any hope of affecting the consequences, of human-caused land transformation* ». Les avancées scientifiques réalisées au sein du Projet Lucc sont aujourd’hui, conjointement au Global Change and Terrestrial Ecosystems (GCTE), au bénéfice du Global Land Project (GLP)¹¹².

2.2.2. La télédétection

« Remote sensing is an essential tool of land-change science because it facilitates observations across larger extents of Earth’s surface than is possible by ground-based observations » (Ellis, 2010).

« Lorsqu’on change d’échelle les phénomènes changent non seulement de grandeur mais aussi de nature » (Dollfus, 1970, p.22, in : Dolidon, 2005, p.16). Les stratégies d’une entreprise forestière ne s’appréhendent pas de la même façon que les objectifs visés par un petit propriétaire. Les prises de décision de même que les objectifs d’un groupe à une échelle¹¹³ donnée peuvent être générateurs de conflits à cette même échelle mais aussi aux autres échelles (Laborte, Van Ittersum et Van den Berg, 2007).

S’intéressant à la multiplicité des échelles dans l’analyse des feux de brousse en Afrique de l’Ouest, Hélène Dolidon note qu’au regard de la complexité de ce système « [...] leur distribution ne peut pas être analysée et interprétée de la même façon à petite, moyenne et grande échelle car elle répond à des problématiques différentes selon le cadre d’observation. D’autre part, toutes ces échelles d’observation sont nécessaires et complémentaires pour exposer « les tenants et les aboutissants » du phénomène dans sa complexité » (Dolidon, 2007). Les différentes logiques de (re-)boisement dans le centre-sud chilien n’ont effectivement pas la même emprise spatiale ni la même échelle temporelle, d’où la nécessité de s’appuyer sur une analyse multi-scalaire¹¹⁴ (étendue et résolution) afin d’appréhender au mieux la localisation, l’intensité et les facteurs explicatifs des changements d’occupation/utilisation du sol (Kok et Velkamp, 2001 ; Geores, 2003).

La science des Lucc fait systématiquement recours à la télédétection pour mesurer et suivre l’évolution des dynamiques environnementales (Anderson *et al.*, 1976 ; Turner *et al.*,

¹¹² <http://www.globallandproject.org/index.shtml>

¹¹³ Parler de niveau serait plus approprié comme le notent Frank Ewert *et al.* (2006). Le terme de niveau se réfère au niveau d’organisation dans un système organisé hiérarchiquement. Les auteurs remarquent cependant que « *moving up the organizational hierarchy from one level to the next usually implies that relevant spatial and temporal scales also change* » (2006, p.2)

¹¹⁴ D’après Robert Costanza et Alexey Voinov (2004, p.7) « *the term ‘scale’ [...] refers to both the resolution (spatial grain size, time step, or degree of complexity of the model) and extent (in time, space, and number of components modeled) of the analysis* ».

1990 ; Goodchild, Parks et Steyaert, 1993 ; Vitousek *et al.*, 1997 ; Veldkamp et Lambin, 2001 ; LUC report n°6, 2002 ; Wulder et Franklin, 2003 ; Gutman *et al.*, 2004 ; Verburg *et al.*, 2004 ; Ramankutty *et al.*, 2006 ; Echeverría, 2008 ; Paegelow et Olmedo, 2008 ; Houet *et al.*, 2010). C'est un outil de mesure privilégié car il permet, en fonction de la disponibilité des images satellitales et/ou des photographies aériennes, d'élaborer une analyse détaillée desdites dynamiques avec un gradient spatio-temporel étendu¹¹⁵. « [...], *remote sensing data and analysis made important contributions in documenting the actual changes in land cover at regional and global spatial scales from the mid-1970s onwards* » (Lambin *et al.*, 2006, p.2). Les projets internationaux se sont à maintes fois tournés vers l'imagerie à moyenne/faible résolution pour étudier l'occupation du sol à l'échelle internationale (NASA Pathfinder Humid Tropical Deforestation project ; SAFARI 2000 Southern African Regional Science Initiative ; Earth Science Information Partnership (ESIP) program). En synthétisant les limites de l'imagerie à (très) haute résolution spatiale (LANDSAT, SPOT, QUICKBIRD, etc.), Navin Ramankutty *et al.* (2006) mettent en exergue l'intérêt porté par la communauté scientifique sur le suivi de l'occupation du sol aux échelles régionales et/ou mondiales (tableau 10). Cette distinction n'enlève en rien à l'utilité des images satellitales à hautes résolutions telles que LANDSAT (cf. chapitre 3, p. 140), qui représente « *the workhorse for the land-cover change studies, and has been used extensively to study land-cover change around the world* » (Ramankutty *et al.*, 2006, p.34).

¹¹⁵ Il existe de nombreuses méthodes pour la détection de changements comme l'analyse de la différence entre images (Ballut et Nguyen, 1984 ; Ridd et Liu, 1998), la soustraction d'images (Fung, 1990 ; Zhang *et al.*, 2002), l'étude des modifications de la morphologie urbaine (Baudot, 1994 ; Dureau, 1990 ; Terretaz, 1998), les indices de différence végétale (Masek *et al.*, 2000), le seuillage d'images (Fung, 1990), l'usage de filtre de passe-haut (Fung, 1990 ; Kwarteng et Chavez, 1998), l'analyse en composantes principales, l'application des réseaux neuronaux (Chen *et al.*, 2004), la régression (Ridd and Liu, 1998), la classification spectrale/temporelle (Xiao *et al.*, 2005 ; Yin *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2002), la comparaison post-classification (Yang et Lo, 2002) ou encore l'approche orientée-objet (He *et al.*, 2005) (source : Skupinski, BinhTran et Weber, 2009, <http://cybergeogeo.revues.org/21995#tocto2n1>).

| Name of product | Creator | Sensor used | Year of data | Spatial resolution | Reference |
|--|--|-----------------|--------------|--------------------|-------------------------------|
| UMD 1 degree land cover | University of Mayland | AVHRR | 1987 | 1 deg | Defries and Townshend (1994) |
| UMD 8 km global land cover | University of Mayland | AVHRR | 1984 | 8 km | Defries <i>et al.</i> (1998) |
| UMD 1 km global land cover | University of Mayland | AVHRR | 1992-1993 | 1 km | Hansen <i>et al.</i> (2000) |
| DISCover | United States Geological Survey’s EROS Data Center, the University of Nebraska-Lincoln, and the Joint Research Centre, Europe Commission | AVHRR | 1992 | 1 km | Loveland <i>et al.</i> (2000) |
| MOD12Q1 | Boston University | MODIS | 2001 | 1 km | Friedl <i>et al.</i> (2002) |
| GLC2000 | Joint Research Centre, European Commission | SPOT VEGETATION | 2000 | 1 km | Bartholomé and Belward (2005) |
| MODIS VCF (Vegetation Continuous Fields) | University of Mayland | MODIS | 2000 | 500 m | Hansen <i>et al.</i> (2003) |
| GLOBCOVER | European Space Agency and EC Joint Research Center | ENVISAT MERIS | 2005 | 300 m | GOFC-GOLD (2005) |

Tableau 10 : Global land cover data sets from Earth observation data.
Source : Ramankutty *et al.*, 2006, p. 35

La télédétection, bien qu’incontournable, n’est qu’une étape du processus de modélisation prospective exposé dans les pages suivantes. Elle permet d’amorcer la phase d’identification des facteurs qui expliquent les changements d’occupation et d’utilisation du sol. « *Monitoring landscape and land use/cover change is considered as an essential first step to assist the identification of driving forces* » (Houet *et al.*, 2010, p.163).

2.2.3. La place des facteurs explicatifs

La capacité réductrice des déterminants globaux, telle que la croissance démographique en tant que « *first-tier driving force of environmental change throughout the history of humankind for the simple biological reasons [...]* » (Kates, Turner et Clark, 1990, p.11) renvoie, une de fois de plus, à l’importance de l’analyse multi-scalaire et à la complexité intrinsèque de chaque système. L’impact des sociétés sur leur environnement ne se résume pas à de simples relations déterministes, mais bien à des interactions et des interrelations de multiples facteurs. « *The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths* » (Lambin *et al.*, 2001) montre clairement qu’au-delà de toute simplification ou “*popular myths*”, les dynamiques environnementales sont le fruit de subtiles logiques locales.

2.2.3.1. Plusieurs catégories de facteurs

La littérature scientifique ne fait pas consensus quant à la nomenclature des variables explicatives, comme en témoignent les quatre références présentées et synthétisées ci-dessous (figure 28).

Pour Robert Kates, B.L. Turner et Williams Clark: « *driving forces* are those actions that change nature from its conditions independent of humankind, whereas *mitigating forces* are those countervailing influences that operate to reduce or alter the driving forces or their impacts » (Kates, Turner et Clark, 1990, p.11). Autrement dit, les *driving forces* ont un impact direct sur les changements d'occupation et d'utilisation du sol, alors que les *mitigating forces* agissent indirectement sur ces dynamiques en exerçant une influence sur leurs causes directes.

Par une analyse de la déforestation sur la base de modèles économétriques, Arild Angelsen et David Kaimowitz distinguent trois niveaux : « *sources* (agents of deforestation), *immediate causes*, and *underlying causes*¹¹⁶ » (Angelsen et Kaimowitz, 1999, p.74). Les sources ou les acteurs sont des entités décisionnelles qui agissent sur leur milieu en fonction de paramètres de décision (*immediates causes*). La combinaison de ces deux niveaux constitue les *driving forces* évoquées précédemment. Le dernier niveau correspond, quant à lui, aux *mitigations forces*.

Peter Verburg, Paul Schot, Martin Dijst et A. Velkamp, citant les recherches de Turner II *et al.* (1995), notent que les facteurs explicatifs se divisent généralement en trois groupes : « *socio-economic drivers*, *biophysical drivers* and *proximate causes* (land management variables) » (Verburg *et al.*, 2004, p.314). Si les acteurs ne sont pas explicitement cités, ils n'en représentent pas moins une partie intégrante des *proximate causes*. Les deux premiers *drivers* sont une déclinaison des *underlying causes*.

Enfin, pour Eric Lambin et Helmut J. Geist (2007), il existe deux catégories de facteurs : (i) *proximate causes* et (ii) *underlying causes*. La première « [...] explain how and why local land-cover and ecosystem processes are modified directly by humans », alors que la seconde, qui caractérise des “*social processes*” aux échelles régionales et/ou globales (Geist et Lambin, 2001, p.2), « explain the broader context and fundamental forces underpinning these local actions ». L'identification des facteurs réalisée dans le chapitre 5 suivra cette logique.

¹¹⁶ *Immediate causes* : causes immédiates ou directes et *underlying causes* : causes sous-jacentes ou indirectes

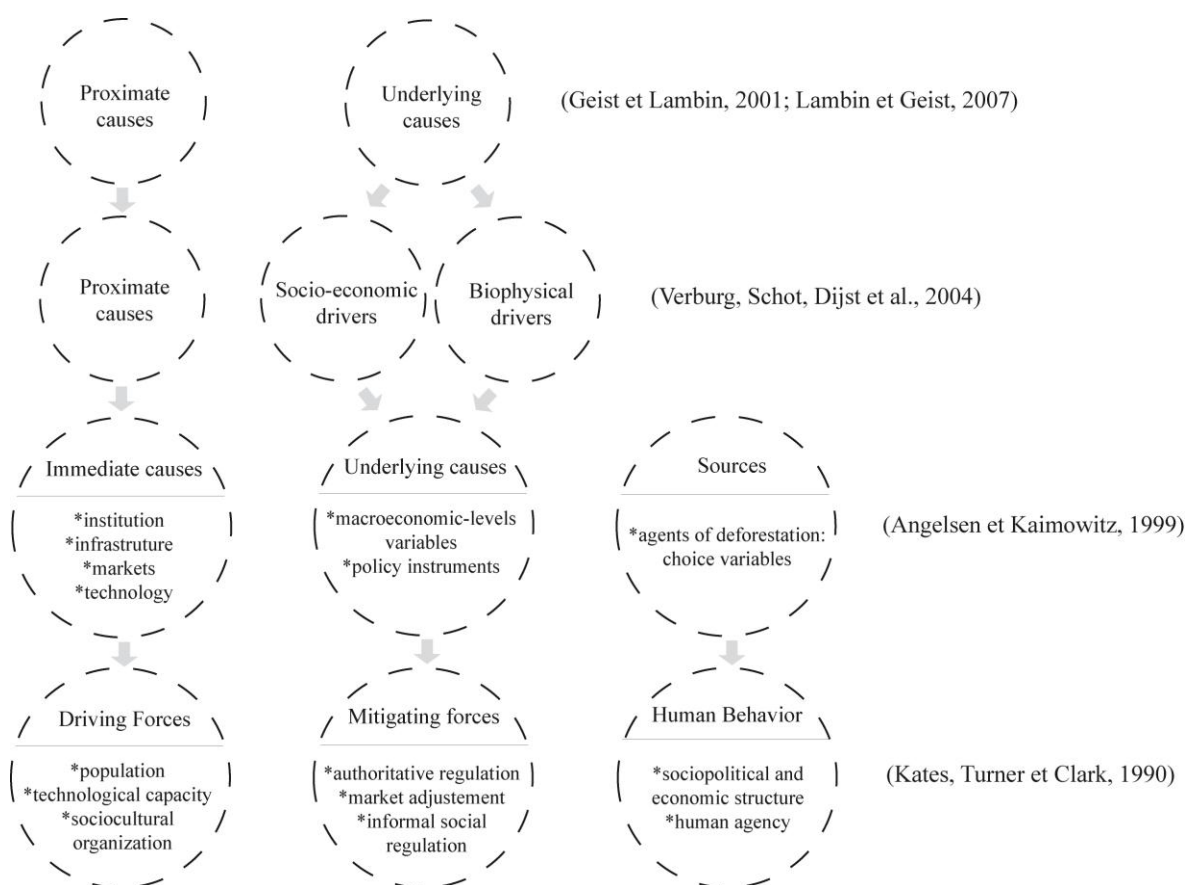


Figure 28 : Synthèse bibliographique relative aux facteurs explicatifs

2.2.3.2. Inter (-dépendances) des facteurs

Bien que certains facteurs opèrent à des échelles bien déterminées, d’autres exercent leur(s) influence(s) à toutes les sphères d’analyse. Les forces motrices à l’échelle mondiale conditionnent les LUCS dans la mesure où elles déterminent l’intensité (atténuations ou amplifications) des facteurs à l’échelle locale (Lambin *et al.*, 2001). Par exemple, la promulgation d’une loi et sa mise en œuvre par un décret (tel que le D.L. 701) émanant de la sphère nationale, peut avoir un impact variable en fonction des facteurs présents à l’échelle locale pour la mettre en œuvre. Ainsi, si une étude comparative était réalisée sur un échantillon de communes, les facteurs (immédiats et sous-jacents), caractéristiques de chacune d’entre-elles, génèreraient des dynamiques spécifiques. D’où l’impossibilité de généraliser à l’échelle régionale/nationale des processus observés à l’échelle locale. D’après Verburg *et al.* (2004, p.313) trois aspects sont à retenir au cours de l’analyse des LUCS¹¹⁷ :

¹¹⁷ (i) L’utilisation des terres est le résultat de plusieurs processus qui agissent à différentes échelles. A chaque échelle différents processus auront une influence dominante sur l’utilisation des terres. (ii) L’agrégation des processus à une échelle détaillée ne conduit pas directement à une représentation adéquate des processus observables à un niveau supérieur. La non-linéarité, l’émergence et le comportement collectif provoquent cette dépendance scalaire. (iii) Nos observations sont limitées par l’étendue et la résolution de mesure ce qui contraint chacune des observations à fournir une description partielle de l’ensemble du système.

- (ii) Land use is the result of multiple processes that act over different scales. At each scale different processes have a dominant influence on land use;
- (iii) Aggregation of detailed scale processes does not straightforwardly lead to a proper representation of the higher-level process. Non-linearity, emergence and collective behavior cause this scale-dependency;
- (iv) Our observations are bound by the extent and resolution of measurement causing each observation to provide only a partial description of the whole multiscale land use system.

2.2.3.3. La sélection des facteurs

L’identification des facteurs de LUCC s’accompagne d’une hiérarchisation tenant compte de l’échelle d’analyse et de l’aire d’étude en question. Les facteurs (et les processus) peuvent à la fois être endogènes ou locaux – propres au « site » – ou exogènes, voire globaux – renvoyant à une « situation » - (Robic et Mathieu, 2001, p.184), ce qui fera varier leur quantité (Verburg *et al.*, 2004).

La sélection des facteurs explicatifs n’a rien d’arbitraire si bien que la littérature scientifique propose plusieurs techniques de compilation. Selon Hugues de Jouvenel (2002, p.11) le listing des variables « sera plus souvent établie [afin d’éviter l’excès de subjectivité] par un groupe de travail pluridisciplinaire composé d’acteurs et d’experts. Son élaboration pourra donner lieu à des enquêtes documentaires, des interviews d’experts, des consultations diverses ». Jacek Malczewki (1999) propose trois techniques privilégiant : (i) la révision de littérature pertinente, (ii) des études analytiques et (iii) des enquêtes d’opinion.

Elinor Ostrom (2007, p.8-10) propose une *Conceptual Maps* à plusieurs niveaux permettant de sélectionner et de détailler la liste des variables. Le premier niveau se décompose en huit éléments: (i) the resource system (fishery, lake, grazing area), (ii) the resource units produced by that system (fish, water, fodder), (iii) the users of that system, (iv) the governance system, (v) the social, economic and political settings, (vi) the related ecosystems, (vii) the interactions et (viii) the outcomes (figure 29). Ensuite chacune des variables est décomposée en cinquante sous-variables, elles-mêmes subdivisées, etc...

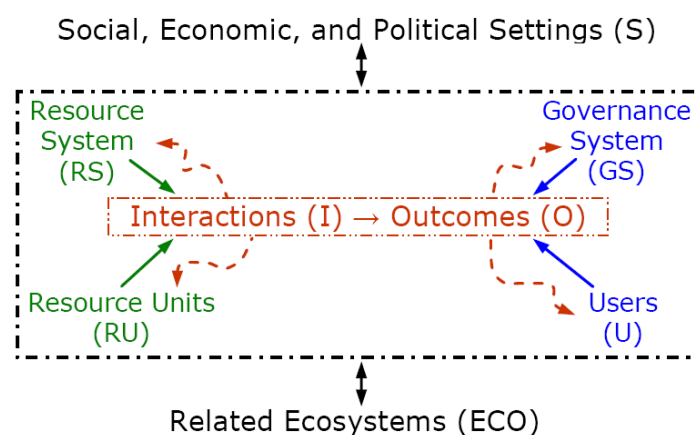


Figure 29 : Structure multi-variables pour analyser les systèmes socio-écologique. Source: Ostrom, 2007

La quantification des relations entre les changements d'utilisation du sol et leurs facteurs (cf. chapitre 5, p. 207) s'effectue via des techniques statistiques telles que l'auto-correlation spatiale (Veldkamp et Lambin, 2001) la régression logistique (Verburg *et al.*, 2002 ; Walker, 2004 ; Castella *et al.*, 2007 ; Echeverría *et al.*, 2008). L'analyse spatiale est, elle aussi, très largement employée (Turner *et al.*, 2003 ; Carmona *et al.*, 2010). La position théorique générale de l'analyse spatiale consiste à proposer une explication partielle, et des possibilités de prévision, quant à l'état et à l'évolution probable des objets/unités géographiques, à partir de la connaissance de leur position par rapport à d'autres objets géographiques (Pumain, Hypergéogé, 2011¹¹⁸).

2.3. Modèles : état de l'art

Chaque phénomène doit être systématiquement appréhendé dans sa totalité en mettant en exergue sa complexité (« *From simplicity to complexity* » (Lambin *et al.*, 2001, p.266)). L'enjeu réside maintenant à trouver la simplicité dans cette complexité « *Finding simplicity in complexity* » (Wainwright et Mulligan, 2004), ce qui constitue l'apanage de la modélisation.

L'analyse systémique se base sur quatre concepts centraux interconnectés: le système, la complexité, la globalité et l'interaction. « *Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* » (De Rosnay, 1975, p.101). La grande variété de ces éléments et leurs interrelations non linéaires sont guidées par des boucles de rétroactions positives ou négatives, qui génèrent la complexité du système. Cette complexité (spatiale, temporelle et des prises de décisions humaines) se trouve également dans les interrelations qu'entretiennent les trois entrées du territoire, à savoir l'espace géographique, le système de représentation et le système d'acteurs. La notion de complexité pose, selon Moine (2007, p. 19), « *plus de questions qu'elle ne permet d'en résoudre, mais en posant ces questions, elle ouvre un champ d'investigation considérable qui force à adopter du recul et à se doter des outils nécessaires afin de comprendre ce qui nous entoure* ». Ce recul se trouve dans la possibilité de décomposer des systèmes complexes qui permet d'atteindre d'après Elinor Ostrom « *a better understanding of complex SESs [Social-Ecological Systems] and approaching ways to improve their performance* » (Ostrom, 2007, p.7). Cette décomposabilité repose sur trois aspects : (i) un partitionnement conceptuel des variables (éléments), (ii) l'existence de sous-systèmes relativement séparables, mais interconnectés et (iii) les systèmes complexes dans leur TOUT sont plus importants que la somme des leurs parties. L'appréhension du comportement d'ensemble d'un système dans toute sa complexité est possible grâce à la modélisation et la simulation, qui font parties, d'après Joël de Rosnay (1975) des méthodes les plus employées.

2.3.1. Le modèle : simplifier la complexité

« *Un modèle est une représentation fonctionnelle d'un phénomène réel permettant de simuler son comportement* » (Paegelow, 2004, p. 101). Il est pour ainsi dire une abstraction du

¹¹⁸<http://www.hypergeo.eu/spip.php?article38>

domaine d'objet formalisée à l'aide d'un langage non ambigu (Amblard, Rouchier, Bommel, 2006, p 105). Pour Coquillard et Hill (1997, p. 7) « *un modèle est une abstraction qui simplifie le système réel étudié en ignorant de nombreuses caractéristiques du système réel étudié, pour se focaliser sur les aspects qui intéressent le modélisateur et qui définissent la problématique du modèle* ». Des similitudes se retrouvent dans la définition proposée par B. Roy (1985, in : David, 2001, p.461), en effet un modèle est: « *a schema which, for a certain family of questions, is considered as a representation of a class of phenomena that an observer has more or less carefully removed from their environment to help in an investigation and to facilitate communication* ». Ainsi, le modèle se doit de répondre à un ensemble de questions en simplifiant les composantes du système étudié, sans pour autant perdre toute complexité : « *the optimal model is one that contains sufficient complexity to explain phenomena, but no more* » (Wainwright et Mulligan, 2004, p.2).

Réfléchissant sur la place du modèle et de la modélisation en Sciences Humaines et Sociales (SHS), Patrice Langlois et Daniel Reguer notent que les mathématiques ne sauraient tenir lieu de vérité scientifique indépendamment des problématiques auxquelles elles sont censées répondre et qui sont d'abord le produit de l'activité humaine et des construits sociaux (Langlois, Reguer, 2005, p.42). Ainsi une approche mathématicienne trop rigoureuse *produisant une formalisation incompréhensible* éloignerait le modèle de la réalité. Les SHS s'appuient principalement sur des phénomènes empiriques et travaillent sur leur complexité, notamment lorsque un individu ou un groupe a la capacité d'agir sur son environnement et de se représenter des futurs possibles et d'agir en conséquence.

Appliqué à la géographie de l'environnement, le modèle permet d'atteindre d'après Martin Paegelow (2004, p. 102) des objectifs : (i) de connaissance et de progression dans la compréhension scientifique de phénomènes complexes dont les composantes [ou les *drivers* de Lucc (Verburg *et al.*, 2009)] sont multiples et reliés entre eux par des interactions et rétroactions et ceci dans une architecture systémique ouverte – c'est le cas du géosystème le plus simple soit-il ; (ii) de gestion [exploration de scénarii de développement possible (Verburg *et al.*, 2009)]. Même une connaissance imparfaite du comportement du système en question ne dispense pas de l'action gestionnaire et préventive. Qu'il s'agisse de gérer des ressources renouvelables ou des risques naturels, le modèle est un outil de gestion privilégié. Ces caractéristiques sont également mises en exergue par Robert G. Pontius Jr. (2010, p.2), qui voit dans la modélisation des Lucc le moyen: (i) to make better management decisions, (ii) to implement environmental agreements, (iii) to assess what we (do not) know about Lucc, (iv) to increase knowledge about Lucc, (v) to learn the implications of our assumptions, (vi) to be able to predict with a measured level of accuracy, (vii) to be able to predict with a high level of accuracy. Ainsi, les objectifs de la modélisation de phénomènes complexes se résument en trois grands objectifs interconnectés : COMPRENDRE (pour mieux) – ANTICIPER (pour mieux) – GERER.

« *Lee (1975) argues that a model must be transparent and simple, and it should start with a particular policy problem that needs to be solved* » (Kim, 2010).

2.3.2. La sélection du/des modèles

La littérature scientifique fait état d'un très large éventail de modèles et d'approches de modélisation. On recense des modèles employés en écologie (systèmes marins, terrestres) (Michael F. Goodchild, Bradley O. Parks et Louis T. Steyaert, 1993, p.249), des modèles économiques – microéconomiques ou régionaux - (Irwin et Geoghegan, 2001), des modèles mathématiques (Andrich, 1988 ; Demeritt et Wainwright, 2005). Ces derniers se déclinent en trois approches : (i) stochastique *vs* déterministe (Maynard Smith, 1978) ; (ii) statistique *vs* déterministe (Andrich, 1988); et (iii) empirique-statistique (avec calcul stochastique des valeurs) *vs* déductif-déterministe (Castree, Rogers et Sherman, 2005).

Les typologies des modèles mobilisés dans les Lucc sont abondantes et ne s'accordent pas systématiquement. La figure 30 synthétise six d'entre elles et tente d'en dégager les principales concordances.

Par exemple, dans « *Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models* », A.J. Jakeman, R.A. Letcher et J.P. Norton (2006, p.606) présentent huit familles de modèles : (i) empirical, data-based, (ii) stochastic, (iii) specific theory-based or process-based models, (iv) conceptual models, (v) agent-based models, (vi) rule-based models, (vii) dynamic et (viii) spatial. John Wainwright et Mark Mulligan, dans l'ouvrage collectif « *Environmental modelling. Finding simplicity in complexity* » (2004), comptent cinq catégories de modèles: (i) conceptual type: empirical, conceptual, physically based or mixed; (ii) integration type: analytical, numerical or mixed; (iii) mathematical type: deterministic or stochastic or mixed; (iv) spatial type: lumped, semi-distributed, distributed, GIS, 2D, 3D or mixed; (v) temporal type: static, dynamic or mixed. Dans le même ouvrage, Eric Lambin en recense quatre: (i) empirical-statistical models, (ii) stochastic models, (iii) optimization models et (iv) dynamic (process-based) simulation models.

On remarque que ces classifications diffèrent de par leurs critères et des descriptions que les auteurs en font. Globalement ce sont les modèles déterministes (non probabilistes et continus), les modèles stochastiques (probabiliste et temps discret) et les modèles empirique/statistiques¹¹⁹ qui apparaissent le plus souvent. D'autres types de modèles sont mentionnés (dynamique, spatial, temporel), ce qui implique qu'ils peuvent se différencier en fonction de l'approche.

Peter Verburg *et al.*, (2006) remarquent que la diversité des approches de modélisation dépend de la grande variété des questions de recherche. Ainsi, ils exposent des caractéristiques qui permettent de distinguer ces modèles: spatiaux et non-spatiaux (localisations et allocations des changements *vs* taux et magnitude des Lucc), dynamiques et statiques (mise à jour et de la variable modélisée et des drivers 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

¹¹⁹ Les modèles empiriques/statistiques peuvent inclure des variables dont les valeurs sont calculées stochastiquement.

entre processus et facteurs *vs* corrélation statistique entre LUCC et *drivers*¹²⁰), basés sur les agents et sur les pixels (simulation des acteurs et des prises de décisions *vs* simulation d'objets spatiaux), connus aussi par approche *bottom-up vs top-down* (Castella *et al.*, 2007 ; Laborte *et al.*, 2007 ; Moreira *et al.*, 2009), globaux et régionaux.

Les modèles basés sur les agents sont également présentés dans le tableau synthétique conjointement aux automates cellulaires et aux réseaux neuronaux. Ces trois modèles sont assimilés et basés sur l'intelligence artificielle.

Ainsi, en croisant les typologies susmentionnées, il est possible de dégager trois grandes catégories de modèles. Martin Paegelow et María Teresa Camacho Olmedo (2008, p.16) tablent sur trois catégories de modèles à savoir: (i) les modèles déterministes, (ii) les modèles stochastiques et (iii) les modèles à base d'Intelligence Artificielle (AI).

2.3.3. Les modèles déterministes

Un modèle déterministe (ou mécaniste) se base sur le principe de causalité. Il modélise des relations causales entre différentes variables (non aléatoires) d'un système, en ignorant le caractère aléatoire de l'environnement. L'objectif est de prévoir avec exactitude l'évolution de ce système dans le temps. Ainsi des disciplines telles que l'économie, la physique, la géomorphologie, etc. ont recours à des équations différentielles ou ordinaires (Jakeman, Letcher et Norton, 2006) pour modéliser le fonctionnement d'un système. La théorie de Newton (1687) est l'exemple le plus communément cité pour décrire les modèles déterministes/mécanistes (Andrich, 1988 ; Rhoads, 2005; Scheck, 2005). Florian Scheck (2005, p.2) en présente les lois fondamentales : « (i) *every body continues in its state of rest or of uniform rectilinear motion, except if it is compelled by forces acting on it to change that state* ; (ii) *the change of motion is proportional to the applied force and takes place in the direction of the straight line along which that force acts*; et (iii) *to every action there is always an equal and contrary reaction; or, the mutual actions of any two bodies are always equal and oppositely directed along the same straight line* ». L'analyse de systèmes complexes, mus par des processus anthropiques non linéaires, instables et incertains, s'oppose à la caractéristique première de ces modèles à savoir l'exclusion de tout probabilisme.

¹²⁰ Pour l'approche déductive le choix des données apparaît dans un second temps, après avoir déterminé l'ensemble des facteurs et ses interrelations avec les dynamiques environnementales. L'approche inductive, au contraire, se base sur des données disponibles qui ne représentent pas totalement les processus en jeu.

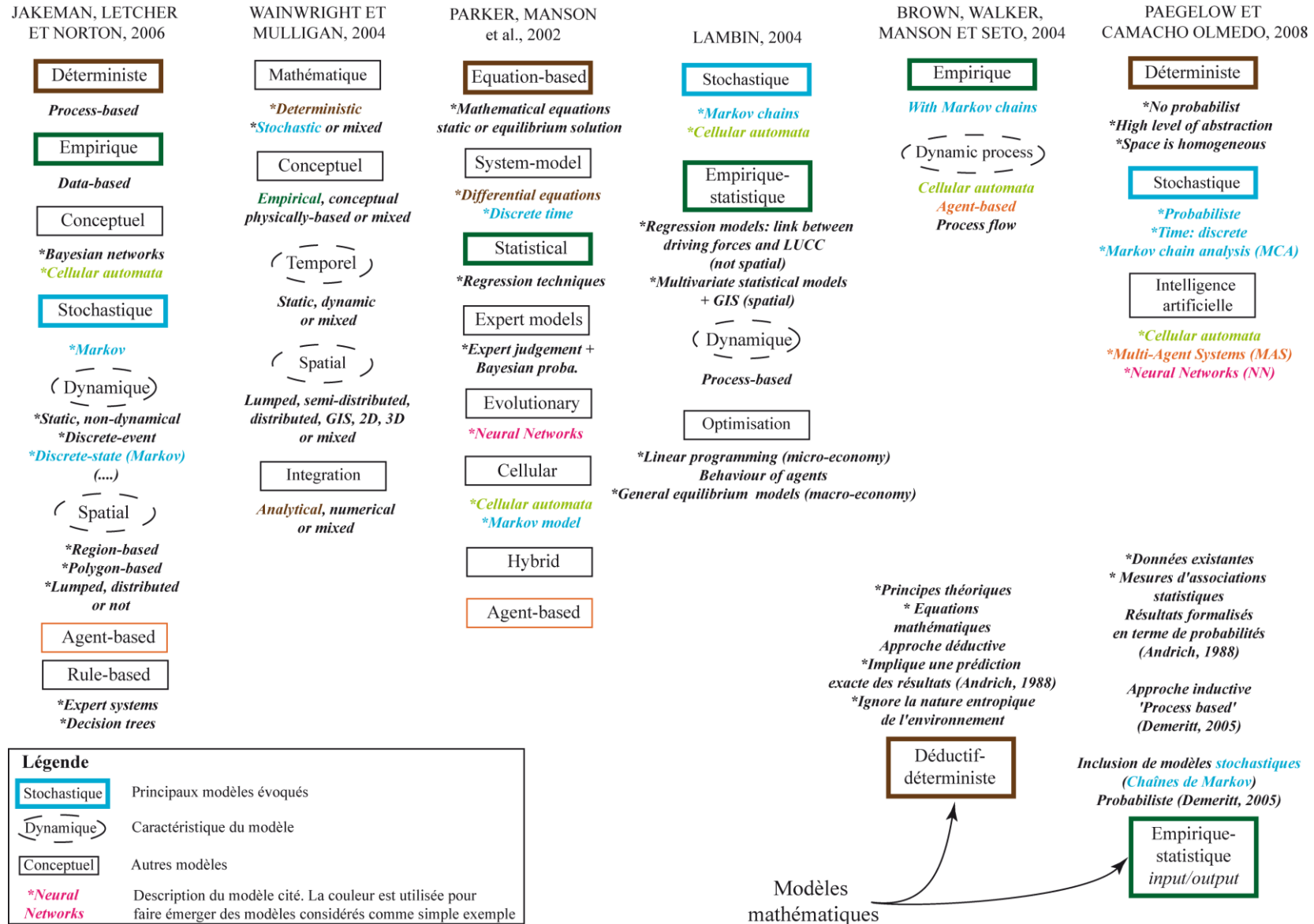


Figure 30 : Typologie synthétique des modèles

2.3.4. Les modèles stochastiques

Parfait antonyme des modèles déterministes, les modèles stochastiques sont probabilistes. Un processus stochastique est une famille de variables aléatoires X_t , où t est un paramètre s'exécutant sur un ensemble d'index pertinent T . L'index t correspond à des unités de temps discrètes, et l'ensemble d'index est $T = \{0,1,2,\dots\}$ (Pinsky et Karlin, 2010, p.4). Les valeurs dans un modèle stochastique sont calculées de façon aléatoire « *within an ascribed probability distribution range* » (Demeritt et Wainwright, 2005, p.212). Si la chaîne est actuellement à l'état t_i , son passage à l'état t_j se fera avec une probabilité notée p_{ij} (ou probabilité de transition).

Pour illustrer ce processus, Martin Paegelow et María Teresa Olmedo (2008, p.18) font référence à un exemple souvent cité, celui d'un jet de dés. « *Each throw realizes one of the six possible states which are, for an instant t , exclusive and time independent. [...]. The successive realizations form a discrete process. This means that the variables cannot change continuously in time but only into an ascending series of real positive numbers called instants* ».

Dans le domaine des LUCC, les chaînes de Markov font partie des méthodes les plus communément employées afin de prédire des changements entre plusieurs états (Pontius et Malanson, 2005). Pour Heiko Balzter (1998, p.139-140) les chaînes markoviennes sont des: « *stochastic processes, and can be parameterised by empirically estimating transition probabilities between discrete states in the observed system. [...] with a discrete state space and a discrete or continuous parameter space* ». Elles calculent les valeurs d'une variable à l'instant t par une fonction probabiliste de sa valeur à l'instant antérieur $t-1$ (Agarwal *et al.*, 2000).

Elles sont largement utilisées afin d'étudier les dynamiques de végétation (Coquillard et Hill, 1997 ; Balzter, 1998 ; Balzter, 2000 ; Lambin, 2004; Paegelow *et al.*, 2004 ; Paegelow et Camacho Olmedo, 2005; Camacho Olmedo *et al.*, 2007). Elles s'appliquent également dans le domaine épidémiologique (propagation de virus) (Srivastava *et al.*, 2002), ou les dynamiques urbaines (Antoni, 2006), etc.

2.3.5. Les modèles à base d'intelligence artificielle (AI)

L'apparition de l'intelligence artificielle remonte aux années 1950, avec l'objectif de simuler et d'exposer des systèmes intelligents grâce à la puissance informatique. Dans *Artificial intelligence : an empirical science* (1995), Herbert A. Simon décline ces objectifs en trois catégories : (i) construire des programmes informatiques capables de mettre en exergue l'intelligence, et de commencer à construire une théorie sur les systèmes intelligents ; (ii) construire des programmes (ex : les GPS) qui mettent en avant l'intelligence en utilisant des processus comme ceux utilisés par les humains pour les mêmes tâches ; (iii) construire des programmes intelligents qui pourraient remplacer ou compléter l'intelligence humaine dans l'analyse de phénomènes complexes, par exemple les « systèmes experts ». Les automates cellulaires, les réseaux neuronaux et les systèmes multi-agents sont des exemples de programmes largement utilisés pour l'analyse des systèmes complexes.

2.3.5.1. Les automates cellulaires (AC)

Un AC est une idéalisation mathématique d’un système physique dans lequel l’espace et le temps (Wolfram, 1983, p.602) et les états (Balzter, 1998) sont discrets, c’est-à-dire que l’espace réel (continu) est discrétisé en cellules. Le passage d’une évolution en temps continu à une évolution à temps discret passe par la méthode dite de *section de Poincaré*. Elle consiste « à n’enregistrer l’état du système que lorsqu’une de ses observables passe par une valeur particulière (annulation d’une phase, par exemple), [...] » (Lesne, 2002, p.4). Chaque cellule change son état simultanément en tenant compte des règles de transition « *which determine the state of a cell as a function of the states of cells in a neighborhood* » (Soares-Filho, Coutinho Cerqueira et Lopes Pennachin, 2002, p. 219). Le voisinage est une notion importante. Langlois (2005) explique que « *chaque cellule, à chaque instant, est dans un certain état (une entité, une couleur, etc.) qui appartient à un ensemble fini d’états, commun à toutes les cellules. Les connexions d’une cellule à son voisinage permettent à la cellule de « connaître » l’état de ses voisines. Ainsi, le motif constitué de son propre état entouré des états des cellules voisines, permet à chaque cellule, à l’aide de son mécanisme de transition, de faire évoluer son état* » (Langlois, 2005, p.330). Les voisinages les plus répandus sur un réseau bidimensionnel carré sont : le voisinage de von Neumann qui contient une cellule centrale et quatre cellules adjacentes, et le voisinage de Moore qui étend le voisinage de von Neumann à huit cellules adjacentes (figure 31).

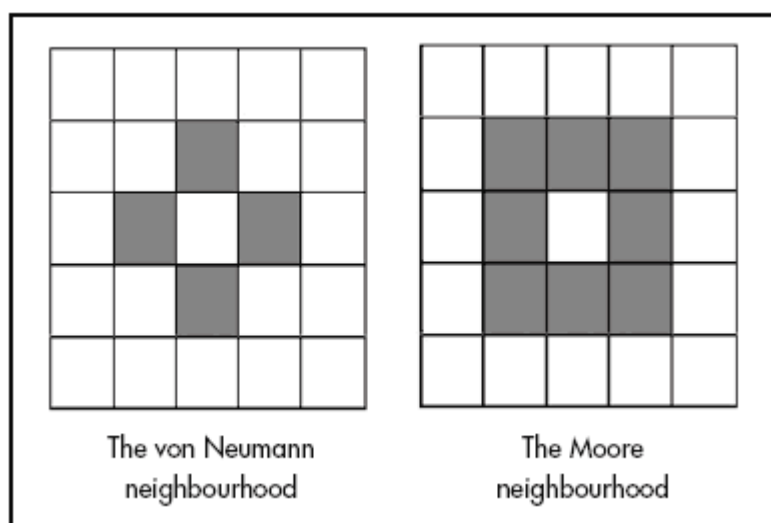


Figure 31 : Voisinage de von Neumann et de Moore

The Game of Life (ou simplement Life) est l’exemple d’automate cellulaire le plus cité (Gardner, 1970 ; Wolfram, 1983 ; Li, 1990 ; Wu, 2002 ; Paegelow, 2008). Introduit par John Conway en 1970, il se base sur le voisinage de Moore. Voici ses règles présentées par Bruno Durand et Zsuzsanna Róka (1998, p.53-54) :

« *Life is a game played on an infinite grid. At any time, some cells are alive and the others are dead. [...]. At every time step, each cell can change its state, in a parallel and synchronous way according to the following local rules: (i) Birth: a cell that is dead at time t becomes alive at time $t+1$ if and only if three of its neighbors were alive at time t (for example, see Figure 2a); (ii) Survival: a cell that was alive at time t will remain alive if and*

only if it had just 2 or 3 alive neighbors at time t (see Figure 2b); (iii) Death by overcrowding: a cell that is alive at time t and has 4 or more of its eight neighbors alive at t will be dead by time t+1 (see Figure 2c); (iv) Death by exposure: a cell that has only one alive neighbors, or none at all, at time t, will be dead at time t+1 (see Figure 2d) » (figure 32).

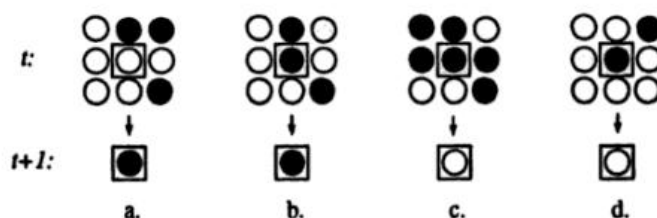


Figure 2. Examples for rules

Figure 32 : Exemples de règles du Game of Life. Source : Durant et Róka, 1998

Les règles de transition peuvent être déterministes ou stochastiques ce qui amène Eric Lambin (2004) à considérer les AC comme une autre forme de modèles stochastiques. La littérature scientifique faisant usage des automates cellulaires est abondante, en témoigne la compilation réalisée par Balzter *et al.* (1998, p.115). Entre autres, il recense des études axées sur les dynamiques d’incendies, les changements d’occupation du sol, le développement d’économie rurale, la propagation de la rage chez les renards, etc.

Enfin, de nombreux logiciels de simulation spatiale de LUCC prennent en compte les AC comme en témoigne le modèle de simulation DINAMICA (Soares-Filho, 2002)¹²¹, SLEUTH, MOLAND (Paegelow et Camacho, 2008, p.26-27) et CA-Markov qui sera présenté dans le chapitre 6.

2.3.5.2. Les réseaux neuronaux artificiels (Artificial Neural Networks – ANNs)

Les réseaux neuronaux artificiels sont basés sur l’architecture neuronale du cerveau animal/humain (figure 33). Par leur capacité à prendre en compte les expériences passées, de comprendre, interpréter et d’agir sur des notions probabilistes et/ou floues (Warner et Misra, 1996), d’appréhender des relations complexes non-linéaires¹²² et d’être tolérants au bruit (Chan, Chow et Liu, 1995), les ANNs dépassent les potentialités informatiques. De plus, « [...] they (ANNs) are good for tasks involving incomplete data sets, fuzzy or incomplete information, and for highly complex and ill-defined problems, where humans usually decide on an intuitional basis » (Kalogirou, 2001, p.376), pour enfin projeter dans le futur des phénomènes inconnus (Mas *et al.*, 2004).

¹²¹ DINAMICA involves a multiple time-step stochastic simulation with dynamic spatial transition probabilities calculated within a cartographic neighborhood (Soares-Filho, 2002, p.219).

¹²² Muriel Gevrey, Ioannis Dimopoulos et Sovan Lek (2003) présentent plusieurs méthodes pour étudier la contribution des variables (et leurs relations) dans un modèle de réseaux de neurones.

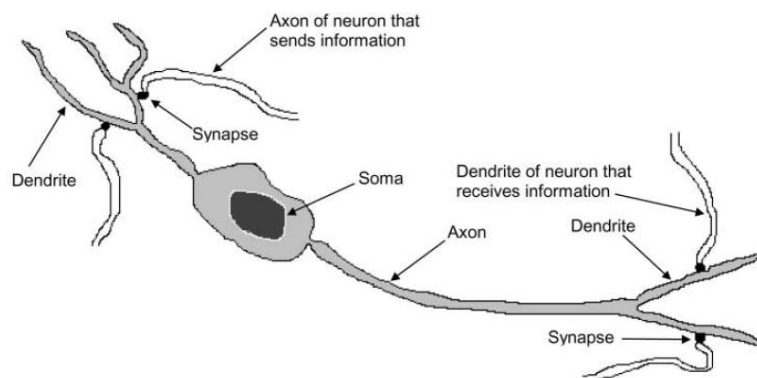


Figure 33 : Représentation d’un neurone biologique. Source: Kalogirou, 2001

« *Artificial neural networks are a branch of artificial intelligence (AI) employing a ‘connectionist’ approach, as opposed to AI techniques such as expert systems which use a ‘rule and symbol’ approach* » (Özesmi et Özesmi, 1999, p.16). Les ANNs font leur première apparition en tant que méthode permettant de modéliser des systèmes écologiques complexes dans l’étude de Colosanti (1991). Il existe plusieurs types de réseaux neuronaux tels que les *feed-forward networks* (*multilayer perceptron* ou MLP), les *symmetric recurrent networks* (*Hopfield nets*) (Ripley, 1994) et bien d’autres, abondamment cités dans la littérature scientifique (Lek et Guégan, 1999, p.67).

Notre attention se porte sur le perceptron multi-couche (ou multi-layer feed-forward) car c’est l’une des architectures les plus employées pour l’étude des dynamiques d’occupation et d’utilisation du sol (Lek et Guégan, 1999 ; Mas *et al.* 2004 ; Paegelow *et al.*, 2004), dans l’analyse des interactions spatiales (migration) (Black, 1995), dans la modélisation spatiale des habitats d’oiseaux (Özesmi et Özesmi, 1999), etc. Plusieurs outils géomatiques intègrent le MLP tel que Land Change Modeler (LCM) sous IDRISI Andes/Taïga (Eastman, 2006 ; Dang Khoi et Murayama, 2010 ; Kim, 2010 ; Oñate-Valdivieso et Bosque Sendra, 2010) qui sera détaillé dans le chapitre 6, page 221.

Un réseau neuronal de type MLP est constitué d’unités (ou nœuds) interconnectées de manière hiérarchique, avec une couche d’entrée (*input layer*), une couche cachée (*hidden layer*) qui joue le rôle d’une boîte noire, et la couche de sortie (*output layer*) (figure 34).

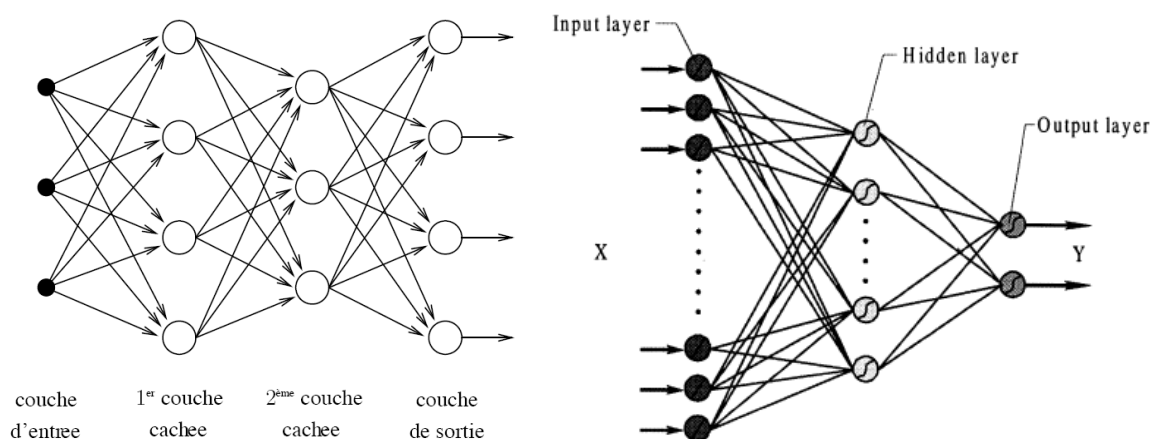


Figure 34 : Diagramme schématique de deux réseaux neuronaux perceptron multicouche. Source : Parizeau, 2004 ; Lek et Guégan, 1999

« *The hidden units [couche cachée] receive a weighted sum of the inputs and apply an activation function to the sum. The output units [couche de sortie] then received a weighted sum of the hidden unit's output and apply an activation function to this sum. Information is passed only from one layer to the next. There are no connections within layers and no connections to pass information back to a previous layer* » (Warner et Misra, 1996, p.286). Le nombre de couches ainsi que le nombre de neurones (couche d'entrée) est quelconque (Parizeau, 2004).

2.3.5.3. Les systèmes Multi-Agents (SMA)

« *La modélisation multi-agents peut être définie dans ce cadre comme partant d'un phénomène collectif à étudier ou à comprendre, et sur lequel on émet des hypothèses à l'échelle individuelle et collective* » (Amblard, Rouchier, Bommel, 2006, p 105).

Il existe deux types d'agents : (i) l'agent réactif qui a un comportement simple, sans mémoire et ayant une représentation limitée de son environnement ; (ii) l'agent cognitif qui est considéré comme une entité qui, au contraire, a une mémoire et qui connaît son environnement et les autres agents. Il a des représentations et des connaissances (de soi, des autres agents) et il est capable de prendre des décisions en fonction de celles-ci (Daudé, 2005, p.360). Ferber J. (Ferber, 1995 in Ferber 2006, p.24) définit un « agent » comme une entité informatique (un processus) située dans un environnement (réel ou virtuel) [appelé écosystème simplifié par J. Weber (1995)], plongée dans une structure sociale qui est capable de : (i) agir dans son environnement, (ii) percevoir et partiellement se représenter son environnement (et les autres), (iii) communiquer directement ou indirectement avec d'autres agents, (iv) mû par des tendances internes (buts, recherche de satisfaction, drivers, utilité), (v) se conserver et se reproduire. Concrètement un agent peut représenter des cellules biologiques, des animaux, des atomes, ou dans le domaine des LUCC, des organisations, des propriétaires, etc.

Sans pour autant les qualifier de modèles hybrides, les SMA/LUCC combinent un modèle cellulaire qui représente les aspects biophysiques et écologique du système modélisé, et un modèle agent (*agent-based*) pour représenter les décisions humaines (Parker *et al.*, 2002).

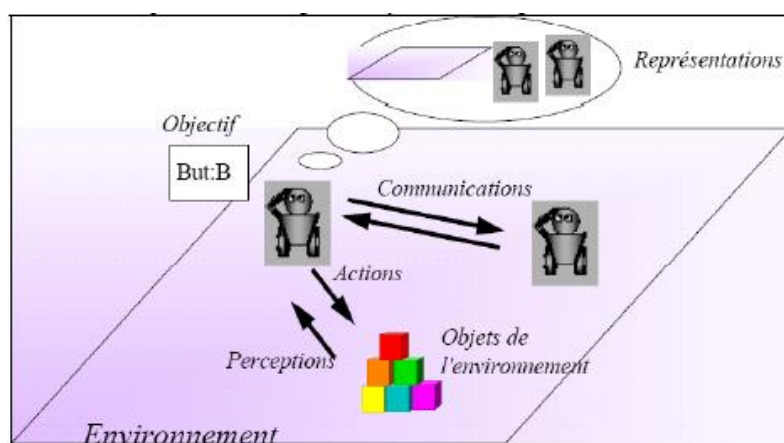


Figure 35 : Représentation d'un système multi-agents. Source : Bousquet *et al.*, 2005

De nombreuses recherches portant sur l’analyse des systèmes dynamiques complexes ont fait appel aux SMA. Tout d’abord la modélisation d’accompagnement ou *companion modelling* développée par le Collectif ComMod (Charte) qui regroupe des chercheurs du CIRAD, de l’INRA, du CEMAGREF (Collectif ComMod, 2005). Les études sont nombreuses et appréhendent des problématiques à travers le monde, tel que l’ouvrage publié par le CIRAD et l’International Rice Research Institute (IRRI) intitulé « *Companion modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia* » (Bousquet, Trébuil et Hardy, 2005). A cela s’ajoute des études centrées sur les systèmes irrigués (Barreteau, Bousquet et Attonaty, 2001), l’analyse des interactions entre le parcours de troupeaux conduits par des bergers et une ressource forestière (Bonnefoy, Bousquet et Rouchier, 2001), la simulation de comportement en présence de pins à crochet via des scénarii contrastés (Etienne, Le Page et Cohen, 2003), ou l’aide à la décision en matière de gestion (D’Aquino *et al.*, 2003). En dehors du Collectif ComMod les SMA sont utilisés pour : l’étude des LUC (Parker *et al.*, p.16), la simulation de dynamique forestière (Gibon *et al.*, 2010), l’analyse de problèmes complexes non spatialisés (Axelrod, 1997).

« *Il nous semble que les univers multi-agents proposent des formalisations qui peuvent prendre en compte plusieurs modèles de pensées sur la gestion collective de ressources renouvelables communes. Offrant la possibilité de modéliser des représentations, des modes de communication au sein de réseaux, des contrôles individuels ou sociaux, donnés ou construits, des interactions, les systèmes multi-agents sont adéquats à la simulation de formes de coordination observables sur le terrain* » (Bousquet, Barreteau, Mullon, Weber, 1996, p 6).

2.4. Modélisation prédictive et prospective

L’intérêt des modèles porte aussi bien sur la simplification et l’analyse des dynamiques passées et actuelles, mais ils permettent également de simuler, grâce à la modélisation prédictive et prospective, lesdites dynamiques dans le futur afin de faciliter la prise de décision.

Si la prédiction et la prospective semblent étymologiquement différentes, elles sont parfois confondues dès lors que l’on s’intéresse à l’évolution des systèmes dans le futur.

2.4.1. La modélisation prédictive

Pour Raymond L. Johnson (2004, p.1096) une prédiction est « *a statement that envisions a future state or event* », ce dernier étant généralement inconnu (Batty et Torrens, 2005)¹²³. D’après Javier Medina Vásquez et Edgar Ortegón (2006, p.215) l’objectif de la prédiction au sens strict du terme est d’aboutir sur une « *declaración no probabilística, con un nivel de confianza absoluto acerca del futuro. Por “no probabilística” se entiende que es un enunciado que tiene la pretensión de ser único, exacto y no sujeto a controversia; es decir, aspira a efectuar afirmaciones determinísticas* ». Selon cette définition seuls les modèles

¹²³ « *Prediction involves generating unknown events and in traditional models, such events usually pertain to the future* » (Batty et Torrens, 2005, p.758).

régis par des lois déterministes, mathématiques, physiques, et non probabilistes sont prédisposés à faire de la prédiction. Les évènements futurs inconnus et incertains deviennent alors des affirmations, des certitudes.

Au-delà de cette limite déterministe, la prédiction d'un système complexe (socio-écologique) au sens strict est impossible. Ivan Blečić et Arnaldo 'Bibo' Cecchini (2008, p.541) expliquent que les questions de prédiction et de prévision ne s'apprehendent pas de la même manière que dans les sciences physiques. En effet, « *the unpredictability of social systems is also a fruit of intentionality, not simply of the non-linear nature of relations between many variables* ». Ainsi, l'acception de ce terme dans le domaine des LUCC atténue la nature optimale des résultats obtenus. D'après Laurence Hubert-Moy *et al.* (2006, p.4) « *les prédictions visent à produire des représentations reproduisant au plus près une situation dans un futur proche, avec un degré de confiance plus ou moins élevé [...] la validation de la prédiction est alors classiquement effectuée à travers la comparaison des résultats simulés par rapport à des données représentant la situation réelle* ». D'une part, le futur n'est plus une échelle temporelle unidimensionnelle, et suppose un échelonnage en plusieurs temporalités. Ainsi la prédiction atteint ses limites dans la représentation de situations dans un futur éloigné, mais demeure incontournable pour simuler des dynamiques dans un *futur proche*. D'autre part, le niveau de confiance absolu passe à un niveau incertain (*plus ou moins élevé*) mais nécessite la validation des résultats. L'optimisation de ces résultats passe, selon Michael Batty et Paul M. Torrens (2005, p.758), par une calibration rigoureuse du modèle, en cherchant à reproduire une situation connue (passé ou présent), ce qui donne in fine « *some confidence in using the model to predict the future* ». Le résultat de la calibration (simulation test) est alors confronté à la situation réelle.

Plus la situation future s'éloigne du présent, plus la probabilité de voir apparaître des évènements extrêmes, des crises, des catastrophes, est grande. La prédiction peut faire face à ces incertitudes à court terme car leurs apparitions (ou itérations) sont réduites, mais ne dispose pas d'outils pour représenter des situations à moyen et long termes, et pour en anticiper leurs impacts (et agir en conséquence). C'est ici que la prédiction doit laisser la place à la prospective.

2.4.2. La modélisation prospective

Afin de construire un projet de développement territorial incorporant les perspectives de développement soutenable, la nécessité d’entrevoir les changements futurs grâce à l’approche prospective devient incontournable (Hubert-Moy, 2006 ; Houet *et al.*, 2008).

2.4.2.1. Emergence et grand principe de la prospective

“The gardener had pointed to a thick bamboo stem and explained that if a pebble was thrown at it and it hit the trunk slightly off-centre, it would bounce off and make hardly any sound. But if it hit the trunk dead centre, it would make a distinctive “clonk”. He then said that to be sure to hit the stem in this way, it was necessary to hear the distinctive sound in your own mind in advance of throwing the pebble—and then to concentrate intensely on that sound” - Pierre Wack et le jardinier japonais¹²⁴ -

Nul ne peut dire de quoi demain sera fait. La prospective, propose cependant des ouvertures, des pistes sur l’image de ce *demain*. Il ne s’agit pas de miser sur un futur en espérant obtenir un taux de réussite optimal. Il est question de construire, grâce à l’analyse du passé et des dynamiques actuelles, un socle d’hypothèses pertinentes considérées par Michel Godet comme « *un regard sur l’avenir destiné à éclairer l’action présente* » (Hatem, 1993, p.221). Ainsi, l’analyse du passé et du présent¹²⁵ n’est pas la seule condition à l’explication du futur, dans la mesure où le futur est imprimé dans le présent (Godet, 1986) par l’anticipation qu’exerce un individu sur son environnement. Javier Medina Vásquez et Edgar Ortegón (2006, p.85) développent la pensée de Michel Godet et la définissent comme « *un proceso de anticipación y exploración de la opinión experta proveniente de redes de personas e instituciones del gobierno, la empresa y las universidades, en forma estructurada, interactiva y participativa, coordinada y sinérgica, para construir visiones estratégicas de la ciencia y la tecnología y su papel en la competitividad y el desarrollo de un país, territorio, sector económico, empresa o institución pública* ».

L’avenir est un « espace » d’action, exploratoire ou normatif, qui se bâtit par et pour un individu (ou des groupes d’individus). Pour Bertrand de Jouvenel (1972 in Jouvenel, 2002) cet avenir est « *pour l’homme, en tant que sujet connaissant, domaine d’incertitude, et pour l’homme, en tant que sujet agissant, domaine de liberté et de puissance* », avec la possibilité d’adopter une attitude pré-active ou pro-active. La pré-activité est le fait de se préparer à un changement anticipé, alors que la pro-activité est volontariste et vise à apporter des changements souhaités par le biais de la planification stratégique (Godet, 2010)¹²⁶.

¹²⁴ <http://www.economist.com/node/12000502>

¹²⁵ Peter H. Verburg, Jeanette van de Steeg, A; Veldkamp et Louise Willemen (2009, p. 1333) soulignent « *that more attention should be given to the actual land use and land functions and linkages between these* ».

¹²⁶ « *Preactivity is what guides all approaches to future studies, forecasting, scenario planning and foresight. Proactivity is more voluntarist, and aims to bring about the desired changes by means of strategic planning (for example, innovation as a way of winning market share.) ‘la prospective’ or ‘strategic foresight’ designates a discipline which seeks enlightened anticipation by clarifying actions made in the present through the thoughtful examination of both possible and desirable futures* » (Godet, 2010, p.1460).



Figure 36 : Les Trente-six vues du Mont Fuji (富嶽三十六景) – Lake Suwa in the Shinano province - 《信州諏訪湖》 Katsushika Hokusai (1760-1849)

L’essor de la prospective fait partie d’un cheminement intellectuel inspiré par la *futures research* nord-américaine d’après-guerre¹²⁷. L’exploration et l’évaluation méthodique du futur s’est faite autour d’organismes de recherche, tel que la Rand Corporation¹²⁸ (contraction du terme *research and development*) qui chercha, dès sa création, à promouvoir la science et l’éducation pour le bien-être public et la sécurité des Etats-Unis. D’après Fabrice Roubelat (1994, p.4) l’âge d’or de cette « *prospective à l’américaine* » est survenu à la suite d’une enquête réalisée par la Rand sur les développements de la science et de la technologie via la méthode Delphi. A l’échelle internationale la prospective devint « populaire » notamment grâce à la publication du rapport Meadows : « *Halte à la croissance* » (1972) par l’équipe du MIT de Boston¹²⁹. Depuis 1996, le « *Millenium Project* » (<http://www.millennium-project.org/>) est certainement le projet le plus important en termes de prospective et de réseau scientifique. Initié par le Smithsonian Institution, The Futures Group International, et the United Nations University (UNU), sa mission est de: « *improve thinking about the future and make that thinking available through a variety of media for feedback to accumulate wisdom about the future for better decisions today* ». Dans sa deuxième phase d’opération, le Projet s’ouvrit à de nombreux sponsors, notamment industriels tels que : Ford Motor Company, Monsanto Company, Motorola Corporation, Shell International (Royal Dutch Shell), et Pioneer Hi-Bred International, etc. (Glenn et Gordon, 1999, p.99). Pour Pierre Gonot et Jean-Luc Gurtler¹³⁰, « *le projet n'est pas une étude ponctuelle sur le futur, mais il vise à fournir une capacité continue de penser en tant que groupe de réflexion géographiquement et institutionnellement dispersé* ».

¹²⁷ La littérature d’anticipation, les récits mythologiques, la science-fiction sont apparus bien avant la fin de la seconde Guerre Mondiale.

¹²⁸ <http://www.rand.org/>

¹²⁹ Fabrice Hatem propose un historique de la prospective à l’échelle internationale et nationale (1993, p.51-92)

¹³⁰ http://www.jle.com/en/revues/bio_rech/ecn/e-docs/00/03/35/5B/article.phtml

La prospective ou « *strategic foresight* », en tant que spécificité française (Roubelat, 1994), remonte à Gaston Berger par la création en 1957 du Centre International de prospective et du World Futures Studies Federation par Bertrand de Jouvenel¹³¹ dans les années 1960, tous deux étant considérés comme les « *prophètes* » de la prospective en France. La diffusion de cette « *philosophie et attitude* » (Hugues de Jouvenel in Cordobes et Durance, 2004) dans le secteur public français se fera par la Délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité Régionale (DATAR) par l'intermédiaire de Pierre Massé en publiant les « *3 scénarios de l'inacceptable* » (1971). Cette parution marque, d'après Raphaëlle Ducret¹³², « *l'âge d'or de la prospective* » française et sera suivi de nombreux travaux (élaboration de scénarios européens en 1972 ; rapport sur l'Europe et le monde Arabe en 1975 ; etc.) (Hatem, 1993, p.180). Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 et la crise économique ont permis l'émergence de la prospective à l'échelle des régions qui, dans le cadre des contrats de Plan État-régions, s'approprient les méthodes de la prospective à travers des exercices pionniers comme *Limousin 2007* paru en 1987 ou encore *Prospective Aquitaine 2005* publié en 1988 (Ducret). La sortie de crise redynamisa la prospective à l'échelle nationale, ainsi que son rayonnement international, que ce soit dans l'administration ou dans le secteur industriel. Dans ce sens, la DATAR lança en 2009 une démarche prospective à l'échelle de la France intitulée « *Territoires 2040, aménager le changement* » regroupant des acteurs locaux, des scientifiques, des experts et des représentants ministériels.

La prospective se situe à mi-chemin des deux dérives exposées par Jacques Lesourne (Président de l'association Futuribles International) (Cordobes et Durance, 2004, p.8), c'est-à-dire entre « *celle des personnes qui appliquent la méthode comme on fait des calculs et celle de ceux qui font tellement jouer leur imagination qu'ils sont totalement hors du réel* ». Bien qu'elle se différencie de la prédiction (par l'optimisation des résultats), « *la prospective n'est pas non plus la prévision trop marquée par la quantification et l'extrapolation de tendances* » (Godet, 1993, p.13), elle se doit de respecter des « règles », donc une certaine rigueur dans ses méthodes. Fabrice Roubelat (1994, p.3) expose les quatre grandes catégories d'outils et méthodes utilisés en prospective : (i) les techniques d'interrogations d'experts (méthode Delphi par exemple), (ii) les matrices d'impacts pour *examiner le système et sa dynamique* (analyse structurelle, analyse de jeux d'acteurs et impacts croisés probabilistes), (iii) les méthodes morphologiques (décomposition en sous-systèmes et recombinaison), et (iv) les approches par scénarios (*simple check-lists ou combinaisons plus élaborées de certaines des méthodes des trois premières catégories*). Pour Michel Godet (1986) cette dernière approche ou méthode (« *scenario method* ») fait consensus pour appréhender les futurs possibles (*les futuribles*)¹³³ (figure 37).

¹³¹ <http://www.wfsf.org/index.php>

¹³² <http://territoires2040.datar.gouv.fr/spip.php?article42>

¹³³ L'auteur note 26 ans plus tard que « *la prospective is less interested in futuribles (possible futures) than futurables (desirable futures)* » (Godet, 2010, p.1458)

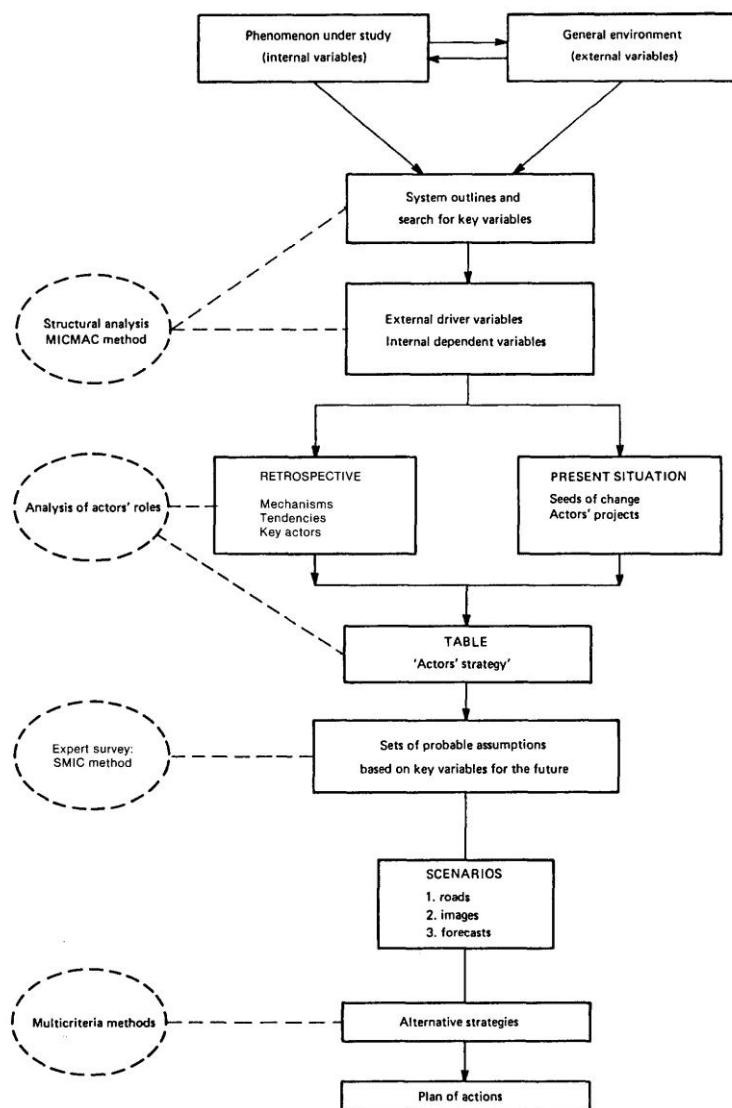


Figure 37 : La méthode des scénarii. Source : Godet, 1986, p.140

2.4.2.2. La méthode des scénarii

La méthode des scénarii sert aux objectifs de la prospective¹³⁴. Elle ne se limite pas aux frontières de l’Hexagone. G. Ringland (1998) citée dans Postma (2005, p.162) présente un éventail d’écoles (d’approches) utilisant la méthode des scénarii : Battelle Institute (BASICS), the Copenhagen Institute for Future Studies (the futures game), the European Commission (the Shaping Factors–Shaping Actors), the Futures Group (the Fundamental Planning Method), Global Business Network (scenario development by using Peter Schwartz’s methodology), Northeast Consulting Resources (the Future Mapping Method) and Stanford Research Institute (Scenario-Based Strategy Development). L’auteur remarque que

¹³⁴ Los escenarios son quizás el método más popular de los estudios del futuro (Medina Vásquez et Ortégón, 2006, p.328)

l'ensemble de ces écoles « *appliquent vaguement la Logique Intuitive de Pierre Wack* »¹³⁵ (Postma, 2005, p.162).

a) Définition

Pierre-André Julien, Pierre Lamonde et Daniel Latouche (1975, p.254) définissent un scénario comme « *une démarche synthétique qui, d'une part, simule, étape par étape et d'une manière plausible et cohérente, une suite d'événements conduisant un système à une situation future, et qui, d'autre part, présente une image d'ensemble de celle-ci* ». On retrouve ici deux des quatre critères évoqués par Michel Godet (1993) essentiel à toute démarche prospective : pertinence, cohérence, vraisemblance et transparence¹³⁶. Le scénario est envisagé comme un cheminement allant du présent vers le futur.

Pour Roger Brunet (1992) ce cheminement s'effectue aussi du futur vers le présent. Il définit le scénario comme une « *méthode d'anticipation poussant à bout les conséquences logiques d'hypothèses ou de tendances préalables, sous des contraintes imposées ou contrastées ; ou, au contraire, imaginant les conséquences d'un infléchissement, d'une nouvelle stratégie* ». Selon Quade (1982 cité par Hatem, 1993, p.221), un scénario est « *la description des caractéristiques essentielles (en ce sens qu'elles affectent les alternatives stratégiques prises en compte) du contexte futur dans lequel ces alternatives devront être mises en œuvre* ». Enfin selon Philip W.F. van Notten *et al.* (2003, p.424) les scénarii sont des « *descriptions of possible futures that reflect different perspectives on the past, the present and the future* ». Ces futurs possibles (*futuribles*) ne sont pas le seul intérêt de la prospective car ils mettent de côté les alternatives stratégiques ou les futurs souhaitables (*futurables*) (Godet, 2010).

b) Typologie des scénarii

La littérature scientifique traitant des scénarii rend complexe l'élaboration d'une typologie claire et univoque. De nombreux auteurs expriment cette confusion sémantique (Bishop *et al.*, 2007 ; Stewart, 2008), notamment Philip W.F. van Notten *et al.* (2003, p.424) qui remarquent que « *one drawback of existing typologies is that their categorisation of scenarios is rather broad. Consequently, a variety of scenario types are often clustered within the same category* ». Les confusions au sujet des définitions et des méthodes des scénarii doivent être résolues selon Stephen M. Millet (2003 cité par Bishop *et al.*, 2007, p.5-6), car cela permet « *to bring the value of scenario thinking and development to a wider audience* ». La figure 38 montre clairement que chaque auteur présente une typologie spécifique, qui parfois recoupe ou précise une autre typologie. Celle exposée par Philip W.F. van Notten *et al.* (2003) est appréhendée sous la forme d'un processus où le *project goal* influence le

¹³⁵ Pierre Wack (1923-1997) est considéré comme un des pères fondateurs de la planification par scénario (Condorbes et Durance, 2004)

¹³⁶ « *A scenario approach can only be credible and useful if it complies with four prerequisites-relevance, consistency, likelihood and transparency* » (Godet, 1993, p.350)

process design qui agit au final sur le *scenario content*. Cette actualisation se base sur l'analyse et la synthèse de 70 études de scénario de gestion, de science de l'environnement et de science politique¹³⁷.

Fabrice Hatem (1993, p.229) distingue quatre approches en *opposition* pour construire un scénario : (i) *backcasting* vs *forecasting* [ou normatif vs exploratoire (Börjeson *et al.*, 2006)¹³⁸], (ii) variantes vs scénarios synthétiques, (iii) scénarios « sans surprise » vs contrastés [ou tendanciels vs contrastés (Masini et Médina Vasquez, 2000)] et (iv) approche littéraire vs formalisée [ou qualitative vs quantitative (European Environment Agency, 2000)].

Opposition (i)- Ils se distinguent par leur approche de construction et traduisent une direction temporelle clairement déterminée (figure 39). Le scénario exploratoire part d'une situation présente, connue et progresse vers le futur. Il permet « *de mettre en lumière, de manière méthodique, les tendances les plus vraisemblables* » (Hattem, 1993, p.231). Le scénario normatif décrit un futur probable ou préférable et remonte de manière rétrospective jusqu'au présent¹³⁹. Il éclaire « *des risques de rupture, de probabilité peut être faible, mais ayant un impact potentiel important, ainsi que les moyens, [...], à mettre en œuvre pour parvenir à des objectifs prédéfinis* » (Hattem, 1993, p.231).

Opposition (iii)- Les scénarii tendanciels décrivent le prolongement de la situation présente, de manière constante et sans ruptures. Ils prennent en compte les facteurs de changements déjà connus, et implique de fait un degré de détail et de probabilité élevé. Les scénarii contrastés présentent des situations extrêmes, faites de ruptures, avec un degré de probabilité faible.

Si la typologie des scénarii prospectifs ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique (A. Martelli, cité par Chris Stewart, 2008, parle même de « *methodological chaos* »), leur méthode de construction, bien que variable selon les auteurs, s'appuie « *sur une base méthodologique commune (ou « méta-méthode ») qui a été synthétisé sous l'impulsion de Godet (1992) et dénommée « la méthode des scénarios »* » (Houet *et al.*, 2008).

¹³⁷ « *Van Notten et al. have offered a significant update to existing scenario typologies, providing a robust, flexible and more comprehensive grasp of the differences and similarities of scenario practice* » (Stewart, 2008, p.161)

¹³⁸ Le scénario prédictif (*forecasts*) exposé par Börjeson *et al.* (2006) se rattache aux propos évoqués sur la modélisation prédictive (page ?), et ne s'applique pas aux objectifs de la modélisation prospective.

¹³⁹ Pierre-André Julien, Pierre Lamonde et Daniel Latouche (1975) parlent de scénario d'anticipation

Hatem (1993, p.229)

Backcasting: part du point d'arrivée pour reconstituer à l'envers le cheminement qui le relie à la situation présente. Il explore des implications potentielles d'hypothèses.

Forecasting: examine les cheminements possibles à partir d'une situation présente, sans idées préconçues sur le point d'arrivée. Il explore des conditions préalables nécessaires à la réalisation d'un objectif ou d'un développement donné.

Variantes: un scénario de référence avec d'autres scénarii élaborés en "variante" de celui-ci

Synthétiques: les scénarii sont placés sur le même plan et sont chacun considérés comme une combinaison particulière des hypothèses de base

Sans surprise: le scénario ne suppose pas de rupture majeure dans aucun domaine (degré de probabilité subjective élevé)

Contrastés: le scénario explore les conséquences d'une rupture majeure (probabilité éventuellement faible)

Littéraire: le scénario est développé de manière littéraire

(sans méthode explicite et sans utilisation de modèles de simulation)

Formalisé: le scénario est défini comme une simple combinaison d'hypothèses (avec méthode et modèles)

Julien et al. (1975, p.255)

Scénario exploratoire

Tendanciel: cherche à identifier un futur possible (permanence des tendances lourdes)

D'encadrement: délimite l'espace des futurs possibles (permanence des tendances lourdes et variation extrême des hypothèses)

Scénario d'anticipation

Normatif: cherche à produire une image d'un futur possible et souhaitable

Contrasté: esquisse un futur souhaitable à la frontière des possibles

Masini et Médina Vasquez (2000, p.55)

Extrapolative and normative scenarios: Erich Jantsch

Extrapolative scenarios use data referring to the past and present bearing in mind what is possible and probable.

Normative scenarios are projected from the future to the present, and thereafter back to the future again.

Extrapolative scenarios can also be normative when, in addition to what is possible and probable, they also contain what is desirable.

First- and second-generation scenarios—Shell-SRI school

First-generation scenarios are usually exploratory (strive for understanding not action)

Second-generation scenarios are based on a solid analysis of reality.

Trend, Optimistic, Pessimistic, and Contrasting Scenarios—H. Kahn and Human and Social Futures Studies

Tendential-inertial or Trend scenario: described the prolongation of the present situation show structural changes. This scenario is extremely important for the decision maker because it shows him the consequences which may arise if things do not change and slowly worsen.

Utopian scenario: describes the best of possible worlds, what would be the ideal situation.

Catastrophic scenario: describes the worst of possible worlds, what is distopical.

Normative scenario: describes a desirable and achievable situation that improves the trend scenario.

Contrasting scenarios: describe different situations starting off from the variations of certain of the key variables. Generally they are quite the opposite of the trend scenario, and present extreme situations.

Börjeson et al. (2006, p.725)

Predictive (what will happen?)

Forecasts: what will happen if the most likely development unfolds?

What-if: what will happen on the condition of some specified nearfuture events of great importance for future development

Explorative (what can happen?)

External: they focus only on factors beyond the control of the relevant actors

Strategic: describe a range of possible consequences of strategic decisions

Normative (How can a specific target be reached?)

Preserving: the task is to find out how a certain target can be efficiently met, with efficiently usually meaning cost-efficiently

Transforming (or backcasting): the starting point is a high-level and highly prioritised target, but this target seems to be unreachable if the ongoing development continues

van Notten et al. (2003, p.426)

Project goal: exploration vs decision support

Inclusion of norms? : *descriptive vs normative*

Vantage point: *forecasting vs backcasting*

Subject: issue-based, area-based, institution-based

Time scale: *long term vs short term*

Spatial scale: *global/supranational vs national/local*

Process design: intuitive vs formal

Data: *qualitative vs quantitative*

Method of data collection: *participatory vs desk research*

Resources: *extensive vs limited*

Institutional conditions: *open vs constrained*

Scenario content: complex vs simple

Temporal nature: *claim vs snapshot*

Variables: *heterogeneous vs homogenous*

Dynamics: *peripheral vs trend*

Level of deviation: *alternative vs conventional*

Level of integration: *high vs low*

Figure 38 : Typologie synthétique des scénarii

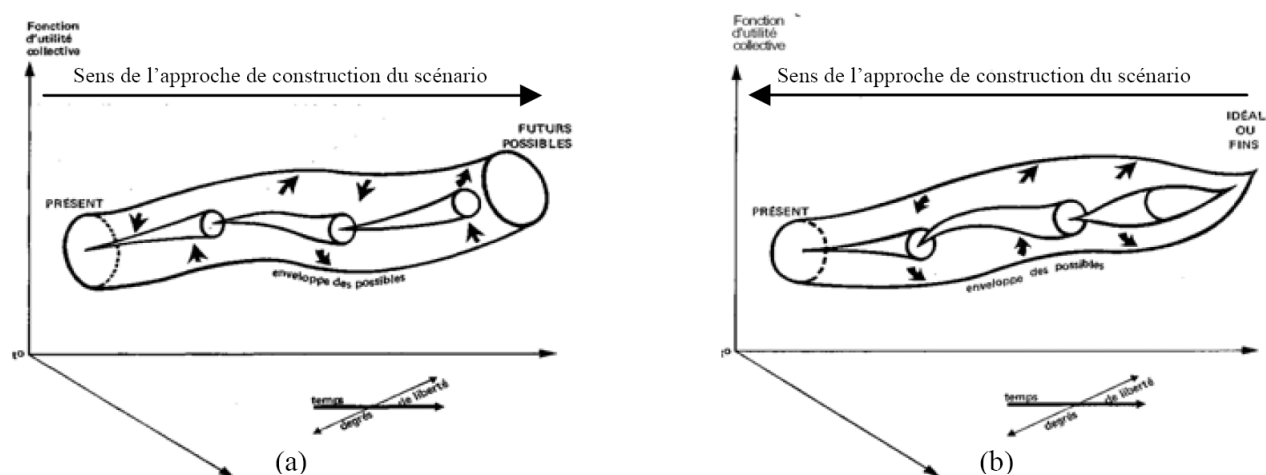


Figure 39 : Représentation tridimensionnelle (a) d'un scénario exploratoire et (b) d'un scénario normatif (Julien *et al.*, 1975). Source : Houet *et al.*, 2008

c) Démarche méthodologique

La méthode générale de construction de scénarii de Michel Godet est présentée par Fabrice Hatem (1993, p.240). Elle se décline en deux grandes phases : la construction de la « base¹⁴⁰ » et la construction des scénarii. La figure 40 (page 118) synthétise la démarche prospective de Michel Godet et établit un lien avec d'autres démarches (Julien *et al.* 1975 ; Masini et Medina Vasquez, 2000 ; Postma et Liebl, 2005).

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.

La construction des scénarii 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, p.243) 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 » (par exemple l'actualisation du D.L. 701, le rachat de nouvelles propriétés par les entreprises, etc.). Chaque élément sera constitué en suite logique qui permettra de lier le présent au futur (*horizon temporel*). L'enjeu d'après Julien *et al.* (1975, p.274) est de « préserver la cohérence

¹⁴⁰ La base correspond à « l'image de l'état actuel du système, aussi complète, globale et explicative que possible, à partir de laquelle l'étude prospective proprement dite (c'est-à-dire la construction des scénarios) pourra être mise en œuvre » (Hatem, 1993, p.240).

synchronique des différents éléments du scénario à chaque moment donné [images] en même temps qu'on maintient la logique de leur cheminement diachronique [cheminement] ».

Enfin il reste le passage des hypothèses aux projections. Thomas Houet (2008, p.5) explique que « *la construction d'images et de cheminements peut être effectuée à partir de récits et/ou de modèles. Le récit est une manière « intellectuelle » et souple d'établir de façon dynamique les relations causales entre variables du système qui donnent leur cohérence aux scénarios (Poux, 2003). Plus rigides que les récits, les modèles informatiques offrent l'avantage de fournir des données quantifiées et/ou spatialisées à l'aide de simulations, souvent plus explicites que la description qualitative des récits ».*

2.4.3. Validation et évaluation des modèles et des scénarii

2.4.3.1. Validation des modèles prédictifs

Une validation est « *a demonstration that a model within its domain of applicability possesses a satisfactory range of accuracy consistent with the intended application of the model* » (Rykiel, 1996 in : Pontius, Huffaker et Denman, 2004, p.446-447). L'optimisation des résultats et la précision du modèle passe par une calibration rigoureuse de celui-ci. La calibration est réalisée grâce à des données historiques empiriques et cherche à reproduire une situation connue. La validation d'un modèle passe généralement par la comparaison avec une situation réelle. Si cette étape est fondamentale pour le modélisateur, elle ne satisfait pas les attentes des aménageurs et des décideurs. Robert Gilmore Pontius et Joseph Spencer (2005, p.213) remarquent alors que « *one important purpose of the validation exercise is to allow the modeler and decision-maker to understand the appropriate level of confidence to have in the model as it extrapolates to points in time that are not known, for example, the future* ».

Plusieurs techniques de validation existent et certaines d'entre elles sont présentées en détail et utilisées dans le chapitre 6. On retrouve la mesure statistique Relative Operating Characteristic (ROC), qui consiste à combiner une carte de probabilité de changement avec une carte d'occupation utilisée pour la validation. Cette technique présente l'avantage de valider la capacité du modèle à spécifier l'allocation spatiale (Pontius et Schneider, 2001 ; Pontius et Batchu, 2003). L'indice de Kappa est également utilisé afin de mesurer la correspondance entre deux cartes d'occupation du sol (Pontius et Millones, 2008). On distingue également deux types de budgétisation. Le premier (Pontius *et al.*, 2004) examine une matrice de confusion dans le but d'estimer les changements d'occupation du sol entre deux paires de cartes. Le deuxième compare une carte de changements observés à celle de changements prédits (Chen et Pontius, 2010)¹⁴¹.

¹⁴¹ Deux autres types de comparaison sont présentés par Pontius *et al.* (2008, p. 16) Comparison between the reference map of time 1 and the prediction map of time 2 characterizes the model's predicted change, which reflects the behavior of the model. Comparison between the reference map of time 2 and the prediction map of time 2 characterizes the accuracy of the prediction, which is frequently a primary interest.

2.4.3.2. Validation des modèles prospectifs (scénarii)

A la différence des modèles prédictifs, il est impossible d'estimer à l'instant présent la qualité et la précision du modèle issu d'un scénario.

Le succès d'un scénario peut être évalué rétrospectivement en le comparant avec la situation actuelle. Mike Hulme et Suraje Dessai (2008) expliquent qu'au-delà de la précision (rétrospective) d'un scénario ou de l'efficacité (rétrospective) d'une décision, la rétrospective permet *a posteriori* de s'interroger sur les défaillances d'un scénario et d'établir de bonne condition à l'élaboration de nouvelles décisions. « *Les rétrospectives ont le mérite d'éviter de faire les mêmes erreurs et aident ainsi à développer notre connaissance du contenu et de la mise en œuvre des méthodes* » (Van Der Helm, 2002, in : Houet, 2006).

L'évaluation et la validation d'un scénario peut s'effectuer « à dire d'expert » et « à dire d'acteur » (Leclerc *et al.*, 2010, p.158). Enfin, Thomas Houet (2006, p.62) explique que « *l'évaluation peut aussi porter sur les méthodes utilisées dans les constructions de scénarios (modèles, probabilités...)* » ainsi que sur le scénario prospectif « *en vérifiant le respect des quatre fondamentaux de construction des scénarios : la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence* ».

2.4.4. L'aide à la décision

Les prises de décision politiques sont un élément fondamental et déterminant dans l'analyse des Lucc. Elles peuvent impacter directement les types d'utilisation du sol en modifiant les types d'activités (sylvicoles par exemple), ou en favorisant la création de parcs naturels. Elles peuvent également affecter ces processus de manière indirecte, notamment par la mise en place de politique économique sectorielle (prix du bois, aide à au boisement, exonération d'impôts, etc.) (Reid *et al.*, 2006). Ceci doit inciter les dirigeants politiques, les aménageurs à anticiper les répercussions socio-économiques et environnementales de leurs décisions. Or, « *l'anticipation n'est guère répandue chez les dirigeants, car, lorsque tout va bien, ils peuvent s'en passer et, lorsque tout va mal, il est trop tard pour voir plus loin que le bout de son nez : il faut réagir et vite* » (Godet, 1993 in Hatem, 1993, p.9). Provoquer une (ré-) action passe avant tout par l'aide à la décision qui implique un choix parmi plusieurs alternatives. « *The alternatives may represent different courses of action, different hypotheses about the character of a feature, different classifications, and so on* » (Eastman, 2006, p.124). La complexité des dynamiques environnementales et leur évolution rendent également complexe le jeu des prises de décision. Dans ce contexte, et en les comparant aux décisions cognitives traditionnelles étudiées par les psychologues, B. Brehmer (1990) cité par Chermack (2004, p.297) remarque que la prise de décision repose sur quatre critères :

1. There are a series of decisions rather than a single decision.
2. The decisions are interdependent—current decisions constrain future decisions.
3. The environment changes autonomously and as a result of decisions made.
4. It is insufficient for the correct decisions to be made in the correct order—they must also be made at a precise moment in real time.

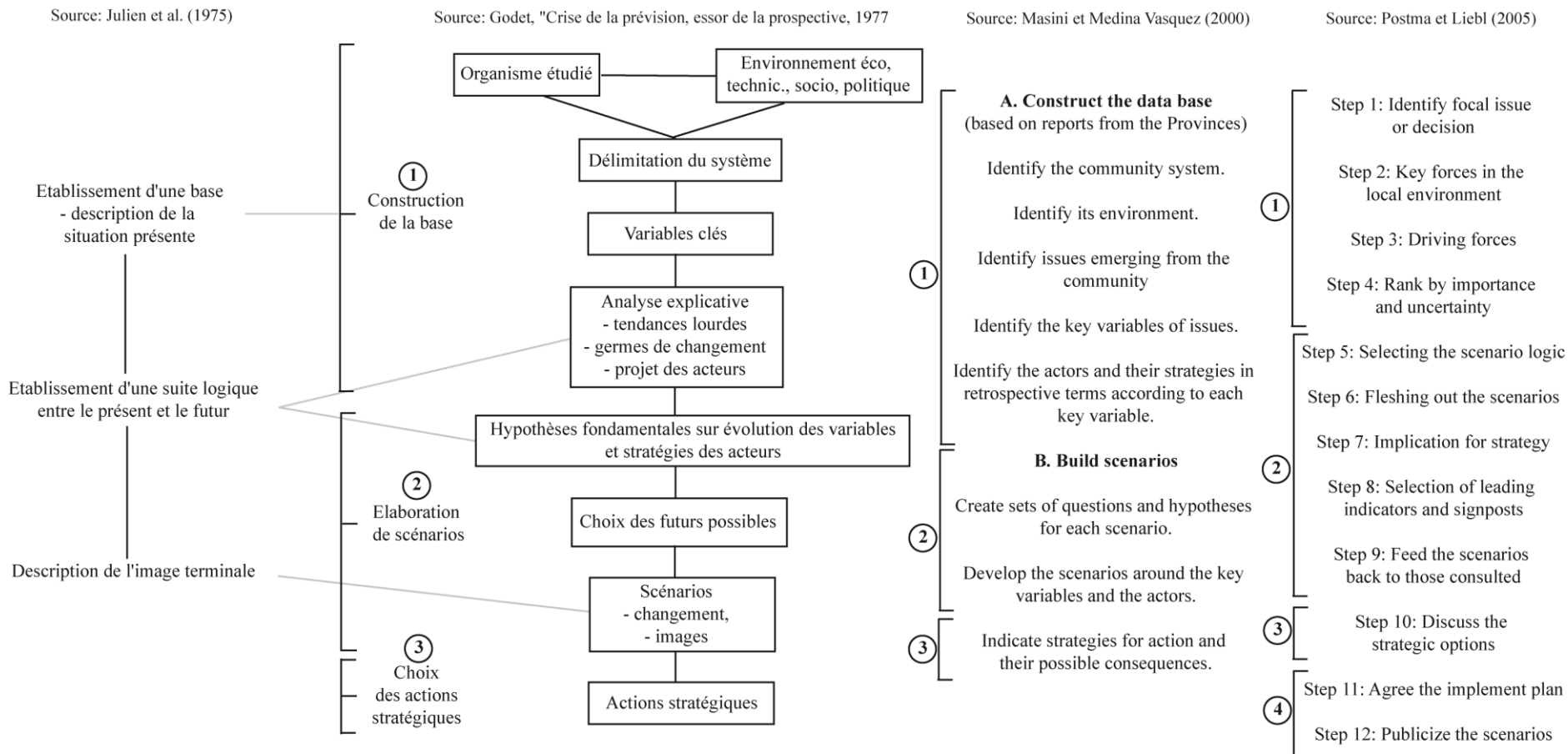


Figure 40 : La démarche prospective vue par plusieurs auteurs

CONCLUSION

Le concept de développement soutenable formalise en un seul et même référentiel les notions de temporalités, de ressources renouvelables, de gestion soutenable, de société, d'économie locale et globale, de conflictualité, de production, de rapport à l'espace, de prise de décision stratégique et de participation. Il embrasse ainsi les caractéristiques qui fondent un système complexe.

L'intensification des pratiques sylvicoles et leurs répercussions socio-économiques et environnementales ont vu l'apparition et l'affirmation des systèmes de certifications afin de répondre aux attentes du développement soutenable. La quasi-totalité des plantations industrielles au Chili sont soumises à un système de certification. Cependant, leur efficacité reste focalisée sur des objectifs de rentabilité économique en négligeant les perspectives sociales et environnementales. Monique Barrué-Pastor (2004, p.25) remarque que la conciliation des « *impératifs de développement à court terme, pour répondre à une demande sociale pressante notamment au niveau des populations les plus démunies, et les objectifs de préservation de l'environnement sur le long terme, pour satisfaire aux obligations de prendre en compte les générations à venir, nécessite des instances de régulations qui n'existent pas* ». A la nécessaire création de ces instances de régulations s'ajoutent leur capacité à anticiper les dynamiques environnementales futures et d'en faire émerger des politiques qui répondent aux attentes économiques et sociales des populations locales.

Le suivi des changements d'occupation et d'utilisation du sol (LUCC) et la mise en place de scénarii prospectifs spatialement explicites, donne aux décideurs une vision simplifiée d'un système complexe et un panel d'images du futur censé les aider dans leurs prises de décisions.

CHAPITRE 3 – L’aire d’étude et les données. Approche multi-scalaire : du régional au local

INTRODUCTION

Avant d’entreprendre toute prospective, il faut déterminer quelle zone fera l’objet de notre analyse. L’approche multi-scalaire facilite le choix de l’aire d’étude car elle permet de resituer la problématique dans son contexte national-régional et communal, en identifiant progressivement les éléments déterminants (**section 1**). La commune de San Juan de la Costa représente un intérêt certain pour la modélisation prospective, de par les recherches menées par des chercheurs (locaux et internationaux) sur la zone et par la littérature et les données qui en découlent, mais aussi de par sa situation géographique, sa végétation et sa population autochtone (**sections 2 et 3**). En effet, en tenant compte de la colonisation progressive des entreprises forestières vers le sud du pays, et la place prépondérante qu’occupent les populations Mapuches, établir des scénarii prospectifs constitue une opportunité afin de prévoir l’impact des diverses politiques qui sont et seront appliquées sur cette commune. L’intérêt de l’étude prospective à l’échelle locale est qu’elle permet « *d’identifier des enjeux de gestion et des sources de conflits locaux ou encore pour déterminer l’influence des facteurs locaux sur les changements des modes d’usage des sols [...]* » (Houet, 2008, p.3). Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de mobiliser des données capables d’appréhender la dynamique des types d’occupation du sol et plus spécifiquement des plantations industrielles à plusieurs échelles (**section 4**).

3.1. Caractéristiques de la 8^{ème} – 9^{ème} – 14^{ème} et 10^{ème} Régions

L’aire d’étude se situe dans le centre-sud chilien. La limite septentrionale est à une distance de 300 km de la capitale Santiago de Chile (800km pour San Juan de la Costa). Elle s’étend de la 8^{ème} Région du Bío-Bío au sud continental de la 10^{ème} Région de Los Lagos [(36°00’36"–41°47’42" (latitude sud)], en passant par la 9^{ème} Région de l’Araucanía et la 14^{ème} Région de Los Ríos récemment créée (figure 41). Cette dernière est issue de la scission de la Région de Los Lagos suite à l’entrée en vigueur de la loi N°20.174 du 2 octobre 2007¹⁴². Ces quatre régions font partie de l’Ecorégion des Forêts Tempérées Humides Valdivienne (chapitre 1).

3.1.1. Une forte concentration de plantations

La grande majorité des plantations industrielles de pins et eucalyptus se situe dans cette zone, ainsi que dans la 7^{ème} Région du Maule. La figure 42 révèle qu’en moyenne 85% de la superficie forestière annuelle plantée à l’échelle nationale se concentre dans ces cinq régions. Historiquement, ce fut dans la 8^{ème} Région que les premières plantations apparurent, justifiant en partie le taux élevé de boisement entre 1975 et 2007. « *El agotamiento de los bosques nativos en la zona de Concepción obligó la empresa [Compañía Carbonífera e*

¹⁴² D’après les articles 1 et 2, la région comprend est composée de deux provinces : Valdivia et Ranco.

Industrial Lota] *a iniciar las plantaciones de pino y eucalipto, en 1907 (CORMA, 2002). [...] En 1915, la empresa ya contaba con 34.339 hectáreas de pino radiata, pino marítimo, eucaliptus globulus y diversos cipreses, ubicadas en la Provincia de Concepción, constituyendo las mayores plantaciones de América del Sur* » (Otero, 2006, p.142). La région de Los Lagos affiche quant à elle les plus faibles pourcentages, bien qu’on observe une augmentation progressive depuis 2003. Cette tendance s’explique notamment par les prévisions de boisement en *Eucalyptus nitens* présentées par l’INFOR lors d’une journée d’étude. Le Diario Austral de Llanquihue relaie cette information dans un article paru le 26 juin 2004 intitulé « *Aumentan expectativas forestales para la Región de Los Lagos* ». Lors de cette journée, il est confirmé que « *las expectativas de plantación de 400 mil hectáreas de esta especie en la Región de Los Lagos, asegurando, así, un crecimiento sostenido en la producción forestal [...]* ». Enfin et dans le but de préserver un continuum continental nord-sud ayant pour point de départ la 8^{ème} Région, la région du Maule et l’île de Chiloé (10^{ème} Région) sont volontairement exclue de l’analyse¹⁴³.

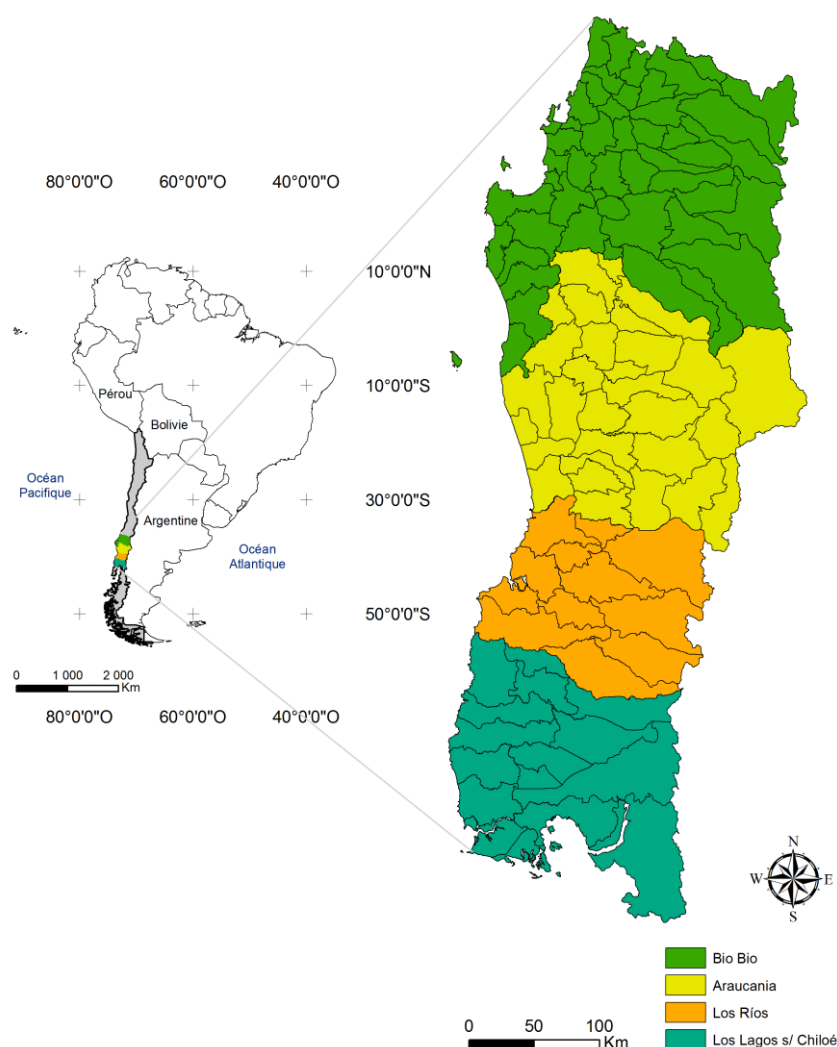


Figure 41 : Carte de localisation à l’échelle régionale

¹⁴³ Cristian Echeverría *et al.* (2006) ont analysé les processus de déforestation et de fragmentation sur la Cordillère Côtière de la 7^{ème} Région. L’expansion des plantations exotiques industrielles y est remarquable. Entre 1975 et 2000 leur superficie passa de 29 579 ha à 211 686 ha, voyant une fragmentation accrue de la forêt native.

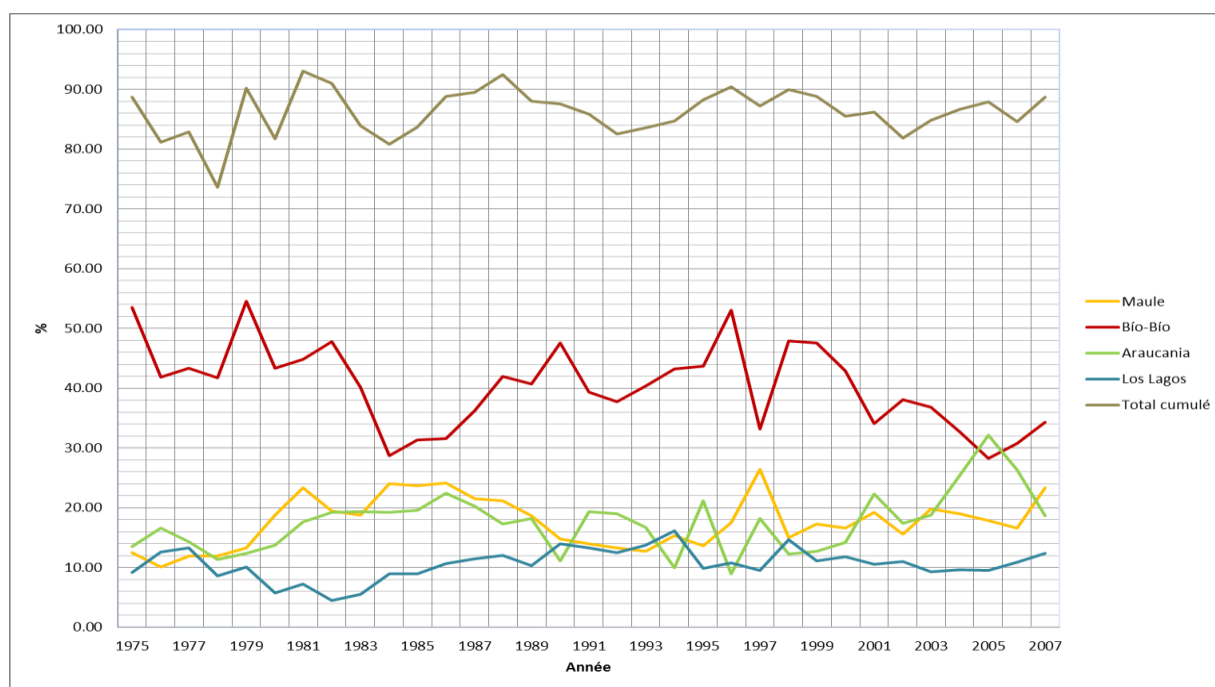


Figure 42 : Part (%) de la superficie forestière plantée par région et par an sur le total annuel national entre 1975 et 2007 - Source: INFOR, CONAF, Empresas (données actualisées avec INFOR, 2008. La 14ème Région est fusionnée avec la 10ème Région)

3.1.2. Description synthétique des régions administratives

On compte trois unités morpho-structurales majeures dans le centre-sud chilien avec d'est en ouest : (i) la Cordillère des Andes, (ii) la Dépression Intermédiaire, (iii) la Cordillère de la Côte (avec la précordillère côtière) (figure 43 et 44). La Dépression Centrale (appelée Dépression ou vallée centrale) est une dépression structurelle, remplie de dépôts glaciaires, fluvio-glaciaires, éoliens et alluviaux de cendres volcaniques¹⁴⁴ du quaternaire (Veblen et Schlegel, 1982) et de moraines. La Cordillère de la Côte sera présentée et détaillée à l'échelle de la commune de San Juan de la Costa. C'est dans ces deux unités que se concentre l'essentiel de l'activité économique chilienne.

La 8^{ème} Région du Bío-Bío

D'une superficie de 37 069 km², cette région est éminemment forestière. Pour la période janvier 2010-2011, les exportations régionales¹⁴⁵ atteignirent 478,8 millions de dollars, dont 343,8 m attribuables au secteur forestier (71,8%). D'après le cadastre de la CONAF (1999)¹⁴⁶, les plantations de pins et d'eucalyptus occupaient 964 940,87 ha de plantations en 1998 dont 665 330,91 ha de plantations adultes et 299 609,96 ha de plantations jeunes (âgées de moins de 5 ans) (figure 45). Le secteur agropastoral représentait quant à lui 48,4 M\$ (dont 18,4 M\$ pour les fruits). Suivent le secteur piscicole (32,9 M\$) et le secteur pétrolier (24,3 M\$).

¹⁴⁴ « *estructural o graben, rellena con depósitos cuaternarios glaciales, fluvio-glaciales, eólicos y aluviales de cenizas volcánicas* »

¹⁴⁵ http://www.inebiobio.cl/contenido.aspx?id_contenido=66

¹⁴⁶ Les données présentées ne sont pas synchrones, certaines n'ayant pas été actualisées (Bío-Bío, ou la province de Llanquihue).

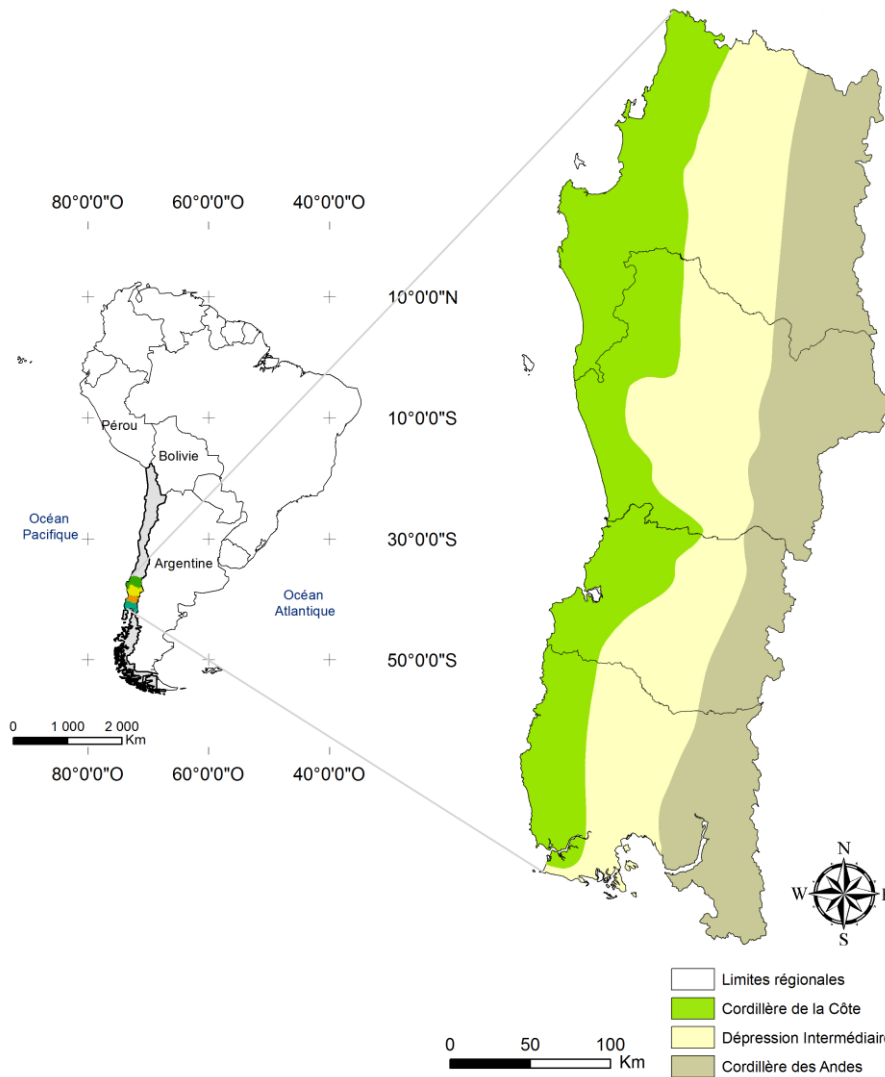


Figure 43 : Unités morfo-structurales dans le centre-sud chilien

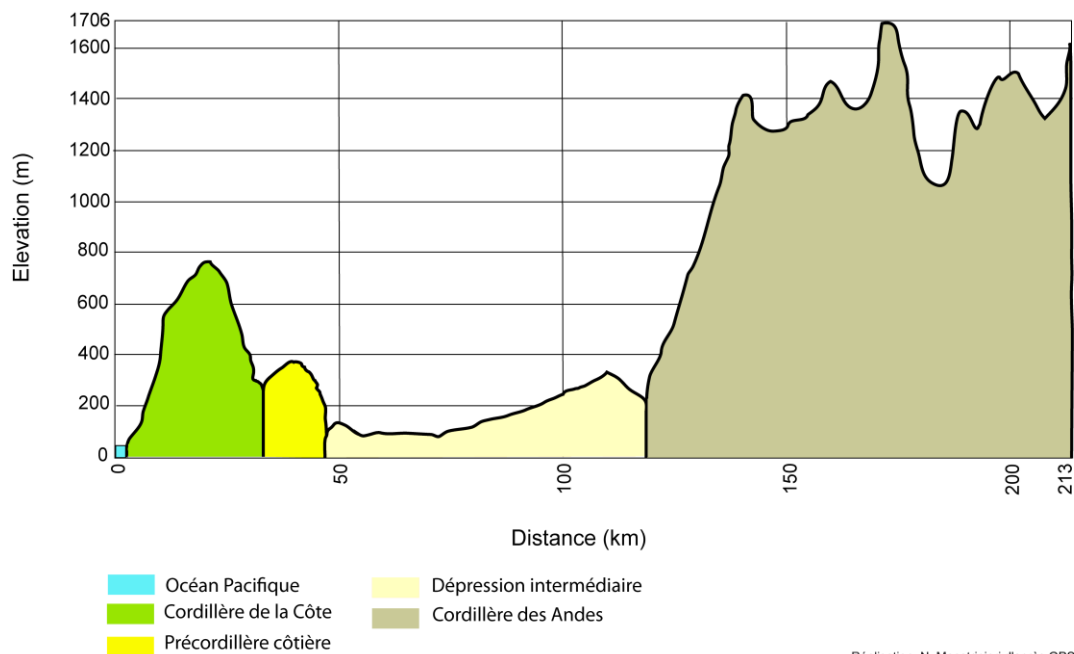


Figure 44 : Profil topographique du centre-sud chilien (S40.7°)

Réalisation: N. Maestripiéri d'après GPSVisualizer.com (2011)

La 9^{ème} Région de la Araucanía

En troisième position en terme de superficie (31 842 km²), l’Araucanía totalise 611,9 M\$ d’exportations entre janvier 2010-2011¹⁴⁷. Le secteur forestier reste le principal contributeur à hauteur de 426,9 M\$. Selon le Gouvernement Régional (GORE Araucania) ce secteur économique « *es el principal eje de desarrollo de la región, destacándose la existencia de industrias productoras y comercializadoras de celulosa, chapas de madera y construcciones prefabricadas, las cuales han accedido con éxito a los mercados internacionales* ». En 2007, le patrimoine forestier exotique atteignait 566 892,9 ha avec 428 731,9 ha de plantations adultes et 138 161 ha de plantations jeunes. Le secteur agropastoral affiche 97,9 M\$ d’exportations (dont 52,2 M\$ due à l’agriculture). La région occupe en effet la seconde place nationale par l’importance de son cheptel bovin.

La 14^{ème} Région de Los Ríos

Malgré une superficie plus restreinte, de 18 429 km², la 14^{ème} Région se caractérise par son dynamisme économique. L’économie régionale est majoritairement tributaire du secteur sylvicole, aussi bien par l’extraction de bois (essentiellement en pins) que par la production de cellulose avec l’implantation de la Planta Valdivia (Forestal Arauco). En 2006, les monocultures occupaient 179 501,28 ha avec 149 531,5 ha de plantations adultes et 29 969,78 ha de plantations jeunes.

La 10^{ème} Région de Los Lagos

Avec ses 48 583 km² (40 189 km² en excluant l’île de Chiloé) elle est la plus importante des quatre régions. Elle se découpe en quatre provinces, avec du nord au sud: Osorno, Llanquihue, Chiloé et Palena. Pour la période juillet-septembre 2003 le total des exportations atteignaient 294,4 M\$ avec 10,4 M\$ issus de la sylviculture et de l’agropastoralisme, 282,3 M\$ de l’industrie¹⁴⁸ et 1,4 M\$ de la pêche. En 2006 la province d’Osorno comptait 42 765,41 ha de plantations dont 32 696,91 ha de plantations adultes et 10 068,5 ha de plantations jeunes¹⁴⁹. La région se caractérise par la croissance du secteur agropastoral et le poids du cheptel bovins/ovins. Sur un total national de 3,7 millions têtes (bovins), la région en totalise plus d’un million (soit 28%), devant la 9^{ème} Région (18%) et la 8^{ème} Région (12%) (INE, 2007). D’après Jerko Yurac du Secretario Regional Ministerial de Agricultura: « *somos la única región que creció. Las cifras demuestran que la nueva Región de Los Lagos sigue teniendo la mayor importancia en el rubro* »¹⁵⁰. La Province d’Osorno réunit à elle seule 527 721 têtes et compte devenir, au travers du projet « Centro de Biotecnología, Calidad Agroalimentaria y del Medioambiente », une puissance agroalimentaire (Gobernación Provincia de Osorno).

¹⁴⁷ Selon le GORE Araucania: « *el sector exportador esta considerado como uno de los lineamientos prioritarios del pilar estratégico desarrollo productivo en la Estrategia Regional de Desarrollo (ERD) 2000 – 2010* ».

¹⁴⁸ Le secteur industriel comprend entre autre la production de cellulose.

¹⁴⁹ La CONAF recense 11 394 ha de plantations dans la province de Llanquihue en 1998.

¹⁵⁰ <http://www.chilepotenciaalimentaria.cl/content/view/96136/Crecimiento-ganadero-en-la-region-de-Los-Lagos.html>

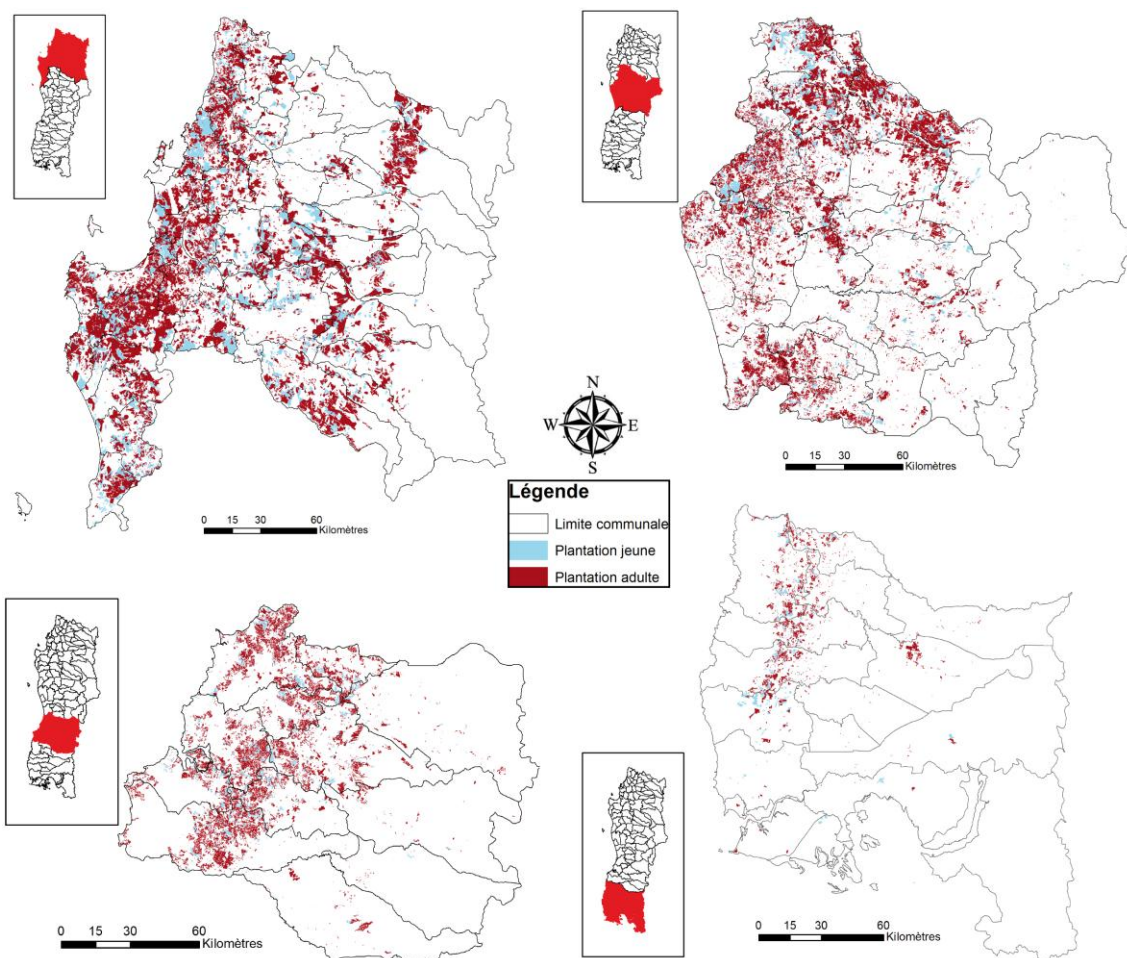


Figure 45 : Plantations industrielles (jeunes et adultes) de la 8ème à la 10ème Région. Source : CONAF (8ème Région : 1998 ; 9ème : 2007 ; 14ème : 2006 ; 10ème : 1998 et 2006)

3.2. San Juan de la Costa

3.2.1. Un laboratoire d’analyse privilégié

3.2.1.1. L’importance des programmes de recherche

La commune suscite l’intérêt de la communauté scientifique aussi bien à l’échelle locale qu’internationale. Un premier programme de recherche avait été entrepris (entre partenaires français et chiliens) sous la direction de Monique Barrué-Pastor entre 1997 et 2002, intitulé « *La gestion des ressources forestières et les conditions d’un développement durable dans la Région des Lacs au Chili* » (Programme de recherche ECOS-Sud France/CONICYT-Chili, n°C97H03 (Barrué-Pastor, 2004). Ce projet s’articula à un programme de recherche sous la responsabilité de Nicolas Sáez, appelé : « *Pression extractive et durabilité, en forêt originelle et propriété paysanne* ». Le fruit de cette collaboration fut matérialisé en 2004 dans un ouvrage collectif intitulé « *Forêts et développement durable au Chili. Indianité Mapuche et mondialisation* », publié par les Presses Universitaires du Mirail. Dans la continuité de cette étude, un nouveau programme franco-chilien ECOS Sud-CONICYT (2008-2011) a été créé : « *La forêt de la Cordillère Côtière continentale dans le sud du Chili : Dynamiques contemporaines et modélisations prospectives* », conduit par le

laboratoire GEODE à Toulouse et le CEDER (Centro de Estudios del Desarrollo Local y Regional) à Osorno.

D'autres études ont été menées dans la zone, notamment par Nicolas Sáez sur le processus de fragmentation de la forêt native sur les collines intérieures dans la province d'Osorno (s.d.) et la soutenabilité de l'exploitation forestière dans la Région des Lacs (1997). Egalement en lien avec l'exploitation forestière, Gilles Selleron (2001) étudia les processus de déforestation/reforestation sur le piémont de la Cordillère Côtière, alors que Dario Toro Balbotín (2007) analysa le développement du secteur forestier. Juan Sánchez Álvarez (2001) et Roberto Santana (2005) s'intéressent quant à eux au développement local et aux stratégies de développement.

3.2.1.2. Analyser, expliquer et promouvoir le développement : le rôle du CEDER

Dirigé par Juan Sánchez Álvarez, le CEDER¹⁵¹ est un centre de recherche rattaché à l'Université de Los Lagos (Osorno). Les thèmes de recherche sont en lien direct avec le territoire et aux problématiques culturelles, environnementales, économiques, sociales et politiques qu'il soulève. Voici les principales caractéristiques du Centre telles qu'elles sont présentées sur son site internet :

- Proporcionar una instancia de reflexión en torno a problemáticas de la Región, desarrollando modelos y técnicas aplicadas que permitan interpretar la dinámica del cambio y del desarrollo en los niveles local y regional.
- Proporcionar bases teórico-prácticos útiles para la formulación y ejecución de planes de desarrollo social, económico, institucional y cultural circunscrito a los niveles Comunal, Provincial y Regional.
- Contribuir a concretar la participación de instituciones y de la comunidad para impulsar y promover el Desarrollo Social- y Económico Local y Regional.
- Proporcionar Asesorías en la formulación y evaluación de proyectos que garanticen el uso eficiente de los recursos en el ámbito local y regional.

Afin de valoriser les recherches axées sur le développement local et régional, le CEDER publie deux fois par an la Revista LIDER (Labor Interdisciplinaria de Desarrollo Regional)¹⁵².

3.2.1.3. Des raisons pratiques

La présence d'une équipe de recherche spécialisée et située à proximité de San Juan de la Costa facilite l'appréhension du terrain. Tout d'abord pour la prise de contact. Les chercheurs du CEDER collaborent régulièrement avec de organismes tels que la CONAF, la CONADI, la CODEFF, l'INFOR, etc. ce qui favorise une mise en relation plus rapide avec les acteurs du secteur forestier. Enfin, la commune est située à une dizaine de kilomètres d'Osorno, ce qui permet de multiplier les missions de terrain ainsi que leur durée.

¹⁵¹ <http://ceder.ulagos.cl/>

¹⁵² <http://ceder.ulagos.cl/lider/>

3.2.2. Une place stratégique au sein de la Région de Los Lagos

Fondée le 17 décembre 1980, San Juan de la Costa est la plus récente des sept communes qui composent la Province d'Osorno, avec San Pablo, Osorno, Rio Negro, Entre Lagos, Purranque et Puerto Octay. Elle se localise au nord-ouest de la région, entre les parallèles 73°47'30"–73°18'50" (longitude ouest) et 40°14'14"–40°44'54" (latitude sud). D'une superficie de 154 479 hectares, elle est délimitée au nord par le rio Bueno qui se jette au 40°14 de latitude sud. Il évacue les eaux des lacs Ranco, Puyehue et Rupanco situés au pied de la Cordillère des Andes. D'après M. Mardones (2005, p.45) ce fleuve: « *es un gran valle en « V » que conforma una garganta profunda, inscrita 700-800m en el macizo costero. El vigor de este cavamiento contrasta con las aguas calmas de este rio, al que la marea remonta hasta 70km al interior. Al sur del rio Bueno se encuentran cuatros valles que atraviesan la Cordillera de la Costa y que como el valle del Lingue, drenan cuencas locales y limitadas: valles de Llesquehue, Contaco, Hueyelhue y de Llico* » (figure 46).

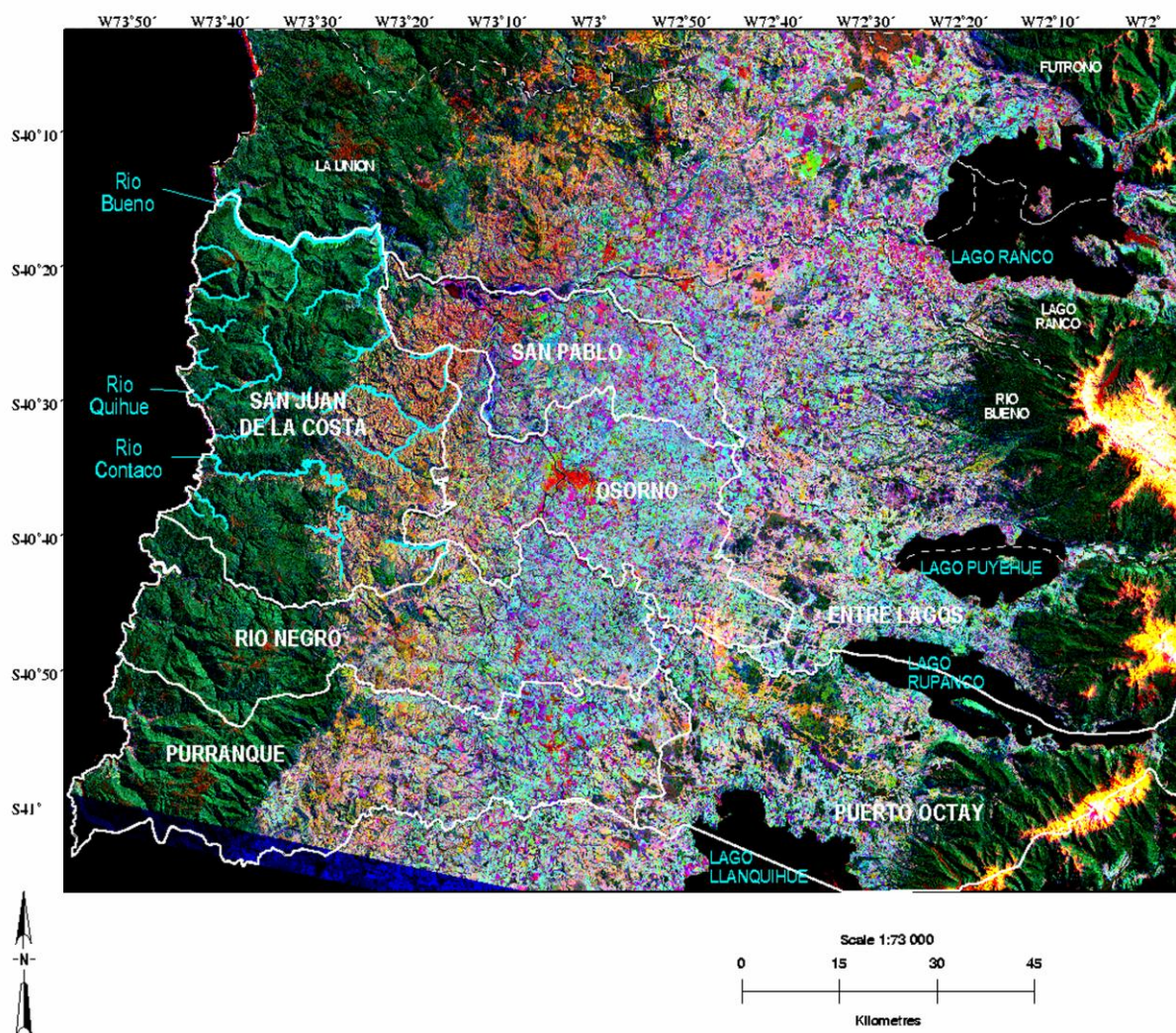


Figure 46 : Communes de la province d'Osorno – 10^{ème} Région de Los Lagos sur fond de composition colorée multitempore Landsat TM (CC-86b3_86b4_01b4)

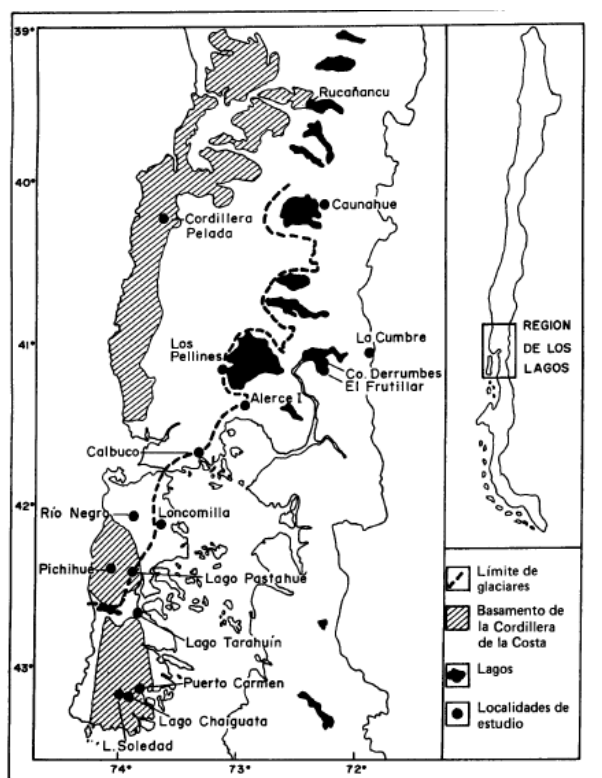


Fig. 1: Situación geográfica de las localidades comparadas en este trabajo. Se indica, además, el límite de los glaciares en la Región de los Lagos durante el Pleistoceno, Basamento de la Cordillera de la Costa (achurado) y posición de los principales lagos.

Figure 47 : Limites des glaciations durant le Pléistocène.
Source : Villagrán, 1991

La dernière époque glaciaire a joué un rôle déterminant sur les formations végétales présentes actuellement sur la Cordillère de la Côte. Durant le Pléistocène les glaces recouvrirent la totalité du territoire continental sud-chilien jusqu'au 43°S (au sud de l'île de Chiloé) et, au-delà de cette limite, la Cordillère des Andes et la Dépression Intermédiaire (figure 47). La Cordillère de la Côte devint ainsi un refuge pour les forêts tempérées sud-américaines. La zone de refuge la plus importante se trouvant dans la Cordillère de Nahuelbuta et les secteurs côtiers compris entre le 37°S et le 39°S (Armesto, Villagrán et Donoso, 1994).

« Al sur del valle del rio Bueno la cordillera retoma el carácter de bloque tectónico costero. Reaparece la Depresión Intermedia y los cordones se alinean a lo largo de grandes dislocaciones NE-SW, que se encadenan desde la llanura de Paillaco hasta el rio Llico » (Mardones, 2005, p.48).

L'altitude moyenne avoisine les 600 mètres, avec quelques élévations majeures entre les vallées du Contaco-Hueyelhue telles que : la cordillère de Los Espejos (940m) et la pampa de San Juan (850m) (Mardones, 2005, p.54). La commune connaît un climat tempéré pluvieux qui s'étend du 39°S à l'extrême sud du continent américain (Donoso, 1997). Plus précisément elle se trouve dans la zone bioclimatique tempérée hyperocéanique (étage méso-tempéré humide et hyper-humide) (Luebert et Pliscoff, 2005). Le régime pluviométrique élevé de cette zone est due à la présence de centres de basses pressions atmosphériques (Luebert et Pliscoff, 2005) corrélés à la présence du courant froid de Humboldt qui modère les températures. S'ajoute à cela un phénomène d'ascension orographique. La forte influence des vents d'ouest provenant du Pacifique sur le versant occidental de la cordillère provoque de fortes

La commune se caractérise par le relief accidenté de sa Cordillère Côtière (ou *Cordillera Pelada*) et les collines peu pentues de sa précordillère (ou Piémont) à l'est.

Les sols des versants de la Cordillère ont évolué sur de la roche granitique et dérivent du granite et du schiste. La Cordillère de la Côte est constituée de roches fragiles, métamorphiques de type micaschiste (Fuentes, 1994) datant du Paléozoïque et du Précambrien (Veblen et Schlegel, 1982). Dans la 10^{ème} Région les sols sont plus récents et sont formés de matériaux provenant de glaciers (Hoffmann, 2005). Cette formation qui date du Jurassique repose sur un socle métamorphique rocheux du Paléozoïque (Veit et Garleff 1995, in : Smith, 2001, p.2).

précipitations. A titre d'exemple, Venecia (40°15'S – 73°42'W) située au nord-ouest de San Juan de la Costa affiche des précipitations moyennes annuelles de 3 500mm (Veblen et Schlegel, 1982). Dans sa représentation cartographique préliminaire de la végétation chilienne, Victor Quintanilla (1974) dresse un profil topographique de la 10^{ème} Région de Los Lagos au niveau de la ville de Frésia en mettant en exergue les fortes précipitations qui s'abattent sur la chaîne littorale (jusqu'à 4000mm/an) (figure 48). En général, et d'après la municipalité de San Juan de la Costa les précipitations moyennes annuelles dépassent les 2 500 mm¹⁵³.

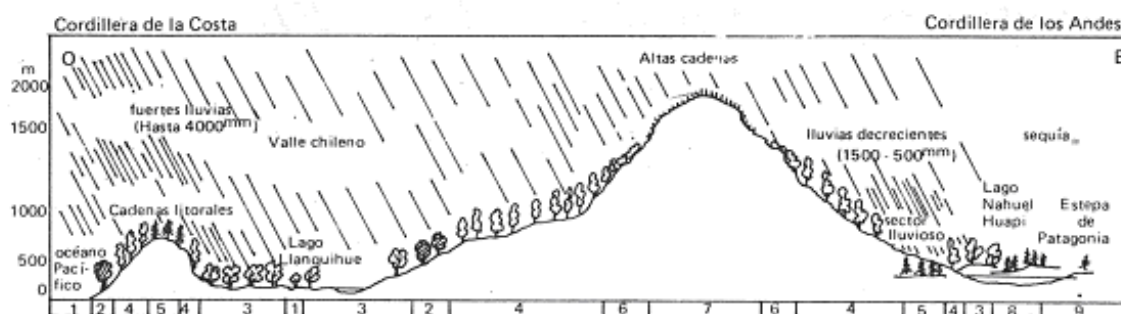


Figure 48 : Profil topographique (Frésia) 41°10' de latitude sud. [2- Forêt dense valdivienne, 4- forêts de roble sempervirente, 5- forêts de conifères]. Source : Quintanilla, 1974

Les épisodes glaciaires susmentionnés et les conditions atmosphériques et topographiques favorisent le maintien d'une végétation pluristratifiée et d'une faune abondante à très fort taux d'endémisme.

Carlos Ramírez et Cristina San Martín (2005) répertorient sept associations végétales prospérant dans cette zone (Cordillère de la Côte – Aire de San Juan de la Costa) :

- (i) Les forêts caducifoliées tempérées de roble (*Nothofagus obliqua*) laurel (*Laurelia sempervirens*) et lingue (*Persea lingue*). Cette formation se trouve sur le versant oriental de la cordillère et peut se mélanger, sous l'effet de foehn, à la forêt sclérophylle de boldo *Peumus boldus* jusqu'à 400 mètres.
- (ii) Les forêts caducifoliées de rauli (*Nothofagus alpina*) - coihue (*Nothofagus dombeyi*). Elles se situent au sud du fleuve Valdivia et aux bords du fleuve Bueno (río Bueno) à moyenne altitude et dans le secteur de Hueyusca (La Naranja). Le rauli préférant les zones à faibles températures de la cordillère (Hoffmann, 2005).
- (iii) Les forêts hygrophiles de olivillo (*Aextoxicon punctatum*) s'accompagnant aussi de ulmo (*Eucryphia cordifolia*) et de laurel (*L. sempervirens*). L'olivillo est une espèce sempervirente et forme des forêts monospécifiques (Hoffmann, 2005).
- (iv) Les forêts hygrophiles de coihue (*Nothofagus dombeyi*) – ulmo (*Eucryphia cordifolia*) occupent le versant oriental de la cordillère entre 400 et 600m et

¹⁵³ <http://www.sanjuandelacosta.cl/>

sont les plus abondantes de la selve Valdivienne. Ces deux espèces sont sempervirentes et ont une croissance relativement rapide et peuvent atteindre les 40m (Hoffmann, 2005).

- (v) Les forêts hygrophiles de tepa (*Laureliopsis philippiana*) – tineo (*Weinmannia trichosperma*) et mañío (*Saxegothaea conspicua*). Elles se développent entre 500 et 800m dans la cordillère côtière de Valdivia, dans des zones de grandes humidités (Oberdöfer, 1960, in Ramírez et San Martín, 2005).
- (vi) Les forêts de conifères d'alerce (*Fitzroya cupressoides*) colonisent les plateaux des sommets ou des coteaux plus exposés et froids, avec une exposition sud. Leur aire de développement est comprise entre 500 et 1100m, avec une aire optimale entre 700 et 900m (Hoffmann, 2005).
- (vii) Les forêts de Cîprès de las Guaitecas (*Pilgerodendron uvifera*). Il s'agit d'une espèce caractéristique de l'archipel de Chiloé mais dont l'aire de distribution s'étend de Valdivia, où elle se mélange à l'alerce, jusqu'à la Terre de Feu (Hoffmann, 2005).

3.2.3. Cartographie officielle de l'occupation du sol

D'après le dernier recensement de l'Instituto Nacional de Estadísticas (INE) de 2007¹⁵⁴, San Juan de la Costa comptait 349 exploitations forestières (plantations et forêt native confondues) pour 119 438,20 hectares. Sur ce total, 40,20 ha correspondaient à des sols destinés aux cultures (annuelles et permanentes, prairies fourragères permanentes et temporaires, sols en jachères), et 119 398 ha aux autres types de sols. Les prairies naturelles occupaient 1 320 ha, les plantations forestières 11 691,8 ha, les forêts natives 100 964,7 ha, les buissons 3 869 ha, les infrastructures (constructions, chemins, retenus d'eau, etc. sauf cultures sous serres) 433 ha, et les terrains stériles (étendues de sable, roches, pierres, marais, etc.) 1 119,5 ha. La figure 49, générée grâce aux données du Cadastre de la CONAF (2006), permet de localiser les types d'occupation du sol et met en exergue l'importance de la topographie. On remarque clairement la démarcation entre la Cordillère de la Côte (forêt native, régénérée et forêt en formation basse) et la précordillère (prairie, plantations exotiques, buisson, culture). Le montage photographique (photo 5) apporte une lecture complémentaire du paysage de la précordillère de la côte, et insiste sur cette démarcation. Elle résume globalement la constitution d'un paysage forestier marqué par de vastes zones de plantations et de coupes rases, ici aux abords de la route U-40.

¹⁵⁴ CENSO AGROPECUARIO Y FORESTAL 2007 - Principales resultados del VII Censo Agropecuario Y Forestal realizado en 2006-2007, que muestra las transformaciones de la estructura agraria chilena relacionadas con el uso y tenencia del suelo, tipos de cultivos, tecnología y mano de obra empleada. Se realiza cada 10 años.

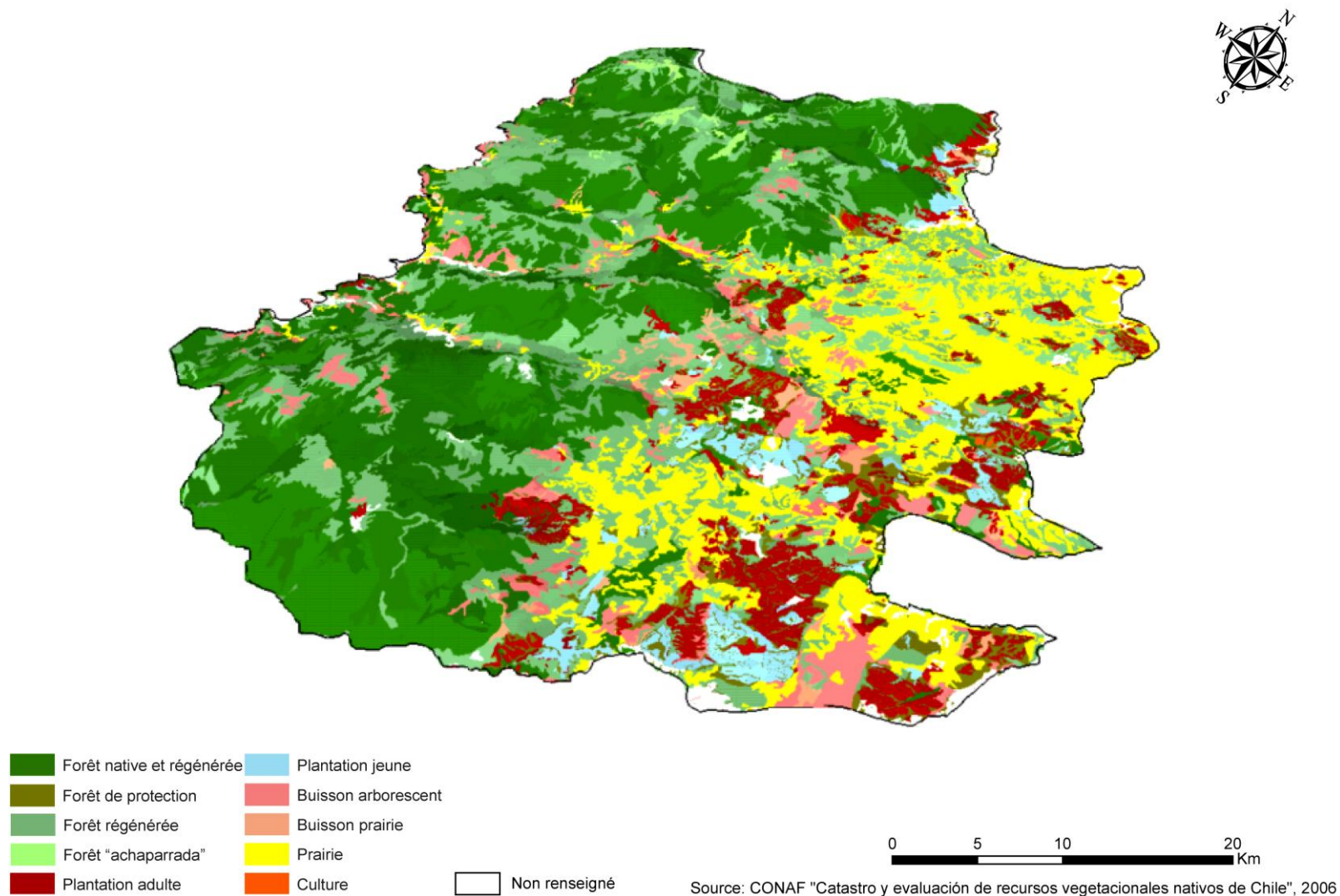


Figure 49 : Carte d'occupation du sol en 2006 – couplée MNT. Source : CONAF, 2006

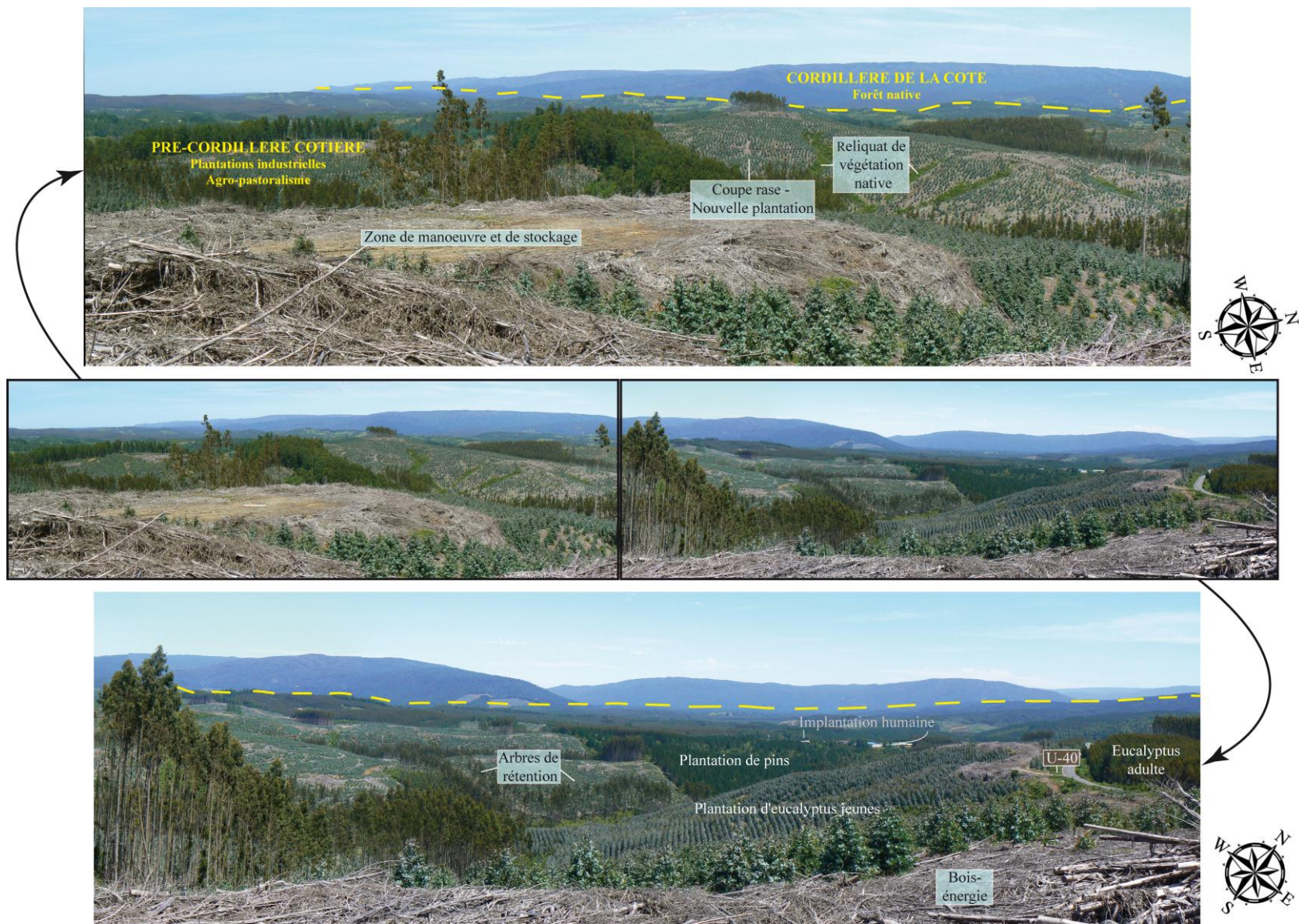


Photo 5 : Paysage de (pré-)cordillère côtière – San Juan de la Costa (S 40°37'0 - W 73°27'1) – Décembre 2008 ©

3.3. Aspects démographiques et situation socio-économique

Bien qu'elles regroupent l'essentiel de l'activité forestière, les quatre régions affichent les indices de Développement Humains (IDH) les plus bas (Donoso et Otero, 2005). La 8^{ème} Région, avec les plus grandes superficies de plantations exotiques, est aussi la plus pauvre avec un pourcentage de population rurale indigente le plus élevé du pays. La 9^{ème} Région, avec une activité forestière très développée, voit la plus forte concentration de population Mapuche. Ces derniers perçoivent la moitié des revenus et leur IDH dans tous les aspects sont inférieurs à la population non Mapuche (Donoso et Otero, 2005). La commune de San Juan de la Costa présente sensiblement les mêmes caractéristiques, avec la présence de communautés indigènes et l'IDH le plus faible du Chili en 2003 (0,510) (PNUD, 2004).

3.3.1. Démographie et pauvreté

D'après les recensements de la population (INE) la population de San Juan de la Costa comptait 8 849 en 1982, 9 778 en 1992 et 8 831 habitants en 2002 (tableau 11). La commune présente une forte part de ruraux : 90,1% de la population totale en 1992 et 89,8% en 2002. Le peuple indigène Mapuche-Huilliche totalise 5 238 habitants (59,3%) avec une nette concentration dans les zones rurales (93,7% contre 6,3% d'urbains). Sur les 62 communautés indigènes recensées en 2000 (Barrué-Pastor, 2004) 44 d'entre-elles se situaient sur la précordillère côtière. Bien que la figure (figure 50) indique un plus grand nombre de communautés, elle témoigne de l'importance du réseau routier sur l'implantation humaine. Cependant Fidel Espinoza (1997, cité par Juan Sánchez Alvarez, 2001) note que le contexte territorial, caractérisé notamment par un isolement accru (accès difficile)¹⁵⁵, permet de qualifier la commune comme l'une des plus pauvres du pays. En effet, elle connaît un taux de pauvreté très élevé. Selon l'Encuesta de CARacterización SocioEconómica Nacional (CASEN) publiée par le Ministerio de Planificación, le taux de pauvres (indigents et non indigents) s'élevait à 32,4% de la population communale en 2000, 42,1% en 2003, pour atteindre les 14,3% en 2006 (dont 5,6% d'indigents), alors qu'à l'échelle du pays ce taux était respectivement de 20,2%, 18,7% et 13,7%¹⁵⁶ (BCN, 2008). Cette chute extraordinaire du taux de pauvreté de 18.1 points de pourcentage en six ans laisse perplexe et demande à être nuancée.

¹⁵⁵ S'ajoute à cela « la faible productivité des terres (précordillère et cordillère), faible qualification de la main d'œuvre (due entre autre à son faible niveau de scolarité), incorporation faible voire inexistante de capital dans les tâches productives, et un accès restreint aux services basiques (lumière, eau potable, santé, électricité, etc) » (Sánchez Alvarez, 2001, p.75).

¹⁵⁶ Cette chute remarquable du taux de pauvreté a également été mise en exergue par Claudio Agostini *et al.* (2008). D'après le PNUD Chile, l'Objectif du Millénaire pour le Développement fixé par les Nations Unies est de réduire de moitié entre 1990 et 2015 le pourcentage de personnes dont le revenu est inférieur à un dollar par jour (<http://www.pnud.cl/areas/2.asp>).

| | 1982 | 1992 | 2002 | | |
|---------------|-------|-------|-------|---------|-----------|
| | | | Total | Mapuche | % Mapuche |
| Rural | ----- | 8 810 | 7 929 | 4 907 | 61.89 |
| Urbain | ----- | 968 | 902 | 331 | 36.70 |
| Total | 8 449 | 9 778 | 8 831 | 5 238 | 59.31 |

Tableau 11 : Recensement de la population (1982, 1992 et 2002).
Source : INE – Région de Los Lagos¹⁵⁷¹⁵⁸¹⁵⁹

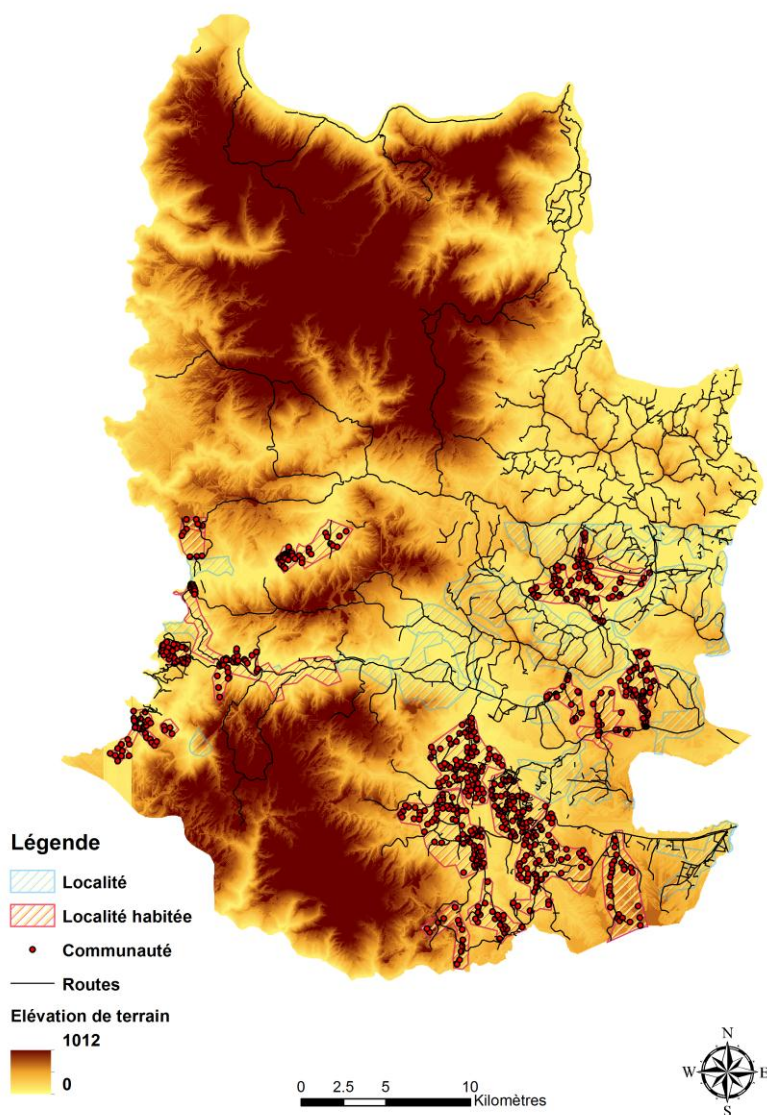


Figure 50 : Localisation des communautés indigènes (zone centre et sud). Source : IGM, 2008 ; Sáez, s.d.

¹⁵⁷ <http://www.ineloslagos.cl/app/bancodatos/bancodatos.htm>

¹⁵⁸ <http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL1992COM&MAIN=WebServerMain.inl>

¹⁵⁹ <http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KCOM&MAIN=WebServerMain.inl>

3.3.2. Décentralisation et investissement

Cette chute remarquable du taux de pauvreté est due en partie à la participation de la commune au « Programa Nacional de Superación de la Pobreza » initié par le premier gouvernement de la Concertación (1992), ce qui engendra une augmentation sans précédent des investissements publics provenant du Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR) (Sánchez Alvarez, 2001). Cet organisme est considéré comme l’instrument le plus décentralisé du Gouvernement Central pour transférer les ressources fiscales à chacune des régions¹⁶⁰. Le processus de décentralisation enclenché en 1974, et le renforcement de l’autorité régionale en 1990, assigna de nombreuses responsabilités aussi bien aux régions qu’aux municipalités. D’après les travaux de Claudia Serrano et Ignacia Fernández (2002, p.3): « *las municipalidades están llamadas a ser el "agente del desarrollo económico y social de las comunas", para lo cual se estipulan funciones privativas (de su exclusiva responsabilidad) y sus funciones compartidas (con el nivel central del Estado y sus ministerios). Los gobiernos regionales, por su parte, tienen la misión de "promover el desarrollo económico, social y cultural de la región" siendo el principal instrumento con que cuentan para hacerlo es la administración y asignación de los fondos de inversión pública de decisión regional* ».

Si le montant des investissements fut très élevé dans la commune, de nombreux auteurs pointèrent du doigt l’absence de projet de développement et planification territoriale, tenant compte des potentialités culturelles et environnementales (Sánchez Alvarez, 2001 ; Santana, 2004). De plus, Roberto Santana (2004, p.146) remarquait que « *le pouvoir local n’est pas armé, ni en formation ni en volonté politique, pour coordonner les différents acteurs locaux et agir dans le sens de stratégies favorisant le bien commun* ».

Ces défaillances amenèrent la municipalité à proposer un projet de planification stratégique appelé « PLAN de Desarrollo Comunal de San Juan de la Costa » (PLADECO). Avec la coordination de tous les agents économiques et sociaux présent sur la commune, ce Plan vise à construire une vision prospective qui « *privilegie el mejoramiento de las condiciones de vida de los sectores con menores ingresos o sectores sensibles con ausencia de bienestar, por ejemplo a través del acceso al empleo y los servicios básicos, entre otros* » (AZUL Consultores Asociados, 2004).

3.3.3. La structure foncière

L’histoire de l’*aliénation-récupération* des terres indigènes ayant déjà été abordée dans le chapitre 1 (cf. 1.3.1.2.), cette section a pour objectif de dresser une cartographie du foncier dans la commune. Se basant sur l’étude de Raul Molina et Martin Correa (1998), Dario Toro Balbotin (2007) synthétise la configuration de la propriété dans les terres huilliches (figure 51). Cinq catégories d’occupation sont présentées : (i) les petites propriétés d’origine successorales, (ii) les propriétés provenant de Titres de Faveur, (iii) les Fonds Fiscaux, (iv) les Fonds Particuliers et (v) les territoires indigènes régularisés (à partir de 1994).

¹⁶⁰ <http://www.subdere.gov.cl/programas/divisi%C3%B3n-desarrollo-regional/fondo-nacional-de-desarrollo-regional-fndr>

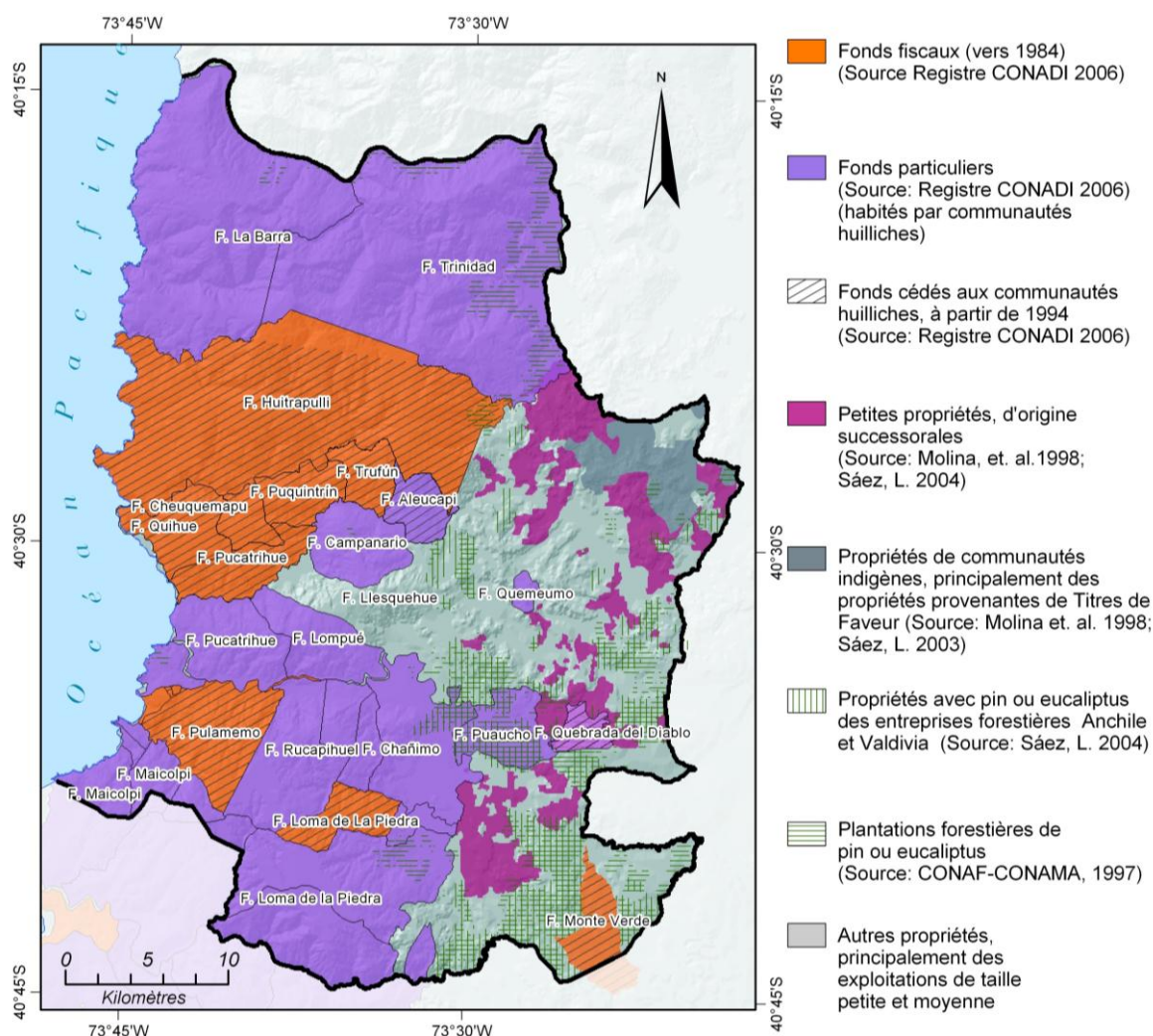


Figure 51 : Configuration actuelle de la propriété dans les terres huiliches. Source : Toro Balbotín, 2007

Si la Cordillère de la Côte compte peu de propriétés, la précordillère est morcelée entre les petites, moyennes, grandes et très grandes propriétés. D'après les données de la Corporación NACIONAL de Desarrollo Indígena (CONADI, 1999) (figure 52), la structure foncière comptait 880 petites propriétés (7 740.63 ha), 263 propriétés de taille moyenne (10 525.32 ha), 31 grandes propriétés (10 718.46 ha) et 4 très grandes propriétés (14 201,74 ha). Le graphique (figure 52) traduit ce net déséquilibre territorial. A elles seules les quatre entreprises représentent 37% de la superficie totale des propriétés, alors que les petits propriétaires (220 fois plus nombreux) ne pèsent que 19%. Cette situation traduit une concentration et une capitalisation des terres dans la commune.

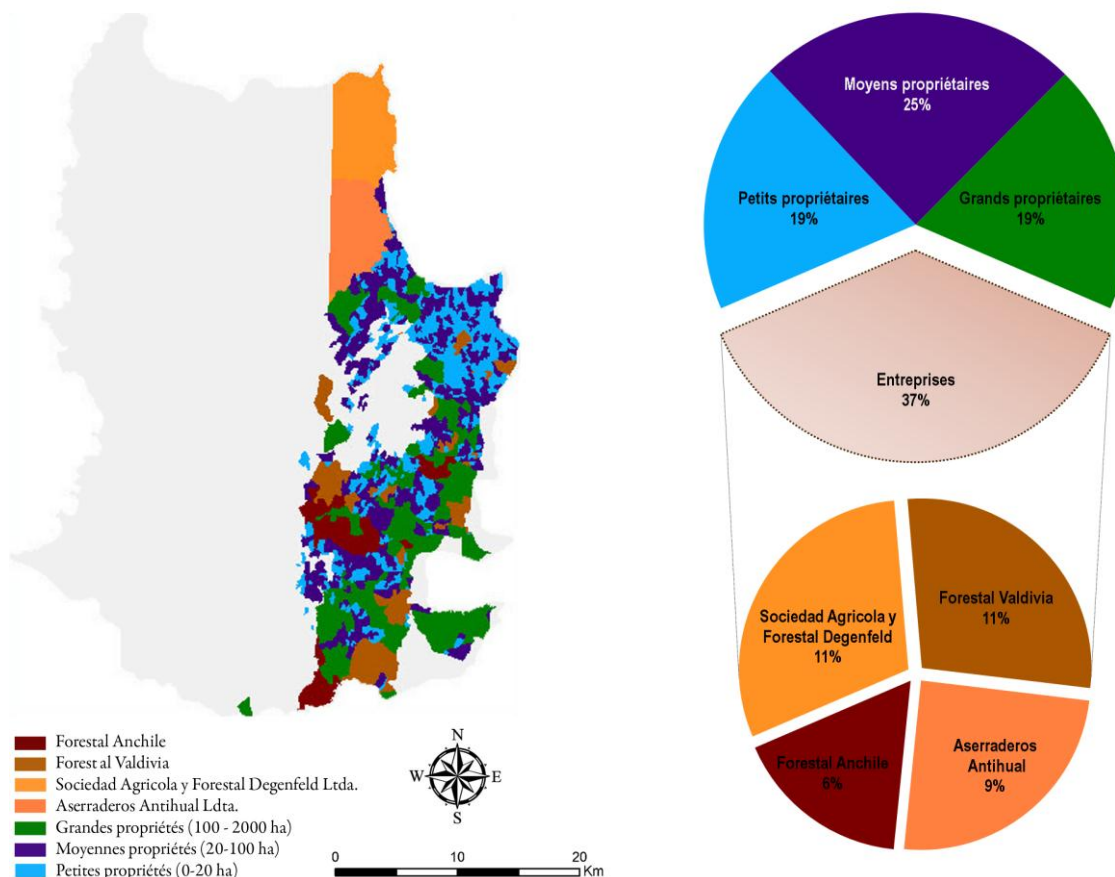


Figure 52 : Structure foncière sur la précordillère côtière de San Juan de la Costa en 1999

3.4. Estimation et évolution du couvert forestier : des données multiples pour une problématique multi-scalaire

L’analyse des changements d’occupation et d’utilisation du sol et leur modélisation prospective requiert l’acquisition de données variées favorisant la compréhension du système. Le recours à des images satellitales à moyenne et haute résolution, des données statistiques, des relevés de terrain, le cadastre officiel et des enquêtes sociales, sont mobilisés afin de mettre en exergue les forces motrices de la dynamique des plantations industrielles.

3.4.1. Les données satellitales

3.4.1.1. Les données moyennes résolution MODIS

Les images MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sont gratuites. Elles disposent de 36 bandes spectrales et se décomposent sous trois formes de résolution spatiale : (i) 250 m pour la bande 1 (rouge, 620-670nm) et 2 (proche infrarouge, 841-876 nm), (ii) 500 m pour les bandes 3 à 7 (459–479, 545–565, 1230–1250, 1628–1652, 2105–2155 nm) et (iii) 1000 m pour les bandes 8 à 36.

L’analyse de la dynamique des plantations monospécifiques nécessite de prendre en compte plusieurs variables, comme la durée des rotations, la nature et la superficie de l’objet étudié, etc. La gamme d’Indice de Végétation (IV) MODIS s’avère être le meilleur compromis

et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les IV permettent le suivi de la végétation à l'échelle mondiale et sont utilisés afin d'étudier les changements d'occupations et d'utilisations du sol (Huete *et al.*, 2002 ; dans le domaine de la déforestation : Morton *et al.*, 2007 ; Potapov *et al.*, 2008 ; le suivi des cultures agricoles : Lecerf, 2008 ; Funk et Budde, 2009 ; l'estimation de la biomasse forestière : le Maire *et al.* 2011).

La National Aeronautics and Space Administration (NASA) propose six produits, avec des résolutions spatiales et temporelles variables¹⁶¹. Notre choix porte sur les données satellitales MOD13Q1¹⁶² fournies tous les 16 jours et à une résolution spatiale de 250 m (pixel de 250 x 250 m). D'après Townshend et Justice (1988, in : dans Zhan *et al.*, 2002) c'est à cette échelle spatiale que se produisent la plupart des changements d'occupation du sol due aux activités humaines. Or, une étude de Armas et Caetano (2005) basée sur la détection des changements en forêt causés par des incendies, des coupes rases et des nouvelles plantations, révèle que les images MODIS (250 – 500 – 1000 m) ne sont pas assez spatialement détaillées pour identifier la plupart des coupes rases et des plantations.

Afin de s'assurer de leur détection dans le centre-sud chilien, une grille d'interprétation basée sur la taille d'un pixel MODIS (250 x 250 m) a été utilisée sur Google Earth. Un échantillonnage de plantations/coupes rases identifiées visuellement dans chacune des régions s'accompagne de cette grille (figure 53).

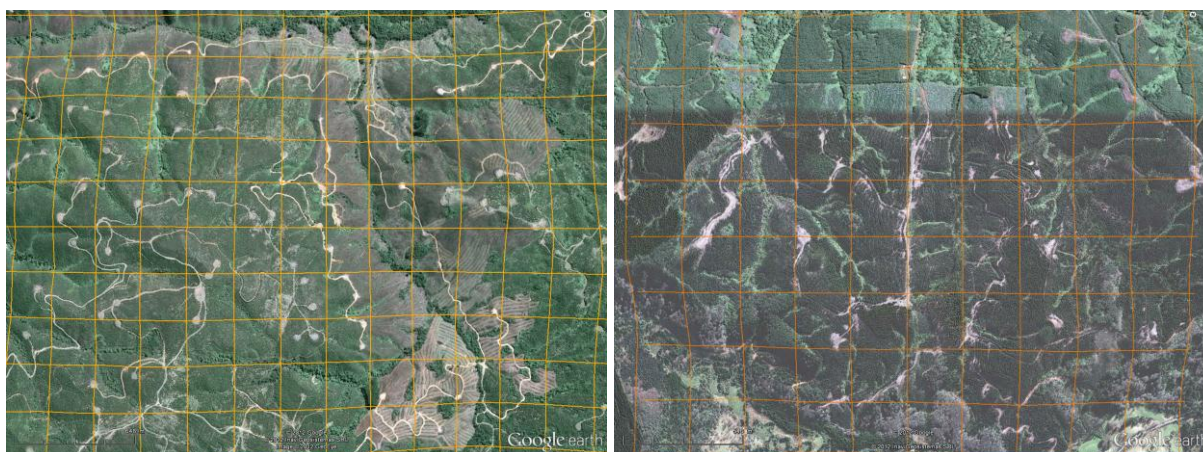


Figure 53 : Grille d'interprétation sous Google Earth (A gauche : 8ème Région ; à droite : 10ème Région)

Seuls les canaux du rouge visible et du PIR opèrent à cette résolution et permettent le calcul du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) qui favorise la détection de l'activité chlorophyllienne caractérisée par une réponse minimale dans le rouge visible et maximale dans le PIR.

Mis en service en mars 2000, MODIS autorise un suivi de l'activité chlorophyllienne à haute résolution temporelle (tous les 16 jours). La zone d'étude s'étale sur deux tuiles de 4 800 lignes/colonnes (figure 54), ce qui nécessite la concaténation des images. L'analyse du

¹⁶¹ <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html>

¹⁶² The MODIS NDVI and EVI products are computed from atmospherically corrected bi-directional surface reflectances that have been masked for water, clouds, heavy aerosols, and cloud shadows (<https://lpdaac.usgs.gov/content/view/full/6652>). Lacking a 250m blue band, the EVI algorithm uses the 500m blue band to correct for residual atmospheric effects, with negligible spatial artifacts.

NDVI emploie quatre images par an entre 2000 et 2008. Cette série temporelle d’une image par saison sur un peu plus de huit ans (33 images) est néanmoins interrompue à trois reprises en saison hivernale (2001, 2005 et 2006) et deux fois durant le printemps chilien (2004 et 2006) en raison d’une couverture nuageuse importante (de 6 et 25 %) et prolongée (plusieurs mois de couverture nuageuse). Ainsi la série diachronique MODIS est composée de 28 images de haute qualité au format HDF EOS en projection sinusoidale.

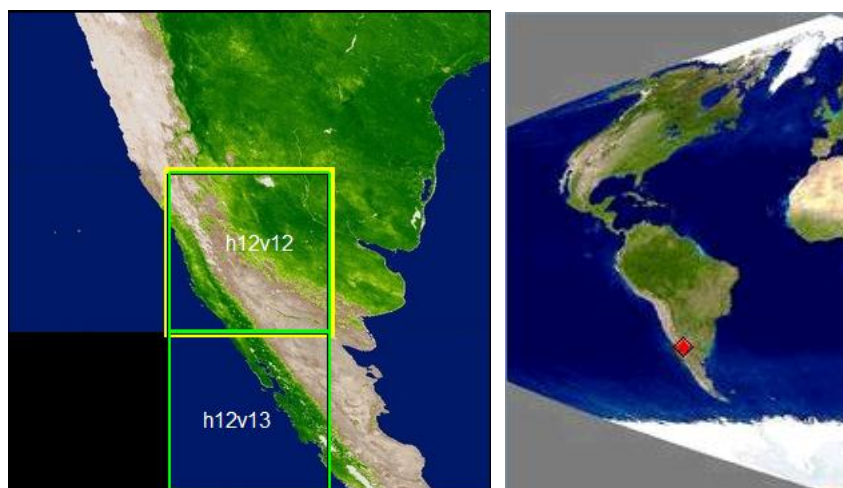


Figure 54 : Localisation des tuiles MODIS

3.4.1.2. Les données LANDSAT

La gratuité des données LANDSAT face au coût des images SPOT est un facteur déterminant quant au choix du type d’image satellitale. De juillet 2008 à janvier 2009, l’U.S. Geological survey (USGS) appliqua son plan de mise à disposition complète d’image satellitale LANDSAT (1-5, 4 et 7). De plus, la fréquence des données disponibles favorisa l’acquisition d’une dizaine de dates d’excellente qualité, augmentant de fait les possibilités de traitements et d’analyses.

L’imagerie satellitale LANDSAT a été maintes fois sollicitée dans une grande variété d’applications écologiques (Wulder *et al.*, 2008), et ce depuis une quarantaine d’années. Warren B. Cohen et Samuel N. Goward (2004) insistent sur le fait que les capteurs LANDSAT ont joué un rôle pivot des plus importants dans l’analyse spatio-temporelle des dynamiques environnementales. De plus, les auteurs font référence à de nombreuses études ayant intégré ce type d’imagerie dans leur modèles écologiques, tels que la modélisation de l’évapotranspiration d’un champ de blé, l’étude des effets de la luminosité sur la capacité productive d’une forêt, l’estimation des flux de carbone dans une région tropicale, l’étude des habitats sauvages et de la biodiversité, ou enfin des études socio-économiques comme la caractérisation de processus de déforestation grâce à la structure foncière.

La période d’acquisition des images choisie correspond au mois de septembre et de décembre, c’est-à-dire en pleine saison printanière dans l’hémisphère sud. La couverture temporelle est intéressante car elle débute deux ans après la promulgation du D.L. 701 et s’achève aux premiers relevés de terrain. La série d’images utilisée est présentée dans le

tableau (tableau 12)¹⁶³. Le choix se justifie par l’influence des conditions météorologiques (faibles précipitations, augmentation de la température), notamment par la minimisation du couvert nuageux, l’intensité lumineuse et donc une activité photosynthétique croissante. L’idéal étant d’acquérir des images provenant du même capteur avec la même géométrie d’observation et à la même date, afin de minimiser les erreurs provoquées par les variations saisonnières et l’angle solaire (Skupinski *et al.*, 2009).

Préalablement à l’analyse diachronique il est nécessaire de corriger géométriquement les images satellitales afin de les rendre superposables. L’ensemble des scènes sont géoréférencées avec l’image LANDSAT-7 TM 2001 précédemment rectifiée (datum WGS 84, projection UTM18 S). En moyenne quinze points d’amer, répartis sur l’ensemble de l’image, suffisent (faible RMS) pour corriger la géométrie et rendre les images superposables.

| Image | Date d’acquisition | Résolution spectrale | Résolution spatiale | Path-Row |
|---------------|--------------------|--|--|----------|
| LANDSAT-1 MSS | 09 février 1976 | (B4) 0,5 - 0,6 μm (B5) 0,6 - 0,7 μm (B6) 0,7 - 0,8 μm (B7) 0,8 - 0,11 μm | (B4 à 7) 79x82m | 250-88 |
| LANDSAT-4 TM | 25 septembre 1986 | (B2) 0,52 - 0,60 μm (B3) 0,63 - 0,69 μm (B4) 0,76 - 0,90 μm (B5) 1,55 - 1,75 μm (B6) 10,4 - 12,5 μm (B7) 2,08 - 2,35 μm | 30x30m (B6) 120x120m | 233-88 |
| LANDSAT-4 TM | 22 septembre 1988 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-7 TM | 23 octobre 1999 | Idem LANDSAT-4 + panchromatique 0,50 - 0,90 μm | Idem sauf (B6) 60x60m (Pan) 15x15m | 233-88 |
| LANDSAT-7 TM | 29 novembre 2001 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-7 TM | 20 février 2003 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-5 TM | 15 février 2004 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-7 TM | 09 février 2005 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-5 TM | 18 août 2007 | ----- | ----- | ----- |
| LANDSAT-5 TM | 10 décembre 2008 | ----- | ----- | ----- |

Tableau 12 : Caractéristiques des images satellitales LANDSAT

3.4.1.3. Google Earth

Google Earth est une application gratuite intégrant un système d’information Géographique 3D accessible par le web (<http://www.google.com/earth/index.html>). Elle se compose d’images satellitales et de photographies aériennes à haute et très haute résolution (Quickbird). La totalité de la surface terrestre est couverte mais la résolution est variable en fonction des régions du globe. L’application permet d’intégrer diverses informations géoréférencées, telles que des images satellitales brutes et traitées (MODIS-LANDSAT). La facilité de navigation, dans le temps et dans l’espace, permet à l’utilisateur d’estimer l’évolution du couvert végétal. Le pas de temps est généralement d’une dizaine d’années.

¹⁶³ Les images de 2004, 2007 et 2008 ont été fournies grâce à l’amabilité de la CONAE (COMisión Nacional de Actividades Espaciales).

3.4.2. Les données cartographiques

Les données digitalisées (*shape file*), synthétisées dans le tableau 13, proviennent de plusieurs organismes d'Etat et sont combinées sous un système d'Information Géographique. Parmi ces organismes se trouvent: le Département de *Prospección Sectorial* de la CONAF, l'Instituto Geográfico Militar (IGM), la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI).

| Source | Localisation | Année | Donnée | |
|------------|----------------------|-------------|---|---|
| CONAF | 8 ^{ème} | 1998 | Occupation du sol complète | Pente – Exposition - Altitude |
| | 9 ^{ème} | 2007 | Occupation du sol complète | Pente – Exposition - Altitude |
| | 14 ^{ème} | 2006 | Occupation du sol complète | Pente – Exposition - Altitude |
| | 10 ^{ème} | 1998 - 2006 | Occupation du sol complète | Pente – Exposition - Altitude |
| IGM | 10 ^{ème} | ?? | Réseau routier, villes, limite régionale | Réseau hydrographique, Système lacustre |
| | San Juan de la Costa | 2009 | Habitat, toponymie, réseau hydrographique détaillé, | Réseau routier détaillé, Courbe de niveau (25m) |
| CONADI | San Juan de la Costa | 1999 | Propriété terrienne | |
| Saez, 2002 | San Juan de la Costa | ?? | Catégorie d'habitat rural | |

Tableau 13 : Données vectorielles utilisées

3.4.2.1. Les données de la CONAF

Le « *Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos del País* » (CONAF/CONAMA/UACH, 1997) est issu de la collaboration de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), de la CONAF et de la Banque Mondiale. Afin d'améliorer la connaissance des formations végétales et de leur évolution, ce projet nécessita 40 000 photographies aériennes et 35 images satellitales pour couvrir la totalité du territoire chilien. Le Cadastre propose une description de l'usage du sol (aux échelles régionales, provinciales et communales), de la végétation par formation végétale, une description par structure, couverture, hauteur et espèces dominantes. Apparaissent aussi les superficies par type d'utilisation du sol selon la pente, l'exposition et l'altitude.

La quantité d'informations récoltées aboutit à la génération d'un SIG institutionnel (ARC/INFO LIBRARIAN) « *que permita la administración, consulta y actualización de la base cartográfica, generados por el Proyecto Catastro. En esta línea se desarrolló el proyecto: "Establecimiento de un sistema de seguimiento y monitoreo del estado de conservación de las formaciones vegetales naturales"* (Sandoval y Real, 1998), elaborado en el período 1997-1998 por las Facultades de Ingeniería Forestal de las universidades chilenas Austral y de Concepción » (Sandoval et al., 2002, p.92). Le Cadastre digitalisé est un outil précieux pour étudier les dynamiques végétales et est considéré comme « *the most detailed and comprehensive survey available for Chile* » (Echeverria et al., 2008, p.446).

3.4.2.2. Les données de l’IGM et de la CONADI

Des cartes digitales au 1/50 000^{ème} et des données vectorisées (shp et dwg) ont été achetées à l’IGM¹⁶⁴ (Departamento de planificación y control técnico) en décembre 2008. Leur couverture s’étend du nord au centre (Fresia) de la 10^{ème} Région. Ces données précisent celles de la CONAF, notamment en ce qui concerne le réseau routier (route principale, secondaire, chemin et sentier) et le réseau hydrographique (fleuve, rivière).

Enfin des données foncières digitalisées datant de 1999 (générées par le CIREN) ont été obtenues par un ingénieur forestier membre de la CONADI. Cette information est initialement fournie par le Servicio de Impuestos Internos (SII) et considère tous les changements portant sur les limites de la propriété – incluant la subdivision et/ou la fusion de ROL. Les informations contiennent le nom de la commune, le nom de la propriété et du propriétaire, le ROL SII (numéro qui identifie la propriété) et la superficie totale.

3.4.3. Les statistiques agricoles et forestières

3.4.3.1. Les statistiques agricoles de l’INE

L’INE (Institut National de la Statistique en français), anciennement connu sous l’appellation Direction de la Statistique et des Recensements¹⁶⁵, est un organisme public qui existe depuis 1843. La Loi Organique de l’INE stipule dans son article I^o que: « *l’Institut National de la Statistique, organisme technique et indépendant, est une personne morale de droit public, fonctionnellement décentralisée avec un patrimoine propre, chargé des statistiques et des recensements officiels de la République, qui concernent le gouvernement à travers le Ministère de l’Economie, du Développement et de la Reconstruction* »¹⁶⁶.

Ces statistiques portent aussi bien sur l’emploi et le chômage, l’économie, l’environnement, la démographie, des variables sociales et culturelles. L’Institut publie des données agropastorales et forestières qui sont consultables librement sur son site internet (<http://www.ine.cl>).

Jusqu’à la publication du VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal de 2007 l’INE publia six Censo Agropecuario Nacionales (1930, 1936, 1955, 1976 et 1997). On remarque que le terme *forestal* a été rajouté à l’appellation en 2007, ce qui s’explique par l’intégration d’informations détaillées relatives au secteur forestier, telles que les espèces et l’âge des plantations, des informations sur la forêt native et les antécédents sur les équipements forestiers utilisés dans les exploitations, les caractéristiques sociales du producteur (-trice) et de son groupe familial entre autres (INE, 2007).

La totalité des activités nécessaires à la construction et la publication de ce recensement furent réalisées entre le 15 mai 2006 et le 13 novembre 2007. La première étape

¹⁶⁴ <http://www.igm.cl/>

¹⁶⁵ Dirección de Estadística y Censos

¹⁶⁶ “*El Instituto Nacional de Estadísticas, organismo técnico e independiente, es una persona jurídica de derecho público, funcionalmente descentralizado y con patrimonio propio, encargado de las estadísticas y censos oficiales de la República, que se relacionará con el Gobierno a través del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción*”

repose sur la révision et la systématisation de la cartographie censitaire pour aboutir dans un deuxième temps sur l'étude des questions qui sont intégrées au formulaire de recensement. La construction de ce formulaire et la sélection des variables à inclure furent à la charge du Département des Statistiques Agropastorales et Environnementales aboutissant ainsi à un document de 12 pages et de 452 questions regroupées en 17 sections. Enfin la dernière étape consiste à définir les questions définitives grâce à des missions de terrains.

Le pays a été découpé en 61 aires de recensements dans lesquelles s'effectuèrent les principales activités de recensement (dactylographie, validation, correction et analyse des données, élaboration et analyses des bases de données communales, contrôle des superficies)¹⁶⁷.

3.4.3.2. Les statistiques forestières de l'INstituto FOREstal (INFOR)

L'INFOR est un Institut Technologique de Recherche rattaché au Ministère de l'Agriculture. Il propose des bulletins statistiques annuels relatifs aux exportations et importations forestières chiliennes, à la production et à la consommation de biens forestiers, aux prix forestiers, etc. (<http://www.infor.cl/es/iym.html>). L'élaboration de ces annuaires rassemble plusieurs acteurs à savoir: la CONAF, CORPORACIÓN chilena de la Madera (CORMA), Banco Central de Chile (BCCH), Sociedad de Fomento FABRIL (SOFOPA), ASOCIACIÓN Chilena de Seguridad (ACHS), ainsi que des entreprises et d'autres institutions.

3.4.4. Les relevés de terrain

Trois missions de terrains (2008, 2009 et 2010) ont été effectuées afin d'appuyer les observations et les premières analyses réalisées grâce aux images satellitales. L'objectif de ces missions consiste à mieux appréhender, par la mise en place d'un dispositif d'observation, la complexité des structures spatiales représentée par les images satellitales. Par complexité nous entendons diversité, localisation (altitude, pente, orientation), caractéristique des entités spatiales étudiées. Cette complexité ne pouvant se limiter à une dimension horizontale d'observation (transect¹⁶⁸), des zones caractéristiques sont sélectionnées, comprenant les principaux types d'occupation du sol (TOS) (prédéterminés par le Cadastre publié par la CONAF et des lectures bibliographiques), et présenter des surfaces minimales correspondant à la taille d'un pixel (30m pour LANDSAT et 250m pour MODIS). La localisation de chaque TOS se fait au moyen d'un *Global Positioning System* (GPS), type SporTrak Magellan, en se positionnant au centre pour corriger les erreurs de localisation. La fiche de terrain a permis de décrire avec un maximum de précisions les observations. Pour compléter cette fiche, plusieurs photos (standards et panoramiques) ont été prises sous plusieurs angles¹⁶⁹. L'objectif de ces relevés est d'estimer la performance globale des classifications.

¹⁶⁷ Pour consulter un formulaire complet de recensement, voir INE, 2007, p.30-45.

¹⁶⁸ La notion de transect (coupe), entrée tardivement dans le vocabulaire géographique français et sans doute par la biogéographie, implique donc plus que celle de coupe la dimension horizontale de l'observation. Les figurations graphiques peuvent se réduire à la représentation de la seule dimension verticale d'une superposition (géologique, pédologique...) ou bien, plus normalement pour un transect, suivre la ligne horizontale de l'espace étudié. (Hypergéométrie)

¹⁶⁹ L'appareil est un Panasonic DMC-FZ7.

3.4.4.1. La fiche de terrain

Elle se destine à décrire, et ce le plus rigoureusement possible, l'ensemble des caractéristiques observables et utiles aux traitements des données satellitales (annexe 4 - page 331). La nomenclature (13 entités) tient compte du cadastre de la CONAF et des observations de terrains. La mesure du diamètre des arbres, leur taux de couverture (figure 55) ainsi que leur hauteur sont des estimations. Cette dernière se fait par le principe de la croix du bûcheron (figure 56).

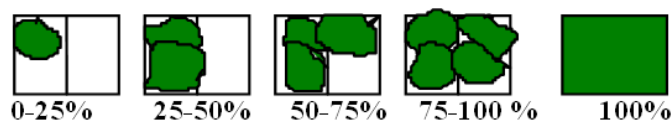


Figure 55 : Taux de couverture. Source : CONAF, 2006

Il suffit de se positionner à une distance de l'arbre pour laquelle le haut du bâton vertical coïncide optiquement avec la cime, et la base du bâton avec la base de l'arbre

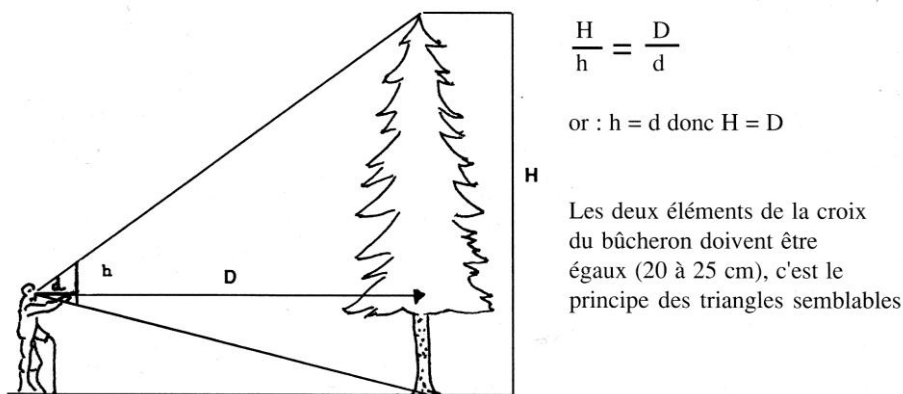


Figure 56 : Principe de la croix du bûcheron. Source : CRPF Midi-Pyrénées, 1992

3.4.4.2. L'échantillonnage

Préalable à chaque sortie de terrain, les zones d'intérêt et les TOS sont pré-localisés sur les images satellitales et sur Google Earth. Pour les TOS, les critères de sélection reposent sur la couleur des objets sur l'image (infrarouge couleur ou couleur réelle) et leur texture. Google Earth permet une première visualisation et estimation du couvert végétal, en le faisant correspondre avec les classes décrites dans la fiche de terrain.

Chaque sortie de terrain est suivie d'une quantification (ratio) des relevés afin de mettre en exergue les objets surreprésentés ou sous-représentés, et ainsi de rééquilibrer la récurrence des données. Le nombre total de points GPS s'élève à 333, répartis sur les quatre régions, dont 271 dans la 10^{ème} Région (tableau 14 et figure 57). Les points GPS sont importés sur le logiciel Google Earth puis modifiés en leur attribuant un pictogramme, en fonction de l'objet qu'ils localisent.

| Région | Commune | Nombre de points GPS | Région | Commune | Nombre de points GPS |
|-----------|-----------------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| Bío-Bío | Colemu | 1 | Los Ríos | La Unión | 24 |
| | Ranquil | 1 | | San Juan de la Costa | 43 |
| | Concepción | 1 | | San Pablo | 3 |
| | Florida | 10 | | Osorno | 46 |
| | Quillón | 1 | | Entre Lagos | 4 |
| | Pemuco | 7 | | Rio Negro | 34 |
| | Cabrero | 8 | | Purranque | 47 |
| | Yungay | 5 | | Puerto Octay | 15 |
| Araucania | Nueva Imperial | 3 | | Fresia | 59 |
| | Carahue | Perdu | | Llanquihue | 9 |
| | Teodoro Schmidt | Perdu | | Los Muermos | 11 |

Tableau 14 : Relevés GPS

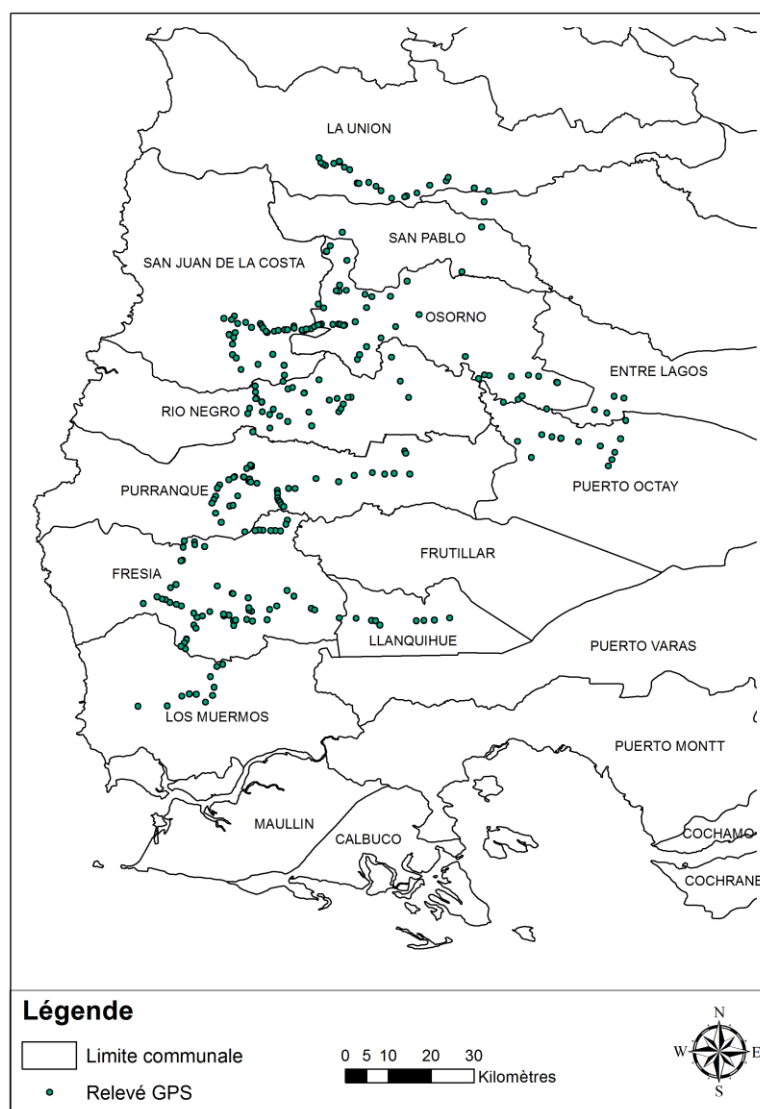


Figure 57 : Carte de localisation des relevés GPS (sud de la 14ème et 10ème Région)

3.4.5. Les enquêtes sociales

3.4.5.1. Les entretiens semi-directifs

Les informations apportées par les images satellitales et les données statistiques prennent toutes leurs dimensions grâce aux enquêtes sociales. Celles-ci répondent à trois objectifs interconnectés : (i) affiner l'analyse rétrospective en améliorant la compréhension du système ; (ii) identifier les facteurs explicatifs de la dynamiques des plantations industrielles ; et (iii) faire émerger des hypothèses quant à l'évolution future du couvert forestier (construction des scénarii prospectifs).

L'entretien semi-directif est mobilisé pour répondre à ces trois objectifs. Ce type d'entretien comporte une consigne générale et des thèmes à aborder. D'après Pierre Bréchon (2011, p.24), cette méthodologie : « *a l'avantage de permettre l'approfondissement par l'enquête de son discours, mais aussi, du fait d'une grille d'entretien commune, d'autoriser une comparaison de l'ensemble des discours produits* ». Le premier objectif, qui s'insère dans le deuxième objectif, nécessite cependant de donner à l'enquêté un maximum de liberté, avec un temps de parole relativement important, afin de faire émerger un maximum d'éléments susceptibles d'expliquer le système étudié.

3.4.5.2. La sélection des acteurs

Si l'importance accordée à l'avis des acteurs est centrale, leur identification l'est tout autant. Delbecq *et al.* (cité dans Okoli, 2004) fournissent une procédure rigoureuse d'identification en cinq étapes largement employée par la méthode DELPHI¹⁷⁰. Le temps et les moyens qu'impliquent cette procédure, ainsi que la disponibilité des acteurs, nous a contraints à réduire nos objectifs. Nous avons choisi au préalable quatre catégories d'acteurs ayant une connaissance approfondie de la problématique forestière dans le centre-sud chilien : des universitaires, des responsables de structures gouvernementales, des entreprises forestières et des responsables politiques indigènes. Si la littérature DELPHI suggère 10 à 18 experts pour chaque catégorie, nous sommes parvenus à rencontrer respectivement quatre universitaires du Centro de Estudios del Desarrollo local y Regional (CEDER), deux responsables de la CONADI et trois responsables de la (CONAF), le responsable sylvicole de la Forestal Anchile Ltda., et deux dirigeants mapuches.

En outre nous avons assisté et participé au « *Programa Taller : Planificación Participativa Para la Tierra y el Mar del Mapu Lahual* » le 28 novembre 2011 à Osorno. Divers organismes ont participé à cet atelier tels que l'Université de Los Lagos, le Secretarías Regionales Ministeriales (SEREMI), le Global Environment Facility associé au Sistema Regional de Areas Protegidas (GEP-SIRAP), le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) et le World Wildlife Fund (WWF).

¹⁷⁰ La méthode Delphi est depuis longtemps utilisée dans les sciences sociales. Par l'intervention d'experts, le chercheur parvient à rassembler un maximum de variables pouvant expliquer le phénomène étudié. Cette méthode complète le discours des populations locales, et permet d'appréhender un processus complexe avec justesse dans la mesure où « *des experts sont mieux placés que les autres citoyens pour expliquer la logique des phénomènes et des mouvements sociaux* » (Lajoie, 2005).

3.4.5.3. La grille d'entretien

Chaque entretien débute par une consigne de base axée sur la description du système forestier et de son évolution dans le temps et dans l'espace. Le cadrage temporel n'est pas prédéterminé, le cadrage spatial distingue, quant à lui, la sphère régionale, provinciale (Osorno) et communale (San Juan de la Costa).

L'acteur doit identifier les processus d'évolutions des types d'occupations et d'utilisation du sol, en énonçant et détaillant leurs facteurs explicatifs (en identifiant si possible l'échelle d'influence). Lorsque l'interviewé estime avoir répondu à la question, il lui est demandé de les hiérarchiser, c'est-à-dire d'estimer si un facteur a un poids plus important qu'un autre dans ce processus. Dans un dernier temps, et en se basant sur les objectifs précédents, l'enquête doit se projeter dans l'avenir et décrire, à l'échelle communale, l'état du couvert forestier. Pour chaque description il est demandé d'expliquer la part jouée par chaque facteur dans ce processus.

3.4.5.4. L'entretien informel

Les missions de terrain favorisent la rencontre fortuite avec de nombreux acteurs (photos 6 et 7). L'entretien informel sert d'une part à compléter la fiche de terrain, en demandant des précisions sur l'évolution du type d'occupation du sol, et d'autre part à améliorer la compréhension du système en donnant une liberté totale d'expression.



Photo 6 : Entretien avec un propriétaire (40°36' S – 73°23' W) – Décembre 2008



Photo 7 : Coupe de leña (40°32' S – 73°13' W) – Décembre 2008

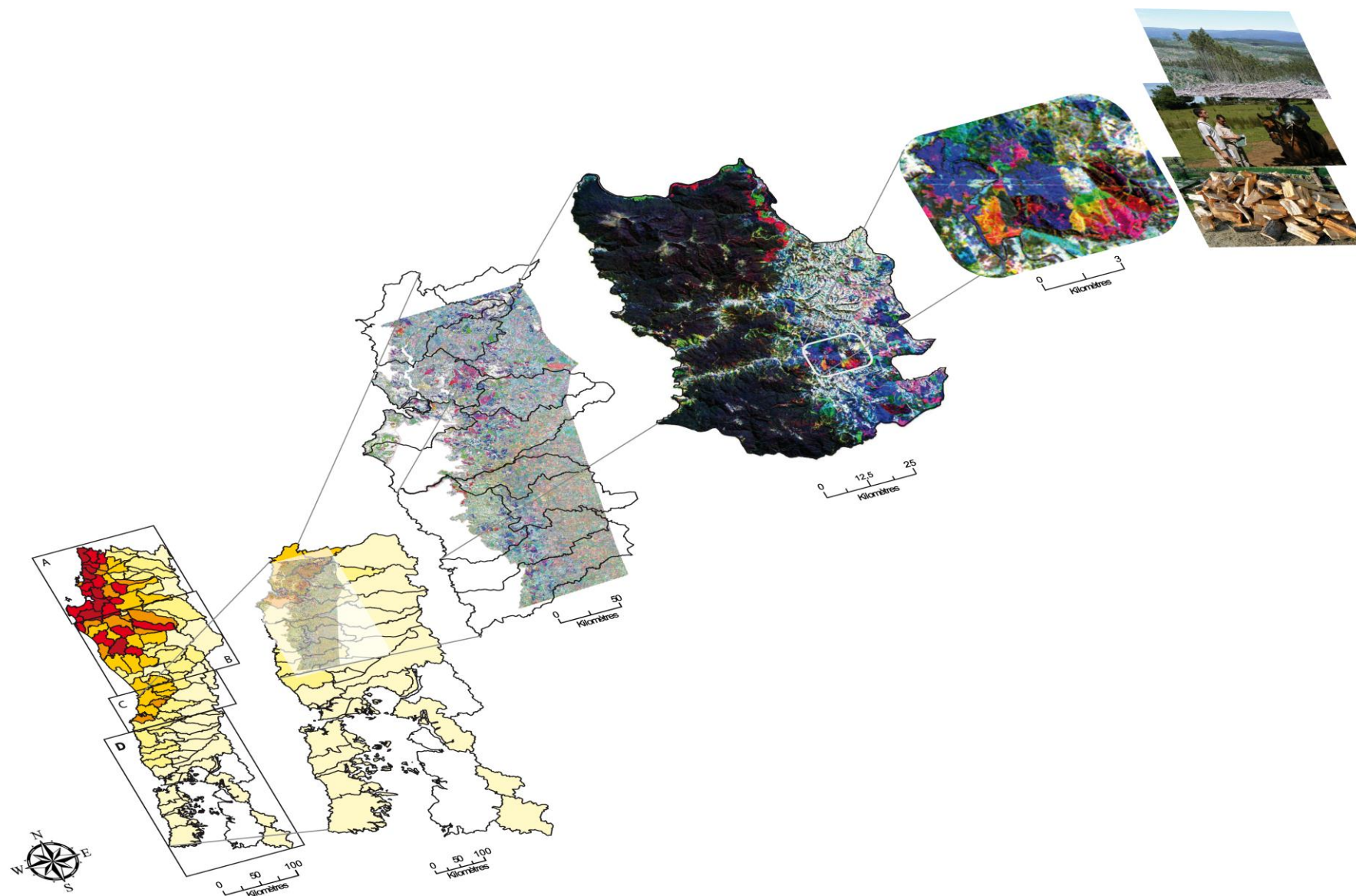


Figure 58 : Analyse multi-échelle – du régional au local

CONCLUSION

Ce chapitre présente la dimension multi-scalaire de la dynamique des plantations industrielles dans le centre-sud chilien (figure 58). La palette de données mobilisées, grâce à leurs interconnexions, est à même de répondre à l'étendue du phénomène, en se focalisant *in fine* sur la commune de San Juan de la Costa. L'approche top-down permet ainsi de resituer la sphère locale dans un contexte global et améliore l'identification des facteurs explicatifs.

DEUXIEME PARTIE – LA DYNAMIQUE FORESTIERE DU REGIONAL AU LOCAL. DE LA STRUCTURE DU SYSTEME A LA DISTINCTION DES FACTEURS

CHAPITRE 4

Détermination des dynamiques paysagères et trajectoires d'évolutions

CHAPITRE 5

Identification et hiérarchisation des facteurs de changements

CHAPITRE 4 – Détermination des dynamiques paysagères et trajectoires d'évolutions

INTRODUCTION

Ce chapitre élabore la « base » du système forestier en suivant une démarche multi-scalaire descendante (*top-down*). Chaque échelle propose une représentation de la dynamique spatio-temporelle des plantations industrielles et tente de faire émerger des facteurs clés susceptibles d'expliquer lesdites dynamiques et de faciliter la lecture et la compréhension à l'échelle locale. L'analyse à l'échelle régionale (de la 8^{ème} à la 10^{ème} Région) (**section 1**) permet tout d'abord une première lecture de la distribution spatiale et une caractérisation des dynamiques forestières. A mesure que l'échelle augmente les zones boisées se précisent et font l'objet d'un suivi sur un spectre temporel plus étendu. Ainsi, l'analyse à l'échelle sous-régionale (**section 2**) affine l'analyse précédente en focalisant sur les rotations forestières. Enfin, la commune de San Juan de la Costa devient le point névralgique de la démarche multi-scalaire en intégrant les connaissances acquises et en précisant les types d'occupation du sol, ainsi que leur trajectoire de changement entre 1986, 1999 et 2008 (**section 3**).

4.1. Dynamiques forestières à l'échelle régionale

4.1.1. Cartographie et statistiques

Les quatre cartes (A-B-C et D – figure 59, page 159) sont fondées sur le dernier recensement agricole de l'Instituto Nacional d'Estadísticas (INE, 2007). L'objectif est de mettre en exergue la part des plantations sur la superficie totale des exploitations recensées, pour les 121 communes qui composent les Régions du Bío-Bío, Araucanía, Los Ríos et Los Lagos et de faire émerger leur répartition spatiale. La discrétisation de Jenks¹⁷¹ est appliquée afin de subdiviser la série statistique en classes de valeurs (6 classes).

4.1.1.1. Une partition est/ouest

Le premier constat repose sur la concentration des plantations dans les communes situées à l'ouest de chacune des quatre régions, c'est-à-dire sur la Cordillère de la Côte et la précordillère côtière. Inversement, les taux les plus faibles se répartissent sur les communes localisées à l'est, à l'exception de la 10^{ème} Région qui affiche des pourcentages globalement faibles. Cette partition est/ouest s'explique tout d'abord par la distribution des types d'occupation et d'utilisation du sol (tableau 15¹⁷²). On constate que les communes affichant un taux de plantations inférieur à 23,55% (les deux premières classes) de leur surface sont

¹⁷¹ Cette méthode est l'équivalent mathématique de la méthode manuelle des seuils observés, elle vise à minimiser la variance intra-classes et à maximiser la variance interclasses, ce qui a pour effet de produire des classes homogènes.

¹⁷² Il s'agit d'un sous-ensemble de communes. La faible part des plantations détermine le choix de ces communes indépendamment de leur localisation.

caractérisées par une extension importante de forêts natives et/ou ont une activité agropastorale dominante. Par exemple, la commune de Ñiquén (dans la 8^{ème} Région), où la part des plantations est de 14,59%, voit son taux d'exploitation agropastorale atteindre les 85,30%. La commune de Vilcún (9^{ème} Région), présente la même tendance avec 10,36% de plantations et 89,11% d'agropastoralisme. Pucón affiche 4,26% de monocultures sylvicoles pour 52,37% de forêt native. Enfin, on observe respectivement 9,36% et 71,92% pour la commune de San Juan de la Costa.

| Région | Commune | % plantation | % forêt native | % exploitation agropastorale |
|-------------------|--------------------------|--------------|----------------|------------------------------|
| 8 ^{ème} | Ñiquén (1) | 14,59 | 4,56 | 85,30 |
| | Antuco (2) | 1,31 | 20,06 | 75,22 |
| 9 ^{ème} | Vilcún (3) | 10,36 | 18,03 | 89,11 |
| | Pucón (4) | 4,26 | 52,37 | 79,66 |
| 14 ^{ème} | Panguipulli (5) | 4,61 | 61,98 | 75,37 |
| | La Unión (6) | 19,28 | 47,34 | 35,74 |
| 10 ^{ème} | San Juan de la Costa (7) | 9,36 | 71,92 | 24,76 |
| | Llanquihue (8) | 1,01 | 10,83 | 100,00 |

Tableau 15 : Part (%) des types d'occupation du sol sur le total communal

La distribution spatiale des types d'occupation du sol ne peut expliquer à elle seule cette configuration. C'est en analysant la stratégie des entreprises forestières et leur objectif de rentabilité, que nous émettons l'hypothèse d'une interaction spatiale entre la localisation des plantations et la morphologie du réseau d'infrastructures¹⁷³.

Pour vérifier cette hypothèse, nous nous intéressons aux deux principales entreprises forestières chiliennes, la Cellulosa Arauco y Constitución S.A et la CMPC S.A. D'après le rapport annuel de la Forestal Arauco (2009) l'entreprise compte six usines de cellulose au Chili. Deux se situent dans la 7^{ème} Région du Maule (i) la Planta Licancel (dans la commune de Licantén) [34°59'18''S – 72°01'30''W] et (ii) la Planta Constitución [25°19'20''S – 72°25'16''W]. La première se situe à trois kilomètres de la côte, alors que la seconde est implantée au bord de l'océan Pacifique.

Plus au sud, l'usine de cellulose Los Horcones, est composée de deux lignes de production¹⁷⁴ qui se trouvent dans la commune de Arauco (8^{ème} Région), à 600m du rivage [37°12'47''S - 73°13'39''O]. La Planta Nueva Aldea (photo 8), dans la commune de Ránquil, est le dernier complexe forestier-industriel rendu opérationnel en août 2006. La Planta Valdivia (dans la commune de Mariquina - 14^{ème} Région), inaugurée le 30 janvier 2004, se distingue des précédentes par son éloignement à la côte ; cependant elle est adjacente à la Panaméricaine (Ruta 5). Enfin, les usines appartenant à la CMPC S.A., essentiellement des scieries, longent elles aussi la Ruta 5, dans les communes de Bucalemu,

¹⁷³ « Un réseau est un ensemble d'éléments matériels, les infrastructures, et immatériels, électromagnétiques (ondes) ou informationnels, assurant la mise en relation de différents lieux d'un territoire et des entités qui les occupent » (Laurent Chapelon, Hypergéométrie). Il est constitué d'éléments linéaires (routes, voies ferrées, etc.) et d'éléments nodaux (ports, usines de fabrication).

¹⁷⁴ Arauco I est entrée en opération en 1972, tandis qu'Arauco II démarra sa production en 1991.

Los Angeles, Mulchén et Renaico. Seule la Planta Coronel borde l'Océan Pacifique. On remarque ainsi que la grande majorité des usines de transformation sont implantées dans des communes présentant un fort taux de plantation, et à l'ouest de la Panaméricaine.

A la délimitation longitudinale marquée par cet axe de communication s'ajoute l'importance des zones portuaires. Selon Graciela Mognillansky et Verónica Silva (2001) la phase d'intégration productive (1970-1980), caractérisée par la maximisation de la productivité et la compétitivité sectorielle, révéla des problèmes d'approvisionnements de produits forestiers. En effet, l'expansion des monocultures couplée à « *un manque d'infrastructures, notamment portuaires, incita les conglomérats à investir dans des ports* » (Mognillansky et Silva, 2001, p.119). Dans ce sens, le rapport annuel (2009) de la Forestal Arauco révèle que la société est propriétaire à 50% du port privé de Coronel, et à 20,1% du port de Lirquén. Si la demande croissante de l'industrie de la cellulose favorisa le développement de zones portuaires, celles-ci exercent en retour une force d'attraction¹⁷⁵ sur le développement des monocultures. Cet état est clairement perceptible dans la 8^{ème} Région autour des ports de Coronel, San Vicente, Lirquén et San Antonio (tableau 16), où la totalité des communes (excepté Talcahuano) affichent des taux de plantations supérieurs ou égal à 47,11% (figure 59). Dans des proportions nettement inférieures, le port de Corral (14^{ème} Région) exerce lui aussi une force d'attraction sur l'expansion des plantations. Les communes qui lui sont adjacentes affichent des taux compris entre 25,55 % et 47,11 %. Sachant que 63% de la production forestière chilienne se destinent à l'exportation (dont 71% pour la production de pulpe et de papier) (INFOR, 2008), l'accès et la facilité d'acheminement à ces pôles, par une réduction de la distance et des coûts, devient une variable incontournable pour les entreprises. D'après Corvalán *et al.* (2007, p.524) le transport est « *l'activité qui influence le plus le coût final du produit, représentant plus de 35% des coûts totaux, [...]* ».

| Région | Port d'embarquement | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 8 ^{ème} | Coronel | 2,84 | 3,04 | 2,96 | 3,84 | 3,87 | 3,51 | 3,43 |
| | San Vicente | 1,30 | 1,75 | 1,78 | 1,97 | 2,26 | 2,06 | 3,14 |
| | Lirquén | 1,84 | 1,60 | 1,97 | 1,51 | 1,59 | 2,18 | 2,62 |
| | San Antonio | 0,67 | 0,71 | 0,79 | 1,07 | 0,91 | 0,87 | 0,92 |
| 14 ^{ème} | Corral | 0,35 | 0,28 | 0,38 | 0,42 | 0,45 | 0,51 | 0,58 |
| 10 ^{ème} | Puerto Montt | 0,59 | 0,40 | 0,33 | 0,18 | 0,33 | 0,40 | 0,50 |

**Tableau 16 : Principaux ports d'embarquement selon la charge mobilisée (en millions de tonnes).
Source : INFOR, 2008**

¹⁷⁵ La force d'attraction caractérise « *l'effet d'entraînement du pôle (le port) sur le développement d'un ensemble régional* » (Elissalde, Hypergéométrie).



Photo 8 : Planta Nueva Aldea (S36°39'31" – W72°28'43). 08 décembre 2008 ©

4.1.1.2. Une gradation nord/sud

Cette partition est/ouest s'accompagne d'une gradation nord-sud de la dynamique des plantations industrielles. On observe une diminution progressive de la part occupée par les plantations à mesure que l'on se dirige vers le sud (10^{ème} Région). La moyenne des valeurs pour les communes de la 8^{ème} Région, de la commune de Cobquecura à Lebu, est de 55,41%¹⁷⁶. Entre le sud de cette Région et la moitié nord de sa voisine¹⁷⁷ (de Los Alamos à Galvarino), la part moyenne des plantations est de 44,21%. Ensuite, la moitié sud de la 9^{ème} Région conjointement à la 14^{ème} Région de Los Rios¹⁷⁸, à l'exception de la commune de La Unión, affiche un taux d'occupation du sol moyen de 30,15%. Enfin, on remarque des valeurs très faibles pour les cinq communes de la Région de Los Lagos (San Juan de la Costa, San Pablo, Río Negro, Purranque et Fresia) pour atteindre des valeurs quasi nulles dans la commune de Los Muermos (2,15%).

Cette configuration spatiale s'explique aisément par l'implantation historique des entreprises forestières dans la 8^{ème} Région et par la disponibilité des terres¹⁷⁹. Cristian Henríquez Ruiz (2008) explique qu'à la fin des années 1970, l'expansion des plantations industrielles se réalisa sur la Cordillère de la Côte dans la Région du Bío-Bío « *principalement dans la province d'Arauco et dans quelques secteurs du Piémont* ». Depuis 1985 « *le boisement se développa vers la précordillère andine, occupant des sols abandonnés par l'élevage ou sur des espaces avec de la végétation native dégradée* » (Mardones, 2001, in Henríquez Ruiz, 2008). L'abandon des terres par un nombre massif d'agriculteurs « *ruinés et endettés par la crise de l'agriculture sudiste des années 80 et 90, victimes de la restructuration agricole liée à la politique néo-libérale inaugurée par le régime militaire* » offrit de nombreuses possibilités de rachat et d'implantation aux entreprises forestières, elles-mêmes faisant face à l'épuisement des terres disponibles (Henríquez Ruiz, 2008). La création de la Planta Valdivia en 2004 dans la 14^{ème} Région est un exemple type de connectivité spatiale qui impulsa le développement de monocultures. *A contrario*, l'absence ou l'éloignement aux infrastructures, notamment pour les communes situées au sud de la 9^{ème} Région, se traduit par une nette diminution des surfaces plantées.

Citant les travaux de Dupuy (1991), Peter Verburg *et al.* (2004, p.316) expliquent que cette connectivité est la résultante d'interactions entre trois types des réseaux :

- Les réseaux physiques. Ces réseaux (routes, corridors écologiques, axes de communication, etc.) forment les conditions spatiales pour les flux de personnes, d'animaux, de biens, d'énergie, d'eau, etc. Ces flux sont étroitement associés à des fonctions, qui peuvent être interprétés comme des formes statiques d'occupation du sol, par exemple les lieux de travail, de loisir, d'habitats humains, de flore ou de faune.

¹⁷⁶ Du nord au sud et d'ouest en est: Cobquecura, Quirihue, Ninhue, Treguaco, Coelemu, Portezuelo, Tome, Ranquil, Talcahuano, Penco, Concepción, Florida, Coronel, Hualqui, Arauco, San Juana, San Rosendo, Curalinahue, Nacimiento et Lebu.

¹⁷⁷ 8^{ème} Région: Los Alamos, Canete, Contulmo, Tirua; 9^{ème} Région: Angol, Renaico, Puren, Los Sauces, Lumaco, Traiguén, Galvarino.

¹⁷⁸ 9^{ème} Région: Carahue, Nueva Imperial, Temuco, Saavedra, Teodoro Schmidt, Freire, Tolten, Pitrufquen, Gorbea et Loncoche; 14^{ème} Région: Mariquina, Lanco, Mafil, Valdivia et Corral.

¹⁷⁹ Les ports favorisent eux aussi cette gradation nord/sud. Les plantations au nord de la 9^{ème} Région sont drainées par les ports de la 8^{ème} Région, au regard de l'absence de ports dans la 9^{ème} Région.

- Les réseaux d'implantation. Ces réseaux sont le résultat des demandes spécifiques qu'exercent les fonctions économiques, sociales et écologiques de l'utilisation de la terre sur leur positionnement spatial par rapport aux réseaux physiques susmentionnés.
- Les réseaux d'interaction. Les sociétés, les ménages, les espèces végétales et animales, toutes entretiennent des relations avec des fonctions situées à d'autres endroits. Ces relations fonctionnelles sont influencées par les réseaux physiques et associées aux modes d'occupation du sol.

Enfin, les auteurs considèrent que « *l'analyse de ces réseaux est essentielle pour comprendre la structure spatiale des types d'occupation du sol* » (Verburg *et al.*, 2004, p.316). L'échelle d'analyse, conjointement au type de représentation cartographique, ne permet 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, etc.). Bien que la mise en relation entre les communes à fort taux de plantations et la structure du réseau mettent en exergue la partition est/ouest et la gradation nord/sud, elle reste détachée de la parcelle en tant qu'objet géographique implanté sur le territoire. En effet, la question de la polarisation reste approximative car la carte ne tient pas compte de la distribution spatiale des plantations, mais traduit néanmoins une tendance générale d'occupation. Enfin, les données mobilisées contraignent l'analyse de la dynamique spatio-temporelle en se focalisant sur un instant t (2007). Par conséquent il est difficile d'expliquer si la relation entre deux ou plusieurs phénomènes est la résultante du premier sur le second ou sa conséquence. Pour approfondir l'analyse de ces réseaux ainsi que l'analyse spatio-temporelle des types d'occupation du sol, nous nous recentrons sur une échelle d'étude plus fine. A ce niveau « *[...] the direct actors of land-use change can be identified and process-based relationships can be determined. With decreasing resolution and increasing extent, it becomes increasingly difficult to identify key processes* » (Veldkamp et Lambin, 2001, p.3).

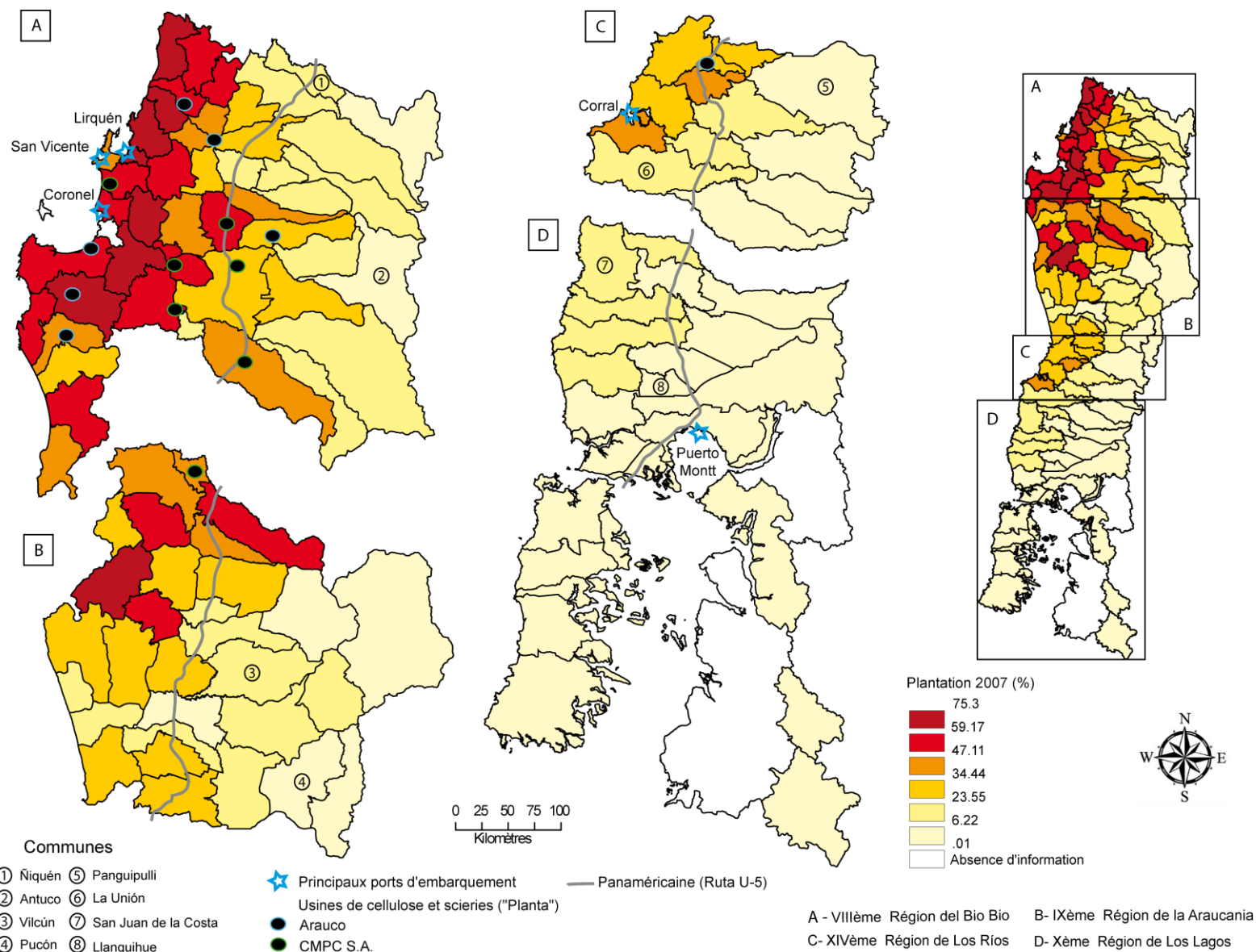


Figure 59 : Part des plantations (%) sur la superficie totale des exploitations par commune en 2007. Elaborée à partir des sources : INE (2007) ; INFOR (2008)

4.1.2. Détection des plantations industrielles (MODIS)

Cette section reprend les principales conclusions énoncées par Paegelow M., Maestriperi N., Sáez N. et Toro Balbotin D., 2012, « Détection des plantations forestières par imagerie satellite modis dans le Sud du Chili », *M@appemonde*, N° 106, 20 p.

<http://mappemonde.mgm.fr/num34/articles/art12204.html>

4.1.2.1. Suivi de l'activité chlorophyllienne et coupe forestière

Avant de s'intéresser aux acteurs directs et aux facteurs clés qui influencent l'expansion des plantations industrielles, nous complétons l'analyse statistique par une étude de leur distribution spatiale. Le suivi de l'activité chlorophyllienne à haute résolution temporelle grâce à l'imagerie MODIS contribue à obtenir une cartographie spatio-temporelle du phénomène pour l'ensemble de l'aire d'étude (de la 8^{ème} Région à la limite continentale de la 10^{ème} Région) entre 2000 et 2008.

Avec une résolution spatiale de 250x250m (soit 6.25 ha), il est difficile d'élaborer une distinction entre les forêts primaires (plurispécifiques) et les plantations monospécifiques. Cependant, le suivi des variations chlorophylliennes (NDVI) permet de différencier les types d'occupations du sol, tels que les surfaces boisées, les corps d'eaux, l'urbain, les cultures et prairies et les sols nus, et les coupes forestières. En effet, la mise en évidence des ruptures de NDVI, en opposition à des indices de végétations stables (surfaces boisées) ou caractéristiques de variations saisonnières (cultures annuelles par exemple), permet de déterminer des coupes forestières (ou des incendies). « *Ces dernières sont caractérisées par un profil temporel similaire aux surfaces boisées à ceci près que celui-ci est interrompu une seule fois par une baisse prononcée et rapide de l'activité chlorophyllienne suivie d'une remontée assez longue pour la distinguer des variations saisonnières* » (Paegelow et al., 2012).

4.1.2.2. Cartographie des variations chlorophylliennes

La représentation cartographique des variations chlorophylliennes est effectuée par la classification non supervisée, « *notamment la classification automatique par technique de cluster. L'algorithme KMEANS utilisé (Eastman, 2009) partitionne une image à n dimensions (ici 28 dates) en k clusters exclusifs (nombre de classes)* » (Paegelow et al., 2012). La figure 60 montre l'évolution de quinze classes entre mars 2000 et février 2008 - au niveau de la Cordillère et précordillère côtière.

Alors que nous disposons de données statistiques sur les plantations exotiques à l'échelle régionale, le traitement des images MODIS permet une lecture de la distribution spatiale des types d'occupation du sol en fonction de leur profil NDVI (figure 61).

La Cordillère de la Côte (CC) est clairement identifiable notamment par la stabilité de l'activité chlorophyllienne de la forêt native (classes 2, 4, 7). « *Un profil apparenté aux espaces forestiers stables, défini par un niveau de l'indice de végétation légèrement plus atténué (exemple classe 11 oscillant entre 200 et 220) indique la probable présence sur le terrain d'un couvert végétal de type matorral ou de forêts de régénération (renewal)* » (Paegelow et al., 2012). La démarcation entre la CC et la précordillère (et la dépression

intermédiaire) est réalisable à cause de la variabilité des types d'occupations qui y sont présents (reste des classes).

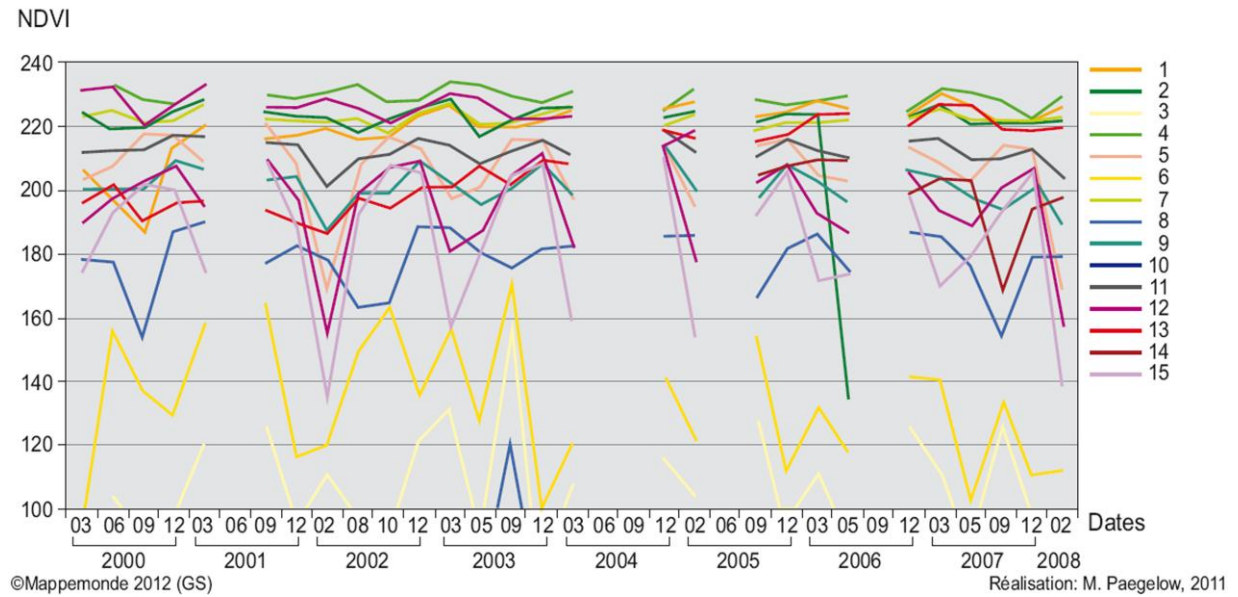


Figure 60 : Profil NDVI issu de la classification non supervisée KMEANS. Source : Paegelow *et al.*, 2012

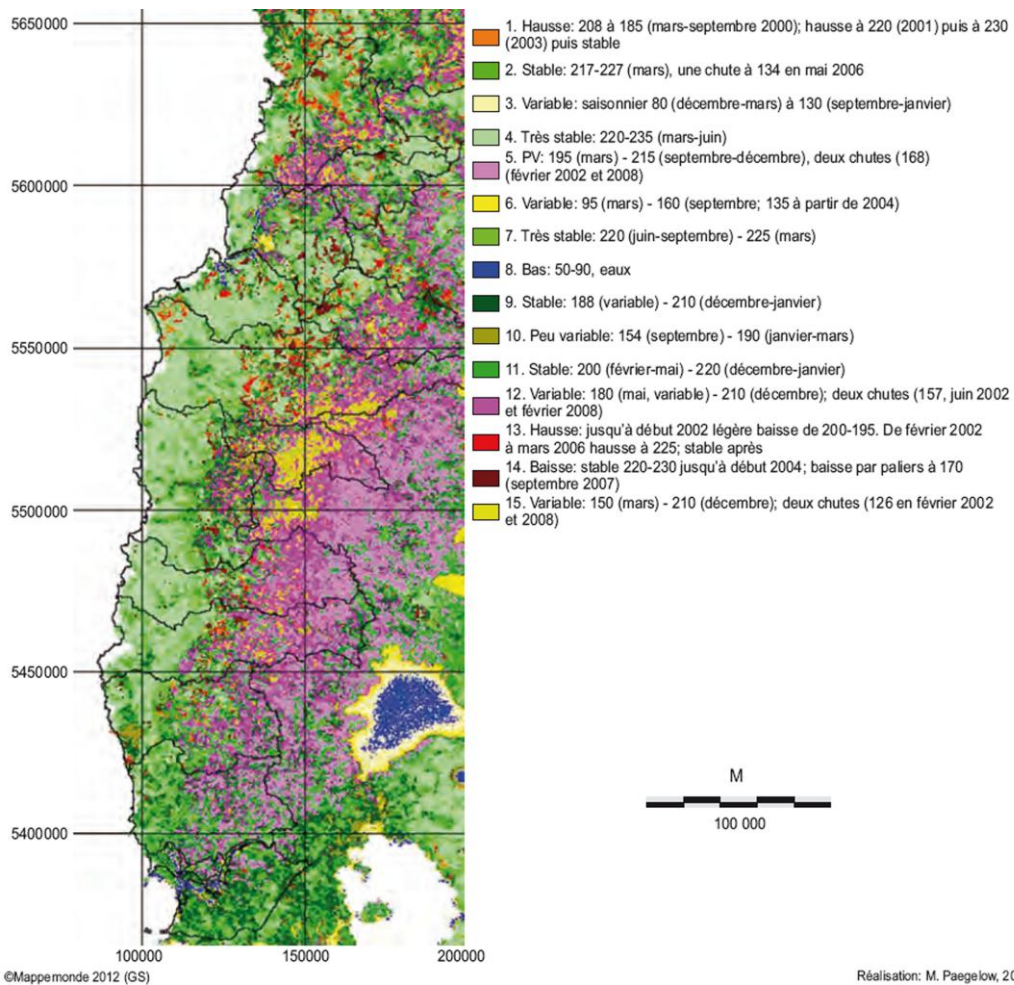


Figure 61 : Classification KMEANS sur la série de 28 images NDVI dans la 14ème et 10ème Région. Source : Paegelow *et al.*, 2012

Afin de distinguer les forêts et plantations stables des coupes forestières et faciliter la lecture, les classes [2, 4, 7 et 11] et les classes [1, 13 et 14] sont regroupées. Les classes restantes sont également agrégées et dénommées « autre » (figure 62). Les coupes forestières se localisent sur le piémont et dans une moindre mesure sur la Cordillère côtière. La 14^{ème} Région présente une plus forte concentration et une répartition plus hétérogène que la 10^{ème} Région, où les coupes rases sont accolées à la CC.

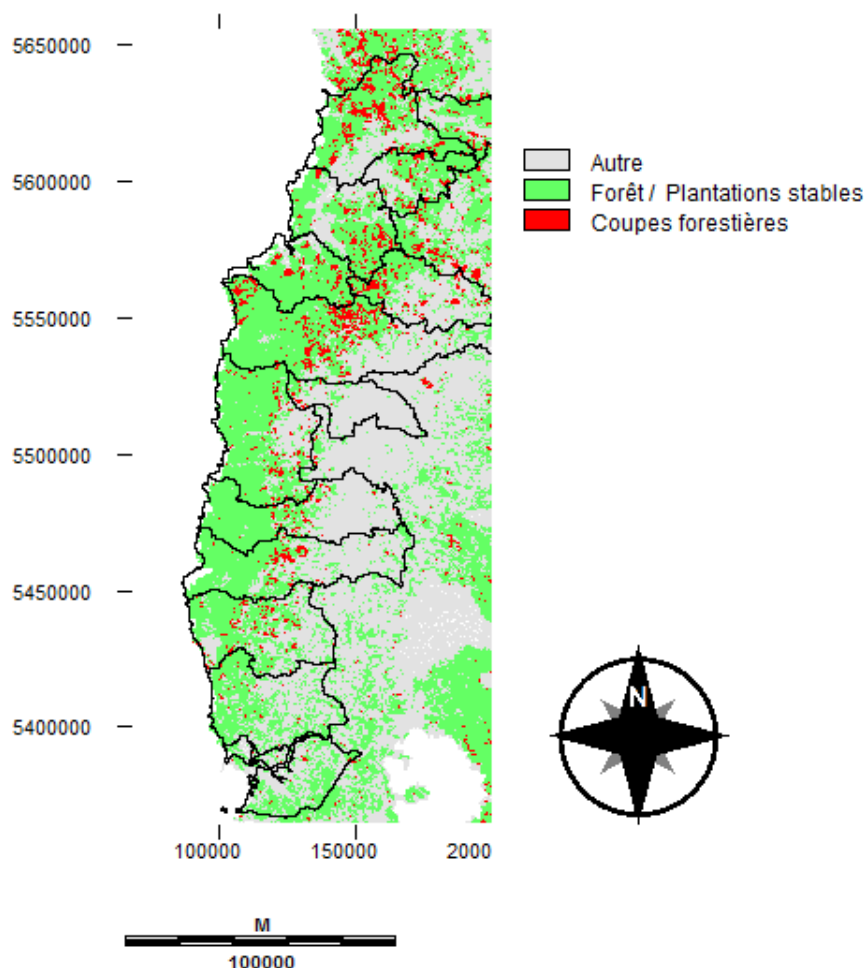


Figure 62 : Forêts stables et coupes forestières dans la 14ème et 10ème Région.
Source : Paegelow *et al.*, 2012

Enfin, les classifications sont confrontées aux données statistiques de l'INE (2007) comparaison montrant une concordance quasi parfaite en surface. La différence entre les surfaces boisées (forêt et plantation stables, coupes forestières), détectées par MODIS, et celles indiquées par l'INE (forêt native, plantations et matorral) est très faible (+ 0.81 % de surfaces pour MODIS).

Dans l'ensemble, les auteurs remarquent que l'imagerie MODIS est efficace afin de détecter les espaces forestiers, mais que sa capacité à distinguer plantations et forêts natives sur la seule base du NDVI à faible résolution spatiale est limitée. Pour aller plus loin, il faudrait disposer d'une série temporelle plus étendue, d'environ 10 à 15 ans, qui serait ainsi plus longue que le cycle de rotations des plantations.

4.2. Caractérisation des formes d'occupation du sol et leurs dynamiques à l'échelle sous régionale

L'analyse via MODIS traduit clairement une concentration des coupes forestières sur le piémont de la Cordillère de la Côte, sans pour autant renseigner la nature de ces coupes (de plantations ou de forêts natives). L'analyse à l'échelle sous-régionale se focalise sur le piémont en excluant les forêts et/ou plantations stables (figure 63). La figure est une combinaison colorée du canal du moyen infrarouge (MIR) à trois dates (1986-1999 et 2008), centrée sur le sud de la 14^{ème} Région et le nord de la 10^{ème} Région. Elle permet une première visualisation diachronique de l'occupation du sol. Un masque géométrique est appliqué en conséquence des résultats susmentionnés et de notre connaissance du terrain afin de mettre en exergue les plantations exotiques dans ces deux régions. Ainsi la Cordillère de la Côte, la portion est de la Dépression Intermédiaire et la Cordillère des Andes sont exclues.

L'objectif est la caractérisation spectrale des plantations exotiques (en lien avec la parcelle) ainsi que le développement d'un modèle réitérable dans le temps et dans l'espace (modèle pluriannuel de détection). Il s'agit ainsi de mettre en place une détection automatique des rotations sylvicoles qui permet de distinguer une coupe de forêt native d'une rotation de plantation exotique¹⁸⁰. L'ensemble des images est regroupé dans un fichier multispectral comportant 67 canaux. L'analyse multispectrale à plusieurs dates est un atout permettant de caractériser avec précision les dynamiques de changements et d'occupation du sol. Les quinze images satellitales allant de 1976 à 2008 favorisent le suivi des processus de transition, et permettent par ailleurs de distinguer les états stationnaires des processus très volatiles intervenant sur des intervalles de temps courts. La fréquence élevée de dates présente l'avantage d'une meilleure appréhension des ruptures, pouvant survenir suite à des événements extrêmes (incendies, événements climatiques) ou à la suite d'opération sylvicole (coupe rase).

4.2.1. Sélection de bandes spectrales sur trois dates différentes

Le choix du moyen infrarouge (MIR 5) est validé suite à une comparaison entre les résultats de photo-interprétation visuelle de chaque composition colorée (vert, rouge, Proche infrarouge et MIR 7). Le MIR affiche exactement la même composition colorée que les canaux vert, rouge et MIR 7, mais propose une lecture plus détaillée du parcellaire. Le PIR s'avère extrêmement intéressant grâce à un gradient coloré étendu, mais complexifie la lecture notamment dans une zone où l'activité chlorophyllienne est prépondérante. Le MIR permet quant à lui d'individualiser les objets en simplifiant la gamme des couleurs (primaires et secondaires). Ce constat a été fait par Koné *et al.* (2002, p.191) en montrant que le MIR « *permet d'affiner la discrimination entre les savanes arborés et boisées [...] par rapport à la composition colorée classique obtenue à partir des canaux dans le vert, le rouge et le proche infrarouge* ». Cette bande est très sensible à la teneur en eau des végétaux, à la biomasse ainsi qu'aux changements de la végétation (Lubinatti, 2010). Il permet aussi de résoudre « *the current ambiguities in discriminating between npv (non-photosynthetic vegetation) and*

¹⁸⁰ Les traitements sont réalisés avec le logiciel de traitement d'images ERDAS ER Mapper.
<http://geospatial.intergraph.com/products/other/ERDASERMapper/ERDASERMapper/Details.aspx>

common soil types when using data from other parts of the electro-magnetic spectrum » (Mushkin, 2005, p.142).

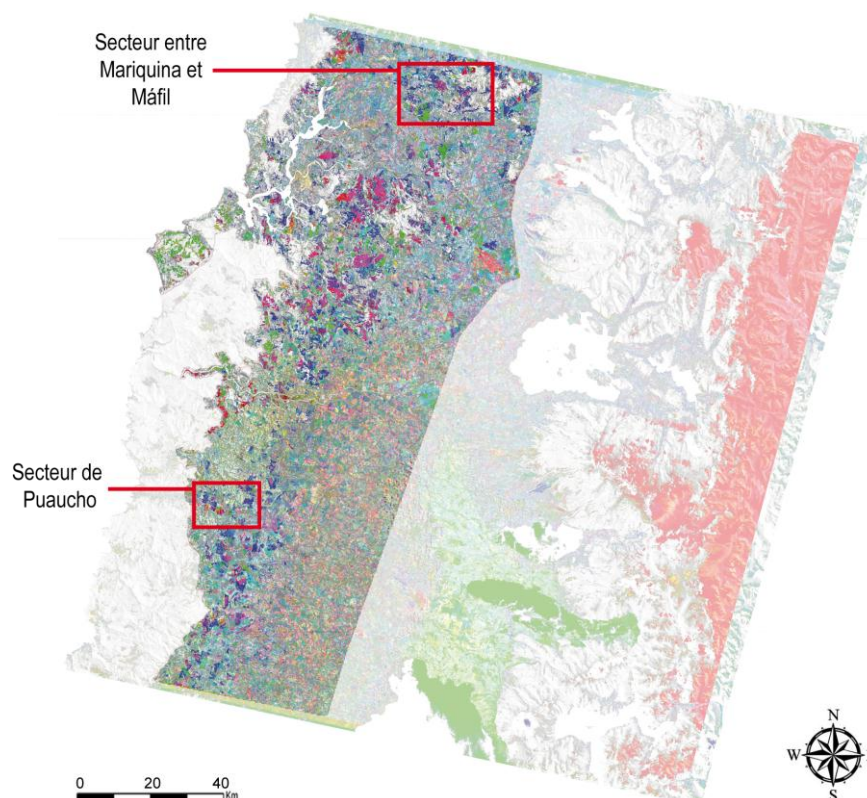


Figure 63 : Masque géométrique (canal MIR : 08r-99v-86b) et localisation des figures 62 et 63

4.2.2. Construction d'une légende dynamique

L'analyse repose sur une succession de compositions colorées (CC) à trois dates allant de 1976 à 2008 (1976-1986-1988 / 1986-1988-1999 / ... / 2005-2007-2008) à base de MIR. La légende dynamique (tableau 17) favorise la lecture des dynamiques environnementales grâce à une grille d'interprétation centrée sur les principales couleurs visible sur l'image. Chacune d'entre-elle traduit l'alternance entre des zones boisées/déboisées et inversement. Le noir et le blanc correspondent à des états stables. Les surfaces boisées déterminent aussi bien des plantations exotiques que de la forêt native. Les surfaces déboisées correspondent à des prairies, de sols nus, des coupes rases, etc. Chaque thème (ou couleur) est validé en s'assurant de l'état du couvert végétal avec les trois images de la période correspondante en IRC (infrarouge couleur).

| Couleur à l'écran | Date 1 (R) | Date 2 (V) | Date 3 (B) | Interprétation |
|-------------------|------------|------------|------------|--|
| Rouge | | | | Déboisé à la Date 1, boisé à la Date 2 |
| Vert | | | | Déboisé Date 2, boisé Date 3 |
| Bleu | | | | Déboisé Date 3 |
| Jaune | | | | Déboisé Date 1 et 2, boisé Date 3 |
| Magenta | | | | Déboisé entre Date 2 et Date 3 |
| Cyan | | | | Boisé Date 1, déboisé Date 2 et 3 |
| Noir | | | | Boisé stable |
| Gris/Blanc | | | | Déboisé stable |

Tableau 17 : Légende dynamique multi-date

Préalablement à l'analyse sous-régionale, deux zones à grande échelle sont sélectionnées (au nord, dans la province de Valdivia, et au sud, dans la province d'Osorno – figure 64) afin de faciliter la lecture et par le fait que des lots de parcelles de différentes couleurs apparaissent nettement selon les CC sélectionnées.

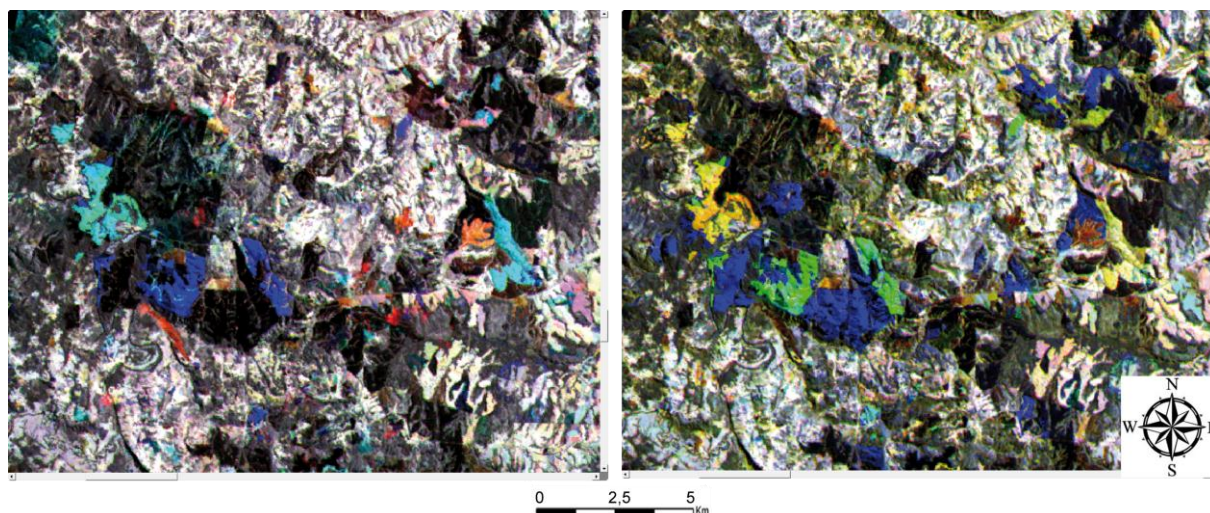


Figure 64 : Composition colorée multi-dates. Secteur de Puaucho (ruta U-40).
A gauche - MIR : R-03/V-04/B-05, à droite - MIR : R-04/V-05/B-07

4.2.3. Analyse des rotations

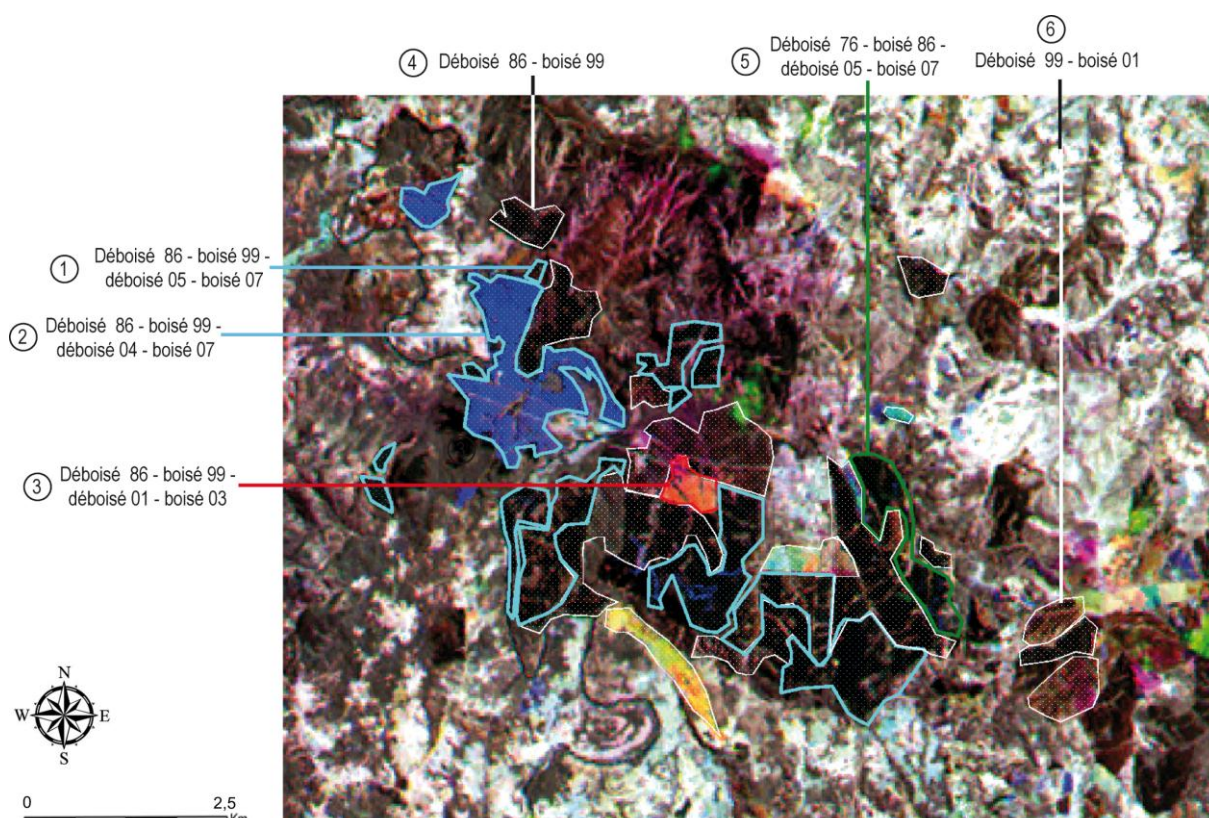
Les compositions colorées mettent clairement en évidence des transformations paysagères, mais ne permettent pas de déterminer la nature du couvert arboré, et plus particulièrement de distinguer les plantations de pins de celles d'eucalyptus. Le suivi des rotations sylvicoles facilite cette distinction en tenant compte de la rotation moyenne de ces deux espèces (22 ans pour le pin – Cabbage *et al.*, 2005 ; et 8 ans pour l'eucalyptus - Geldres et Schlatter, 2004). Ainsi, pour chaque CC, chaque objet coloré remarquable est vectorisé en précisant l'alternance boisé-date/déboisé-date. Enfin, ces objets vectorisés sont regroupés (figure 65) et quantifiés (tableau 18) afin d'obtenir un gradient temporel étendu.

Si les parcelles 4 et 6 ne sont pas identifiables (bien qu'un boisement dans cette zone traduise hypothétiquement une plantation), les parcelles 1-2-3-5 le sont. Cette identification est possible grâce à l'alternance boisé/déboisé sur quatre dates et à sa fréquence. Ainsi, les parcelles 1 et 2 correspondent à des plantations d'eucalyptus car la rotation est de 6 ans (99-05) pour la première et de 5 ans (99-04) pour la seconde. Le reboisement est effectué, d'après Geldres *et al.* (2004, p.58), après une période de 18 mois « *para que los tocones rebroten y desarrollen los retoños, definiéndose en ese período los pies mas vigorosos* ». Ces deux parcelles ont été reboisées en 2007, soit un peu plus de 18 mois après leur coupe.

La parcelle 5 correspondrait à une plantation de pins. En effet sa rotation est de 19 ans (86-05) ce qui concorde avec la rotation moyenne du pin. Or, si on subdivise cette période avec la durée de rotation de l'eucalyptus (8 ans + 18 mois) les résultats concordent également (boisé en 86, coupe en 94, reboisement en 96 et coupe en 04). Enfin la parcelle 3 présente une durée de rotation extrêmement faible (2 ans). Il est plausible qu'il s'agisse d'une plantation ayant subi des dommages sanitaires, avec un développement de parasites (chenilles,

champignons) entre 1999 et 2001. La parcelle est rasée totalement afin d'éviter la propagation puis reboisée.

La détermination des configurations spatiales basée sur la typologie de Mertens et Lambin (2001) étaye cette analyse (figure 66). Bien que cette typologie se focalise sur des processus de déforestation, elle permet une parfaite caractérisation des processus de boisement/coupe rase. Les figures 64 et 65 traduisent clairement une seule des configurations dénommée « géométrique » caractéristique de déboisement sur une échelle très étendue pour les activités du secteur moderne. A cela s'ajoute des parcelles diffuses, moins perceptibles, représentatives de la petite propriété.



| Rotation | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------|
| | d86b99d05b07 | d86b99d04b07 | d86b99d01b03 | d86b99 | d76b86d05b07 | d99b01 |
| Superficie (ha) | 151.6 | 219.6 | 27.7 | 158.9 | 82.7 | 87.7 |

Tableau 18 : Superficie des rotations sylvo-cultures en hectare. Note : d = déboisé et b = boisé

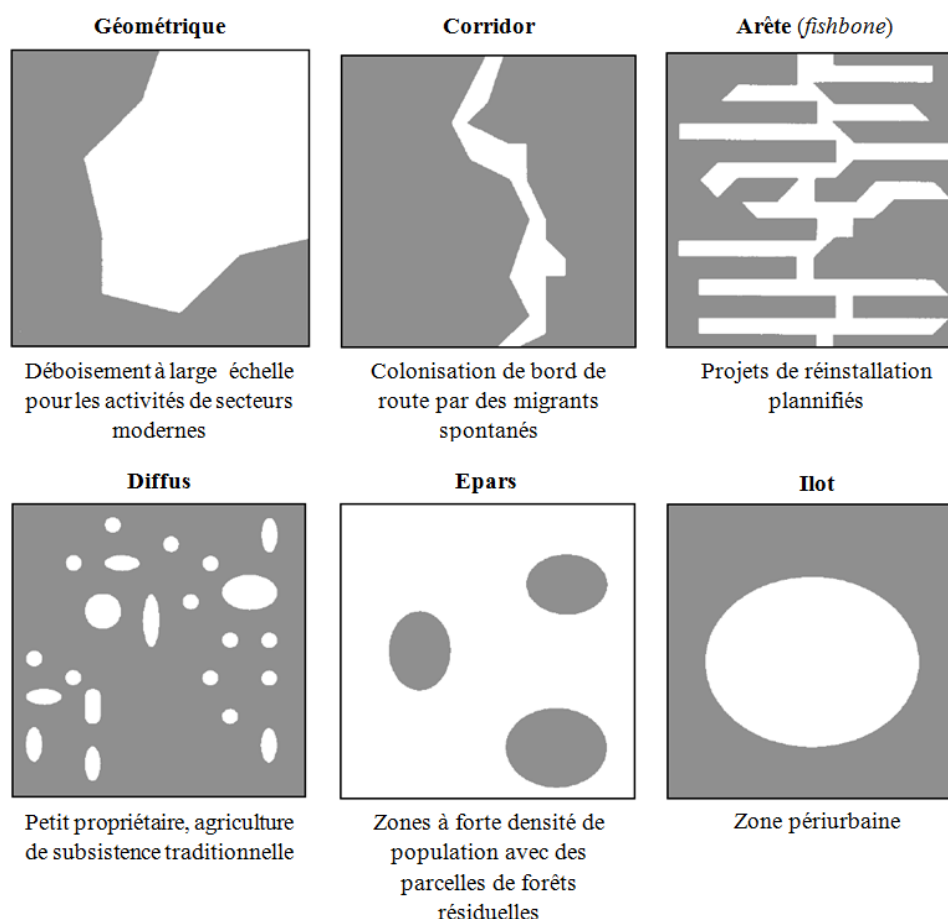


Figure 66 : Typologie de la configuration spatiale des forêts-non forêts et leur interprétation en terme de processus de déforestation. Source : Mertens et Lambin, 1997, in : Geist et Lambin, 2001, p. 66

4.2.4. Observation et analyse à l'échelle sous-régionale

L'intérêt réside dans la prise en compte du parcellaire en tant qu'objet géographique et dans sa localisation. Les figures 67 et 68 étayent les observations faites pour la figure 59 (page 159). Tout d'abord, la nette concentration des plantations à l'ouest (précordillère côtière) fait face à une Dépression Intermédiaire peu marquée, hormis dans les communes de Los Lagos et de Paillaco (14^{ème} Région). L'effet de polarisation joué par le port de Corral se confirme. Les plantations s'agglomèrent essentiellement dans le sud et l'est de la commune de Valdivia, à l'est de Paillaco, au nord de La Unión et dans la commune de Corral.

Le gradient nord-sud est perceptible sur les deux périodes. Alors que la région de Los Ríos voit un fort développement de son patrimoine forestier par le boisement à grande échelle de parcelles en 1999 (en jaune sur la figure 67), les communes de la 10^{ème} Région s'en tiennent à une implantation diffuse et moins étendue. La période 1999-2001-2008 traduit une accentuation du phénomène dans les zones précédemment mentionnées, en particulier dans la commune de La Unión. La progression s'observe au nord-est de la commune de San Juan de la Costa et se poursuit, après une interruption, dans le sud et dans les communes du Río Negro et de Purranque. San Juan de la Costa a la particularité d'être occupée de manière discontinue par des plantations (au nord-est, au centre-sud et au sud), laissant des zones de précordillère totalement vide. Afin de mieux comprendre cette logique d'organisation spatiale, l'échelle d'analyse se focalise sur cette zone.

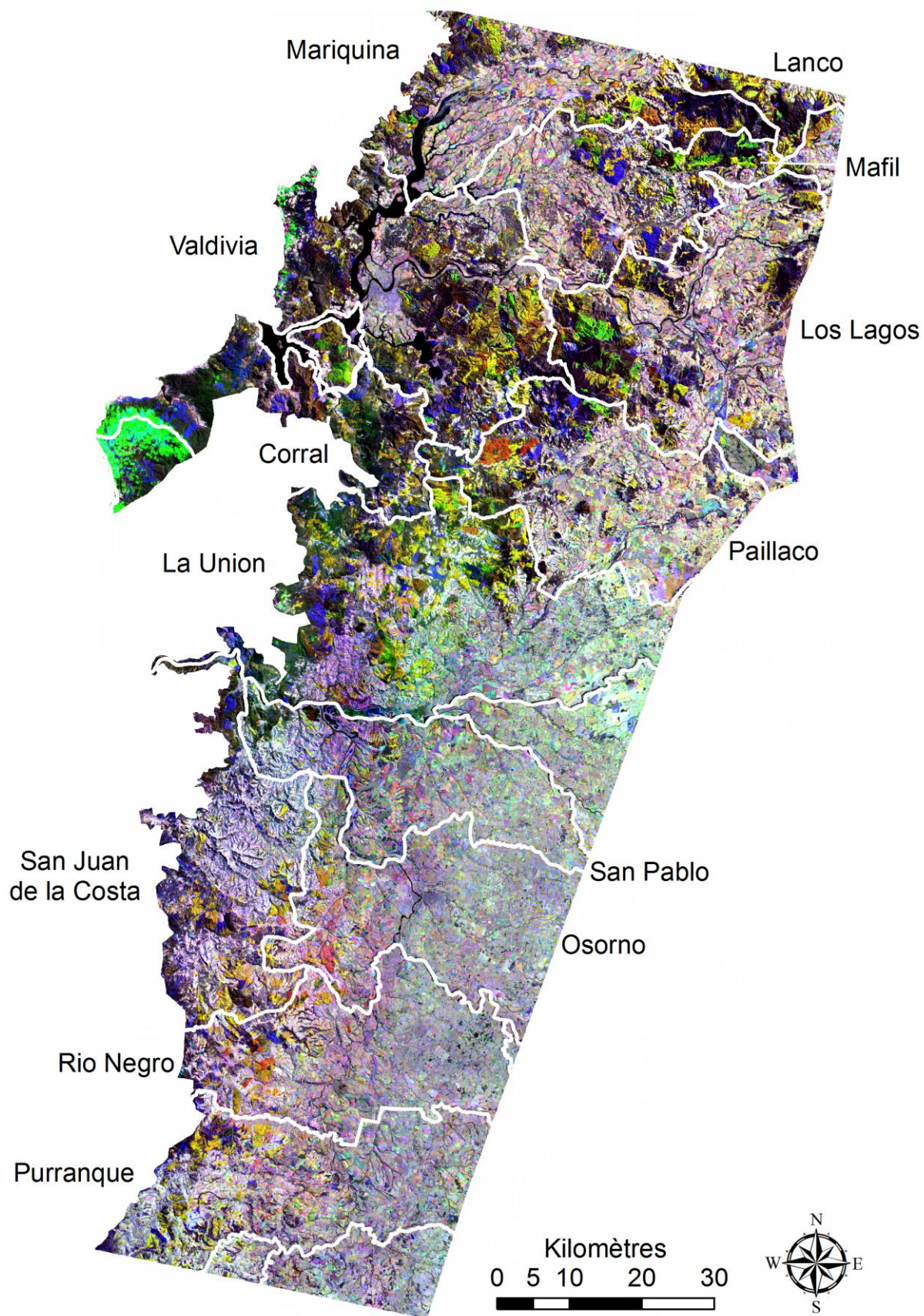


Figure 67 : Composition colorée multi-date (canal MIR 5 : R-86/V-88/B-99)

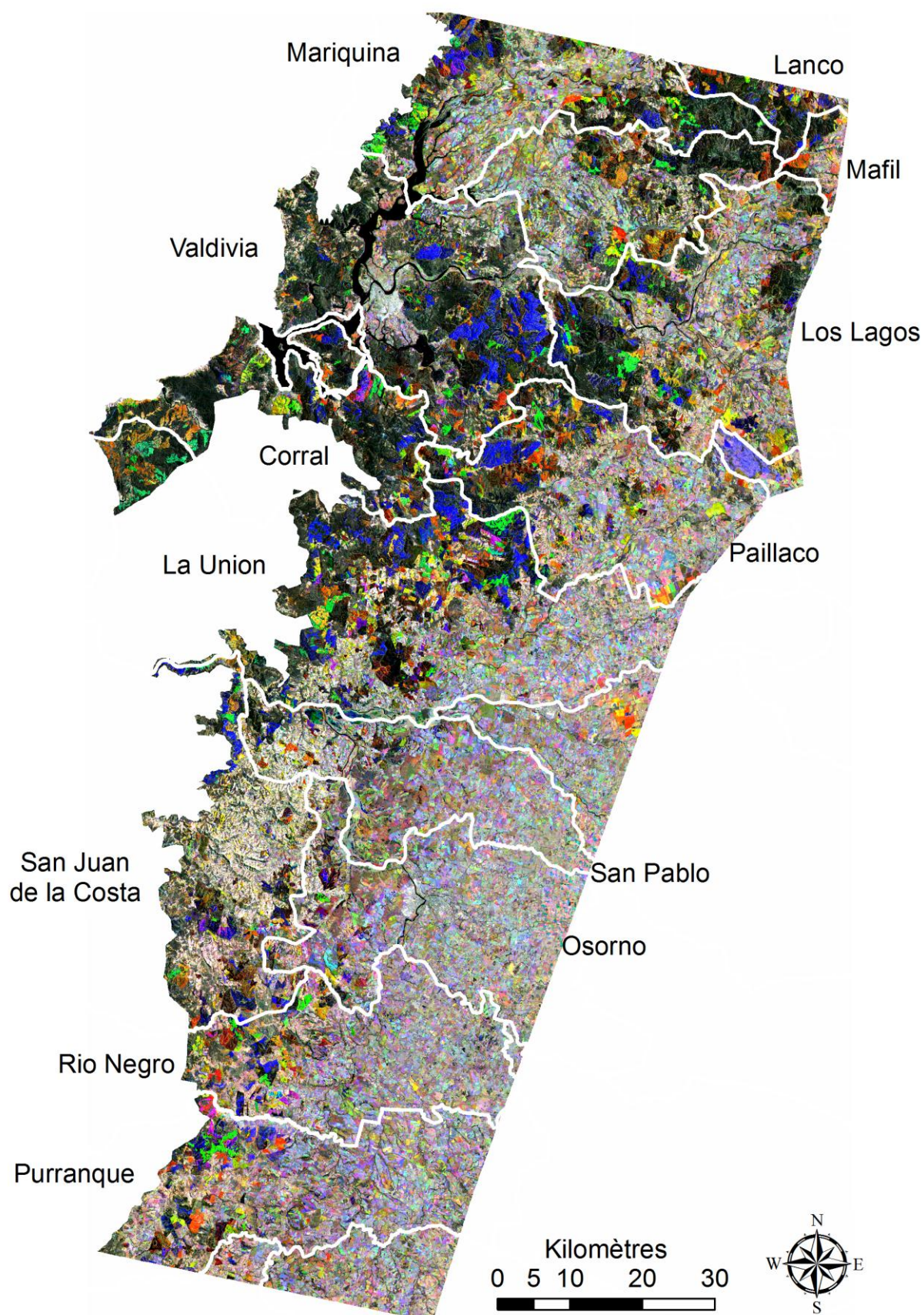


Figure 68 : Composition colorée multi-date (canal MIR 5 : R-99/V-01/B-08)

4.3. Dynamique forestière à l'échelle locale : la commune de San Juan de la Costa

4.3.1. Méthode de classification multi-temporelle

« Ce processus d'analyse vise à la création d'images thématiques, c'est-à-dire d'images dont le contenu ne présente plus une mesure mais une interprétation et une catégorisation de la nature des objets associés aux pixels [...]. » (Bonn, Rochon, 1993)

4.3.1.1. Description et caractéristiques des types d'occupations du sol

L'élaboration de la typologie des catégories d'occupation du sol est effectuée en plusieurs itérations (tableau 20, page 173). Tout d'abord, l'évaluation de la séparabilité des signatures spectrales des échantillons ou parcelles d'apprentissages. Cette évaluation est menée à chaque niveau de classification et pour chaque image, en procédant par une analyse d'histogrammes bidimensionnels. Ceci constitue une étape importante dans la mesure où les échantillons doivent être représentatifs des classes déterminées. Pour mener à bien la détermination des parcelles d'apprentissage, celles-ci devraient s'appuyer idéalement, selon Chen et Stow (2002), sur des relevés *in situ*. De fait, les multiples missions de terrain ont permis de récolter 271 points GPS qui ont été intégrés *a posteriori* sur Google Earth (tableau 19)¹⁸¹. La construction des échantillons en vue de la classification s'est faite par identification visuelle et digitalisation de plusieurs petits groupes de pixels pour chaque thème. Le nombre de parcelles d'entraînement par date et pour le 3^{ème} niveau de classification¹⁸² est de 37 pour 1986, 47 pour 1999 et 49 pour 2008. Enfin, plusieurs tests de classification sont effectués en manipulant (i) les canaux, (ii) les dates, (iii) l'algorithme et (iv) les parcelles d'apprentissages.









| Occupation du sol | Relevés de terrain | | Symbole Google Earth |
|-------------------|--------------------|--------|---|
| | Nombre | % | |
| Forêt native | 17 | 6.27 |  |
| Renoval | 17 | 6.27 |  |
| Matorral | 18 | 6.64 |  |
| Pin | 23 | 8.49 |  |
| Eucalyptus | 89 | 32.84 |  |
| Coupe rase | 10 | 3.69 |  |
| Culture | 39 | 14.39 |  |
| Prairie | 58 | 21.40 |  |
| Total | 271 | 100.00 | |

Tableau 19 : Relevés in situ (mission 2008 et 2009)

¹⁸¹ Les huit type d'occupation du sol font suite à une agrégation de catégories présentes sur la fiche de terrain.

¹⁸² Le lecteur trouvera une explication des niveaux de classification à la page suivante.

Chacune des classifications est élaborée de façon supervisée. Cette méthode est considérée selon Rogan et Chen (2004) comme l'une des plus intuitives afin de cartographier les changements d'occupation du sol. Les auteurs considèrent qu'elle nécessite une connaissance approfondie du terrain en association avec des relevés de terrain et l'interprétation de photographies aériennes. L'algorithme du maximum de vraisemblance (*maximum likelihood*) est utilisé car il est le plus communément utilisé pour les classifications supervisées d'images multispectrales et pour le suivi des LUCC (Rogan et Chen, 2004). Nous l'avons effectivement largement employé pour le suivi des changements d'occupation des sols (Schulz *et al.*, 2010 ; Wyman et Stein, 2010) et l'étude de la fragmentation forestière (Echeverria *et al.*, 2006 ; Echeverria *et al.*, 2008). « *With the ML algorithm, probability density functions are built for each class based on the training data's spectral values. During classification all unclassified pixels are assigned class membership based on the relative likelihood (probability) of that pixel occurring within each class' probability density function (Lillesand et al., 2004)* » (Hagner, 2007, p.439).

La démarche s'échelonne en quatre niveaux de classification synthétisés dans le tableau 20.

Quatrième niveau :

La première typologie se base sur le Cadastre de la végétation de la CONAF (format digital) segmentée en 34 classes détaillées et regroupées en neuf classes générales, ainsi que sur l'étude de Gilles Selleron axée sur les processus de déforestation et reforestation dans la 10^{ème} Région de Los Lagos (2001). Ce quatrième niveau de classification compte 23 classes. La vérification de l'homogénéité radiométrique intra-classes et de l'hétérogénéité interclasses est réalisée par l'analyse d'histogramme bidimensionnel.

La première hypothèse concerne l'hétérogénéité radiométrique de la forêt native et des formations de renoval dense en fonction de l'orientation des versants. La réponse spectrale de ces deux classes étant tributaire de leur localisation (ubac-adret et plat), elles sont déclinées en six sous-classes. De plus elles sont considérées comme analogues de par leur caractéristique floristique et physiologique mais aussi de par leur densité (supérieure à 25%). Enfin, elles sont agrégées en trois classes au 3^{ème} niveau de classification. Une seconde confusion radiométrique se rapporte aux formations de renoval dont la densité est inférieure à 25% conjointement aux formations végétales de matorral (buissons prairies et arborés). Les trois classes sont fusionnées en renoval & matorral (R&M).

Les classes -prairie chlorophyllienne, blé, maïs et colza- affichent une forte homogénéité intra-classe. Cependant le colza se détache très nettement des classes blé et maïs affichant une signature spectrale extrêmement élevée dans le proche infrarouge (PIR), à l'image des prairies chlorophylliennes. Par souci thématique et radiométrique, et afin de minimiser les confusions de classification, ces quatre classes sont synthétisées en prairie chlorophyllienne.

Le dernier regroupement concerne les classes pin et eucalyptus jeune et coupe rase (uniquement pour l'image de 1986). Les jeunes plantations, comme l'indique la description, caractérisent de nouveaux boisements de moins de cinq ans, c'est-à-dire qu'elles regroupent aussi bien de jeunes pousses que des arbustes de 3-4 mètres. Les différences spectrales, observées par l'histogramme, sont en toute logique notables, mais ont cependant subi un premier regroupement thématique. Ces deux classes sont jointes à la classe coupe rase dans la

mesure où chaque coupe rase est suivie de nouvelles plantations. Enfin, les classes eucalyptus et pin adulte, sol nu, prairie rase, alerzales et eau révèlent une forte séparabilité spectrale.

Troisième niveau :

Le 3^{ème} niveau de classification se réduit donc à treize classes pour l'image de 1986, et à quinze classes pour les images de 1999 et 2008 (+ pin et eucalyptus jeune). A cette étape, la vérification de l'homogénéité radiométrique de chacune des classes est effectuée par analyse d'histogramme bidimensionnel. La validation quantitative est réalisée par l'analyse de la matrice de confusion (annexes 5-6 et 7, pages 332-334).

Tout d'abord, les plantations d'eucalyptus adultes (1986) présentent de fortes confusions radiométriques. La matrice de confusion indique que cette catégorie n'est correctement classée que pour 13,9% (précision du producteur¹⁸³) et que sa classification n'est seulement correcte que 19,2% du temps (précision de l'utilisateur). Les erreurs d'omission sont provoquées par les classes forêt native ubac, R&M et pin adulte, et les erreurs de commission par les classes forêt native adret et R&M. La classe pin adulte affiche de meilleurs résultats (40,9% de précision producteur et 36,2% de précision utilisateur), les erreurs de commission étant dues aux plantations d'eucalyptus. Ces deux classes sont donc fusionnées en « plantation » afin d'améliorer leur précision. Malgré tout, nous sommes conscient que les résultats post-fusion restent faibles comparativement aux précisions observées pour les classifications de 1999 et 2008. Les multiples tests de classifications n'ont pu aboutir à de meilleurs résultats.

Les trois sous-classes de forêt native sont agrégées en « forêt native », permettant d'améliorer la précision de la classification de 2008. En effet, la matrice de confusion met en exergue une confusion entre la classe forêt native plat et forêt native ubac. Les classes pâturage et prairie chlorophyllienne présentent des confusions entre elles (classification de 1986 et 2008) et sont donc regroupées en une classe unique « prairie ». Enfin, les classes sol nu, coupe rase, prairie rase, alerzales affichent, dans l'ensemble, une bonne précision statistique. Or, les faibles confusions observées, pour la classification de 1986, se faisant entre ces mêmes classes (principalement pour les classes -prairie rase et coupe rase-), celles-ci sont réunies dans la catégorie « sol nu ».

Deuxième et premier niveaux :

Le deuxième niveau de classification compte (pour les trois images) six classes : (i) plantation, (ii) forêt native, (iii) renoval et matorral (R&M), (iv) prairie, (v) sol nu et (vi) corps d'eau. Ensuite, afin de simplifier le processus de simulation prospective et de mettre en évidence la dynamique des plantations industrielles, la légende est réduite à quatre types d'occupation du sol : (i) plantation, (ii) forêt native, (iii) autre (R&M, prairie et sol nu), et (iv) corps d'eau.

¹⁸³ Pour l'USGS Land Cover Institute (LCI) la précision du producteur est liée à la probabilité qu'un échantillon de référence (parcelles d'apprentissages dans notre cas) d'être correctement cartographié et mesure les erreurs d'omission. En revanche, la précision de l'utilisateur indique la probabilité qu'un échantillon de la classification de correspondre effectivement à ce qu'elle est à partir des données de référence, et mesure les erreurs de commission. (<http://landcover.usgs.gov/accuracy/>)

DEUXIEME PARTIE / CHAPITRE 4 – Détermination des dynamiques paysagères et trajectoires d'évolutions

| Code | 1 ^{er} niveau de classification | Code | 2 ^{ème} niveau de classification | Code | 3 ^{ème} niveau de classification | Code | 4 ^{ème} niveau de classification | Description détaillée | | |
|---------|--|---|---|---|---|---------|---|---|--------------------------|---|
| 1 | Plantation | 1.0 | Plantation | 1.0.1 | Eucalyptus adulte | 1.0.1.0 | Eucalyptus adulte | Plantation en pleine croissance, âgée de plus de cinq ans | | |
| | | | | 1.0.2 | Pin adulte | 1.0.2.0 | Pin adulte | Plantation en pleine croissance, âgée de plus de cinq ans | | |
| 2 | Forêt Native | 2.0 | Forêt Native | 2.0.1 | Forêt Native adret | 2.0.1.1 | Forêt Native adret | * Ecosystème dans lequel la strate arborée, constituée d'espèces natives, a une hauteur supérieure à 2 mètres et une couverture supérieure à 25%. Dans l'hémisphère sud il s'agit de la face Nord de la montagne | | |
| | | | | | | 2.0.1.2 | Renoval* dense adret | *Correspond à une forêt secondaire dont la reproduction végétative est issue de perturbation anthropique ou naturelle (incendie, coupe rase, effondrement). En général elles sont homogènes dans leur structure verticale et leur diamètre. La densité est supérieure à 25% | | |
| | | | | 2.0.2 | Forêt Native ubac | 2.0.2.1 | Forêt Native ubac | Dans l'hémisphère sud il s'agit de la face Sud de la montagne | | |
| | | | | | | 2.0.2.2 | Renoval* ubac | Idem | | |
| | | | | 2.0.3 | Forêt Native plat | 2.0.3.1 | Forêt Native plat | Terrain à déclivité faible voire nulle | | |
| | | | | | | 2.0.3.2 | Renoval* plat | Idem | | |
| | | | | 3 | Autre | 3.1 | Renoval & Matorral | 3.1.0 | Renoval & matorral | 3.1.0.1 |
| 3.1.0.2 | Matorral prairie | *Formation végétale dans la couverture végétale arborée est inférieure à 25%; la couverture de type arbustive varie entre 25-100%, et la couverture herbacée entre 25-100%. | | | | | | | | |
| 3.1.0.3 | Matorral arboré | *Avec des arbres > 2m de hauteur et dont la couverture arborée est comprise entre 10-25%, la strate arbustive entre 10-100% et la strate herbacée entre 0 et 100% | | | | | | | | |
| 3.2 | Prairie | 3.2.2 | Prairie chlorophyllienne | | | 3.2.1 | Pâturage | 3.2.1.0 | Pâturage | Prairie permanente, non assolée, destinée à l'alimentation pour différents types d'élevages |
| | | | | | | 3.2.2 | Prairie chlorophyllienne | 3.2.2.0 | Prairie chlorophyllienne | *Formación vegetal donde la cobertura en el tipo biológico herbáceas supera el 10%. La réponse spectrale de ce type de prairie est très forte dans le proche infrarouge (PIR) |
| | | | | | | | | 3.2.2.1 | Blé | Céréale à paille cultivée pour son grain. Alimentation animale et/ou humaine |
| | | | | | | | | 3.2.2.2 | Maïs | Céréale alimentaire de la famille des Graminées. Alimentation animale (maïs grain) et/ou humaine (maïs sucré/doux) |
| 3.2.2.3 | Colza | Plante annuelle, de la famille des crucifères, cultivée principalement pour ses graines, riches en huile et en protéines, et accessoirement pour la production de fourrage vert au printemps ou en été. | | | | | | | | |
| 3.3 | Sol nu | 3.3.1 | Sol nu | | | 3.3.1.1 | Sol nu | 3.3.1.1 | Sol nu | Surface dépourvue de végétation |
| | | | | | | 3.3.1.2 | Pin jeune | *Plantation dans ses premiers stades de développement ou qui a été récemment coupée (< 5 ans) | | |
| | | | | | | 3.3.1.3 | Eucalyptus jeune | * Plantation dans ses premiers stades de développement ou qui a été récemment coupée (< 5 ans) | | |
| | | | | 3.3.2 | Coupe rase | 3.3.2.0 | Coupe rase | Enlèvement de la totalité ou d'une partie de la végétation d'un site | | |
| 3.3.3 | Prairie rase | 3.3.3.0 | Prairie rase | *Formation végétale dont la strate herbacée est supérieure à 10%. La végétation présente est rase voire sèche | | | | | | |
| 3.3.4 | Alerzales | 3.3.4.0 | Alerzales | Zone d'extraction d'alerce | | | | | | |
| 4 | Eau | 4.0 | Eau | 4.0.0 | Eau | 4.0.0.0 | Eau | Regroupe le réseau hydrographique (fleuve et ruisseau) et le système lacustre | | |
| | | | | | | | *Renoval dense et semi-dense | * Définition de la CONAF. Documentación del Catastro de la vegetación nativa del país | | |

Tableau 20 : Niveau de classification et description détaillée des types d'occupation du sol

4.3.1.2. Evaluation et validation (approche rétrospective ; méthode œil-cerveau)

Trois classifications sont réalisées en 1986, 1999 et 2008 (figure 69). Elles sont évaluées et validées selon deux approches : de manière quantitative à l'aide (i) de matrice de confusion et (ii) du cadastre de la CONAF (2006), puis de façon qualitative via (iii) Google Earth.

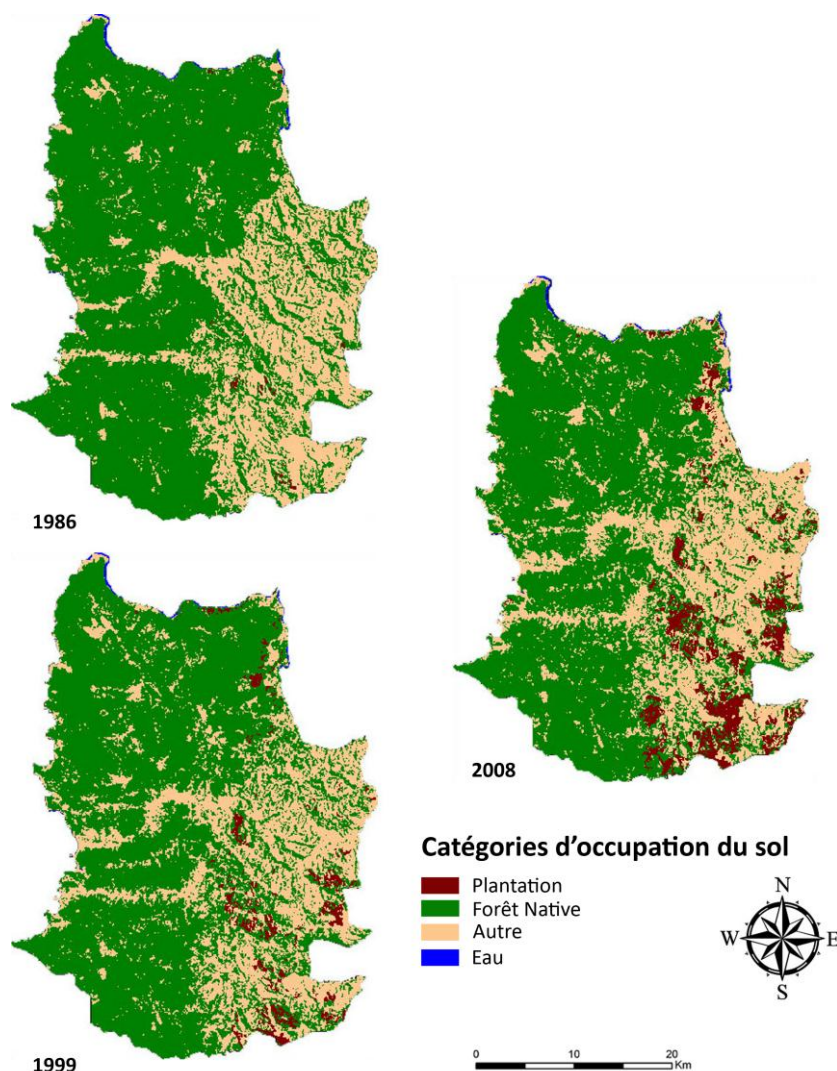


Figure 69 : Occupation du sol en 1986, 1999 et 2008 dans la commune de San Juan de la Costa

a) Première validation quantitative (précision globale et coefficient de Kappa)

La précision de chaque classification est analysée grâce à une matrice de confusion (annexes 5-6 et 7), en confrontant de nouvelles parcelles (parcelles de validation) aux catégories desdites classifications. La matrice indique la précision d'ensemble, et détaille, via l'indice de Kappa (*Kappa Index of Agreement* – KIA), le degré de précision et d'omission/commission pour chaque classe. Le Kappa est reconnu comme une puissante technique d'analyse de matrice (Lu *et al.*, 2005, p.107). Son importance réside dans la

possibilité de tester si une carte d'occupation du sol, élaborée de manière supervisée, se révèle être meilleure qu'une carte générée par l'attribution aléatoire de parcelles (Congalton, 1996, in Bottomley, 2000)¹⁸⁴. Enfin cet indice est jugé, dans le domaine de l'écologie du paysage et des habitats faunistiques, comme particulièrement utile afin d'estimer la précision des modèles prédictifs en mesurant l'accord entre le modèle prédictif et un ensemble de points d'échantillonnage issus de relevés de terrain¹⁸⁵.

Dès lors, quel degré de précision globale et quel coefficient doit-on obtenir afin de valider nos classifications ? Selon Shao et Wu (2008) il existe une hypothèse commune selon laquelle la qualité d'une carte serait relative à la précision de sa classification. Les auteurs poursuivent leur raisonnement et mettent en garde les modélisateurs dans l'estimation de leur résultat en avançant deux raisons. Tout d'abord l'absence d'un standard universellement applicable sur lequel peut être quantifiée la précision de la classification (*overall accuracy*). D'autre part, du fait qu'une même image satellitale ne produit pas systématiquement la même classification en fonction de l'algorithme employé. Constatant la faible reproductibilité de la classification d'une même image, ils considèrent « *qu'il n'y a aucun moyen de s'assurer que les mesures du paysage dérivées de la carte soient les plus précises, dans la mesure où il n'y a aucun moyen pratique de prouver que cette carte est la meilleure possible* ». Malgré tout, la règle de base tend à ce que la précision globale approche les 90%. D'après les critères de classifications élaborés par Anderson en 1971 (Anderson *et al.*, 1976), le niveau minimum d'exactitude pour l'identification des catégories d'occupation du sol doit être au moins de 85%.

La précision globale pour les classifications de 1999 et 2008 est respectivement de 91,24% et de 87,51%. En revanche, on obtient sur l'image de 1986 un résultat inférieur au seuil minimum avec 84,34% (tableau 21).

Le coefficient de Kappa s'échelonne entre 0 et 1, où ce dernier indique une concordance parfaite. Les valeurs de Kappa sont aussi caractérisées en trois groupes : une valeur supérieure à 0,8 (80%) représente un accord solide, une valeur comprise entre 0,4 et 0,8 (40 à 80%) représente un accord modéré, et une valeur inférieure à 0,4 (40%) représente une faible concordance (Congalton, 1996, in : Bottomley, 2000).

Le résultat du coefficient pour les trois classifications est similaire à leur précision globale. Si les images de 1999 et 2008 ont un coefficient supérieur à 80%, seule l'image de 1986 affiche un résultat légèrement inférieur.

| | 1986 | 1999 | 2008 |
|-------------------|-------|-------|-------|
| Coefficient Kappa | 0.78 | 0.89 | 0.86 |
| Précision globale | 84.34 | 91.24 | 87.51 |

Tableau 21 : Résultat des trois classifications

¹⁸⁴ <http://cast.uark.edu/home/research/environmental-studies/lulc-change-in-carroll-county.html>

¹⁸⁵ http://www.jennessent.com/arcview/kappa_stats.htm

b) Deuxième validation quantitative (comparaison avec la CONAF)

Chaque catégorie d'occupation du sol issue de classification de 2008 est comparée au Cadastre numérisé et actualisé de la CONAF (2006). La première comparaison se focalise sur les plantations cumulées sur les trois dates (1986+1999+2008) (figures 70 et 71). Alors que la CONAF détecte 12 872,43 ha de plantations (adultes et jeunes), nos résultats minimisent cette étendue avec 9 888,39 ha soit 76,8%. Or, si la quantification aboutit à des résultats comparables, la concordance spatiale est seulement de 6 124,23 ha soit 47,6%, et une discordance de 81,6% (résultat cumulé des discordances représentées en bleu et rose sur la carte). La classification de 2008 affiche des plantations adultes alors que la CONAF mentionne des plantations jeunes et adultes, ce qui pourrait expliquer cette différence. En réalisant la même opération mais cette fois sur les plantations adultes, la CONAF détecte 8496,54 ha, soit 85,92% de similitude. La concordance spatiale est beaucoup moins satisfaisante avec 2954,25 ha (34,8%) et une discordance cumulée de 12227,94 ha (143,9%).

Les rotations de plantations ainsi que la date d'acquisition expliquent ces différences. Contrairement à la CONAF, nos données sont l'état à un instant t, c'est-à-dire que certaines images minimisent les plantations alors que le patrimoine forestier est très développé. Les coupes rases ne se coordonnent pas systématiquement avec la date de l'image.

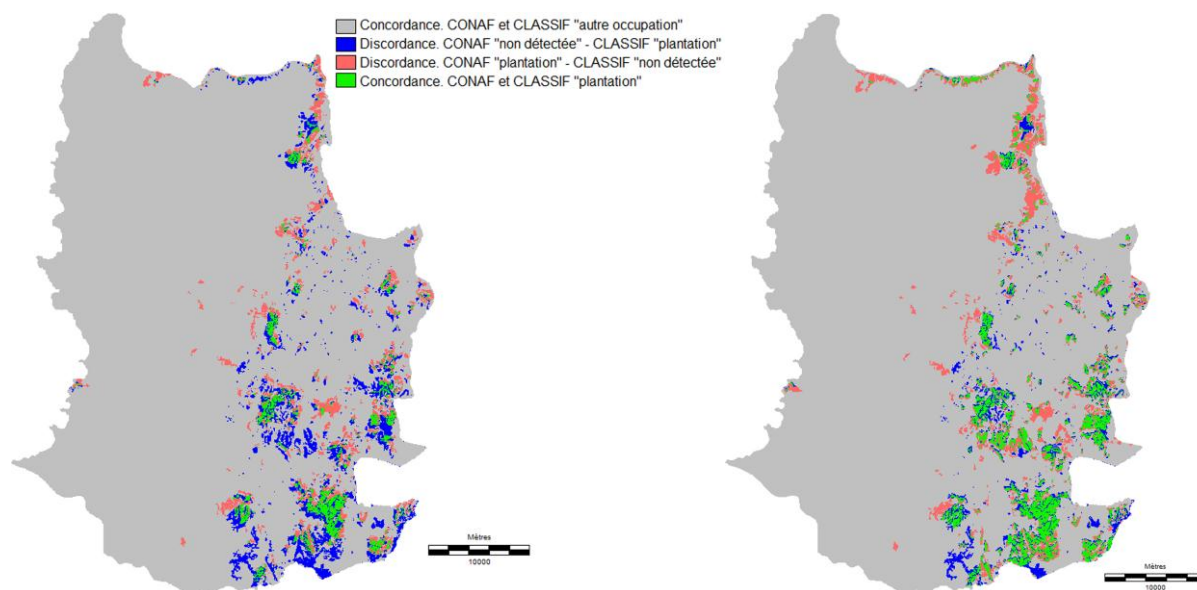


Figure 70 : Comparaison plantations adultes

Figure 71 : Comparaison plantations jeunes et adultes

La deuxième comparaison se concentre sur la forêt native (figures 72 et 73). Les catégories de la CONAF sont fusionnées (forêt native, forêt native – renoval, renoval dense et semi-dense, forêt de protection) afin de les rendre comparable avec notre typologie. La CONAF compte 105 655,7 ha alors que notre classification en détecte 96 859,08 (91,7%). La concordance spatiale s'élève à 80 372,16 ha (76,1%), et la discordance cumulée à 39 046,23 ha (37%).

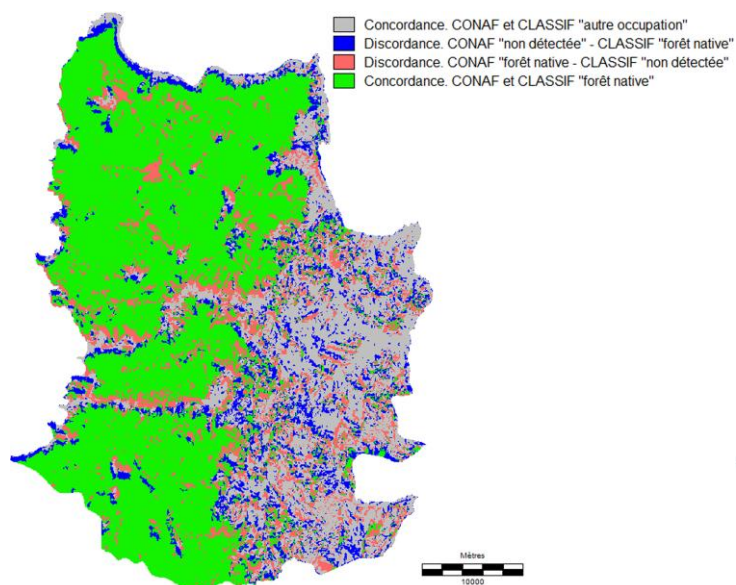


Figure 72 : Comparaison de la forêt native

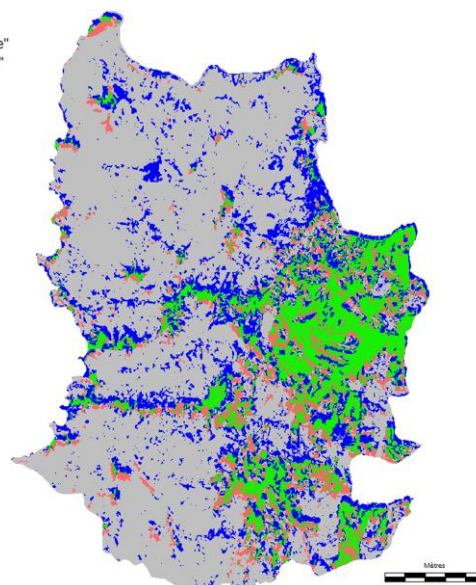


Figure 73 : Comparaison de « autres »

Enfin la dernière comparaison concerne la catégorie « autre ». Les catégories prairie, matorral-pradera, matorral-arborescente, renoval abierto sont également fusionnées. Cette fusion totalise 35 766,54 ha alors que la classification 2008 affiche 48 199,23 ha (74,2%). La concordance spatiale est de 21 272,58 ha (59,5%), et la discordance de 39 028,70 ha (109,1%).

D'un point de vue statistique, l'absence de cohérence entre les nomenclatures utilisées par la CONAF (2006)¹⁸⁶, l'INE (2007) et les classifications rend la comparaison des superficies d'occupation discutable. De plus, la superficie communale totale n'est pas similaire. Alors que nos classifications totalisent 154 478,97 ha, la CONAF en compte 152 193,2. Le tableau 22 établit une comparaison entre le deuxième niveau de classification (6 classes) et les données de la CONAF et de l'INE. Le tableau 23 compare le premier niveau de classification avec les données de la CONAF. A l'image des comparaisons susmentionnées, les statistiques révèlent des discordances notables, en particulier pour la classe « sol nu »¹⁸⁷. La fusion entre les classes R&M, prairie et sol nu atténue remarquablement ces différences.

¹⁸⁶ Le lecteur peut remarquer que les superficies entre les données digitalisées du Cadastre et leurs statistiques diffèrent sensiblement. Exemple des plantations adultes : données digitalisées (8496,54 ha), données statistiques (8790,70 ha).

¹⁸⁷ Ceci s'explique par le fait que les sols nus ne déterminent pas un usage mais bien un état momentané.

| | Classif. 1999 | CONAF 1998 | % diff. (Classif- CONAF) | Classif. 2008 | CONAF 2006 | % diff. (Classif- CONAF) | INE 2007 | % diff. (Classif- INE) |
|-----------------|------------------|---------------|--------------------------------|------------------|---------------|--------------------------------|-------------|------------------------------|
| Plant. | 4 201.0 | 5 583.1 | -24.8 | *9 888.4 | 8 790.7 | 12.5 | 14 854.0 | -33.4 |
| Forêt native | 104 322.6 | 107 285.1 | -2.8 | 96 859.1 | 107 342.3 | -9.8 | 114 170.9 | -15.2 |
| R&M | 15 406.2 | 9 774.3 | 57.6 | 8 270.7 | 8 669.6 | -4.6 | **7 467.3 | 10.8 |
| Prairie | 9 427.1 | 23 378.6 | -59.7 | 12 946.4 | 21 488.7 | -39.8 | ***18 851.9 | -31.3 |
| Sol nu | 20 713.2 | 5 644.2 | 267.0 | 26 982.1 | 4 930.5 | 447.2 | ----- | ----- |
| Eau | 408.9 | 528.0 | -22.6 | 408.9 | 515.8 | -20.7 | ----- | ----- |

*Plantations cumulées 86-99-08 - **Matorral - ***Prairie, culture, culture fourragère

Tableau 22 : Comparaison des données de la CONAF, INE et classifications (six classes)

| | Classif. 1999 | CONAF 1998 | % de différence (Classif- CONAF) | Classif. 2008 | CONAF 2006 | % de différence (Classif- CONAF) |
|--------------|------------------|---------------|---|------------------|---------------|---|
| Plantation | 4 201 | 5 583.1 | -24.8 | *9 888.4 | 8 790.7 | 12.5 |
| Foret Native | 104 322.6 | 107 285.1 | -2.8 | 96 859.1 | 107 342.3 | -9.8 |
| Autre | 45 546.5 | 38 797.1 | 17.4 | 48 199.2 | 35 088.8 | 37.4 |
| Eau | 408.9 | 528 | -22.6 | 408.9 | 515.8 | -20.7 |

*Plantations cumulées 86-99-08

Tableau 23 : Comparaison des données de la CONAF, INE et classifications (quatre classes)

c) Validation qualitative (Google Earth)

En tenant compte de la couverture temporelle des images haute résolution proposées par Google Earth (GE) sur la commune (18/01/2005 au 19/02/2011), seule la classification de 2008 est soumise à une validation. La disponibilité de ces images n'étant pas synchrone à l'ensemble de la zone, ce gradient temporel se réduit aux dates du 26/01/2006 et du 02/09/2010 afin d'éliminer certaines images floues.

La localisation des erreurs susmentionnées s'opère suite à l'importation de la classification sous GE et par réglage de l'opacité, permettant de visualiser simultanément le couple de données. Une première visualisation d'ensemble confirme la qualité de la classification, notamment pour la zone ouest de la commune (forêt native et parcelles déboisées), mais laisse apparaître quelques discordances sur le piémont. L'échelle d'analyse est ainsi affinée et trois zones sont sélectionnées : (i) au nord-est, aux abords du Río Bueno, (ii) dans le centre-sud, à proximité de la U-40, et (iii) au sud, à la limite communale. Enfin, la validation s'appuie sur le curseur du temps de GE, permettant de naviguer entre les images disponibles et anticiper des ruptures telles que l'alternance plantation/coupe rase (figure 74).

Les résultats sont probants pour les trois zones. Les patrons spatiaux issus de la classification concordent parfaitement à ceux observés sur GE [(1)-(3)-(4) et (6)]. L'intérêt du choix des deux dates GE se confirme par la catégorie (3) qui se focalise sur l'évolution d'une plantation dans le temps et dans l'espace. Si la validation s'était fondée uniquement sur l'image de 2010 (pour la zone (i) ou (ii)), nous aurions pu en conclure qu'il s'agissait d'une confusion, or l'image de 2006 prouve le contraire. On remarque cependant quelques

confusions entre la forêt native et les plantations (2), et entre la classe autre et les plantations (5).

CONCLUSION PARTIELLE

Les trois formes de validation utilisées à l'échelle locale corroborent les résultats obtenus avec MODIS (Paegelow *et al.*, 2012) et avec l'étude de Gilles Selleron (2001). Bien que le cadastre de la CONAF (cartes digitalisées) se superpose pour certains secteurs, de nombreuses discordances existent : il ne peut être utilisé pour effectuer des comparaisons. Plusieurs hypothèses peuvent être émises à ce stade: (i) soit les données de la CONAF sont lacunaires, (ii) soit la date n'est pas exacte (ou les données ne sont pas actualisées), (iii) soit sa nomenclature n'est pas comparable.

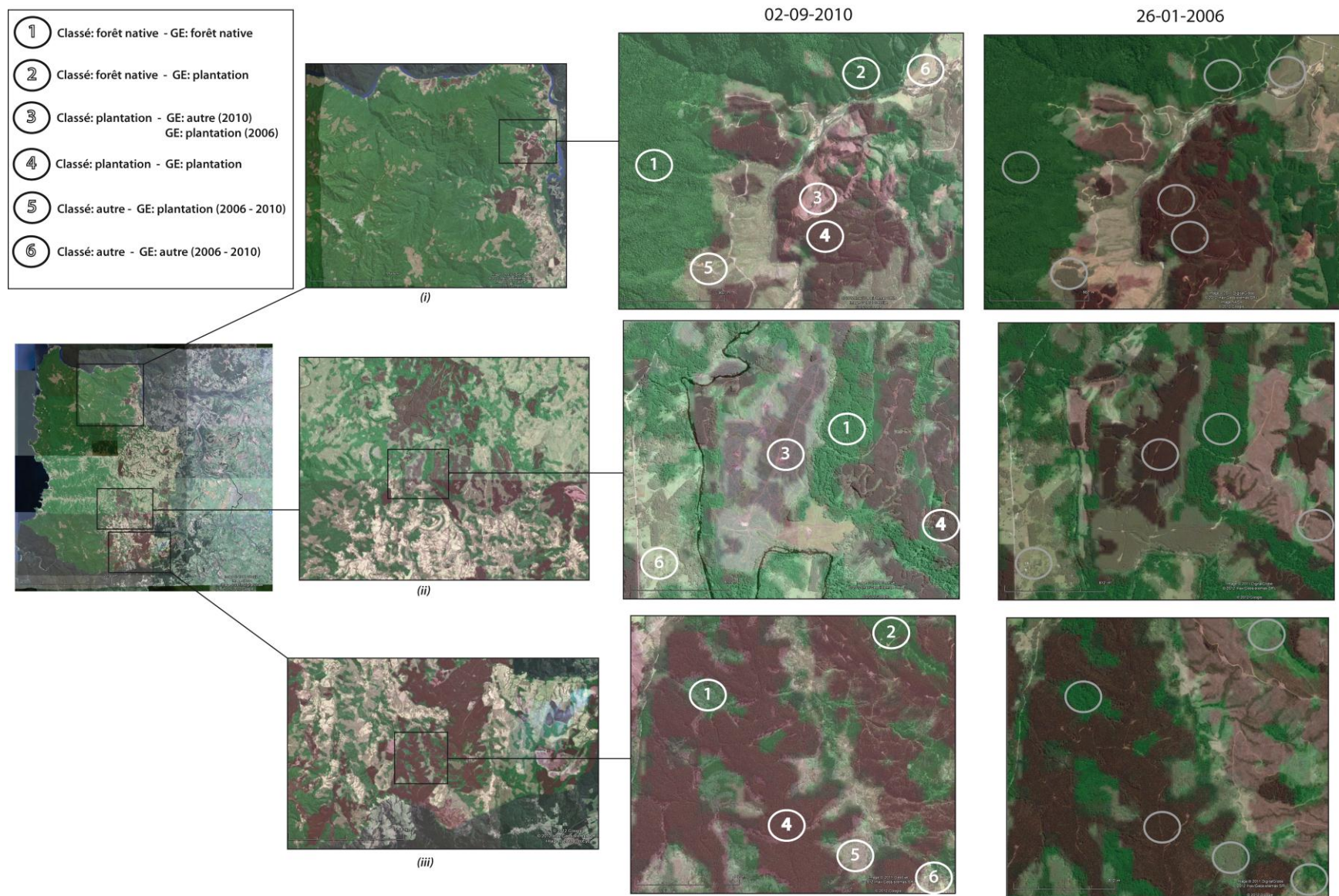


Figure 74 : Comparaison et validation qualitative – Classification 2008 et Google Earth

4.3.2. Analyse et interprétation

4.3.2.1. Distribution spatiale des types d'occupation du sol et quantification par date

La forêt native occupe la majeure partie de la superficie communale avec 110 775,06 ha en 1986 soit 71,71% de la superficie totale (tableau 24). Elle se concentre essentiellement sur la Cordillère de la Côte (à l'ouest) et de manière fragmentée, sur le piémont (à l'est) (Saez, 2002 ; Sánchez Álvarez, 2004). Malgré son extension remarquable, cette forêt a subi de fortes perturbations voyant son aire se réduire à 96 857,84 ha en 2008 - soit une perte de 13% - qui ont été remplacées par d'autres types d'occupation du sol.

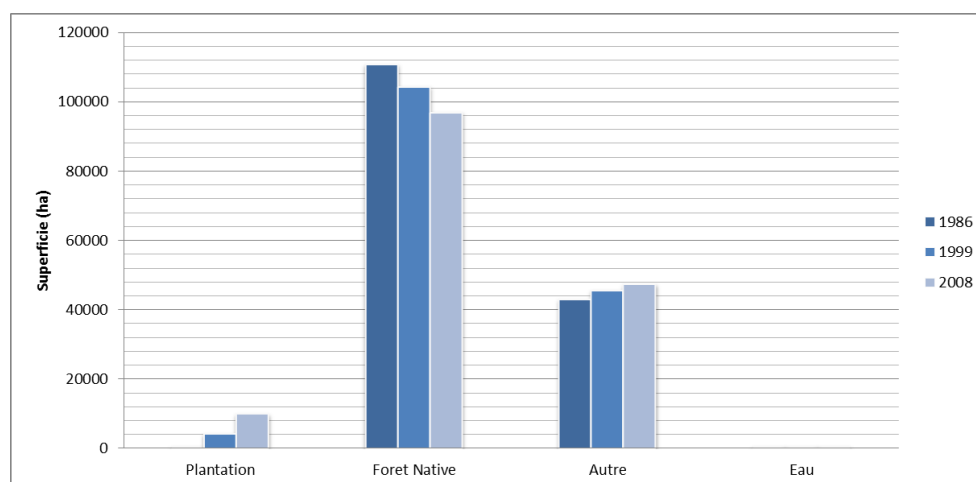
La catégorie « autre » qui comprend les formations de R&M, de prairie et les sols nus, est la deuxième entité en surface. Sa superficie passa de 42 907,41 ha en 1986 à plus de 47 000 ha 22 ans plus tard, soit une augmentation de 10%. Afin de mieux interpréter les dynamiques d'occupation du sol, nous proposons une analyse plus fine de l'évolution de la classe « autre » en étudiant l'évolution des R&M, prairies et sols nus.

Les formations de R&M représentaient en 1986 environ 7% du paysage pour atteindre les 10% 13 ans plus tard. En 2008 sa superficie diminua fortement couvrant près de 8 270 ha (5,35%). Cette variation peut être due à une recolonisation naturelle d'espaces abandonnés qui auraient été par la suite nettoyés afin d'accueillir de nouvelles activités (confère aux trajectoires d'évolutions pour plus de détail). La majorité se situe sur le piémont de la cordillère et quelques zones isolées sur la cordillère.

Contrairement aux R&M, les prairies qui ont connu une légère diminution en 1999, passant de 9 559 ha en 1986 à 9 427 ha, occupent plus de 8% de la commune avec 12 946 ha 9 ans plus tard. Cette formation occupe également la précordillère côtière et de zones peu étendues aux abords de la côte Pacifique, du Río Bueno au nord et la route U-40 menant à l'océan.

Les sols nus représentent la deuxième « formation » dominante avec 22 559 ha en 1986, 20 713,23 en 1999 et 26 982,09 ha en 2008, avec respectivement 14,6%, 13,4% et 17,4% de l'occupation totale. On retrouve des sols nus principalement sur le piémont (prairies sèches, jeunes plantations et coupes rases visuellement identifiables de par leur géométrie caractéristique) et sur la cordillère (zone de coupes d'alerce et prairies rases-sèches).

A défaut d'avoir occupé la plus faible superficie en 1986 avec 387,63 ha, les plantations ont connu la plus forte augmentation entre 1986 et 2008 : 2 451% (9 888,39 ha en 2008). La précordillère est le siège de ces monocultures. Le sud-est de la commune concentre la quasi-totalité de ces plantations, avec des parcelles identifiables dans le nord aux abords du Río Bueno longé par la route U-22, et aux alentours de Bahía Mansa au centre-ouest de San Juan. Les étendues d'eau, localisées à la limite nord (río Bueno) et nord/est (lago Rupanco), représentent 0,26% de la superficie communale (408,7 ha).


Figure 75 : Superficie des types d'occupation du sol en 1986, 1999 et 2008

| Catégorie | 1986 | | 1999 | | 2008 | |
|--------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | (ha) | (%) |
| Plantation | 387.63 | 0.25 | 4 201.02 | 2.72 | 9 888.39 | 6.40 |
| Forêt Native | 110 775.06 | 71.71 | 104 322.6 | 67.53 | 96 857.84 | 62.70 |
| Autre | 42 907.41 | 27.78 | 45 546.48 | 29.48 | 47 323.87 | 30.63 |
| Eau | 408.87 | 0.26 | 408.87 | 0.26 | 408.87 | 0.26 |
| Total | 154 478.97 | 100.00 | 154 478.97 | 100.00 | 154 478.97 | 100.00 |

Tableau 24 : Superficie des types d'occupation du sol en 1986, 1999 et 2008

4.3.2.2. Analyse des dynamiques par les trajectoires d'évolution

Ces trajectoires concernent deux périodes : 1986-1999 et 1999-2008 et sont traitées par des matrices de transitions construites sous le logiciel IDRISI Andes. La date la plus ancienne se retrouve en colonne et la date la plus récente en ligne (tableaux 25 et 26). Ce procédé permet d'analyser plusieurs processus de dynamique d'occupation et d'utilisation du sol, à savoir : les états stationnaires (en diagonale grisée), les pertes et les gains de chacune des catégories d'occupation (les autres cellules), et la provenance des pertes/gains. Quatre transitions se démarquent : (i) Autre vers Forêt Native ($A \rightarrow FN$), (ii) Forêt Native vers Autre ($FN \rightarrow A$), (iii) Forêt Native vers PLantation ($FN \rightarrow PL$), et (iv) Autre vers PLantation ($A \rightarrow PL$).

| | | 1986 | | | | Total |
|------|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | |
| 1999 | Plantation | 387.63 | 1 483.83 | 2 329.56 | 0 | 4 201.02 |
| | Forêt Native | 0 | 96 496.92 | 7 825.68 | 0 | 104 322.60 |
| | Autre | 0 | 12 794.31 | 32 752.17 | 0 | 45 546.48 |
| | Eau | 0 | 0 | 0 | 408.87 | 408.87 |
| | Total | 387.63 | 110 775.06 | 42 907.41 | 408.87 | 154 478.97 |

Tableau 25 : Matrice de confusion entre les classifications de 1986 et 1999 (en hectares)

| | | 1999 | | | | Total |
|------|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | |
| 2008 | Plantation | 4 201.02 | 1 883.61 | 3 803.76 | 0 | 9 888.39 |
| | Forêt Native | 0 | 94 509.47 | 2 348.37 | 0 | 96 857.84 |
| | Autre | 0 | 7 928.52 | 39 394.35 | 0 | 47 323.87 |
| | Eau | 0 | 0 | 0 | 408.87 | 408.87 |
| | Total | 4 201.02 | 104 322.60 | 45 546.48 | 408.87 | 154 478.97 |

Tableau 26 : Matrice de confusion entre les classifications de 1999 et 2008 (en hectares)

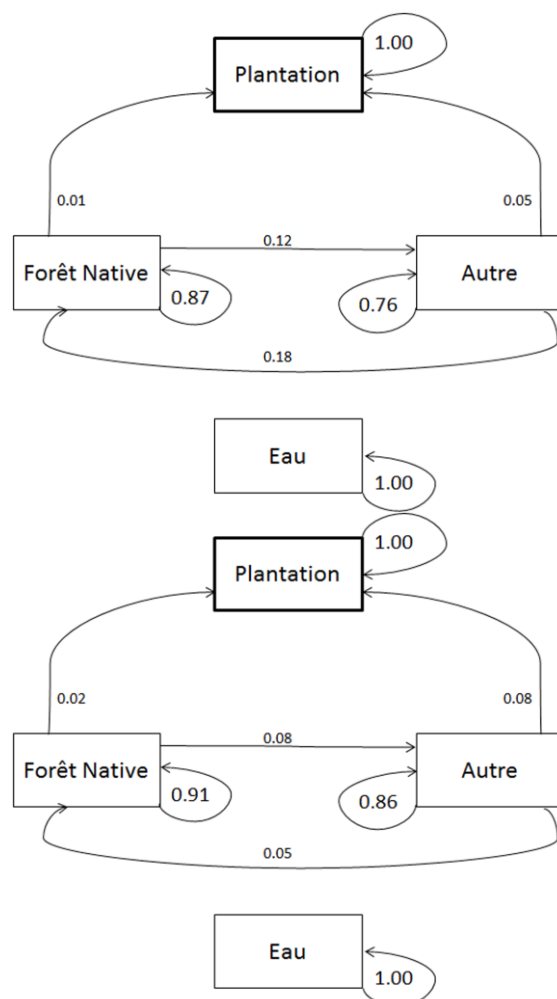


Figure 76 : Trajectoires d'évolution entre 1986-1999 (en haut) et 1999-2008 (en bas) (en pourcentage). Les boucles caractérisent des états stationnaires (avec la part de stabilité) ; les flèches directionnelles traduisent des changements.

a) Dynamique des plantations exotiques

Les deux périodes présentent les mêmes trajectoires d'évolution, seules leurs quantités et leur localisation les différencient. Les plantations industrielles établies restent parfaitement stables (100%) (figure 76), c'est-à-dire qu'aucun type d'occupation ne vient s'y substituer, ce qui n'empêche pas l'introduction de nouvelles plantations. Entre 1986 et 1999, ces dernières se firent au détriment de la forêt native (0,01% soit 1 483 ha) et de la catégorie « autre » (0,05% soit 2 329 ha). La deuxième période montre une accentuation de ce processus de

substitution avec 0,02% (1 883 ha) de forêts natives convertis et 0,08% (3 803 ha) pour la catégorie « autre ». Les changements observés (figure 80, page 188) lors de la 1^{ère} et 2^{ème} période se concentrent à proximité de parcelles existantes en 1986 et en 1999, et principalement dans le sud-est de la commune où la transition A → PL est dominante. On constate enfin un phénomène de substitution indirecte, voyant 985,7 ha de forêts natives présentes en 1986 être remplacées par des plantations après avoir été déboisées en 1999 (figure 77).

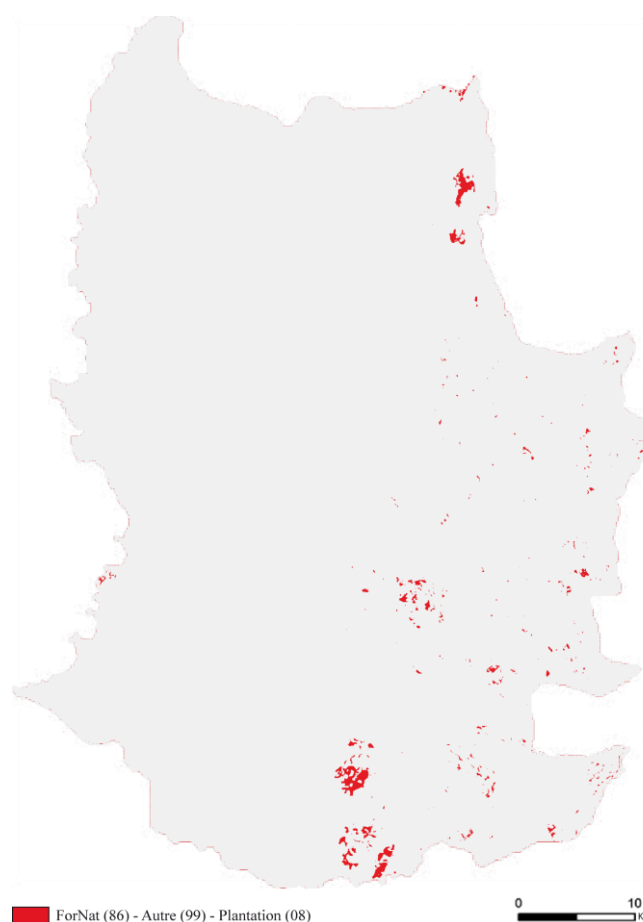


Figure 77 : Substitution indirecte : forêt native en 1986 – autre en 1999 et plantation en 2008

b) Dynamique de la forêt native

Le nord-est voit essentiellement des transitions de FN → PL (période 1), et de FN → A (période 1 et 2). Cette dernière, généralement localisée sur la Cordillère de la Côte, a été très intense lors de la 1^{ère} période avec plus de 12 700 hectares de pertes (soit 12%). Lors de la 2^{ème} période, le processus de déforestation se poursuit essentiellement aux abords du Río Bueno et du Lac Rupanco, et de façon très diffuse sur le piémont et sur la Cordillère. Son intensité diminua remarquablement avec 7 928 ha de pertes (soit 8% et un taux de déforestation de 0,8%/an). Les incendies naturels et anthropiques (Santana, 2004, p.117) couplés à une forte exploitation de l'*alerce* sur les sommets de la Cordillère (Toro Balbotin, 2007) expliquent en grande partie cette dégradation. Malgré tout, il est difficile d'apporter des données quantitatives qui permettraient de corroborer et de valider les trajectoires d'évolution sur l'ensemble de la commune.

L'extraction illégale, c'est-à-dire dépourvue de permis d'exploitation¹⁸⁸, est une activité avérée, conflictuelle et latente. Seule l'INFOR (2008) propose des chiffres relatifs aux montants des exportations d'alerce entre 1997 et 2007 mais uniquement à l'échelle nationale. Néanmoins, quelques études font état de la situation dans la commune de San Juan de la Costa et confirment que l'extraction de cette essence n'est pas un phénomène récent, remontant bien avant 1986, et qu'elle constituait une activité irrationnelle. En effet, « *entre 1950 y 1970 comenzaron a explotarse los alerzales de Maicolpi y Hueyelhue, la apertura del camino Puaucho a Bahía Mansa y la creciente demanda de postes por parte de la empresa eléctrica estatal Endesa en ese entonces provocó la deforestación de extensas áreas en San Juan de la Costa* » (Cardenas *et al.*, 2001, p.51). Les recherches de Roberto Santana (2004) étayent cette situation en rapportant le cas de la communauté Catrihuala qui fit une demande d'autorisation à la CONAF en 1985 « *pour l'extraction de 10 000 pulgadas¹⁸⁹ d'alerce mort (madriers), 10 000 pulgadas de rodrigones (piquets), 20 000 unités de tejuela et 80 000 pulgadas de bois blancs sous différentes formes et dimensions* » (Santana, 2004, p.123). Enfin, le cadastre Alerce, élaboré par la Universidad de Chile (1983), montre que les zones d'alerce brûlé se situaient sur la côte pacifique de la commune. Rada de la Bandera (40°24'50''S - 73°45'18''O) et Bahía Mansa (40°34'58''S - 73°44'19''O) en comptaient respectivement 304 ha et 639 ha (Pizarro et Zolezzi, 2004).

L'extraction de la *leña* est considérée par Nicolas Sáez (1997) comme un facteur de dégradation de la forêt native. L'analyse des flux de cette ressource dendro-énergétique, pour l'année 1993, c'est-à-dire des points d'extraction au point de consommation (les villes) concordent avec la carte de transition (1986-1999). L'étude révèle que ces flux se concentrent essentiellement dans la zone centre (de l'ouest vers Osorno), sud-est et dans une moindre mesure dans le nord-est de la commune (figure 78). Les zones de transition FN → A sont clairement perceptibles et correspondent, dans une certaine mesure, à des points d'extraction de bois de chauffe.

¹⁸⁸ Depuis les années 1960, « *toute vente ou circulation des produits de l'alerce devra s'accompagner d'un permis d'exploitation, d'ailleurs exclusivement valable pour les arbres « morts » (produit des incendies) et accordé à condition de faire valoir un titre de propriété sur les arbres exploités. [...] Toutefois, les ventes « illégales » n'allaient pas pour autant disparaître* » (Santana, 2004, p.122).

¹⁸⁹ 1 *pulgada* = 3,0 m de longueur x 2,5 cm d'épaisseur x 10 cm de largeur.

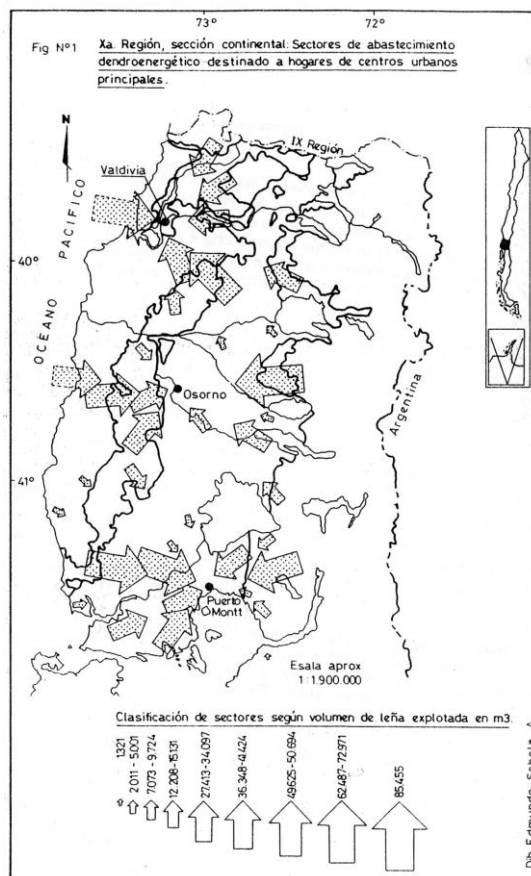


Figure 78 : Distribution des secteurs d'exploitation et volume de leña exploitée. Source : Sáez, 1997

D'après les données incendies de la CONAF¹⁹⁰, les superficies de végétation naturelle arborée affectées par des incendies sont très faibles pour la commune. On compte environ 1942 ha de végétation incendiée entre 1986 et 1999, et seulement 34,6 ha entre 1999 et 2008 (figure 79). A l'échelle de la 10^{ème} Région les incendies affectèrent plus de 73 346 ha entre 1994 et 2008, dont 17 691 ha entre 1999 et 2008 (INFOR, 2008, p.38).

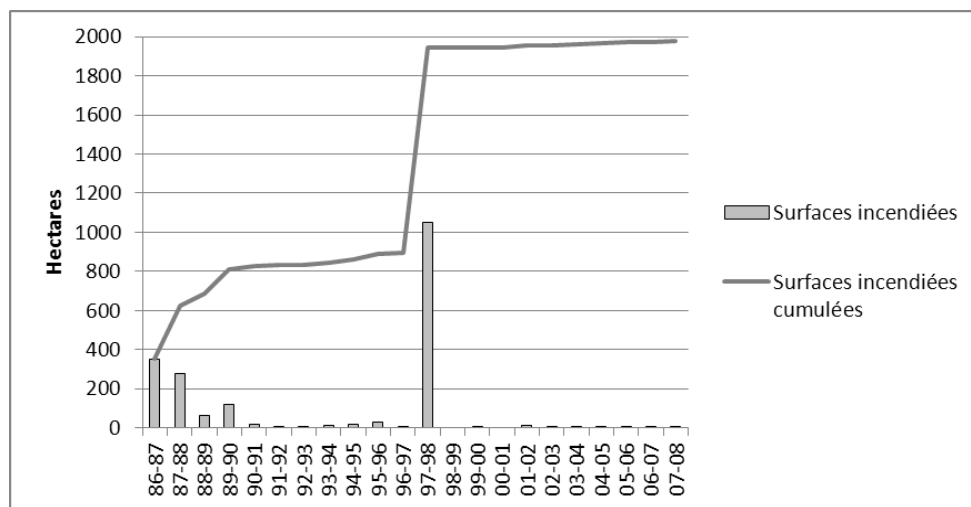


Figure 79 : Superficie de végétation naturelle incendiée dans la commune de San Juan de la Costa (1986-2008)

¹⁹⁰ <http://www.conaf.cl/proteccion/seccion-estadisticas-historicas.html>

c) Dynamique des « autres »

Enfin, la forêt native a recolonisé 7825.7 ha de terres classées en 1986 comme « autre » (A → FN) lors de la 1^{ère} période. Cette progression, fragmentée et diffuse, se localise principalement sur le piémont. Il est probable, en tenant compte des confusions radiométriques, que les patrons spatiaux (en verts), de par leur géométrie et leur contiguïté aux plantations industrielles soient eux aussi des plantations. Entre 1999 et 2008, ces transitions se distribuent sur la Cordillère de la Côte avec quelques fragments sur le piémont.

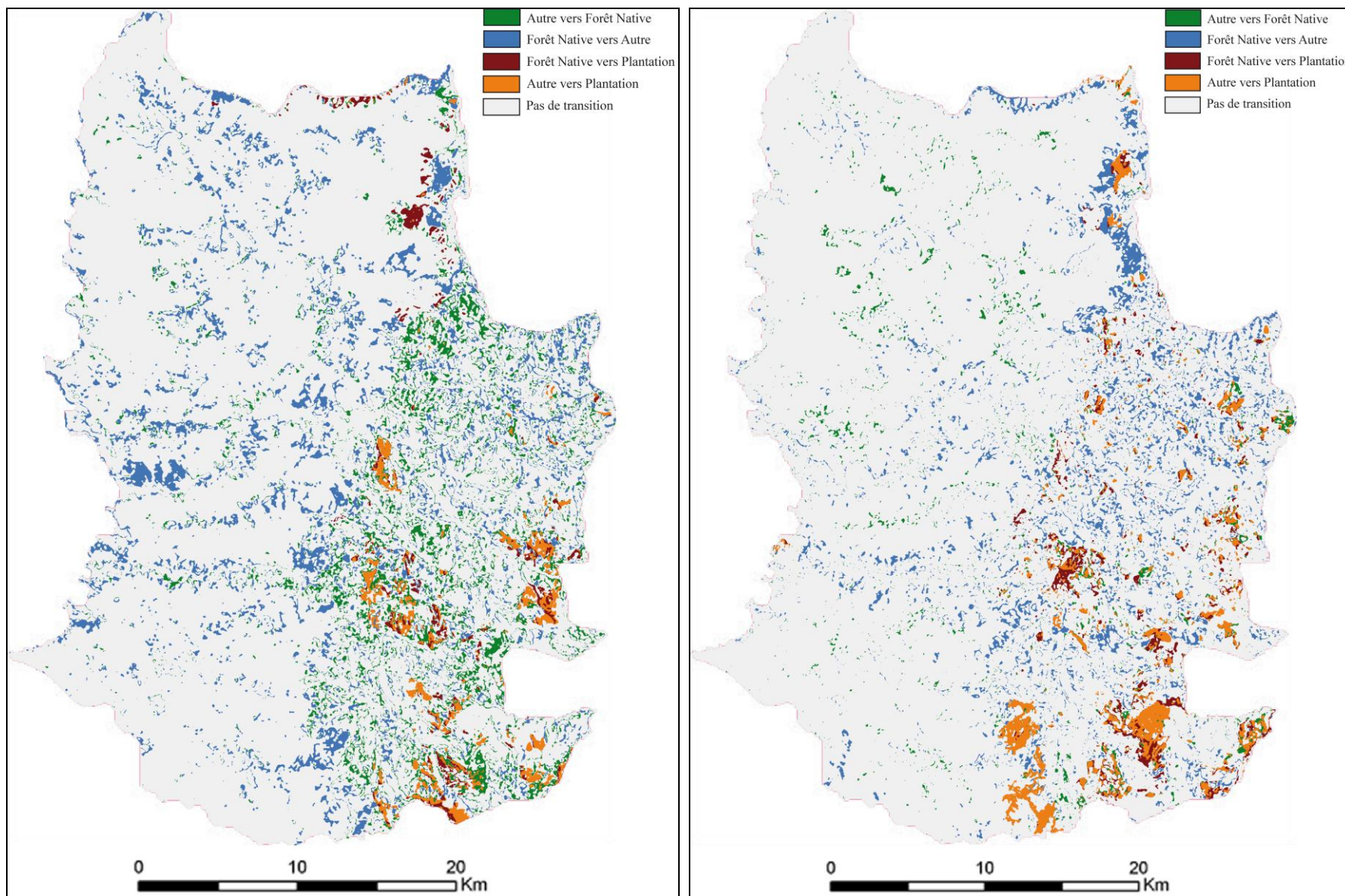


Figure 80 : Principales transitions observées pour les périodes (1986-1999) et (1999-2008)

CONCLUSION

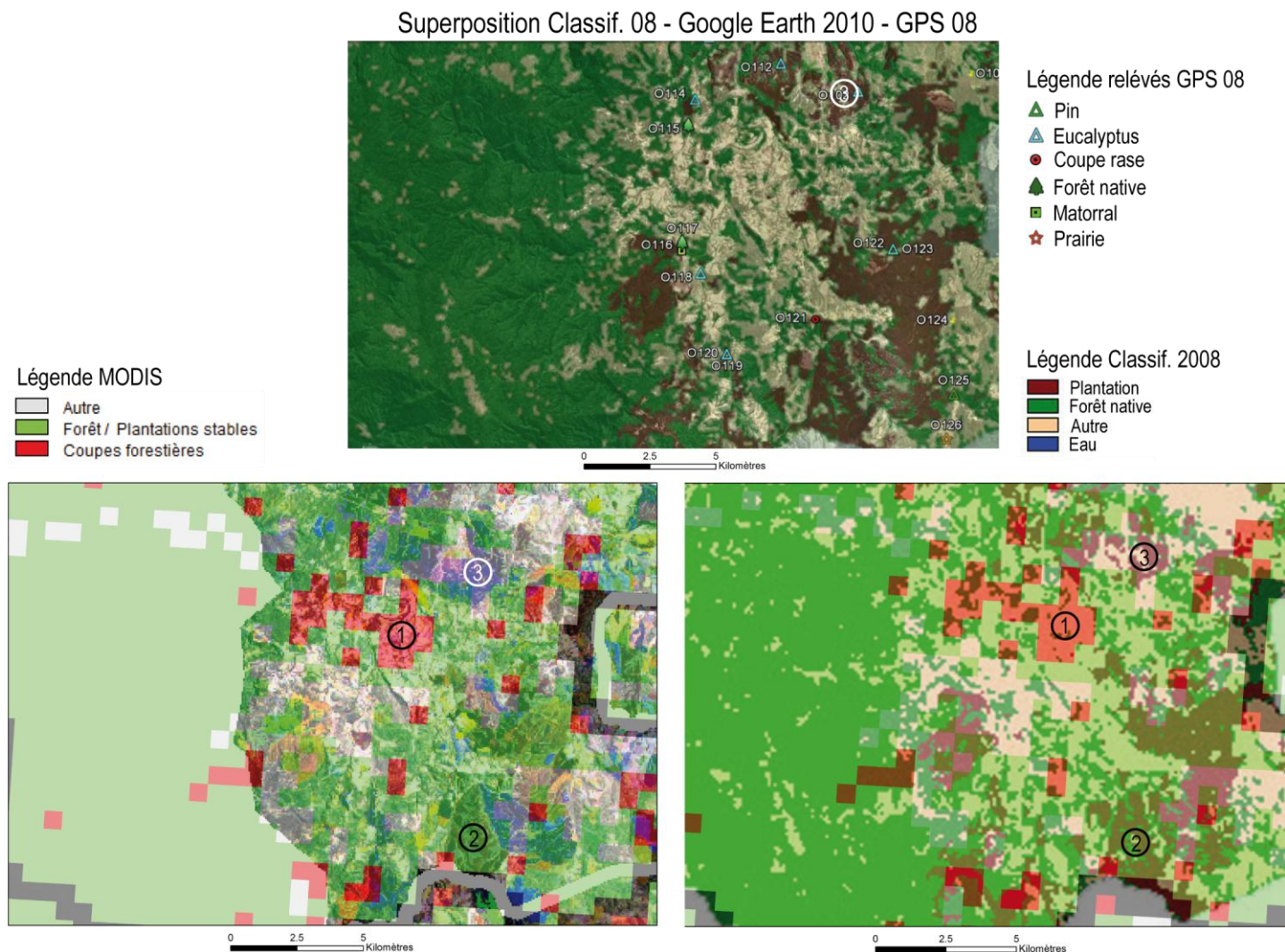
L'approche multi-scalaire, moyennant le recours à l'imagerie satellitale (moyenne et haute résolution), permet de caractériser les évolutions du couvert forestier à l'échelle régionale et sous-régionale et contribue progressivement à l'analyse des trajectoires d'évolution d'occupation du sol à l'échelle communale.

D'un point de vue méthodologique le recours à l'imagerie MODIS s'avère fiable afin de détecter les coupes forestières des forêts/plantations stables. Les résultats obtenus et comparés à d'autres sources cartographiques doivent être nuancés. Martin Paegelow *et al.* (2012) remarquent qu'en « *observant cette correspondance à l'échelle locale, les situations varient de la non-coïncidence évidente à la correspondance quasi-parfaite* ». Cette analyse comparative, effectuée dans le Nord de la 9^{ème} Région, met en évidence de très bonnes correspondances et permet de nous interroger également sur la signification du cadastre forestier de la CONAF. Pour s'assurer de cette fiabilité, une deuxième comparaison est réalisée dans le 10^{ème} Région (figure 81) en croisant cinq sources d'informations cartographiques (MODIS, LANDSAT multidate, la classification de 2008, Google Earth et nos relevés GPS). Le point n°1 représente une coupe forestière détectée par MODIS. Si la classification de 2008 concorde (« autre »), il y a discordance avec les données multidates (déboisé stable entre 1999 et 2008). Le point n°2 montre que les forêts/plantations stables de MODIS se superposent avec la classification (plantation) et le multidate (boisé stable). Enfin, le point n°3 révèle une dernière discordance entre MODIS (autre) – multidate (déboisé en 2008¹⁹¹) – classification (plantation) - Google Earth (plantation) – relevé GPS (eucalyptus). A l'échelle de la 10^{ème} Région les résultats semblent moins concluants qu'au niveau de la 8^{ème} et 9^{ème}, ce qui est probablement imputable à des superficies de plantations nettement inférieures.

La détermination des dynamiques paysagères dans le centre-sud chilien révèle 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.

Dans la commune de San Juan de la Costa leur évolution est remarquable entre 1986 et 2008, mais reste mineure comparée aux observations menées dans la 7^{ème} Région du Maule (Echeverría, 2006) et dans le bassin versant du fleuve Chillán dans la 8^{ème} Région du Bío-Bío (Henriquez Ruiz, 2008). Cependant, la tendance d'évolution est exponentielle et les résultats montrent que la forêt native est continuellement menacée de substitution par les plantations exotiques (directe et/ou indirecte) pour les deux périodes étudiées. Si les causes de dégradation de la forêt native sont connues, il reste désormais à identifier avec précision les facteurs explicatifs de la dynamique des plantations.

¹⁹¹ Rappel : les plantations de 1986 et 1999 sont intégrées à la classification de 2008, d'où la discordance avec le multidate.



Superposition Landsat multodate (99-01-08) - MODIS (2000-2008)

Superposition Classif. 08 - MODIS (2000-2008)

Figure 81 : Superposition des données MODIS (2000-2008) – LANDSAT multodate (99-01-08) – classification, Google Earth et GPS 2008

Note : la zone verte (à l'ouest) sur la superposition LANDSAT-MODIS correspond à un masque géométrique.

CHAPITRE 5 – Identification et hiérarchisation des facteurs de changements

INTRODUCTION

La dynamique des plantations industrielles est la résultante de processus multiformes, opérant à plusieurs échelles. Ces processus sont alimentés par l'interrelation de variables (ou facteurs) de nature économique, sociale, environnementale, technique, politique. « *On distingue habituellement des variables externes (caractérisant l'environnement du système); des variables internes (caractérisant le système étudié stricto sensu)* » (Hatem, 1993, p.240-241). Ce chapitre se focalise sur l'identification des facteurs potentiellement explicatifs de l'expansion des plantations exotiques dans la commune de San Juan de la Costa, en tenant compte des facteurs sociaux, politiques et économiques sous-jacents découlant des sphères supérieures (nationale et internationale). Trois phases rythment ce processus, avec, dans un premier temps, l'identification des variables via des études de cas (**section 1**). Pour y répondre nous procédons à un balayage bibliographique puis à l'analyse du discours des acteurs représentatifs du secteur forestier (**section 2**). Ainsi, Elinor Ostrom remarque que « *listing a variable in this nested taxonomy does not mean that all identified variables are relevant for analyzing any particular research question* » (Ostrom, 2005, p.11). Enfin, dans le cadre de la modélisation prospective, une classification exhaustive des facteurs est recommandée afin d'affiner la compréhension du système étudié et d'optimiser son (ou ses) évolution(-s) future(-s). La méthodologie mise en œuvre requiert des données spatialisables (**section 3**) et exclut *de facto* une part conséquente des variables listées dans les sections précédentes.

5.1. Identification des facteurs via des études de cas

5.1.1. Les processus de déforestation

La caractérisation de la configuration spatiale des processus de déforestation réalisée par Geist et Lambin (2001) apporte une première piste de réflexion ainsi qu'une vision d'ensemble de la problématique. Les auteurs remarquent qu'à l'échelle des causes immédiates, les *cas géométriques* (tel que l'abattage à large échelle) peuvent provenir de l'extraction de bois, de l'expansion des infrastructures, de caractéristiques biophysiques et de divers évènements déclencheurs. A l'échelle des facteurs indirects, la croissance du marché urbain, des cultures commerciales orientées vers l'exportation, la croissance du marché du bois, les politiques *pro-déforestations* (subventions de l'Etat et crédits), la spéculation foncière et le comportement de la population expliquent les processus de déforestation. Ces facteurs influencent indirectement l'expansion des monocultures de pins et d'eucalyptus dans la mesure où la déforestation ouvre des espaces potentiels de boisement.

5.1.2. La dimension géographique

De nombreuses études ont démontré que les caractéristiques géographiques d'un lieu pouvaient expliquer la localisation de plantations exotiques. Tout d'abord, Victor Gerding et

Juan E. Schlatter (1995) ont étudié les variables d'importance pour l'implantation du *Pinus Radiata* au Chili. Parmi ces facteurs on retrouve les variables climatiques (température et précipitations), la nature des sols (composition chimique, drainage, profondeur, teneur en eau). A l'échelle de la 8^{ème} Région, un rapport rédigé par l'Université de Concepción (Universidad de Concepción, 2009) apporte des éléments de compréhension. Il en ressort que leur concentration géographique s'explique fondamentalement par des raisons géographiques, telles que la disponibilité de sols bon marché, la présence de cours d'eau et la proximité aux ports pour l'exportation (cf. chapitre 5).

Enfin, l'orientation est un facteur important pour la 10^{ème} Région. Contrairement à ces voisines du Nord (8^{ème} et 9^{ème}), la région des Lacs connaît des températures basses pendant la saison hivernale. Une étude démontre que sur deux plantations d'eucalyptus situées dans la province d'Osorno, la croissance des arbres est totalement différente (10-12 m³/ha/an contre 32 m³/ha/an), concluant et préconisant ainsi sur une soigneuse sélection du site, particulièrement en privilégiant des versants plus chauds (Geldres et Schlatter, 2004).

5.1.3. La fragmentation de la forêt native

La fragmentation de la forêt native constitue un facteur favorable à l'implantation de formations exotiques notamment à proximité de forêts fragmentées et isolées. L'étude menée par Cristian Echeverria *et al.* (2006, p.489) sur les processus de déforestation et de fragmentation des forêts tempérées dans la 7^{ème} Région du Maule révèle que « *P. radiata industrial plantations largely dominate the neighbouring areas of isolated native forest patches. A similar situation has been reported in New South Wales, Australia, where the establishment of P. radiata commercial plantations has caused the isolation of remnant eucalypt patches [...]. However, the invasions of P. radiata seedlings into the Nothofagus forest fragments in the study area tend to occur in the edges of forest fragments, reaching the interior areas in highly disturbed and open forest fragments (Bustamante et al., 2003) ».*

Des observations similaires ont été faites sur l'île de Chiloé par Juan J. Armesto *et al.* (2005, p.587), en démontrant que « *l'extension de chemins et de zones ouvertes peut faciliter la dispersion et l'établissement d'espèces introduites qui, dans certains cas, peuvent déplacer des espèces autochtones qui remplissent des fonctions écologiques essentielles, tels que les polinisateurs natifs ».*

5.1.4. La capacité d'usage des sols

La capacité d'usage des sols se décline en huit catégories (I à VIII). Elle exprime l'aptitude naturelle que présente un sol pour la production d'une ressource sans risque de dégradation¹⁹². Neil B. Stolpe (s.d.) donne une explication détaillée de chacune des classes (tableau 27). A titre d'exemple la classe I, considérée comme la meilleure, ne dispose

¹⁹² On compte quatre catégories de dégradation exprimée par des symboles :

e = risques d'érosion ou d'érosion passée, phénomènes d'écoulement superficiel, pentes excessives

w = problème de sursaturation du sol, de drainage ou d'inondation

s = contraintes du sol (profondeur, textures extrêmes, salinité, autres)

cl = contraintes climatiques (aridité, gel, neige et vent)

d'aucune limitation et permet ainsi un usage agricole intensif. Les sols de cette classe « *sont quasi plats, profonds, bien drainés, faciles à travailler, avec une haute capacité de rétention d'humidité, leurs fertilité naturelle est bonne, ses rendements sont élevés lorsqu'ils sont gérés de manières adéquates, et permettent une culture très intensive* ». A mesure que le numéro de classe augmente les restrictions d'usages deviennent plus importantes. La classe VII caractérise des sols ayant des contraintes très importantes (pentes très prononcées, érosion passée grave, susceptibilité d'érosion très grave, sols minces et excessivement pierreux) ce qui bannit toute activité agricole mais destine ces sols fondamentalement à un usage sylvicole. La dernière classe (VIII) présente de telles contraintes qu'elle interdit tout type de production (agricole ou sylvicole).

| Classe | Vie sylvestre | Forêt | Prairie | Prairie intensive | Culture limitée | Culture modérée | Culture intensive | Culture très intensive |
|--------|---------------|-------|---------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| I | / | / | = | == | ∞ | ∞∞ | ∞∞∞∞ | ∞∞∞∞∞ |
| II | / | / | = | == | ∞ | ∞∞ | ∞∞∞∞ | |
| III | / | / | = | == | ∞ | ∞∞ | | |
| IV | / | / | = | == | ∞ | | | |
| V | / | / | = | == | | | | |
| VI | / | / | = | | | | | |
| VII | / | / | | | | | | |
| VIII | / | | | | | | | |

Tableau 27 : Utilisation de la terre selon sa capacité d'utilisation. Source : Neal B. Stolpe, s.d.

Roberto Santana (2004, p.136) se référant aux travaux de Fransisco Ibarra (1984) note que « *la classification des terres de la commune selon leur aptitude agricole montre que la plupart des terres ont des contraintes considérables : les classes I et II (les meilleures terres agricoles) sont inexistantes ; les classes III et V, terres libres de risques d'érosion, représentent à peine 9,1% ; la classe IV, terres avec aptitude agricole mais exposées au risque d'érosion, ne représentent que 15,8%, tandis que 75% des terres correspondent aux classes VI et VII, d'aptitude exclusivement forestière* ». La carte d'aptitude des sols (figure 82) dans la commune de San Juan de la Costa met en évidence cinq classes (de III à VII). On note que les sols du Piémont, où se localisent les plantations, sont généralement de catégories VI et, dans une moindre mesure, de catégorie IV.

Les sols situés sur des terrains dont la pente est supérieure à 15% sont considérés comme fragiles à cause de leur sensibilité à l'érosion. Cette fragilité va être déterminante lors de la qualification des terres destinées à la bonification attribuée par la CONAF. En deçà de 15% la bonification n'est pas allouée (sauf pour les petits propriétaires), car ces terres sont d'aptitude agricole, mais cela n'écarte pas la possibilité de boisement. En effet, les entreprises forestières sont les seules à pouvoir acheter ou à louer ces terres à des moyens propriétaires à cause de leur haute valeur foncière. La valeur moyenne d'un hectare de terre est de 2 millions de pesos chileno, soit 3 000€ (Alexandro Escobar, CONAF, entretien 2011).

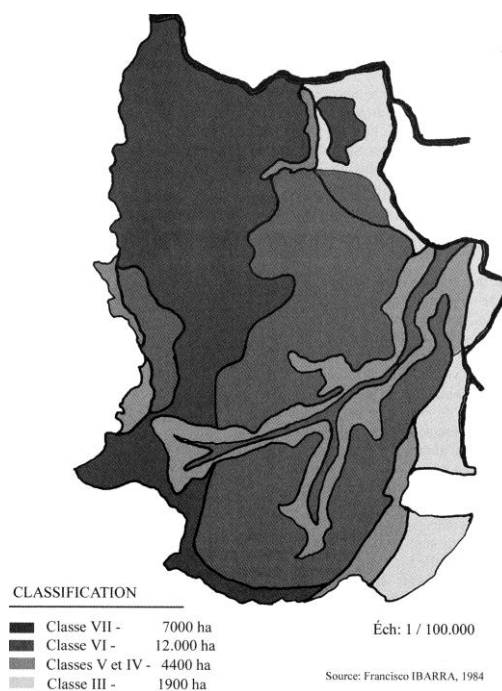


Figure 82 : Aptitude des sols dans la commune de San Juan de la Costa.
Source : Ibarra, 1984, in : Santana, 2004

5.2. Identification des facteurs : entretiens participatifs et analyse systémique

La méthode des entretiens participatifs a permis d'établir une liste exhaustive de facteurs susceptibles d'expliquer l'expansion des plantations exotiques à l'échelle du pays mais plus spécifiquement dans la commune de San Juan de la Costa. Le tableau 29 (pages 203-205) propose un inventaire de l'ensemble des facteurs évoqués par les experts et acteurs du secteur forestier. Chaque facteur identifié fait l'objet de recherches complémentaires afin d'estimer sa part pour chacune des deux périodes 1986-1999 et 1999-2008. Leur hiérarchisation suit une échelle simplifiée à trois niveaux : (i) très important **TRI**, (ii) important **IMP** et (iii) peu important **PIM**. Les deux périodes ne sont pas traitées séparément, c'est-à-dire que les facteurs sont hiérarchisés pour la période totale (1986-2008). L'interaction des facteurs entre eux est synthétisée par une représentation systémique (figure 83, page 196 et figure 86, page 202).

5.2.1. La période 1986-1999

5.2.1.1. Le DL 701 (1974)

Bien que le D.L.701 de 1974 soit considéré comme un élément mineur comparativement au facteur économique (moyens de subsistance ou bénéfiques), sa promulgation a été un moteur du développement du secteur forestier, notamment par le système des bonifications (cf. chapitre 1). L'évaluation de l'impact du Programme de Bonification Forestière via des études économétriques révèle que la bonification n'a pas eu d'impact significatif sur la superficie de boisement entre 1974 et 1997 (Valdebenito Rebolledo, 2010). A l'échelle nationale, l'incitation au boisement concerna essentiellement les entreprises mais aussi les grands propriétaires. Ce constat s'observe également à l'échelle

de San Juan de la Costa. Entre 1986 et 1999, 72,5% des transitions observées en direction des plantations se localisaient sur des terres appartenant à des entreprises forestières et/ou agricoles, 19,5% sur des grandes propriétés, 5,5% sur des moyennes et enfin 2,5% sur des petites exploitations. Cette répartition traduit les effets du D.L.701 qui favorisa les grandes entreprises forestières au détriment des moyens et petits propriétaires.

Si dans l'analyse des données le petit propriétaire dispose d'un titre de propriété reconnu par l'Etat, nombreux sont ceux n'ayant pas « assaini » leur terre. La loi n° 2.695 de juillet 1979 intitulée « *Fija reglas para regularizar la posesión de la pequeña propiedad raíz y para la constitución del dominio sobre ella* » a pour objectif de régulariser la situation de petits propriétaires n'ayant pas de titres afin que ces derniers puissent élaborer des plans de développement (*plan de manejo* par exemple) et d'assistance technique ou de crédit.

5.2.1.2. La faible attractivité de la forêt native

Le développement des monocultures s'explique indirectement par la faible attractivité de la forêt native en tant que ressource commercialisable. Les raisons de ce désintérêt se trouvent, entre autres, dans des coûts de production élevés liés aux accès difficiles, pénalisant aussi les coûts d'abattage et de transport. Les coûts de boisement élaborés par la CONAF peuvent varier du simple au double : 123 803 pesos pour 1 250 plants exotiques contre 238 442 pesos pour des plants natifs (tableau 28, page 199). Au rapport de productivité inégale entre forêt native et plantation exotique, s'ajoute la méconnaissance du marché quant aux forêts natives. « *En l'absence d'incitations, la forêt n'est pas gérée, et dans de nombreux cas, est considérée comme une « nuisance » par les propriétaires* » (Cruz, Schmidt, 2007). Dans ce sens, un rapport de l'Organisation Internationale du Travail (BIT, 2001) ajoute que l'expansion des monocultures combinée à un marché concurrentiel rend peu rentable l'aménagement des forêts naturelles et secondaires¹⁹³.

5.2.1.3. Le coût du foncier

La non-rentabilité des petites propriétés combinée à l'absence d'instrument de l'Etat, permettant l'amélioration des moyens de production, provoqua l'abandon et la vente de nombreuses terres et la migration (rural-urbain) de leurs propriétaires. Roberto Santana (2004, p.140) considère que ce dépeuplement de la précordillère est la conséquence de l'arrivée de la Forestal Valdivia et Forestal Anchile dans les années 80-90, par la création d'un marché foncier hyper tonique. « *L'arrivée de cette nouvelle firme (Anchile) a fait monter très vite le prix de la terre qui a été multiplié par dix sur une douzaine d'années. [...]. Ainsi, le peuplement des terres avec des espèces exotiques s'accompagne d'un dépeuplement démographique de la pré-cordillère et d'un monopole quasi exclusif des terres à vocation forestière dans les mains des deux grandes firmes, les prix qu'elles pratiquent excluant de la*

¹⁹³ La ressource forestière native n'est pas pour autant mise hors-circuit. La consommation de bois de chauffe issue des forêts natives reste une habitude des ménages urbains. « *Hay un factor cultural que involucran a los no Mapuche. La gente no se acostumbra a utilizar pino o eucalipto para calefaccionarse. Prefieren el bosque nativo porque da más caloría. [...] Hay que traspasar la responsabilidad no solamente de la gente que corta el bosque sino que la usa* » (Bernardo Antriao, CONADI, entretien 2010).

concurrence tout petit ou moyen entrepreneur forestier ». Cette situation se combine au statut « d’illégalité » des terres indigènes. Leur non-régularisation permet aux entreprises de racheter des terres à l’Etat chilien (propriété fiscale) ce qui engendra de nombreux conflits et une situation d’extrême pauvreté. Enfin, Helmut J. Geist et Eric F. Lambin (2001, p.73) notent que la pauvreté « *in combination with other factors, has been reported as an underlying social process of deforestation in 64 out of 152 (or 42% of all) cases. It was specified in terms of several demographic, economic, technological and policy/institutional factors (resource-poor farming, survival economies, insufficient food production, chronic food deficits, displacement, limited amount of land, growing land scarcity, landlessness, land division and creation of poor landholdings, low living standard, joblessness, extremely low income levels, social deprivation, marginalization, low empowerment of local user groups)* ».

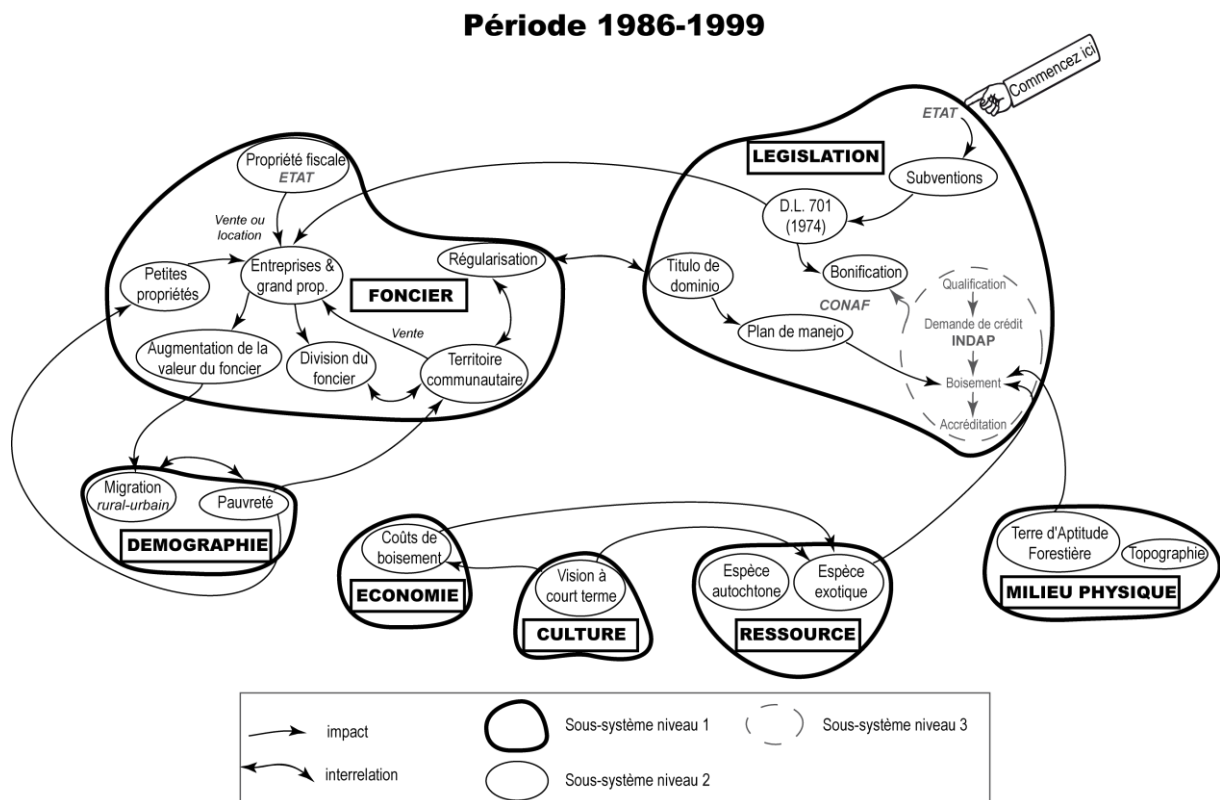


Figure 83 : Représentation systémique pour la période 1986-1999

5.2.2. La période 1999-2008

5.2.2.1. L’actualisation du DL 701

Afin d’intégrer les petits propriétaires dans le processus de bonification, la Ley 19.561, qui modifie et prolonge le D.L. 701 pour une période de 15 ans (1996-2011), fut promulguée en avril 1998. Les premières évaluations présentées par Gerardo Valdebenito (2010) montrent que la nouvelle loi tend à reproduire le schéma antérieur avec une utilisation importante des subventions par les grandes entreprises, se traduisant par une augmentation du patrimoine forestier. Or à l’échelle communale, on remarque que les plantations progressent chez les moyens (+ 7,5 points) et petits propriétaires (+ 3,5 points) et diminuent chez les

entreprises (- 8 points). Son application engendra la bonification de 181 000 hectares à l'échelle nationale dont 40% correspondant à des superficies boisées par des petits propriétaires (CONAF, 2010, consulta indígena). Ceci s'explique également par la mise en place de mécanismes de financement découlant directement de ce décret, et conçu spécifiquement pour les petits propriétaires. Les principaux sont :

- (i) Le crédito de enlace forestal de l'INDAP (INstituto de Desarrollo AgroPecuario) qui est un crédit opérationnel depuis 1998 permettant de financer les coûts des premiers élagages et éclaircies¹⁹⁴ ;
- (ii) La caución solidaria CORFO (CORporacion de Fomento de la Producción) permet au propriétaire d'emprunter à une banque privée avec une garantie de 60% de son montant après avoir obtenu un Certificat de Future Bonification. Opérationnel depuis 1999, cette méthode est aussi un moyen de rassurer les banques et de faciliter les crédits¹⁹⁵ ;
- (iii) La "securitización" forestal (2000) requiert la participation d'une entreprise privée qui se charge de financer le reboisement, en passant un accord avec les propriétaires par le biais de contrats d'usufruits (CONAF, 2005). Alexandro Escobar explique que le système de *leasing* (affermage) est utilisé par les entreprises forestières pour la première rotation, soit une dizaine d'années. Lors de la seconde rotation, il arrive qu'elles puissent négocier le prix de la terre à cause de son appauvrissement;
- (iv) Le programme "Empresas forestales-pequeños agricultores" voit aussi l'intervention d'une entreprise privée. Mais au lieu d'avoir l'usufruit de la terre, l'entreprise passe des accords de soutien et de transfert avec le propriétaire (Leyton, 2009, p.12-13). La Forestal Mininco, avec le soutien de la CONAF, s'apercevant que la plupart de ces petits propriétaires n'avaient pas accès au crédit et à la technologie adéquate à la préparation des sols et au choix des plants, a lancé en 2009 le « *Programa de Inversión Forestal* » avec comme objectif 36 000 hectares de plantations forestières (CONAF, 2009). Le petit propriétaire perçoit tous les avantages, Mininco apportant ses connaissances ainsi que ses prédispositions à intégrer un produit sur le marché. Les provinces concernées par ce programme sont, dans la Région du Bío-Bío, les provinces de Ñuble, Bío-Bío et Arauco (3 provinces sur 4); dans la Région de La Araucanía, les provinces de Malleco et Cautín (2/2) ; dans la Région de Los Ríos, les provinces de Valdivia et Ranco (2/2); et dans la Région de Los Lagos, la province d'Osorno (1/4).
- (v) La gestión subsidiaria participativa s'adresse aux propriétaires possédant moins de 5 hectares, et étant intéressés par le boisement de leur parcelle. Le soutien financier et technique s'applique à des zones d'extrême pauvreté et aux communautés indigènes n'ayant pas régularisé leurs terres.

¹⁹⁴ http://www.indap.gob.cl/Programasdeindap/disp_programas.aspx?ids=44

¹⁹⁵ <http://www.gestionforestal.cl:81/pfnm/politicayfomento/foyfi/fyf1/txt/02.03.htm>

- (vi) Enfin, le Programa de recuperación de suelos SAG-INDAP fournit une aide pouvant varier entre 50 et 80% des coûts nets associés aux revenus, aux travaux et aux conseils techniques.

5.2.2.2. L'assurance forestière

Directement reliée aux crédits susmentionnés, elle se destine à l'établissement de plantations forestières, dans le cadre du D.L. 701, et s'adresse essentiellement aux petits et moyens propriétaires. Cette assurance permettrait, selon Aseguradora Magallanes (CONAF, 2009), de faire un investissement par le biais d'un prêt, et de réduire le risque de non établis face à des phénomènes météorologiques et des incendies de forêt, ce qui signifie ne pas recevoir de bonification forestière et d'avoir à renégocier le crédit. Cette proposition a été appuyée par le Movimiento Unitario Campesino y Etnias de Chile (MUCECH), déclarant que cette assurance poussera les petits propriétaires chiliens, cumulant près de deux millions d'hectares, à planter.

5.2.2.3. Les impôts fonciers

Lors de la qualification d'un terrain destiné à une plantation, un propriétaire peut réduire l'impôt foncier, uniquement pour la première rotation, au Servicio de Impuesto Interno (<http://www.sii.cl>). Le petit propriétaire, contrairement aux moyens, grands propriétaires et entreprises forestières, est exempté d'impôt territorial, mais paie l'impôt à la consommation (tels que le combustible) et l'impôt à la valeur ajoutée (Alexandro Escobar, CONAF, entretien 2011). Cet impôt est régi par la Loi 17.235 sur l'Impôt Territorial du 16 décembre 1998 (actualisée au 31 juillet 2010) et s'applique, comme le définit l'Article 1° - Titre 1, aux Biens Immeubles (*Bienes Raíces*) qui se déclinent en Biens Immeubles Agricoles et en Biens Immeubles Non Agricoles.

Les Biens Immeubles Agricoles regroupent (Titulo 1 – Art.1°- A): *todo predio, cualquiera que sea su ubicación, cuyo terreno esté destinado preferentemente a la producción agropecuaria o forestal, o que económicamente sea susceptible de dichas producciones en forma predominante.*

Les Biens Immeubles Non Agricoles regroupent (Titulo 1 – Art.1°- B): *todos los bienes raíces no incluidos en la Serie anterior, con excepción de las minas, de las maquinarias e instalaciones, aun cuando ellas estén adheridas, a menos que se trate de instalaciones propias de un edificio, tales como ascensores, calefacción, etc.*

Alexandro Escobar (CONAF, entretien 2011) insiste sur l'importance de la charge ou pression tributaire de chaque propriétaire terrien. Cette charge correspond à la relation qui existe entre l'impôt de rente que paie le contribuable et le total des revenus nets perçus. On distingue deux types de rentes au Chili et dans la commune de San Juan de la Costa à savoir (i) la rente effective qui est déterminée par preuves directes, et (ii) la rente présumée. Cette dernière est ainsi qualifiée car la loi présume le montant de la rente pour la calculer. Cette présomption est une présomption de droit ou simplement juridique. Nous renvoyons le

lecteur vers l'étude de Maria José Navarro Mella afin d'obtenir une explication détaillée de ce processus¹⁹⁶.

5.2.2.4. Les coûts de boisement

Le D.L.701, par les coûts de boisement, et de gestion (éclaircie et élagage¹⁹⁷), publiés par la CONAF, joue incontestablement un rôle sur la dynamique des plantations exotiques. L'analyse des coûts et de leurs évolutions entre 1995 et 2010 permet d'expliquer l'orientation de chaque propriétaire quant au choix de l'espèce. Tout d'abord on constate que les coûts au boisement sont inférieurs pour les plantations exotiques comparés à ceux attribués aux forêts natives, et ceci indépendamment des régions et du nombre de plants par hectare (tableau 28). Cependant, l'écart en pourcentage entre le coût de 1 250 plants en espèces natives par hectare et son équivalent en espèces exotiques diminue significativement entre 1995 et 2010. En effet, en 1995, un écart de 114 639\$ chilien (164,20€) représentait 93%. En 2000, un écart de 122 753\$ chilien (175,82€) représentait 71%. 158 525\$ de différence en 2005 représentait 54%, alors qu'en 2010 un écart de 167 154\$ ne représentait plus que 42%. A ce rythme, dans quelques années, l'écart entre les coûts de boisement en espèces natives et exotiques sera négligeable.

| 9, 14 et 10 ^{ème} Région sauf province de Palena | Coût en pesos chilien (1 € ≈ 698,1 CLP) | | | | | | | | |
|---|---|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|------------------------|
| Année | 1995 | | 2000 | | 2005 | | 2010 | | Evolution 1995-2010 |
| Espèce native (CEP ¹⁹⁸) | 238 442 | 341,52 | 296 793 | 425,10 | 429 948 | 615,83 | 570 749 | 817,50 | 139.37 |
| Espèce exotique (CEP) | 123 803 | 177,32 | 174 040 | 249,28 | 271 423 | 388,76 | 403 295 | 577,65 | 225.76 |
| Ecart exotique – native (%) | 93 | | 71 | | 54 | | 42 | | |

Tableau 28 : Coût du boisement entre 1995 et 2010

Malgré tout, si l'écart des coûts entre types de plantation diminue, les coûts absolus ne cessent d'augmenter, tant pour les forêts natives (+ 139,37%) que pour les espèces exotiques (+ 225,76%).

L'évolution des prix impacte fortement les petits propriétaires même si la bonification peut s'élever jusqu'à 90% des coûts de boisement. La bonification n'est effectivement valable

¹⁹⁶ <http://www.scribd.com/doc/54216679/20/Renta-Efectiva>

¹⁹⁷ Premier élagage: \$ 53332/ha (76,15€) (sauf *Eucalyptus globulus*). Première éclaircie : \$ 30 222/ha (43,15€) (données CONAF, 2010). S'ajoute les frais d'assistance technique (ingénieur forestier) pour les petits propriétaires.

¹⁹⁸ CEP (con cepollon) : correspond aux plants produits dans des poches ou des pots et qui se plantent avec les racines couvertes avec une dose de terre (valable jusqu'en 2009). L'appellation CEP a été remplacée par RC (racine couverte), qui correspond aux plants qui sont produits dans des contenus de type quelconque.

RD (racine nue): correspond aux plants qui sont produits dans des « plantabandas » et qui se plantent avec les racines découvertes.

que pour un boisement et une seule rotation. La loi ne prévoit pas de bonification pour le reboisement d'une parcelle, et oblige le propriétaire à replanter à la suite d'une coupe¹⁹⁹. Ainsi, après avoir perçu sa bonification, un petit propriétaire devra gérer sa parcelle de sorte à pouvoir générer des bénéfices lui permettant de couvrir les frais de reboisement de sa parcelle.

5.2.2.5. Le rachat des terres

La logique de rachat et/ou location de petites et moyennes propriétés par des entreprises forestières est un facteur déterminant sur les dynamiques futures de plantations industrielles. D'après le responsable sylvicole à la Forestal Anchile (entretien, 2010), le rachat de petites propriétés ne devient plus rentable pour les entreprises, ces dernières préférant louer ou acheter des terres de grandes superficies. En effet et d'après ses propos, « [...] hoy día las empresas no compran en San Juan de la Costa, primero porque no hay propiedad grande. Son todas de 15-20 hectáreas. En segundo lugar existe varios sectores indígenas donde es complicado [...] ». Cependant la carte des propriétés de 1999 (numérisée) ne corrobore pas les propos susmentionnés. Bien que les petites propriétés comprises entre 0 et 20 hectares totalisent 7 430 ha (880 propriétés), les moyennes et grandes propriétés atteignent les 16 680 ha (294 propriétés), donnant un potentiel de boisement considérable aux entreprises. De plus, l'analyse des rachats effectués dans la commune entre 1999 et 2011 (SII, 2011) nous montre que les entreprises s'intéressent aux petites propriétés. La Forestal Valdivia, qui administrait 36 parcelles en 1999, en totalise actuellement 128. Sur ce total, la Forestal racheta treize petites propriétés pour un total cumulé de 171 ha (dont certaines de 8 ha), s'ajoutant à cela 450 ha de moyennes propriétés et 813 ha de grandes (figures 84 et 85). Les 65 parcelles restantes sont issues de processus de subdivision qui engendra la création de nouvelles parcelles. Il nous est impossible de connaître leur superficie ni même de savoir la taille des parcelles subdivisées, à moins de disposer de données digitalisées et actualisées. La Forestal Anchile administrait quant à elle dix parcelles en 1999, et racheta quatre nouveaux terrains, dont un de 79,2 ha. Enfin, de nouvelles sociétés se sont implantées dans la commune en l'espace de 12 ans telles que la Forestal Tornagaleones, filiale de la société Masisa S.A. (trois parcelles), la Sociedad Minera y Forestal Alianza Ltda., spécialisée dans l'équipement et le transport forestier (2 parcelles), et la Forestal Probosque, propriété de l'entreprise FORESA, qui racheta une parcelle dans le secteur de Loma de la Piedra (40°39'S – 73°31'O) (IMO, 2006).

¹⁹⁹ Le propriétaire a la liberté de favoriser la régénération naturelle.

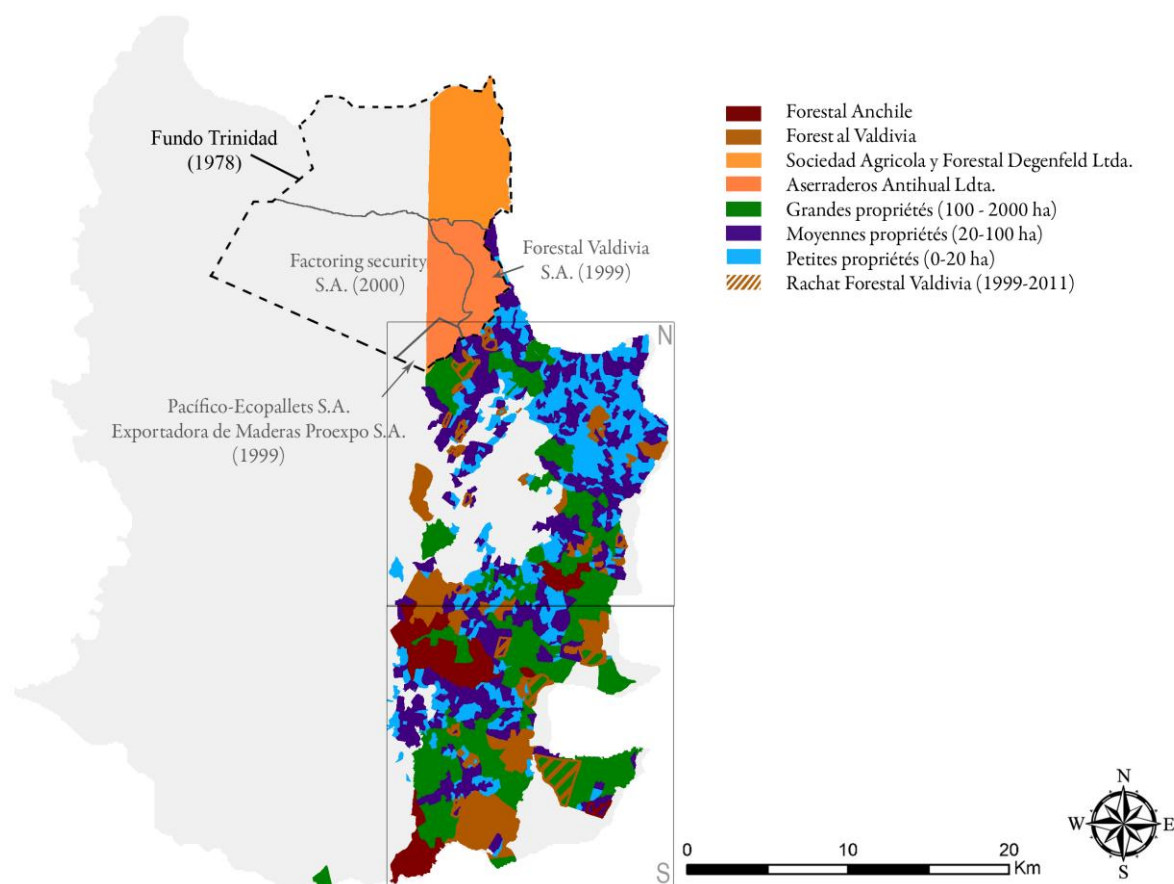


Figure 84 : Propriétés et rachats de la Forestal Valdivia entre 1999 et 2011²⁰⁰

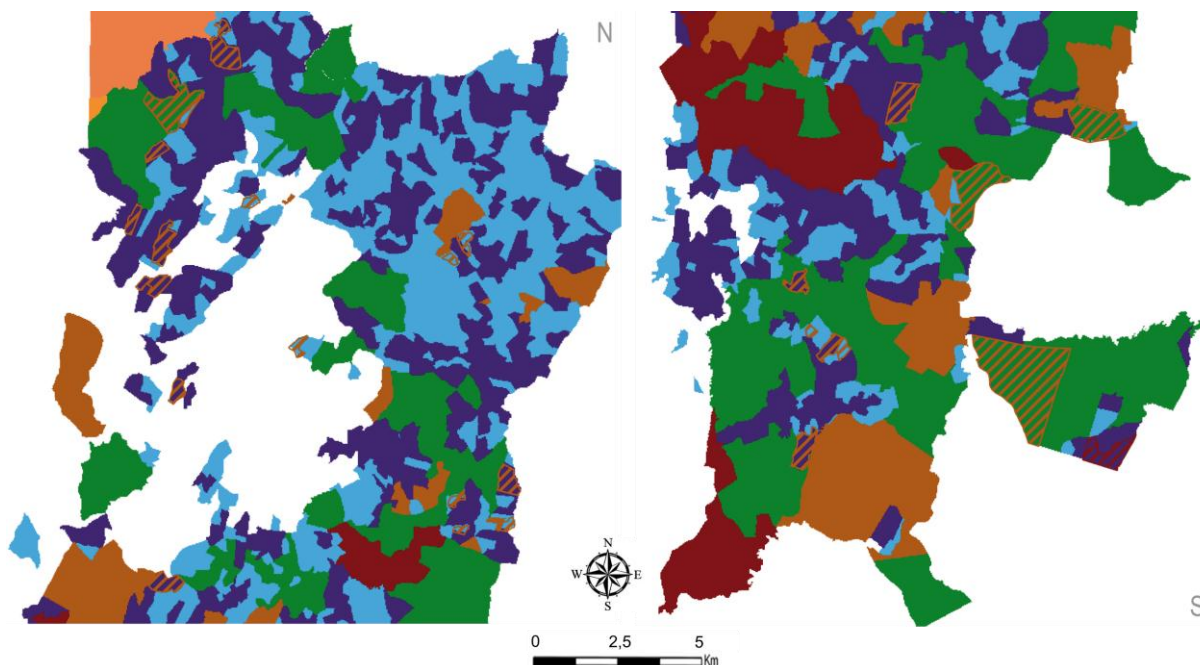


Figure 85 : Zoom sur les propriétés et les rachats de la Forestal Valdivia entre 1999 et 2011

²⁰⁰ Les limites réelles de la Sociedad Agricola y Forestal Degenfeld Ltda et Aserraderos Antihual vont bien au-delà des limites fournies par nos données. La note (page 202) détaille les processus de rachat du Fundo Trinidad entre 1978 et 1996.

Période 1999-2008

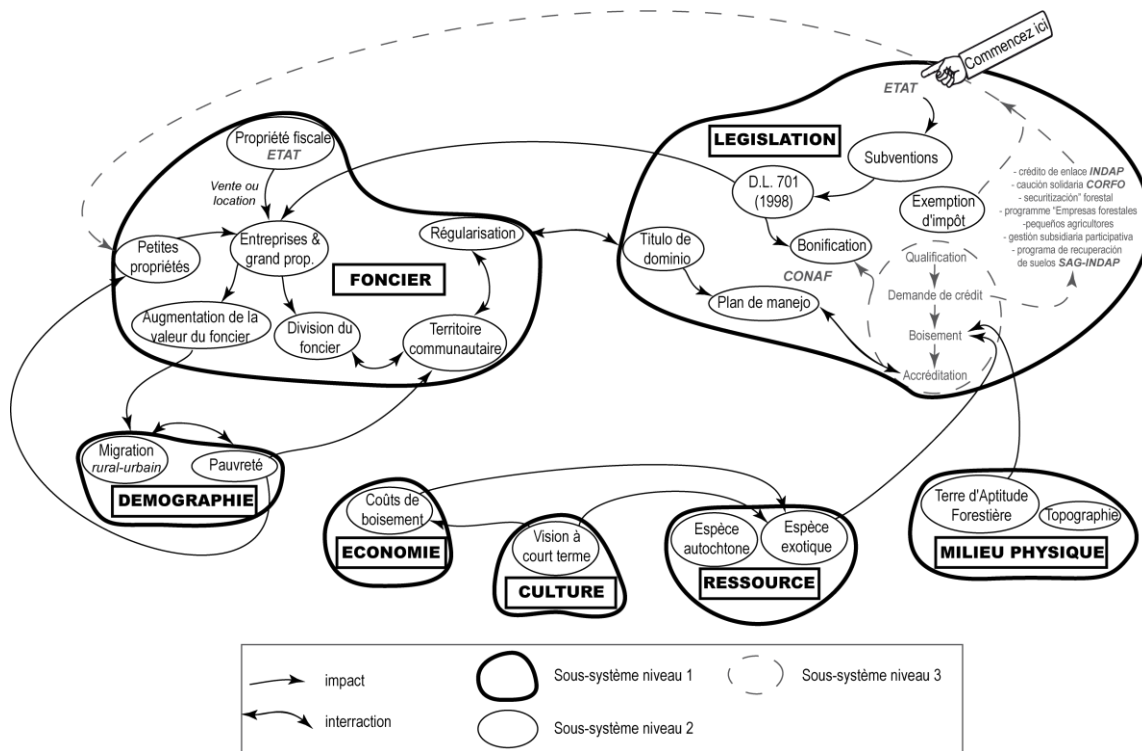


Figure 86 : Représentation systémique pour la période 1999-2008

-NOTE SUR LE FACTEUR FONCIER-

A l’instar de la tendance nationale, on remarque que les plantations industrielles se localisent à l’intérieur de grandes propriétés terriennes et de grandes entreprises. Les données cadastrales utilisées datent de 1999 et ne traduisent pas les multiples achats et ventes qui se sont effectués durant les années 1990. Les limites des deux propriétés situées au nord-est de la commune (Forestal Degenfeld et Aserraderos Antihual – figures 84 et 85) faisaient partie du Fundo Trinidad qui appartenait à Gottfield von Degenfeld Schoburg jusqu’en 1983. En 1984 la propriété devint la Sociedad Agricola y Forestal Degenfeld Ltda (FSC, Degenfeld, 2003). En 1989 le Fundo fut divisé en deux *Lote*. Le *Lote A* demeurant l’Hacienda Trinidad (avec le même propriétaire), alors que *Lote B* (13 000 ha) devint le Fundo San Nicolas et fut vendu à Forestal Anchile Ltda. Ce dernier est acheté en 1995 par l’entreprise Aserraderos Antihual Ltda. et est subdivisée en 1996²⁰¹. Aujourd’hui le Fundo Trinidad reste la propriété de Gottfield von Degenfeld Schoburg. Le *Lote 1* de San Nicolas appartient à Factoring Security S.A.²⁰², le *Lote 2-sud* à Pacífico-Ecopallets S.A.²⁰³ y Exportadora de Maderas Proexpo S.A.²⁰⁴ et le *Lote 2-nord* à Forestal Valdivia S.A. (Sáez Varas, 2006).

Poblete (2003 in : Sáez Varas, 2006) explique que ces propriétaires, tel que la Factoring Security S.A., sont pour la plupart absents, et utilisent leurs terres en tant qu’hypothèques afin d’obtenir des crédits bancaires. Bernardo Antriao (CONADI) déclare que cet « absentéisme » n’est pas exclusif aux grands propriétaires mais touche aussi les particuliers (moyens propriétaires): “*Toda la costa de la provincia de Osorno es reclamado como territorio Huilliche, al interior hay particulares que tienen propiedad pero particulares que no viven allí, tampoco explotan, y cuyo título son cuestionables*” (Bernardo Antriao, entretien, 2010).

²⁰¹ Nos données cadastrales correspondent à cette période.

²⁰² www.factoringsecurity.cl/quienes_somos

²⁰³ Nuestra Empresa comercializa la producción de Pallets armados y Kits en conjunto con Aserraderos Arauco S.A., la mayor Empresa Forestal de Chile. Contamos con cobertura en Chile y alrededor de América, con plantas de armado en Ecuador, Costa Rica, Honduras, Guatemala México y Chile.

²⁰⁴ Lien avec cette entreprise : http://www.dircomp.cl/empresas_detalle_pd.php?id_e=19423

| ACTEURS | FONCTION | FACTEURS IDENTIFIES | COMMENTAIRES | HIERARCHISATION |
|--------------------|--|---------------------------------------|---|-----------------|
| Dirigeants Mapuche | Dirigeant Mapuche - Secteur côtier de San Paolo (Quilakawin) | Politique de l'Etat chilien | La política del Estado chileno es el factor más importante. [...]. No había política clara e orientada para que la gente pueda trabajar sus tierras y pueda recuperar el territorio que le perteneció en el pasado. Favoreció las empresas, los Fundos, las propiedades particulares pero no las comunidades. Todos los otros factores son la consecuencia de la política del Estado. | TRI |
| | | DL 701 | Es una reforma para fomentar, incentivar y dar recursos (plata) para que la gente planta. Las especies chilenas no eran rentable económicamente, [...] hay que esperar bastante tiempo [...]. A partir de este, gran parte de la gente de las comunidades fue vendiendo y algunos vendieron pocos terrenos pero los no Mapuche empezaron a acumular más territorio. Con este incentivo a la actividad forestar, se empezaron a forestar con pino y eucalipto. Llegaron empresas forestales. | IMP |
| | | Fragmentation du territoire | Asistimos a una fragmentación del territorio mapuche-huilliche. | IMP |
| | | Migration | Con este proceso de invasión forestal y con la política publica en Chile, mucha gente ha migrado y ha vendido su terreno. | IMP |
| | | Bonification | Cuando hay muchas tierras es rentable. | IMP |
| | Secretario del cacique (territorio Rio Negro) | Territoire – bonification – migration | Las tierras nos fueron tomadas. En la zona de la Costa había gran territorio, grande Fundo y el Estado le bonificaba, entonces prefirieron forestarlos. El Estado ayudo los propietarios y no las comunidades. Muchos pequeños propietarios se sentían obligados a dejar sus tierras y migraron a la ciudad. Actualmente esas tierras están forestadas. | IMP |
| CONADI | Responsable de l'environnement | Division des proprietés | Hay una alta división predial y muchas personas constituidas en un espacio pequeño. No tienen un espacio suficiente para realizar actividades que le puede permitir sus subsistencias. | TRI |
| | | Bonification (DL 701) | ----- | IMP |
| | Président de la CONADI sous Bachelet (Assistant social) | DL 701 | ----- | IMP |
| | | Propriété | La propiedad nunca estuvo legalmente en manos de los Huilliche, pero en manos de los particulares que incitaron y financiaron la deforestación, usando como mano de obra el pueblo Huilliche. | TRI |

| | | | | |
|-------|---|--|---|------------|
| | | | La pequeña propiedad indígena (2, 5 10 o 15 ha) en la precordillera costera, era insuficiente para que la gente sobreviven dignamente, termino vendiendo (migración campo-ciudad), y fue en esos territorio que se asentaron las empresas forestales, o que se asentaron otros particulares que dieron un otro uso a la tierra. | |
| | | Absence d'instrument de l'Etat | La ley Bosque Nativo no tiene el mismo fondo económico que la tenía el DL 701 por los particulares para plantar pino y eucalipto. | TRI |
| | | Facteur culturel | Hay un factor cultural que involucran a los no Mapuche, que no se acostumbra a utilizar pino o eucalipto para calefaccionarse, prefieren el bosque nativo, porque dan mas caloría. El contribuye a la destrucción del bosque. En la provincia no hay conciencia. | PIM |
| | | Plan de manejo | CONAF nos daba (CONADI) gastos para dar plan de manejo, y como la gente no tenía titulo no podía pedir plan de manejo. | IMP |
| | | Pauvreté | Una persona solo, desvalida, sin financiamiento, el único recurso que tenía para salir momentáneamente de la pobreza era sus tierra, y lo vendieron, y ya llegaron las forestales. | TRI |
| CONAF | | Impôt foncier | Cuando se establece un bosque o una plantación, por la primera rotación se baja el impuesto territorial (por los medianos propietarios). Los pequeños no pagan impuestos. | IMP |
| | | Distance aux axes de communications | Va a determinar el valor del suelo, la rentabilidad de tu plantación. Si hay menor distancia va a tener menores costos de transporte (más ganancia). | IMP |
| | | Erosion | Hay que tomar en cuenta la susceptibilidad de los suelos a la erosión | PIM |
| | Chargé provincial de la gestion des incendies | Loi du marché et productivité économique | La decisión de forestación es una decisión económica, no medio ambiental (igual por el trigo otra cosa, es una razón económica). | TRI |
| | | Possession de la terre | ----- | PIM |
| | | DL 701 | El Decreto Ley 701 es factor mínimo, menos que el factor económico. | PIM |
| | Ingénieur forestier | Question socio-culturelle | No hay mayor educación respecto al cambio de especie (exótica a nativo) o simplemente por el tema de costumbre. | IMP |
| | | Vision à court terme | Cuando tuvo fuerte el tema de la forestación, hace 10 años, cuando era el | TRI |

| | | | | |
|------------------|------------------|-----------------------------|---|-----|
| | | | boom del Decreto 701, las empresas, por un tema de costo eligieron el eucalipto o pino (muy escaso). Esto entro en la mentalidad de los viejos, estas plantaciones están cortando, generando leña (que es el producto primario) y están repitiendo las experiencias [...]. No hay la mentalidad del “largo plazo”, “ <i>ah vamos a esperar, vamos a plantar nativo</i> ”, la visión es a corto plazo. | |
| | | Coûts de boisement | La CONAF obliga la reforestación, y por supuesto por una cuestión de costo, no se planta bosque nativo. | IMP |
| | | DL 701 vs Ley Bosque Nativo | El DL 701 tiene focalizado, por región, sus montos. Hay “macrozona”, y se divide en función de la densidad, de la especie. Es adaptado, la Ley Bosque Nativo no, es grosero. [...]. Solo se hace la diferencia entre pequeños y medianos. [...].Y bueno, el propietario necesita comer, la gente necesita plata y si no hay promedio, se quedan con las plantaciones. | IMP |
| Forestal Anchile | Gérant sylvicole | Prix de la terre | La Forestal Anchile no compra mas, porque hoy en día la tierra esta muy cara. Su valor ingresó mucho. [...]. Hay mucha inversión en la zona. Muchos terceros, que son propietarios grandes de Santiago, compran en la zona y plantan. | IMP |

Tableau 29 : Identification et hiérarchisation des facteurs explicatifs

5.3. Identification et analyse des facteurs spatialisables

5.3.1. Disponibilité et choix des données

Le nombre de variables explicatives qui sont intégrées aux modèles est contraint par leur disponibilité ainsi que par leur influence sur la localisation et les changements des types d'occupation des sols. Par conséquent, le nombre de facteurs retenus est restreint comparativement à la palette des variables potentiellement explicatives que nous avons vu précédemment. Parmi ces derniers seules la propriété et la distance aux axes de communications sont spatialement explicites. A celles-ci s'ajoutent l'occupation du sol (OS) en 1986-1999 et 2008, la distance à chaque type d'OS, le réseau hydrographique, la distance aux centres urbains, la pente, l'altitude et le niveau d'érosion. La figure 87 présente l'ensemble de ces données spatialisées en précisant leur nom, leur contenu, leur date et leur source.

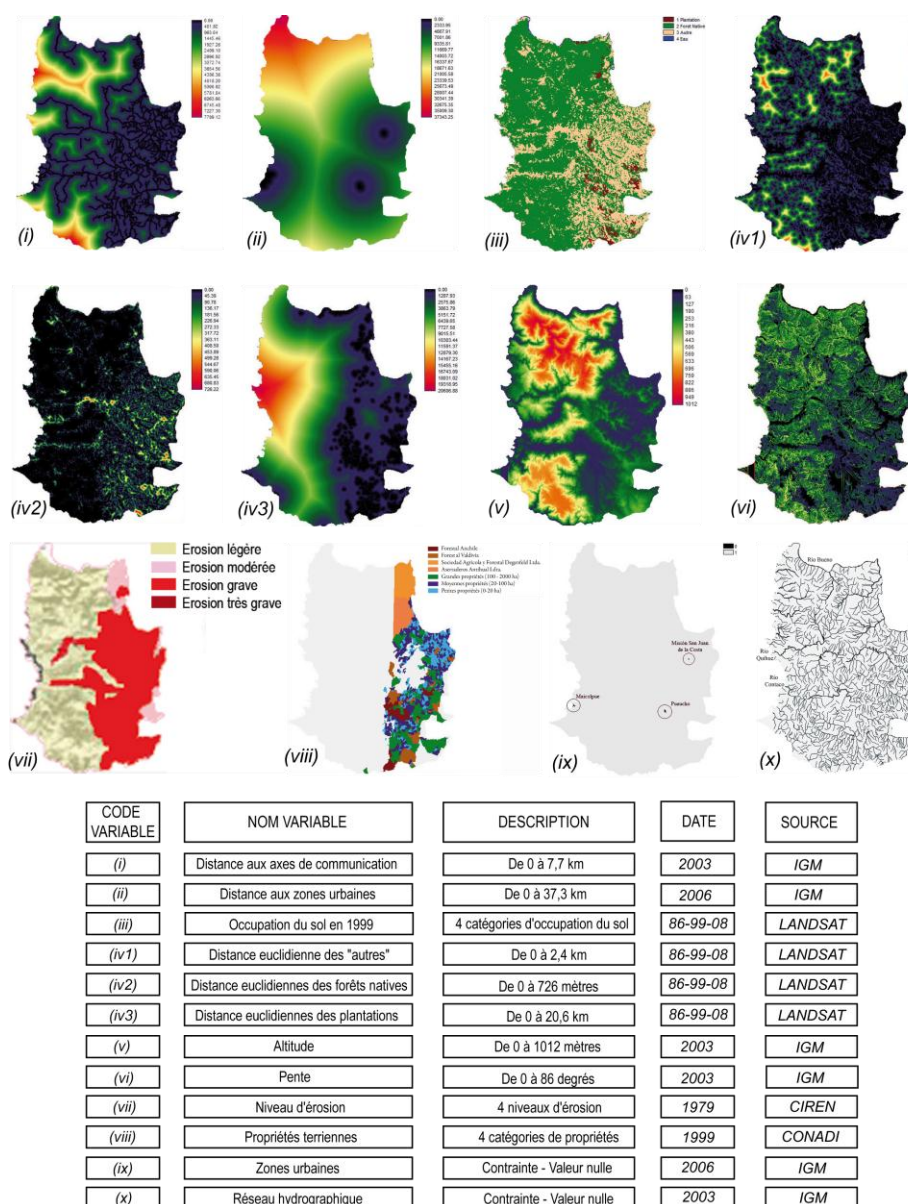


Figure 87 : Variables spatialement explicites

5.3.2. Validation des facteurs

Nous avons procédé à une analyse de la distribution des changements (1986-1999 et 1999-2008) et des types d'occupation du sol pour 1999 et 2008 en fonction de chaque variable. Chacune des variables (sauf OS) est mise en relation avec la carte des changements 1986-1999 afin d'étudier l'intensité de leur liaison grâce au coefficient de corrélation linéaire de Pearson et ainsi estimer leur pouvoir explicatif. Les valeurs comprises entre -1 et 1 nous renseignent sur l'existence d'une relation linéaire entre la variable et les changements observés. Les coefficients de corrélation proches de 0 n'ont pas été systématiquement exclus dans la mesure où des relations non linéaires peuvent exister. David Demeritt et John Wainwright remarquent que « *the empirical-statistical models run the risk of making spurious associations between variables whose statistical correlation may either be purely coincidental or contingent upon some intervening process ignored by the model* » (2005, p.214).

Le coefficient V de Cramer calcule la corrélation entre des variables ; il varie entre 0 et 1. Plus la corrélation est forte, plus ce coefficient s'approche de 1 et vice versa. Selon Eastman (2004) la variable sera considérée comme acceptable si son coefficient est égal ou supérieur à 0.4, mais devra être rejetée si le coefficient est inférieur à 0.15. Malgré tout, il faut garder à l'esprit qu'une forte corrélation ne tient pas compte de la complexité des relations entre les variables.

5.3.3. Résultats

5.3.3.1. Validation pour la période 1986-1999

a) Relation entre facteurs explicatifs et changement d'occupation du sol

Le tableau 30 exprime le niveau d'association et les oppositions existant entre les principaux changements d'occupation du sol et les variables explicatives exposées précédemment.

La fréquence des changements d'occupation du sol s'amointrit à mesure que la distance aux routes, l'altitude et la pente augmentent, en témoignent les coefficients de Pearson supérieur à -0,58. La proximité aux routes facilite l'accès et l'exploitation ressources forestières (forêt native et plantation). L'altitude représente également un frein à l'apparition de pins ou d'eucalyptus dans la mesure où les zones élevées, corrélées à de fortes pentes et à une raréfaction du réseau routier, rendraient toute plantation improductive.

La déforestation (ForNat-Autre) s'explique elle aussi par la proximité aux routes, une déclivité faible et de basses altitudes (Lambin et Geist, 2007), de même que la proximité aux zones classées « autres » en 1986. Cet état a été également constaté par Gerardo Vergara et Jorge Gayoso (2004) dans les douze communes de la province de Valdivia. Les auteurs expliquent qu'il existe une forte corrélation entre la présence de chemins et de forts taux de déforestation, de même que la variation de la distribution de la forêt native est fortement influencée par la pente du terrain.

Les zones ayant transité de « autre » vers des plantations industrielles ont manifestement été influencées par la proximité aux parcelles de pins ou d'eucalyptus (-0,86).

Cette situation pouvant s’expliquer par la volonté des entreprises forestières d’accroître et de concentrer leur patrimoine forestier. La substitution des forêts natives par des monocultures est liée quant à elle à la proximité à « autre » en 1986. Cette dernière a un effet de polarisation dans la mesure où les plantations gagnées sur les forêts natives peuvent s’étendre plus facilement sur de nouveaux espaces dépourvus de végétation native. « *The importance of such structural spatial dependencies is increasingly recognised by geographers and economists* » (Verburg, 2004, p. 316).

| | | PAC | HYDRO | URB | ALT | PTE | DEN Plantation 86 | DEN Forêt Native 86 | DEN Autre 86 |
|----------------------------|------------------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| Trans. ForNat- Autre | Coef. Pearson | -0.61 | -0.53 | 0.11 | -0.58 | -0.69 | 0.10 | -0.26 | -0.41 |
| | Cramer’s v | 0.09 | 0.03 | 0.04 | 0.10 | 0.07 | 0.05 | 0.19 | 0.37 |
| Trans. ForNat-Plt | Coef. Pearson | -0.66 | -0.50 | 0.11 | -0.63 | -0.72 | -0.14 | -0.26 | -0.42 |
| | Cramer’s v | 0.05 | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.04 | 0.17 | 0.06 | 0.13 |
| Trans. Autre-Plt | Coef. Pearson | -0.58 | -0.49 | 0.11 | -0.65 | -0.60 | -0.86 | -0.71 | -0.15 |
| | Cramer’s v | 0.09 | 0.03 | 0.06 | 0.11 | 0.10 | 0.17 | 0.21 | 0.20 |
| Trans. Autre- ForNat | Coef. Pearson | -0.58 | -0.50 | 0.12 | -0.67 | -0.65 | -0.06 | -0.49 | -0.15 |
| | Cramer’s v | 0.15 | 0.04 | 0.07 | 0.16 | 0.11 | 0.19 | 0.41 | 0.37 |

Tableau 30 : Relation entre les transitions observées (1986-1999) et les variables spatiales

b) Relation entre facteurs explicatifs et occupation du sol (1999)

L’analyse spatiale porte sur l’année 1999 afin de prendre en compte un plus grand nombre de pixels de plantations comparé à 1986 où les plantations étaient encore très peu répandues. La figure 88 représente la part (en %) des trois catégories d’occupation du sol en fonction de l’altitude, de la distance aux axes de communication, de la pente, de la distance aux centres urbains et des types de propriétés foncières²⁰⁵.

Les plantations se localisent essentiellement dans les très grandes propriétés (TGP – 66 %), ce qui traduit une tendance à la capitalisation et la concentration de la ressource forestière exotique. La logique de rentabilité explique cette situation - une altitude inférieure à 400 mètres (100 % des plantations), sur des pentes inférieures à 15% (84 %) et à proximité des axes de communications afin d’optimiser le transport des grumes (le point d’inflexion se situe à 500 mètres). La proximité aux villes ne semble pas jouer un rôle important.

La forêt native se situe dans l’ensemble à moins de 800 m d’altitude mais à la différence des plantations, elles occupent la strate altitudinale dans sa totalité pouvant atteindre les 1200 m (le point d’inflexion étant à 800 m). De fait on les retrouve sur toutes les catégories de pente (avec une inflexion à 30 %). Moins de 3% des forêts natives se trouvent à moins de 2km d’une ville. Il s’agit principalement de forêts fragmentées caractéristiques du paysage du piémont, ou de ripisylve. *A contrario* 87,6 % sont au-delà de 10 km. Enfin, on

²⁰⁵ TGP : très grandes propriétés (essentiellement des entreprises du secteur forestier) – GP : grandes propriétés – MP : propriétés de taille moyenne – PP : petites propriétés

constate que 56,4 % d’entre-elles sont à une distance comprise entre 500 et 1 500 mètres d’une route, le reste se répartie aussi bien entre 0 et 100 m qu’entre 5 et 8 km.

La catégorie « autre » doit être interprétée avec précaution car elle intègre des catégories d’occupation du sol trop hétérogènes de par leur nature et leur organisation spatiale. Ainsi leurs relations avec les variables étudiées révéleraient de nombreuses divergences – par exemple une coupe rase a une plus forte probabilité d’être à proximité d’un axe de communication qu’une forêt d’alerce. Plus de 86,5 % se trouvent à moins de 400 mètres d’altitude, puis la part diminue fortement mais n’atteint pas de valeur nulle. Peu de pixels se localisent au-delà de 600 mètres ce qui pourrait correspondre à des forêts dégradées (*achaparradas*), ou à des coupes de forêts natives sur la Cordillère Côtière. Une forte proportion se trouve sur le piémont, ce qui se caractérise par une distance inférieure à 500 mètres des axes de communications, des pentes inférieures à 15 % et à une distance minimale de 10 km des villes.

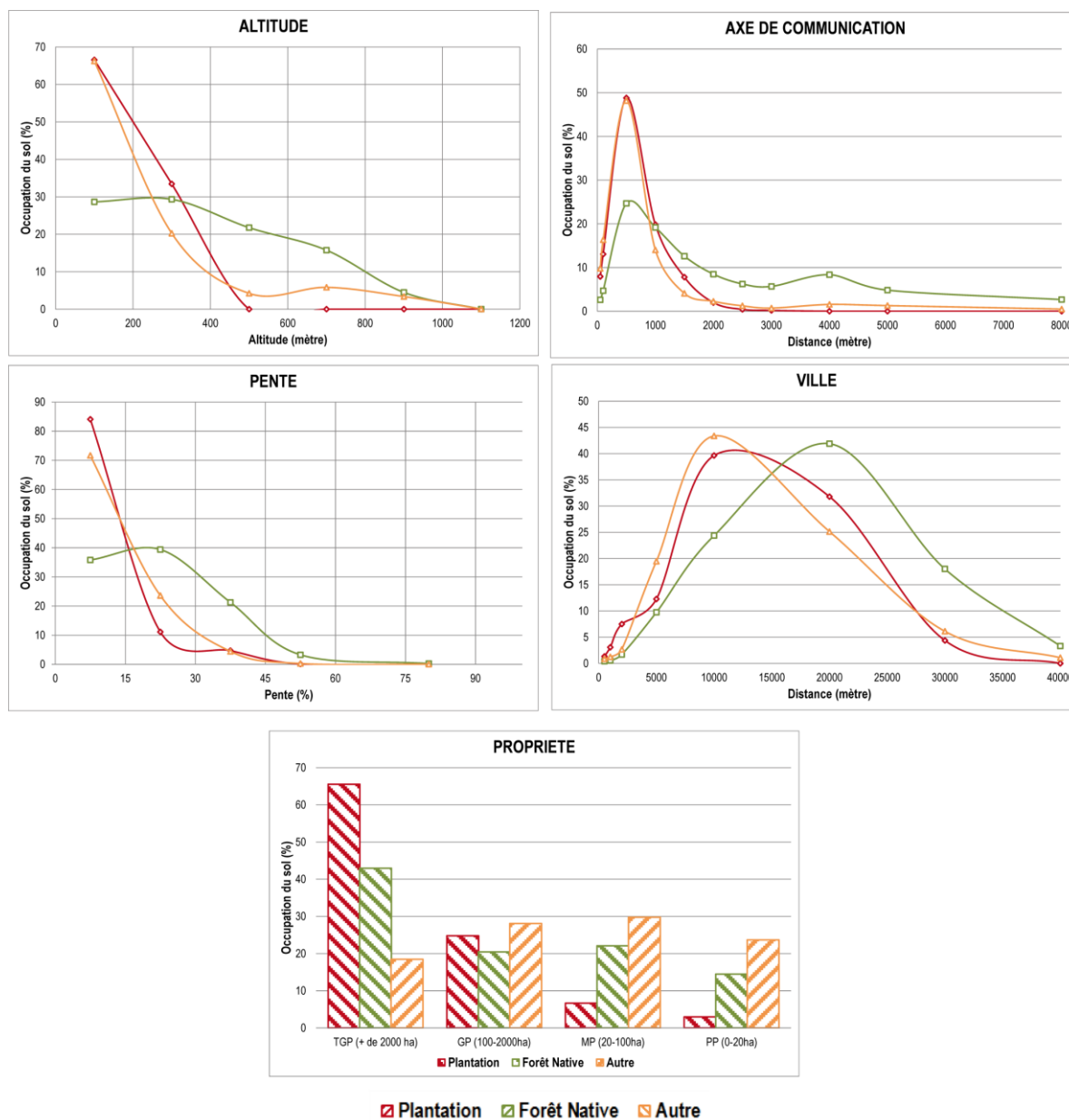


Figure 88 : Relation entre les types d’occupation du sol (1999) et cinq variables explicatives

5.3.3.2. Validation pour la période 1999-2008

a) Relation entre facteurs explicatifs et trajectoires d'évolution

A l'instar de la période précédente, la fréquence des changements d'occupation du sol s'amointrit à mesure que la distance aux routes, l'altitude et la pente augmentent, en témoignent les coefficients de Pearson supérieur à -0,53 (contre -0,58) (tableau 31). La déforestation (ForNat-Autre) est toujours influencée par la distance aux routes, l'altitude et la pente. Les résultats montrent que la proximité à des plantations (datant de 1999) accentue le processus de déforestation (coef. de 0.53). La volonté de créer un espace ininterrompu de plantation afin de faciliter l'exploitation du bois peut pousser un propriétaire à couper des zones de forêt native. De plus, on remarque que la proximité à la catégorie « autre » joue un rôle sur la substitution de la forêt native par les plantations. En d'autres termes, le coefficient de corrélation (-0,40) montre que l'éloignement accentue ce processus, ce qui s'explique potentiellement par la présence de zones de coupe rases à proximité de forêts natives²⁰⁶.

Les zones ayant transité de « autre » vers des plantations industrielles diminuent à mesure que la distance aux axes de communication et aux cours d'eau, et que l'altitude et la pente augmentent (avec respectivement -0,54, -0,53, -0,66 et -0,65), ce qui confirme les observations réalisées lors de la période précédente.

| | | PAC | HYDRO | URB | ALT | PTE | DEN Plantation 99 | DEN Forêt Native 99 | DEN Autre 99 |
|----------------------------|------------------|--------------|--------------|------|--------------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| Trans. ForNat- Autre | Coef. Pearson | -0.59 | -0.48 | 0.11 | -0.66 | -0.66 | 0.53 | -0.28 | -0.35 |
| | Cramer's v | 0.12 | 0.03 | 0.07 | 0.15 | 0.05 | 0.16 | 0.16 | 0.33 |
| Trans. ForNat-Plt | Coef. Pearson | -0.56 | -0.52 | 0.11 | -0.68 | -0.72 | -0.28 | -0.28 | -0.40 |
| | Cramer's v | 0.08 | 0.04 | 0.07 | 0.10 | 0.06 | 0.19 | 0.08 | 0.15 |
| Trans. Autre-Plt | Coef. Pearson | -0.54 | -0.53 | 0.11 | -0.66 | -0.65 | -0.43 | -0.69 | -0.16 |
| | Cramer's v | 0.13 | 0.04 | 0.04 | 0.13 | 0.09 | 0.07 | 0.23 | 0.25 |
| Trans. Autre- ForNat | Coef. Pearson | -0.57 | -0.52 | 0.11 | -0.53 | -0.73 | -0.46 | -0.49 | -0.16 |
| | Cramer's v | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.05 | 0.07 | 0.22 | 0.19 |

Tableau 31 : Relation entre les transitions observées (1999-2008) et les variables spatiales

b) Relation entre facteurs explicatifs et occupation du sol (2008)

La logique d'implantation des monocultures observée en 1999 se poursuit en 2008 avec, dans un premier temps, la confirmation de la concentration aux mains des (très-) grands propriétaires (55 % et 27 %) (figure 89). Cependant, il faut noter que les plantations ont également augmenté chez les petits et moyens propriétaires, ce qui est potentiellement

²⁰⁶ Il est délicat d'évaluer la place de la catégorie « autre » dans la mesure où il peut s'agir de coupe rase, de prairie, de *reoval/matorral* ou de sol nu.

attribuables à l'actualisation du D.L. 701 en 1998 visant à une meilleure intégration de ces propriétaires dans le processus de boisement.

De plus, on remarque que 98 % des plantations se localisent entre 0 et 400 m et seulement 2 % à 600 m, ce qui constitue une progression par rapport à 1999 où aucune plantation n'était détectée à cette altitude. Le même constat s'applique pour les axes de communication, avec une concentration à moins de 500 m (76 %) et une réduction progressive pour atteindre une valeur nulle à 4 km. La relation avec la pente est sensiblement la même qu'en 1999. Enfin les plantations s'étendent au-delà de 5 km des centres urbains, alors que la superficie reste stable entre 0 et 5 km. La forêt native connaît un recul important en 2008 entre 0 et 400 mètres (environ 8 000 hectares, mais reste stable au-delà de 400 m. On observe que la proximité aux routes accentue le processus de déforestation – notamment entre 0 et 2 000 m – et que son intensité s'amointrit à mesure que la distance augmente. La diminution surfacique ne change pas la relation avec la pente et la distance aux villes observée en 1999. Enfin, la déforestation est plus importante chez les (très-) grands propriétaires bien qu'elle se généralise à l'ensemble des propriétés. La catégorie « autre » connaît une diminution surfacique proportionnellement répartie sur toutes les classes d'altitude, de pente, de distance aux routes et aux villes par rapport à 1999.

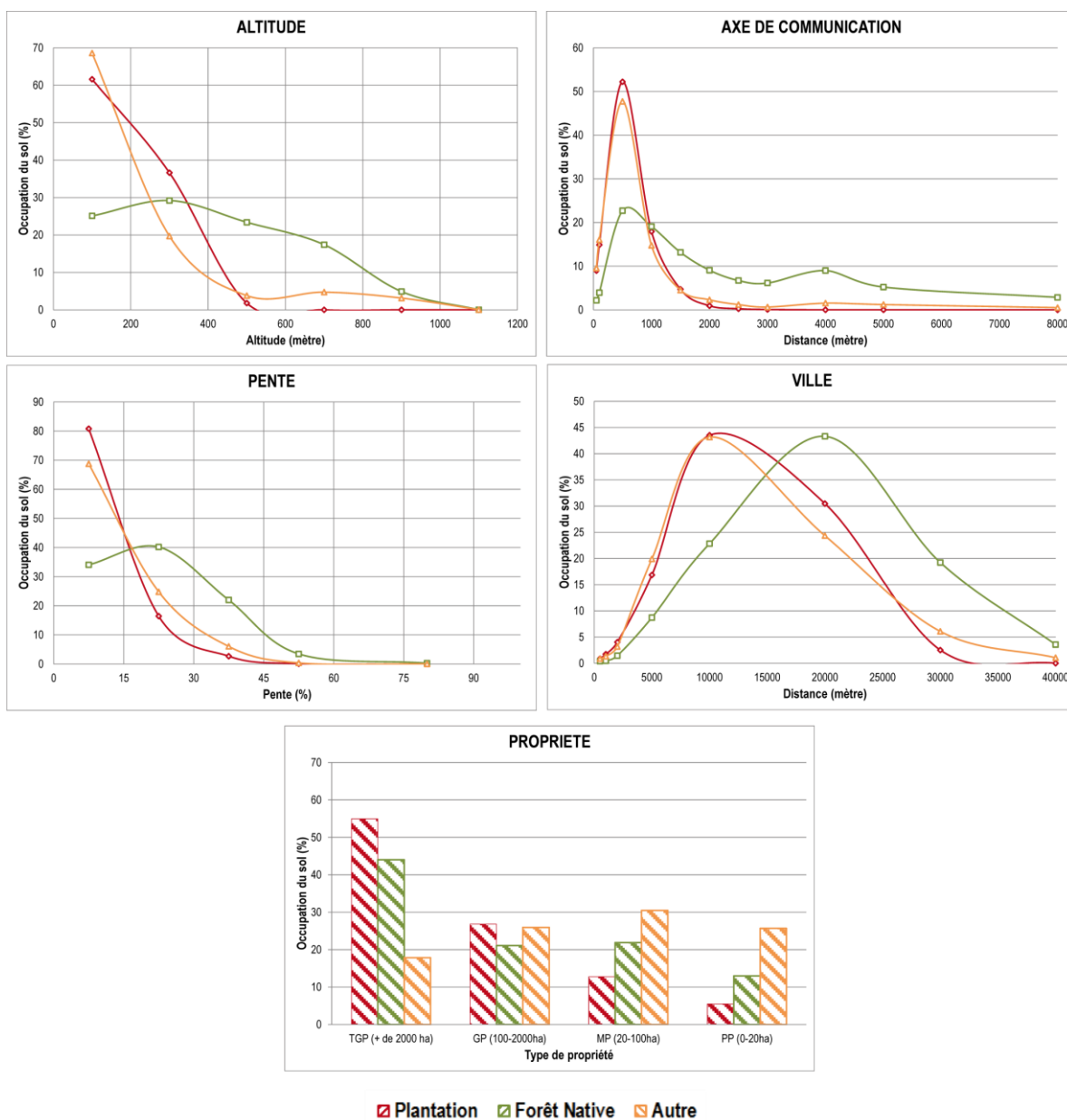


Figure 89 : Relation entre les types d'occupation du sol (2008) et cinq variables explicatives

CONCLUSION

L'identification des variables et la représentation systémique pour les deux périodes révèle la complexité du système forestier dans la commune de San Juan de la Costa en mettant en exergue leur interdépendance à l'échelle locale. Cette complexité est également la résultante de la synergie de facteurs directs et indirects opérant à de multiples échelles, ce qui n'apparaît pas explicitement dans les représentations systémiques. Rappelons que si les impacts des changements d'occupation et d'utilisation des sols suivent une logique ascendante (du local au global), les facteurs de changements suivent une logique descendante (du global au local). Dans ce sens la figure 90 resitue chacun des facteurs identifiés à l'échelle géographique dans laquelle il évolue.

L'ensemble de ces facteurs est directement relié aux prises de décisions individuelles (Carmona *et al.*, 2010) et collectives, elles-mêmes soumises aux directives gouvernementales « *influenced, as they are, by the social and political context in which they are made* » (Walker, 2004, 259). Eric Lambin et Helmut J. Geist (2007) constatent également que « *land use decisions are made and influenced by environmental and social factors across a wide range of spatial scales, from household level decisions that influence local land use practices, to policies and economic forces that can alter land use regionally and even globally* ». La figure 91 est un « modèle concept » destiné à traduire et verbaliser les relations entre acteurs-ressources et acteurs-acteurs, et se destine à caractériser la complexité du système en démontrant qu'il ne se limite pas aux interactions de la douzaine de facteurs spatialisables susmentionnés. On constate également que la plupart des facteurs identifiés et jugés (très-) important par les acteurs ne sont pas spatialisables et ne sont pas inclus dans le processus de modélisation. Ceci pose la question de la légitimité et de la pertinence du modèle en l'absence de ce type de données (plus subjectives).

Il est clair que l'identification et la classification des facteurs présentent certaines limites et peuvent être améliorées. Chitu Okoli et Suzanne D. Pawlowski (2004) voient dans la méthode DELPHI un outil populaire permettant « *identifying and prioritizing issues for managerial decision-making* ». L'objectif initial, tel qu'il émergea au sein de la RAND Corporation dans les années 1950, était de développer une technique pour obtenir le consensus le plus fiable parmi un groupe d'experts. Cette méthode a été largement employée dans des études prospectives à court et long termes, ainsi que dans le développement de scénarii alternatifs. Si l'intérêt d'une telle méthode est clairement identifiable dans cette recherche, le temps qu'elle requiert constitue une limite²⁰⁷.

En tenant compte de ce constat, l'objectif est désormais de modéliser la dynamique future des plantations industrielles. Cette phase passe avant tout par la calibration d'un modèle de simulation qui intègre l'ensemble de ces facteurs (spatialisables) et la compréhension des processus.

²⁰⁷ Okoli et Pawlowski (2004) expliquent que la method DELPHI est connue « *for the elapsed time required for data collection. Delbecq et al., for example, estimated that the average Delphi study could take 45 days to 5 months* ».

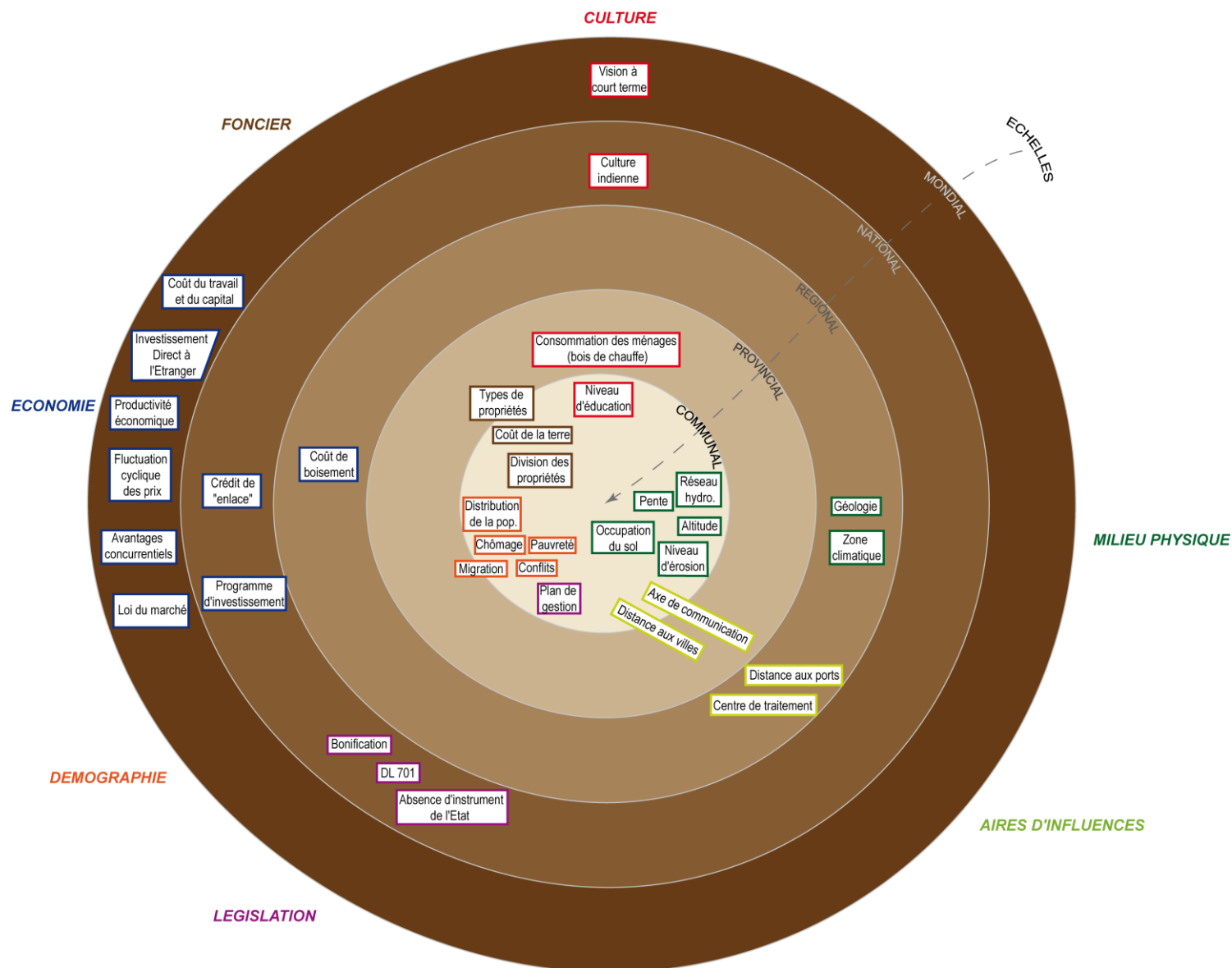


Figure 90 : Place des facteurs selon l'échelle géographique

TROISIEME PARTIE – SIMULATION PROSPECTIVE A L'ECHELLE COMMUNALE

CHAPITRE 6

Le choix des modèles : mise en œuvre et calibration pour 2008

CHAPITRE 7

Les scénarii d'évolutions et évaluation de leur soutenabilité

CHAPITRE 6 – Le choix des modèles : mise en œuvre et calibration pour 2008

INTRODUCTION

L'élaboration et la spatialisation des scénarii prospectifs requièrent, au préalable, la calibration et la validation de modèles de simulation. Ce chapitre se focalise sur deux approches de modélisation des changements et d'utilisations d'occupation des sols (LUCC) : CA-Markov (Eastman, 2006), Land Change Modeler (LCM) (Eastman, 2006) (**section 1**). La mise en œuvre des deux modèles (**section 2**) se caractérise par l'intégration des variables et des processus analysés dans les chapitres 4 et 5. Une première simulation-test est obtenue à une date connue (2008). L'analyse des résultats des deux simulations et leur validation avec une carte « réelle » (**section 3**) sont réalisées grâce à plusieurs techniques essentiellement développées par Robert G. Pontius (Pontius et Schneider, 2001 ; Pontius *et al.*, 2004 ; Chen et Pontius, 2010). La comparaison des deux modèles (**section 4**) permet de confronter le comportement de deux modèle de simulation, notamment quant à l'allocation spatiale des changements en direction des plantations, et de déterminer leur aptitude à répondre à des scénarii d'évolution tendanciels et /ou contrastés.

6.1. Présentation des modèles : CA-Markov et Land Change Modeler (LCM)

6.1.1. La calibration du modèle

Afin de modéliser la dynamique des plantations industrielles et de simuler l'occupation du sol à l'horizon de 2017²⁰⁸, il convient au préalable de calibrer le modèle sur des données connues. L'image de 2008 = $t2$ étant la plus récente, elle fera l'objet d'une première simulation-test, calibrée par deux dates antérieures ($t0 = 1986$ et $t1 = 1999$) (chaîne de Markov d'ordre 2) (figure 92). Les images de 1986 et 1999 servent de base pour extrapoler les quantités de la future occupation du sol. Il s'agit d'une extrapolation linéaire car la simulation se base sur deux points dans le temps afin de calibrer le modèle. D'après Robert Gilmore Pontius *et al.* (2005) la calibration est « *l'estimation et l'ajustement des paramètres et des contraintes du modèle afin d'améliorer l'entente entre les sorties du modèle et un ensemble de données* ». Elle caractérise aussi « *le processus par lequel le scientifique utilise des informations sur le paysage pouvant l'aider à sélectionner les paramètres du modèle* ». Cette étape est fondamentale car la qualité des résultats obtenus dépendra du bon paramétrage du modèle.

²⁰⁸ La calibration du modèle se base sur la période 1986-1999 pour simuler en 2008. La simulation atteint 2017 (2008 + 9) afin de respecter le pas de temps de 9 ans compris entre 1999 et 2008. D'autres simulations en 2026 et 2035 sont traitées au chapitre 7.

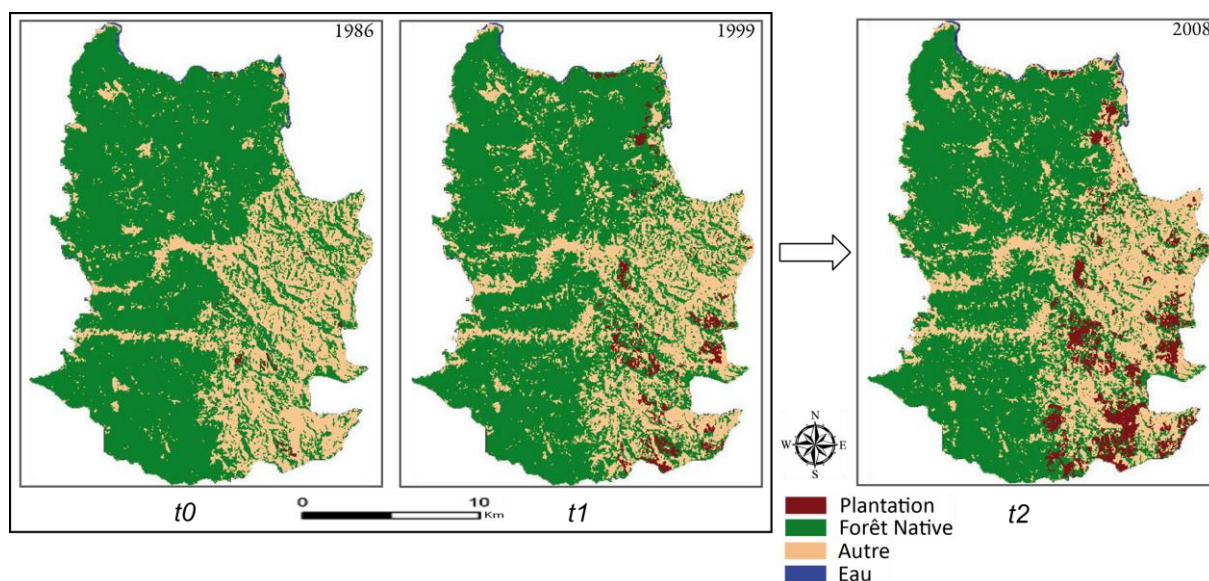


Figure 92 : Calibration du modèle

6.1.2. Ca-Markov

La CA-Markov est une procédure de prédiction LUC 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 chaînes markoviennes analysent deux images d'occupation du sol à des dates différentes et produisent deux matrices de transition (probabilité et surface concernée en pixels pour la persistance et la transition), et un ensemble d'images de probabilité conditionnelle (Eastman, 2006). Elles permettent "*de calculer un état futur à partir de l'état présent connu, en se basant sur l'observation des évolutions passées et leur probabilité*" (Antoni, 2006). Les limites de l'analyse markovienne caractérisées par la non-allocation spatiale de ces transitions, peuvent être corrigées en ayant recours à une évaluation multicritère (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005).

L'objectif de l'évaluation multicritère 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 de modélisation en identifiant et en caractérisant les facteurs explicatifs grâce à une approche experte. Dans le cadre de l'évaluation multicritère on distingue deux types de critères : (i) les facteurs et (ii) les contraintes.

Un facteur est un critère qui renforce ou réduit la pertinence d'une variable particulière pour l'activité étudiée. Il indique le degré d'aptitude de chaque unité de l'espace, et est mesuré sur une échelle continue allant de 0 à 255. Les variables ayant des entités différentes, le calcul d'indice (0 à 255) permet ainsi de standardiser l'ensemble des facteurs, les rendant comparables. La phase de standardisation est réalisée au moyen d'une fonction d'appartenance de logique floue. Une contrainte limite, quant à elle, l'espace en considération dans la mesure où elle masque les zones inaptées aux objectifs fixés. C'est une variable

booléenne, les zones exclues de l'analyse seront codées 0, et celles prises en compte seront codées 1.

S'en suit une phase de pondération des facteurs basées sur la technique de comparaison par paires (*pairwise comparaison*) dans le contexte de processus décisionnel appelé Analytical Hierarchy Process (AHP). Ainsi, les facteurs sont comparés deux par deux dans une matrice de comparaison dite de Saaty (Saaty, 1977) et ce en fonction de leur importance relative par rapport à l'objectif fixé. Enfin, une deuxième série de poids (poids d'ordre) est appliquée aux facteurs dans le but de contrôler leur niveau de compensation ainsi que le niveau de risque dans la détermination des aptitudes.

Les cartes d'aptitudes issues de l'EMC sont combinées aux cartes de probabilités de transition dérivant du calcul des chaînes de Markov. A cela s'ajoute l'application d'un filtre de contiguïté (5x5) qui a pour but d'éliminer les occurrences isolées et de renforcer les zones d'agglomérations afin d'éviter l'effet "pixélisé" (*pepper and salt*). Le traitement tient compte des quantités markoviennes ce qui explique un fonctionnement en boucle.

6.1.3. Land change modeler (LCM)

Ce modèle a été développé afin d'étudier les LUCC, de projeter leur dynamique dans le futur et d'en évaluer l'impact sur la biodiversité (Eastman, 2006). Une première estimation des changements (pertes, gains, changements nets, constance) est réalisée par la création de graphiques et de cartes de changements. Cette phase d'analyse permet la mise en place de sous-modèles de transition potentielle entre plusieurs catégories d'occupation du sol tout en tenant compte des variables statiques ou dynamiques. Les variables qui sont intégrées à chaque sous-modèle sont préalablement évaluées avec le coefficient V de Cramer afin de connaître leur pouvoir explicatif (chapitre 5). Pour modéliser les changements d'occupation et d'utilisation des sols, LCM utilise soit la technique des réseaux neuronaux artificiels multicouches (*Multi-Layer Perceptron* ou MLP), soit une régression logistique. Nous avons privilégié le réseau neuronal car il est plus performant que le modèle de régression multiple, notamment dans les systèmes complexes et non-linéaires (Karul et Soyupak, 2006), mais peut conduire à "*un sur-ajustement de la relation probabilité de changement / variables explicatives et du poids respectifs des variables aux caractéristiques de la période de calibrage*" (Mas *et al.*, sous presse, p.13). Par ailleurs le MLP est vivement recommandé par les éditeurs (Eastman, 2009).

Un réseau neuronal de type MLP est constitué d'unités (ou nœuds) interconnectées de manière hiérarchique, avec une couche d'entrée (*input layer*), une couche cachée (*hidden layer*) qui joue le rôle d'une boîte noire, et la couche de sortie (*output layer*). L'architecture de ce réseau et son fonctionnement sont présentés en détail par Martin Paegelow *et al.* (2004)²⁰⁹.

La procédure d'allocation spatiale des changements d'utilisation et d'occupation du sol s'effectue par affectation multi-objectif (MOLA) qui se couple à l'estimation de la quantité de changement effectuée par des chaînes de Markov. Le MOLA prend en compte la totalité des

²⁰⁹ Nous renvoyons le lecteur sur les travaux de Lek et Guégan (1999), Mas *et al.* (2004), et Parizeau (2004) pour une description détaillée de sa structure et de son fonctionnement.

conversions afin de lister les classes d'accueil qui perdent une quantité donnée de terre et les classes demandeuses qui acquièrent une quantité donnée de terre provenant de chaque classe d'accueil. Le résultat est une carte de transition potentielle pour chaque transition (Eastman, 2009).

6.1.4. Similitude des variables et des quantités

La légitimité de ces données pour calibrer le modèle doit être discutée. En effet, certaines d'entre-elles sont postérieures à 1999 ce qui fausse la calibration et ainsi l'extrapolation des dynamiques d'occupations du sol. Les données sur le réseau routier datent de 2003 et devraient donc être exclues, de même que les zones urbaines qui datent de 2006. Cependant, et après vérification auprès d'experts, les axes de communications sont restés relativement stables entre 1999 et 2003, voyant la construction de quelques chemins forestiers. Enfin l'analyse des images satellitales révèle que les zones urbaines sont restées stables en sept ans. Les variables utilisées dans les deux modèles sont identiques hormis les deux contraintes utilisées lors de l'évaluation multicritère.

La superficie réelle des plantations en 2008 était de 9 011,79 ha. Nous considérons que chaque plantation détectée en 1986 et 1999, mais qui n'apparaît pas en 2008, est la conséquence d'une coupe rase. Les parcelles en question restant destinées à la production de pins et d'eucalyptus. De surcroît, afin de dépasser l'aléa temporel causé par la télédétection, nous avons regroupé les plantations des deux dates antérieures sur l'image de 2008 pour obtenir une superficie plus proche de la réalité (9 888,39 ha). L'intérêt porte sur le résultat final des plantations et non pas sur leur caractère cyclique.

| MODELE | Quantités de changements | Probabilité du changement | Relation facteurs explicatifs / LUCC | Allocation spatiale des changements | Type de calibration |
|------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|---------------------|
| CA-Markov | Chaînes de Markov | Carte d'aptitude | Evaluation multicritère | ---- | Supervisée |
| LCM | Chaînes de Markov // Données externes | Sous-modèles de transition | Perceptron multicouche ; régression logistique | Affectation multi-objectif | Automatique |

Tableau 32 : Similitude et différence entre CA-Markov et LCM

6.2. Mise en œuvre

6.2.1. Un modèle probabiliste et supervisé (CA-Markov)

6.2.1.1. La démarche de l'évaluation multicritère

“The principal aim is to help decision makers learn about the problem situation, about their own and others values and judgments, and through organization, synthesis and appropriate presentation of information to guide them in identifying, often through extensive discussion, a preferred course of action” (Belton, 1990 in : Joerin, 1997).

L'évaluation multicritère permet d'obtenir des cartes d'aide à la décision en intégrant un ensemble de critères mesurables et cartographiables. La question principale dans l'évaluation multicritère s'intéresse à la façon de combiner des informations provenant de plusieurs critères pour former un seul indice d'évaluation (Eastman, 2006). L'EMC, développée sous le logiciel de géostatistique IDRISI 15.0, se déroule en trois étapes (figure 93).

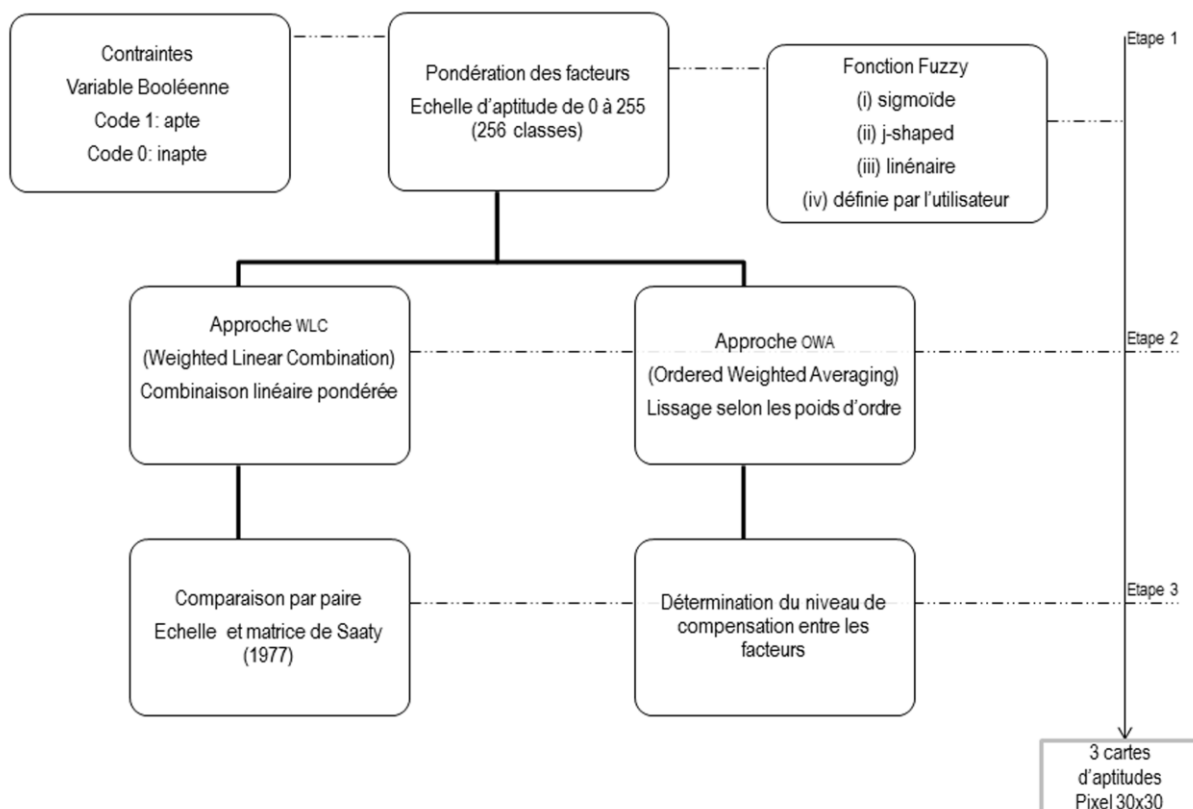


Figure 93 : Démarche méthodologique de l'évaluation multicritère

6.2.1.2. Facteurs et contraintes

La sélection des critères est dépendante de la disponibilité des données. Dans ce sens l'EMC développée ne prétend aucunement à une exhaustivité et à une précision optimale.

La pondération des facteurs et la détermination de leur poids est toute autant critiquable. Cette étape, présente en effet un degré certain de subjectivité. Cette dernière est souvent perçue à tort comme un défaut de la décision. Elle est d'ailleurs parfois confondue avec l'imprécision ou l'incertitude (Joerin, 1997). La subjectivité se définit comme une appréciation ou une attitude qui résulte d'une perception de la réalité, d'un choix, effectué en fonction de ses états de conscience (CNRTL, 2009). L'approche multicritère est dans ce sens soumise à cette subjectivité dans la mesure où le géographe, *par ses états de conscience* mais aussi et avant tout par sa connaissance du terrain, sélectionne et détermine l'importance relative de chaque variable. Valérie Belton (2002) considère que la subjectivité est inhérente dans toutes prises de décision, en particulier dans le choix de critères sur lesquels se base la décision, et le « poids » relatif donné à ces critères.

La procédure d'EMC mobilise neuf facteurs spatialement explicites répartis en trois catégories :

- les facteurs socio-économiques,
- les facteurs environnementaux,
- les contraintes.

Deux facteurs relèvent de la socio-économie : (i) la Distance aux Axes de Communication (DAC) et (ii) les PROPriétés TERriennes (PROTER). Ces facteurs anthropiques ont une influence directe à la fois sur la motivation des propriétaires (car elles déterminent le coût final du produit dans le cas de plantations), et sur le processus de déforestation. La distance joue un rôle clé sur l'ensemble des interactions spatiales de même que sur la localisation des entités géographiques²¹⁰.

Cinq autres facteurs relèvent de l'environnement: (iii) l'Occupation du sol en 1999 (OS) qui est une variable dépendante, (iv)²¹¹ la Distance aux Entités de mêmes Nature (DEN), (v) l'ALTitude (ALT), (vi) la PenTE (PTE) et (vii) le niveau d'EROSion (EROS). Enfin deux facteurs (considérés comme contraintes) sont intégrées et évaluées dans le modèle : (viii) les ZONES Urbaines (CZU) et (ix) le Réseau Hydrographique (CRH).

6.2.1.3. Standardisation des facteurs

Afin de rendre comparables des facteurs de natures différentes (mètres, pente en pourcentage, classes) et de les intégrer dans le modèle, il est nécessaire de les standardiser, c'est-à-dire de leur attribuer une échelle continue de valeurs. Cette étape peut se réaliser soit manuellement par le modélisateur, soit en appliquant une fonction d'appartenance à logique floue²¹² préprogrammée dans le logiciel IDRISI 15.0. Cette étape qui précède la procédure d'agrégation des facteurs par l'approche de comparaison par paire (Saaty, 1977) permet de standardiser les facteurs sur une échelle continue d'aptitude (0 : non apte, 128 : moyennement apte et 255 : le plus apte), rendant leur compensation optimale²¹³. Ainsi un facteur ayant un degré d'aptitude faible peut être compensé par un degré d'aptitude élevé provenant d'un autre facteur. Cette échelle est utilisée car elle fournit la différenciation maximale possible, tout en analysant des données de type byte (Eastman, 2006).

L'occupation du sol se discrétisant en trois classes (l'eau étant une contrainte), le but est de générer trois cartes d'aptitudes (OBJECTIVE) : (1) PLANTATION ; (2) FORET NATIVE ; (3) AUTRE. Ainsi chaque facteur est standardisé en fonction de chaque objectif.

²¹⁰ La distance aux villes n'est pas standardisée suite aux faibles résultats présentés dans le chapitre 5.

²¹¹ iv1: proximité à "autre" 1986; iv2: proximité à la forêt native 1986 ; iv3 : proximité aux plantations 1986. L'hypothèse de base est que le voisinage immédiat d'un type d'occupation du sol influence l'apparition d'entité de même nature. Les nouveaux espaces de forêts natives correspondent potentiellement à des forêts natives régénérées ou à des plantations de forêt native (exploitation). Ces zones ont été laissées en tant que "forêt native" afin de faire émerger des zones potentielles de colonisation, en vue de leur conservation dans le futur.

²¹² Cette technique de fusion d'information est une des plus répandues. « Elle présente l'inconvénient majeur de représenter surtout le caractère imprécis des informations, l'incertitude étant alors implicite » (Bloch et Maître, 1994 in : Hubert-Moy *et al.*, 2006)

²¹³ Afin de donner une plus grande flexibilité à l'EMC, l'approche booléenne qui vise à réduire les facteurs en contraintes (prise de décision très conservatrice et prise de risque minimale) n'a pas été retenue.

« *An objective is an activity and perspective. For example, consider the objective to determine areas most suitable for timber harvesting. One perspective might be to minimize the impact of harvesting on recreational uses while another might be to maximize profit. The two suitability models may be quite different* » (Eastman, 2006).

a) Affectation manuelle du degré d'aptitude

L'approche manuelle facilite la standardisation de variables qualitatives et quantitatives discrètes telles que les types d'occupation du sol et les types de propriétés. En fonction de l'objectif, par exemple PLANTATION, le but est d'estimer le degré d'aptitude de chaque TOS et de chaque catégorie de foncier (tableau 33).

Les PROPriétés TERriennes (ii)

Les propriétés sont standardisées exclusivement pour l'objectif PLANTATION dans la mesure où l'implantation de monocultures est fortement corrélée au régime foncier, contrairement aux forêts natives et aux « autres ».

L'analyse rétrospective des dynamiques d'occupation du sol met en exergue l'importance des entreprises forestières et des grands propriétaires terriens sur l'expansion des plantations industrielles, et la faible part des petits et moyens propriétaires. Ainsi nous faisons l'hypothèse que la probabilité de voir de nouvelles plantations sur des terres appartenant aux entreprises forestières est plus forte que sur des petites et moyennes propriétés.

| | Classes | PLANTATION |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 255 |
| | Grands propriétaires | 255 |
| | Moyens propriétaires | 100 |
| | Petits propriétaires | 50 |

Tableau 33 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

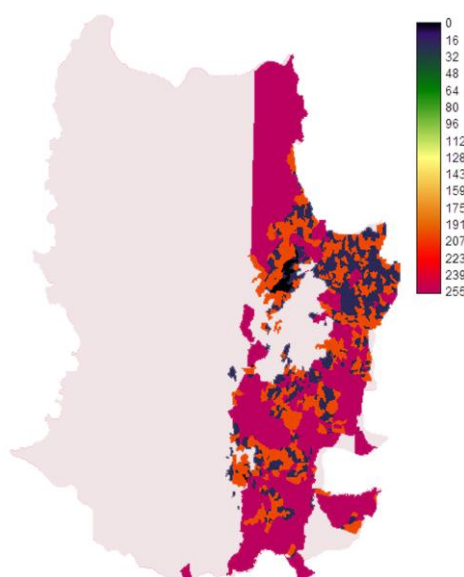


Figure 94 : Standardisation du facteur PROTER

L'occupation du sol (iii)

Le degré d'aptitude pour les plantations est maximal (255) (tableau 34), car la probabilité de voir apparaître des plantations à leur emplacement d'origine est maximale. La classe « autre » est considérée comme fortement apte (200) car elle représente des zones favorables à l'établissement de plantations. Enfin les forêts natives sont faiblement aptes (50). Bien que les trajectoires d'évolution traduisent un processus de remplacement par des plantations, l'occupation actuelle de la majorité du couvert forestier natif dans la commune (Cordillère de la Côte) ne laisse supposer de futures substitutions. Malgré tout, une faible part de celles-ci sont présentes sur le piémont, d'où la considération d'un faible degré d'aptitude. Un degré d'aptitude nul aurait supposé une conservation totale de la ressource.

| Classes | Degré d'aptitude |
|--------------|------------------|
| Plantation | 255 |
| Forêt Native | 50 |
| Autre | 200 |

Tableau 34 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types d'occupations du sol – Objectif PLANTATION

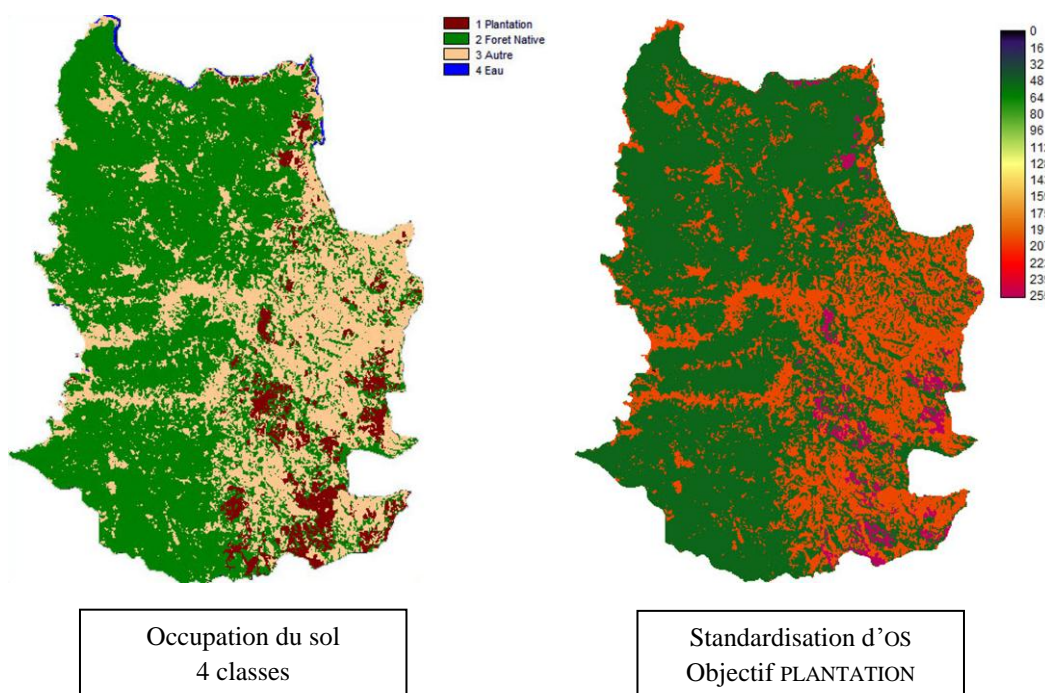


Figure 95 : Standardisation du facteur OS

| | Classes | Plantation | Forêt native | Autre |
|-------------------------|-----------------------|------------|--------------|-------|
| Degré d'aptitude | Objectif FORET NATIVE | 5 | 255 | 100 |
| | Objectif AUTRE | 100 | 150 | 255 |

Tableau 35 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types d'occupations du sol – Tout objectif

Le niveau d'ÉROSION (vii)

Plus de 95% des plantations se situent sur le piémont, c'est-à-dire sur des sols dont le niveau d'érosion est grave. Une faible part d'entre-elles occupent des zones légèrement et modérément érodées. De fait, une distinction géographique entre la Cordillère de la Côte et la précordillère a été incluse afin d'accorder plus d'importance à cette dernière. La standardisation de ces deux facteurs est exclusive à l'objectif PLANTATION. Les dynamiques de pins et d'eucalyptus se concentrent sur le piémont (PMT) et dans une très faible mesure sur la Cordillère (CC). Ces deux entités géographiques ont obtenu respectivement un degré d'aptitude de 255 et de 128.

b) Standardisation par la fonction *fuzzy membership*

La fonction d'appartenance *fuzzy* propose quatre sous fonctions qui seront utilisées selon les caractéristiques et le *comportement* de chaque facteur : (i) sigmoïde, (ii) j-shaped, (iii) linéaire et (iv) celle définie par l'utilisateur. Dans chacune des fonctions le modélisateur doit renseigner les points d'inflexion a, b, c et d, où (a) traduit une appartenance supérieure à 0, (b) une appartenance égale à 1, (c) une appartenance inférieure à 1 et (d) une appartenance égale à 0 (Paegelow, 2008). Cette étape offre ainsi une variation graduelle de la non-appartenance (0) à l'appartenance complète (1).

Les quatre facteurs restant à standardiser sont : (i) la Distance aux Axes de Communication (DAC), (iv) la Distance aux Entités de mêmes Natures (DEN), (v) l'ALTitude (ALT), et (vi) la PENTE (PTE).

La distance occupe une place fondamentale dans le processus de standardisation. Denise Pumain (2005) définit la distance comme étant « *la mesure de l'écart spatial, de la séparation entre deux lieux. La distance interfère avec tous les déplacements qui se produisent à la surface de la terre, et donc dans les localisations des activités humaines* ».

(DAC) - Pour modéliser le degré d'aptitude des plantations, la distance aux routes est standardisée en utilisant la fonction d'appartenance *fuzzy* sigmoïde à décroissement monotone avec deux points de contrôle à 260m (min) - et 2 900m (max). Cette fonction est privilégiée à la fonction j-shaped car les valeurs atteignent le 0 à 2 900 mètres (figure 96).

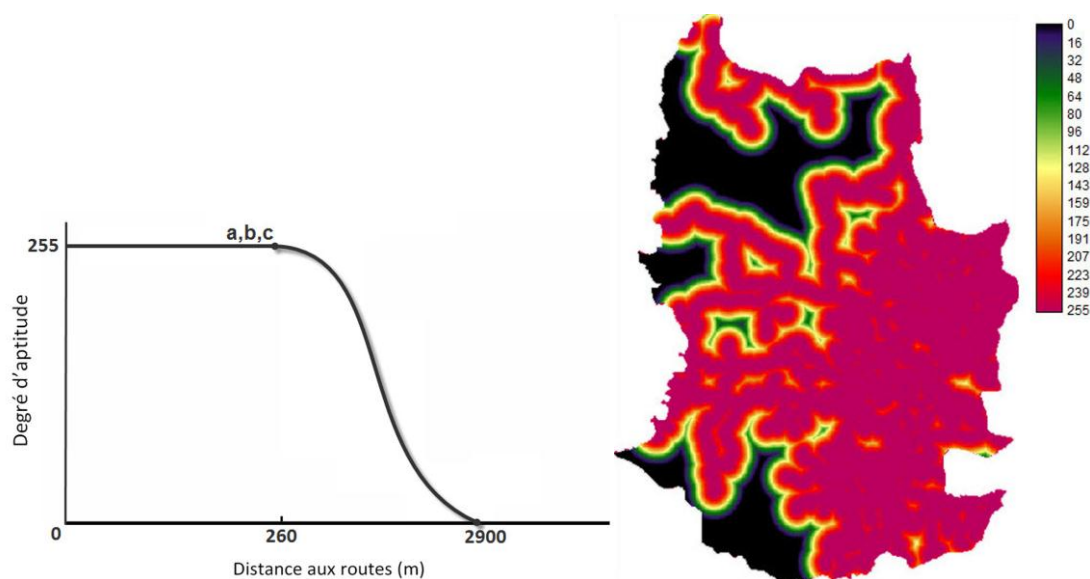


Figure 96 : Standardisation du facteur DAC

Ainsi les zones inférieures à 260m se voient attribuer une valeur maximale de 255 (ici la fonction d'appartenance est égale à 1), puis au-delà de 260m (c) et jusqu'à 2 900m la valeur décroît progressivement de 255 à 0 (la fonction d'appartenance passe graduellement de 1 à 0).

(DEN) - Les zones à distance des espaces occupés par des plantations sont plus aptes que celles qui sont éloignées. L'aptitude étant décroissante avec la distance. Ainsi la fonction d'appartenance linéaire à décroissement monotone a été appliquée afin de transformer la proximité aux entités de même nature sur une échelle continue de 0 à 255. Le point de contrôle (c) a été placé à 0m (aptitude maximale) et le point (d) à 20 606,88m (max) où la fonction d'appartenance atteint le 0 (figure 97).

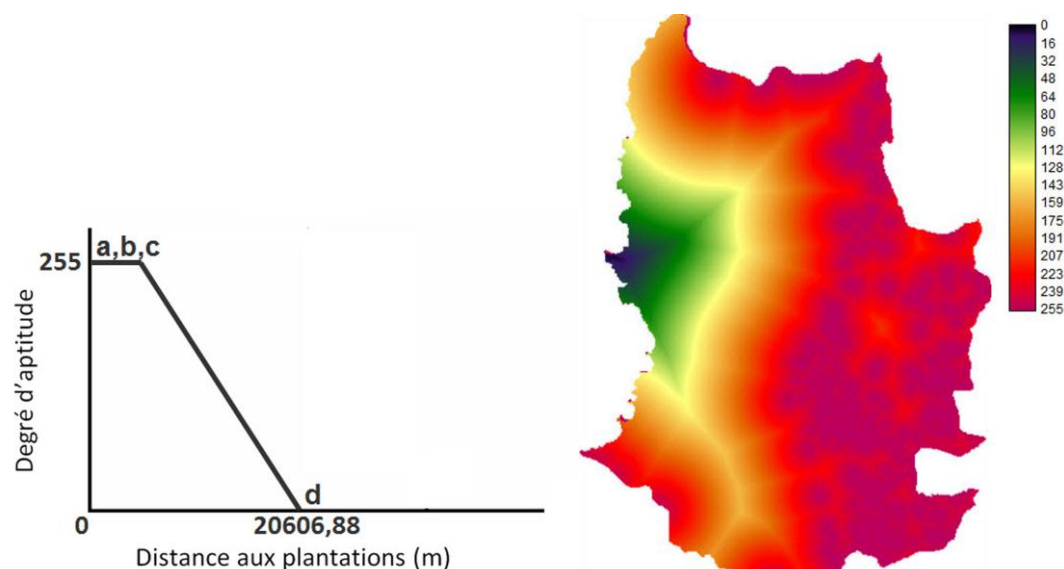


Figure 97 : Standardisation du facteur DEN

(ALT) - Les transitions vers les plantations industrielles s’opèrent majoritairement entre 40 et 300 mètres. La fonction sigmoïde symétrique a été utilisée. Quatre points de contrôle sont renseignés avec 0m (min), 40m pour le point de contrôle (b), 300m pour (c) et 360m (max) (figure 98).

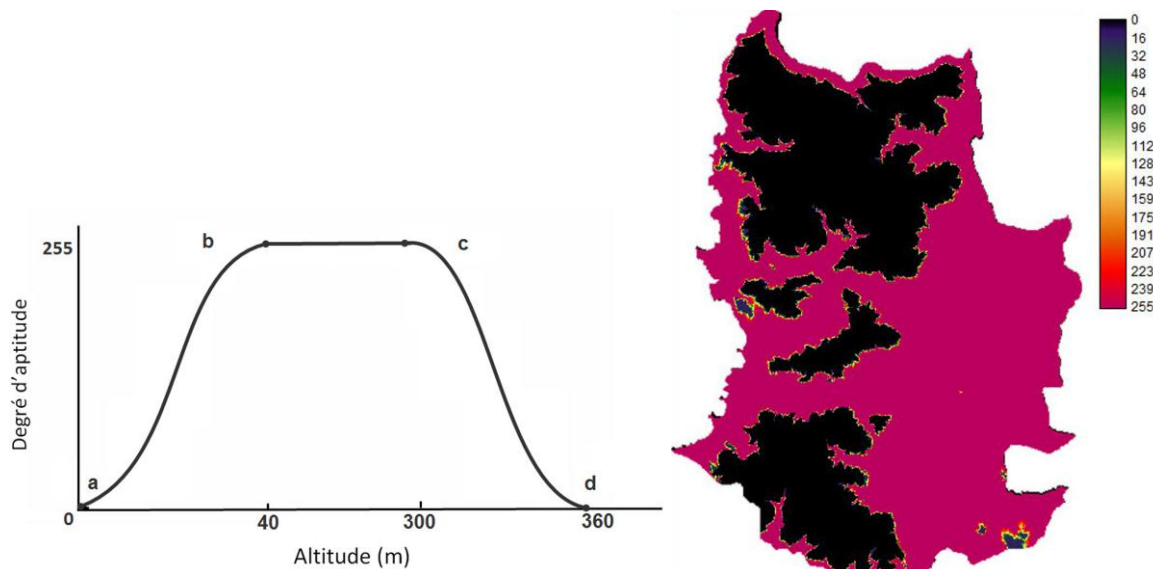


Figure 98 : Standardisation du facteur ALT

(PTE) - Plus de 70% des transitions vers les plantations se distribuent sur des pentes comprises entre 0 et 12 degrés, les valeurs chutent au-delà de cette classe. Cette variable est standardisée en utilisant la fonction d’appartenance sigmoïde à décroissement monotone avec deux points de contrôle à 12° (soit 20%) (c) et à 86° (d) correspondant à la valeur maximale (figure 99).

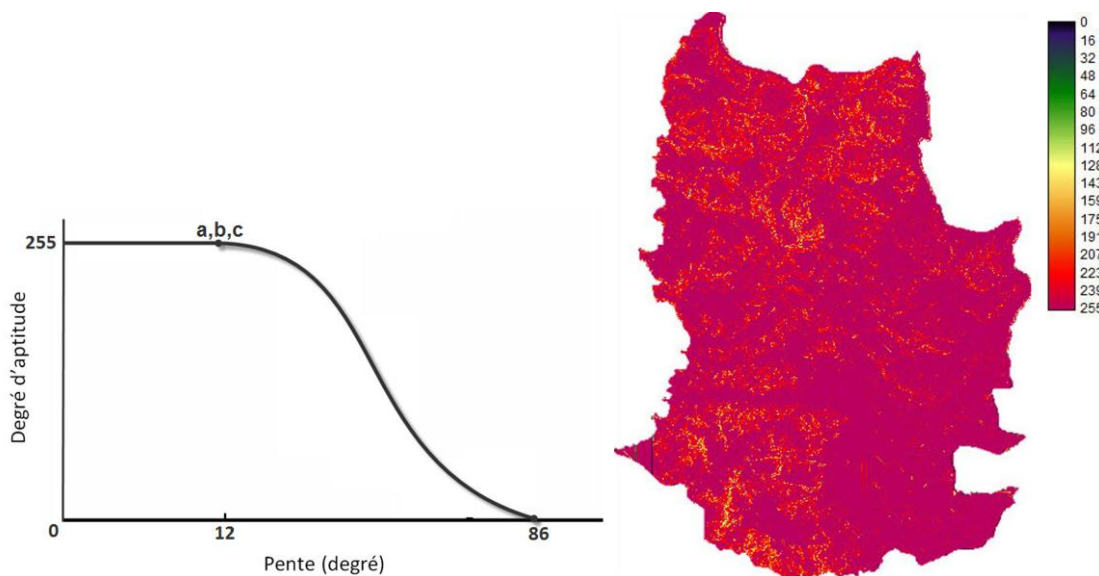


Figure 99 : Standardisation du facteur PTE

6.2.1.4. Pondération inter-facteurs et procédure d'agrégation

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). Cette technique est programmée dans le logiciel IDRISI sous la fonction WEIGHT. Des poids sont ainsi attribués à chaque facteur. Ils traduisent l'importance d'un facteur par rapport à tous les autres facteurs 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, p.159).

Les facteurs sont comparés deux par deux dans une matrice de comparaison (tableau 36) et ce en fonction de leur importance relative par rapport à l'objectif fixé. De fait, l'ensemble des facteurs se retrouvent en ligne et en colonne, ce qui permet de déterminer par exemple l'importance du facteur DEN (ligne) par rapport au facteur OS (colonne), en se basant sur l'échelle de Saaty (1977) (tableau 37). Pour l'objectif PLANTATION, le facteur DEN est modérément plus important (3) que le facteur OS, alors que PROTER est fortement plus important (7) comparé à ALT.

| | | | | | | | | |
|----------------|---------------|----------|------------|----------------|------------|----------|---------------|-----------|
| extremely | very strongly | strongly | moderately | equally | moderately | strongly | very strongly | extremely |
| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| less important | | | | more important | | | | |

Tableau 36 : Echelle de Saaty (1977)

L'approche par la méthode des vecteurs propres de l'AHP propose un ratio traduisant la cohérence des poids donnés à chacun des facteurs. Si ce ratio est supérieur à 1 alors les poids doivent être réajustés. Pour atteindre une bonne cohérence ce ratio doit se rapprocher de 1 mais ne jamais le dépasser. Ici, le ratio de cohérence est de 0,08.

| | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | OS | PROTER | CC | PMT | DEN | DAC | PTE | ALT |
| OS | 1 | | | | | | | |
| PROTER | 9 | 1 | | | | | | |
| CC | 1/3 | 1/6 | 1 | | | | | |
| PMT | 4 | 1/3 | 7 | 1 | | | | |
| DEN | 3 | 1/3 | 4 | 1 | 1 | | | |
| DAC | 1/3 | 1/4 | 3 | 1 | 1/3 | 1 | | |
| PTE | 3 | 1/3 | 3 | 1/2 | 1/3 | 2 | 1 | |
| ALT | 1/4 | 1/7 | 2 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.0793 | 0.3502 | 0.0292 | 0.1583 | 0.1682 | 0.0737 | 0.1065 | 0.0347 |
| Ratio de cohérence : 0.08 (acceptable) | | | | | | | | |

Tableau 37 : Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION

La Combinaison Linéaire Pondérée - CLP

La procédure d'agrégation est faite via une combinaison linéaire pondérée (CLP). Chaque facteur standardisé est multiplié par son poids correspondant, puis est additionné aux

autres facteurs ; la somme étant au final divisée par le nombre de facteurs. Une fois que cette moyenne est calculée pour chaque pixel, l'image résultante est multipliée par les contraintes booléennes (Eastman, 2006) (figure 100). La CLP (stratégie n°3 – figure 101) permet une compensation totale entre facteurs moyennant ainsi le risque qui se situe à mi-chemin entre le ET logique (minimisation du risque) et le OU logique (maximisation du risque). Makropoulos et Butler (2006) notent que « *all criteria that are taken into account in the decision process are generally not equally important to the expected outcome* ». Il est alors possible de contrôler le niveau de compensation entre les facteurs ainsi que le niveau de risque dans la détermination des aptitudes (Eastmann, 2006) grâce à la technique OWA (*Ordered Weighted Averaging*), en appliquant une deuxième série de poids (poids d'ordre) aux facteurs. Comme le remarquent Alexandra Gemitzi *et al.* (2007) « *order weights are quite different from factor weights. They do not apply to any specific factor* ».

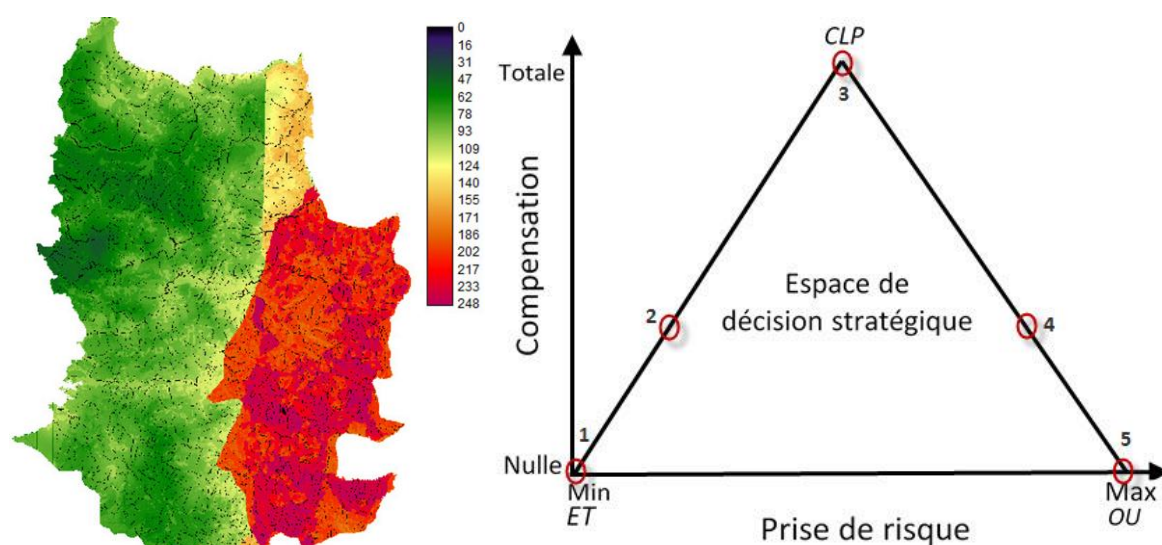


Figure 100 : Objectif PLANTATION - CLP Figure 101 : Espace de décision illustrant les poids d'ordre

Lissage selon les poids d'ordre - OWA

Cette technique permet un double choix – celui de la compensation entre facteurs et la prise de risque - (figure 101). La pondération s'applique différemment à chaque pixel selon le classement des aptitudes, de la plus faible (1er rang) à la plus forte (dernier rang) « *the first order weight is assigned to the factor with the lowest weighted suitability. The last order weight is assigned to the highest suitability among the weighted factors for the considered pixel* » (Paegelow et Camacho Olmedo, 2005) (tableau 38).

Cinq séries de poids d'ordre – ou stratégies – sont identifiées :

- (1) Prise de risque minimum – sans compensation entre les facteurs
- (2) Prise de risque faible – peu de compensation (approche conservatrice)
- (3) Prise de risque moyenne – compensation totale (CLP)
- (4) Prise de risque élevée – peu de compensation
- (5) Prise de risque maximum – pas de compensation

La stratégie n°3 (CLP) attribue le même poids d'ordre (0,125) à chacun des facteurs à chaque localisation donnée (pixel), donnant une probabilité égale aux résultats possibles à cet endroit. L'analyse rétrospective montre que l'essentiel - mais pas la totalité - des plantations se concentre là où se trouvent des propriétés terriennes, c'est-à-dire sur le piémont. De plus, chaque facteur n'a pas la même influence sur la localisation des plantations exotiques (tableau 37). La stratégie n°4 (*optimistic strategy*) donne trop d'importance aux pixels ayant une valeur d'aptitude élevée aux dépens de critères ayant des valeurs faibles, ce qui ne tiendrait pas compte des lois d'incitation aux boisements auprès des petits propriétaires (aptitude faible) prévus entre 1999 et 2008. La stratégie n°2 (prise de risque faible et peu de compensation – *pessimistic strategy*) donne un poids plus fort aux facteurs ayant un degré d'aptitude plus faible (tableau 38). Elle implique, d'après Malczewski *et al.* (2003), « *that relatively higher and higher probabilities (ordered weights) are assigned to the higher ranking criterion values at a given location at the expense of assigning smaller probabilities to the lower ranking criterion values for that location* ». Par conséquent, nous optons pour cette stratégie conservatrice en termes de prise de risque dans la décision. La compensation est limitée et la prise de risque également. Ainsi ces facteurs très favorables ne peuvent compenser une localisation dont plusieurs facteurs sont peu aptes.

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Poids d'ordre | 0.4 | 0.25 | 0.15 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th |

**Tableau 38 : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif plantation) –
Prise de risque faible, peu de compensation (2)**

La pondération pour l'objectif FORET NATIVE et AUTRE est détaillé en annexe 8 page 335.

6.2.1.5. Résultats

Trois cartes d'aptitude, correspondant aux trois objectifs fixés, sont générées (figure 102). Elles seront croisées avec la matrice de transition markovienne et un filtre de contiguïté spatiale (5 x 5) afin de projeter l'occupation du sol en 2008.

La carte d'aptitude des plantations fait clairement émerger les zones de potentialités sur le piémont (en beige et orange), alors que la Cordillère de la Côte présente un niveau d'aptitude très faible (entre 10 et 30). Le cas de la forêt native est révélateur de la distribution observée au cours des périodes 1986-1999 et 1999-2008, avec une aptitude très forte sur la Cordillère (orange et magenta) et une aptitude sensiblement supérieure à la moyenne sur le piémont (150). Enfin la carte d'aptitude pour la catégorie « autre » affiche des résultats très élevés sur l'ensemble de la commune (supérieur à 200), excepté une zone située au nord-ouest (150).

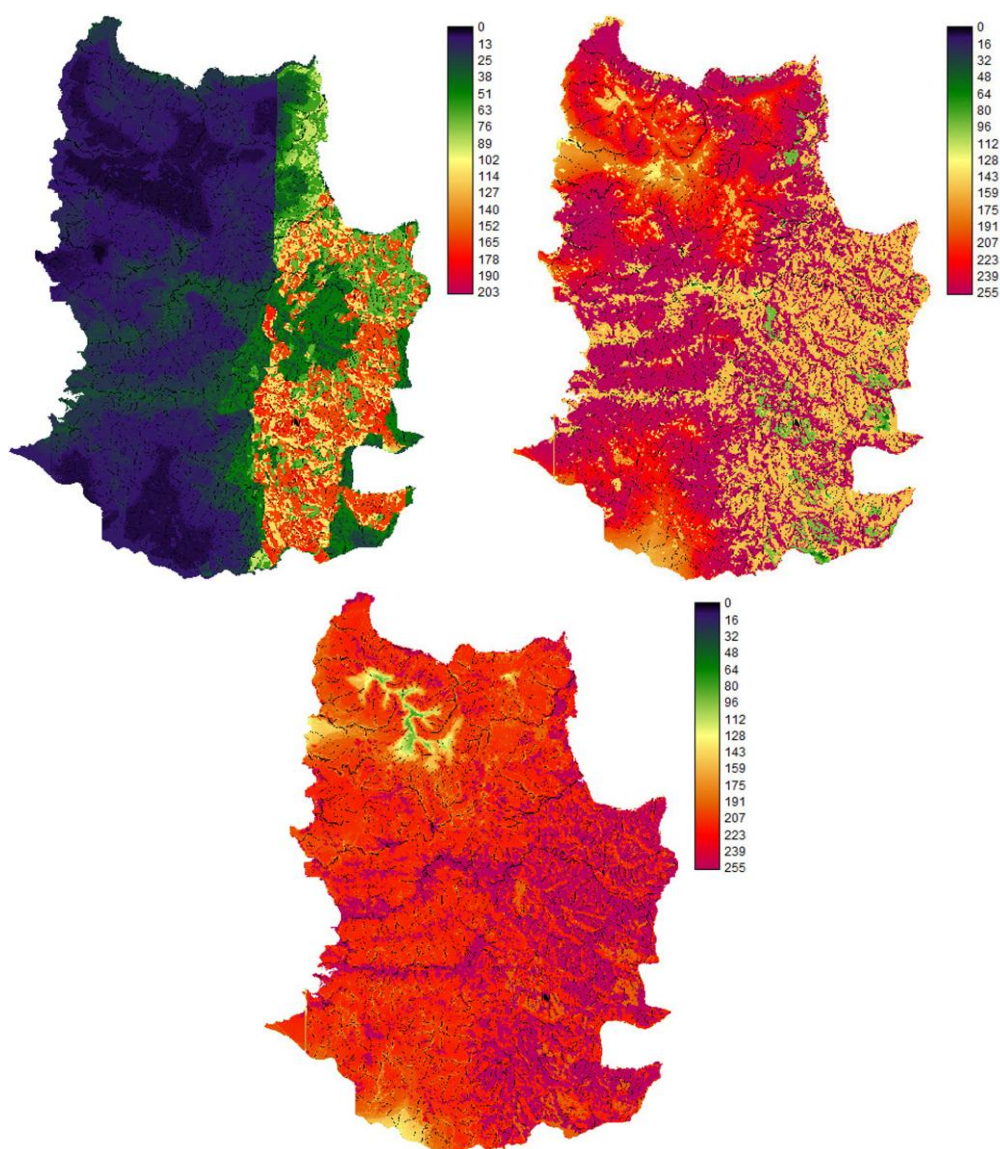


Figure 102 : Carte d'aptitude pour les plantations (en haut à gauche), la forêt native (en haut à droite) et la catégorie « autre » (en bas)

6.2.2. Land Change Modeler

A la différence de CA-Markov, LCM permet de calibrer automatiquement le modèle grâce à un réseau neuronal perceptron multicouche. Avant de prédire l'occupation du sol en 2008, la calibration du modèle passe par trois phases : (i) la détermination des principales transitions observées entre 1986 et 1999, avec leur regroupement (non-systématique) en sous-modèles de transitions, (ii) la sélection des variables explicatives de chaque transition et (iii) la phase d'entraînement du MLP comprenant l'élaboration de cartes de probabilité de transitions.

6.2.2.1. Transitions et sous-modèles de transitions

Une transition représente le passage d'un type d'occupation du sol (forêt native par exemple) à un autre (plantation). L'analyse des changements entre 1986 et 1999 (cf. chapitre 4) met en évidence quatre catégories de transitions : (i) de la forêt native vers « autre », (ii) de

la forêt native vers les plantations, (iii) de « autre » vers les plantations et (iv) de « autre » vers la forêt native ». Ces quatre transitions ont ensuite été agrégées en trois dynamiques majeures²¹⁴ (tableau 39) : déforestation, (re)-boisement et régénération.

| Transition | Processus de changement (sous-modèle) | Explication |
|---------------------------|---------------------------------------|---|
| Forêt native → autre | Déforestation | Conversion de forêt native en une autre catégorie d'utilisation du sol |
| Forêt native → plantation | (Re)-boisement | Transition de tout type d'occupation vers des plantations exotiques (substitution et boisement) |
| Autre → plantation | | |
| Autre → forêt native | Régénération | Transition de tout type d'occupation vers des formations natives (secondaire) ²¹⁵ |

Tableau 39 : Transition et sous-modèles de transition

6.2.2.2. Sélection des variables

La sélection et l'intégration des variables d'entrée tiennent compte de l'analyse réalisée dans le chapitre 5. LCM fait la distinction entre deux types de variables : (i) les variables statiques expriment l'aptitude basique pour la transition prise en considération et restent stable au cours du temps, et (ii) les variables dynamiques qui sont temporellement dépendantes (proximité aux routes, proximité au TOS déjà existant, infrastructures, etc.) et sont recalculées à chaque étape de temps durant le processus de prédiction. Les tableaux ci-dessous présentent, pour chaque transition, les variables explicatives qui les caractérisent.

| DEFORESTATION | | | |
|---------------------|---------|------------------|-----------|
| Variable | Role | Basis layer type | Operation |
| ALT | Static | ----- | ----- |
| DAC | Dynamic | Road | Distance |
| PTE | Static | ----- | ----- |
| DEN_forêt native 99 | Dynamic | Land cover | Distance |
| DEN_autre 99 | Dynamic | Land cover | Distance |

Tableau 40 : Variables spatialement explicites pour la transition DEFORESTATION

| RÉGÉNÉRATION | | | |
|---------------------|---------|------------------|-----------|
| Variable | Role | Basis layer type | Operation |
| ALT | Static | ----- | ----- |
| DAC | Dynamic | Road | Distance |
| PTE | Static | ----- | ----- |
| DEN_forêt native 99 | Dynamic | Land cover | Distance |
| DEN_autre 99 | Dynamic | Land cover | Distance |

Tableau 41 : Variables spatialement explicites pour la transition REGENERATION

²¹⁴ Neuf catégories de transitions sont automatiquement détectées par le logiciel. L'application d'un filtre spatial de 70 hectares a permis d'extraire les pixels isolés, en particulier ceux correspondant à l'eau.

²¹⁵ Seule la régénération de forêts natives secondaires est prise en compte. Le cycle de succession de forêts primaires est beaucoup trop long afin de l'intégrer dans le modèle. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les zones de forêt native secondaires sont laissées en tant que "forêt native" afin de faire émerger des zones potentielles de colonisation, en vue de leur conservation dans le futur.

| PLANTATION | | | |
|---------------------|---------|------------------|-----------|
| Variable | Role | Basis layer type | Operation |
| ALT | Static | ----- | ----- |
| DAC | Dynamic | Road | Distance |
| PTE | Static | ----- | ----- |
| PROTER | Static | ----- | ----- |
| DEN_forêt native 99 | Dynamic | Land cover | Distance |
| DEN_autre 99 | Dynamic | Land cover | Distance |
| DEN_plantation 99 | Dynamic | Land cover | Distance |

Tableau 42 : Variables spatialement explicites pour la transition PLANTATION

6.2.2.3. Les cartes de probabilité de transition (1999-2008)

Ces cartes de probabilité de transition (figures 103 et 104) sont générées par le réseau neuronal en combinant une carte de transition (1986-1999) aux variables explicatives de ces changements. Le terme « *potential map* » correspond d'après Oh Seok Kim (2010, p. 640) aux cartes de « *suitability* (Eastman 2006), *lubrication* (Pontius and Chen 2006), *favorability* (Soares-Filho et al. 2003), *potential land-use change* (Brown et al. 2007), and *vulnerability* (Eastman 2007) ».

Le réseau neuronal MLP est composé de trois couches: la couche d'entrée avec autant de nœuds qu'il y a de variables sélectionnées, la couche cachée avec le même nombre de nœuds, et la couche de sortie avec autant de nœuds qu'il y a de cartes de transition. A ce stade, « *the MLP is operating in automatic mode whereby it makes its own decisions about the parameters to be used and how they should be changed to better model the data* » (Eastman, 2009). Les cartes résultantes correspondent à chacune des transitions susmentionnées en exprimant, pour chaque pixel, leur probabilité graduelle d'occurrence sur une échelle continue de 0 à 1. Si elles mettent en exergue les zones potentiellement soumises à des changements, elles ne disent pas ce qui changera. J.R. Eastman (2005, p. 345, in : Kim, 2010) définit ces cartes comme « *a degree to which locations might potentially change in a future period of time* ».

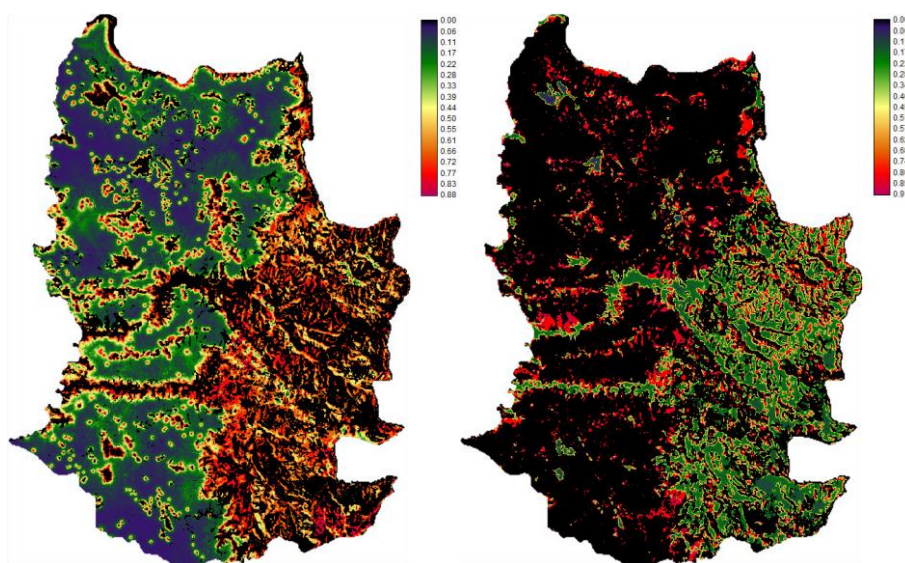


Figure 103 : Cartes de transition potentielle - DEFORESTATION (à gauche) et COLONISATION NATURELLE (à droite)

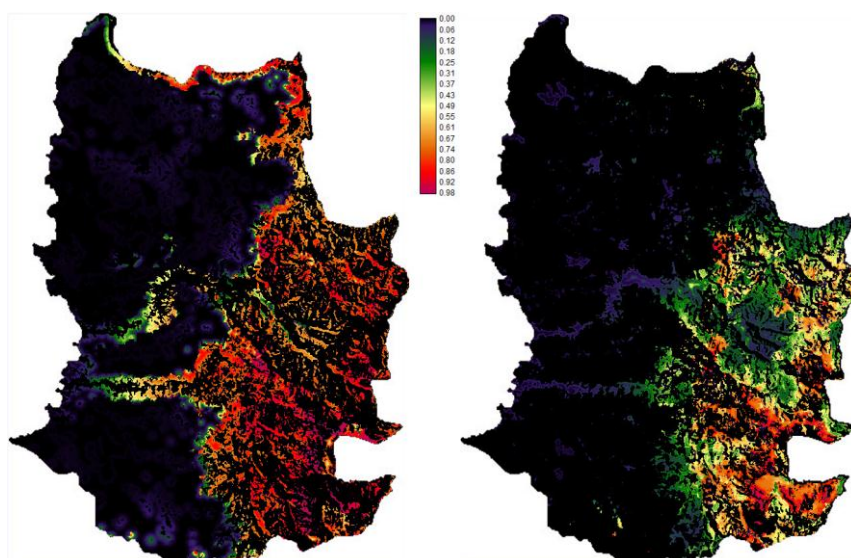


Figure 104 : Cartes de transition potentielle - PLANTATION

6.2.2.4. Allocation spatiale des changements

L'allocation spatiale des changements entre 1999 et 2008 s'appuie sur une *competitive land allocation* qui se rapproche du processus de décision multi-objectif (MOLA). *A contrario* des cartes de probabilités susmentionnées (*soft prediction*), les éditeurs du logiciel appellent cette prédiction « *hard prediction* ».

En s'appuyant sur les variables explicatives et les quatre cartes de probabilités de transitions, le MOLA va attribuer la distribution idéale pour chaque type d'occupation du sol. La quantification des changements se fait grâce aux chaînes markoviennes qui prennent en compte les dynamiques passées et les probabilités de transitions entre chaque type d'occupation du sol. Par exemple, afin d'allouer la catégorie « autre » aux plantations, le MOLA va utiliser la carte de probabilité de transition de la catégorie « autre » vers les plantations (PLANTATION) et y combiner la quantité de changement correspondante. Le MOLA va attribuer aux pixels ayant la plus forte probabilité la classe « plantation ».

La figure 105 ci-dessous retranscrit chacune des étapes de la calibration pour les deux modèles.

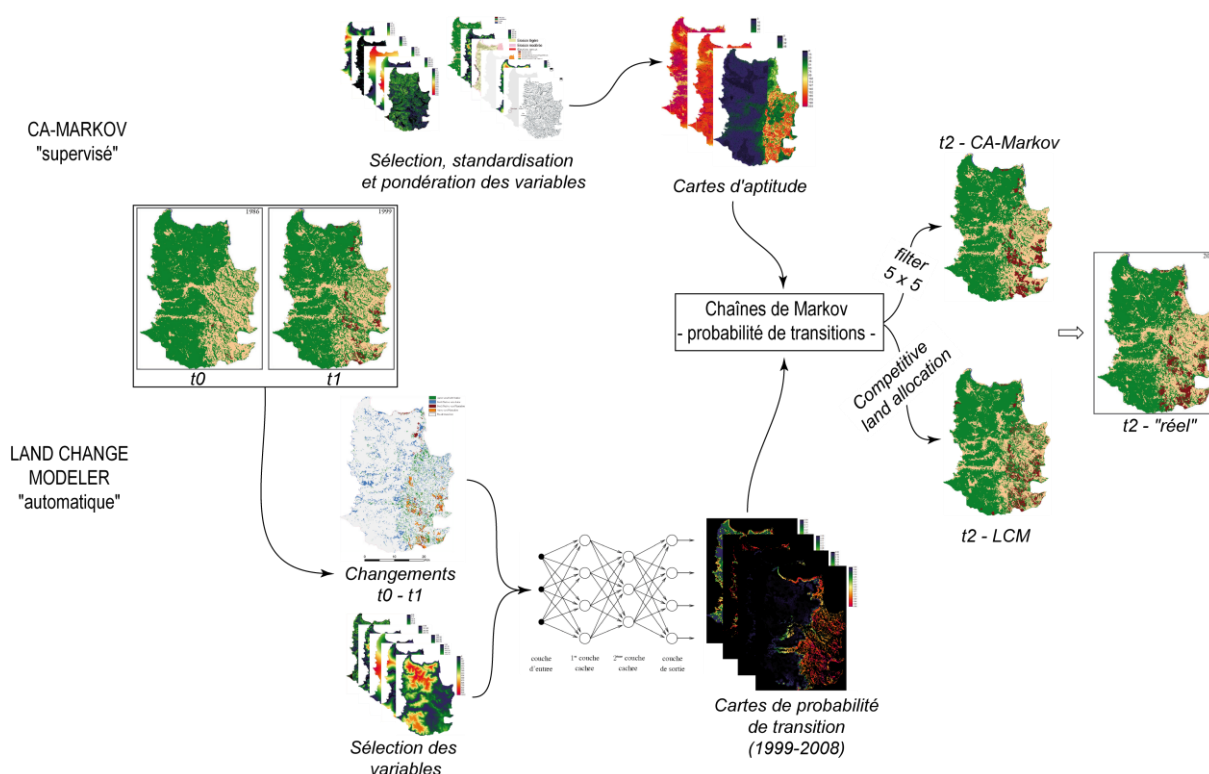


Figure 105 : Organigramme du processus de calibration de CA-Markov et LCM

6.3. Résultats et validation

La matrice de Markov entre 1999 et 2008 (tableau 43) indique la probabilité en pourcentage dont dispose chaque catégorie en 1999 de changer pour une autre catégorie – ou de rester stable – en 2008. On remarque une nette stabilité globale avec un maximum pour les plantations et l'eau. Les transitions s'opèrent de la catégorie « autre » vers FN et les plantations, et de FN vers la catégorie « autre » et plantations. Le tableau suppose qu'il y a une plus forte probabilité pour la FN de devenir « autre » que d'être convertie en monoculture (9% contre 1%). Cette dynamique suggère deux logiques de substitution. La première, que l'on peut qualifier d'indirecte, consiste en une dégradation de la forêt suivie par une conversion en terre arable ou prairie ou simplement son abandon, pour, à terme, finir en plantation. La deuxième est une substitution directe et traduit un remplacement immédiat par du pin ou de l'eucalyptus. Les zones classées comme « autre » sont recolonisées par de la forêt native (14%) et seulement 4% par des plantations.

| 1999 | 2008 | | | |
|--------------|------------|--------------|-------|------|
| | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau |
| Plantation | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Forêt Native | 0.02 | 0.90 | 0.09 | 0.00 |
| Autre | 0.08 | 0.14 | 0.77 | 0.00 |
| Eau | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

Tableau 43 : Probabilité de transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en pourcentages)

La figure 106 montre, pour 2008, l'occupation du sol observée et simulée. On remarque que la distribution des types d'occupation du sol est bien simulée, avec les forêts natives sur la Cordillère de la Côte (à l'ouest), les plantations sur la précordillère (à l'est) et la catégorie "autre" répartie sur l'ensemble de commune. CA-Markov et LCM sous-estiment l'expansion des monocultures, principalement dans le sud-est de la commune. L'analyse détaillée des concordances et des discordances entre les deux modèles et la carte de référence sera abordée en fin de chapitre.

Si l'examen visuel donne une première estimation de la qualité de la prédiction en comparant la carte de référence 2008 et la simulation 2008, cette approche ne permet pas de localiser et de quantifier avec précision les zones d'erreurs et celles correctement prédites qui auraient échappé à la vigilance de l'observateur. Afin de dépasser la subjectivité du modélisateur, Pontius *et al.* (2004) montrent l'intérêt d'une comparaison statistique entre ces cartes. Voici une présentation synthétique des trois méthodes qui vont être mobilisées afin d'évaluer et de valider les modèles (chacune d'entre-elle sera détaillée dans les pages suivantes):

- LUCC-budgets (Pontius *et al.*, 2004)

En comparant deux cartes d'occupation du sol à deux dates différentes ($t1-t2$) cette budgétisation met en exergue les composantes de la dynamique – *dominant signals of land change* –. L'objectif est de comparer deux LUCC-budgets ($t1-t2$ et $t1-t2$ prédit) afin de caractériser les erreurs.

- ROC (Pontius et Schneider, 2001)

Bien qu'il ne sépare pas les erreurs dues à la quantité des erreurs dues à la localisation, le *Relative Operating Characteristic* évalue la qualité de la prédiction en termes de localisation. Cette évaluation se fait en comparant une carte binaire (occupation du sol) et une carte d'aptitude.

- Budgétisation des erreurs/exactitudes (Chen et Pontius, 2010)

Cette méthode permet de quantifier et de localiser les erreurs/exactitudes des changements issus du croisement de deux cartes de référence ($t1$ et $t2$) et d'une carte de prédiction ($t2$). La comparaison des changements observés et prédits génère quatre catégories de pixels : *null successes, false alarms, hits* et *misses*.

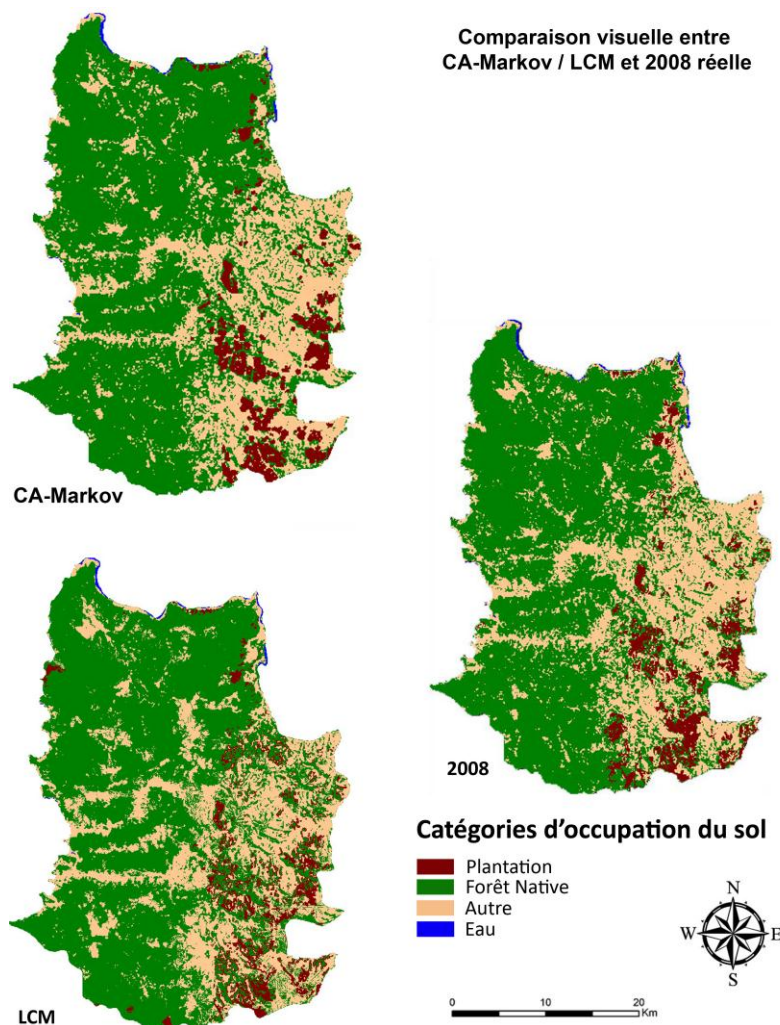


Figure 106 : Comparaison visuelle entre "paysage simulé" (CA-Markov et LCM) et "paysage réel" en 2008

6.3.1. CA-Markov – validation

6.3.1.1. Analyse des résidus (LUCC-budgets)

Une première technique permettant d’analyser le changement d’occupation du sol entre deux dates, pouvant servir également à comparer une date observée et une autre simulée, est proposée par Pontius *et al.* (2004). Les auteurs partent du constat que « *the problem is that scientists usually already know that persistence dominates the landscape. Scientists want to identify the dominant signals of land change* ». Pour se faire, ils proposent de « *identify the signals of change separately from any given level of persistence* ». Quatre « signaux » de changement sont déterminés:

- (i) Loss – perte : différence entre le total (ligne) et la persistance
- (ii) Gain : différence entre le total (colonne) et la persistance
- (iii) Net change – solde : différence absolue entre le total de la date $t1$ et $t2$ (ou entre gain et loss)
- (iv) Swap : différence entre la totalité des changements (gain et loss) et le net change

Le swap correspond à des changements d'allocation spatiale une fois le solde (soustraction des gains et des pertes) soustrait. Par exemple, une catégorie d'occupation du sol enregistre un gain de 30 ha entre deux dates ainsi qu'une perte de 20 ha durant la même période. Le changement total s'élève alors à 50 ha, le solde (net change) de + 10ha et le swap à 40 ha. Bien que la surface de la catégorie d'occupation en question n'a augmenté que de 10 ha ce solde cache des dynamiques spatio-temporelles importantes : 50 ha de l'espace ont été modifié

Les plantations représentaient 2,7 % du paysage en 1999 et 6,4 % en 2008. La figure 107 montre que les changements observés pour cette catégorie sont uniquement des changements nets (3,7 %), aucune perte n'a été observée ce qui implique également un swap zéro. La figure montre que le modèle CA-Markov simule parfaitement cette dynamique.

La forêt native est la deuxième catégorie en termes de changement total (7,9 % - swap : 3 % et net change : 4,8 %). Le modèle a clairement sous-estimé le total change (3,9 %) ce qui est principalement due à la minimisation des pertes (3,4 % contre 6,4 %) et à une persistance plus élevée (64,1% contre 61,2 %). Malgré tout la proportion entre le swap et le net change est correctement simulée.

La catégorie « autre » présente le total change le plus élevé avec 9,1 %. Ces changements ne sont pas imputables au net change (1,2 %), mais bien au swap (7,9 %) qui traduit une perte à un endroit donné (boisement et recolonisation naturelle – 4 %), contrebalancée par un gain à un autre endroit (déforestation – 5,1 %). Bien que le modèle ait sous-estimé le changement total avec 4,7 % (due principalement aux 2 % de déforestation simulée contre 5,1 % d'observée), la proportion entre le net change et le swap est correcte.

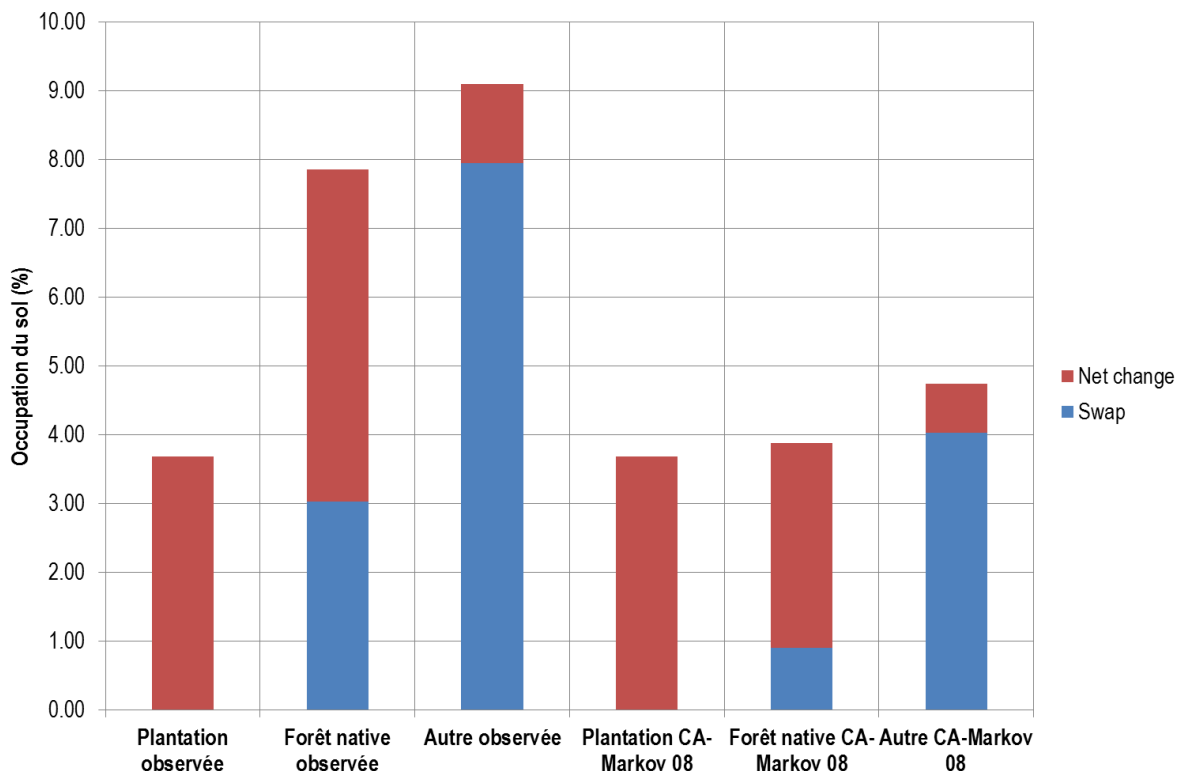


Figure 107 : Comparaison entre le LUCC-budget réel (1999-2008) et le LUCC-budget simulé (1999 réel – 2008 CA-Markov). La barre totale (net change + swap) représente le % total de changement.

Afin de caractériser les sous (et sur-) estimations du modèle vis-à-vis de la carte observée, autrement dit de comprendre d'où viennent les erreurs (ou résidus), la carte d'occupation du sol en 2008 est comparée à la simulation CA-Markov en 2008. Cette comparaison met en exergue deux informations : (i) la part des concordances spatiales en diagonale de la figure 108 (cylindres à rayures) et (ii) les résidus qui représentent les types d'occupation du sol simulés qui ne correspondent pas à l'observation.

Sur les 6,4% de plantations simulées en 2008, 3,7% concordent avec l'observation. Les 2,73% restant (0,99% de forêt native et 1,74% de "autre") correspondent aux résidus (gain ou M – figure 111, page 245). Ils se localisent, pour la plupart, à proximité des plantations observées. *A contrario*, les autres résidus (perte ou F) (2,02% de "autre" et 0,71% de forêt native) traduisent des erreurs de simulation où le modèle omet l'apparition de nouvelles plantations.

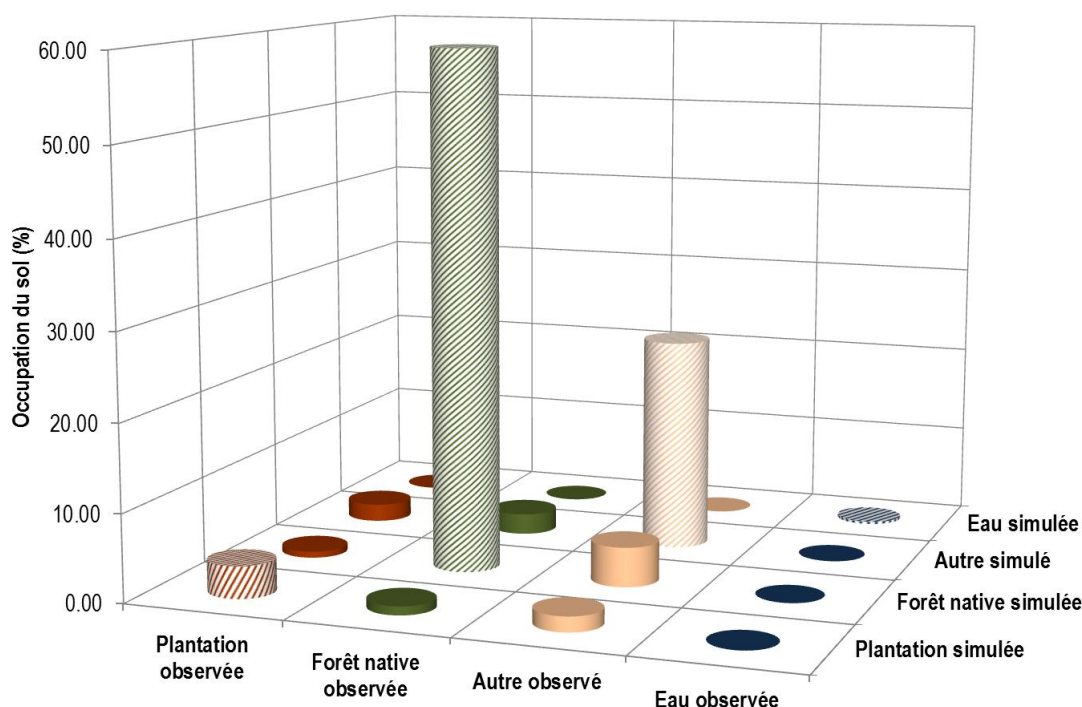


Figure 108 : Observation des résidus entre l'occupation du sol observée et simulée (CA-Markov). Les cylindres à rayures représentent les concordances

6.3.1.2. Relative Operating Characteristic (ROC)

Cette mesure statistique teste la similitude entre une carte binaire et une carte d'aptitude en termes de localisation. D'après Pontius et Schneider (2001) « *the ROC works for exactly two land types. If the modeler has more than two land-cover types, then the modeler can create an ROC for each land type* ». Les trois classes ont été isolées et évaluées indépendamment les unes des autres.

Pour les plantations, ROC va classer par ordre décroissant leurs catégories d'aptitude dont les seuils sont définis par le modélisateur. L'occurrence de chaque classe résultante est comparée avec la carte réelle de localisation (Paegelow et Camacho Olmedo, 2008) pour

déterminer si elle correspond réellement à des plantations (*true positive*²¹⁶) ou des non-plantations (*false positive*).

La mesure de la performance est déterminée par *the Area Under the Curve* (AUC). Si les valeurs d'aptitude du type d'occupation du sol en question correspondent parfaitement à sa localisation sur la carte réellement observée, alors le ROC sera égal à 1. Dans ce sens, « *a highly predictive model will produce a curve that rises rapidly from the lower left to a point near the upper left corner and then moves slowly near the upper edge of the graph to reach the upper right hand corner* » (Pérez Vega *et al.*, 2012). Si les valeurs d'aptitude étaient distribuées de manière aléatoire entre plantation et non-plantation par exemple, le ROC serait de 0,5 (*random distribution* sur la figure 109). L'AUC pour les plantations simulées par CA-Markov est de 0,90, de 0,87 pour la forêt native et de 0,84 pour la classe « autre », ce qui montre que le modèle a pris en compte les valeurs d'aptitude pour chacune des classes afin d'assurer leur localisation.

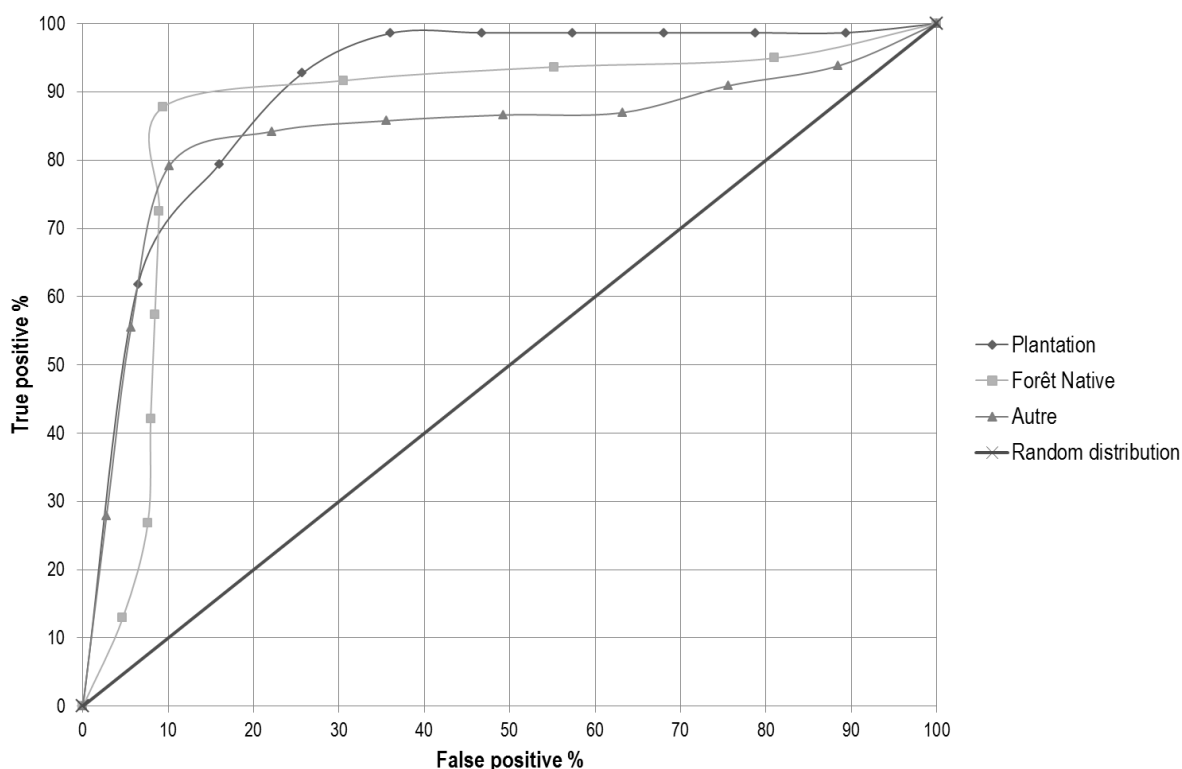


Figure 109 : ROC pour le modèle CA-Markov

6.3.1.3. Budgétisation des erreurs/exactitudes

Tenant compte des récentes critiques portant sur les limites des indices de Kappa (Kno, Klocation, Kquantity, Kstandard) (Pontius et Millones, 2008), la validation se base sur la récente étude de Chen et Pontius (2010) qui propose une méthode permettant de quantifier

²¹⁶ « *If a grid cell is simulated as change in a scenario, it is a 'positive'. Therefore, a 'true-positive' is a cell that is categorized as change in both reality and the modeled scenario. A 'false-positive' is a cell that is categorized as non-change in reality and as change in the modeled scenario* » (Pontius et Schneider, 2001, p.244). Le lecteur doit substituer "plantation" à "change" et "non-plantation" à "non change".

et visualiser les relations entre les changements d'occupation du sol et des variables explicatives²¹⁷. Notre intérêt s'est porté sur la "budgétisation" des erreurs et des prédictions correctes. Les auteurs distinguent quatre catégories de pixels avec (i) les pixels corrects en raison d'une constance observée et prédite (*null successes [N]*), (ii) les erreurs en raison d'une constance observée mais prédite comme changée (*false alarms [F]*), (iii) les pixels corrects dus à un changement observé et prédit (*hits [H]*) et (iv) les erreurs dues à un changement observé mais prédit comme constant (*misses [M]*).

Pour juger la précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage ils avancent une méthode permettant de mesurer les erreurs (en % du paysage) en raison de la quantité et celles en raison de l'allocation en s'appuyant sur les résultats de la budgétisation susmentionnée (tableau 44).

$$\begin{aligned} \text{OC} &: \text{changement observé en pourcentage du paysage} \\ \text{PC} &: \text{changement prédit} \\ \text{Q} &: \text{erreur en raison de la quantité des changements prédits} \\ \text{Q} &= |\text{PC} - \text{OC}| = |(\text{F} + \text{H}) - (\text{M} + \text{H})| = |\text{F} - \text{M}| \\ \text{A} &: \text{erreur en raison de l'allocation des changements prédits} \\ \text{A} &= (\text{F} + \text{M}) - \text{Q} = 2 \times \text{MIN}(\text{F}, \text{M}) \\ \text{T} &: \text{erreur totale} \\ \text{T} &= \text{F} + \text{M} = \text{Q} + \text{A} \end{aligned}$$

Tableau 44 : Mesure des erreurs et des exactitudes

L'erreur due à la quantité de changement prédit mesure le pourcentage d'imperfection de la correspondance entre la quantité de changement observée et prédite. L'erreur due à l'allocation mesure le degré d'approximation de la correspondance dans l'allocation spatiale des changements, compte tenu de la spécification de la quantité des changements dans les cartes de changements observés et prédits.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode, la carte des changements observés entre 1999 et 2008 et celle des changements prédits doivent être croisées. Pour y parvenir la fonction CROSSTAB a été utilisée générant un tableau de contingence.

La validation du modèle se déroule en deux étapes, en se focalisant tout d'abord sur l'analyse des changements prédits et observés entre 1999 et 2008, puis en comparant le cas des plantations entre la carte d'occupation connue et la prédiction.

86% de la constance observée (sur un total de 90%) entre 1999 et 2008 a été correctement prédite (N) (tableau 45 et figure 110). La prédominance de la forêt native et sa stabilité à l'échelle communale comparativement aux autres types d'occupation explique en partie ce résultat. Les erreurs, en raison d'une constance observée mais prédite comme changée, sont de 4% (F), alors que les *misses* qui traduisent le processus inverse atteignent les 8%. Enfin les changements observés ayant été correctement prédits par le modèle sont de 2% (H). Le total des changements observés (OC = M + H) est de 10% alors que les changements totaux prédits (PC = F + H) ont été sous-estimés avec 6%. La précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage est la suivante :

²¹⁷ L'objectif des auteurs n'est pas de comparer une image de référence à une simulation à une date t2, mais bien de comparer les changements observés et simulés entre une date t1 et t2.

Erreur de quantité (Q) = |F – M| = 4% Erreur d'allocation (A) = (F + M) - Q = 12% Erreur totale (Q + A) = 14%

| % | | Changements observés 99-08 | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|------|-------|
| | | 0 | 1 | Total |
| Changements prédits 99-08 | 0 | 0.86 | 0.08 | 0.94 |
| | 1 | 0.04 | 0.02 | 0.06 |
| | Total | 0.90 | 0.10 | 1.00 |

Tableau 45 : Matrice de contingence entre les changements observés et les changements prédits – CA-Markov

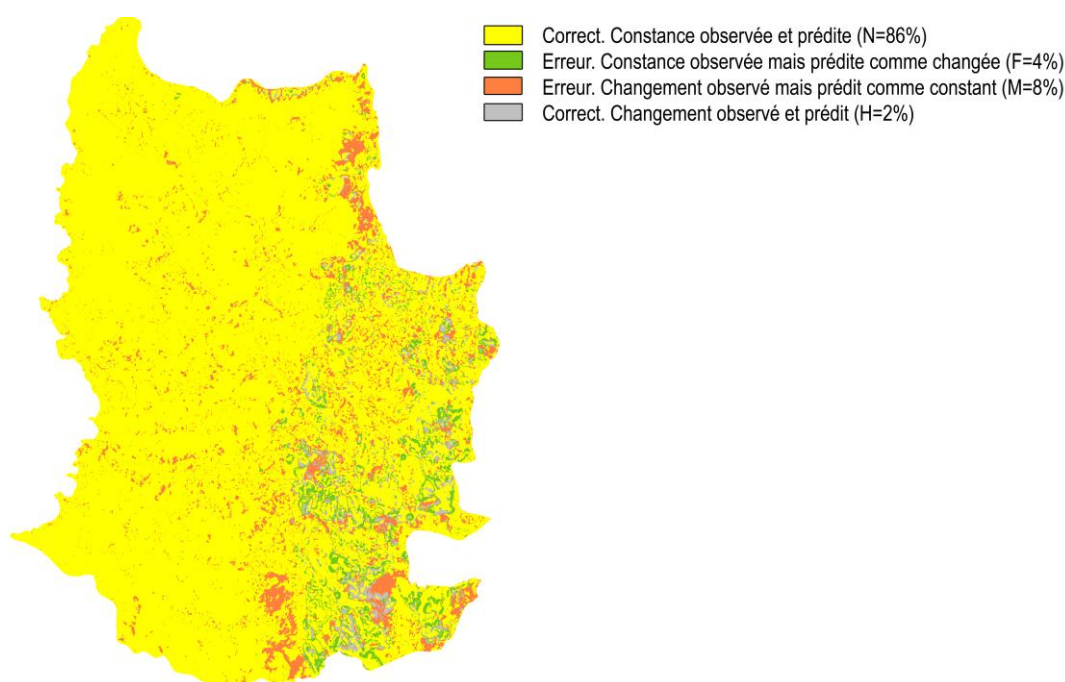


Figure 110 : Exactitudes et erreurs de la prédiction – CA-Markov

Les taux d'exactitudes et d'erreurs renseignent l'ensemble des types d'occupation, mais ne donnent pas de précision pour chaque catégorie d'occupation. Pour obtenir ces résultats un tableau de contingence à trois entrées est mis en place, avec en ligne la carte de 2008, en colonne la carte de 1999 et en troisième entrée la simulation de 2008. La validation des changements par type d'occupation du sol montre que le modèle prédit 40% de changement (PC) pour les plantations alors que les changements réels (OC) pour cette catégorie ne sont que de 18%. Les erreurs dues à la quantité sont de 22% alors que celles dues à la distribution sont nulles.

La confrontation des deux modèles (simulé – observé) (tableau 46) exprime la concordance et la discordance spatiale des plantations. La valeur 1 représente les plantations alors que le 0 caractérise un autre type d'occupation du sol (forêt native ou "autre"). On remarque que 57% des plantations sont correctement prédites par le modèle, et que par conséquent ce dernier a omis près de 43% d'entre-elles (4 212,5 ha).

La figure 111 traduit cartographiquement et graphiquement le pourcentage d'exactitudes et d'erreurs pour les plantations. Le segment supérieur exprime un taux d'exactitude (N) lié à un type d'occupation du sol (autre que plantation) observé et simulé en

2008. Le résultat extrêmement élevé (91%) s'explique par la faible part qu'occupent les plantations à l'échelle de la commune comparativement aux autres types d'occupation du sol. Le segment suivant correspond à une première erreur due à l'observation de plantations en 2008 n'ayant pas été simulées (F=3%). Le même résultat est obtenu *a contrario* pour les plantations simulées mais observées comme autre (M=3%). Enfin, 4% du paysage est simulé et observé comme étant des plantations (H).

| Hectares | | plantation 08 réel | | |
|-------------------------|-------|--------------------|----------|------------|
| | | 0 | 1 | Total |
| plantation CA-Markov | 0 | 140 338.62 | 4 207.32 | 144 545.94 |
| | 1 | 4 212.45 | 5 672.25 | 9 884.70 |
| | Total | 144 551.07 | 9 879.57 | 154 430.64 |

Tableau 46 : Concordance et discordance spatiale des plantations – CA-Markov

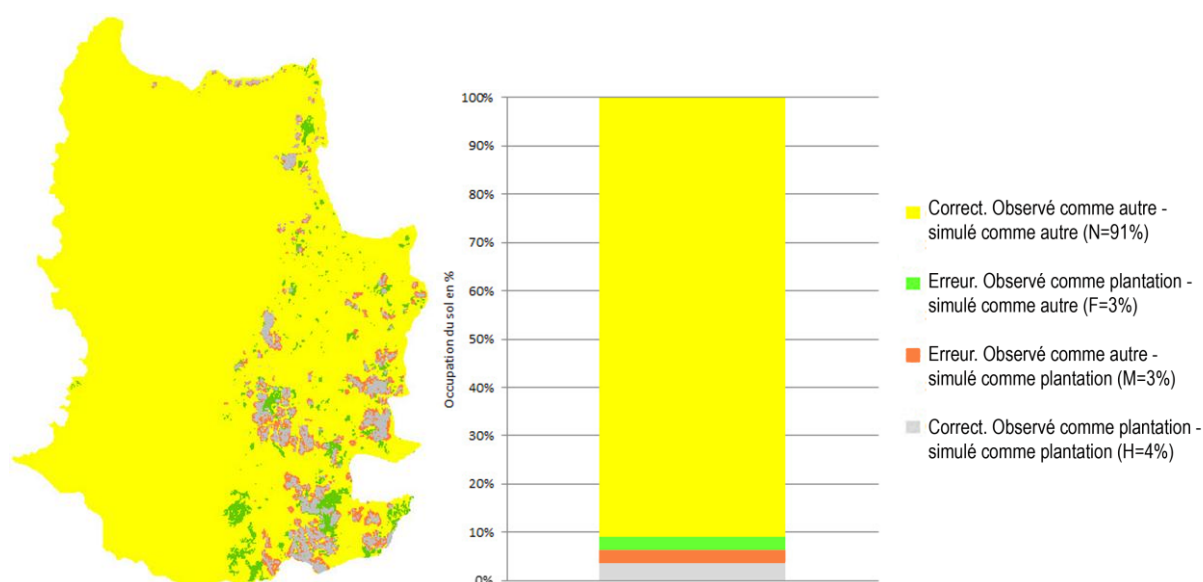


Figure 111 : Exactitudes et erreurs de la prédiction pour les plantations, entre 2008 réel et 2008 simulée – CA-Markov

6.3.2. Land Change Modeler - Validation

6.3.2.1. Analyse des résidus (LUCC-budgets)

Les plantations représentaient 2,7 % du paysage en 1999 et 6,4 % en 2008. A l'image de CA-Markov, le modèle LCM simule parfaitement la dynamique des plantations (net change : 3,7 % et swap nul) (figure 112).

La forêt native est la deuxième catégorie en termes de changement total (7,9 % - swap : 3 % et net change : 4,8 %). Le modèle a nettement surestimé le total change (11 %) ce qui est principalement due à un gain de forêt native (4 % contre 1,5 %). Etant donné que le net change simulé est inférieur à l'observation (3 % contre 4,8 %), seul des changements importants d'allocation spatiale (swap) expliquent ce résultat (8 % contre 3 %).

La catégorie « autre » présente le total change le plus élevé avec 9,1 %. Le modèle a surestimé le changement total avec 12,4 %. Le swap est responsable de cette surestimation dans la mesure où le net change simulé et observé s'équivalent sensiblement (0,7 % contre 1,1 %). La proportion entre le net change et le swap est correcte.

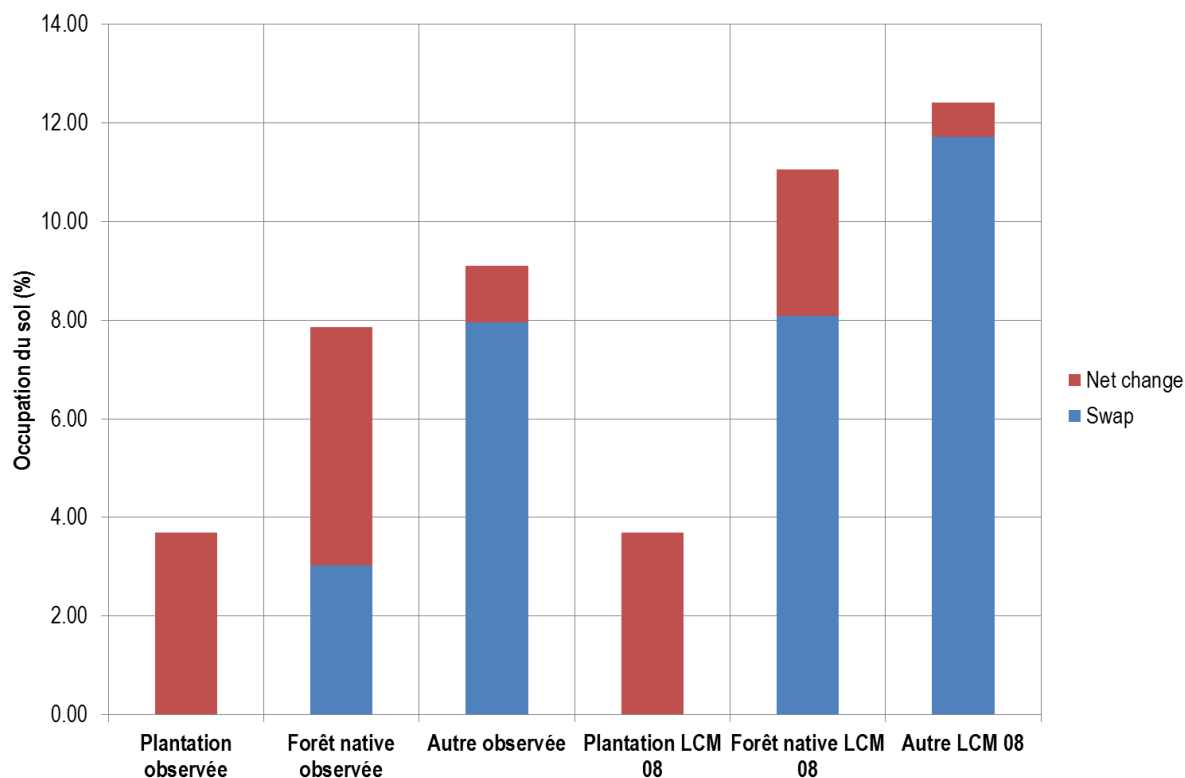


Figure 112 : Comparaison entre le LUC-budget réel (1999-2008) et le LUC-budget simulé (1999 réel – 2008 LCM). La barre totale (net change + swap) représente le % total de changement

Comme pour l'analyse des résidus (CA-Markov), la carte d'occupation du sol en 2008 est comparée à la simulation LCM en 2008 (figure 113). Sur les 6,4% de plantations simulées en 2008, 3,2% concordent avec l'observation. Les 3,2% restant (0,92% de forêt native et 2,26% de "autre") correspondent aux résidus (gain ou M). Contrairement à CA-Markov, ils se répartissent de manière diffuse et fragmentée sur le Piémont sans aucune relation de proximité avec des plantations existantes, et apparaissent plus homogènes au sud et à l'ouest de la commune (figure 116, page 250). *A contrario*, les autres résidus (perte ou F) (1,90% de "autre" et 1,28% de forêt native) traduisent des erreurs de simulation où le modèle omet l'apparition de nouvelles plantations.

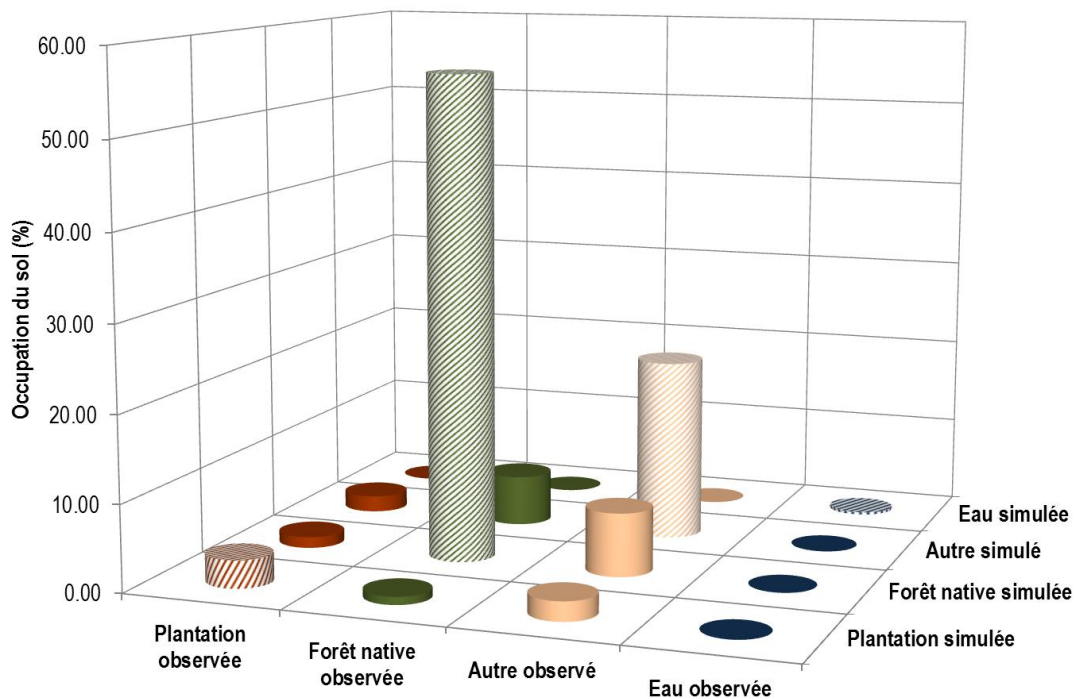


Figure 113 : Observation des résidus entre l'occupation du sol observée et simulée – LCM

6.3.2.2. Relative Operating Characteristic

L'AUC pour les plantations simulées par LCM est de 0,87, de 0,80 pour la forêt native et de 0,78 pour la classe « autre ». Le modèle prend également en compte les valeurs d'aptitude pour chacune des classes, bien que l'AUC soit moins concluant que celui de CA-Markov (figure 114).

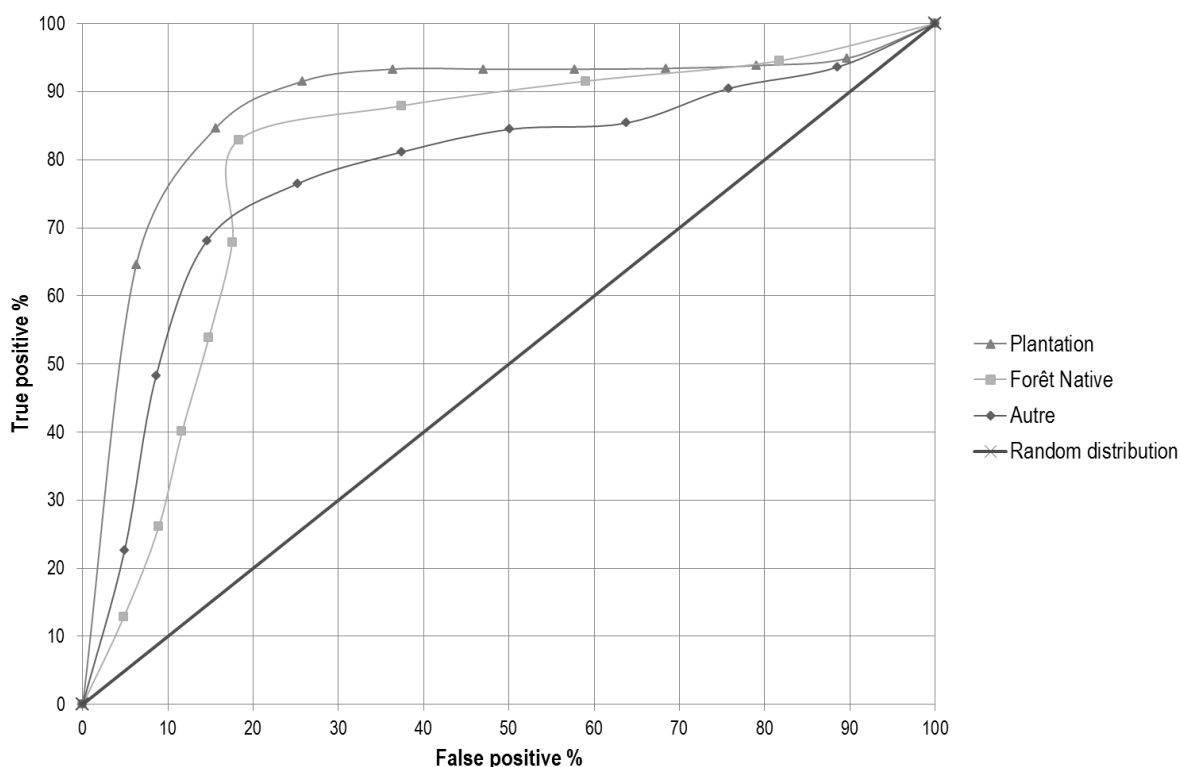


Figure 114 : ROC pour le modèle LCM

6.3.2.3. Budgétisation des erreurs/exactitudes

79% de la constance observée entre 1999 et 2008 est correctement prédite (N) (tableau 47 et figure 115). L'explication est identique à celle exposé précédemment. Les erreurs, en raison d'une constance observée mais prédite comme changée, sont de 11% (F), alors que les *misses* qui traduisent le processus inverse atteignent les 8%. Enfin les changements observés ayant été correctement prédits par le modèle est de 2% (H). Le total des changements observés (OC = M + H) est de 10% alors que les changements totaux prédits (PC = F + H) ont été sous-estimés avec 8%. La précision de la prédiction globale des changements à travers l'ensemble du paysage est la suivante :

Erreur de quantité (Q) = |F - M| = 3% Erreur d'allocation (A) = (F + M) - Q = 16% Erreur totale (Q + A) = 19%

| % | | Changements observés 99-08 | | |
|---------------------------|-------|----------------------------|------|-------|
| | | 0 | 1 | Total |
| Changements prédits 99-08 | 0 | 0.79 | 0.08 | 0.87 |
| | 1 | 0.11 | 0.02 | 0.13 |
| | Total | 0.90 | 0.10 | 1.00 |

Tableau 47 : Matrice de contingence entre les changements observés et les changements prédits – LCM

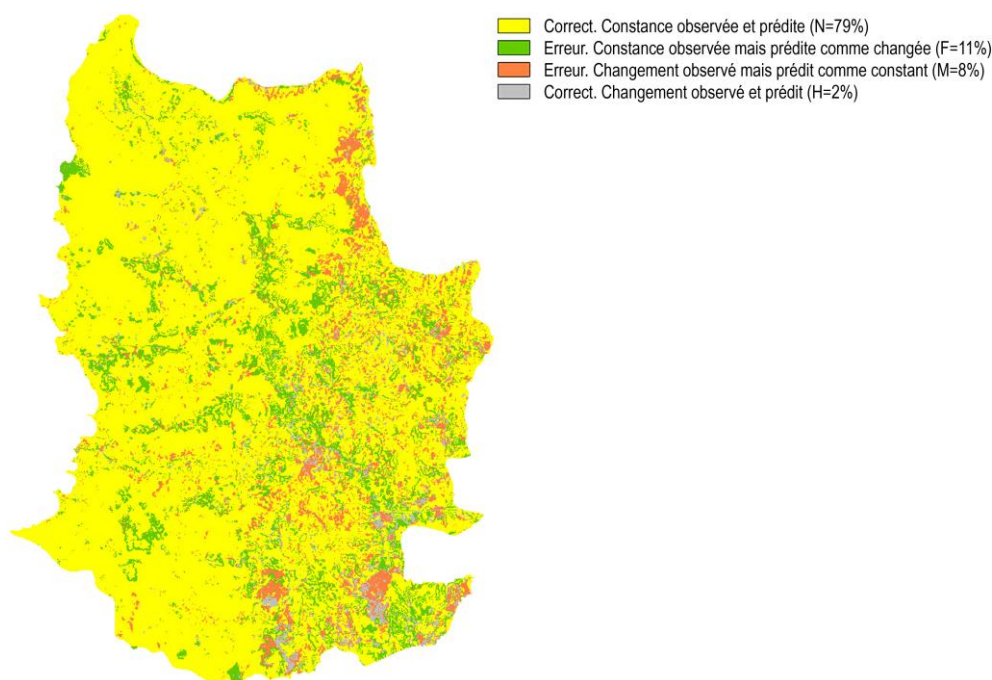


Figure 115 : Exactitudes et erreurs de la prédiction – LCM

Les résultats OC et PC diffèrent de CA-Markov car leurs calculs se basent sur les résultats de la prédiction. La validation des changements par type d’occupation du sol montre que le modèle prédit 58% de changement (PC) pour les plantations alors que les changements réels (OC) pour cette catégorie n’ont été que de 13%²¹⁸. Les erreurs dues à la quantité sont de 45% alors que celles dues à la distribution sont nulles.

La confrontation entre les plantations réellement observées et leurs prédictions (tableau 48) traduit une concordance spatiale de 50%. En effet, LCM a simulé autant de plantations qu’elle en a omises (4976,6 ha contre 4903,2 ha).

Les erreurs remarquables (figure 116) correspondent à la part des plantations observées mais n’ayant pas été simulées en tant que telles (F = 3%), et la part des plantations simulées mais observées comme autres (M = 3%). Le taux d’exactitude pour les plantations observées et celles prédites atteint également les 3% (H sur le graphique). Enfin la plus forte concordance (90%) exprime les autres catégories d’occupation du sol, d’où le taux élevé d’exactitude (N sur le graphique).

| Hectares | | plantation 08 réel | | |
|-------------------|-------|--------------------|---------|-----------|
| | | 0 | 1 | Total |
| plantation LCM | 0 | 139647.87 | 4903.02 | 144550.89 |
| | 1 | 4903.2 | 4976.55 | 9879.75 |
| | Total | 144551.07 | 9879.57 | 154430.64 |

Tableau 48 : Concordance et discordance spatiale des plantations – LCM

²¹⁸ Les changements observés (OC) diffèrent des résultats exposés pour CA-Markov (18%) ce qui pourrait sembler erroné. Ceci s’explique par le calcul du OC qui tient compte des résultats de la prédiction (H + M) et que ces derniers diffèrent entre les deux simulations.

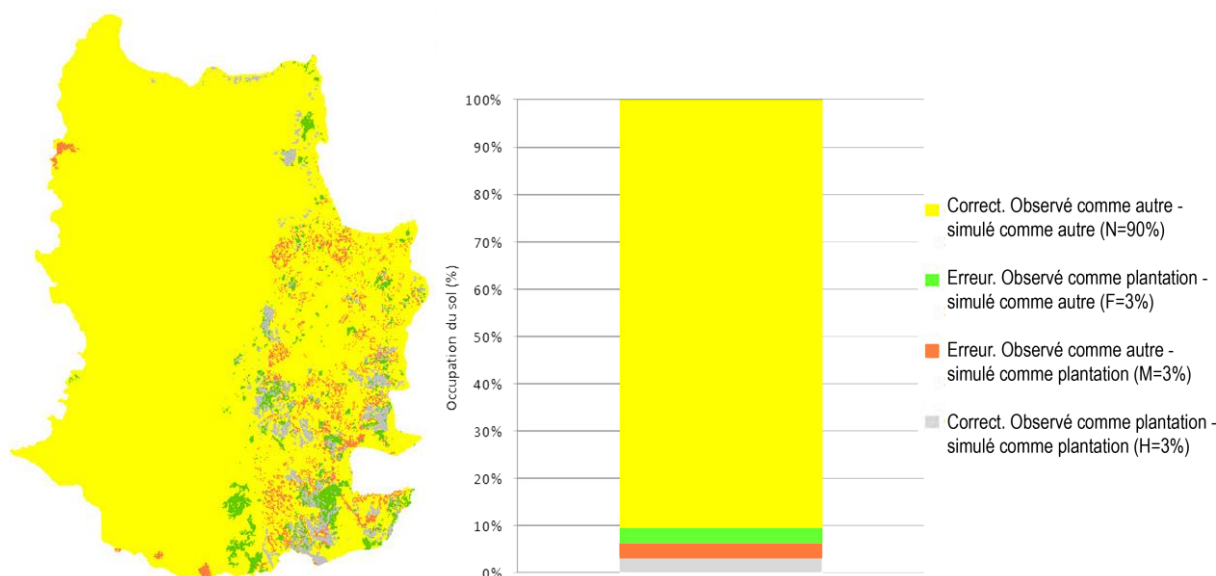


Figure 116 : Exactitudes et erreurs de la prédiction pour les plantations, entre 2008 réel et 2008 simulée – LCM

6.4. Analyse comparative des deux modèles

6.4.1. LUCC-budgets comparatif pour les deux modèles

Le LUCC -budget révèle un changement total de 20,6 % entre 1999 et 2008 principalement due à la dynamique de la forêt native et de la catégorie « autre » (tableau 49). Contrairement à cette évolution observée (1999-2008), les deux modèles aboutissent respectivement à une sous-estimation des changements (CA-Markov) et une surestimation (LCM). Les plantations présentent un changement total et un changement net moitié moins élevé, ce qui signifie que les zones de plantations en 1999 sont restées les mêmes en 2008 (swap nul). Inversement la catégorie « autre » - avec un total change de 9,1 % et une légère augmentation de 1,2 % (net change) - révèle des dynamiques spatio-temporelles importantes avec un swap de 7,9 %.

| | 1999-2008 Observé | | | 1999-2008 CA-Markov | | | 1999-2008 LCM | | |
|--------------|----------------------|------------|------|------------------------|------------|------|------------------|------------|------|
| | Total change | Net change | Swap | Total change | Net change | Swap | Total change | Net change | Swap |
| Plantation | 3.7 | 3.7 | 0.0 | 3.7 | 3.7 | 0.0 | 3.7 | 3.7 | 0.0 |
| Forêt native | 7.9 | 4.8 | 3.0 | 3.9 | 3.0 | 0.9 | 11.1 | 3.0 | 8.1 |
| Autre | 9.1 | 1.2 | 7.9 | 4.7 | 0.7 | 4.0 | 12.4 | 0.7 | 11.7 |
| Total | 20.6 | 9.7 | 11.0 | 12.3 | 7.4 | 4.9 | 27.2 | 7.4 | 19.8 |

Tableau 49 : Comparaison entre 1999-2008 (observé), 1999 (observé)-2008 (CA-Markov) et 1999 (observé)-2008 (LCM). Les valeurs expriment le changement en % du paysage

En comparant les deux modèles, le LUCC-budget de CA-Markov indique que le changement total est sous-estimé (- 8,3 points de pourcentage) alors que celui de LCM est surestimé (+ 6,6 points) et plus proche de la réalité. En d'autres termes, le premier modèle traduit une plus grande stabilité du paysage et le second exagère ses dynamiques.

Le net change pour chacune des catégories d'occupation du sol est identique pour les deux modèles (net change total de 7,4 %) et est sous-estimé. Le swap de CA-Markov est nettement inférieur à la réalité et inverse la proportion observé entre le net change (9,7 %) et le swap (11 %), alors que LCM respecte cette proportion (figure 117).

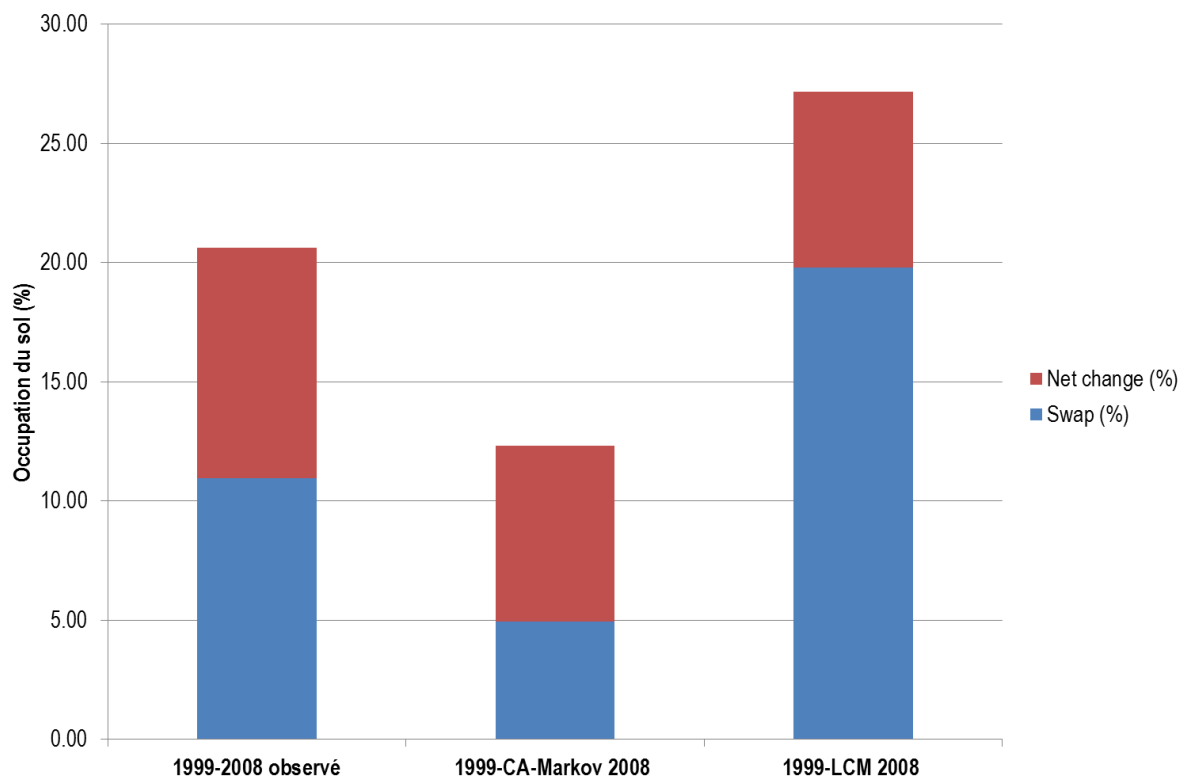


Figure 117 : Comparaison entre 1999-2008 (observé), 1999 (observé)-2008 (CA-Markov) et 1999 (observé)-2008 (LCM)

Pour conclure, Ca-Markov donne des résultats plus adaptés à l'évolution linéaire et simple des plantations, traduite par des pertes nulles et seulement des gains. Les résultats diffèrent avec la forêt native et la catégorie « autre » qui présentent des erreurs, mais ces erreurs affectent moins la partie prospective dans la mesure où les scénarii prospectifs se focalisent sur la dynamique des plantations exotiques.

6.4.2. Représentation des erreurs/exactitudes des deux modèles

Afin de comparer et d'estimer la qualité des deux modèles, la technique de Pontius *et al.* (2004) susmentionnée est utilisée en se focalisant sur la prédiction des plantations issue de CA-Markov et celle de LCM. La carte met en exergue quatre états : (i) les zones non prédites comme plantations, (ii) les zones prédites comme plantations par les deux modèles, (iii) les plantations exclusivement prédites par CA-Markov et (iv) les plantations uniquement prédites par LCM.

La figure 119 permet de visualiser la prédiction des plantations issue des deux modèles en les comparant aux plantations réellement observées en 2008. Les deux modèles prédisent les plantations réellement observées de la même manière – 4 504,7 hectares, soit

45,6% (figure 118). Pris isolément, CA-Markov présente de meilleur résultat que LCM avec 5672,3 (57,4 %) ha contre 4 976,6 ha²¹⁹ (50,4 %). *A contrario*, les erreurs induites par la simulation de "non plantation" par les deux modèles mais observées comme plantation s'élèvent à 3 735,4 ha (en rose sur la figure 119). Les erreurs communes aux deux modèles s'élèvent à 639,5 ha, alors qu'individuellement CA-Markov compte 4 212,5 ha de surestimation et LCM 4 903,2 ha²²⁰ (en dégradé de bleu). Ces erreurs apportent une dimension non négligeable quant à l'évolution future des monocultures. Bien que ces zones ne soient pas réellement observables, elles représentent des aires potentielles pour de nouvelles plantations. Si la plupart d'entre-elles se situent sur la précordillère, on remarque que certaines (LCM) occupent des zones totalement isolées mais prédites malgré tout en tenant compte du panel de variables explicatives.

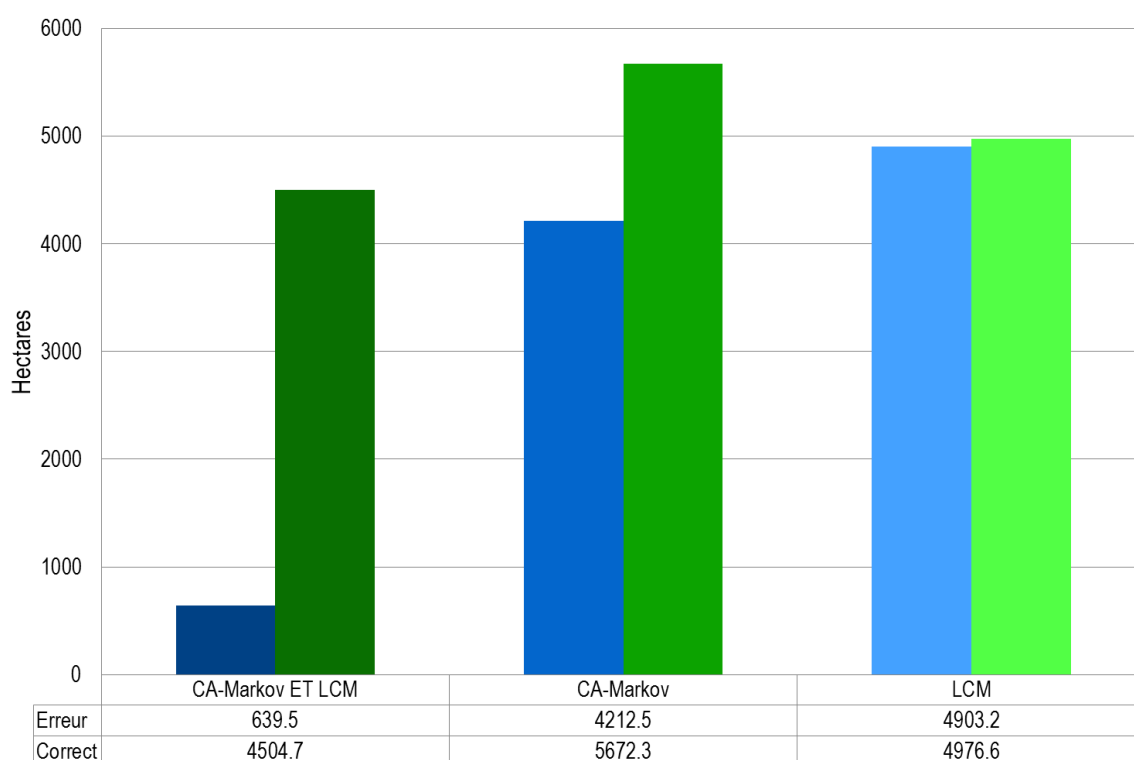


Figure 118 : Erreurs et exactitudes dans la prédiction des plantations (CA-Markov et LCM) comparées au "paysage observé"

²¹⁹ CA-Markov – 1167,6 + 4504,7 = 5672,3

LCM – 471,9 + 4504,7 = 4976,6

²²⁰ CA-Markov – 3573 + 639,5 = 4212,5

LCM – 4263,7 + 639,5 = 4903,2

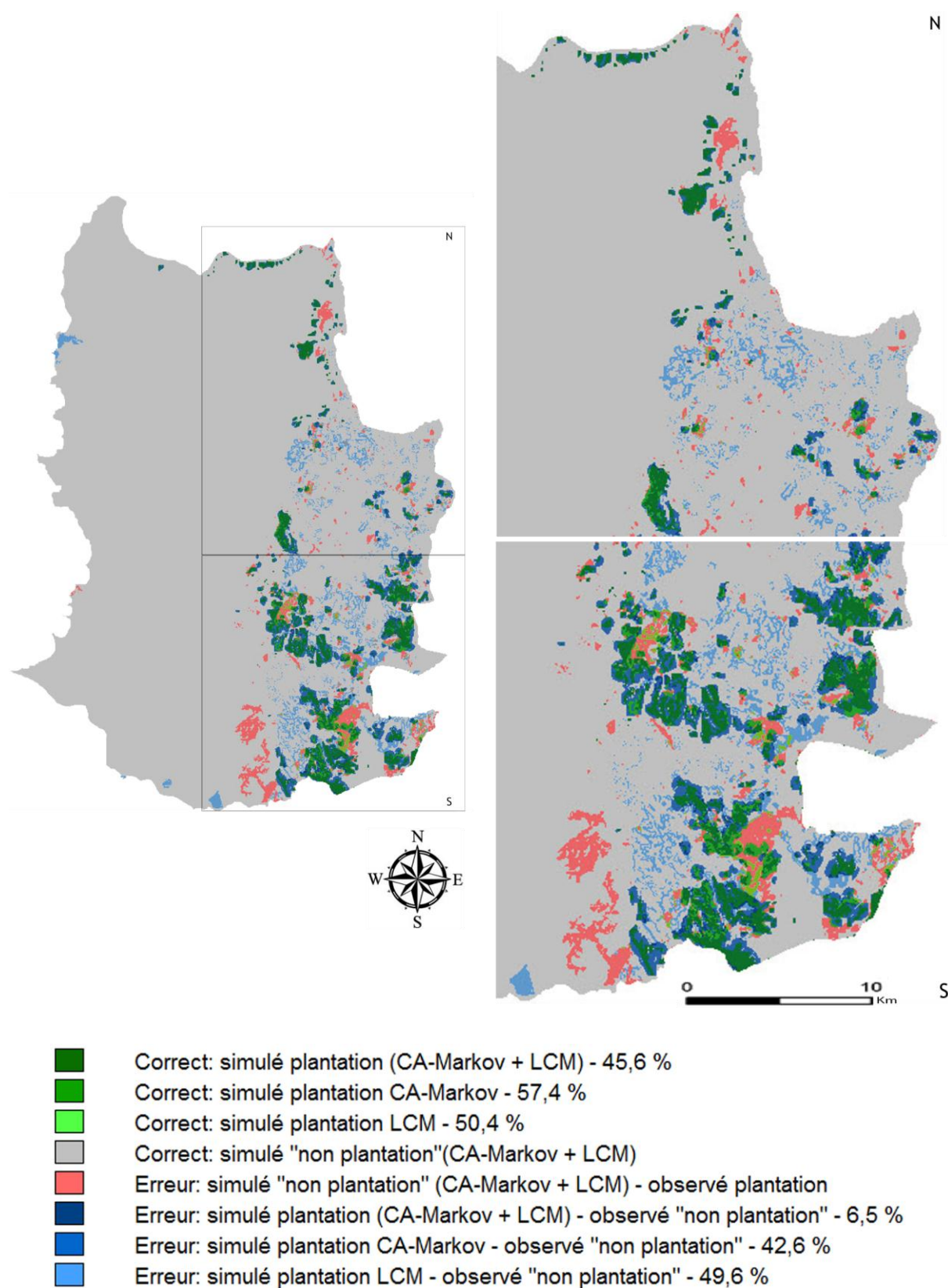


Figure 119 : Comparaison des plantations simulées par CA-Markov et LCM avec les plantations réelles en 2008. Carte globale de la commune de San Juan de la Costa et deux zooms sur la précordillère

CONCLUSION

Dans l'ensemble les modèles présentent des difficultés à prédire les changements entre 1999 et 2008, mais permettent de confirmer les tendances d'évolution²²¹. En effet, l'analyse des changements, aussi bien à l'échelle du paysage qu'au niveau des plantations prises isolément, met en exergue des résultats intéressants qu'il convient néanmoins de nuancer. Ceci est imputable à la part importante de la constance observée et simulée, 86% pour CA-Markov et 79% pour LCM à l'échelle du paysage.

Néanmoins, la comparaison des plantations observées et simulées en 2008 donnent des résultats acceptables quant à l'allocation spatiale. Si LCM prédit autant de plantations qu'il en omet, CA-Markov affiche de meilleurs résultats. En excluant les zones observées comme "autre" et simulées comme "autre" qui écrasent une fois de plus les résultats, les deux modèles affichent des pourcentages de -prédictions correctes- équivalentes aux erreurs (sauf pour CA -Markov dont les pourcentages d'exactitudes sont supérieurs aux erreurs). L'observation des erreurs (observé comme autre – simulé comme plantation) révèle que celles-ci se localisent à proximité des plantations réellement observées pour CA-Markov, et de façon aléatoire pour LCM. A l'échelle du paysage les erreurs d'allocations spatiales issues de LCM ont été nettement supérieures à celles de CA-Markov.

L'analyse comparative des deux modèles avec la carte "réelle" indique que les plantations prédites par CA-Markov ont un taux de concordance plus élevé qu'avec LCM. La simulation des catégories d'occupation du sol par une approche supervisée (CA-Markov) permet de générer des cartes plus réalistes. Les cartes d'aptitudes générées par le modélisateur optimisent la probabilité des changements contrairement à LCM qui s'appuie sur les probabilités de transitions. Ce dernier fait cependant émerger des zones potentielles de plantations qui ne seraient pas apparues si l'on avait privilégié exclusivement une approche experte. Une critique commune aux deux modèles peut être avancée dans la mesure où l'établissement de nouvelles plantations, de même que les ruptures, n'aient pas été anticipées.

La limite des modèles se trouvent principalement dans la disponibilité des données mobilisées. Malgré tout, certains auteurs ont montré que l'ajout de données supplémentaires pouvait être limité par leur nature non quantifiable et leur indisponibilité en format digital (Schneider et Pontius, 2001). La complexité du système forestier dans la commune de San Juan de la Costa ne peut effectivement se résumer à un nombre restreint de facteurs (chapitre 5). Aux variables utilisées s'ajoutent des facteurs explicatifs dont la spatialisation est difficile à mettre en œuvre ou impossible.

La question qui se pose alors est de savoir à quel degré de complexité (induit par la quantité de variables incluses dans les modèles) le modélisateur et le modèle se limitent-ils ? De même que la prise en compte de la totalité hypothétique des variables explicatives permettrait-elle une précision optimale de la prédiction ?

²²¹ Pontius *et al.* (2004) constatent également que « *published literature shows that this phenomenon is more the rule than the exception* ».

La validation de ces modèles constitue une première étape à la modélisation prospective des plantations industrielles. Bien que CA-Markov présente des résultats plus concluants que LCM (tableau 50) et semble être à même de mieux prendre en compte les tendances d'évolution, ce dernier, de par son caractère non-supervisé (boîte noire), pourrait être plus adapté pour simuler des scénarii contrastés en restant totalement indépendant de la connaissance des experts. L'élaboration d'images issues de scénarii prospectifs tendancielles et contrastés favorisera l'identification de zones à enjeux socio-environnementaux concernant d'une part le milieu de vie des communautés indigènes mapuches et d'autre part la préservation des forêts natives.

| | | CA-Markov | LCM |
|--|---------|-------------|-----------|
| Changements – ensemble du paysage | Q | 10 | 3 |
| | A | 18 | 16 |
| | T | 28 | 19 |
| Changements par TOS (PLANTATION) | Q | 34 | 45 |
| | A | 0 | 0 |
| | T | 34 | 45 |
| Changements par TOS (FORET NATIVE) | Q | 7 | 3 |
| | A | 2 | 4 |
| | T | 9 | 7 |
| Changements par TOS (AUTRE) | Q | 6 | 7 |
| | A | 8 | 20 |
| | T | 14 | 27 |
| Plantations observées / plantations simulées | Q | 0 | 0 |
| | A | 6 | 6 |
| | T | 6 | 6 |
| LUC- budget / Swap | PLT | 0.0 | 0.0 |
| LUC- budget / Total change | PLT | 3.7 | 3.7 |
| ROC | PLT | 0.90 | 0.87 |
| | FOR NAT | 0.87 | 0.80 |
| | AUTRE | 0.84 | 0.78 |

Tableau 50 : Synthèse des erreurs et exactitudes des deux modèles (en %)

CHAPITRE 7 – Les scénarii tendanciels et normatifs spatialisés

INTRODUCTION

La construction de scénarii prospectifs ne se destine pas exclusivement à faciliter la prise de décision en multipliant des cas de figure. La démarche scientifique suivie dans ce chapitre se veut la plus large possible, c'est-à-dire qu'elle s'adresse aux acteurs (directs et indirects) qui font vivre le secteur forestier à l'échelle locale. D'après Fabrice Hatem, l'exercice de la prospective peut à la fois « *sensibiliser un public à une question nouvelle, faire prendre conscience d'un risque ou de l'imminence d'un changement, sans que cela débouche de façon directe sur une prise de décision* » (Hatem, 1993, 21). L'objectif est, entre autres, de *conscientiser* le grand public, les décideurs et les acteurs directs, 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. A ce stade, la pertinence, la cohérence, la vraisemblance et la transparence (Godet, 1993) des hypothèses sont cruciales. Leur capacité à appréhender le secteur forestier doit être la plus étendue possible et ne doit pas se limiter aux seules stratégies des entreprises forestières. En effet, à l'image des conclusions énoncées dans le chapitre 5, Christopher Brown (2002) remarque que l'expansion des boisements dépend d'une combinaison de décisions d'ordre complexe. D'après l'auteur, « *ces décisions ne sont pas prises en vase clos, mais dans un cadre plus large et plus complexe d'aspirations économiques, sociales et environnementales, qui sont souvent nées et exprimées en dehors du secteur. Ces aspirations sont difficiles à identifier, à quantifier et à analyser, mais elles influenceront probablement beaucoup plus le développement des plantations forestières que des considérations strictement liées à l'offre future de bois* ». Ainsi, chacune des hypothèses est élaborée sur plusieurs critères : (i) la connaissance du terrain et du secteur forestier chilien, (ii) des entretiens, (iii) des analyses d'experts, (iv) des discussions informelles ponctuées de rumeurs et (v) d'imagination tempérée.

L'ensemble des scénarii (tendanciels et contrastés) sont modélisés avec CA-Markov. La spatialisation des hypothèses s'ajuste à la disponibilité des données, et s'appuie sur l'évaluation multicritère pour pondérer les facteurs. La présentation synthétique du scénario prédictif et des scénarii prospectifs (**section 1**) s'accompagne de leur détermination temporelle et surfacique. Les sections suivantes développent les hypothèses propres à chaque scénario, expliquent le procédé de spatialisation et présentent les résultats. Les **sections 2-3-4** et **5** correspondent respectivement au scénario prédictif, au scénario prospectif tendanciel, au scénario prospectif normatif « éco-centré » et au scénario prospectif normatif « intensif ».

7.1. Présentation synthétique des scénarii

Chaque scénario est décrit afin de mettre en évidence ses principales caractéristiques. La figure 120 représente les quatre scénarii en focalisant sur l'évolution des plantations exotiques à l'horizon 2035. Les hypothèses qui les caractérisent sont développées dans les parties suivantes.

Le scénario tendanciel (A) – *business as usual* – se veut être une anticipation « *poussant à bout les conséquences logiques d’hypothèses ou de tendances préalables* », modulées ou contraintes par des décrets de loi en restant dans la trajectoire spatio-temporelle du passé telle que le modèle la connaît à travers la période d’entraînement. Nous émettons l’hypothèse que la croissance des plantations industrielles reste constante, c’est-à-dire que l’on n’observe pas de régression ou, au contraire, de rachat massif dans la commune. Ce scénario va jusqu’en 2017 (tableau 51) afin de réduire au minimum la marge d’erreur ou l’incertitude (il s’agit d’une prédiction), tout en respectant le pas de temps compris entre 1999-2008 (calibration). Si les plantations et la catégorie « autre » évoluent librement, la forêt native ne peut pas gagner de nouveaux espaces en neuf ans.

Les trois scénarii (B – C – D) suivants vont jusqu’en 2035 (2008 + 3 x 9 itérations) et relèvent de la prospective. Ce choix temporel tient compte de la croissance des espèces végétales arborées natives et de notre volonté à les intégrer dans notre modèle. En effet, d’après Cubbage *et al.* (2007), la rotation du *Nothofagus dombeyi* (espèce native), lorsqu’il est soumis à une gestion sylvicole, est de 30 ans²²². Ainsi, la forêt native (pour le scénario développement soutenable et le scénario éco-centré) est gérée et évolue au cours du processus de simulation.

Le premier scénario est qualifié (i) d’exploratoire car il part d’une situation présente et progresse vers le futur et (ii) tendanciel car cette progression est constante et sans rupture. Les deux derniers scénarii sont normatifs et contrastés et présentent des situations extrêmes, faites de ruptures, avec un degré de probabilité faible.

Le scénario exploratoire (B) – qualifié de développement soutenable – a pour ambition de développer un projet de territoire incitant à l’application d’une sylviculture soutenable pour les forêts natives et les plantations exotiques (Cruz et Schmidt, 2007, p. 290-293). Il est question de prendre en compte la situation économique de la zone d’étude, les conséquences environnementales susceptibles d’être engendrées et les attentes des populations locales. Sur ce dernier élément, « l’attente » peut être envisagée dans un cadre de prise de décision autonome vis-à-vis du pouvoir centralisé. Le patrimoine forestier natif augmente légèrement alors que les plantations stagnent.

Le scénario normatif « éco-centré » (C) fait référence à la World Conservation Strategy « *qui insiste sur la conservation destinée à maintenir le processus écologique essentiel grâce à la préservation de la diversité génétique et une utilisation raisonnable des espèces et des écosystèmes* » (Veyret, s.d.). Il doit se comprendre comme un infléchissement des tendances actuelles, caractérisé par un fort ralentissement de la croissance économique et une explosion des prix des produits forestiers. Les zones boisées par des espèces natives s’accroissent sur l’ensemble de la commune. Seuls des fragments de plantations exotiques occupent la précordillère.

²²² Avec un taux de croissance de 18 m³/ha/an

Le dernier scénario normatif (D) est qualifié d'intensif. Le secteur forestier à l'échelle internationale est en plein boom et les politiques forestières incitent les propriétaires (du petit propriétaire à la multinationale) à intensifier leur production. La surface attribuée aux plantations explose littéralement alors que la forêt native est dégradée systématiquement et n'évolue pas.

| SCENARIO | HORIZON TEMPOREL | DETERMINATION SURFACIQUE (HA) - PLANTATION |
|---|---------------------------|--|
| (A) <i>Business as usual</i> | 2017 (+9) | 15 590 |
| (B) Développement soutenable | 2035 (+27) | 10 690 |
| (C) Eco-centré | 2035 (+27) | 5 400 |
| (D) Intensif (D) ^{bis} + Ruta Costera | 2017 (+9) | 25 705 |
| | 2026 (+18) | 54 973 |
| | 2026 ^{bis} (+18) | 54 973 |
| | 2035 (+27) | 54 973 |

Tableau 51 : Présentation des scénarii prospectifs

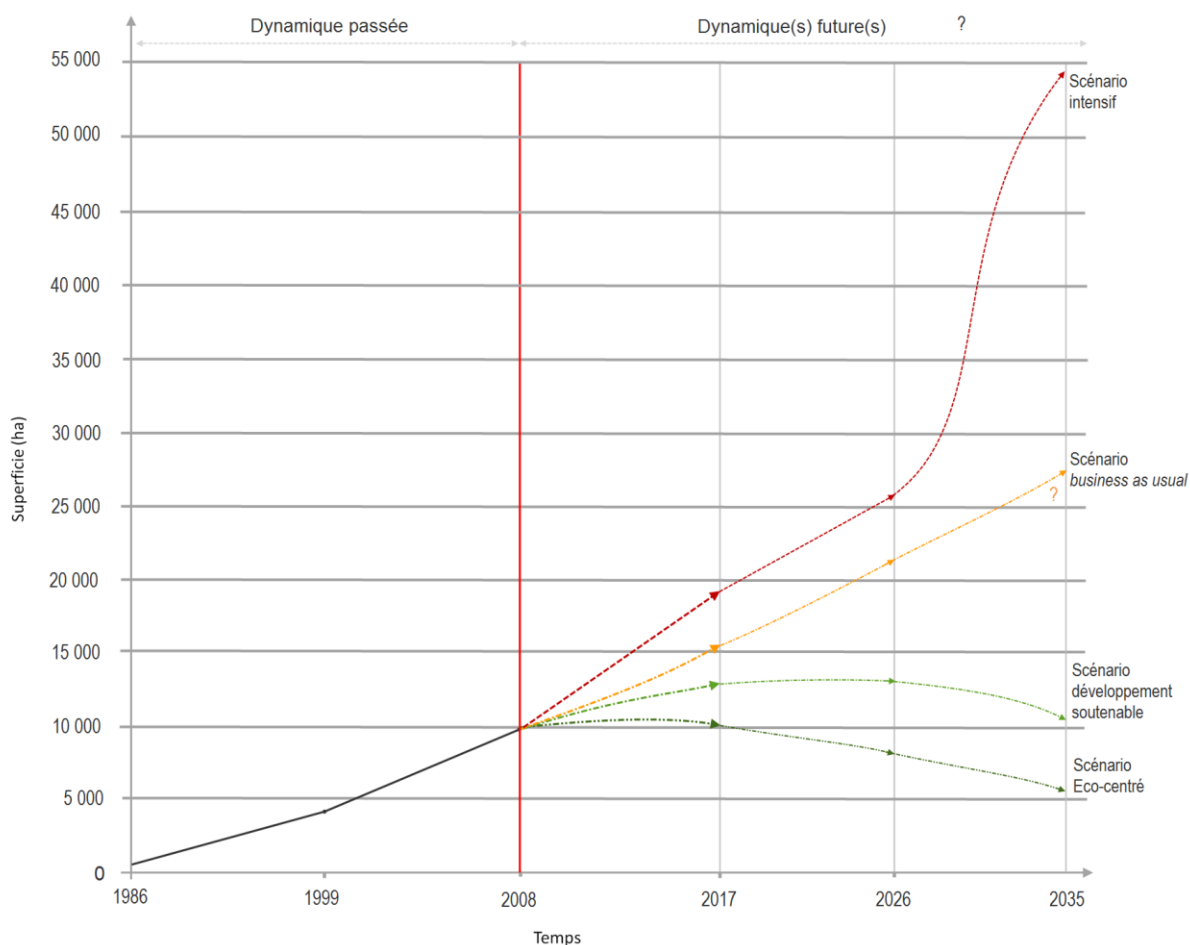


Figure 120 : Représentation et évolution des scénarii entre 2008 et 2035.
Note : les superficies concernent uniquement les plantations.

7.2. Scénario prédictif - *business as usual* -

7.2.1. Elaboration des hypothèses

7.2.1.1. La vision des spécialistes du secteur forestier

S’interrogeant sur l’avenir - à court terme - du marché de la cellulose dans les pays de l’hémisphère sud, Dave Hillman (Market Pulp Consultant) considère que le Chili « *will be the only major supplier of softwood market pulp and it will not be able to expand as much as customers would prefer* » (Hillman, 2009, p.21). Cette incapacité à répondre à une demande toujours plus croissante va de pair avec la stratégie des entreprises Arauco et CMPC qui consiste à ne pas construire de nouvelles usines d’ici les cinq à dix prochaines années dans la région. « *The reason given is the lack of availability of pulpwood, especially softwood (Radiata Pine). [...] But, “no new mills” does not mean there will be no increases in capacity. [...] Plans to modernize their Laja mill are on hold for now* » (Hillman, 2009, p.16). Cette capacité de production est clairement perceptible dans les résultats prospectifs de l’INFOR (2008) sur la disponibilité future de bois issu de plantations de pins et d’eucalyptus à l’horizon 2032, avec une augmentation de 58 % entre la période 2003-2005 et 2030-2032 (tableau 52).

| | Moyenne annuelle (milliers de m ³ /an) | | |
|-----------|---|------------|--------|
| | Pin | Eucalyptus | Total |
| 2003-2005 | 24 288 | 9 779 | 34 067 |
| 2006-2008 | 29 223 | 12 685 | 41 908 |
| 2009-2011 | 31 425 | 13 067 | 44 492 |
| 2012-2014 | 31 453 | 13 163 | 44 616 |
| 2015-2017 | 31 453 | 15 154 | 46 607 |
| 2018-2020 | 31 453 | 14 725 | 46 178 |
| 2021-2023 | 31 453 | 14 784 | 46 237 |
| 2024-2026 | 33 538 | 14 865 | 48 403 |
| 2027-2029 | 38 191 | 14 930 | 53 121 |
| 2030-2032 | 38 705 | 15 154 | 53 859 |

Tableau 52 : Disponibilité future de bois par espèces. Source : INFOR, 2008

Si l’indisponibilité en matière première s’avère être un facteur de la stagnation de la production, Alfredo Seguel (2010) remarque que l’un des moyens dont disposent les conglomérats forestiers afin de développer leur patrimoine forestier et ainsi d’accroître leur production, est de s’appuyer sur les petits propriétaires : « *considerando que el patrimonio forestal de las grandes compañías está prácticamente agotado en las regiones VII y X Regiones para adquirir grandes paños, la expansión va apuntada a incorporar paralelamente a sectores campesinos y mapuche para que se transformen en forestadores* » (Seguel, 2010). Or, le climat d’instabilité entre les communautés indigènes et les entreprises forestières, notamment dans la 9^{ème} Région, et, dans une moindre mesure, dans la commune de San Juan de la Costa, est à l’origine d’un dysfonctionnement de l’économie forestière à l’échelle locale.

Pour Verónica Labra²²³ cette situation a « *generado inseguridad para las inversiones forestales y una progresiva perdida de confianza en los empresarios del sector. En general, las empresas forestales han visto aumentados sus costos por los mayores gastos en seguros y de protección de los bosques ante la amenaza de ataques* » (Labra, 2001, p.3-4).

7.2.1.2. La disponibilité des terres

L’avenir du secteur forestier au Chili ne fait pas consensus, précisément en ce qui concerne la disponibilité des terres. Selon Fernando Raga (2005) (vice-président de la CORMA), il suffirait seulement de 5% de la superficie actuelle du couvert forestier mondial en plantations industrielles à croissance rapide pour satisfaire de manière soutenable la consommation industrielle jusqu’en 2050. Dans un contexte économique international concurrentiel, le Chili dispose d’avantages en termes de coûts directs de production (cellulose Kraft) parmi les plus compétitifs du monde, et offre des opportunités notamment par des rendements élevés, des coûts avantageux et la disponibilité des terres, répondant à l’approvisionnement industriel. Si la disponibilité des terres est perçue comme un avantage, Graciela Moguillansky et Verónica Silva (2001, p.123) en nuancent la portée, expliquant que « *se sabe que para las grandes empresas, las tierras hoy disponibles en Chile tienen menor calidad y altos precios, lo que las hace económicamente no rentable* ». Leurs propos rejoignent les remarques d’Oscar Enghdal (Forestal Anchile) notant que les entreprises forestières n’ont plus d’intérêt à planter dans la commune de San Juan de la Costa (chapitre 5, p. 200). Or, pour le gérant sylvicole la question de la disponibilité ne dépend pas de la qualité des sols, car la totalité des sols de la commune est apte à cet usage. Le « problème » provient du morcellement de la propriété, ce qui ne contraint nullement, nous l’avons vu, l’établissement de nouvelles plantations.

7.2.1.3. Actualisation du Decreto Ley 701

L’échéance du DL 701 de 1974, modifiée en 1998, fut fixée au 1^{er} janvier 2011. Une dérogation de deux ans a été accordée à la CONAF afin qu’elle puisse élaborer et proposer une nouvelle Loi d’incitation au boisement. Ces modifications se focalisent sur l’intégration des petits et moyens propriétaires ainsi que des communautés indigènes afin de « *incrementar la tase de forestación en el país y por ende contribuir al desarrollo productivo de los pequeños y medianos propietarios forestales, esto, llevará a la consiguiente generación de oportunidades de trabajo en el mundo rural en línea con el Programa de Gobierno del Presidente Piñera* » (CONAF, 2010, p.2). Le point central et novateur de cette nouvelle Loi est l’intégration des communautés autochtones, et la bonification des terres acquises et transférées par la CONADI par la Loi N° 19.253 :

« *Excepcionalmente, cuando personas, comunidades indígenas o una parte de éstas reciban subsidios de tierras en virtud de lo dispuesto en la Ley N° 19.253, podrán optar recibir la bonificación a que alude el inciso primero de este artículo, sin perjuicio que la superficie haya sido objeto de bonificación anterior. Ello, sólo para aquellos bosques*

²²³ Feller Rate Clasificadora de Riesgo – *Strategic affiliate of Standard & Poor’s* – <http://www.feller-rate.cl/indexb.php>

que hayan sido explotados y aprovechados por propietarios distintos a las personas, comunidades indígenas o una parte de éstas que hayan sido favorecidas con el subsidio de la referida Ley N° 19.253 » (CONAF, 2010, p.7).

7.2.1.4. Bonification des plantations à des fins dendroénergétiques

L'industrie internationale des forêts, du papier et de l'emballage doit faire face et s'adapter à une crise qui touche l'ensemble des secteurs économiques. La PricewaterhouseCoopers International Limited (PwCIL), dont l'objectif est d'aider leurs clients à résoudre des problèmes d'affaires complexes et viser à améliorer leur capacité à créer de la valeur, de gérer les risques et améliorer les performances²²⁴, est consciente de cette situation. Tenant compte de la volatilité de l'environnement économique mondial, la PwC publia un rapport intitulé « *CEO Perspectives. Viewpoints of CEOs in the forest, paper & packaging industry worldwide* » qui donne la parole à 33 PDG de compagnies forestières et papetières afin de mettre en exergue leurs inquiétudes face au marché mondial et leur stratégie pour redynamiser le secteur forestier. D'après la PwC « *the most exciting option for some stems from bio-energy. Many CEOs, particularly in Europe, see greater participation in bio-energy generation as critical to future viability. Some CEOs describe bio-mass generated energy as critical to their companies' futures. [...] Forward looking forest product companies will adapt, form alliances with other parties to exploit the opportunities, and acquire new competencies, all with the potential to generate new, sustainable and profitable revenues – provided the appropriate strategic choices are made in order to generate a respectable return on investment* » (PcW, 2009, p.15-16).

Il ressort clairement que les bioénergies deviennent la nouvelle stratégie des entreprises, leur permettant de se prémunir des fluctuations du marché et de répondre aux exigences du développement soutenable. L'accent est mis sur l'énergie-bois (granulés de bois, bûchettes, etc.) et la cellulose. « *Biofuels will become an important part of the overall fuel mix over the next ten to twenty years. [...] There are a whole host of second-generation biofuel technologies, [...], which essentially turn cellulose from woody fibres (or other plant materials) into liquid fuels* » (PcW, 2011, p.15).

Nous avons vu que la dendroénergie existe depuis plusieurs décennies au Chili, principalement par la commercialisation de bois de chauffe. Or, la bonification spécifique des plantations destinées à la production de bioénergie n'existe que depuis 2010, et sous certaines conditions, avec la publication de la table des coûts par la CONAF. En effet, ces plantations doivent être uniquement destinées à la production de biomasse pour la génération d'énergie. La CONAF précise que la bonification s'effectuera seulement sur des plantations peuplées d'espèces du genre *Eucalyptus* et situées dans les Macrozones 5 et 6²²⁵, « *aplicándose un costo único de \$ 781.200 [soit 1 212 €] por hectárea, para una densidad mínima de 3.000 plantas/ha, en distanciamientos máximos de 3 metros entre líneas por 1,1 metros sobre la línea* » (CONAF, 2010, C).

²²⁴ <http://www.pwc.com/gx/en/ethics-business-conduct/index.jhtml>

²²⁵ La Macrozone 5 correspond à la 7^{ème} et 8^{ème} Région. La Macrozone 6 à la 9^{ème}, 14^{ème} et 10^{ème} Région (sauf la province de Palena)

Cette nouvelle bonification aura pour effet, en toute logique, de décourager les petits propriétaires à boiser leur parcelle en espèces natives. Au contraire, les petits propriétaires récoltant et commercialisant du bois de chauffe, par voie légale et/ou informelle, vont se tourner vers l'eucalyptus pour des raisons législatives et aussi financières. Le boisement de 2 918 plants exotiques (1 250 + 1 668) coûte au propriétaire 884.845\$ [1 375,6€], alors que 2 918 plants natifs reviennent à 1 288.896\$ [2 003,8€].

7.2.1.5. Application de la Ley Bosque Nativo (Ley N° 20.283)

Selon Gustavo Henriquez de la CONADI (entretien, 2008), la promulgation de la nouvelle loi sur la Forêt Native (Ley Bosque Nativo)²²⁶ « *es lo que puede más repercutir en la disminución de las plantaciones forestales. Va a favorecer la generación de bosque nativo* », en favorisant la participation des communautés indigènes pour la récupération de la ressource forestière native. La loi présente malgré tout des points faibles en comparaison au DL 701. Sergio Pinoza (entretien, 2011) constate que « *no se hicieron costos localizados, no podemos tener los mismos costos, por ejemplo por la Región de Aysén, la novena Región y en la décima, los costos no son parejos. Los tipos de bosques no son iguales, no podemos trabajar en un bosque de lenga como en un tipo de siempreverde, no tenemos la misma vegetación, por lo tanto los costos son diferentes, la mano de obra es diferente. El decreto ley 701 tiene focalizado, por región, sus montos. Hay “macrozona”, y se divide en función de la densidad, de la especie. Es adaptado, la ley bosque nativo no, es grosero. Solo se hace la diferencia entre pequeños y medianos* ». Ainsi, l'efficacité de cette loi visant la récupération et la valorisation de la ressource forestière native n'est toujours pas démontrée.

Par ailleurs, il subsiste la question de la mise en place des plans de gestion sylvicole. Le Titre II – Article 5° stipule que « *toda acción de corta de bosque nativo, cualquiera sea el tipo de terreno en que éste se encuentre, deberá hacerse previo plan de manejo aprobado por la Corporación* ». L'exploitation de bois natif par un petit propriétaire indigène devra impérativement être précédée d'une régularisation des terres.

7.2.2. Spatialisation des hypothèses

A l'image des facteurs non-spatialisables (chapitre 5 et 6), les hypothèses susmentionnées ne peuvent être directement introduites dans le modèle. Chacune d'entre-elles est interprétée afin de pouvoir faire varier le poids des facteurs.

L'actualisation du D.L. 701, à l'image de sa précédente modification, n'aura aucun impact (à court terme) sur les communautés indigènes, et concernera les (très) grands et moyens propriétaires. Dans le cadre de l'évaluation multicritères, ces derniers obtiennent un poids maximal (255), alors que celui des petits propriétaires est très faible (20). Le poids relatif de chaque facteur, calculé par la méthode des vecteurs propres, ainsi que le choix de la stratégie sont les mêmes que pour la calibration en 2008.

Rappelons que la stratégie n°4 (*optimistic strategy*) donne trop d'importance aux pixels ayant une valeur d'aptitude élevée aux dépens de critères ayant des valeurs faibles, ce

²²⁶ Ley N°. 20.283. Ley sobre recuperación del Bosque Nativo y fomento forestal

qui ne tiendrait pas compte des lois d'incitation au boisement auprès des petits propriétaires (aptitude faible). La stratégie n°2 (prise de risque faible et peu de compensation – *pessimistic strategy*) donne un poids plus fort aux facteurs ayant un degré d'aptitude plus faible.

Ce scénario voit la création de nouvelles plantations et le reboisement de toutes les superficies existantes après la coupe. Le calcul des probabilités de transition markoviennes entre 2008 et 2017 donne un total de 15 590 ha de plantations dans la commune à la date de simulation.

7.2.3. Résultats

Les plantations industrielles établies restent stables entre 2008 et 2017 (tableau 53). De nouveaux espaces sont gagnés sur la forêt native (1 926 ha, soit 2 % des forêts natives en 2008) et sur la catégorie « autre » (3 776 ha, soit 8 %) pour atteindre un total de 15 590 ha. La figure 122 permet de localiser ces espaces et montre que la totalité se trouve sur le piémont à proximité des plantations détectées en 2008. En comparant ces résultats aux transitions observées entre 1999-2008, on remarque que le processus de substitution directe s'accroît très légèrement (+ 43 ha) alors que l'intensité de la transformation de « autre » à « plantation » baisse.

La forêt native est la seule catégorie qui voit sa superficie totale diminuer. Néanmoins, les pertes sont inférieures à la période précédente (6 673 ha contre 7 928 ha) mais la tendance laisse présager que ces pertes vont perdurer au-delà de 2017. Les transitions se font principalement vers la catégorie « autre » avec près de 4 750 ha. Les zones déboisées se concentrent sur le piémont et au centre de la Cordillère Côtière à proximité de la Ruta U-40.

Les détails des traitements (pondération des facteurs et choix de la stratégie) sont présentés en annexe 9 page 336.

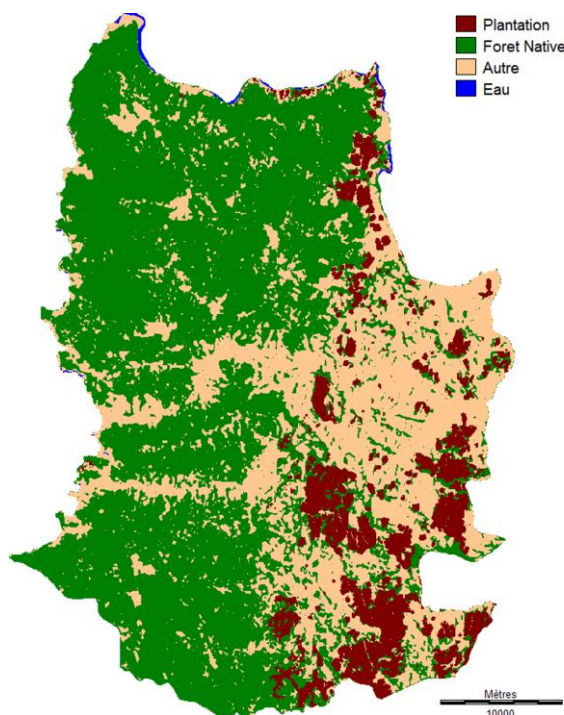


Figure 121 : Scénario tendanciel 2017
– BUSINESS AS USUAL

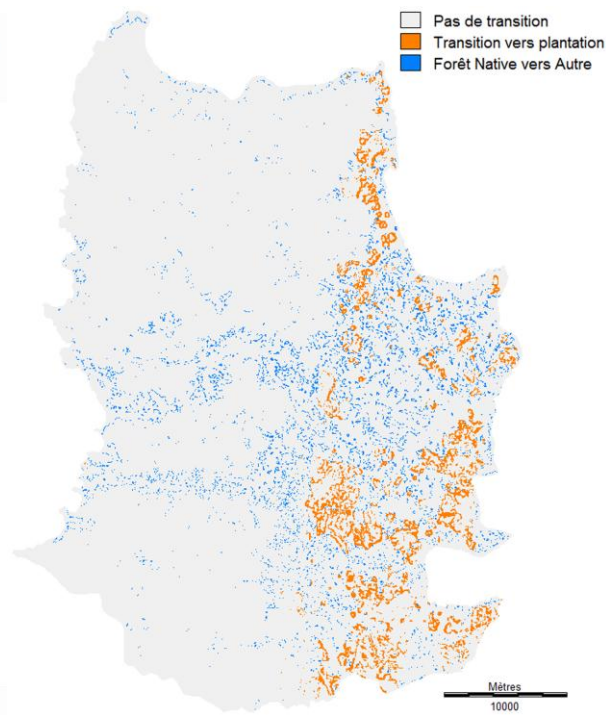
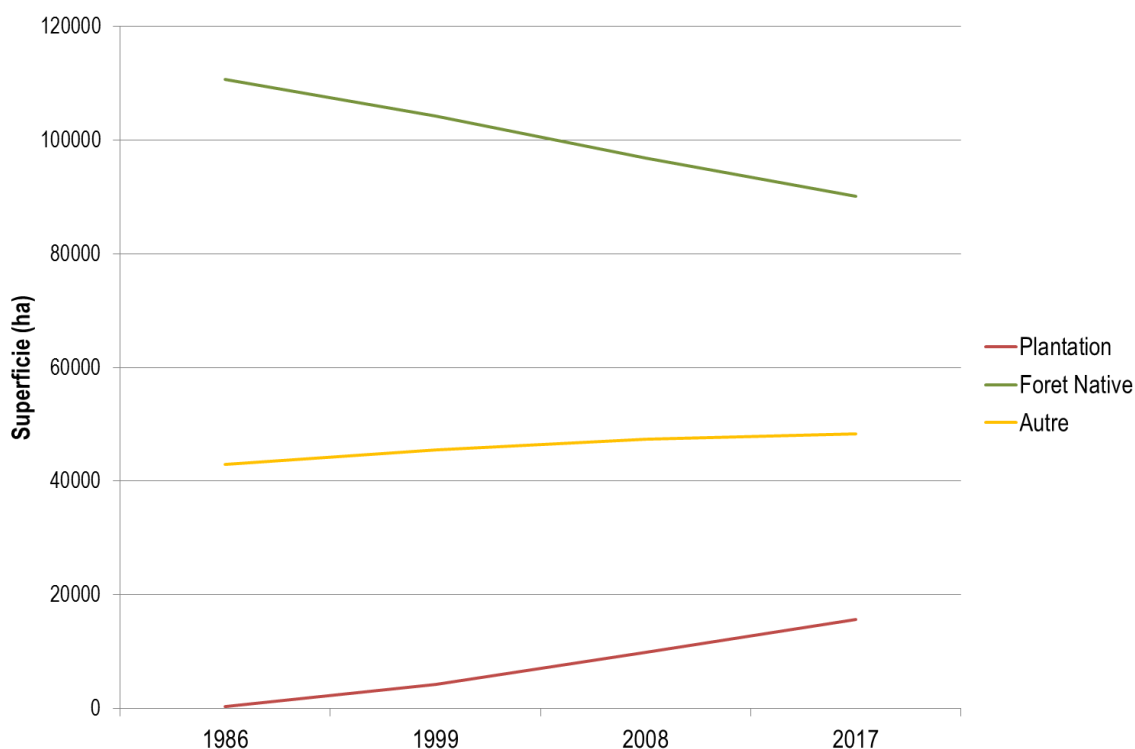


Figure 122 : Transitions simulées entre 2008 et 2017

Figure 123 : Scénario tendanciel 2017 – *BUSINESS AS USUAL*

| 2008 | 2017 | | | | |
|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | Total 2008 |
| Plantation | 9 888.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9 888.39 |
| Forêt Native | 1 926.27 | 90 184.32 | 4 747.32 | 0.00 | 96 857.84 |
| Autre | 3 776.13 | 0.00 | 43 547.67 | 0.00 | 47 323.87 |
| Eau | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 408.87 | 408.87 |
| Total 2017 | 15 590.79 | 90 184.32 | 48 294.99 | 408.87 | 15 4478.97 |

Tableau 53 : Scénario tendanciel - *BUSINESS AS USUAL*
Transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en hectares)

7.3. Scénario prospectif exploratoire : scénario volontariste (type de développement soutenable)

« It is possible to develop rural areas in a way that brings economic prosperity, maintains social cohesion, and promotes environmental sustainability - all at the same time. But the social science research required to help reconcile these objectives must be interdisciplinary »
(Institute for Alternative Futures, 2004)

Proposer un scénario d'évolution future basée sur des objectifs de soutenabilité doit nécessairement passer par la détermination de ses critères et indicateurs. Ce scénario doit également répondre à une question centrale : comment pourrait évoluer le territoire en question suite à la mise en place de politiques et/ou de pratiques sylvicoles soutenables ? S'il peut être difficile de répondre à cette question, focaliser sur la « non soutenabilité » des politiques et/ou des pratiques sylvicoles peut déjà apporter des pistes de réflexion. Ainsi, après avoir déterminé les facteurs de détérioration du territoire générés par lesdites politiques/pratiques, « le passage progressif de la « non durabilité » à la durabilité éventuelle

devrait alors se traduire par une requalification du territoire, et on pourrait prendre comme illustrations les stricts envers des exemples négatifs donnés à l’instant » (Laganier et al., 2002). Les chapitres 1, 2 et 4 ont mis en évidence les limites environnementales, sociales et économiques de la sylviculture intensive et, par conséquent, son incapacité à répondre au critère de soutenabilité sylvicole. Dans quelle mesure ces pratiques différent-elles de l’exploitation traditionnelle de la forêt native ?

Soutenable vs non soutenable

Le premier constat repose sur le rapport entre les communautés indigènes et la forêt native. Leur pérennité pluriséculaire en tant que peuple et le maintien d’une ressource de laquelle dépend leur survie peut être considérée un signe de soutenabilité.

Les plantations industrielles présentent des caractéristiques contraires : ainsi, à l’endémisme de la forêt native s’oppose l’exotisme du pin et de l’eucalyptus ; au maintien de la biodiversité, une dégradation de cette dernière ; au plurispécifique, le monospécifique ; à la régulation naturelle, les manipulations génétiques ; à l’autosuffisance des communautés, la rentabilité ; à la localité/territorialité, l’*extra-territorialité* (Santana, 2004) ; à la structure communautaire, la concentration et la capitalisation des terres ; enfin à l’isolement géographique et économique des communautés, l’intégration à un fonctionnement économique national et mondial.

7.3.1. Elaboration des hypothèses

7.3.1.1. La gouvernance territoriale

Afin de s’affranchir d’un pouvoir centralisé et de dépasser ce clivage – isolement vs intégration – l’objectif est de donner aux populations locales le moyen de valoriser leurs activités autour des ressources locales. Cet objectif renvoie directement au concept de gouvernance territoriale définie comme « *un processus non seulement de coordination des acteurs mais aussi d’appropriation des ressources et de construction de la territorialité. [...] Cette forme particulière de coordination par création de groupes ne se construit pas seulement par l’identification d’un problème commun mais aussi à travers la métamorphose des ressources, c’est-à-dire la transformation et l’appropriation par les acteurs locaux des ressources non valorisées des territoires* » (Leloup, 2005, p.330). Richard Laganier, Bruno Villalba et Bernard Zuindeau (2002, p.9) envisagent la gouvernance « *comme un mode d’organisation des acteurs (institutions, entreprises, associations, etc.) plus fondé sur l’accommodement que sur la domination, et destiné à concevoir et à mettre en œuvre un projet* ». De fait, la centralisation des prises de décisions caractéristique du pouvoir chilien laisse progressivement la place à un processus de décentralisation, à de nouvelles formes d’organisations territoriales collectives, détachées du gouvernement d’unités administratives locales (Leloup, 2005)²²⁷. Dans ce sens, Rosalía Arteaga (présidente exécutive de la

²²⁷ Cette territorialisation de l’action renvoie quant à elle au concept de développement local. « C’est ainsi que l’approche en termes de développement local conduit à considérer que le développement ne découle pas seulement de la valeur économique des activités et qu’il ne relève pas seulement des systèmes organisés de

Fundación Integración y Desarrollo para América Latina - Fidal) considère que les processus de décentralisation sont bénéfiques et « *hay que hacer un esfuerzo para que cada región decida sobre sus políticas bajo el conglomerado de un país* » (Source: Diario Austral de Osorno, Jueves 19 de mayo de 2011).

L'importance de la population locale pour une gestion soutenable de la forêt native est fondamentale. Ariel Canquil Canquil, jeune dirigeant mapuche du secteur côtier de San Paolo explique que « *para nosotros el manejo sustentable ha estado desde hace ciento de años, antes que lleguen los españoles, la manera donde las comunidades se han mantenido porque hay que tener equilibrio con nuestra Ñuke Mapu [Terre Mère], porque la tierra es acompañado con árboles, con frutos silvestres, con hongos, con animales, con hierbas medicinales. Se mantiene un equilibrio que te hace tener una buena salud. Siempre fue la visión de las comunidades. Esta visión de sustentabilidad* » La soutenabilité ne doit pas s'enfermer dans une vision européocentriste ou promue par un pouvoir centralisé, sous peine d'omettre les raisons du maintien pluriséculaire du peuple Mapuche-Huilliche. « *No effort has been made by industry to incorporate the knowledge of the indigenous Araucanos who, since time immemorial, have been excellent stewards of the monkey-puzzle forests* » (Aagesen, 1998, in Altieri et Rojas, 1999, p.58).

L'ancien président de la CONADI recentre ces propos à l'échelle de la commune de San Juan de la Costa:

« *En la costa, hay que detectar que tipo de población mapuche y que tipo de propietario tiene pensado estratégicamente plantar bosque nativo, para hacer un uso adecuado de la Ley Bosque Nativo o de la subvención estatal. Hay un nicho que hay que potenciar. Segundo, yo creo también deber haber un nicho importante de población huilliche y no huilliche que tiene como proyecto la posibilidad de seguir vendiendo leña pero para eso, requiere de una asesoría para que lo haga con plantación de eucalipto o algún tipo de árbol de mayor crecimiento, y al mismo tiempo requiere de asesorar mejor la gente que vive en la costa de Osorno (huilliche – no huilliche) de un ordenamiento de esta territorio, que hay explotación ordenada. Pero eso tiene que ir acompañado de que la gente sienta que el Estado o la sociedad o los organismos especializados en sector privado o universidad, que el bosque nativo que tienen le va a traer dividendos económicos para mejorar su vida, no para que no lo toque. Hoy día tengo la impresión que la gente huilliche está reclamando esto. Si ven que no tiene apoyo, no tienen asesoría, que no le dan la capacitación suficiente para que haciendo uso de este bosque nativo genere dividendos económicos para mejorar su vivienda, para que su hijo sale a estudiar [...]. La clase política de este territorio y la universidad de este territorio se tiene que salvar su único bosque nativo que tienen por el lado del mar y por el lado de la Cordillera. [...] La diversificación del uso del bosque nativo requiere de mayor asesoría, y no hay que esperar un programa de gobierno central, debe que surge de este territorio* ». La valorisation de la forêt native représente un enjeu central qui doit être accompagné d'un

production et des institutions centralisées mais est aussi lié à de petites initiatives localisées, à la mobilisation de la population locale autour de projets utilisant des ressources locales ».

(<http://www.hypergeo.eu/spip.php?article424>)

intérêt de la part des acteurs présents sur ce territoire (universitaires, organismes publics, etc.).

Enfin, et pour mettre en avant cette volonté de décentralisation, voici deux stratégies de développement mises en place à l'échelle régionale et communale.

La Région de Los Lagos a publié un rapport intitulé « *Región de Los Lagos al 2020 – Estrategia De Desarrollo* » (2009) dont l'objectif est de parvenir à une meilleure compétitivité régionale en 2020, en mettant l'accent sur l'intégration et la cohésion sociale.

« *La propuesta que se presenta tiene como ejes de Desarrollo Regional, lograr al 2020 una Región con mayor cohesión e integración social, donde la generación del conocimiento es la base para alcanzar el desarrollo; los sectores económicos relevantes agropecuario, pesca y acuicultura y turismo, alcanzan los objetivos del desarrollo a través de la competitividad regional con énfasis en la inclusividad y crecimiento sostenible* » (Gobierno Regional de Los Lagos, 2009).

Le PLAN de Desarrollo Comunal (PLADECO) concentre ses efforts sur la coordination de tous les agents institutionnels, économiques et sociaux à l'échelle de la commune, en vue d'élaborer un projet futur destiné à promouvoir son rayonnement économique et social.

« *Plan de Desarrollo Comunal es el conocimiento, lo más profundo posible, de la propia realidad, con sus posibilidades, los intereses de su población, de las empresas ubicadas en la comuna, las relaciones económicas y sociales existentes al interior y su relación con el exterior, sus recursos humanos y materiales, su cultura y costumbres, así como su historia pasada y reciente* » (AZUL Consultadores Asociados, 2004).

7.3.1.2. Le Projet de Territoire Mapu Lahual

Le Projet de Territoire Mapu Lahual (Red de Parques Comunitarios Mapu Lahual) s'inscrit dans cette optique de valorisation. Il s'agit d'une initiative de conservation et d'écotourisme inscrite dans une stratégie globale de développement conduite par les organisations autochtones. D'après l'Asociación Indígena Mapu Lahual (AIML)²²⁸: « *la idea es permitir el uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y escénicos de la Cordillera de la Costa de la Provincia de Osorno, contribuyendo con ello a incrementar los niveles de conciencia respecto a la importancia de la conservación del bosque nativo, y a generar alternativas de empleo e ingreso para las familias de las comunidades a partir del turismo, artesanías y otras actividades compatibles con la conservación* ».

La Mapu Lahual (Tierra de Alerce) s'étend sur plus de 60 000 hectares dont 45 000 couverts de forêts natives (WWF, 2001)²²⁹ et intègre les communautés de Melillanca Guanquil, Maicolpi, Maicolpi Rio Sur (pour la commune de San Juan de la Costa), Caleta Huelyehue, Nirehue, Loy Cumilef, Caleta Condor, Manquemapu et Mahuidantu (Paillamanque, novembre 2011²³⁰) (figure 124). Les principales activités productives forestières se concentrent sur l'extraction de bois et d'alerce mort et sont régulées par la présence de plan de gestion délivré par la CONAF. Le modèle de gestion forestière favorise l'usage « *sustentable de recursos naturales del bosque con fines alimenticios, artesanales, manufacturados, energéticos, entre*

²²⁸ <http://www.mapulahual.cl/index.php>

²²⁹ <http://chile.panda.org/?200722/seminariomapolahual1>

²³⁰ Note prise lors de l'atelier intitulé « *Planificación Participativa Para la Tierra y el Mar del Mapu Lahual* »

otros, que permitan la incorporación de valor agregado a la producción, con denominación de origen » (Paillamanque, novembre 2011).

La Mapu Lahual représente clairement un projet de gouvernance territoriale. La visée d'autonomie économique du territoire s'est précisée en 2010 par la création d'une entreprise communautaire Cooperativa Williche Mapu Lahual. Les impacts économiques et productifs, socio-culturels, et environnementaux sont considérés comme positifs et très prometteurs par l'ingénieur forestier Luis Cárdenas (Cardenas, 2006).



Figure 124 : Localisation de la Mapu Lahual – Source : Cardenas, 2006

7.3.1.3. L'agroforesterie sur la précordillère côtière

L'agroforesterie est une activité « associant sur les mêmes parcelles une vocation mixte de production agricole annuelle (cultures, pâture) et de production différée à long terme par les arbres (bois, services) » (AFAF, 2006)²³¹. Elle regroupe trois systèmes : (i) le système agro-sylvicole (association de cultures agricoles et d'arbres), (ii) le système agro-sylvo-pastoral (lorsque les arbres sont associés à une culture agricole et de l'élevage), et (iii) le système sylvo-pastoral (association d'arbres et d'élevage/pâture) (Garfias, 2007, p.633).

L'Association Française d'AgroForesterie (AFAF) a démontré les avantages sur le plan forestier, agricole et environnemental de l'agroforesterie avec, entre autres, une meilleure croissance et une meilleure qualité des arbres, la « création de paysages originaux, attractifs,

²³¹ <http://www.agroforesterie.fr/>

ouverts, favorables aux activités récréatives ». Le Macaulay Land Use Research Institute²³² considère que l'agroforesterie « *creates welfare benefits to grazing livestock through the provision of shelter and shade. Agroforestry generates new opportunities for wildlife. More species of insects and a greater abundance of insects are found in agroforestry. The same applies to birds with more species (both open-field and woodland bird species) and a greater abundance of birds in agroforestry than in conventional agriculture* »²³³.

Compte tenu du potentiel exclusivement forestier des terres dans la commune (Santana, 2004), seul le sylvopastoralisme est applicable. Ce type de pratique a été largement étudié au Chili, bien que les expériences soient peu connues. Roberto Garfias donne l'exemple d'une expérience sylvopastorale, menée dans les années 1970, sur des parcelles de petites superficies dans la 10^{ème} Région de Los Lagos. « *En estas experiencias se estableció una carga animal de 7 ovinos/ha/año, para condiciones de pradera natural mejorada con trébol subterráneo, con densidades de plantación de Pinus radiata que fluctúan entre 1.000 y 2.000 árboles/ha* » (2007, p.635). Les bénéfices (environnementaux, économiques et paysagers) générés par cette pratique sont notables: « *en estos ensayos se pudo comprobar que los ovinos consolidan su posición como mejoradores de la pradera, contribuyen a disminuir el riesgo de incendios forestales, mejoran la estética y suministran abono al bosque* » (Olivares, 1993, in Garfias, 2007, p.635). D'autres expériences révèlent que ce système « *diversifies farm income; can minimize the need for chemical or mechanical vegetation control; and can reduce hay and feeding costs for livestock. Silvopastoral management creates an environment where trees, forage, and livestock can be developed to their full economic potential* » (The Center For Agroforestry – University of Missouri)²³⁴.



Photo 9 : F. Liagre – Source INRA Montpellier²³⁵

²³² The Macaulay Land Use Research Institute est un centre international de recherche et de conseil focalisé sur les conséquences sociales et environnementales de l'utilisation des sols en milieu rural. Ses recherches portent plus particulièrement sur la protection des ressources naturelles, la création de systèmes intégrés d'utilisation des sols et le soutien au développement soutenable des communautés rurales.

²³³ http://www.macaulay.ac.uk/agfor_toolbox/

²³⁴ <http://www.centerforagroforestry.org/practices/sp.php>

²³⁵ <http://www1.montpellier.inra.fr/safe/french/agroforestry.php>

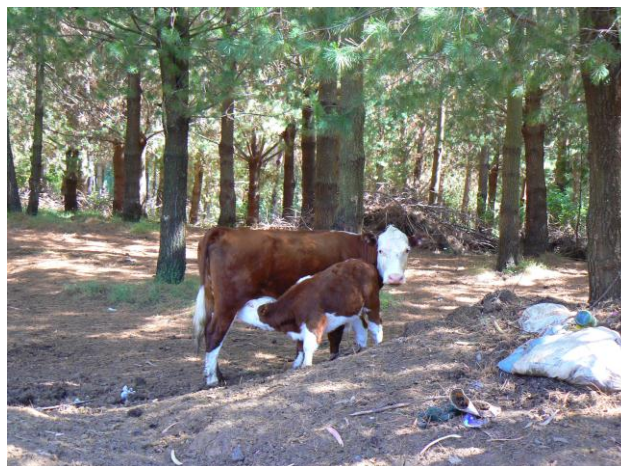


Photo 10 : Sylvopastoralisme dans le secteur de Puaicho – 02/12/2008 ©

L'avantage de ce système est financier. Le boisement des petites parcelles peut être considéré comme une activité non rentable à court terme pour les petits propriétaires. Bien que l'Etat apporte une aide financière remarquable pour inciter au boisement, les récoltes se font sur des temporalités telles que le petit propriétaire ne dispose pas de retour sur investissement à court terme lui permettant de nourrir sa famille. Les éclaircies pour le *Nothofagus dombeyi* se font tous les 10, 15, 22 et 30 ans (30 ans étant la date de rotation). Le Taux de Rentabilité du capital Investi (TRI) pour le *Nothofagus* est de 13,6%. « *Financial returns from planted and native forests are one of the most important factors driving forest management, conservation, and investments throughout the world* » (Cubbage et al., 2007). Développer en parallèle une activité pastorale apporterait des revenus réguliers aux propriétaires, dans l'attente des premières récoltes de bois (élagages, éclaircies).

Le coût pour le boisement de 100 plants/ha, entre les Macrozones N°2 à N°8, correspond à des plantations de faibles densités, à des fins sylvopastorales, et est seulement applicable pour les petits propriétaires forestiers (Tabla de costos CONAF, 2010, B.4). Même avec une faible densité de plants, les coûts restent plus avantageux pour les espèces exotiques (100 plantas/ha = 151 829\$) que pour les espèces natives (100 plantas/ha = 165 226\$).

7.3.1.4. Valorisation de la ressource forestière native par la commercialisation de la *leña*

La variété des fonctions que peut satisfaire la *leña* a créé au fil du temps une dépendance des ménages urbains par rapport à cette ressource. En 1997, Nicolas Sáez remarquait qu'environ 91% des foyers de la 10^{ème} Région en consommait, dont 70,7% dans la ville d'Osorno (Sáez, 1997). Corrélée à une réserve abondante, avec plus de 265 m de m³ ssc²³⁶ dans la même Région (tableau 54), l'exploitation et la gestion soutenable de la forêt native, notamment par un système de certification, devient une nécessité.

Pour René Reyes (Voces del Bosque, 2007) « *en el inicio de la cadena, es decir, la extracción del recurso, la certificación permite entregar asesoría de técnicos y expertos en la materia, de manera de no degradar el bosque nativo y, muy por el contrario, manejarlo sustentablemente. Esto otorga un claro beneficio para quienes viven de los bosques, pues les*

²³⁶ Ssc : seca sin corteza / sec sans écorce

permite ofrecer un producto de calidad, por el que pueden exigir un mejor precio ». Le Sistema Nacional de Certificación de Leña (http://www.lena.cl/?q=los_lagos) montre cependant que l'exploitation du bois de chauffe ne se limite pas à la forêt native, mais aussi à la gestion d'essences exotiques pour des raisons que nous avons exposées précédemment (table de coûts). Or, des études ont démontré que le pouvoir calorifique de l'eucalyptus est inférieur à celui de certaines espèces natives, notamment la *luma*. D'après Carola Iturriaga (secrétaire technique du Consejo de Certificación de Leña de la Provincia de Llanquihue) « *es la más potente, ya que entrega entre 6 y 8 Giga Joule por metro cúbico de leña (con un 20% de humedad), mientras que el ulmo y el eucaliptus dan 5,5 Giga Joule, el coigüe y el mañío 4 Giga Joule y el canelo 4 Giga Joule* » (El Llanquihue, 12 mars 2008).

| Région | Volume (m ³ ssc) | | | |
|----------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------|----------|
| | Sciage | Trituration | Bois de chauffe | Total |
| V | 0,12 | 0,43 | 0,66 | 1,22 |
| RM | 0,16 | 0,57 | 0,79 | 1,53 |
| VI | 0,50 | 1,00 | 0,14 | 2,96 |
| VII | 5,26 | 5,53 | 9,68 | 20,47 |
| VIII | 3,57 | 16,13 | 34,95 | 86,79 |
| IX | 51,48 | 15,96 | 49,67 | 117,12 |
| X | 158,99 | 51,97 | 265,46 | 476,43 |
| XI | 81,21 | 30,22 | 141,12 | 252,55 |
| XII | 23,26 | 9,86 | 58,00 | 91,13 |
| Total (m ³ ssc) | 356,68 | 131,70 | 561,83 | 1 050,21 |

Tableau 54 : Volume (en millions de m³ ssc) de forêt native par région. Source : CONAF, 1999

Valoriser la forêt native passe tout d'abord par la réduction des coûts de boisement en les ajustant à ceux des plants exotiques. Frederick Cubbage *et al.* (2007) ont démontré que la gestion des forêts autochtones (natives) peut contribuer à des retours financiers positifs et considèrent ces derniers comme l'un des facteurs les plus importants de gestion forestière, de conservation et d'investissement à travers le monde.

L'importance des aides financières est mise en évidence par les travaux de Schiappacasse *et al.* (2012) sur la forêt aride dans le centre chilien. Les auteurs expliquent que les subventions (D.L 701 et Ley Bosque Nativo) ne suffisent pas à faire changer le comportement des propriétaires terriens et prônent un changement radical des lois forestières en vigueur : « *if we want to implement effective incentives for dryland forest ecosystem restoration, it is necessary to radically change the current system of economic incentives, which includes environmentally harmful subsidies such as Decree Law 701* ».

Cette situation est d'autant plus importante que la demande future en dendroénergie va s'accroître. D'après le CNE (2008, in : Grosse, 2011) la demande énergétique passera de

245 000 tcal/an²³⁷ en 2007 à 812 000 tcal/an en 2030. La consommation de *leña* (thermique et électrique) augmenterait alors de 2,1 fois.

7.3.1.5. Les propositions de l’Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo (AIFBN) pour un « Nuevo Modelo Forestal »

Publié en 2011, les propositions de l’AIFBN pour le développement soutenable de la forêt native et du secteur forestier reposent sur trois piliers :

- 1- Mejorar las condiciones de vida de la población en regiones forestales mediante la promoción del desarrollo territorial a escala local y los valores de autonomía, solidaridad, autorregulación y participación ciudadana en la toma de decisiones.
- 2- Desarrollar y fortalecer un sector forestal orientando al mercado interno, basado en aspectos estratégicos como el reemplazo de importaciones, la mitigación y adaptación al cambio climático y la valorización social de los bienes y servicios que proveen los bosques nativos y plantaciones
- 3- Avanzar hacia la sustentabilidad del sector forestal exportador, a través de regulaciones y programas de permitan minimizar sus externalidades negativas en temas ambientales, sociales y económicos, y mejorar la distribución de sus beneficios.

Ce nouveau modèle forestier propose des améliorations (i) sur le plan politique : avec le développement de nouvelles institutions dédiées à la gestion forestière soutenable, et la modification du cadre législatif (Decreto Ley 701, Ley Bosque Nativo, etc.) ; (ii) sur le plan social : avec la question de la régularisation des terres indigènes et la sauvegarde des pratiques ancestrales, le développement d’entreprises locales accompagné de suivis techniques et de formations, le maintien d’emploi à l’échelle communale ; (iii) sur le plan économique : avec l’insertion des petites et moyennes entreprises sur le marché du bois, et la diversification des produits forestiers (notamment natifs) ; enfin (iv) sur le plan environnemental : avec la nécessité de généraliser les plans de gestion, de renforcer les SNASPE et de développer des plans intégrés de développement local.

7.3.2. Spatialisation des hypothèses

Ce scénario s’envisage ainsi à mi-chemin entre la pérennité des plantations exotiques (stabilité économique), voire un infléchissement de la production forestière, et le respect des revendications indigènes se traduisant par la récupération des terres et la mise en place de politiques de développement. Cet infléchissement ne réduit pas pour autant la probabilité de voir apparaître des plantations sur le piémont. D’après Cristián Estades et Martín Escobar (2005, p. 614) « [...] aunque las plantaciones de pinos dejan de ser interesante, debido a su gran capacidad de regeneración natural, su erradicación total es sumamente difícil (al menos con las técnicas existentes a la fecha). Esto permite suponer que las plantaciones de pino son un ecosistema artificial que dominara gran parte del paisaje de la CC de Chile por mucho

²³⁷ tcal/an (tonne calorie) = quantité de chaleur dégagée par la combustion d’une tonne de charbon par an.

tiempo ». Ainsi, la totalité des propriétaires est touchée et se voit affecter une aptitude maximale pour l'objectif PLANTATION. L'évolution des plantations est modulée en déterminant leur couverture (ha) en 2035 dans la matrice markovienne (10 690 ha). La stratégie employée (pour les plantations) est identique au scénario précédent. Enfin, et dans l'optique de favoriser l'apparition de la forêt native sur la catégorie « autre », l'aptitude de cette dernière est maximale (255).

7.3.3. Résultats

Les plantations industrielles établies restent stables entre 2008 et 2035 (tableau 55). De nouveaux espaces sont gagnés uniquement sur la catégorie « autre » (801.90 ha, soit 2 %) pour atteindre un total de 10 690 ha. Ce scénario marque la fin du processus de substitution directe. La figure 126 montre que l'ensemble de ces zones se trouve sur le piémont à proximité des plantations détectées en 2008.

La forêt native recolonise de manière diffuse et hétérogène la commune et ne connaît aucune perte. En 2008 sa superficie atteignait les 96 857 ha (63 % du paysage) et avoisine les 99 000 ha 27 ans plus tard (65 % du paysage), ce qui correspond à une expansion d'environ 3 000 ha. En plus de cette reconquête naturelle, il est probable que l'apparition de forêts natives (sur la précordillère) soit d'origine anthropique, c'est-à-dire qu'elle provienne de parcelles forestières gérées et soumises à un plan de gestion.

Les détails des traitements (pondération des facteurs et choix de la stratégie) sont présentés en annexe 10 page 337.

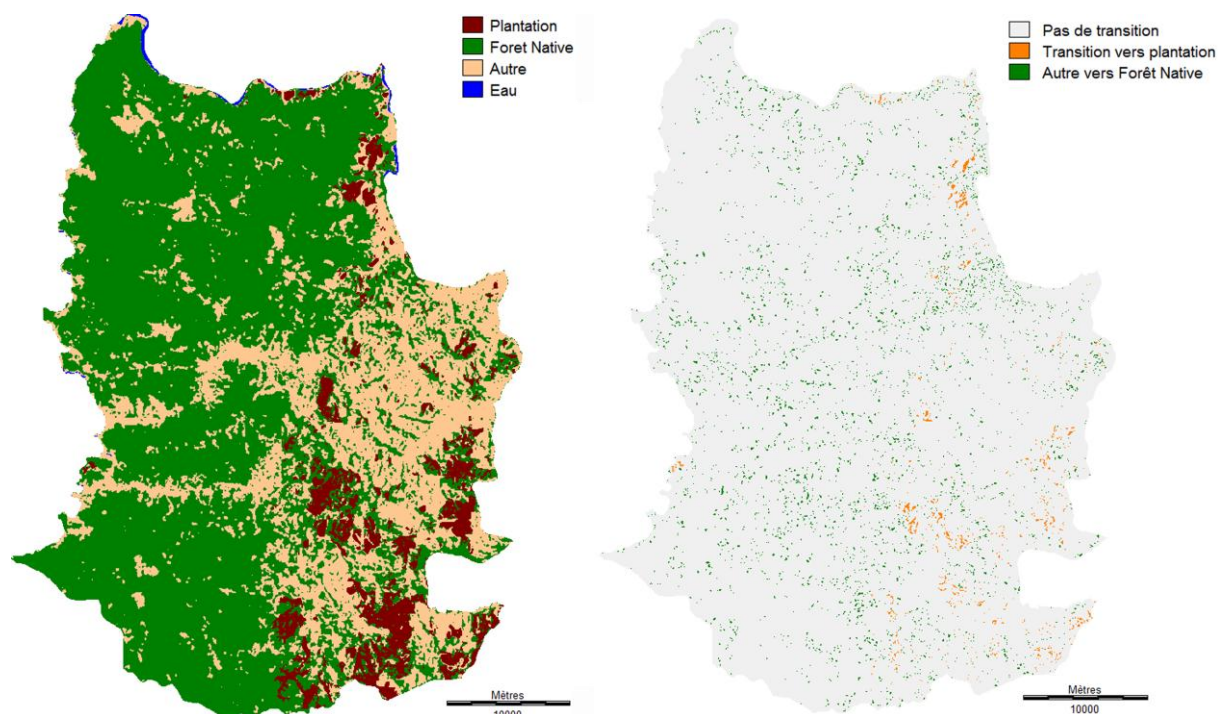


Figure 125 : Scénario prospective exploratoire 2035 Figure 126 : Transitions simulées entre 2008 et 2035

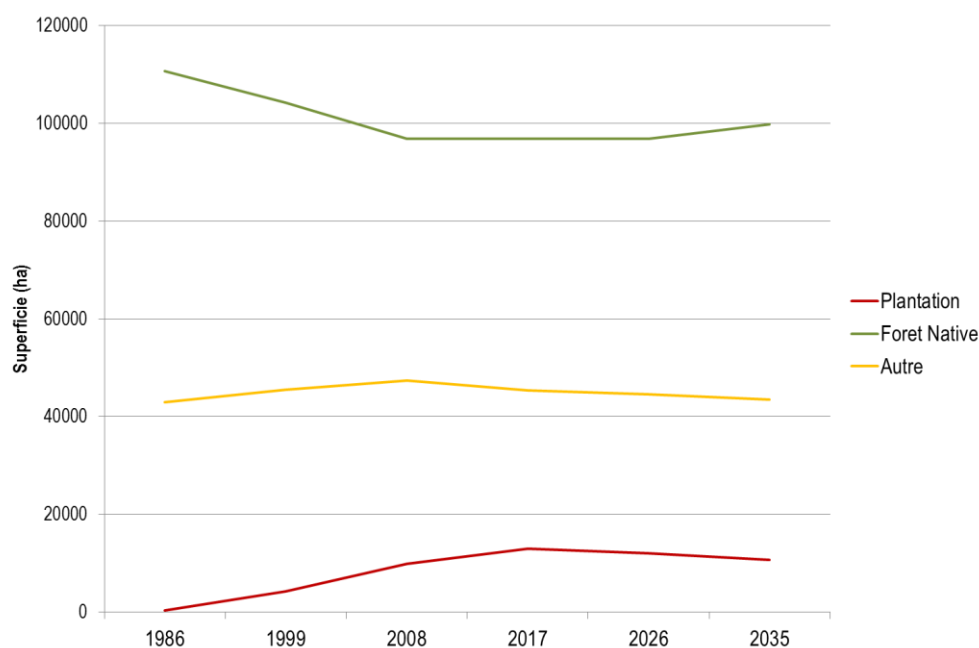


Figure 127 : Scénario prospective exploratoire 2035 – DS

| 2008 | 2035 | | | | |
|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | Total 2008 |
| Plantation | 9 888.39 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9 888.39 |
| Forêt Native | 0.00 | 96 857.84 | 0.00 | 0.00 | 96 857.84 |
| Autre | 801.90 | 2 998.62 | 43 523.28 | 0.00 | 47 323.87 |
| Eau | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 408.87 | 408.87 |
| Total 2035 | 10 690.29 | 99 856.26 | 43 523.28 | 408.87 | 154 478.97 |

Tableau 55 : Scénario prospective exploratoire – DS.
Transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en hectares)

7.4. Scénario prospectif normatif « éco-centré »: scénario de préservation (« contrasté »)

Ce scénario présente des situations extrêmes - bien que réalistes - avec un degré de probabilité faible.

7.4.1. Elaboration des hypothèses

7.4.1.1. La crise économique et la chute du secteur forestier

La crise économique a un impact notable sur le secteur forestier international. La Pricewaterhouse Coopers' 22nd Annual Global Forest & Paper Industry Conference qui s'est déroulée en mai 2009 à Vancouver, a clairement exprimé son inquiétude face à la récession économique mondiale, laissant apparaître des termes tels que « *economic tsunami* », « *pessimistic forecasts* », « *the dismal year* » ou « *survive the downturn* » (PwC, 2009, Global Forest). Le mythe chilien – le « jaguar de l'Amérique latine » – fondé sur un modèle économique néo-libéral n'est pas en mesure de contrer les effets dévastateurs de la crise économique. Les entreprises forestières sont contraintes à des restructurations économiques, c'est-à-dire à des licenciements et à des investissements afin de redynamiser leur production.

Elles doivent également faire face à l'augmentation exponentielle du prix du foncier. Or, les retours sur investissements sont systématiquement inférieurs aux coûts mobilisés pour améliorer les installations. Cette situation se traduit, à terme, par une incapacité à répondre à la concurrence internationale et par le déclin progressif de l'économie forestière chilienne.

Ce scénario laisse donc présager d'un abandon partiel ou total de la part des entreprises forestières qui délocalisent leurs plantations. La délocalisation sous-entend la recherche de nouvelles terres à l'étranger, notamment au Brésil, en Uruguay ou en Argentine. Selon Verónica Labra l'Argentine présente de bonnes conditions pour investir cela « *gracias al otorgamiento de beneficios tributarios; menores presiones ambientalistas e indígenas; menor costo de la tierra en relación a Chile; [...]* » (Labra, 2001, p.4).

7.4.1.2. Redistribution et/ou régularisation des terres indigènes

Les espaces « libérés » sont alors redistribués et/ou vendus aux populations locales (petits et moyens propriétaires, indigènes ou non). Pour les communautés autochtones la redistribution s'effectue par l'intermédiaire de la Ley Indígena N° 19.253 art. 20, letra a), b) et c) page 19 (CONADI, 2008). En 2010, la CONADI lança un appel d'offre aux propriétaires particuliers souhaitant offrir leurs terres à la CONADI qui assure la redistribution au profit du *Fondo Tierras y Aguas Indígenas*. Seules les personnes, communautés et partie de communautés indigènes sont concernées :

« *La Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, CONADI, invita a todos los propietarios interesados a inscribir sus bienes inmuebles en el Registro Nacional de Oferta de Predios, cuyo objetivo es contar con un registro único de la oferta de predios a nivel nacional que puedan ser adquiridos por la CONADI a personas, comunidades y parte de comunidades indígenas* »²³⁸.

La création du Fondo para Tierras y Aguas Indígenas permet à la Corporation d'atteindre trois objectifs – art.20, letra a), b) et c):

- a) *Otorgar subsidios para la adquisición de tierras por personas, Comunidades Indígenas o una parte de éstas cuando la superficie de las tierras de la respectiva comunidad sea insuficiente, con aprobación de la Corporación. [...].*
- b) *Financiar mecanismos que permitan solucionar los problemas de tierras, en especial, con motivo del cumplimiento de resoluciones o transacciones, judiciales o extrajudiciales, relativas a tierras indígenas en que existan soluciones sobre tierras indígenas o transferidas a los indígenas, provenientes de los títulos de merced o reconocidos por títulos de comisario u otras cesiones o asignaciones hechas por el Estado en favor de los indígenas.*
- c) *Financiar la constitución, regularización o compra de derechos de aguas o financiar obras destinadas a obtener este recurso.*

²³⁸ Source CONADI, 10 de Noviembre 2010 : <http://www.origenes.cl/tarapaca-10-nov.html>

A la redistribution des terres s'ajoute, durant la période 2010-2015, la régularisation de terres communautaires par quelques propriétaires indigènes. La demande des *títulos de dominio* s'effectue auprès du *Ministerio de Bienes Nacionales* et favorise la régularisation de centaines d'hectares sur le piémont. A partir de 2015, l'Etat chilien, sous l'impulsion de la CONADI, et en respect à la Convention 169 de l'Organisation Internationale du Travail sur les Peuples Indigènes et Tribaux des Pays Indépendants, reconnaît les anciennes limites des communautés dans la commune. L'article 2 – point 1 (partie 1) de la Convention demande aux gouvernements de protéger les droits de ces peuples et de garantir le respect de leur intégrité. Pour ce faire, il est sommé aux représentants, selon le point 2, b), de promouvoir « *la plena efectividad de los derechos sociales, económicos y culturales de esos pueblos, respetando su identidad social y cultural, sus costumbres y tradiciones, y sus instituciones* » et c) d'aider « *a los miembros de los pueblos interesados a eliminar las diferencias socioeconómicas que puedan existir entre los miembros indígenas y los demás miembros de la comunidad nacional, de una manera compatible con sus aspiraciones y formas de vida* ».

Les politiques économiques se construisent simultanément en faveur de ces populations en systématisant des projets de développement local, en optant pour un processus de décision *bottom-up* (cf. gouvernance territoriale). On assiste à une (ré-) intégration des valeurs Mapuche dans la société, à une (re-) connexion de la société moderne avec l'identité autochtone, à une (re-) valorisation du savoir indigène et à un renforcement de la participation des communautés dans le développement de programmes (Groenfeldt, 2003). D'après Bernardo Antriao, la nouvelle génération de dirigeants mapuche-huilliche n'est plus seulement préoccupée par la récupération de la terre, mais s'interroge sur son usage et sa valorisation -"*que vamos a hacer de las tierras recuperadas?*"-. Afin de construire un *projet indigène* d'utilisation rationnelle du sol et des ressources naturelles, nombreux sont ces dirigeants à suivre des formations techniques et professionnelles.

7.4.1.3. Valorisation de la Cordillère de la Côte

La Cordillère de la Côte devient une unité administrative cohérente à la fois d'un point de vue (i) économique, avec la valorisation de la ressource forestière native (commercialisation de bois de qualité et certifié – gestion soutenable, écotourisme) (Luz de la Maz, 2007, p.682) – circuit de découverte, activité de plein air – rencontre avec les populations locales et découvertes des savoir-faire locaux, mise en place de coopérative forestière); (ii) social, avec la redistribution auprès des familles de cette valorisation (création de centres culturels – d'écoles – formation de professionnels, etc.); et (ii) environnementale, avec le maintien de la biodiversité inhérente aux forêts tempérées humides. Ceci rejoint les propositions de l'AIFBN mais dans un contexte économique défavorable aux entreprises forestières.

7.4.2. Spatialisation des hypothèses

Ce scénario exclut la création de nouvelles plantations exotiques ainsi que le reboisement des superficies existantes après la coupe. Les entreprises forestières sont inaptés

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. Les forêts natives n'évoluent pas à l'intérieur des (très) grandes propriétés (aptitude de 25), mais peuvent apparaître chez les moyens et petits propriétaires (aptitude de 255)²³⁹. L'objectif FORÊT NATIVE opte pour la stratégie n°4 « optimiste » (avec une prise de risque élevé 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 natives existantes.

Enfin, l'objectif AUTRE 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.

7.4.3. Résultats

Le déclin des plantations exotiques est majeur (figure 130). Près de la moitié du patrimoine forestier observé en 2008 (55 %) reste stable, ce qui signifie que 45 % sont remplacés par un autre type d'occupation du sol. En effet, 29 % des plantations (2 855 ha) sont converties par des plantations d'espèces natives (tableau 56). Il s'agit de reboisements volontaires qui ont suivi les phases de redistribution/régularisation des terres et de mise en place de projet de gestion sylvicoles. Environ 1 600 ha de plantations sont récoltés et laissés à l'abandon.

La superficie couverte par la forêt native dépasse les 110 775 ha observés en 1986. Sur les 119 500 ha couverts en 2035, 17 % sont gagnés sur la catégorie « autre » et 2 % sur les plantations exotiques. Ces premières transitions se localisent sur la précordillère et forment des patrons spatiaux similaires (géométriques et homogènes) à ceux des plantations de pins et d'eucalyptus observés en 2008 (figure 129). La création de coopératives forestières regroupant plusieurs petits propriétaires forestiers peut expliquer ces patrons.

Les détails des traitements (pondération des facteurs et choix de la stratégie) sont présentés en annexe 11 page 338.

²³⁹ A la différence des autres scénarii, l'objectif FORÊT NATIVE inclut le facteur propriété pour insister sur le boisement d'espèces natives par les propriétaires.

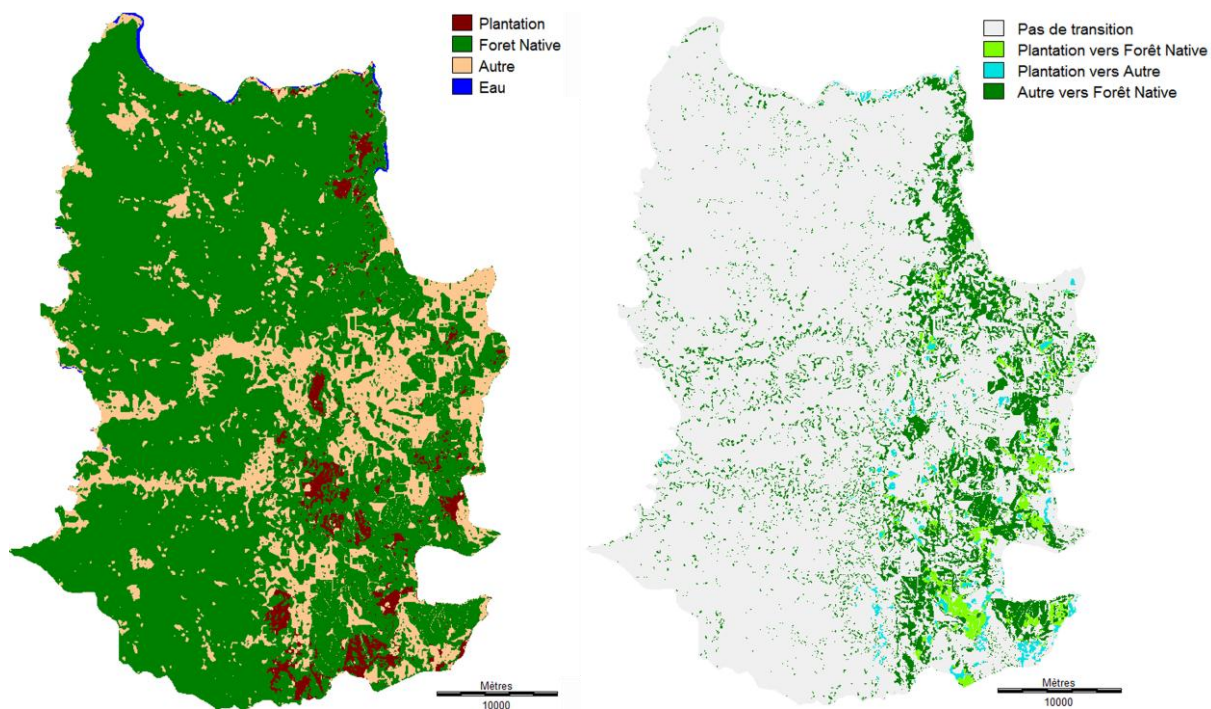


Figure 128 : Scénario normatif 2035 – ECO-CENTRE Figure 129 : Transitions simulées entre 2008-2035

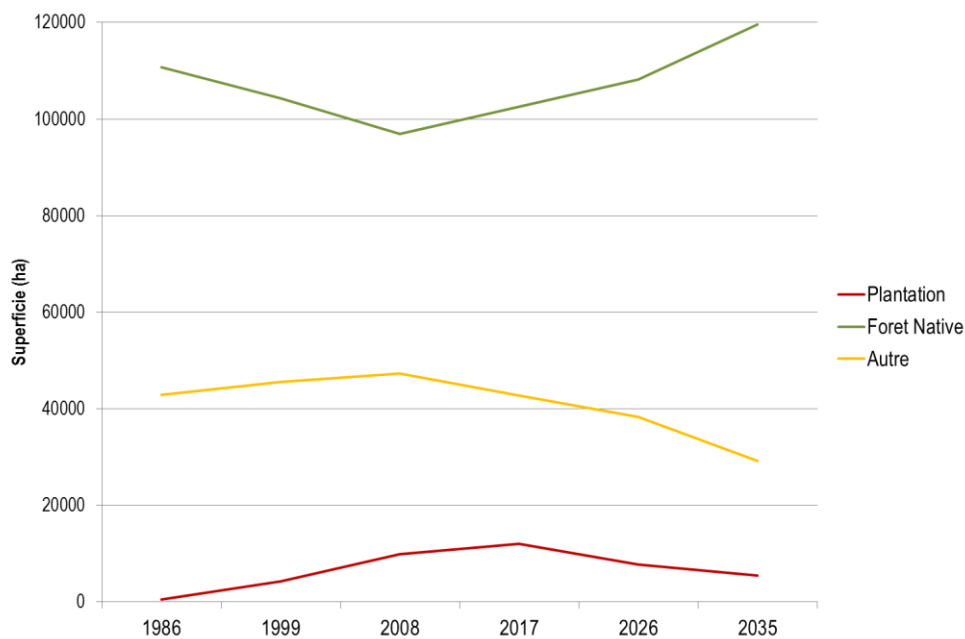


Figure 130 : Scénario normatif 2035 – ECO-CENTRE

| 2008 | 2035 | | | | Total 2008 |
|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | |
| Plantation | 5 400.45 | 2 855.43 | 1 632.51 | 0.00 | 9 888.39 |
| Forêt Native | 0.00 | 96 857.84 | 0.00 | 0.00 | 96 857.84 |
| Autre | 0.00 | 19 823.56 | 27 500.31 | 0.00 | 47 323.87 |
| Eau | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 408.87 | 408.87 |
| Total 2035 | 5 400.45 | 119 536.83 | 29 132.82 | 408.87 | 154 478.97 |

Tableau 56 : Scénario normatif – ECO-CENTRE
Transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en hectares)

7.5. Scénario prospectif normatif: scénario intensif (« *contrasté* »)

7.5.1. Elaboration des hypothèses

7.5.1.1. Un marché international compétitif

La crise économique est résorbée et le marché international de la cellulose connaît depuis 2015 un boom foudroyant. Les entreprises ont réorienté leur stratégie et ont entrepris des restructurations économiques, notamment par la construction de nouvelles usines de traitement parallèlement à la modernisation des structures déjà existantes et des techniques de production. La Forestal Arauco, Empresas CMPC et la Forestal Tornagaleone cherchent à intégrer les rangs des 10 premiers producteurs de cellulose au monde, et à pouvoir concurrencer l'arrivée en force de la Chine sur le marché de la bioénergie. Fort de ses 40 millions d'ha de plantations, la Chine prévoit, via le National Plan for the Protection and Use of Forestland, le boisement « *of an additional 20 million ha of wooded land that is stated to be used to provide feedstock for bioenergy projects* » (PwC, 2011, p.21).

Les exigences du marché international ont poussé le gouvernement chilien à réorienter sa politique en matière de boisement. Les entreprises disposent de multiples avantages fiscaux (exemption d'impôts, prime d'installation, etc.) et profitent de la dévaluation du foncier pour acquérir de nouvelles parcelles.

7.5.1.2. La réorganisation territoriale à l'échelle de la 10^{ème} Région

L'objectif pour les entreprises est très clair. Il s'agit d'accroître leur patrimoine forestier en tenant compte de la disponibilité des terres, et les entreprises focalisent leurs efforts sur la 10^{ème} Région de Los Lagos et plus particulièrement sur la province d'Osorno.

Dans la lignée de la création d'usines de cellulose (Planta Valdivia en 2004 et Planta Nueva Aldea en 2006), les entreprises favorisent l'implantation d'un centre de production de cellulose dans la province du Río Negro²⁴⁰ (figure 131) qui jouera un effet de polarisation sur l'établissement de nouvelles plantations exotiques dans les communes adjacentes. Cette stratégie avait déjà été évoquée par Roberto Santana (2004, p. 140), ce dernier expliquant que « *les objectifs de reboisement de la firme [Forestal Anchile] sont en rapport avec une possible usine de cellulose de fibre courte qui devrait être installée à la Unión* ».

²⁴⁰ Le choix de la commune du Río Negro provient d'une rumeur qui circulait parmi des ingénieurs forestiers.

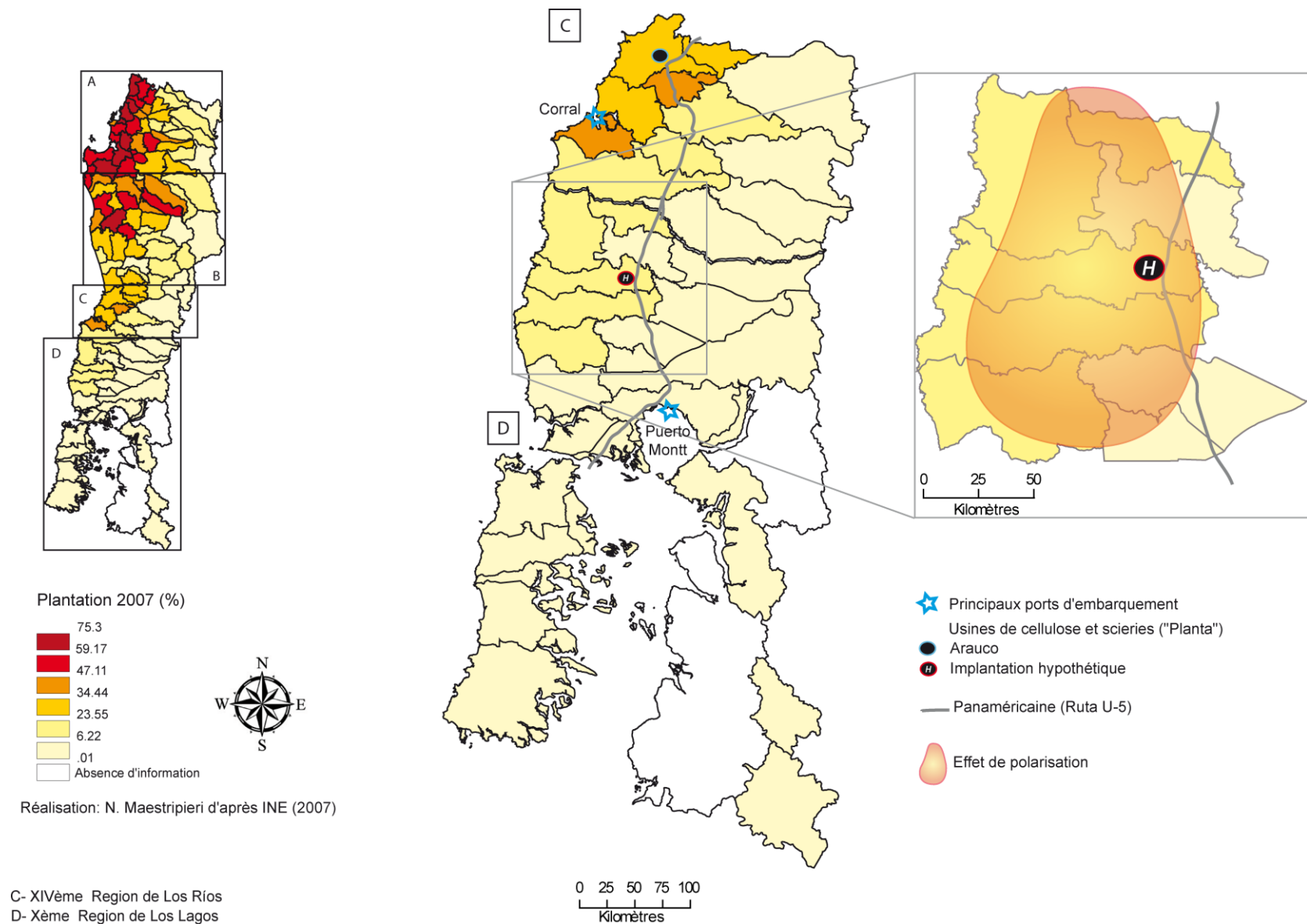


Figure 131 : Implantation hypothétique d'une usine de cellulose dans la commune du Río Negro

7.5.1.3. La construction de la Ruta Costera

« [...] les firmes, notamment Anchile, auraient intérêt à progresser vers le littoral de la Cordillère, [...]. Ces menaces hypothétiques ne font que s'accroître avec la construction de la route sur la côte entre Mehuin et Bahía Mansa » (Santana, 2004, p.141).

Le Ministère des Travaux Publics (MOP) voit dans le projet de la *Ruta Costera* (figure 132) le moyen d'unir le Chili grâce à une voie longitudinale qui connecte le Norte Grande avec les zones du centre et du sud du pays, c'est à dire de la Région de Tarapacá jusqu'à Los Lagos. Le tracé total de la route atteint les 3 340 kilomètres²⁴¹. Ce projet permettrait selon le Ministère des Travaux Publics 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. Elle permettra aussi de relier les principales villes et ports.

Comme le remarque l'Intendant de la 10^{ème} Région dans le *Diario Austral* (décembre 2001, in Barrué Pastor, 2004, p. 223) : « la construction de la route côtière est d'une importance vitale pour la région. Elle permettra le développement du tourisme en tant que principal moyen de développement et de subsistance pour les gens qui habitent cette zone. C'est une réalisation qui devra respecter l'environnement et les communautés indigènes, mais la poursuite de sa construction ne doit pas être remise en cause tant son caractère de source potentielle de richesse est grand pour tous les secteurs économiques...La Cordillère de la Côte, surtout la Dixième Région, comprend une zone d'un grand intérêt pour l'exploitation forestière ; après avoir eu accès à son potentiel autochtone, les industries comptent sur de vastes territoires pour planter des pins et des eucalyptus ».



La route est un agent potentiel de déforestation sur le piémont occidental de la Cordillère de la Côte. On a déjà vu qu'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 le couvert végétal natif reste relativement peu exploité et dégradé.

En plus de faciliter le transport du bois de la plantation aux ports ou aux centres de production, la Route Côtière sera un moteur à la création de nouveaux centres de transformations. Se basant sur des études réalisées par le MOP, des membres de la Fondation Terram²⁴² notèrent que les travaux entrepris dans la Province de Valdivia (10^{ème} Région), étaient principalement destinés à extraire et transporter la production d'une seule entreprise

²⁴¹ <http://www.vialidad.cl/proyectos/rutacostera/Paginas/default.aspx>

²⁴² La Fundación Terram a été créée en 1997 et regroupe des économistes, des juristes, des ingénieurs forestiers comme Antonio Lara, etc.

http://www.terram.cl/index.php?option=com_frontpage&Itemid=229

forestière (Bosques S.A.) (Espinosa *et al.*, 2002). Les enjeux liés au développement de cette infrastructure sont conséquents. Les répercussions bien connues engendrées par les monocultures n'en seront qu'exacerbées. La Coalición para la Conservación de la Cordillera de la Costa (CCCC)²⁴³ note que « *tanto el trazado de la Ruta Costera como sus características y objetivos afectan gravemente una multiplicidad de dominios indígenas, tanto comunitarios como individuales, la calidad de vida de los mismos y sus perspectivas de desarrollo futuro* ».



Figure 132 : Route Côtière (14ème et 10ème Région). Source: Ponce Arqueros, 2008²⁴⁴

7.5.1.4. Politique de remembrement à l'échelle communale

Le développement du secteur forestier a vu l'abandon progressif des terres par les petits propriétaires, rachetées *a posteriori* par les entreprises. Bien qu'elles soient réticentes à l'achat de petites propriétés à cause de leur faible superficie, nombreuses sont celles à avoir entrepris un remembrement de propriétés (abandonnées ou vendues). Ceci a permis de créer des espaces suffisamment étendus afin d'obtenir une utilisation plus rationnelle et plus

²⁴³ <http://ccc2.cl.tripod.com/amenazas/rcostera.html>

²⁴⁴ Patricio Ponce Arqueros, 2008, *La Ruta Costera que unirá Chile, Plataforma Urbana* <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2008/01/25/la-ruta-costera-que-unira-chile/>

rentables des sols et particulièrement des plantations. Cette politique de remembrement s'est accompagnée d'une amplification des conflits entre les communautés et les entreprises forestières, suite à la violation de la Convention 169 de l'OIT par ces dernières. A l'image des affrontements et des expulsions qui se sont déroulés dans la 9^{ème} Région, la commune de San Juan de la Costa connaît le même synopsis.

7.5.2. Spatialisation des hypothèses

La simulation prospective du scénario intensif nécessite deux évaluations multicritères, dont une qui intègre la Ruta Costera. 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 9 ans (2017) et 18 ans (2026) plus tard²⁴⁵. Les plantations exotiques atteignent 25 705 ha en 2017 et 54 973 ha en 2026²⁴⁶. 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 est similaire au scénario tendanciel, à la différence près d'attribuer une aptitude plus faible à la catégorie d'occupation du sol « autre », réduisant la probabilité d'y voir apparaître de la forêt native.

7.5.3. Résultats

Le paysage de la commune est caractérisé par une dualité entre les plantations exotiques et la forêt native. Le boom du secteur forestier se traduit littéralement par une invasion de la précordillère côtière, laissant quelques îlots de terres non boisées (figure 133). Les 71 930 ha (soit une diminution de 25,7 % par rapport à 2008) de forêts natives confinés sur la Cordillère de la Côte sont menacés par l'avancée des entreprises forestières. La construction de la Ruta Costera à l'ouest de la commune (figure 135 – droite) renforce le réseau routier existant en 2008 et facilite l'accessibilité des entreprises dans les terres. Les plantations connaissent une augmentation de 455 % entre 2008 et 2026. Sur ses 55 000 hectares, 42 % (soit 23 000 ha) des monocultures se font au détriment de la catégorie « autre » et 40 % (soit 22 000 ha) aux dépens de la forêt native (tableau 57).

Les détails des traitements (pondération des facteurs et choix de la stratégie) sont présentés en annexe 12 page 339.

²⁴⁵ En projetant 27 ans plus tard, le calcul dépasse les 100 000 ha de plantations (sur les 155 000 ha de la commune), ce qui donne un résultat peu réaliste.

²⁴⁶ $B = A \cdot (1 + \alpha/100)^p$ où B : valeur d'arrivée / A : valeur de départ / α : taux de variation annuelle / p : période couverte exprimée en années

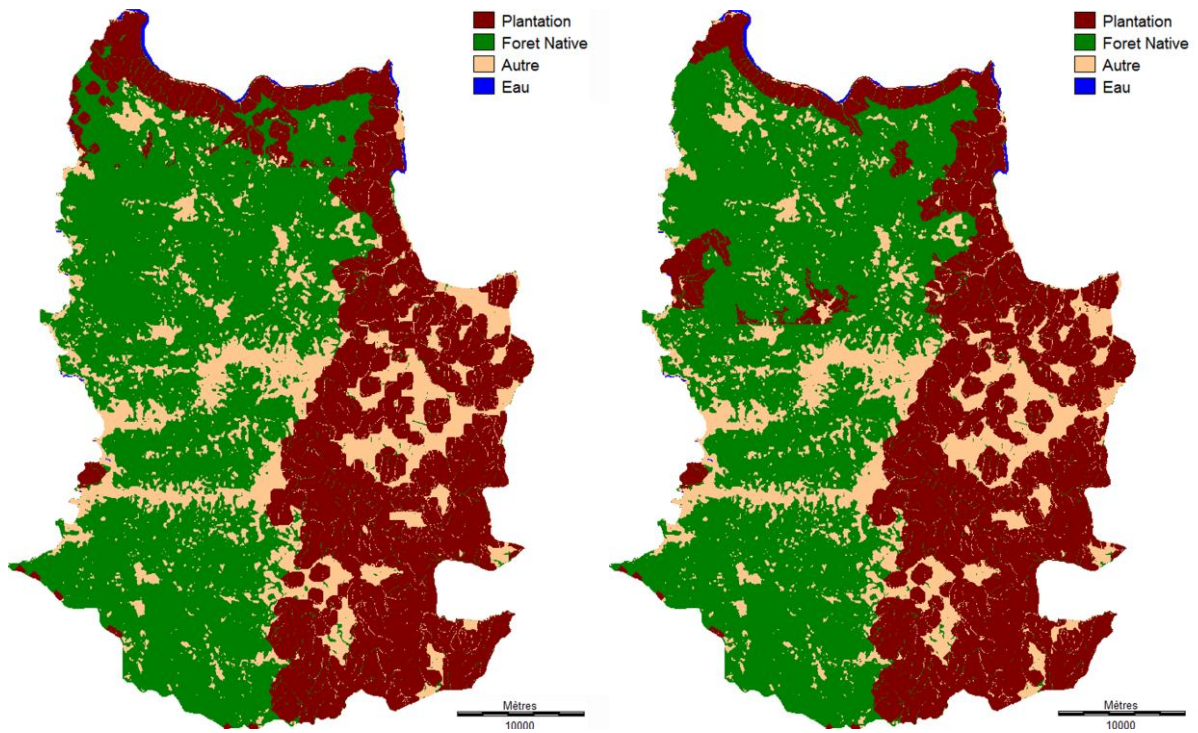


Figure 133 : Scénario normatif 2026 – INTENSIF. A droite : avec la Ruta Costera

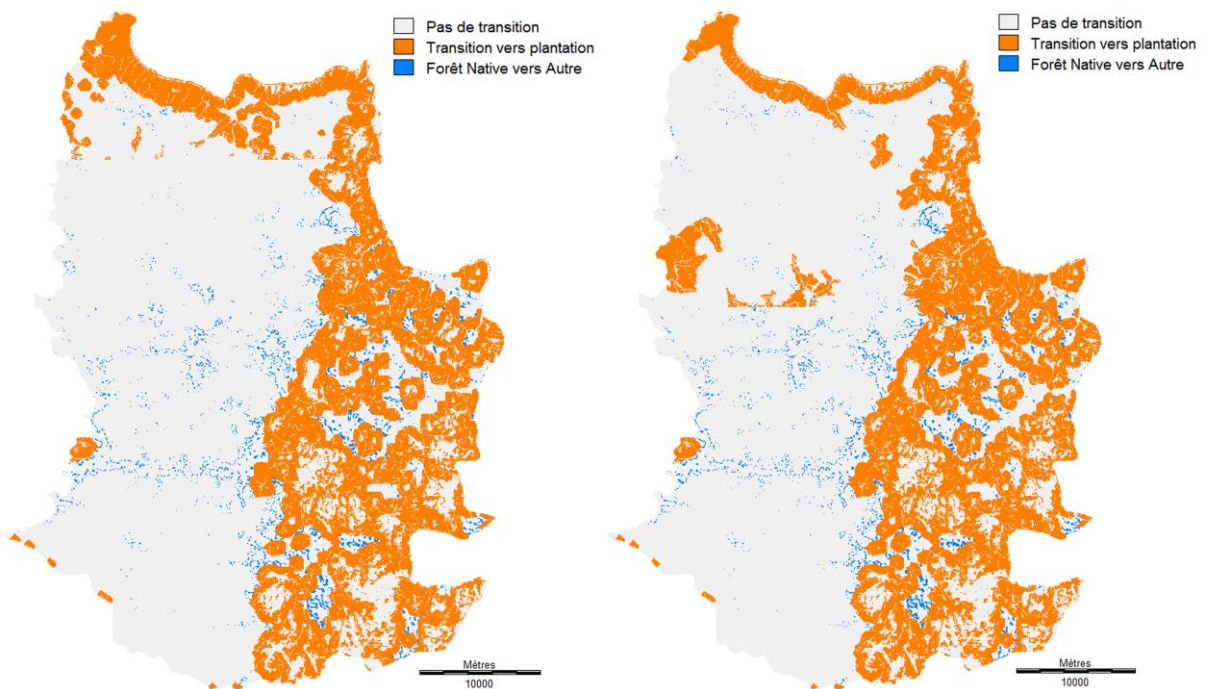


Figure 134 : Transitions simulées entre 2008 et 2026 (D). A droite : avec la Ruta Costera

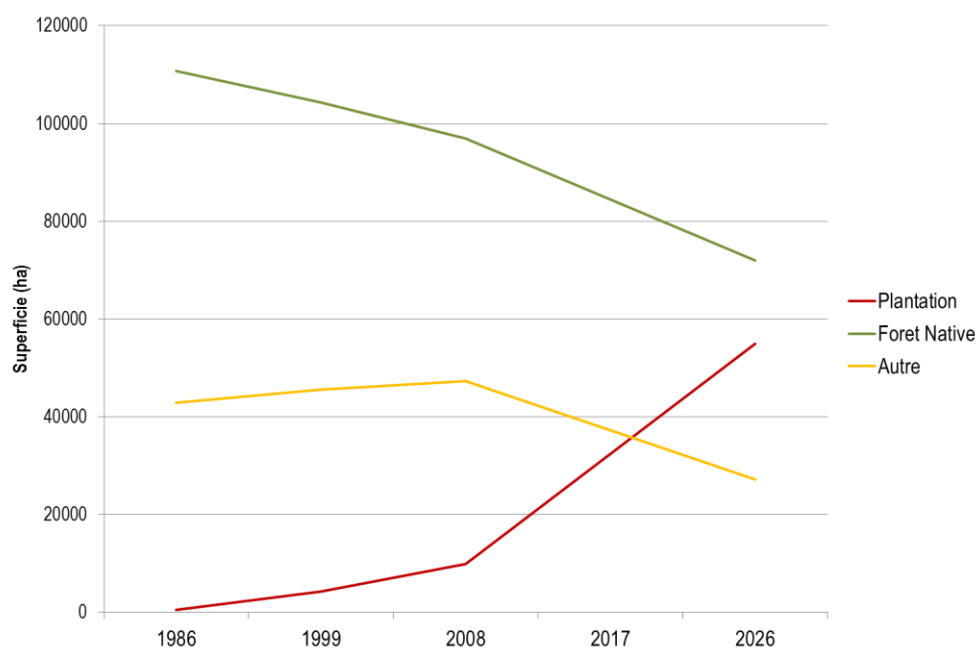


Figure 135 : Scénario normatif 2026 – INTENSIF

| 2008 | 2026 | | | | |
|--------------|------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | Plantation | Forêt Native | Autre | Eau | Total 2008 |
| Plantation | 9 888.39 | 0.00 | 0 | 0.00 | 9 888.39 |
| Forêt Native | 22 039.56 | 71 930.70 | 2 887.58 | 0.00 | 96 857.84 |
| Autre | 23 045.04 | 0.00 | 24 278.83 | 0.00 | 47 323.87 |
| Eau | 0.00 | 0.00 | 0 | 408.87 | 408.87 |
| Total 2026 | 54 972.99 | 71 930.70 | 27 166.41 | 408.87 | 154 478.97 |

Tableau 57 : Scénario normatif – INTENSIF.

Transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en hectares)

7.6. Comparaison des scénarii et logiques de localisation

L'objectif est de présenter une cartographie synthétique qui met en évidence un degré de congruence spatialisée pour les plantations. Ainsi, les plantations de chaque scénario sont extraites, pour être ensuite fusionnées en une seule carte. On obtient donc un degré de congruence à quatre niveaux (figure 136). Les zones en rouge traduisent une concordance totale entre les quatre scénarii. Les plantations simulées par les scénarii 4 (intensif), 1 (*business as usual*) et 2 (développement soutenable) apparaissent en vert. Les espaces en bleu représentent des plantations uniquement simulées par les scénarii 4 et 1. Enfin, les plantations qui sont exclusives au scénario 4 sont en gris.

En toute logique, la correspondance des quatre scénarii se localise sur la précordillère et quelques îlots sont repérables à la limite nord de la commune. Hormis certaines zones exclusives au scénario 4 (en gris), l'ensemble des zones simulées comme plantations sont contiguës et forment des couches concentriques autour des noyaux ayant une concordance totale. Le zoom sur la précordillère traduit cet effet. Ainsi, les modèles nous informent que l'expansion future des plantations est contenue, dans une certaine mesure, sur le piémont et ne devrait pas impacter les grands espaces de forêts natives qui couvrent la Cordillère côtière. Malgré tout, cette implantation septentrionale représente une menace potentielle.

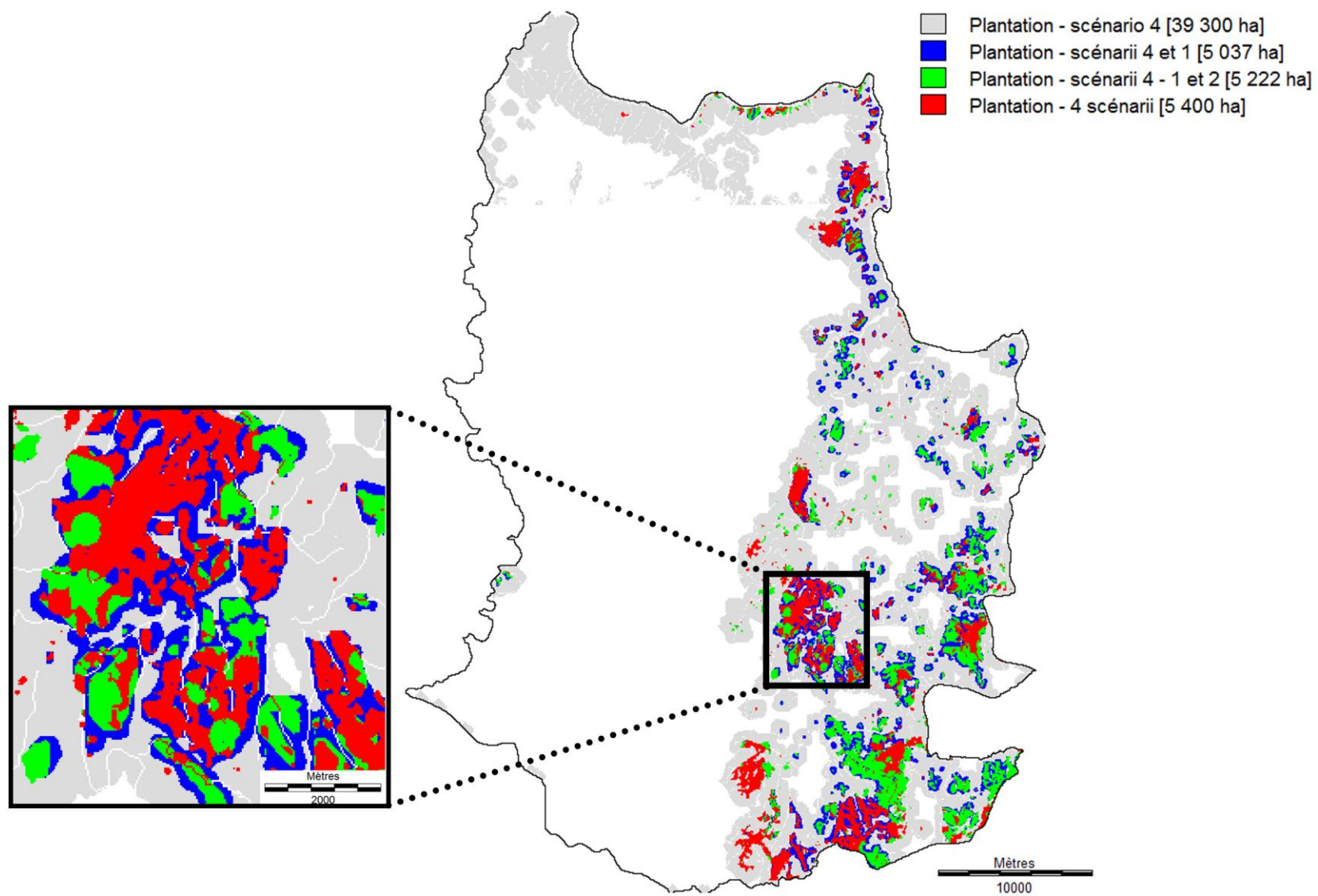


Figure 136 : Degré de congruence spatialisée pour les plantations. Carte globale de la commune et zoom sur la précordillère

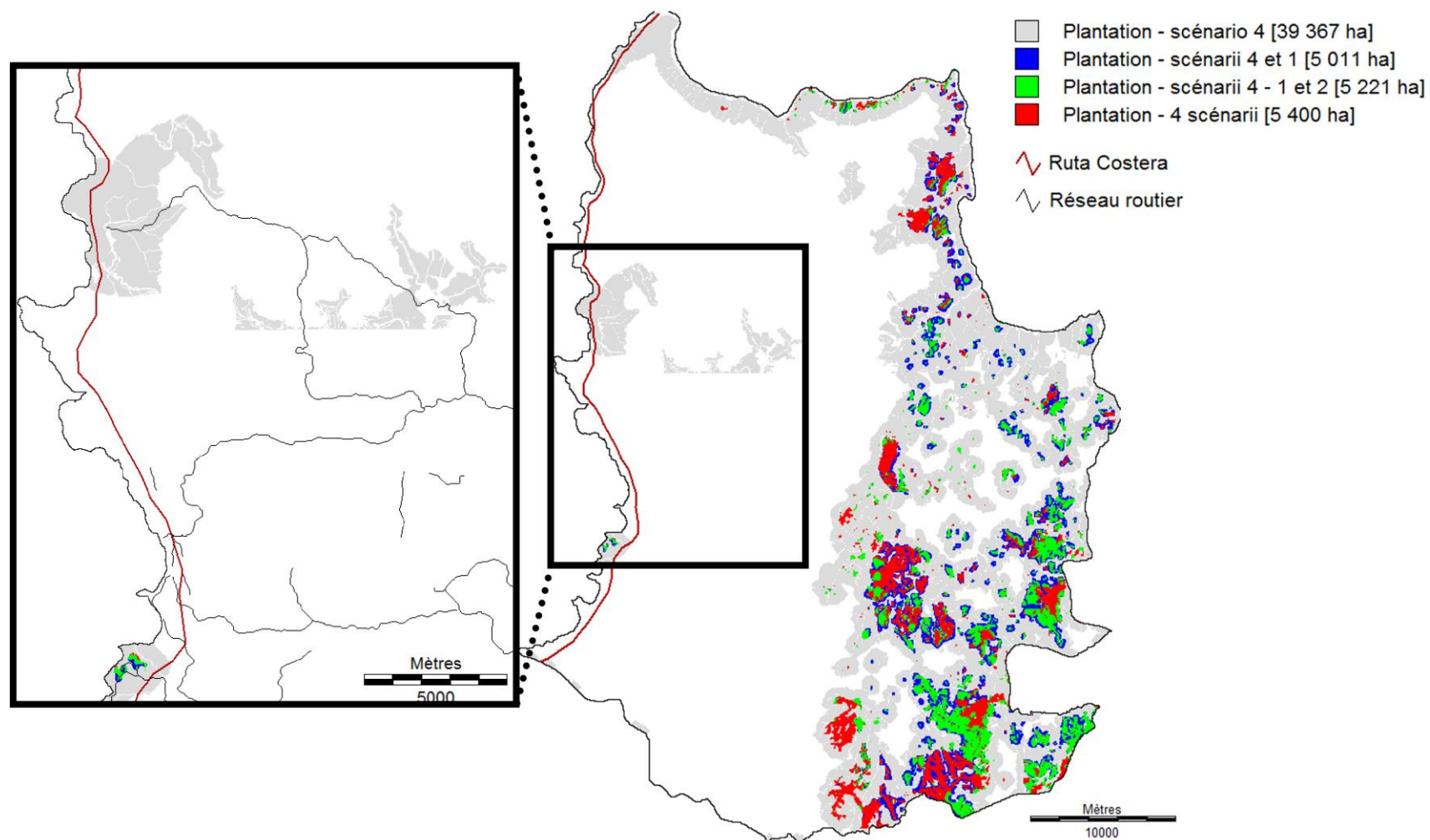


Figure 137 : Degré de congruence spatialisée pour les plantations. Carte globale de la commune et zoom sur la Cordillère Côtière

La deuxième carte de convergence des scénarii intègre le scénario 4 avec la Ruta Costera (figure 137). La probabilité d'implantation est quasi similaire à la précédente, mais l'apparition de la route côtière est à l'origine de grandes plantations à l'ouest de la commune et au sein même de la Cordillère. La menace potentielle identifiée précédemment devient une menace majeure (bien qu'hypothétique) susceptible d'engendrer de nombreuses perturbations environnementales et sociales. Le zoom met en exergue le rôle joué par le réseau routier (il s'agit, dans cette zone, de chemins et/ou de sentiers), et laisse supposer qu'ils seront - associés à la route côtière - les agents futurs de la déforestation et du reboisement, indépendamment du poids de la propriété foncière.

Enfin, la figure 138 synthétise les espaces - de forêt native et de plantation - qui sont communs à chacun des scénarii. Le patrimoine forestier natif, bien qu'il subisse de nombreuses pressions, resterait un continuum écologique faunistique et floristique pour, *a minima*, une trentaine d'années. Dès lors, il conviendrait de généraliser les projets de conservation (à long terme) et de production forestière raisonnée (à court terme) en accord avec les acteurs locaux (les petits propriétaires forestiers et les communautés indigènes). Des programmes de conservation de la biodiversité ont vu le jour dans la 10^{ème} Région de Los Lagos, tel que le programme *Áreas Protegidas Privadas*, avec pour motivation de « *proteger los lugares naturales, conservar su biodiversidad y disfrutar del paisaje* » (Sepúlveda, Villarroel *et al.*, 2006).

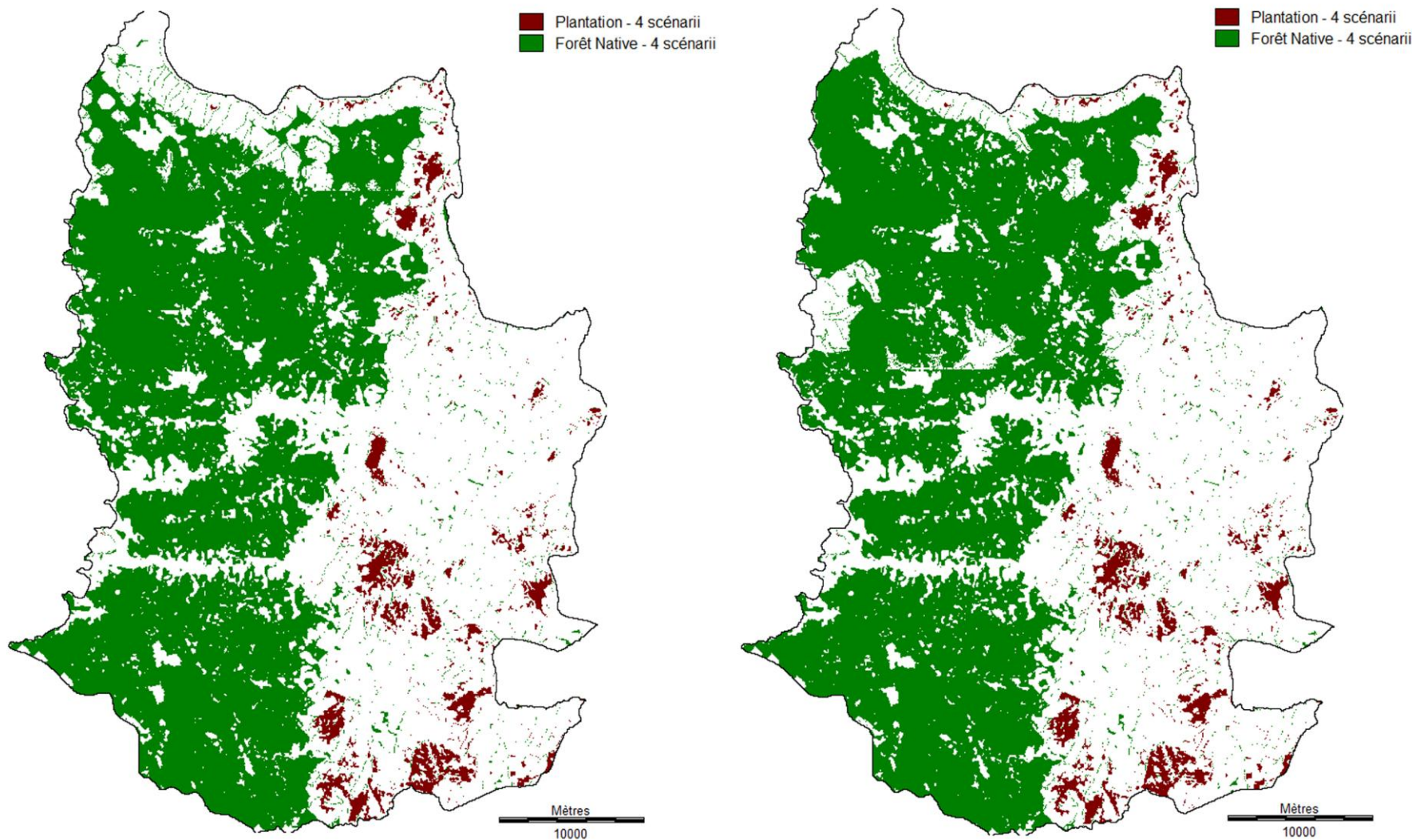


Figure 138 : Concordance des quatre scénarii pour la forêt native et les plantations. A droite : avec la route côtière

CONCLUSION

La spatialisation des scénarii prospectifs tendanciels et contrastés montre leur plein potentiel afin d'identifier les zones à enjeux socio-environnementaux. Leur capacité à quantifier et localiser les changements futurs d'occupation du sol constitue une base solide dans le processus décisionnel, dans la mesure où ils servent d'entrée pour calculer les impacts des processus environnementaux (Veldkamp et Verburg, 2004) - via des études d'impact sur l'environnement (EIE) par exemple. D'après Bernard Cazes (in Hatem, 1993, p.48) la prospective décisionnelle « *ne peut que bénéficier des travaux d'évaluation a posteriori de l'efficacité des politiques publiques, qui permettent, sinon de dire sans équivoque ce qu'il faudrait faire à l'avenir, du moins de repérer les erreurs qu'il vaudrait mieux ne pas recommencer* ».

L'analyse des trajectoires d'évolutions passées et la simulation des plantations exotiques sont affectées par la structure foncière. Cependant, ce facteur ne se suffit pas à lui-même dans la mesure où il est la caractérisation spatiale de facteurs socio-économiques sous-jacents, tels que la croissance démographique elle-même associée à la consommation de bois de chauffe et à l'expansion des pâturages (Marín *et al.*, 2011), les coûts de boisement, le coût du foncier, etc. D'après Elena Irwin et Jacqueline Geoghegan (2001, p. 11) « *they [the empirical models of LUCC] are less successful at explaining the human behavior that leads to the spatial process/outcome of land use change. [...] Clearly temporal dynamics are an important consideration in modeling land use/cover change. There are many external features that change over time (and not necessarily space), including variables that affect the economic returns to different land uses, e.g. agricultural and timber prices, subsidies, land tenure rules, etc., that will affect individual choices* ». Le challenge serait de coupler des modèles spatialement explicites à des modèles économiques.

Un autre challenge consiste à prendre en compte les cycles de rotation des plantations dans la simulation. Le modèle ne prend pas en compte l'alternance coupe rase/reboisement et considère les monocultures comme un processus cumulatif et temporellement linéaire. De plus, les scénarii prospectifs ne considèrent pas l'épuisement de la terre (donc une mise en jachère prolongée) après plusieurs cycles de rotation²⁴⁷.

La question du degré de faisabilité pour chacun des scénarii doit être posée. Malgré l'apparente facilité de l'élaboration théorique des scénarii prospectifs, leur application sur le terrain par la recherche de moyens adéquats n'est pas systématique au niveau local. Il est donc essentiel de les faire évaluer et, le cas échéant, d'approfondir certaines hypothèses en confrontant la vision des acteurs locaux (élus, experts et parties prenantes) et non locaux permettant, *in fine*, une prise de décision consciente, anticipative et participative. La situation conflictuelle à l'échelle locale, générée principalement par la question foncière, fait jouer d'autres jeux (Joliveau, 2004, p. 334) moins perceptibles tels que « *l'influence de l'Etat, les tractations politiques et le lobbying du secteur privé et des acteurs économiques* ». A l'échelle de la Région des Lacs, Juan Sanchez Álvarez (2004) constate la difficulté à faire

²⁴⁷ Après combien de rotation la terre est-elle mise en jachère ?

consentir la vision de l'Etat et des grands entrepreneurs avec celle des communautés indigènes, des agriculteurs et des écologistes, ce qui complexifie la démarche participative. *« Ces deux visions, sans être contradictoires, ne réussissent pas à se compléter, selon nous, parce que la législation en vigueur ne favorise seulement l'une d'entre elles ».*

Malgré tout, cette étape est nécessaire pour que la construction des scénarii et que la démarche participative ne se soient placées, comme le décrit Roger Brunet (2004) comme des *« rituels d'autolégitimation visant à justifier une forme d'autorité, plus que comme un vœu sincère d'ouverture démocratique ».*

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse a permis de retracer spatio-temporellement la dynamique des plantations forestières industrielles dans le sud chilien et de modéliser leurs localisations.

Le recours à l'imagerie satellitale à plusieurs résolutions spatiales, temporelles et spectrales, s'est avéré indispensable afin d'appréhender ce processus. La variation des échelles d'analyses a mis en évidence le degré de complexité du système étudié. Cette complexité est due à l'imbrication et à l'inertie de multiples facteurs qui n'ont pas eu et n'auront pas la même influence sur les changements d'occupation et d'utilisation du sol. La rythmicité est un élément caractéristique de cette dynamique, de par la volatilité des processus de transitions observés, et, d'autre part, par la distinction des états stationnaires.

L'étape de caractérisation et de spatialisation des changements d'occupation du sol a nécessité une simplification des composantes du système. La modélisation a favorisé la localisation et la quantification des trajectoires d'évolution à l'échelle locale, facilitant la spatialisation des plantations industrielles dans le futur. Les scénarii prospectifs ont démontré leur efficacité à concevoir plusieurs images de ce futur, et constituent une aide à la décision.

SYNTHESE DES RESULTATS

SUIVI DE LA DYNAMIQUE DES PLANTATIONS INDUSTRIELLES A PLUSIEURS ECHELLES SPATIALES ET TEMPORELLES PAR TELEDETECTION.

Les résultats ont clairement démontré la distribution spatiale des plantations industrielles de la 8^{ème} Région au sud continental de la 10^{ème} Région. Leur implantation suit une logique spatiale et temporelle factuelle, avec une gradation nord/sud et une partition est/ouest. La gradation s'explique par des déterminants historiques. Ainsi les premières usines de traitement du bois ont été implantées dans la 8^{ème} Région tandis que les créations plus au sud ont été beaucoup plus tardives. La partition est caractérisée par un agglomérat de facteurs (ports, usines de cellulose, axes de communication) ayant un effet de polarisation, indépendamment du gradient susmentionné.

Ce constat s'affranchit de la parcelle en tant qu'objet géographique implanté sur le territoire, nécessitant ainsi l'emploi d'images satellitales à moyenne résolution MODIS pour confirmer ces observations. Le suivi des variations chlorophylliennes étaye et précise cette logique d'implantation. Malgré l'avantage de la résolution temporelle des images pour le suivi des coupes forestières, la résolution spatiale atteint ses limites pour détecter des zones de coupes rases dans des régions où les superficies de boisement sont restreintes. De plus, la difficulté de distinguer les plantations des forêts natives – via l'indice de végétation – montre l'intérêt potentiel d'une série temporelle plus étendue qui irait au-delà du cycle de rotations des plantations (10-15 ans).

Le suivi a donc été appréhendé à haute résolution spatiale et spectrale et a mis en évidence l'alternance boisement/déboisement à l'échelle locale. Ainsi, il a été possible de distinguer les plantations forestières des forêts natives, mais aussi de déterminer l'espèce utilisée en tenant compte de la durée des rotations.

SIMPLIFIER ET COMPRENDRE LA COMPLEXITE DU SYSTEME ETUDIE A L'ECHELLE LOCALE.

Les précédentes analyses ont abouti à des classifications multidates, proposant une meilleure lecture spatiale de l'occupation du sol. En lien avec les missions de terrain, près d'une quinzaine de types d'occupation du sol ont été identifiés pour être agrégés *in fine* en quatre catégories (plantation, forêt native, « autre » et eau). Les analyses démontrent que la forêt native est prédominante dans la commune mais se localise principalement sur la Cordillère de la Côte et de manière plus fragmentée sur le piémont. Les plantations restent minoritaires mais ont connu une progression remarquable entre 1986 et 2008 sur le piémont.

Sur ces bases, nous avons approfondi la lecture dynamique de la période 1986-1999-2008, afin de caractériser les trajectoires d'évolution. Deux constats majeurs émergent : (i) une déforestation sur la Cordillère côtière entre 1986-1999 avec une atténuation entre 1999-2008 qui s'explique par le commerce du bois de chauffe et par des incendies, et (ii) une progression des plantations monospécifiques au détriment de la forêt native (processus de substitution), ce qui complète l'hypothèse (H4).

L'identification des facteurs explicatifs a révélé la complexité inhérente à tout système dynamique. La progression des plantations exotiques est la résultante de la synergie de facteurs directs et indirects opérant à de multiples échelles, du D.L. 701 à la proximité aux axes de communication par exemple. Pour la plupart d'entre eux leur influence est difficilement matérialisable dans la mesure où leur nature *aspatiale* ne permet pas de les confronter aux dynamiques observées. Malgré cette limite, les facteurs spatialisables ont permis d'expliquer et de quantifier l'expansion des monocultures en fonction de leur implantation géographique.

PRODUIRE DES SCENARII PROSPECTIFS SPATIALISES ET PROPOSER UNE GAMME DE FUTURS POSSIBLES DESTINES A ECLAIRER LES ACTEURS DU SECTEUR FORESTIER.

La dernière phase préparatoire à l'élaboration des scénarii prospectifs consista à calibrer deux modèles de simulation intégrant l'ensemble des facteurs spatialisables et des processus analysés. La validation mit en évidence la difficulté, pour les deux modèles, de prédire les changements, mais révéla néanmoins leur capacité à confirmer les tendances d'évolution. Après comparaison, le modèle supervisé (ou expert) s'est avéré plus performant que le modèle automatique.

Les scénarii prospectifs ont été développés de telle sorte que l'ensemble esquisse une « vision panoramique » de la dynamique future des plantations forestières mais aussi de la forêt native. Du scénario tendanciel et « sans surprise » aux scénarii contrastés, l'avenir de la commune de San Juan de la Costa doit contraindre les acteurs locaux et les gestionnaires du secteur forestier à faire face à des enjeux socio-économiques et environnementaux. Le croisement des scénarii établit un degré de congruence spatialisé pour les plantations et pour la forêt native, et apporte des connaissances nécessaires qui peuvent aider à la gestion soutenable de la ressource forestière.

LES LIMITES DE LA RECHERCHE

FACTEURS EXPLICATIFS ET PRECISION DU MODELE

La modélisation des changements d'occupation et d'utilisation du sol intègre une série de facteurs permettant d'optimiser son processus. La question des facteurs met en exergue de nombreuses limites notamment sur la quantité optimale, si quantité optimale il y a, de variables à intégrer au modèle. De plus, leurs échelles d'influence (nationale, régionale, locale) et leur nature – économique, sociale, législative, géographique, etc. – ne peuvent être considérées indépendamment les unes des autres, sans oublier le poids exercé par la (ou les) stratégie(s) des acteurs. Pour une aire d'étude donnée, seuls les facteurs identifiés comme opératoires à cette échelle seront inclus dans le modèle, aux dépens de facteurs identifiés à des échelles supérieures et ayant une emprise nettement plus marquée sur le processus étudié (D.L. 701 et proximité aux ports par exemple). Dès lors, plusieurs questions se posent : (i) comment modéliser l'impact d'un facteur sur un autre ? (ii) cet impact est-il tributaire du changement d'échelle ? Et, de fait (iii) comment tenir compte de ce changement ?

Dans le cadre du jeu des acteurs, (iv) comment caractériser l'influence des prises de décisions à l'échelle étatique sur les comportements à l'échelle locale ? (v) quel degré de complexité doit-on atteindre afin de comprendre les prises de décisions de chaque catégorie d'acteurs ? Un récent article de M.W. Patterson et N. Hoalst-Pullen (2011) sur l'évolution du paysage forestier dans la 8^{ème} Région du Bío-Bío démontre que la recherche « *on economic pathways could identify financial reasons at local to global scales that contribute to plantation land use conversion. This may include individual decision making and labor costs, local and regional economic conditions, national subsidies, commodity pricing, and the global market. Even the policy aspect could be further expounded by scale; as local policies from communities, for example, influence individuals in ways entirely different from trade policies at the global level* ».

CLASSIFICATION ET PROCESSUS DYNAMIQUES

La classification est l'étape fondamentale de l'analyse rétrospective et de la simulation prospective. De sa précision dépend l'interprétation des résultats, la calibration et la validation d'un modèle et la simulation prospective. Or, le modélisateur doit faire face à une marge d'erreur (quantifiable et détectable) qui peut avoir des conséquences sur ces résultats d'autant plus s'ils sont utilisés à des fins de décisions stratégiques. Sans pour autant constituer une limite, cette incertitude doit être prise en compte et faire l'objet de multiples comparaisons.

Les transitions entre les types d'occupations du sol peuvent être appréhendées par télédétection en mobilisant plusieurs dates. Ainsi, il a été possible de suivre le cycle de rotation des plantations exotiques. La phase de calibration du modèle s'est fondée, quant à elle, sur trois dates avec un pas de temps régulier. On est en mesure de se demander, compte tenu de la nature cyclique des plantations, si la calibration ne devrait pas employer quatre, voire cinq dates, afin de détecter et d'intégrer ce processus dynamique dans le modèle. Ceci devrait être appliqué aux pratiques des petits propriétaires notamment pour la succession [*renewal* (coupe) – culture (récolte et abandon) – pâturage – régénération],

supposant une cartographique d'occupation du sol plus détaillée que celle développée dans ce travail.

SCENARI PROSPECTIFS ET DEMARCHE PARTICIPATIVE

A l'image des *Trente-six vues du Mont Fuji* les scénarii prospectifs sont le fruit de connaissances empiriques (analyse rétrospective et mise en relation avec des variables spatialisées) mais aussi subjectives (représentation, interprétation et extrapolation) du modélisateur.

Chaque modèle prospectif est fondé sur des hypothèses, des visions, des souhaits d'acteurs ayant des stratégies et des aspirations que le modélisateur tente de retranscrire via un outil informatique. « *Models are mental inventions that represent a world which cannot be imprisoned in equations* » (Godet, 2010). La difficulté est de rester dans les limites du réel et de ne pas tomber dans des dérives de la science-fiction. En effet, l'objectif est d'ordre décisionnel mais relève avant tout de la prise de conscience, de la sensibilisation.

PERSPECTIVES DE RECHERCHE

La première perspective est de systématiser le suivi des rotations sylvicoles à l'échelle provinciale et régionale. L'objectif est de développer un algorithme (avec un informaticien) capable d'inclure la variation des valeurs spectrales du MIR sur plusieurs dates (entre 1976 et 2012, avec un pas de temps de 2 ans, soit environ seize images) et de cartographier l'alternance déboisé/boisé sur cette période de temps. L'objectif suivant consiste à compléter la base de données existante en intégrant l'évolution du foncier (entre 1999 et 2012) et du réseau routier (variable dynamique) et de préciser la logique de la dynamique des plantations.

Les facteurs mobilisés pour modéliser les changements d'occupation du sol dans la commune ne sont pas représentatifs de l'ensemble des facteurs potentiellement explicatifs. L'enjeu est de comprendre le comportement (ou le choix) des individus spatialement distribués en fonction de variables économiques tels que le coût de boisement, le prix de vente du bois et le prix du foncier. La mise en place d'un modèle économique spatialement explicite à l'échelle locale serait un complément au modèle basé sur des variables géographiques.

Il aurait été intéressant de confronter les acteurs du secteur forestier à la spatialisation des scénarii prospectifs et d'améliorer la démarche participative à l'échelle de plusieurs parcelles en ayant recours, par exemple, aux Systèmes Multi-Agents (SMA). D'après F. Bousquet et al. (1996) les SMA « *proposent des formalisations qui peuvent prendre en compte plusieurs modèles de pensées sur la gestion collective de ressources renouvelables communes* » et permettent « *de modéliser des représentations, des modes de communication au sein de réseaux, des contrôles individuels ou sociaux, donnés ou construits, des interactions [...]* ».

Enfin, il resterait à développer et à mettre en relation plusieurs modèles appliqués à différentes échelles (de la parcelle à la région) créant ainsi un méta-modèle multiscalair de la dynamique des plantations forestières industrielles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abbas M., 2004, La CNUCED XI: du consensus de Washington au consensus de Sao Paulo?, Observatoire des Amériques, Université de Québec à Montréal, N° 21, 13 p.

Agarwal C., Green G. L. et al., 2000, *A Review and Assessment of Land-Use Change Models. Dynamics of Space, Time, and Human Choice*, Bloomington, Center for the Study of Institutions, Population and Environmental Change, Bloomington, 76 p.

Agostini C. et Brown P.H., 2008, "Nota técnica. Distribución espacial de la pobreza en Chile", *Estudios de Economía*, vol. 35, N° 1, 79-110

Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo (AIFBN), 2011, *Hacia un nuevo modelo forestal. Propuestas para el desarrollo sustentable del bosque nativo y el sector forestal en Chile*, AIFBN, Valdivia, 67 p.

Altieri M.A. et Rojas A., 1999, "Ecological impacts of Chile's neoliberal policies, with special emphasis on agroecosystems", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 1, 55-72

Amblard F., Rouchier J. et al., 2006, "Evaluation et validation de modèles multi-agents", in Amblard F. et Phan D. (eds.), *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Paris, Hermès, 103-111

Anderson J.R., Hardy E.E., et al., 1976, "A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data", *Geological Survey*, 41 p.

Andrich D., 1988, *Rasch models for measurement*, Quantitative Applications in the Social Sciences, Newbury Park, SAGE Publications, 95 p.

Angelsen A. et Kaimowitz D., 1999, "Rethinking the Causes of Deforestation: Lessons from Economic Models", *The World Bank Research Observer*, vol. 14, N° 1, 73-98

Antoni J-P., 2006, "Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort", *Cybergeo : European Journal of Geography. Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, article 347, <http://cybergeo.revues.org/2436>

Arana Silva M.T., 2009, "¿Hacia dónde va la industria chilena? Situación actual, inversiones y desafíos", Santiago de Chile, CORMA, 27 p.

Aravena A., 2002, "Los mapuches - warriache", in Boccara G., *Colonización, resistencia y mestizaje en las Américas (siglos XVI-XX)*, Quito-Ecuador, Editorial Abya Yala, 359-383

Araya Cornejo J., 2003, "La invasión de las plantaciones forestales en Chile. Efectos de la actividad forestal en la población indígena mapuche", Observatorio Latino-Americano de Conflictos Ambientales, 13 p.

Armas R. et Caetano M., 2005, Mapping changes in forest cover using multi-scale MODIS imagery, Proceedings of the 31st International Symposium, Saint Petersburg, Russian Federation, 4 p.

Armesto J., Villagrán C. *et al.*, 1994, "Desde la era glacial a la industrial: La historia del bosque templado chileno", *Ambiente y desarrollo*, 66-72

Armesto J. J., Willson M.F. *et al.*, 2005, "Ecología del paisaje rural de la isla de Chiloé: diversidad de especies de aves en fragmentos de bosques nativos", in Smith-Ramírez C. *et al.* (eds.), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Edición Universitaria Bosque Nativo, 585-599

Armesto J. J., Manuschevich D. *et al.*, 2010, "From the Holocene to the Anthropocene: A historical framework for land cover change in southwestern South America in the past 15,000 years", *Land Use Policy*, vol. 27, 148-160

Arnould P. et Clément V., 2004, "Forêts et développement durable. De l'impératif de la durabilité à la question controversée des indicateurs. Vers une géographie du développement durable", *Historiens et Géographes*, N° 387, 163-173

Arroyo M.T.K., Marticorena C. *et al.*, 2000, "Plant Invasions in Chile: Present Patterns and Future Predictions", in Mooney H. A. et Hobbs R. J. (eds.), *Invasive species in a changing world*, Washington D.C., Island Press, 385-421

Astorga L., 2006, "Reflexiones en torno a la extensión forestal en Chile", in Catalán R. *et al.* (eds.), *Bosques y comunidades del sur de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 67-135

Axelrold R.M., 1997, *The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration*, Chichester, Princeton University Press, 232 p.

Aylwin J., 2000, "Los conflictos en el territorio mapuche: antecedentes y perspectivas", *Revista Perspectivas*, vol. 3, N° 2, 277-300

AZUL Consultores Asociados, 2004, Plan de desarrollo comunal de San Juan de la Costa, Plan Estratégico, Informe Final, 41 p.

B

Balzter H., 1998, "Cellular automata models for vegetation dynamics", *Ecological Modelling*, vol. 107, 113-125

Balzter H., 2000, "Markov chain models for vegetation dynamics", *Ecological Modelling*, vol. 126, 139-154

Banco Central de Chile, 2010, "Balancas de Pagos de Chile 2010", Departamento Publicaciones de la Gerencia de Asuntos Institucionales, Santiago, 212 p.

Barreteau O., Bousquet F. *et al.*, 2001, "Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 4, N° 2, 13 p.

Barrué-Pastor M., 2004, *Forêts et développement durable au Chili. Indianité Mapuche et mondialisation*, Toulouse, Presse Universitaire du Mirail, 287 p.

Barrué-Pastor M., 2004, "Concept de propriété, conflits territoriaux et développement durable des forêts et des communautés Mapuche-Huilliches" in Barrué-Pastor M. (dir.), *Forêts et développement durable au Chili. Indianité Mapuche et mondialisation*, Toulouse, Presse Universitaire du Mirail, 193-238

Batty M. et Torrens P.M., 2005, "Modelling and prediction in a complex world", *Futures*, vol. 37, 745-766

Belton V. et Stewart T.J., 2002, *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*, Norwell-Massachusetts, Kluwers Academic Publishers, 372 p.

Bengoia J., 1999), "La question mapuche", *Espaces Latinos*, vol. 164, 17-20

Bernal-Meza R., 1997, "Chili, un modèle périphérique d'insertion internationale? (Note)", *Études internationales*, vol. 28, N° 1, 5-25.

Berr E., 2008, "Le développement soutenable dans une perspective post keynésienne : retour aux sources de l'écodéveloppement ? ", *Cahiers du GRETha*, Bordeaux, N° 24, 20 p.

Bertrand G., 2002, *Une géographie traversière. L'environnement à travers territoires et temporalités*, Paris, Editions Arguments, 57-67 et 264-273

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2008, *Reporte Estadístico Comunal. San Juan de la Costa*, 24 p.

Binkley D. et Stape J.L., 2004, "Sustainable management of eucalyptus plantations in a changing world", in Proc. Of IUFRO Conference, *Eucalyptus in a Changing World*, Aveiro, 7 p.

Bishop P., Hines A. *et al.*, 2007, "The current state of scenario development: an overview of techniques", *Foresight*, vol. 9, N° 1, 5-25

Black W.R., 1995, "Spatial interaction modeling using artificial neural networks", *Journal of Transport Geography*, vol. 3, N° 3, 159-166

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, 537-551

Boccaro G. et Seguel-Boccaro I., 2005, "Políticas indígenas en Chile (siglos xix y xx) de la asimilación al pluralismo -El Caso Mapuche-", *Nuevo Mundo Mundos Nuevos* [En línea], EHESS, from <http://nuevomundo.revues.org/594>.

- Bonn F. et Rochon G., 1993, *Précis de télédétection. Principes et méthodes*, Presse de l'Université du Québec, 485 p.
- Bonnefoy J-L., Bousquet F. *et al.*, 2001, "Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle", *L'Espace géographique*, vol. 1, 13-25
- Börjeson L., Hojer M. *et al.*, 2006, "Scenario types and techniques: Towards a user's guide", *Futures*, vol. 38, N° 7, 723-739
- Boudraux J-P., 2002, "Análisis del mercado de trabajo del sector forestal en Chile", Consorcio Internacional de Desarrollo en Educación (CIDE), Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI), 50 p.
- Bousquet F., Barreteau O. *et al.*, 1996, "Modélisation d'accompagnement : systèmes multi-agents et gestion des ressources renouvelables", *Quel environnement au 21ème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie*, Fontevraud (France), 10 p.
- Bousquet F., Trébuil G. *et al.*, 2005, "Companion modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia", International Rice Research Institute (IRRI), 360 p.
- Bradshaw G.A. et Marquet P.A., 2003, *How landscapes change: Human Disturbance and Ecosystem Fragmentation in the Americas*, Ecological Studies 162, Germany, Springer edition, 363 p.
- Brand D.G., 1997, "Criteria and indicators for the conservation and sustainable management of forests: progress to date and future directions", *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, N° 4/5, 247-253.
- Bréchon P., 2011, *Enquêtes qualitatives, enquêtes quantitatives*, Grenoble, Presses Universitaires de Grenoble, 232 p.
- Brockeroff E.G, Jactel H. *et al.*, 2008, "Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity?", *Biodiversity and Conservation*, vol. 17, 925-951
- Brown C., 2002, *Perspectives mondiales de l'offre future de bois issus de plantations forestières. Division des politiques et de la planification forestières*, FAO, 171 p.
- Brown C., Walker R. *et al.*, 2004, "Modeling Land Use and Land Cover Change", in Gutman G. *et al.* (eds.), *Land Change Science. Observing, Monitoring and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*, Springer-Netherlands, vol. 6, 395-409
- Brunet R., Ferras R. *et al.*, 1992, *Les Mots de la géographie, dictionnaire critique*, Montpellier-Paris, RECLUS – La Documentation Française, 520 p.
- Brunet R., 2004, "SIG et citoyenneté", in Roche S. et Caron C. (dir.), *Aspects organisationnels des SIG*, Paris, Hermès Lavoisier, 313 p.
<http://mappemonde.mgm.fr/num4/librairie/lib04402.html>

Buchanan K., 2005, Progrès accomplis dans la mise en œuvre du processus de Montréal sur les critères et les indicateurs pour la conservation et l'aménagement durable des forêts tempérées et des forêts boréales, Bureau de Liaison, Service canadien des forêts, Ottawa, 19-50

Bull G.Q., Bazett M. *et al.*, 2006, "Industrial forest plantation subsidies: Impacts and implications", *Forest Policy and Economics*, vol. 9, 13-31

Burel F. et Garnier E., (s.d.), "Les effets de l'agriculture sur la biodiversité", ESCo "Agriculture et biodiversité", 139 p.

Bustamante R., Serey I., Pickett S.T., 2003. "Forest fragmentation, plant regeneration and invasion processes in Central Chile", in Bradshaw, G., Marquet, P. (eds.), *How Landscapes Change: Human Disturbance and Ecosystem Fragmentation in the Americas*, Berlin, Springer, 145–160.

C

Camus P., 2003, *La forêt et la gestion forestière au Chili*, Université de Toulouse Le Mirail - Université Catholique du Chili, Thèse de doctorat en Etudes sur l'Amérique Latine, 431 p.

Cannell M.G.R., 1999, "Environmental impacts of forest monocultures: water use, acidification, wildlife conservation, and carbon storage", *New Forests*, vol. 17, 239–262

Capul J.Y. et Garnier O., 1998, *L'économie et les sciences sociales de A à Z*, Paris, Hatier, 286 p.

Camacho Olmedo M.T., Paegelow M. *et al.*, 2007, "Modélisation géomatique rétrospective des paysages par évaluations multicritères et multiobjectifs", *Cybergeo : European Journal of Geography*, article 365, <http://cybergeo.revues.org/4811>

Carmona A., Nahuelhuala L. *et al.*, 2010, "Linking farming systems to landscape change: An empirical and spatially explicit study in southern Chile", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 139, 40-50

Cardenas F.L., Escobar H.A. *et al.*, 2001, "El alerce y la comunidades huilliche de Osorno", in Cornejo A.P et Gacitua D.M. (eds.), *Arboles, recursos naturales y comunidades indigenas en Chile*, Corporación Nacional Forestal, 50-55

Cardenas F.L., 2006, "Red de Parques Indígenas Mapu Lahual: una experiencia de las comunidades ind'igenas de la cordillera de la Costa", in Catalán R. *et al.* (eds.), *Bosques y Comunidades del Sur de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 308-317

Cashore B., Auld G. *et al.*, 2004, *Governing through markets. Forest certification and the emergence of non-state authority*, Yale University Press, 327 p.

Castella J.C., Pheng Kam S. *et al.*, 2007, "Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam", *Land Use Policy*, vol. 24, 531–545

Castillo M., Pedernera P., *et al.*, 2003, "Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global", *Revista ambiente y desarrollo de CIPMA*, N° 3 et 4, 44-53

- Castree N., Rogers A. *et al.*, 2005, *Questioning geography: fundamental debates*, Blackwell Publishing, 328 p.
- Cavelier J. et Tecklin D., 2005, "Conservación de la Cordillera de la Costa: un desafío urgente en la Ecorregión Valdiviana" in Smith-Ramírez C. *et al.* (eds.), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Edición Universitaria Bosque Nativo, 632-644
- Cazes B., 1993, "Continuité et mutations dans l'histoire de la pensée prospective", in Hatem F., *La Prospective. Pratiques et Méthodes*, Paris, Economica, Gestion, 29-50
- Chan W. T., Chow Y.K. *et al.*, 1995, "Neural Network: an alternative to pile driving formulas", *Computers and Geotechnics*, vol. 17, 135-156
- Chen D.M. et Stow D., 2002, "The effect of training strategies on supervised classification at different spatial resolutions", *Photogrammetric engineering & remote sensing*, vol. 68, N° 11, 1155-1161
- Chen H. et Pontius Jr R.G., 2010, "Diagnostic tools to evaluate a spatial land change projection along a gradient of an explanatory variable", *Landscape Ecology*, vol. 25, 1319-1331
- Chermack T. J., 2004, "Improving decision-making with scenario planning", *Futures*, vol. 36, 295-309
- Chomsky N., 2003, *Le profit avant l'homme*, Paris, Edition Fayard, 53 - 84
- Clapp R.A., 1995, "Creating Competitive Advantage: Forest Policy as Industrial Policy in Chile", *Economic Geography*, vol. 71, N° 3, 273-296
- Clément V., 2004, "Le développement durable: un concept géographique?", *Géococonfluences*, 4 p. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient.htm#1>
- CMED (Commission mondiale sur l'environnement et le développement), 1987, Rapport de Bruntland G.H. : « Notre avenir à tous », Edition du Fleuve, Montréal
- CMPC, 2009, Memoria anual, 203 p.
- CNTRL, 2009, <http://www.cnrtl.fr/>
- Cohen W.B. et Goward S.N., 2004, "Landsat's role in ecological applications of remote sensing", *BioScience*, vol. 54, N° 6, 535-545
- Colasanti R.L., 1991, "Discussions of the possible use of neural network algorithms in ecological modeling", *Binary: Computing in Microbiology*, vol. 3, N° 1, 13-15
- Collectif ComMod, 2005, "La modélisation comme outils d'accompagnement", *Natures Sciences Sociétés*, vol. 13, 165-168
- CONADI, 2008, Ley Indígena N° 19.253, Establece Normas Sobre Protección, Fomento y Desarrollo de los Indígenas, y Crea la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, Temuco, 49 p.

CONAF, CONAMA, *et al.*, mars 1999, "Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Informe nacional con variables ambientales", Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco, 90 p.

CONAF, CONAMA, *et al.*, décembre 1999, "Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Informe forestal nacional extensivo", Universidad Austral de Chile, 14 p.

CONAF, CONAMA, *et al.*, 2006, Actualización y Monitoreo del Uso del Suelo en la Región de Los Ríos / Los Lagos, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE, Facultad de Ciencias Forestales, Laboratorio de Geomática

CONAF, 2006, Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile, Données digitalisées, Santiago de Chile

CONAF, 2010, De la consulta indígena sobre prórroga de vigencia del Decreto Ley 701 de 1974, Informe Final, Santiago de Chile, 49 p.

Condorbes S. et Durance P., 2004, *Attitudes prospectives. Eléments d'une histoire de la prospective en France après 1945*, Paris, L'Harmattan, 63-88

Consultorías Profesionales Agraria, 2005, "Informe Final – Evaluación de Impacto de la Bonificación Forestal DL 701. Evaluación de impacto", Consultorías Profesionales Agraria, 226 p.

Coquillard P. et Hill D.R.C., 1997, *Modélisation et simulation d'écosystèmes. Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*, Paris, Edition Masson, 273 p.

CORMA, 2010, <http://www.corma.cl/>

Corvalán P., De La Maza C.L. *et al.*, 2007, "Cosecha, caminos y transporte forestal", in Hernandez P.J. *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Edición Universitaria, 508-535

Costanza R. et Voinov A., 2004, *Landscape simulation modeling. A spatially explicit, dynamic approach*, New York, Springer 330 p.

CRPF Midi Pyrénées (Centre Régional de la Propriété Forestière), 1992, Mémento forestier, Charte intercantonale de l'Astarac-Bigorre, 52 p.

Cruz G. et Schmidt H., 2007, "Silvicultura en bosques nativos" in Hernandez P.J. *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Edición Universitaria, 279-307

Cubbage F., Mac Donagh P., *et al.*, 2007, "Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the Southern United States", *New Forests*, vol. 33, 237-255

Cypher J., janvier 2007, "El caso del Estado chileno actual. Proyectos de acumulación, proyectos de legitimación" in Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), *Repensar la teoría del desarrollo en un contexto de globalización. Homenaje a Celso Furtado*, Buenos Aires, 143-166

Cypher J., septembre 2007, "La economía política del Estado chileno en la era neoliberal: 1973 - 2005", *Revista Oikos - Revista de la Escuela de Administración y Economía*, vol. 22, 19 p.

D

D'Aquino P., Le Page C. *et al.*, 2003, "Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, N° 3

Dallaire J.F., 2009, "La réforme du régime forestier permettrait-elle une gestion durable des forêts? ", Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, 153 p.

Damette O. et Delacote P., 2011, "Unsustainable timber harvesting, deforestation and the role of certification", *Ecological Economics*, vol. 70, 1211-1219

Danais M., 2001, "Durabilité et soutenabilité : dynamique des systèmes locaux" in Jolivet M. (ed.), *Le développement durable, de l'utopie au concept*, Paris, Elsevier/ Nature, Science et Société, 253 - 268

Dang Khoi D. et Murayama Y., 2010, "Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam", *Remote Sensing of Environment*, vol. 2, 1249-1272

David A., 2001, "Model implementation: A state of the art", *European Journal of Operational Research*, vol. 134, 459-480

Daudé E., 2005, "Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie: vers une Géographie Artificielle", in Yves Germond (dir.), *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*, Paris, Lavoisier, 353-380

Defensores del Bosque Chileno, 1998, "Bosques arrasados por el fuego", in Defensores del Bosque Chileno, *La tragedia del Bosque Chileno*, Santiago de Chile, Ochos Libros Editores, 245-250

De Jouvenel H., 2002, "La démarche prospective. Un bref guide méthodologique", *Futuribles*, vol. 247, 24 p.

Demangeot J., 2000, *Les milieux « naturels » du globe*, Paris, HER/Armand Colin, 364 p.

Demeritt D. et Wainwright J., 2005, "Models, Modelling and Geography", in Castree N. *et al.* (eds.), *Questioning geography: fundamental debates*, Blackwell Publishing, 206-224

De Rosnay J., *Le macroscopie. Vers une vision globale*, Paris, Editions du Seuil, 346 p.

Dezalay Y. et Garth B., 1998, "Le "Washington consensus"", *Actes de la recherche en sciences sociales*, vol. 121, N° 1, 3-22

Diario Austral de Llanquihue, <http://www.ellanquihue.cl/impresa/2012/10/07/papel/>

Diario Austral de Osorno, <http://www.australosorno.cl/site/home/20040707231625.html>

Dolidon H., 2005, L'espace des feux en Afrique de l'Ouest. L'analyse spatio-temporelle d'un phénomène d'interface nature/société, Université de Caen. Thèse de doctorat, 414 p.

Dolidon, H., 2007, "La multiplicité des échelles dans l'analyse d'un phénomène d'interface nature/société. L'exemple des feux de brousse en Afrique de l'ouest", *Cybergéographie: European Journal of Geography*, <http://cybergeographie.revues.org/4805>

Donoso C., 1997, *Ecología forestal. El bosque y su medio ambiente*, Valdivia, Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile, 369 p.

Donoso C., 1998, "Bosques Nativos de Chile: Patrimonio de la Tierra", in Defensores del Bosque Chileno, *La tragedia del bosque chileno*, Santiago de Chile, Ochos Libros Editores, 83-87

Donoso P.J. et Otero L.A., 2005, "Hacia una definición de país forestal: ¿Dónde se sitúa Chile?", *Revista Bosque*, vol. 26, N° 3, 5 - 18

Dumouchel L., 2010, Avis technique – Aménagement écosystémique et zonage forestier, Document de réflexion pour la Commission régionale sur les ressources naturelles et le territoire Montérégie Est, 22 p.

Durand B. et Róka Z., 1998, "The Game of Life: Universality revisited", in Delorme M. et Mazoyer J. (eds.), *Cellular Automata. A Parallel Model*, Kluwer Academic Publishers, 51-74

Du Toit B., Smith C.W. *et al.*, 2010, "Intensive, site-specific silviculture: Manipulating resource availability at establishment for improved stand productivity. A review of South African research", *Forest Ecology and Management*, vol. 259, 1836–1845

E

Echeverria C., Coomes D. *et al.*, 2006, "Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests", *Biological Conservation*, vol. 130, 481-494

Echeverria C., Coomes D. *et al.*, 2008, "Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile", *Ecological modeling*, vol. 212, 439–449

Eastman J.R., 2006, *IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing*, Worcester, Clark University, 457 p.

Eastman J.R., 2009, "The Land Change Modeler for Ecological Sustainability", *IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing*, Worcester, 234-256

Elamé E., 2002, *Géographie du développement durable. Plaidoyer*, Paris, Economica, 135 p.

Ellis E. et Pontius Jr R.G., 2010, Land-use and land-cover change, Encyclopedia of Earth, Cutler J. Cleveland. Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment Washington D.C., http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change

Errázuriz A.M, Cereceda P., *et al.*, 1998, *Manual de geografía de Chile*, Santiago de Chile, Andres Bell, 443 p.

Espinosa C., Gabella J.P. *et al.*, 2002, Megaproyecto camino costero sur. ¿Inversión fiscal al servicio de quien? Un necesario análisis económico, ambiental y social, Santiago de Chile, Publicaciones Terram, 44 p.

Estades C.F et Escobar M.A., 2005, "Los ecosistemas de las plantaciones de pino de la Cordillera de la Costa", in Smith-Ramírez C. *et al.* (eds), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Edición Universitaria Bosque Nativo, 600-616

Etienne M., Le Page C. *et al.*, 2003, "A Step-by-step Approach to Building Land Management Scenarios Based on Multiple Viewpoints on Multi-agent System Simulations", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 6, N° 2

Etienne M. (coord.), 2010, *La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable*, Paris, Editions Quae, 384 p.

European Environment Agency, 2001, "Scenarios as tools for international environmental assessments", *Environmental issue report*, N° 24, 31 p.

Evans J., 2009, *Planted forests: uses, impacts, and sustainability*, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), CAB International, Rome, 224 p.

Ewert F., Van Keulen H., *et al.*, 2006, Multi-scale analysis and modelling of natural resource management options. Proceedings of the iEMSs Third biennial Meeting. Summit on Environmental Modelling and Software, International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, Vermont, USA, 6 p.

F

FAO, 2003, *Le régime foncier et le développement rural*, FAO – Etude sur le régime foncier, 62 p.

FAO, 2004, *Global Forest Resources Assessment Update 2005. Terms and definitions (final version)*. Forestry Department, 36 p.

FAO, 2005, *Evaluation des ressources forestières 2005*, Département des forêts, 26 p.

FAO, 2010, *Evaluation des ressources forestières 2010. Rapport principal*, Département des forêts, FAO, 163- 377

Ferber J., 2006, "Concepts et méthodologies multi-agents", in Amblard. F. et Phan D (eds.), *Modélisation et Simulation Multi-Agents. Application pour les Sciences de l'Homme et de la Société*, Londres, Hermès science & Lavoisier, 23-27

Fiala N., 2008, "Meeting the demand: An estimation of potential future greenhouse gas emissions from meat production", *Ecological Economics*, vol. 67, N° 3, 412-419

Foerster G.R., 2001, "Sociedad mapuche y sociedad chilena: la deuda histórica", *Revista de la Universidad Bolivariana*, vol. 1, N° 2, 19 p.

Fresco L.O. et Kroonenberg S.B., 1992, "Time and spatial scales in ecological sustainability", *Land use policy*, 155-168

Fuentes Quezada E., 1994, *Qué futuro tienen nuestros bosques? Hacia la gestión sustentable del paisaje del centro y sur de Chile*, Santiago de Chile, Ediciones Universidad Católica de Chile

Funk C. et Budde M.E., 2009, "Phenologically-tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe", *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, 115-125

G

Galdames R., 2009, *Gran empresa y territorio. El sector forestal maderero chileno del Maule a Los Ríos*, Concepción, Universidad del Bío-Bío.

Garfias R., 2007, "Agroforestería", in Hernandez P.J. *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 633-643

Gardner M., 1970, "MATHEMATICAL GAMES. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life"", *Scientific American*, vol. 223, 120-123

Geist H. J. et Lambin. E.F., 2001, "What Drives Tropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence". *LUCC Report Series No. 4*. Louvain-la-Neuve, University of Louvain – Belgium, 136 p.

Geist H. J. et Lambin E.F., 2006, *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*, Berlin, Springer.

Geldres E. et Schlatter J.E., 2004, "Crecimiento de las plantaciones de Eucalyptus globulus sobre suelos rojo arcillosos de la provincia de Osorno, Décima Región", *Revista Bosque*, 95 - 101

Gélinas J.B., 1995, La réforme de toutes les réformes. L'ajustement structurel et la réforme des soins de santé dans le Tiers-Monde, Communication présentée à la 2^{ème} Conférence canadienne de santé internationale, Ottawa, 12-15 novembre 1995

Gemitzi A., Tsihrintzis V. *et al.*, 2007, "Combining geographic information system, multicriteria evaluation techniques and fuzzy logic in siting MSW landfills", *Environmental Geology*, vol. 51, N° 5, 797-811

Geores M.E., 2003, "The relationship between scale resource definition and scale: considering the forest", in Dolsak N. et Ostrom E. (eds.), *The Commons in the New Millennium. Challenges and adaptation*, Cambridge, MIT Press, 77-97

Gevrey M., Dimopoulos I. *et al.*, 2003, "Review and comparison of methods to study the contribution of variables in artificial neural network models", *Ecological Modelling*, vol. 160, 249-/264

Gibon A., Sheeren D. *et al.*, 2010, "Modelling and simulating change in reforesting mountain landscapes using a social-ecological framework", *Landscape Ecology*, vol. 25, N° 2, 267-285

- Glenn J.C., Gordon T.J. *et al.*, 2010, *2010 State of the Future*, The Millennium Project, 83 p.
- Gobierno Regional de Los Lagos, 2009, *Estrategia Regional de desarrollo 2009-2020*, 61 p.
- Godet M., 1986, "Introduction à la Prospective. Seven key ideas and one scenario method", *Futures*, 134-157
- Godet M., 1993, "Anticipation and scenarios are not synonymous", *Futures*, 350-351
- Godet M., 2010, "Future memories", *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 77, 1457-1463
- Godoy R., Paulino L. *et al.*, 2009, "Temperate ecosystems of Chile: characteristic biogeochemical cycles and disturbance regimes", 31-40
- GOFC-GOLD, 2010, A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation, GOFC-GOLD Report version COP16-1, (GOFC-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada), Alberta, 210 p.
- González R.E., 2008, "Explaining Afforestation with a Panel Data of Municipalities in Southern Chile", 22 p.
- Goodchild M.F., Parks B.O. *et al.*, 1993, *Environmental modeling with GIS*, New York, Oxford University Press, 520 p.
- Goussault Y., 1972, "La réforme agraire chilienne", *Tiers Monde*, vol. 13, N° 51, 541 - 558
- Grebe M.E., Pacheco S. *et al.*, 1972, "Cosmovisión mapuche", *Cuadernos de la realidad nacional*, N° 14, 46-73
- Grez A.A., Bustamente O. *et al.*, 1998, "Landscape ecology, deforestation, and forest fragmentation: the case of the ruil forest in Chile", in Chávez S., Eduardo & Middleton, John (eds.), *La ecología del paisaje como base para el desarrollo sustentable en América Latina*, 26 p.
- Groenfeldt D., 2003, "The future of indigenous values: cultural relativism in the face of economic development", *Futures*, vol. 35, 917-929
- Grosse H., 2011, Abastecimiento de madera: un gran desafío para Chile y el mundo, V Seminario Forestal para Medios de Comunicación, 17 de Agosto de 2011
- Guerra M. G., 2007, "Historia del uso de los recursos forestales en Chile", in Hernandez P.J. *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 13-27
- Gutman G., 2004, *Land change science: observing, monitoring and understanding trajectories of change on the Earth's surface*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 459 p.

H

Hagner O. et Reese H., 2007, "A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types", *Remote Sensing of Environment*, vol. 110, 438-444

Harribey J.M., 1996, Développement soutenable et réduction du temps de travail. Analyse critique appliquée au cas de la France, Thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université de Paris I – Panthéon – Sorbonne, Institut d'Etude du développement économique et social, 836 p.

Hartwig Carte F., 1991, *Chile, desarrollo forestal sustentable. Ensayo de política forestal*, Buenos Aires, Editorial Los Andes, 185 p.

Hatem F., 1993, *La Prospective. Pratiques et Méthodes*, Paris, Economica, Gestion, 390 p.

Henriquez Ruiz C., 2006, "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile", *Revista de Geografía Norte Grande*, vol. 36, 61-74

Henriquez Ruiz C., 2008, Apertura neoliberal y expansión forestal: Algunos factores para su modelización en la cuenca de Chillan, Xème Coloquio Internacional de Geocrítica – Diez años de cambios en el mundo, en la geografía y en la ciencias sociales, 1999-2008, Universidad de Barcelona, Barcelona.

Herrera S., 2011, "El Indap desarrolla proyecto hídrico en San Juan de la Costa", *El Diario Austral de Osorno*

Hillman D., 2009, After the Global Recovery...What Will the Market Pulp Business Look Like?, Special Features, Paper Asia, 5 p.

Hofstede R., 1998, "Impactos ecológicos de plantaciones forestales", in Hofstede R., Lips J. *et al.*, *Geografía, Ecología y Forestación de la Sierra Alta del Ecuador. Revisión de Literatura*, Eucador, Editorial Abya Yala, 242 p.

Hoffmann A., 2005, *Flora silvestre de Chile. Zona Araucana. Arboles, arbustos y enredaderas leñosas*, Santiago de Chile, Ediciones Fundación Claudio Gay, 257 p.

Houet T., 2006, Occupation des sols et gestion de l'eau: Modélisation prospective en paysage agricole fragmenté (Application au SAGE Blavet), Thèse de doctorat, Département de Géographie - Laboratoire COSTEL. Rennes, Université de Rennes 2 - Haute Bretagne, 370 p.

Houet T., Hubert-Moy L. *et al.*, 2008, "Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique. Application à la gestion de l'eau en Bretagne", *Revue internationale de Géomatique*, 345 - 373.

Houet T., Loveland T. *et al.*, 2010, "Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies", *Landscape Ecology*, vol. 25, N°2, 249-266

Houet T., Verburg P. *et al.*, 2010, "Monitoring and modelling landscape dynamics", *Landscape Ecology*, vol. 25, N° 2, 163-167

Hubert-Moy L., Corgne S. *et al.*, 2006, Modélisation prédictive et prospective des changements de l'occupation des sols. Interactions Nature-Sociétés : Analyse et modèles, La Baule, 6 p.

Huete A., Didan K. *et al.*, 2002, Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, 195-213

Hulme M. et Dessai S., 2008, "Predicting, deciding, learning: can one evaluate the 'success' of national climate scenarios? ", Manuscript for special Focus Issue of *Environmental Research Letters* on the topic 'Where next with global environmental scenarios?', 14 p.

I

IMO Group Office, 2006, Informe de evaluación, FSC-Manejo Forestal, Forestal Probosque Ltd., 4to Monitoreo, 14 p.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas), 2002, Estadísticas Sociales de los pueblos indígenas en Chile. Censo 2002, Instituto Nacional de Estadísticas / Programa Orígenes (MIDEPLAN / BID), 201 p.

INE, 2007, VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal - Informe metodológico, Instituto Nacional de Estadísticas, 45 p.

INFOR (INstituto FORestal), 2005, Estadísticas forestales chilenas 2004. Boletín estadístico 101, Centro de Información Forestal (CIF), 160 p.

INFOR, 2007, Estadísticas forestales chilenas 2006. Boletín estadístico 117, Centro de Información Forestal (CIF), 164 p.

INFOR, 2008, Anuario Forestal 2008, Centro de Información Forestal (CIF), 169 p.

INFORME País, 2002, Estado del Medio Ambiente en Chile, Universidad de Chile, 244 p.

IREN (Instituto nacional de investigación de REcursos Naturales), 1979, "Fragilidad de los ecosistemas naturales de Chile", Informe N° 40, 61 p.

Irwin E.G. et Geoghegan J., 2001, "Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 85, 7-23

Institute for Alternative Futures, 2004, "Striving to Have it all in Sustainable Rural Development", Newsletter, in Glenn *et al.*, 2010, *2010 State of the Future*
<http://www.millennium-project.org/millennium/environscen.html>

J

Jakeman A.J., Letcher R.A. *et al.*, 2006, "Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models", *Environmental Modelling & Software*, vol. 21, 602-614

Joerin F., 1997, Proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère, Département de génie rural, Ecole Polytechnique, Lausanne, 269 p.

Johnson R.L., 2004, "Networks of predictions", *Futures*, vol. 36, 1095–1102

Joliveau T., 2001, "La participation à la décision territoriale : dimension socio-géographique et enjeux informationnels d'une question politique", *Géocarrefour*, vol. 76, N° 76, 273-279

Joliveau T., 2004, Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences Humaines, Rouen, Université de Rouen, 2 vol., 504 p. + non pag.

Julien P.A., Lamonde P. *et al.*, 1975, "La méthode des scénarios en prospective", *L'Actualité économique*, vol. 51, N° 2, 253-281

K

Kalogirou S.A., 2001, "Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 5, 373–401

Karul, C. et Soyupak S., 2006, "A comparison between neural network based and multiple regression models for Chlorophyll-a estimation", in Recknagel, F. (ed), *Ecological Informatics*, Berlin, Springer.

Kates R.W., Turner B.L. *et al.*, 1990, "The Great transformation", in Turner B.L., Clark W.C., *et al.* (eds.), *The Earth as transformed by Human action. Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years*, Cambridge University Press w/ Clark University, 1-18

Kim O.S., 2010, "An assessment of deforestation models for Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation (REDD)", *Transactions in GIS*, vol. 5, N° 14, 631-654

Kimmins (Hamish) J.P., 1997, *Balancing Act. Environmental Issues in Forestry*, University of British Columbia Press, Vancouver, 305 p.

Kimmins (Hamish) J.P., 2002, "Future shock in forestry", *The forestry chronicle*, vol. 78, N° 2, 263-271

Kimmins (Hamish) J.P., Blanco J.A., *et al.*, 2010, Forecasting forest futures. A hybrid modelling approach to the assessment of sustainability of forest ecosystems and their values, Londres, The Earthscan forest library, 281 p.

Knockaert Pasquali H., 2007, Historia de los Incendios Forestales en Chile, Seminario Internacional: "Sensores Remotos y Catástrofes Naturales", 15 p.

Kok K. et Veldkamp A., 2001, "Evaluating impact of spatial scales on land use pattern analysis in Central America", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 85, 205–221

Koné N., Souleymane P. *et al.*, 2002, "Évaluation de la bande moyen infrarouge TM5 pour l'identification des cultures et de la végétation naturelle en zone cotonnière du Burkina Faso", *Télédétection*, vol. 2, N° 3, 183-192

L

Laborte A.G., M. K. Van Ittersum *et al.*, 2007, "Multi-scale analysis of agricultural development: A modelling approach for Ilocos Norte, Philippines", *Agricultural Systems*, vol. 94, 862-873

Labra V., 2001, La industria forestal en Chile, desarrollo y perspectivas, Feller Rate – Vision de Riesgo, 6 p.

Lachenal D., 2003, Industrie papetière mondiale: croissance prévue jusqu'en 2015. Le papier, un matériau complexe. Grenoble, Institut polytechnique de Grenoble – INPG, 36 p.

Lafrance M.A., 2007, Le potentiel de la certification à favoriser la mise en œuvre d'une foresterie durable, Les cahiers de la CRSDD, Université du Québec à Montréal, N° 204, 159 p.

Laganier R., Villalba B. *et al.*, 2002, "Le développement durable face au territoire : éléments pour une recherche pluridisciplinaire", *Développement durable et territoires*, Dossier 1 : Approches territoriales du Développement Durable, <http://developpementdurable.revues.org/774>

Lajoie G., 2005, "Modélisation et prospective territoriale", in Yves Germond (dir.), *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*, Paris, Lavoisier, 107-136

Lambin E.F., Turner B. L. *et al.*, 2001, "The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths", *Global Environmental Change*, vol. 11, N° 4, 261–269

Lambin E.F., 2004, Modelling land-use change, in Wainwright J. et Mulligan M. (eds.), *Environmental modelling: finding simplicity in complexity*, London – UK, John Wiley & Sons, Ltd, 245-254

Lambin E.F. et Geist H., 2006, *Introduction: Local Processes with Global Impacts*, in Lambin E.F. et Geist H. (eds.), *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*, New York/Berlin, Springer, p. 1-8

Lambin E.F. et Geist H. J., 2007, "Causes of land-use and land-cover change", Cutler J. Cleveland. from http://www.eoearth.org/article/Causes_of_land-use_and_land-cover_change

Lanfranco, D., S. Ide *et al.*, 2002, "Caracterización fitosanitaria de astillas de Eucalyptus spp. y de especies nativas" 10 p.

Langlois P. et Reguer D., 2005, "La place du modèle et de la modélisation en Sciences Humaines et Sociales", in Germond Y (dir.), *Modélisations en géographie. Déterminismes et complexités*, Paris, Elsevier, 35-48

- Lara A., 1996, "Una propuesta general de silvicultura para Chile", *Ambiente y Desarrollo*, vol. 12, N° 91, 31-40
- Larrere R. et Nougarede O., 1993, *Des hommes et des forêts*, Paris, Gallimard-Tradition, 128 p.
- Latouche, S., 2003, "L'imposture du développement durable ou les habits neufs du développement", *Mondes en développement*, vol. 31, N° 121, 23 - 30
- Latouche, S., 2004, *Survivre au développement. De la décolonisation de l'imaginaire économique à la construction d'une société alternative*, Edition Mille et une Nuits, 127 p.
- Lecerf R., 2008, Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution. (Application à la Bretagne), Thèse de doctorat, Université de Rennes, Laboratoire COSTEL, 326 p.
- Leclerc G., Bommel P. *et al.*, "Elaboration participative de modèles et de scénarios : une entrée pour analyser la coévolution des systèmes d'élevage extensif et des territoires", *Cahiers Agricoles*, vol. 19, N° 2, 152-159
- Lefèvre F., 2004, "Human impacts on forest genetic resources in the temperate zone: an update review", *Forest Ecology Management*, vol. 197, 257-271
- Lek S. et Guégan J.F., 1999, "Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction", *Ecological Modelling*, vol. 120, 65-73
- Leloup F. Moyart L. *et al.*, 2005, "La gouvernance territoriale comme nouveau mode de coordination territoriale ? ", *Géographie Économie Société*, vol. 7, 321-332
- Le Maire G., Marsden C. *et al.*, 2011, "MODIS NDVI time-series allow the monitoring of Eucalyptus plantation biomass", *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, N° 10, 2613–2625
- Le Quesne G.C., 2000, "Bioecología del bosque nativo chileno", in Baldini A. et Pancel L. (eds.), *Agente de daños en el bosque nativo*, Santiago de Chile, 19-44
- Lesne A., 2002, Du discret au continu (et inversement) : modèles et réalités, Ecole thématique « Biologie intégrative : l'organisation du vivant », Berder, 16-22 Mars 2002, 7 p.
- Leyton Vasquez J.I., 2009, "Tenencia forestal en Chile." FAO, 37 p.
- Li W., Packard N.H. *et al.*, 1990, Transition Phenomena in Cellular Automata Rule Space, 35 p.
- Little C., Lara A., *et al.*, 2009, "Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile", *Journal of Hydrology*, vol. 374, 162-170
- Lu D., Mausel P. *et al.*, 2005, "Land cover binary change detection methods for use in the moist tropical region of the Amazon : a comparative study", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, N° 1, 101-114

Luebert F. et Pliscoff P., 2005, "Bioclimas de la Cordillera de la Costa del centro-sur de Chile", in Smith-Ramírez C. *et al.* (eds.), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 60-74

Luz de la Maza A. C., 2007, "Planificación de áreas silvestres protegidas y ecoturismo", in Hernandez P. J *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 644-690

M

Maestripiéri N., 2007, Dynamique forestière (forêts natives et plantations) sur la pré cordillère côtière: province d'Osorno (Xème Région des Lacs: Chili). Analyse diachronique: 1986-1998 et 2001, Mémoire de Master 1, Toulouse, Université de Toulouse 2 Le Mirail, 101 p.

Maestripiéri N., 2008, Sylviculture et développement soutenable dans le sud chilien. De l'analyse diachronique à la modélisation, Mémoire de Master 2, Toulouse, Université de Toulouse 2 Le Mirail, 111 p.

Maestripiéri N., (en évaluation), Validation spatiale de deux modèles de simulation : l'exemple des plantations industrielles au Chili, *Cybergeo - European Journal of Geography*, 23 p.

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, 69-84

Malczewski J., 1999, *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley & Sons, 392 p.

Malczewski J., Chapman T. *et al.*, 2003, "GIS - multicriteria evaluation with ordered weighted averaging (OWA): case study of developing watershed management strategies", *Environment and Planning*, vol. 73, 1769-1784

Mancebo F., 2007, "Le développement en question(s)", *Cybergeo - European Journal of Geography*, <http://cybergeo.revues.org/10913>

Mann P., 1991, *L'action collective. Mobilisation et organisation des minorités actives*, Paris, Armand Colin, 160 p.

Mardones M., 2005, "La Cordillera de la Costa: caracterización físico-ambiental y regiones morfoestructurales", in Smith-Ramírez C. *et al.* (eds.), *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 39-59

Marín S.L., Nahuelhual L. *et al.*, 2011, "Projecting landscape changes in southern Chile: Simulation of human and natural processes driving land transformation", *Ecological Modelling*, vol. 222, 2841– 2855

Mariqueo R. et Calbucura J., 2002, "The Mapuche Nation" from <http://www.mapuche.info/mapu/EU020209NacionMapEn.htm>

- Martin B., 2003, Reconnaître les plantations intensives comme troisième force de la foresterie. XII World Forestry Congress, Canada.
- Mas J.F., Puig H. *et al.*, 2004, "Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks", *Environmental Modelling & Software*, vol. 19 461–471
- Mas J.F., Kolb M. *et al.*, sous presse, "Eclairer le choix des outils de simulation des changements des modes d'occupation et d'usages des sols. Une approche comparative", *Revue Internationale de Géomatique*, 26 p.
- Masini E.B. et Medina Vasquez J., 2000, "Scenarios as Seen from a Human and Social Perspective", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 65, 49–66
- Maynard Smith J., 1978, *Models in ecology*, Cambridge, Cambridge University Press, 160 p.
- McMahon J.P., 1999, "International expectations for sustainable forestry: a view from the U.S. forest industry", *New Forests*, vol. 17, 329-338
- Meadows D.H., Meadows D.L., *et al.*, 1972, Haltes à la croissance?, Paris, Edition Fayard
- Medina Vásquez J. et Ortégón E., 2006, *Manual de prospectiva y decisión estratégica: bases teóricas e instrumentos para América Latina y el Caribe*, Santiago, Manuales, CEPAL, 438 p.
- Millenium Ecosystem Assessment, 2005, Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire, Version provisoire finale destinée à la revue pour impression, 59 p.
- Miossec A., Arnould P. *et al.*, 2004, "Développement durable: affaire de tous, approches de géographes", *Historiens et Géographes*, N° 387, 85-95
- Mitchell C.P., Stevens E.A. *et al.*, 1999, "Short-rotation forestry - operations, productivity and costs based on experience gained in the UK", *Forest Ecology and Management*, vol. 121, 123-136
- Modrego F., 2004, Estimación del efecto del Decreto Ley n°701 fomento forestal sobre las tasas de forestación en Chile: Un análisis a nivel regional, Departamento de Economía Agraria, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Moine, A., 2007, *Le territoire: comment observer un système complexe*, Itinéraires géographiques, Paris, L'Harmattan, 176 p.
- Molina R. et Correa M., 1998, Las tierras Huilliches de San Juan de la Costa. Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI), 441 p.
- Montagne-Huck C. et Niedzwiedz A., 2010, Comptes intégrés économiques et environnementaux de la forêt en France. Document de travail du LEF. Hors-série technique. Nancy, LEF – AgroParisTech/INRA, 25 p.
- Mullins G., 2009, ¿Hacia dónde va la industria chilena? La industria de la Celulosa, CMPC Celulosa, 44 p.

Moguillansky G. et Silva V., 2001, "Estrategias empresariales y políticas publicas: el futuro del complejo forestal en Chile", in Oscar Muñoz (ed.), *Más allá del bosque: transformar el modelo exportador*, Santiago de Chile, Editorial FLASCO, 107-144

Moreira E., Costa S., *et al.*, 2009, "Dynamical coupling of multiscale land change models", *Landscape Ecology*, vol. 24, 1183–1194

Morissette S., 2010, La ligniculture au Québec et en Outaouais, Forum reboisement Outaouais 2010, Gatineau, Réseau Ligniculture Québec, 27 p.

Morton D.C., Shimabukuro Y.E. *et al.*, 2007, Secondary forest dynamics and Cerradão loss in Mato Grosso during 2001-2005 from MODIS phenology time series. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Brasil, 6859-6866

Muñoz B., 1999, "Derechos de propiedad y pueblos indígenas en Chile", Publicación de las Naciones Unidas, Red de desarrollo agropecuario, Santiago de Chile, 49 p.

Mushkin A., Balick L.K. *et al.*, 2005, "Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3–5 μm) using the Multispectral Thermal Imager (MTI) ", *Remote Sensing of Environment*, vol. 98, 141 – 151

Myers N., Mittermeier R.A. *et al.*, 2000, "Biodiversity hotspots for conservation priorities", *Nature*, vol. 403, N° 24, 853-858

N

Naef O., 2011, "La chimie et l'industrie papetière", *Chimia*, vol. 65, N° 6, 444-446

Nahuelhual L., Donoso P. *et al.*, 2007, "Valuing ecosystem services of chilean temperate rainforests", *Environment, Development and Sustainability*, vol. 9, 481-499

Nahuelhual L., Carmona A. *et al.*, 2012, "Land-cover change to forest plantations: Proximate causes and implications for the landscape in south-central Chile", *Landscape and Urban Planning*, vol. 107, 12– 20

Navarro R.M., Henríquez N.C. *et al.*, 2005, Contexto económico y social de las plantaciones forestales en Chile. El caso de la Comuna de Lumaco, región de la Araucanía. Montevideo, Movimiento Mundial por los Bosques, 71 p.

Neira E. et Lara A., 2000, "Desarrollo de cronologías de ancho de anillos para alerce (*Fitzroya cupressoides*) en Contao y Mirador, Chile", *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 73, 693-703

O

Oficina Internacional del Trabajo, 2006, Convenio 169 de la OIT. Sobre pueblos indígenas y tribales en países independientes, Santiago de Chile, 113 p.

Okoli C. et Pawlowski S.D., 2004, "The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications", *Information & Management*, vol. 42, 15–29

Okoli C. et Oh W., 2007, "Investigating recognition-based performance in an open content community: A social capital perspective", *Information & Management*, vol. 44, N° 3, 240-252

Ominani C., 1986, "Chili: échec du monétarisme périphérique", in Boyer R. (dir.), *Capitalismes. Fin de siècles*, Paris, PUF, 109-139

Oñate-Valdivieso F. et Bosque Sendra J., 2010, "Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling", *Journal of Hydrology*, vol. 395, 256-263

Organisation Internationale du Travail (2001). Mondialisation et développement durable de la foresterie et des industries du bois: un secteur en mouvement. Rapport soumis aux fins de discussion à la Réunion tripartite sur la dimension sociale et les répercussions sur la main-d'oeuvre de l'évolution des industries de la foresterie et du bois, Bureau International du Travail (Genève), 122 p.

Ortega Martínez L., 2005, *Chile en ruta al capitalismo. Cambio, euforia y depresión (1850-1880)*, Santiago de Chile, LOM Ediciones Ltda., Colección sociedad y cultura, 511 p.

Ostrom E., 2007, Sustainable Social-Ecological Systems: An Impossibility?, Annual Meetings of the American Association for the Advancement of Science, Science and Technology for Sustainable Well-Being, San Francisco, 15–19 February, 29 p.

Otero L., 1998, "Efectos de la sustitución de bosques nativos por plantaciones de especies exóticas en Chile", in Defensores del Bosque Chileno, *La Tragedia del Bosque Chileno*, Santiago de Chile, Ochos Libros Editores, 295-298

Otero L., 2006, *La huella del fuego. Historia de los bosques nativos. Poblamiento y cambio en el paisaje del sur de Chile*, Santiago de Chile, Pehuén Editores, 171 p.

Özesmi S.L., Özesmi U., 1999, "An artificial neural network approach to spatial habitat modelling with interspecific interaction", *Ecological Modelling*, vol. 116, 15–31

P

Paegelow M., Villa N., *et al.*, 2004, "Modélisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne", *Cybergeo : European Journal of Geography*, <http://cybergeo.revues.org/2811>

Paegelow M., 2004, Géomatique et géographie de l'environnement : de l'analyse spatiale à la modélisation prospective, Habilitation à diriger des recherches, Université de Toulouse Le Mirail, 210 p.

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, 26 p.

Paegelow M. et Camacho Olmedo M.T., 2008, *Modelling Environmental Dynamics: Advances in Geomatic Solutions*, Berlin – Heidelberg, Springer, 390 p.

- Paegelow M., 2008, Aide à la décision : évaluation multicritères et multi-objectifs, Note de cours, 14 p.
- Paegelow M., Maestriperi N., *et al.*, 2012, "Détection des plantations forestières par imagerie satellite MODIS dans le sud du Chili", *M@ppemonde*, N° 106, 22 p.
- Parizeau M., 2004, "Le perceptron multicouche et son algorithme de rétropropagation des erreurs", Département de génie électrique et de génie informatique, Laval, 8 p.
- Parker D.C., Manson S.M. *et al.*, 2002, "Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review", *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 93, N° 2, 314-337
- Patterson M.W. et Hoalst-Pullen N., 2011, "Dynamic equifinality: The case of south-central Chile's evolving forest landscape", *Applied Geography*, vol. 31, 641-649
- Pérez Muñoz C., 2005, "Alerce: El Padre Forestal de Chile", *Chile Forestal*, 30-32
- Pérez Vega A., Mas J.F. *et al.*, 2012, "Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest", *Environmental Modelling & Software*, vol. 29, 11-23
- Perroux F., 1974, "L'Europe fin de siècle", *Economie appliquée*, vol. 2, 369-384
- Peterson W., 2005, The Environmental Kuznet's curve, University of Nebraska, Lincoln, 3 p.
- Pinsky M.A. et Karlin S., 2010, *An Introduction to Stochastic Modeling*, Burlington, Academic Press, 563 p.
- Pizarro G., et Zolezzi C.I., 2004, "Tala ilegal de Alerces: la responsabilidad de la CONAF", Santiago de Chile, Terram Publicaciones, 38 p.
- Pliscoff P., Tecklin D. *et al.*, Análisis de paisaje de conservación para la Cordillera de la Costa de la Región de Los Lagos, World Wild Fund Chile, Valdivia, 144 p.
- PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement), 2004, *Las trayectorias del Desarrollo Humano en las comunas de Chile (1994-2003)*, N° 11 Temas de Desarrollo Humano Sustentable, 150 p.
- PNUD, 2008, *About Human Development*, <http://hdr.undp.org/en/humandev/>
- Pontius Jr R.G. et Schneider L.C., 2001, "Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 85, 239-248
- Pontius Jr R.G. et Batchu K., 2003, "Using the Relative Operating Characteristic to Quantify Certainty in Prediction of Location of Land Cover Change in India", *Transactions in GIS*, vol. 7, N° 4, 467-484

Pontius Jr R.G., Huffaker D. *et al.*, 2004, "Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models", *Ecological Modelling*, vol. 179, 445-461

Pontius Jr R.G., Shusas E. *et al.*, 2004, "Detecting important categorical land changes while accounting for persistence", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 101, 251-268

Pontius Jr R.G. et Malanson J., 2005, "Comparison of the structure and accuracy of two land change models", *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, N° 2, 243-265

Pontius Jr R.G. et Spencer J., 2005, "Uncertainty in extrapolations of predictive land-change models", *Environment and Planning*, vol. 32, 211-230

Pontius Jr R.G. et Millones M., 2008, "Problems and solutions for kappa-based indices of agreement", International Conference, Mytilene, Lesvos, Greece, 8 p.

Pontius Jr R.G., 2010, Workshop Land Change Modeling Methods: calibration, validation and extrapolation. SAGEO'10 - Spatial Analysis and GEomatics 2010. Conférence internationale de Géomatique et Analyse Spatiale « Outils, méthodes et modèles en géomatique pour la production de connaissances sur les territoires et le paysage », Toulouse

Postma T.J.B.M. et Liebl F., 2005, "How to improve scenario analysis as a strategic management tool?", *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 72, 161-173

Potapov P., Hansen M.C., *et al.*, 2008, "Combining MODIS and Landsat imagery to estimate and map boreal forest cover loss", *Remote Sensing of Environment*, 3708-3719

Prado D. et Antonio J., 1991, *Eucalyptus: principios de silvicultura y manejo*, INFOR - Corporación de fomento de la producción, 199 p.

Putuhena W. et Cordery I., 2000, "Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*", *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 100, 59-72

PwC, 2009, Global Forest, Paper & Packaging Industry Survey, www.pwc.com/fpp, 36 p.

PwC, 2009, CEO Perspectives Viewpoints of CEOs in the forest, paper & packaging industry worldwide, 2010 Edition, 32 p.

PwC, 2011, Growing the Future, www.pwc.com/fpp, 48 p.

Q

Quintanilla V.G., 1974, *La representación cartográfica preliminar de la vegetación chilena: Un ensayo fitoecológico del sur de Chile*, Valparaíso, Ediciones Universitarias de Valparaíso, 73 p.

R

Rabl A., 1996, "Discounting of long-term costs: What would future generations prefer us to do?", *Ecological Economics*, 137-145

Raga C.F., 2005, Sustentabilidad forestal, plantaciones y oportunidades para el Sur, Cuenca Foresto - Industrial: Modelo, Visión y Perspectivas, Buenos Aires, 21 p.

Ramade F., 2005, *Eléments d'écologie: écologie appliquée*, Dunod, Paris, 487-522

Ramankutty N., Graulich *et al.*, 2006, "Global Land-Cover Change: Recent Progress, Remaining Challenges", in Lambin E.F. et Giest H. (eds.), *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*, New York/Berlin, Springer, 9-39

Reid R.S., Tomich T.P. *et al.*, 2006, "Linking Land-Change Science and Policy: Current Lessons and Future Integration", in Lambin E.F. et Giest H. (eds.), *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*, New York/Berlin, Springer, 157-171

Rhoads B.L., 2005, *Process/Form*, in Castree N. *et al.* (eds.), *Questioning geography: fundamental debates*, Blackwell Publishing, 131-150

Rist G., 2007, *Le développement. Histoire d'une croyance occidentale*, 3^{ème} édition revue et augmentée, Paris, Presses de Sciences Po, 483 p.

Ripley B. D., 1994, "Neural Networks and Related Methods for Classification", *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, vol. 56, N° 3, 409-456

Robic M.C. et Mathieu N., 2001, *Géographie et durabilité : redéployer une expérience et mobiliser de nouveaux savoir-faire. Le développement durable, de l'utopie au concept*, Paris, Elsevier, 167 - 190.

Rodríguez M. et Luz de la Maza C., 2007, "Certificación forestal", in Hernandez P.J. *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 82-100

Rogan J. et Chen D.M., 2004, "Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change", *Progress in Planning*, vol. 61, 301-325

Roger C., "Agriculture raisonnée, multifonctionnelle, biologique,... : quelles voies vers une « agriculture durable » ?", Notes de Synthèse, INRA, 5 p.

Roubelat F., 1994, "La prospective aux Etats-Unis. De la rigueur au divertissement", 9 p.

S

Saaty T., 1977, "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of mathematical psychology* vol. 15, N° 3, 234-281

Sadanandan Nambiar E.K., 1999, "Productivity and sustainability of plantation forests", *Revista Bosque*, vol. 20, N° 1, 9-21

Saez Villalobos N., 1997, "¿Es sustentable la explotación forestal en la Región de Los Lagos? La problemática dendroenergética como aporte analítico relevante", *Revista LIDER*, 175-186

- Saez Villalobos N., 2002, "Clasificación de espacios forestales nativos en el norte de la Isla de Chiloé", *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 249-265
- Saez Villalobos N., 2005, "Silvicultura predial en bosques nativos del área central-interior de la Isla grande de Chiloé", *Revista LIDER*, vol. 13, 227 - 264
- Sánchez Álvarez J., 2001, "San Juan de la Costa: entre la participación social y la sociedad sin proyecto", *Revista LIDER*, N° 9, 75-83
- Sánchez Álvarez J., 2004, "Politiques publiques, institutions et dynamiques forestières au sud du Chili" in Barrué-Pastor M. (dir.), *Forêts et développement durable au Chili. Indianité mapuche et mondialisation*, Toulouse, Presse Universitaire du Mirail, Toulouse, 49-64
- Sandoval V., Real P. *et al.*, 2002, "Desarrollo de un Sistema de Información Geográfico Forestal en Chile", *Revista Bosque*, vol. 23, N° 1, 91-99
- Santana R., 2004, "Exploitation de la forêt originelle et reboisements dans la commune de San Juan de la Costa. Enjeux du développement durable à l'échelon local", in Barrué-Pastor M. (dir.), *Forêts et développement durable au Chili. Indianité Mapuche et mondialisation*, Toulouse, Presse Universitaire du Mirail, 115-146
- Santana R., 2005, "Los Huilliches de Osorno y la gestión de un modelo litoral de desarrollo", *Revista LIDER*, vol. 13, 151-164
- Sarget M-N., 1996, *Histoire du Chili: de la conquête à nos jours*, Paris, L'Harmattan, Collection Horizons Amériques Latines, 320 p.
- Scheck F., 2005, *Mechanics. From Newton's Laws to Deterministic Chaos*, Springer-Verlag, 547 p.
- Schlatter J.E., Gerding V. *et al.*, 1998, "Características y variabilidad de sitios con plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don en suelos graníticos de las Regiones VIII y IX", *Revista Bosque*, vol. 19, N° 1, 37-59.
- Schulz J.J., Cayuela L. *et al.*, 2010, "Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008)", *Applied Geography*, vol. 30, 436-447
- Schütz J-P., 1990, *Sylviculture : principes d'éducation des forêts*, Lausanne, Presses Polytechniques et universitaires romandes, 243 p.
- Scott C.W., 1954, "Pinus radiata au Chili", Document de la FAO, 12 p.
- Scott C.W., 1960, "Pinus radiata, une essence exotique", Document de la FAO, 21 p.
- Schiappacasse I., Nahuelhual L. *et al.*, 2012, "Assessing the benefits and costs of dryland forest restoration in central Chile", *Journal of Environmental Management*, vol. 97, 38-45

Schlatter J.E., 1977, "La relación entre suelo y plantaciones de *Pinus Radiata* D. Don en Chile central. Análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo", *Revista Bosque*, vol. 2, N° 1, 12-31

Seguel A., 2010, Conflicto público de tierras y Recursos naturales: Expansión forestal y territorialidad Mapuche (Chile), 23 p.

Selleron G., 2001, "Deforestación y reforestación de las ladera de la Región de Los Lagos de Chile por teledetección ", *Revista LIDER*, N° 9, año 6, 7 p.

Sepúlveda C, Villarroel P. *et al.*, 2006, "Conservacion en tierras privadas de la Décima Region: la importancia de los pequeños y medianos propietarios", in Catalán R. *et al.* (eds.), *Bosques y comunidades del sur de Chile*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 163-176

Serrano C. et Fernández M.I., 2002, "Descentralización del Estado en el nivel regional y local. ¿Reformas paralelas ? ", *Serie de Estudios Socio/Economicos*, N° 18, 34 p.

Servicio de Impuesto Interno, 2011, Rol semestral de contribuciones, Bienes Raíces 2011 "Predios Agrícolas" – Comuna: 10207 – 307 – San Juan de la Costa

Seymour R.S. et Hunter M.L., 1999, *Principles of ecological forestry*, in Hunter M.L. (ed.), *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*, Cambridge, Cambridge University Press, 22-61

Shao G. et Wu J., 2008, "On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data", *Landscape Ecology*, vol. 23, 505–511

Silva P., 2006, "Los tecnócratas y la política en Chile: pasado y presente", *Revista de Ciencia Política*, vol. 26, N° 2, 175-190

Simon H. A., 1995, "Artificial intelligence: an empirical science", *Artificial Intelligence*, vol. 77, 95-127

Sizer N., 1994, Opportunities to save and sustainably use the world's forests through international cooperation. UNCED and international forest policy, World Resources Institute (WRI), 28 p.

Skupinski G., BinhTran D. *et al.*, 2009, "Les images satellites Spot multi-dates et la métrique spatiale dans l'étude du changement urbain et suburbain – Le cas de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France)", *Cybergeo : European Journal of Geography*, <http://cybergeo.revues.org/21995>

SmartWood, 2004, Resumen Público de Certificación de Forestal Anchile Ltda., 31 p.

Smith C., 2001, "Valdivian temperate forests"
from http://www.worldwildlife.org/wildworld/profiles/terrestrial/nt/nt0404_full.html.

Smith Ramirez C., Armesto J. J. *et al.*, 2005, *Historia, biodiversidad y ecología de los bosques costeros de Chile*, Santiago de Chile, Edición Universitaria Bosque Nativo, 708 p.

Soares-Filho B.S., Coutinho Cerqueira G. *et al.*, 2002, "DINAMICA—a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier", *Ecological Modelling*, vol. 154, 217–235

Soekotjo, 2009, Intensive silviculture to improve productive capacity of forests: Large scale enrichment planting of dipterocarps. XIII World Forestry Congress, Buenos Aires, Argentina.

Srivastavawz R., Youw L. *et al.*, 2002, "Stochastic vs. Deterministic Modeling of Intracellular Viral Kinetics", *Journal of Theoretical Biology*, vol. 218, 309–321

Streeten P., 1986, "What do we owe the future? ", *Resources policy*, 16 p.

Stewart C.C., 2008, "Integral scenarios: Reframing theory, building from practice", *Futures*, vol. 40, 160–172

T

Toral Ibañez M., 2007, "Plantaciones forestales comerciales", in Hernandez P. J *et al.* (eds.), *Biodiversidad: Manejo y conservación de recursos forestales*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria, 308-361

Toro J. et Gessel S.P., 1999, "Radiata pine plantations in Chile", *New Forests*, vol. 18, 33-44

Toro Balbotin D., 2007, Le développement du secteur forestier dans le sud du Chili : de la terre des Mapuches à la grande entreprise globalisée. Cas d'étude : commune de San Juan de la Costa. Mémoire de Master 2, IPEALT, Toulouse Le Mirail, 103 p.

Tough A., 1993, "What future generations need from us", *Futures*, 1041-1050

Turner B.L., Clark W.C. *et al.*, 1990, *The Earth as transformed by Human action. Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years*, Cambridge University Press w/ Clark University, 729 p.

Turner M.G., Pearson S.M. *et al.*, 2003, "Effects of land-cover change on spatial pattern of forest communities in the Southern Appalachian Mountains (USA)", *Landscape Ecology*, vol. 18, 449–464

Turner B.L., Lambin E.F., *et al.*, 2007, "The emergence of land change science for global environmental change and sustainability", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), vol. 104, N° 52, 20666–20671

U

Unda A., Stuardo A., 1996, Chile: Expansión forestal en la Novena Región y desarrollo sustentable, Oficina Internacional del Trabajo, Santiago de Chile, 91 p.

UNFCCC, 2002, Report of the Conference of the Parties on its seventh session. Part two: action taken by the Conference of the Parties. Conference of the Parties. Marrakech. 1: 69.

V

- Valdebenito Rebolledo, G. A., 2005, Evaluación de efectividad el fomento forestal en Chile, periodo 1996-2003, Etude de cas réalisée afin d'obtenir le grade de Magister en Gestión y Políticas Públicas de la Universidad de Chile, Estudio de Caso N° 86, Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 63 p.
- Valdebenito Rebolledo, G. A., 2010, Impacto del Decreto Ley 701 de Fomento Forestal en Chile, Política de Fomento Forestal, Concepción, INFOR, 18 p.
- Václavík T. et Rogan J., 2009, "Identifying Trends in Land Use/Land Cover Changes in the Context of Post-Socialist Transformation in Central Europe: A Case Study of the Greater Olomouc Region, Czech Republic", *GIScience & Remote Sensing*, vol. 46, N° 1, 54-76
- Vallejos Romero A., 2005, "Los conflictos ambientales en una sociedad mundializada. Algunos antecedentes y consideraciones para Chile", *Revista LIDER*, vol. 13, 193 - 214
- Van de Hoef L., 2003, "Radiata pine for farm forestry", State of Victoria, Department of Primary Industries, 2 p.
- Van der Werf G. R., Morton D. C. *et al.*, 2009, "CO² emissions from forest losses", *Nature Geoscience*, vol. 2, 737-738
- Van Notten P.W.F., Rotmans J., 2003, "An updated scenario typology", *Futures*, vol. 35, 423-443
- Veblen T.T et Schlegel F.M., 1982, "Reseña ecológica de los bosques del sur de Chile", *Revista Bosque*, vol. 4, N° 2, 73-115
- Veldkamp A. et Lambin E. F., 2001, "Predicting land-use change", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 85, N° 1-3, 1 - 6
- Verburg P., Soepboer W. *et al.*, 2002, "Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model", *Environmental Management*, vol. 30, N° 3, 391-405
- Verburg P.H., Schot P.P. *et al.*, 2004, "Land use change modelling: current practice and research priorities Peter", *Geo Journal*, vol. 61, 309-324
- Verburg P.H., Kok K. *et al.*, 2006, "Modeling Land-Use and Land-Cover Change", in Lambin E.F. et Giest H. (eds.), *Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes and Global Impacts*, New York/Berlin, Springer, 117-135
- Verburg P.H., Van de Steeg *et al.*, 2009, "From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization", *Journal of Environmental Management*, vol. 90, 1326-1335
- Vergara J.T., 2004, "Alternativas silvícolas para aumentar la rentabilidad de las plantaciones forestales", *Revista Bosque*, vol. 25, N° 2, 101 - 113.

Vergara P.M. et Armesto J.J., 2009, "Responses of Chilean forest birds to anthropogenic habitat fragmentation across spatial scales", *Landscape Ecology*, vol. 24, 25-38

Vitousek P.M., Mooney H. A. *et al.*, 1997, "Human Domination of Earth's Ecosystems", *Science*, vol. 277, 494-499

Vivien F-D., 2003, "Jalons pour une histoire de la notion de développement durable", *Monde en développement*, N° 121, 21 p.

Vivien F-D., 2005, *Le développement soutenable*, Paris, La découverte, 122 p.

Voces del Bosque, 2007, Leña certificada en Chile: hacia la consolidación, Voces del Bosque, N° 50, 2 p.

Voiron-Canicio C., 2006, "L'espace dans la modélisation des interactions nature-société", *Colloque Interactions Nature-Sociétés : Analyse et modèles*, 3-6 mai 2006, La Baule

W

Wainwright J. et Mulligan M., 2004, *Environmental modelling: finding simplicity in complexity*, Environmental Monitoring and Modelling Research Group, London – UK, John Wiley & Sons, 408 p.

Warner B. et Misra M., 1996, "Understanding Neural Networks as Statistical Tools", *The American Statistician*, vol. 50, N° 4, 284-293

Weber J., 1995, *Gestion des ressources renouvelables: fondements théoriques*, CIRAD, 13 p.

White T.L., Adams W.T. *et al.*, 2007, *Forest genetics*, CAB International, Cambridge, USA, 682 p

Williamson J., 2003, "Un train de réformes Consensus de Washington : un bref historique et quelques suggestions", *Finances & Développement*, 10-13

Winjum J.K. et Schroeder P.E., 1997, "Forest plantations of the world: their extent, ecological attributes, and carbon storage", *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 84, 153-167

Wolfram S., 1983, "Statistical mechanics of cellular automata", *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, N° 3, 601-644

Wolfslehner B., Vacik H. *et al.*, 2005, "Application of the analytic network process in multi-criteria analysis of sustainable forest management", *Forest Ecology and Management*, vol. 207, 157-170

World Rainforest Movement, 2003, "Las plantaciones no son bosques", Uruguay, World Rainforest Movement, 236 p.

World Rainforest Movement, 2008, Statement by forestry professionals and students. Plantations Campaign. <http://www.wrm.org.uy/index.html>

World Wild Fund, 2005, "Resumen visión para la biodiversidad de la Ecoregión de los bosques templados lluviosos de Chile y Argentina, Programa Ecoregión Valdiviana", 15 p.

Wilken P., 1998, La sustentabilidad forestal en Chile. Aporte a una política integral de los bosques nativos y plantaciones exóticas, CODEFF, 62 p.

Wu F., 2002, "Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions", *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 16, N° 8, 795–818

Wulder M.A., White J.C. *et al.*, 2008, "Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring", *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, 955–969

Wyman M.S. et Stein T.V., 2010, "Modelling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize", *Applied Geography*, vol. 30, 329-342

Z

Zhan X., Sohlberg R.A. *et al.*, 2002, "Detection of land cover changes using MODIS 250 m data", *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, 336–350

Zuindeau B., 2000, *Développement durable et territoire*, Presses Universitaire du Septentrion, Villeneuve d'Ascq (Nord), 296 p.

ANNEXES

| | |
|---|-----|
| Annexe 1 – Procédure de modification à la définition de forêt (Ghana) ----- | 328 |
| Annexe 2 – L’eucalyptus à travers le monde ----- | 329 |
| Annexe 3 - Régimes de gestion forestière pour les plantations exotiques et les espèces natives en Amérique----- | 330 |
| Annexe 4 - Fiche de terrain----- | 331 |
| Annexe 5 – Matrice de confusion (1986)----- | 332 |
| Annexe 6 - Matrice de confusion (1999) ----- | 333 |
| Annexe 7 - Matrice de confusion (2008) ----- | 334 |
| Annexe 8 – Standardisation et pondération de l’objectif forêt native et autre----- | 335 |
| Annexe 9 – Standardisation et pondération – Scénario prédictif – <i>business as usual</i> - ----- | 336 |
| Annexe 10 – Standardisation et pondération – scénario prospectif exploratoire ----- | 337 |
| Annexe 11 – Standardisation et pondération – scénario prospectif normatif «éco-centré»----- | 338 |
| Annexe 12 – Standardisation et pondération - scénario prospectif normatif « intensif » ----- | 339 |

Annexe 1 – Procédure de modification à la définition de forêt (Ghana)

Tel: (021) 664697 / 664698,
662465 / 667524

Fax: 233 (021) 662690

Email: support@epaghana.org



Environmental Protection Agency

P. O. Box M 326
Ministries Post Office
Accra, Ghana

Our Ref. GD 65/229/01

6 November 2007

The Executive Secretary
UNFCCC Secretariat,
P. O. Box 260 124,
53153 Bonn
Germany
Fax + 49 228 815 1999

Dear Sir,

GHANA'S NATIONAL DEFINITION OF FOREST

Recognizing the potential contribution of afforestation/reforestation Clean Development Mechanism project activities to the Ghana's sustainable development, the Government of Ghana; under the auspices of the Forestry Commission of the Ministry of Lands, Forestry and Mines; called for a stakeholders' meeting to re-assess and re-define the national definition of forest which had been submitted to the UNFCCC Secretariat.

The meeting sought to assess the **applicability** of the submitted national forest definition in the light of the **varied agro-ecological zones** in the country and potential the submitted definition has to reduce CDM eligible land areas, as well as, and the potential for communities to benefit from and the private sector entities and government to be engaged in CDM A/R projects across the country.

At this stakeholders' meeting a **new national definition** of forest was agreed upon, which as the UNFCCC Focal Point and Designated National Authority for CDM, I am pleased to submit to the UNFCCC Secretariat to **replace** the forest definition previously communicated to the Secretariat.

The current Ghana definition of forest is:

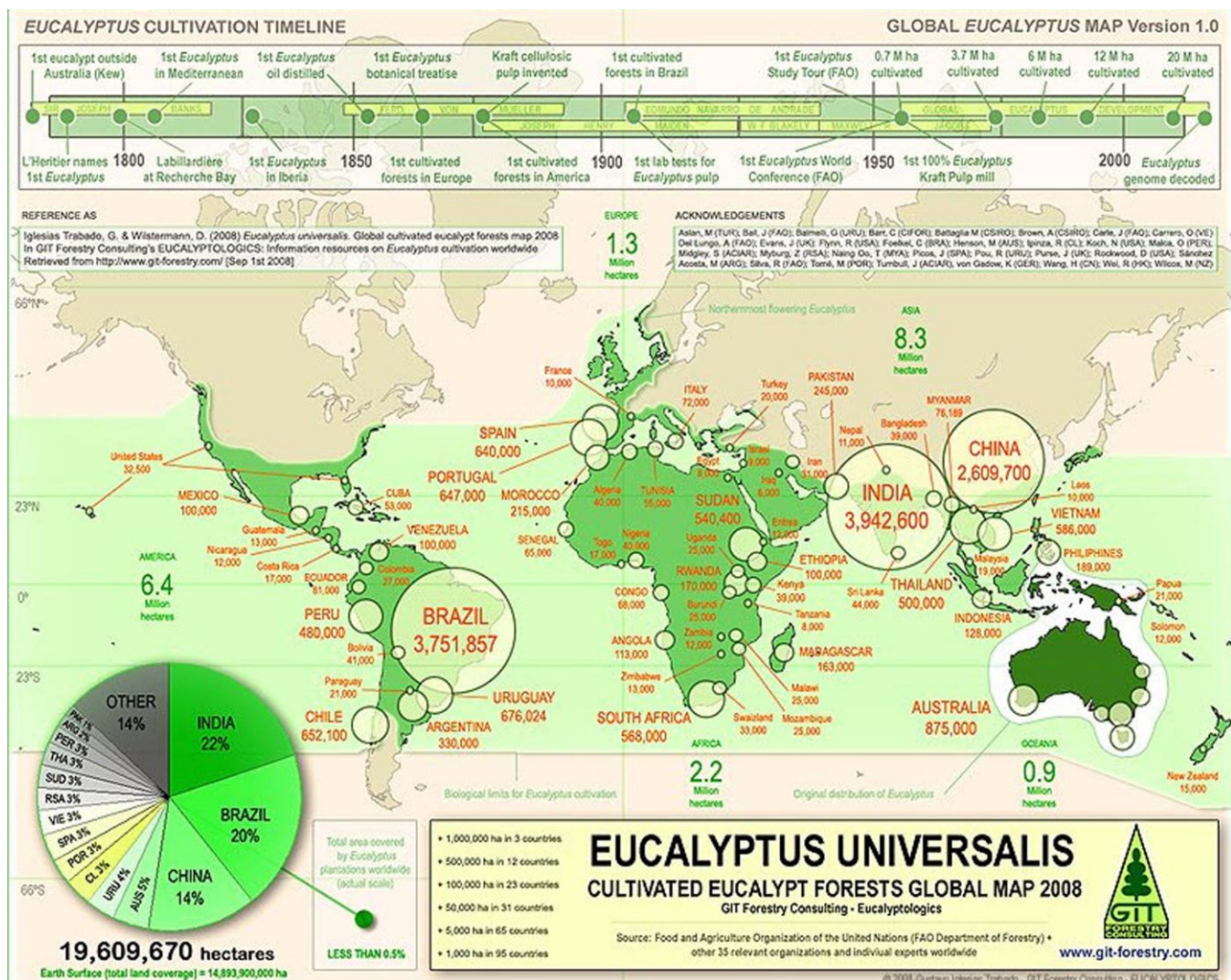
"A piece of land with a minimum area of 0.1 hectares, with a minimum tree crown cover of 15% or with existing tree species having the potential of attaining more than 15% crown cover, with trees which have the potential or have reached a minimum height of 2.0 meters at maturity in situ".

I will appreciate if all records of the Secretariat could be amended to reflect the current national definition for forest as stated above.

Please accept the assurance of my highest consideration.

William Kojo Agyemang-Bonsu
UNFCCC Focal Point/CDM-DNA

Annexe 2 – L'eucalyptus à travers le monde



Source : GIT Forestry Consulting - <http://git-forestry.com/nosotros/nosotros.htm>

Annexe 3 - Régimes de gestion forestière pour les plantations exotiques et les espèces natives en Amérique

| Country | Species | Rotation (year) | Thinnings and Harvests (years) | Growth (m ³ /ha/yr) | Total Yield per Rotation (m ³) |
|---------------------|----------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Argentina | Pinus taeda - Misiones | 20 | 5, 8, 12, 20 | 30 | 600 |
| | Pinus taeda - Corrientes | 20 | 5, 8, 12, 20 | 35 | 700 |
| | Eucalyptus grandis | 14 | 5, 14 | 40 | 560 |
| | Aracauria angustifolia | 28 | 10,15,21,28 | 15 | 420 |
| | Native forest unmanaged | 80 | 20,40,60,80 | 1 | 20 |
| | Native forest best management | 80 | 20,40,60,80 | 2 | 60 |
| Brazil | Pinus taeda | 18 | 18 | 35 | 540 |
| | Eucalyptus grandis | 15 | 7,11,15 | 40 | 600 |
| | Eucalyptus dunnii | 7 | 7 | 43 | 301 |
| | Aracauria angustifolia | 25 | 10, 16, 21, 25 | 43 | 450 |
| | Ilex paragarariensis | 10 | leaves, all | Na | na |
| Chile | Pinus radiata | 22 | 7,11,15,22 | 22 | 484 |
| | Nothofagus dombeyi | 30 | 10, 15, 22, 30 | 18 | 540 |
| | Nothofagus nervosa | 35 | 12, 18, 26, 35 | 16 | 560 |
| Uruguay | Pinus taeda | 22 | 11,15,22 | 20 | 440 |
| | Eucalypts grandis | 16 | 6,11,16 | 30 | 480 |
| | Eucalypts globulus | 10 | 10 | 18 | 180 |
| Subtropical Optimal | Native forest optimal management | 80 | 20,38,50,65,80 | 4 | 360 |
| U.S.A. | Pinus taeda planted | 30 | 17,24,30 | 12 | 360 |
| | Pinus taeda natural | 40 | 25,33,40 | 7.4 | 300 |
| | Pinus palustris | 80 | 38,50,65,80 | 4 | 320 |
| | Hardwood sp. | 80 | 38,50,65,80 | 4 | 320 |

Source : Cabbage *et al.*, 2007

Annexe 5 – Matrice de confusion (1986)

| CLASSIFICATION | TERRAIN | | | | | | | | | | | | | TOTAL | Précision utilisateur (%) | Erreur de commission (%) |
|---------------------------|--------------|------------|--------------|---------------|--------------|------|-----------------|----------|--------|------------|--------------|-----------|------|-------|---------------------------|--------------------------|
| | Euca. adulte | Pin adulte | ForNat. ubac | ForNat. adret | ForNat. plat | R&M | Prairie chloro. | Pâturage | Sol nu | Coupe rase | Prairie rase | Alerzales | Eau | | | |
| Euca. adulte | 159 | | | 539 | | 129 | | | | | | | | 827 | 19.2 | 80.8 |
| Pin adulte | 332 | 192 | | | 6 | 1 | | | | | | | | 531 | 36.2 | 63.8 |
| ForNat. ubac | 394 | 180 | 5707 | 138 | 20 | 20 | 1 | | | | | | 5 | 6465 | 88.3 | 11.7 |
| ForNat. adret | 28 | | 74 | 6428 | | 53 | | 4 | | | | 37 | 7 | 6631 | 96.9 | 3.1 |
| ForNat. plat | | 8 | 50 | | 138 | 4 | | | | | | | | 200 | 69.0 | 31.0 |
| R&M | 231 | 90 | 31 | 105 | 13 | 1058 | 4 | | | | | | | 1532 | 69.1 | 30.9 |
| Prairie chlorophyllienne | | | | | | | 231 | 6 | 2 | | | | | 239 | 96.7 | 3.3 |
| Pâturage | | | | | | | 90 | 190 | 4 | | 11 | | | 295 | 64.4 | 35.6 |
| Sol nu | | | | | | | 8 | 11 | 156 | 20 | 19 | | | 214 | 72.9 | 27.1 |
| Coupe rase | | | | | | | | | 5 | 36 | 12 | | | 53 | 67.9 | 32.1 |
| Prairie rase | | | | | | | | 9 | 22 | 62 | 83 | | | 176 | 47.2 | 52.8 |
| Alerzales | | | 14 | 21 | | | | | | | 3 | 511 | 2 | 551 | 92.7 | 7.3 |
| Eau | | | | | | | | | | | | | 329 | 329 | 100.0 | 0.0 |
| TOTAL | 1144 | 470 | 5876 | 7231 | 177 | 1265 | 334 | 220 | 189 | 118 | 128 | 548 | 343 | 18043 | | |
| Précision producteur (%) | 13.9 | 40.9 | 97.1 | 88.9 | 78.0 | 83.6 | 69.2 | 86.4 | 82.5 | 30.5 | 64.8 | 93.2 | 95.9 | | | |
| Erreur d'omission (%) | 86.1 | 59.1 | 2.9 | 11.1 | 22.0 | 16.4 | 30.8 | 13.6 | 17.5 | 69.5 | 35.2 | 6.8 | 4.1 | | | |
| Overall Accuracy: 84.343% | | | | | | | | | | | | | | | | |

Matrice de confusion – 1986 TM – case vide = 0

Précision statistique – précision de l'utilisateur

Précision géographique – précision du producteur

Erreur de commission (producer's accuracy) - probabilité pour un pixel de la classe Ck sur le terrain la probabilité d'être bien classé en Ck sur la carte - EC = $(X_{kk}/X_{.k}) * 100$

Erreur d'omission (user's accuracy) - probabilité pour un pixel classé en Ck sur la carte d'appartenir à Ck sur le terrain - EO = $(X_{kk}/X_k) * 100$

Annexe 6 - Matrice de confusion (1999)

| CLASSIFICATION | TERRAIN | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL | Précision utilisateur (%) | Erreur de commission (%) |
|---------------------------|--------------|------------|---------------|----------------|---------------|------|-----------------|----------|--------|------------|--------------|---------|-----------|-------------|------|-------|---------------------------|--------------------------|
| | Euca. adulte | Pin adulte | For Nat. ubac | For Nat. adret | For Nat. plat | R&M | Prairie chloro. | Pâturage | Sol nu | Coupe rase | Prairie rase | Alerzal | Pin jeune | Euca. jeune | Eau | | | |
| Euca. adulte | 521 | 30 | | 24 | | 215 | | | | | | | | | | 790 | 65.9 | 34.1 |
| Pin adulte | 28 | 635 | 347 | 74 | 17 | 122 | | | | | | | 3 | | | 1226 | 51.8 | 48.2 |
| ForNat. ubac | | 66 | 5392 | 116 | 30 | 15 | | | | | | | | | 5 | 5624 | 95.9 | 4.1 |
| ForNat. adret | | 3 | 55 | 6970 | | 110 | | | | | 3 | | | | 5 | 7146 | 97.5 | 2.5 |
| ForNat. plat | | 10 | 72 | | 110 | 24 | | | 2 | | | | | 4 | | 222 | 49.5 | 50.5 |
| R&M | 6 | 8 | 10 | 45 | 20 | 2031 | 18 | 2 | 1 | | | | | | | 2141 | 94.9 | 5.1 |
| Prairie chlorophyllienne | | | | | | | 281 | 14 | | | | | | | | 295 | 95.3 | 4.7 |
| Pâturage | | | | | | | | 216 | | | 12 | | | | | 228 | 94.7 | 5.3 |
| Sol nu | | | | | | | | 10 | 667 | 152 | | | | | | 829 | 80.5 | 19.5 |
| Coupe rase | | | | | | | | | 62 | 946 | | | | | 3 | 1011 | 93.6 | 6.4 |
| Prairie rase | | | | | | | | | | | 41 | | | | | 41 | 100.0 | 0.0 |
| Alerzales | | | | 2 | | | | | 46 | 4 | | 650 | | | | 702 | 92.6 | 7.4 |
| Pin jeune | | 3 | | | | | | | | | | | 88 | | | 91 | 96.7 | 3.3 |
| Eucalyptus jeune | | | | | | | | | 3 | | | | | 164 | | 167 | 98.2 | 1.8 |
| Eau | | | | | | | | | | | | | | | 50 | 50 | 100.0 | 0.0 |
| TOTAL | 555 | 755 | 5876 | 7231 | 177 | 2517 | 309 | 232 | 781 | 1102 | 53 | 653 | 91 | 168 | 63 | 20563 | | |
| Précision producteur (%) | 93.9 | 84.1 | 91.8 | 96.4 | 62.1 | 80.7 | 90.9 | 93.1 | 85.4 | 85.8 | 77.4 | 99.5 | 96.7 | 97.6 | 79.4 | | | |
| Erreur d'omission (%) | 6.1 | 15.9 | 8.2 | 3.6 | 37.9 | 19.3 | 9.1 | 6.9 | 14.6 | 14.2 | 22.6 | 0.5 | 3.3 | 2.4 | 20.6 | | | |
| Overall Accuracy: 91.242% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Matrice de confusion – 1999 TM

Annexe 7 - Matrice de confusion (2008)

| CLASSIFICATION | TERRAIN | | | | | | | | | | | | | | | TOTAL | Précision utilisateur (%) | Erreur de commission (%) |
|---------------------------|--------------|------------|---------------|----------------|---------------|------|-----------------|----------|--------|------------|--------------|---------|-----------|-------------|------|-------|---------------------------|--------------------------|
| | Euca. adulte | Pin adulte | For Nat. ubac | For Nat. adret | For Nat. plat | R&M | Prairie chloro. | Pâturage | Sol nu | Coupe rase | Prairie rase | Alerzal | Pin jeune | Euca. jeune | Eau | | | |
| Euca. adulte | 306 | 79 | | 8 | | 19 | | | | | | | | | 1 | 413 | 74.09 | 25.91 |
| Pin adulte | 48 | 689 | 27 | 8 | | 135 | | | | | | | | | | 907 | 75.96 | 24.04 |
| ForNat. ubac | | 6 | 644 | 16 | 48 | 1 | | | | | | 11 | | | | 726 | 88.71 | 11.29 |
| ForNat. adret | 2 | 1 | 4 | 1846 | | 95 | | 3 | | | | 1 | | | | 1952 | 94.57 | 5.43 |
| ForNat. plat | | 2 | 52 | | 73 | 37 | | | | | | | 3 | | | 167 | 43.71 | 56.29 |
| R&M | 2 | 4 | 6 | 28 | 57 | 1464 | 4 | 4 | | | | | 22 | 2 | | 1593 | 91.90 | 8.10 |
| Prairie chlorophyllienne | | | | | | 5 | 164 | 12 | | | 4 | | | | | 185 | 88.65 | 11.35 |
| Pâturage | | | | | | | 30 | 34 | | 23 | | | | | | 87 | 39.08 | 60.92 |
| Sol nu | | | | | | | | | 82 | | | | | | 33 | 115 | 71.30 | 28.70 |
| Coupe rase | | | | 4 | | 10 | 4 | 16 | | 1290 | | 2 | | 9 | | 1335 | 96.63 | 3.37 |
| Prairie rase | | | | | | 2 | | | | | 66 | | | | | 68 | 97.06 | 2.94 |
| Alerzales | | | | | | | | | | 8 | | 417 | | | 1 | 426 | 97.89 | 2.11 |
| Pin jeune | 2 | 9 | | | | 44 | | | | | | | 275 | | | 330 | 83.33 | 16.67 |
| Eucalyptus jeune | | | | | | 7 | | | | 144 | | | | 229 | | 380 | 60.26 | 39.74 |
| Eau | | | | | | | | | 32 | | | | | | 388 | 420 | 92.38 | 7.62 |
| TOTAL | 360 | 790 | 733 | 1910 | 178 | 1819 | 202 | 69 | 114 | 1465 | 70 | 420 | 300 | 240 | 434 | 9104 | | |
| Précision producteur (%) | 85.0 | 87.2 | 87.9 | 96.6 | 41.0 | 80.5 | 81.2 | 49.3 | 71.9 | 88.1 | 94.3 | 99.3 | 91.7 | 95.4 | 89.4 | | | |
| Erreur d'omission (%) | 15.0 | 12.8 | 12.1 | 3.4 | 59.0 | 19.5 | 18.8 | 50.7 | 28.1 | 11.9 | 5.7 | 0.7 | 8.3 | 4.6 | 10.6 | | | |
| Overall Accuracy: 87.511% | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Matrice de confusion – 2008 TM

Annexe 8 – Standardisation et pondération de l'objectif FORET NATIVE et AUTRE

| | Classes | FORET NATIVE |
|-------------------------|--------------|--------------|
| Degré d'aptitude | Plantation | 5 |
| | Forêt Native | 255 |
| | Autre | 100 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les catégories d'occupation du sol

| | OS | DEN | DAC | PTE | ALT |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| OS | 1 | | | | |
| DEN | 3 | 1 | | | |
| DAC | 1/3 | 1/3 | 1 | | |
| PTE | 1/5 | 1/6 | 1/4 | 1 | |
| ALT | 1/3 | 1/6 | 1/3 | 3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.2752 | 0.4583 | 0.1488 | 0.0447 | 0.0730 |
| Ratio de cohérence : 0.07 (acceptable) | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif FORET NATIVE

| | Classes | AUTRE |
|-------------------------|--------------|-------|
| Degré d'aptitude | Plantation | 128 |
| | Forêt Native | 50 |
| | Autre | 255 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les catégories d'occupation du sol

| | OS | DEN | DAC | PTE | ALT |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| OS | 1 | | | | |
| DEN | 3 | 1 | | | |
| DAC | 5 | 3 | 1 | | |
| PTE | 4 | 2 | 1/3 | 1 | |
| ALT | 4 | 2 | 1/3 | 1/4 | 1 |
| Vecteur propre | 0.0516 | 0.1147 | 0.4208 | 0.1469 | 0.2660 |
| Ratio de cohérence : 0.08 (acceptable) | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif AUTRE

Annexe 9 – Standardisation et pondération – Scénario prédictif –*business as usual*–

Objectif PLANTATION

| | Classes | PLANTATION |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 255 |
| | Grands propriétaires | 255 |
| | Moyens propriétaires | 200 |
| | Petits propriétaires | 20 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

| | OS | PROTER | CC | PMT | DEN | DAC | PTE | ALT |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OS | 1 | | | | | | | |
| PROTER | 9 | 1 | | | | | | |
| CC | 2 | 1/6 | 1 | | | | | |
| PMT | 4 | 1/3 | 7 | 1 | | | | |
| DEN | 3 | 1/3 | 4 | 1 | 1 | | | |
| DAC | 1/3 | 1/4 | 3 | 1 | 1/3 | 1 | | |
| PTE | 3 | 1/3 | 3 | 1/2 | 1/3 | 2 | 1 | |
| ALT | 1/4 | 1/7 | 1/2 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.0684 | 0.3431 | 0.0496 | 0.1636 | 0.1679 | 0.0775 | 0.1007 | 0.0294 |
| Ratio de cohérence : 0.10 (acceptable) | | | | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Poids d'ordre | 0.4 | 0.25 | 0.15 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th |

Tableau : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif PLANTATION) –
Prise de risque faible, peu de compensation (2)

Objectif FORET NATIVE ET AUTRE

Même pondération que pour la calibration

Annexe 10 – Standardisation et pondération – scénario prospectif exploratoire

Objectif PLANTATION

| | Classes | PLANTATION |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 255 |
| | Grands propriétaires | 255 |
| | Moyens propriétaires | 255 |
| | Petits propriétaires | 255 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

| | OS | PROTER | CC | PMT | DEN | DAC | PTE | ALT |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OS | 1 | | | | | | | |
| PROTER | 9 | 1 | | | | | | |
| CC | 2 | 1/6 | 1 | | | | | |
| PMT | 6 | 1/2 | 2 | 1 | | | | |
| DEN | 5 | 1/3 | 4 | 1 | 1 | | | |
| DAC | 1/2 | 1/4 | 3 | 1 | 1/3 | 1 | | |
| PTE | 3 | 1/3 | 2 | 1/2 | 1/3 | 2 | 1 | |
| ALT | 1/4 | 1/7 | 1/2 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 1/3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.0575 | 0.3303 | 0.0557 | 0.1562 | 0.1863 | 0.0821 | 0.1015 | 0.0304 |
| Ratio de cohérence : 0.08 (acceptable) | | | | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Poids d'ordre | 0.4 | 0.25 | 0.15 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th |

Tableau : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif PLANTATION) –
Prise de risque faible, peu de compensation (2)

Objectif FORET NATIVE ET AUTRE

| | Classes | FORET NATIVE |
|-------------------------|--------------|--------------|
| Degré d'aptitude | Plantation | 5 |
| | Forêt Native | 255 |
| | Autre | 255 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les catégories d'occupation du sol

| | Classes | AUTRE |
|-------------------------|--------------|-------|
| Degré d'aptitude | Plantation | 128 |
| | Forêt Native | 50 |
| | Autre | 255 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les catégories d'occupation du sol

Annexe 11 – Standardisation et pondération – scénario prospectif normatif «éco-centré»

Objectif PLANTATION

| | Classes | PLANTATION |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 0 |
| | Grands propriétaires | 75 |
| | Moyens propriétaires | 20 |
| | Petits propriétaires | 20 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

| | OS | PROTER | CC | PMT | DEN | DAC | PTE | ALT |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OS | 1 | | | | | | | |
| PROTER | 7 | 1 | | | | | | |
| CC | 1/3 | 1/7 | 1 | | | | | |
| PMT | 1/3 | 1/7 | 2 | 1 | | | | |
| DEN | 1/3 | 1/6 | 4 | 1/2 | 1 | | | |
| DAC | 1/2 | 1/6 | 3 | 2 | 2 | 1 | | |
| PTE | 1/3 | 1/6 | 2 | 1/3 | 2 | 1/2 | 1 | |
| ALT | 1/4 | 1/7 | 1/3 | 1/4 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.1504 | 0.4577 | 0.0430 | 0.0896 | 0.0627 | 0.0999 | 0.0656 | 0.0312 |
| Ratio de cohérence : 0.08 (acceptable) | | | | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION

| | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|
| Poids d'ordre | 0.4 | 0.25 | 0.15 | 0.1 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 0 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th |

Tableau : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif plantation) –
Prise de risque faible, peu de compensation (2)

Objectif FORET NATIVE ET AUTRE

| | Classes | FORET NATIVE | AUTRE |
|-------------------------|-------------------------|--------------|-------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 25 | 255 |
| | Grands propriétaires | 25 | 128 |
| | Moyens propriétaires | 255 | 25 |
| | Petits propriétaires | 255 | 25 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

| | | | | | | |
|----------------------|-----|-------|------|-------|-----|-----|
| Poids d'ordre | 0 | 0.025 | 0.05 | 0.125 | 0.3 | 0.5 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th |

Tableau : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif FORET NATIVE) –
Prise de risque élevé, peu de compensation (4)

Annexe 12 – Standardisation et pondération - scénario prospectif normatif « intensif »

Objectif PLANTATION

| | Classes | PLANTATION |
|-------------------------|-------------------------|------------|
| Degré d'aptitude | Entreprises forestières | 255 |
| | Grands propriétaires | 255 |
| | Moyens propriétaires | 255 |
| | Petits propriétaires | 255 |

Tableau – Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés

| | OS | PROTER | CC | PMT | DEN | DAC | PTE | ALT | RUTA COSTERA |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| OS | 1 | | | | | | | | |
| PROTER | 9 | 1 | | | | | | | |
| CC | 2 | 1/3 | 1 | | | | | | |
| PMT | 6 | 1/2 | 2 | 1 | | | | | |
| DEN | 6 | 1/3 | 3 | 1/2 | 1 | | | | |
| DAC | 3 | 1/4 | 2 | 1 | 1/2 | 1 | | | |
| PTE | 1/2 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/3 | 1 | | |
| ALT | 1/4 | 1/7 | 1/2 | 1/4 | 1/4 | 1/3 | 1/3 | 1 | |
| RUTA COSTERA | 5 | 1/2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| Vecteur propre | 0.0444 | 0.2677 | 0.0632 | 0.1351 | 0.1287 | 0.0970 | 0.0494 | 0.0292 | 0.1853 |
| Ratio de cohérence : 0.08 (acceptable) | | | | | | | | | |

Tableau – Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION

| | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Poids d'ordre | 0 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.15 | 0.25 | 0.35 |
| Rang | 1st | 2nd | 3rd | 4th | 5th | 6th | 7th | 8th | 9th |

Tableau : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif PLANTATION) –
Prise de risque élevé, peu de compensation (4)

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|-----|
| Figure 1 : Etat de l'art synthétique sur la question forestière dans le centre-sud chilien. ----- | 13 |
| Figure 2 : Part du couvert forestier par zone sur le total mondial en 2010 (%) – Source (FAO, 2010) | 23 |
| Figure 3 : Changement net de superficie forestière par pays, 2005-2010 (ha/an) – (FAO, 2010)----- | 23 |
| Figure 4 : Ecorégion Valdivienne – Type de végétation historique. Source : WWF, 2001----- | 29 |
| Figure 5 : Ecorégion Valdivienne – Sites prioritaires. Source : WWF, 2001 ----- | 30 |
| Figure 6 : 25 hotspots de biodiversité – (Myers, 2000)----- | 31 |
| Figure 7 : Volume total (m ³ ssc) de bois natif par Région. CONAF-CONAMA-BIRF, 1999 ----- | 33 |
| Figure 8 : Processus de fragmentation (Grez <i>et al.</i> , 1998) ----- | 34 |
| Figure 9 : Substitution directe ----- | 36 |
| Figure 10 : Substitution indirecte ----- | 36 |
| Figure 11 : Carte des zones érodées à l'échelle régionale ----- | 38 |
| Figure 12 : Distribution naturelle du <i>Pinus radiata</i> (Griffin and Critchfield 1972)----- | 40 |
| Figure 13 : Couvert forestier en Australie – Source : http://www.daff.gov.au/forestry ----- | 41 |
| Figure 14 : Evolution des plantations exotiques (1915-2007) et du cadre politico-législatif----- | 44 |
| Figure 15 : Montant des exportations forestières (M\$) de en direction des Etats-Unis, de la Chine et du Japon (1967-2007)----- | 46 |
| Figure 16 : Exportations forestières entre 2004 et 2007 (valeur en millions de \$) – (INFOR, 2008) -- | 47 |
| Figure 17 : Demande mondiale de papiers et cartons 1970-2015. Source : Lachenal, 2003 ----- | 49 |
| Figure 18 : Balance commerciale chilienne entre 2008 et 2011. Banco Central de Chile, 2010 ----- | 49 |
| Figure 19 : Dessin du kultrún ----- | 51 |
| Figure 20 : Vision d'ensemble des principaux acteurs du secteur forestier----- | 59 |
| Figure 21 : Triptyque du développement soutenable----- | 75 |
| Figure 22 : Comparaison entre une coupe rase (A) et un patchcut (B). La coupe rase dépend plus de la forme que de la superficie. Source : Kimmins, 1997 ----- | 82 |
| Figure 23 : Logo du Forest Stewardship Council. Source: FSC, 2011 ----- | 85 |
| Figure 24 : Logo CERTFOR Chile. Source : CERTFOR Chile, 2011 ----- | 85 |
| Figure 25 : Evolution de la superficie forestière certifiée par le système de certification CERTFOR.- | 86 |
| Figure 26 : Logo ISO. Source : ISO, 2011 ----- | 86 |
| Figure 27 : Part des plantations industrielles selon le système de certification. INFOR, 2005 ----- | 87 |
| Figure 28 : Synthèse bibliographique relative aux facteurs explicatifs ----- | 94 |
| Figure 29 : Structure multi-variables pour analyser les systèmes socio-écologique. Ostrom, 2007 ---- | 95 |
| Figure 30 : Typologie synthétique des modèles ----- | 100 |
| Figure 31 : Voisinage de von Neumann et de Moore ----- | 102 |
| Figure 32 : Exemples de règles du Game of Life. Source : Durant et Róka, 1998 ----- | 103 |
| Figure 33 : Représentation d'un neurone biologique. Source: Kalogirou, 2001 ----- | 104 |
| Figure 34 : Diagramme schématique de deux réseaux neuronaux perceptron multicouche. ----- | 104 |
| Figure 35 : Représentation d'un système multi-agents. Source : Bousquet <i>et al.</i> , 2005----- | 105 |
| Figure 36 : Les Trente-six vues du Mont Fuji (富嶽三十六景) – Lake Suwa in the Shinano province - 《信州諏訪湖》 Katsushika Hokusai (1760-1849)----- | 109 |
| Figure 37 : La méthode des scenarii. Source : Godet, 1986, p.140----- | 111 |
| Figure 38 : Typologie synthétique des scenarii----- | 114 |
| Figure 39 : Représentation tridimensionnelle (a) d'un scénario exploratoire et (b) d'un scénario normatif (Julien <i>et al.</i> , 1975). Source : Houet <i>et al.</i> , 2008 ----- | 115 |
| Figure 40 : La démarche prospective vue par plusieurs auteurs ----- | 118 |
| Figure 41 : Carte de localisation à l'échelle régionale ----- | 122 |

| | |
|---|-----|
| Figure 42 : Part (%) de la superficie forestière plantée par région et par an sur le total annuel national entre 1975 et 2007 - Source: INFOR, CONAF, Empresas (données actualisées avec INFOR, 2008. La 14ème Région est fusionnée avec la 10ème Région) ----- | 123 |
| Figure 43 : Unités morpho-structurales dans le centre-sud chilien ----- | 124 |
| Figure 44 : Profil topographique du centre-sud chilien (S40.7°)----- | 124 |
| Figure 45 : Plantations industrielles (jeunes et adultes) de la 8ème à la 10ème Région. CONAF (8ème Région : 1998 ; 9ème : 2007 ; 14ème : 2006 ; 10ème : 1998 et 2006) ----- | 126 |
| Figure 46 : Communes de la province d’Osorno – 10ème Région de Los Lagos sur fond de composition colorée multirate Landsat TM (CC-86b3_86b4_01b4)----- | 128 |
| Figure 47 : Limites des glaciations durant le Pléistocène. Source : Villagrán, 1991----- | 129 |
| Figure 48 : Profil topographique (Fresia) 41°10 de latitude sud. [2- Forêt dense valdivienne, 4- forêts de roble sempervirente, 5- forêts de conifères]. Source : Quintanilla, 1974----- | 130 |
| Figure 49 : Carte d’occupation du sol en 2006 – couplée MNT. Source : CONAF, 2006----- | 132 |
| Figure 50 : Localisation des communautés indigènes (zone centre et sud). IGM, 2008 ; Sáez, s.d. -- | 135 |
| Figure 51 : Configuration actuelle de la propriété dans les terres huilliches. Toro Balbotín, 2007 --- | 137 |
| Figure 52 : Structure foncière sur la précordillère côtière de San Juan de la Costa en 1999 ----- | 138 |
| Figure 53 : Grille d’interprétation sous Google Earth (A gauche : 8ème Région ; à droite : 10ème Région)----- | 139 |
| Figure 54 : Localisation des tuiles MODIS ----- | 140 |
| Figure 55 : Taux de couverture. Source : CONAF, 2006 ----- | 145 |
| Figure 56 : Principe de la croix du bûcheron. Source : CRPF Midi-Pyrénées, 1992----- | 145 |
| Figure 57 : Carte de localisation des relevés GPS (sud de la 14ème et 10ème Région)----- | 146 |
| Figure 58 : Analyse multi-scalaire – du régional au local----- | 149 |
| Figure 59 : Part des plantations (%) sur la superficie totale des exploitations par commune en 2007. Elaborée à partir des sources : INE (2007) ; INFOR (2008) ----- | 159 |
| Figure 60 : Profil NDVI issu de la classification non supervisée KMEANS. Paegelow <i>et al.</i> , 2012 | 161 |
| Figure 61 : Classification KMEANS sur la série de 28 images NDVI dans la 14ème et 10ème Région. Source : Paegelow <i>et al.</i> , 2012 ----- | 161 |
| Figure 62 : Forêts stables et coupes forestières dans la 14ème et 10ème Région.----- | 162 |
| Figure 63 : Masque géométrique (canal MIR : 08r-99v-86b) et localisation des figures 62 et 63 ---- | 164 |
| Figure 64 : Composition colorée multi-dates. Secteur de Puacho (ruta U-40).----- | 165 |
| Figure 65 : Suivi des rotations sylvicoles. Les parcelles d’eucalyptus (en cyan), de pin (en vert)---- | 166 |
| Figure 66 : Typologie de la configuration spatiale des forêts-non forêts et leur interprétation en terme de processus de déforestation. Mertens et Lambin, 1997, in : Geist et Lambin, 2001, p. 66---- | 167 |
| Figure 67 : Composition colorée multi-date (canal MIR 5 : R-86/V-88/B-99) ----- | 168 |
| Figure 68 : Composition colorée multi-date (canal MIR 5 : R-99/V-01/B-08) ----- | 169 |
| Figure 69 : Occupation du sol en 1986, 1999 et 2008 dans la commune de San Juan de la Costa ---- | 174 |
| Figure 70 : Comparaison plantations adultes----- | 176 |
| Figure 71 : Comparaison plantations jeunes et adultes----- | 176 |
| Figure 72 : Comparaison de la forêt native----- | 177 |
| Figure 73 : Comparaison de « autres »----- | 177 |
| Figure 74 : Comparaison et validation qualitative – Classification 2008 et Google Earth----- | 180 |
| Figure 75 : Superficie des types d’occupation du sol en 1986, 1999 et 2008 ----- | 182 |
| Figure 76 : Trajectoires d’évolution entre 1986-1999 (en haut) et 1999-2008 (en bas) (en %)----- | 183 |
| Figure 77 : Substitution indirecte : forêt native en 1986 – autre en 1999 et plantation en 2008----- | 184 |
| Figure 78 : Distribution des secteurs d’exploitation et volume de leña exploitée. Sáez, 1997----- | 186 |
| Figure 79 : Superficie de végétation naturelle incendiée dans la commune de San Juan de la Costa | 186 |
| Figure 80 : Principales transitions observées pour les périodes (1986-1999) et (1999-2008)----- | 188 |

| | |
|---|-----|
| Figure 81 : Superposition des données MODIS (2000-2008) – LANDSAT multodate (99-01-08) – classification, Google Earth et GPS 2008----- | 190 |
| Figure 82 : Aptitude des sols dans la commune de San Juan de la Costa.----- | 194 |
| Figure 83 : Représentation systémique pour la période 1986-1999 ----- | 196 |
| Figure 84 : Propriétés et rachats de la Forestal Valdivia entre 1999 et 2011 ----- | 201 |
| Figure 85 : Zoom sur les propriétés et les rachats de la Forestal Valdivia entre 1999 et 2011----- | 201 |
| Figure 86 : Représentation systémique pour la période 1999-2008 ----- | 202 |
| Figure 87 : Variables spatialement explicites----- | 206 |
| Figure 88 : Relation entre les types d'occupation du sol (1999) et cinq variables explicatives----- | 209 |
| Figure 89 : Relation entre les types d'occupation du sol (2008) et cinq variables explicatives----- | 212 |
| Figure 90 : Place des facteurs selon l'échelle géographique----- | 214 |
| Figure 91 : Modèle conceptuel. (Inter-) relations entre acteurs-ressources et acteurs-acteurs ----- | 215 |
| Figure 92 : Calibration du modèle ----- | 220 |
| Figure 93 : Démarche méthodologique de l'évaluation multicritère ----- | 223 |
| Figure 94 : Standardisation du facteur PROTER ----- | 225 |
| Figure 96 : Standardisation du facteur OS----- | 226 |
| Figure 96 : Standardisation du facteur DAC----- | 228 |
| Figure 97 : Standardisation du facteur DEN ----- | 228 |
| Figure 98 : Standardisation du facteur ALT ----- | 229 |
| Figure 99 : Standardisation du facteur PTE ----- | 229 |
| Figure 100 : Objectif PLANTATION – CLP----- | 231 |
| Figure 101 : Espace de décision illustrant les poids d'ordre----- | 231 |
| Figure 102 : Carte d'aptitude pour les plantations (en haut à gauche), la forêt native (en haut à droite) et la catégorie « autre » (en bas) ----- | 233 |
| Figure 103 : Cartes de transition potentielle - Déforestation (à gauche) et colonisation naturelle (à droite) ----- | 235 |
| Figure 104 : Cartes de transition potentielle - Plantation----- | 236 |
| Figure 105 : Organigramme du processus de calibration de CA-Markov et LCM----- | 237 |
| Figure 106 : Comparaison visuelle entre "paysage simulé" (CA-Markov et LCM)----- | 239 |
| Figure 107 : Comparaison entre le LUCC-budget réel (1999-2008) et le LUCC-budget simulé (1999 réel – 2008 CA-Markov).----- | 240 |
| Figure 108 : Observation des résidus entre l'occupation du sol observée et simulée (CA-Markov). Les cylindres à rayures représentent les concordances ----- | 241 |
| Figure 109 : ROC pour le modèle CA-Markov ----- | 242 |
| Figure 110 : Exactitudes et erreurs de la prédiction – CA-Markov ----- | 244 |
| Figure 111 : Exactitudes et erreurs de la prédiction pour les plantations, entre 2008 réel et 2008 simulée – CA-Markov ----- | 245 |
| Figure 112 : Comparaison entre le LUCC-budget réel (1999-2008) et le LUCC-budget simulé (1999 réel – 2008 LCM). ----- | 246 |
| Figure 113 : Observation des résidus entre l'occupation du sol observée et simulée – LCM----- | 247 |
| Figure 114 : ROC pour le modèle LCM ----- | 248 |
| Figure 115 : Exactitudes et erreurs de la prédiction – LCM ----- | 249 |
| Figure 116 : Exactitudes et erreurs de la prédiction pour les plantations, entre 2008 réel et 2008 simulée – LCM ----- | 250 |
| Figure 117 : Comparaison entre 1999-2008 (observé), 1999 (observé)-2008 (CA-Markov) et 1999 (observé)-2008 (LCM)----- | 251 |
| Figure 118 : Erreurs et exactitudes dans la prédiction des plantations (CA-Markov et LCM) comparées au "paysage observé"----- | 252 |

| | |
|--|-----|
| Figure 119 : Comparaison des plantations simulées par CA-Markov et LCM avec les plantations réelles en 2008. Carte globale de la commune de San Juan de la Costa et deux zooms sur la précordillère----- | 253 |
| Figure 120 : Représentation et évolution des scénarii entre 2008 et 2035. ----- | 259 |
| Figure 121 : Scénario tendanciel 2017 ----- | 264 |
| Figure 122 : Transitions simulées entre 2008 et 2017 ----- | 264 |
| Figure 123 : Scénario tendanciel 2017 – <i>Business as usual</i> ----- | 265 |
| Figure 124 : Localisation de la Mapu Lahual – Source : Cardenas, 2006----- | 269 |
| Figure 125 : Scénario prospective exploratoire 2035----- | 274 |
| Figure 126 : Transitions simulées entre 2008 et 2035 ----- | 274 |
| Figure 127 : Scénario prospective exploratoire 2035 – DS----- | 275 |
| Figure 128 : Scénario normatif 2035 – ECO-CENTRE----- | 279 |
| Figure 129 : Transitions simulées entre 2008-2035 ----- | 279 |
| Figure 130 : Scénario normatif 2035 – eco-centré----- | 279 |
| Figure 131 : Implantation hypothétique d’une usine de cellulose dans la commune du Río Negro -- | 281 |
| Figure 132 : Route Côtière (14ème et 10ème Région). Source: Ponce Arqueros, 2008----- | 283 |
| Figure 133 : Scénario normatif 2026 – INTENSIF. A droite : avec la Ruta Costera ----- | 285 |
| Figure 134 : Transitions simulées entre 2008 et 2026 (D). A droite : avec la Ruta Costera----- | 285 |
| Figure 135 : Scénario normatif 2026 – INTENSIF----- | 286 |
| Figure 136 : Degré de congruence spatialisée pour les plantations. Carte globale de la commune et zoom sur la précordillère ----- | 287 |
| Figure 137 : Degré de congruence spatialisée pour les plantations. Carte globale de la commune et zoom sur la Cordillère Côtière ----- | 288 |
| Figure 138 : Concordance des quatre scénarii pour la forêt native et les plantations. A droite : avec la route côtière----- | 290 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Etendue des forêts primaires et plantées sur le total mondial entre 1990 et 2010 (%)----- | 24 |
| Tableau 2 : Accroissement annuel de la superficie forestière en milliers d'hectares ----- | 26 |
| Tableau 3 : Superficie nationale de forêt native en 1999, par type et structure de forêt----- | 27 |
| Tableau 4 : Superficie nationale de forêt native par type forestier (ha) ----- | 27 |
| Tableau 5 : Principales entreprises forestières mondiales selon les ventes ----- | 58 |
| Tableau 6 : Etat de l'art des conséquences socio-économiques et environnementales de la sylviculture intensive ----- | 65 |
| Tableau 7 : Principes fondamentaux du consensus de Washington ----- | 72 |
| Tableau 8 : Une conception du développement fondée sur l'innovation institutionnelle ----- | 76 |
| Tableau 9 : Comparaison des programmes de certification du FSC et du PEFC (été 2002).----- | 88 |
| Tableau 10 : Global land cover data sets from Earth observation data. ----- | 92 |
| Tableau 11 : Recensement de la population (1982, 1992 et 2002). ----- | 135 |
| Tableau 12 : Caractéristiques des images satellitaires LANDSAT ----- | 141 |
| Tableau 13 : Données vectorielles utilisées ----- | 142 |
| Tableau 14 : Relevés GPS ----- | 146 |
| Tableau 15 : Part (%) des types d'occupation du sol sur le total communal----- | 154 |
| Tableau 16 : Principaux ports d'embarquement selon la charge mobilisée (en millions de tonnes). - | 155 |
| Tableau 17 : Légende dynamique multi-date ----- | 164 |
| Tableau 18 : Superficie des rotations sylvicoles en hectare. Note : d = déboisé et b = boisé ----- | 166 |
| Tableau 19 : Relevés in situ (mission 2008 et 2009)----- | 170 |
| Tableau 20 : Niveau de classification et description détaillée des types d'occupation du sol----- | 173 |
| Tableau 21 : Résultat des trois classifications ----- | 175 |
| Tableau 22 : Comparaison des données de la CONAF, INE et classifications (six classes) ----- | 178 |
| Tableau 23 : Comparaison des données de la CONAF, INE et classifications (quatre classes) ----- | 178 |
| Tableau 24 : Superficie des types d'occupation du sol en 1986, 1999 et 2008 ----- | 182 |
| Tableau 25 : Matrice de confusion entre les classifications de 1986 et 1999 (en hectares)----- | 182 |
| Tableau 26 : Matrice de confusion entre les classifications de 1999 et 2008 (en hectares)----- | 183 |
| Tableau 27 : Utilisation de la terre selon sa capacité d'utilisation. Source : Neal B. Stolpe, s.d. ---- | 193 |
| Tableau 28 : Coût du boisement entre 1995 et 2010 ----- | 199 |
| Tableau 29 : Identification et hiérarchisation des facteurs explicatifs ----- | 205 |
| Tableau 30 : Relation entre les transitions observées (1986-1999) et les variables spatiales ----- | 208 |
| Tableau 31 : Relation entre les transitions observées (1999-2008) et les variables spatiales ----- | 210 |
| Tableau 32 : Similitude et différence entre CA-Markov et LCM----- | 222 |
| Tableau 33 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types de propriétés----- | 225 |
| Tableau 34 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types d'occupations du sol ----- | 226 |
| Tableau 35 : Affectation manuelle du degré d'aptitude pour les types d'occupations du sol – Tout objectif ----- | 226 |
| Tableau 36 : Echelle de Saaty (1977) ----- | 230 |
| Tableau 37 : Matrice de comparaison – Objectif PLANTATION----- | 230 |
| Tableau 38 : Poids d'ordre attribués aux facteurs (objectif plantation) – ----- | 232 |
| Tableau 39 : Transition et sous-modèles de transition ----- | 234 |
| Tableau 40 : Variables spatialement explicites pour la transition DEFORESTATION ----- | 234 |
| Tableau 41 : Variables spatialement explicites pour la transition REGENERATION ----- | 234 |
| Tableau 42 : Variables spatialement explicites pour la transition PLANTATION----- | 235 |
| Tableau 43 : Probabilité de transition entre les types d'occupation du sol (valeurs en pourcentages) 238 | |

| | |
|---|-----|
| Tableau 44 : Mesure des erreurs et des exactitudes ----- | 243 |
| Tableau 45 : Matrice de contingence entre les changements observés et les changements prédits – CA-Markov ----- | 244 |
| Tableau 46 : Concordance et discordance spatiale des plantations – CA-Markov ----- | 245 |
| Tableau 47 : Matrice de contingence entre les changements observés et les changements prédits – LCM ----- | 248 |
| Tableau 48 : Concordance et discordance spatiale des plantations – LCM ----- | 249 |
| Tableau 49 : Comparaison entre 1999-2008 (observé), 1999 (observé)-2008 (CA-Markov) et 1999 (observé)-2008 (LCM). Les valeurs expriment le changement en % du paysage ----- | 250 |
| Tableau 50 : Synthèse des erreurs et exactitudes des deux modèles (en %) ----- | 255 |
| Tableau 51 : Présentation des scénarii prospectifs ----- | 259 |
| Tableau 52 : Disponibilité future de bois par espèces. Source : INFOR, 2008 ----- | 260 |
| Tableau 53 : Scénario tendanciel - <i>Business as usual</i> ----- | 265 |
| Tableau 54 : Volume (en millions de m ³ ssc) de forêt native par région. Source : CONAF, 1999 --- | 272 |
| Tableau 55 : Scénario prospective exploratoire – ds. ----- | 275 |
| Tableau 56 : Scénario normatif – eco-centré ----- | 279 |
| Tableau 57 : Scénario normatif – intensif. ----- | 286 |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|---|-----|
| Photo 1 : Bois de chauffe natif (à gauche) et exotique (à droite). San Juan de la Costa octobre 2008 | 33 |
| Photo 2 : Paysage fragmenté dans le centre-sud chilien. Source : Cristian Echeverria (s.d.) | 34 |
| Photo 3 : Zones érodées par les activités agropastorales | 38 |
| Photo 4 : Pulpe chimique blanchie – Source : Mullins, 2009 | 48 |
| Photo 5 : Paysage de (pré-)cordillère côtière – San Juan de la Costa (S 40°37'0 - W 73°27'1) – Décembre 2008 © | 133 |
| Photo 6 : Entretien avec un propriétaire (40°36' S – 73°23' W) – Décembre 2008 | 148 |
| Photo 7 : Coupe de leña (40°32' S – 73°13' W) – Décembre 2008 | 148 |
| Photo 8 : Planta Nueva Aldea (S36°39'31'' – W72°28'43). 08 décembre 2008 © | 156 |
| Photo 9 : F. Liagre – Source INRA Montpellier | 270 |
| Photo 10 : Sylvopastoralisme dans le secteur de Puaicho – 02/12/2008 © | 271 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS ----- | 5 |
| LISTE DES SIGLES ----- | 7 |
| SOMMAIRE ----- | 9 |
| INTRODUCTION GENERALE ----- | 11 |
| PREMIERE PARTIE – DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES FORETS ET LEUR MODELISATION PROSPECTIVE DANS LE CENTRE SUD CHILIEN : ENJEUX ET METHODOLOGIE ----- | 17 |
| CHAPITRE 1 – LE SYSTEME FORESTIER CHILIEN DANS LE CONTEXTE MONDIAL ----- | 19 |
| 1.1. Etat des lieux à l'échelle mondiale et régionale----- | 19 |
| 1.1.1. Forêts et plantations (définition) ----- | 19 |
| 1.1.2. L'état des forêts à l'échelle mondiale ----- | 22 |
| 1.1.2.1. Principales dynamiques du couvert forestier----- | 22 |
| 1.1.2.2. Les facteurs de changements----- | 24 |
| 1.1.3. L'état des forêts à l'échelle de la sous-région sud-américaine ----- | 26 |
| 1.2. Caractérisation des forêts natives et apparition progressive des plantations industrielles exotiques----- | 26 |
| 1.2.1. La forêt tempérée humide (caractéristiques, enjeux)----- | 26 |
| 1.2.1.1. Caractéristiques de la selve valdivienne ----- | 26 |
| 1.2.1.2. L'Ecorégion valdivienne----- | 28 |
| 1.2.1.3. Usages de la ressource forestière native ----- | 31 |
| 1.2.1.4. Perturbations et dégradations ----- | 33 |
| a) Les incendies forestiers ----- | 34 |
| b) L'habilitation des terres pour l'agriculture et l'élevage ----- | 35 |
| c) La substitution de la forêt native ----- | 36 |
| 1.2.2. L'essor des plantations industrielles----- | 36 |
| 1.2.2.1. L'apparition des premières plantations industrielles ----- | 37 |
| a) Activité agropastorale et érosion----- | 37 |
| b) Le modèle industriel de substitution des exportations ----- | 39 |
| 1.2.2.2. Caractéristiques botaniques et distribution du <i>Pinus radiata</i> et de l' <i>Eucalyptus globulus</i> ----- | 39 |
| a) <i>Pinus radiata</i> D.Don ou Pin de Monterrey ----- | 39 |
| b) L' <i>Eucalyptus globulus</i> Labill. ou Eucalyptus commun ----- | 40 |
| 1.2.2.3. Evolution des plantations et tendance future : les effets de l'économie de marché- ----- | 41 |
| a) Le rôle de la CONAF----- | 42 |
| b) La réforme du secteur forestier : le Decreto Ley 701 ----- | 43 |
| 1.2.3. L'industrie forestière ----- | 45 |
| 1.2.3.1. Importance du secteur forestier dans l'économie chilienne ----- | 45 |
| 1.2.3.2. Les exportations ----- | 45 |
| 1.2.3.3. Le sous-secteur de la cellulose : le moteur de l'industrie forestière----- | 47 |
| 1.3. Complexité et rôle déterminant des relations entre acteurs ----- | 50 |
| 1.3.1. Acteurs et propriétés foncières : entre inégalité spatiale et conflit d'usage----- | 50 |
| 1.3.1.1. Le peuple Mapuche ----- | 50 |

| | |
|---|----|
| 1.3.1.2. La construction du régime foncier ----- | 51 |
| a) Les Títulos del Comisario ----- | 52 |
| b) Les Títulos de Merced ----- | 52 |
| c) La division des Titres ----- | 52 |
| d) La période militaire ----- | 53 |
| 1.3.1.3. Etat des lieux du régime foncier ----- | 53 |
| a) Les petites propriétés ----- | 54 |
| b) Les propriétés de taille moyenne ----- | 54 |
| c) Les grandes et très grandes propriétés ----- | 54 |
| 1.3.2. Les principaux acteurs du secteur forestier ----- | 55 |
| 1.3.2.1. Le Groupe Angelini ----- | 55 |
| 1.3.2.2. Le Groupe Matte ----- | 56 |
| 1.3.2.3. Le Groupe Nueva ----- | 57 |
| 1.3.2.4. La Daio Paper Corporation ----- | 58 |
| 1.4. Les conséquences environnementales, sociales et économiques des plantations industrielles exotiques ----- | 60 |
| 1.4.1. L'environnement ----- | 60 |
| 1.4.1.1. La pression sur la forêt native ----- | 60 |
| 1.4.1.2. La biodiversité ----- | 61 |
| 1.4.1.3. La ressource hydrique ----- | 61 |
| 1.4.2. Impact sur le développement rural ----- | 62 |
| 1.4.2.1. L'Indice de Développement Humain (IDH) ----- | 62 |
| 1.4.2.2. L'exode rural ----- | 63 |
| CHAPITRE 2 – POSITIONNEMENT CONCEPTUEL ET METHODOLOGIQUE : DEVELOPPEMENT SOUTENABLE, ETUDE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DES SOLS ET SIMULATION PROSPECTIVE ----- | 67 |
| 2.1. Développement soutenable et sylviculture ----- | 67 |
| 2.1.1. Le développement : définition ----- | 68 |
| 2.1.2. Le développement soutenable ----- | 69 |
| 2.1.2.1. Avant-propos ----- | 69 |
| 2.1.2.2. L'émergence du concept ----- | 71 |
| a) Politique économique et développementiste ----- | 71 |
| b) Emergence du concept ----- | 73 |
| c) La remise en cause du Consensus de Washington ----- | 75 |
| 2.1.2.3. La dimension spatio-temporelle du développement soutenable ----- | 76 |
| a) La dimension temporelle ----- | 76 |
| b) La dimension spatiale ----- | 77 |
| 2.1.3. La sylviculture : état de l'art ----- | 79 |
| 2.1.3.1. Plusieurs types de sylviculture ----- | 80 |
| 2.1.3.2. La sylviculture intensive ----- | 81 |
| 2.1.4. Sylviculture et développement soutenable ----- | 83 |
| 2.1.4.1. L'avènement de la soutenabilité des pratiques sylvicoles ----- | 83 |
| 2.1.4.2. La certification forestière ----- | 84 |
| a) Forest Stewardship Council (FSC) et le FSC Chile ----- | 84 |
| b) Sistema Chileno de Certificación de Manejo Forestal Sustentable (CERTFOR) ----- | 85 |
| c) ISO 14.0001 ----- | 86 |
| 2.1.4.3. Etat des lieux de la situation chilienne ----- | 86 |
| 2.2. Land-Use and Cover Change (LUCC) et « drivers »: état de l'art ----- | 88 |

| | |
|--|-----|
| 2.2.1. Land Use and Cover Change ----- | 89 |
| 2.2.2. La télédétection----- | 90 |
| 2.2.3. La place des facteurs explicatifs ----- | 92 |
| 2.2.3.1. Plusieurs catégories de facteurs----- | 93 |
| 2.2.3.2. Inter (-dépendances) des facteurs ----- | 94 |
| 2.2.3.3. La sélection des facteurs ----- | 95 |
| 2.3. Modèles : état de l’art ----- | 96 |
| 2.3.1. Le modèle : simplifier la complexité----- | 96 |
| 2.3.2. La sélection du/des modèles ----- | 98 |
| 2.3.3. Les modèles déterministes ----- | 99 |
| 2.3.4. Les modèles stochastiques ----- | 101 |
| 2.3.5. Les modèles à base d’intelligence artificielle (AI)----- | 101 |
| 2.3.5.1. Les automates cellulaires (AC)----- | 102 |
| 2.3.5.2. Les réseaux neuronaux artificiels (Artificial Neural Networks – ANNs)----- | 103 |
| 2.3.5.3. Les Systèmes Multi-Agents (SMA)----- | 105 |
| 2.4. Modélisation prédictive et prospective----- | 106 |
| 2.4.1. La modélisation prédictive ----- | 106 |
| 2.4.2. La modélisation prospective ----- | 108 |
| 2.4.2.1. Emergence et grand principe de la prospective----- | 108 |
| 2.4.2.2. La méthode des scénarii----- | 111 |
| a) Définition----- | 112 |
| b) Typologie des scenarii ----- | 112 |
| c) Démarche méthodologique----- | 115 |
| 2.4.3. Validation et évaluation des modèles et des scénarii----- | 116 |
| 2.4.3.1. Validation des modèles prédictifs ----- | 116 |
| 2.4.3.2. Validation des modèles prospectifs (scénarii) ----- | 117 |
| 2.4.4. L’aide à la décision ----- | 117 |
| CHAPITRE 3 – L’AIRE D’ETUDE ET LES DONNEES. APPROCHE MULTI-SCALAIRE : DU REGIONAL AU LOCAL ----- | 121 |
| 3.1. Caractéristiques de la 8 ^{ème} – 9 ^{ème} – 14 ^{ème} et 10 ^{ème} Régions ----- | 121 |
| 3.1.1. Une forte concentration de plantations----- | 121 |
| 3.1.2. Description synthétique des régions administratives ----- | 123 |
| 3.2. San Juan de la Costa ----- | 126 |
| 3.2.2. Une place stratégique au sein de la Région de Los Lagos----- | 128 |
| 3.2.3. Cartographie officielle de l’occupation du sol----- | 131 |
| 3.3. Aspects démographiques et situation socio-économique----- | 134 |
| 3.3.1. Démographie et pauvreté ----- | 134 |
| 3.3.2. Décentralisation et investissement ----- | 136 |
| 3.3.3. La structure foncière----- | 136 |
| 3.4. Estimation et évolution du couvert forestier : des données multiples pour une problématique multi-scalaire ----- | 138 |
| 3.4.1. Les données satellitales ----- | 138 |
| 3.4.1.1. Les données moyennes résolution MODIS ----- | 138 |
| 3.4.1.2. Les données LANDSAT ----- | 140 |
| 3.4.1.3. Google Earth ----- | 141 |
| 3.4.2. Les données cartographiques----- | 142 |
| 3.4.2.1. Les données de la CONAF----- | 142 |
| 3.4.3. Les statistiques agricoles et forestières----- | 143 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.4.3.1. | Les statistiques agricoles de l'INE ----- | 143 |
| 3.4.3.2. | Les statistiques forestières de l'INstituto FOREstal (INFOR) ----- | 144 |
| 3.4.4. | Les relevés de terrain ----- | 144 |
| 3.4.4.1. | La fiche de terrain ----- | 145 |
| 3.4.4.2. | L'échantillonnage ----- | 145 |
| 3.4.5. | Les enquêtes sociales ----- | 147 |
| 3.4.5.1. | Les entretiens semi-directifs ----- | 147 |
| 3.4.5.2. | La sélection des acteurs ----- | 147 |
| 3.4.5.3. | La grille d'entretien ----- | 148 |
| 3.4.5.4. | L'entretien informel ----- | 148 |
| DEUXIEME PARTIE – LA DYNAMIQUE FORESTIERE DU REGIONAL AU LOCAL. DE LA STRUCTURE DU SYSTEME A LA DISTINCTION DES FACTEURS ----- | | 151 |
| CHAPITRE 4 – DETERMINATION DES DYNAMIQUES PAYSAGERES ET TRAJECTOIRES D'EVOLUTIONS | | |
| ----- | | 153 |
| 4.1. | Dynamiques forestières à l'échelle régionale ----- | 153 |
| 4.1.1. | Cartographie et statistiques ----- | 153 |
| 4.1.1.1. | Une partition est/ouest ----- | 153 |
| 4.1.1.2. | Une gradation nord/sud ----- | 157 |
| 4.1.2. | Détection des plantations industrielles (MODIS) ----- | 160 |
| 4.1.2.1. | Suivi de l'activité chlorophyllienne et coupe forestière ----- | 160 |
| 4.1.2.2. | Cartographie des variations chlorophylliennes ----- | 160 |
| 4.2. | Caractérisation des formes d'occupation du sol et leurs dynamiques à l'échelle sous régionale ----- | 163 |
| 4.2.2. | Construction d'une légende dynamique ----- | 164 |
| 4.2.3. | Analyse des rotations ----- | 165 |
| 4.2.4. | Observation et analyse à l'échelle sous-régionale ----- | 167 |
| 4.3. | Dynamique forestière à l'échelle locale : la commune de San Juan de la Costa ----- | 170 |
| 4.3.1. | Méthode de classification multi-temporelle ----- | 170 |
| 4.3.1.1. | Description et caractéristiques des types d'occupations du sol ----- | 170 |
| 4.3.1.2. | Evaluation et validation (approche rétrospective ; méthode œil-cerveau) ----- | 174 |
| a) | Première validation quantitative (précision globale et coefficient de Kappa) ---- | 174 |
| b) | Deuxième validation quantitative (comparaison avec la CONAF) ----- | 176 |
| c) | Validation qualitative (Google Earth) ----- | 178 |
| 4.3.2. | Analyse et interprétation ----- | 181 |
| 4.3.2.1. | Distribution spatiale des types d'occupation du sol et quantification par date - | 181 |
| 4.3.2.2. | Analyse des dynamiques par les trajectoires d'évolution ----- | 182 |
| a) | Dynamique des plantations exotiques ----- | 183 |
| b) | Dynamique de la forêt native ----- | 184 |
| c) | Dynamique des « autres » ----- | 187 |
| CHAPITRE 5 – IDENTIFICATION ET HIERARCHISATION DES FACTEURS DE CHANGEMENTS ----- | | 191 |
| 5.1. | Identification des facteurs via des études de cas ----- | 191 |
| 5.1.1. | Les processus de déforestation ----- | 191 |
| 5.1.2. | La dimension géographique ----- | 191 |
| 5.1.3. | La fragmentation de la forêt native ----- | 192 |
| 5.1.4. | La capacité d'usage des sols ----- | 192 |
| 5.2. | Identification des facteurs : entretiens participatifs et analyse systémique ----- | 194 |
| 5.2.1. | La période 1986-1999 ----- | 194 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.1.1. Le DL 701 (1974) | 194 |
| 5.2.1.2. La faible attractivité de la forêt native | 195 |
| 5.2.1.3. Le coût du foncier | 195 |
| 5.2.2. La période 1999-2008 | 196 |
| 5.2.2.1. L'actualisation du DL 701 | 196 |
| 5.2.2.2. L'assurance forestière | 198 |
| 5.2.2.3. Les impôts fonciers | 198 |
| 5.2.2.4. Les coûts de boisement | 199 |
| 5.2.2.5. Le rachat des terres | 200 |
| 5.3. Identification et analyse des facteurs spatialisables | 206 |
| 5.3.1. Disponibilité et choix des données | 206 |
| 5.3.2. Validation des facteurs | 207 |
| 5.3.3. Résultats | 207 |
| 5.3.3.1. Validation pour la période 1986-1999 | 207 |
| a) Relation entre facteurs explicatifs et changement d'occupation du sol | 207 |
| b) Relation entre facteurs explicatifs et occupation du sol (1999) | 208 |
| 5.3.3.2. Validation pour la période 1999-2008 | 210 |
| a) Relation entre facteurs explicatifs et trajectoires d'évolution | 210 |
| b) Relation entre facteurs explicatifs et occupation du sol (2008) | 210 |

TROISIEME PARTIE – SIMULATION PROSPECTIVE A L'ECHELLE COMMUNALE - 217

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 6 – LE CHOIX DES MODELES : MISE EN ŒUVRE ET CALIBRATION POUR 2008 | 219 |
| 6.1. Présentation des modèles : CA-Markov et Land Change Modeler (LCM) | 219 |
| 6.1.1. La calibration du modèle | 219 |
| 6.1.2. Ca-Markov | 220 |
| 6.1.3. Land change modeler (LCM) | 221 |
| 6.1.4. Similitude des variables et des quantités | 222 |
| 6.2. Mise en œuvre | 222 |
| 6.2.1. Un modèle probabiliste et supervisé (CA-Markov) | 222 |
| 6.2.1.1. La démarche de l'évaluation multicritère | 222 |
| 6.2.1.2. Facteurs et contraintes | 223 |
| 6.2.1.3. Standardisation des facteurs | 224 |
| a) Affectation manuelle du degré d'aptitude | 225 |
| b) Standardisation par la fonction <i>fuzzy membership</i> | 227 |
| 6.2.1.4. Pondération inter-facteurs et procédure d'agrégation | 230 |
| 6.2.1.5. Résultats | 232 |
| 6.2.2. Land Change Modeler | 233 |
| 6.2.2.1. Transitions et sous-modèles de transitions | 233 |
| 6.2.2.2. Sélection des variables | 234 |
| 6.2.2.3. Les cartes de probabilité de transition (1999-2008) | 235 |
| 6.2.2.4. Allocation spatiale des changements | 236 |
| 6.3. Résultats et validation | 237 |
| 6.3.1. CA-Markov – validation | 239 |
| 6.3.1.1. Analyse des résidus (LUCC-budgets) | 239 |
| 6.3.1.2. Relative Operating Characteristic (ROC) | 241 |
| 6.3.1.3. Budgétisation des erreurs/exactitudes | 242 |
| 6.3.2. Land Change Modeler - Validation | 245 |
| 6.3.2.1. Analyse des résidus (LUCC-budgets) | 245 |

| | |
|---|------------|
| 6.3.2.2. Relative Operating Characteristic ----- | 247 |
| 6.3.2.3. Budgétisation des erreurs/exactitudes ----- | 248 |
| 6.4. Analyse comparative des deux modèles ----- | 250 |
| 6.4.1. LUCC-budgets comparatif pour les deux modèles ----- | 250 |
| 6.4.2. Représentation des erreurs/exactitudes des deux modèles ----- | 251 |
| CHAPITRE 7 – LES SCENARII TENDANCIELS ET NORMATIFS SPATIALISES ----- | 257 |
| 7.1. Présentation synthétique des scénarii ----- | 257 |
| 7.2. Scénario prédictif - <i>business as usual</i> - ----- | 260 |
| 7.2.1. Elaboration des hypothèses ----- | 260 |
| 7.2.1.1. La vision des spécialistes du secteur forestier ----- | 260 |
| 7.2.1.2. La disponibilité des terres ----- | 261 |
| 7.2.1.3. Actualisation du Decreto Ley 701 ----- | 261 |
| 7.2.1.4. Bonification des plantations à des fins dendroénergétiques ----- | 262 |
| 7.2.1.5. Application de la Ley Bosque Nativo (Ley N° 20.283) ----- | 263 |
| 7.2.2. Spatialisation des hypothèses ----- | 263 |
| 7.2.3. Résultats ----- | 264 |
| 7.3. Scénario prospectif exploratoire : scénario volontariste (type de développement soutenable) ----- | 265 |
| 7.3.1. Elaboration des hypothèses ----- | 266 |
| 7.3.1.1. La gouvernance territoriale ----- | 266 |
| 7.3.1.2. Le Projet de Territoire Mapu Lahual ----- | 268 |
| 7.3.1.3. L'agroforesterie sur la précordillère côtière ----- | 269 |
| 7.3.1.4. Valorisation de la ressource forestière native par la commercialisation de la <i>leña</i> - ----- | 271 |
| 7.3.1.5. Les propositions de l'Agrupación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo (AIFBN) pour un « Nuevo Modelo Forestal » ----- | 273 |
| 7.3.2. Spatialisation des hypothèses ----- | 273 |
| 7.3.3. Résultats ----- | 274 |
| 7.4. Scénario prospectif normatif « éco-centré »: scénario de préservation (« <i>contrasté</i> ») ----- | 275 |
| 7.4.1. Elaboration des hypothèses ----- | 275 |
| 7.4.1.1. La crise économique et la chute du secteur forestier ----- | 275 |
| 7.4.1.2. Redistribution et/ou régularisation des terres indigènes ----- | 276 |
| 7.4.1.3. Valorisation de la Cordillère de la Côte ----- | 277 |
| 7.4.2. Spatialisation des hypothèses ----- | 277 |
| 7.4.3. Résultats ----- | 278 |
| 7.5. Scénario prospectif normatif: scénario intensif (« <i>contrasté</i> ») ----- | 280 |
| 7.5.1. Elaboration des hypothèses ----- | 280 |
| 7.5.1.1. Un marché international compétitif ----- | 280 |
| 7.5.1.2. La réorganisation territoriale à l'échelle de la 10ème Région ----- | 280 |
| 7.5.1.3. La construction de la Ruta Costera ----- | 282 |
| 7.5.1.4. Politique de remembrement à l'échelle communale ----- | 283 |
| 7.5.2. Spatialisation des hypothèses ----- | 284 |
| 7.5.3. Résultats ----- | 284 |
| CONCLUSION GENERALE ----- | 293 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ----- | 297 |
| ANNEXES ----- | 327 |

| | |
|---------------------------|------------|
| LISTE DES FIGURES | 341 |
| LISTE DES TABLEAUX | 345 |
| LISTE DES PHOTOS | 347 |
| TABLE DES MATIERES | 349 |

RESUME : Le couvert forestier dans le sud chilien représente un enjeu environnemental majeur. 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 en 1974 généra l'expansion de monocultures de pins et d'eucalyptus dans le sud chilien. L'intensification des pratiques sylvicoles, combinée à la substitution des écosystèmes forestiers natifs, remet en question leur soutenabilité à court et moyen terme. Cette étude cherche à appréhender et à anticiper la dynamique des plantations forestières à plusieurs échelles spatiales et temporelles afin d'identifier les enjeux futurs d'occupation du sol. Dans un premier temps, l'utilisation de données satellitales à moyenne résolution MODIS a permis de détecter et de quantifier les coupes forestières et les forêts stables de la 8^{ème} Région du Bío-Bío au sud continental de la 10^{ème} Région de Los Lagos. Le recours aux images LANDSAT a, dans un second temps, fourni des éléments de précision sur le cycle de rotations des plantations industrielles à l'échelle de deux régions. Enfin, une classification multi-dates a constitué une base d'étude pour aborder les changements d'occupation et d'utilisation du sol (LUCC) dans la commune de San Juan de la Costa. Aussi, entre 1986 et 2008, la progression des monocultures au détriment de la forêt native et des autres types d'occupation du sol atteint respectivement 3 366 ha et 6 132 ha. Bien que l'identification des facteurs explicatifs combinée à l'analyse rétrospective mette en évidence une grande complexité au sein de ce système, quatre scénarii prospectifs ont pu être proposés. Ces derniers permettent d'obtenir une vision panoramique des dynamiques évolutives des plantations forestières et de la forêt native. Si les scénarii prédictif et intensif traduisent une expansion des plantations monospécifiques en 2017 et 2026, les scénarii, exploratoire et « éco-centré », apportent une vision à contre-courant, avec un regain de forêt native et un déclin des plantations à l'horizon 2035. Le croisement des scénarii établit également un degré de congruence spatialisé susceptible de fournir, dans une perspective de gestion, des informations complémentaires d'aide à la décision.

MOTS-CLES : Chili, sylviculture intensive, multi-scalaire, changement d'occupation et d'utilisation du sol, modélisation spatiale, système complexe, prospective, scénarii.

RESUMEN: La cubierta forestal en el sur de Chile representa un desafío medio ambiental mayor. El bosque nativo, ubicado en la Ecorregión Valdiviana (35°S–48°S), forma parte de ecosistemas que tienen una alta prioridad de conservación en el mundo. La aplicación del Decreto Ley 701 en 1974 provocó la expansión de monocultivos de pinos y eucaliptos en el sur chileno. La intensificación de las prácticas silvícolas, junto con la sustitución de ecosistemas forestales nativos, pone en cuestión su sustentabilidad a corto y mediano plazo. Este estudio trata de comprender y anticipar la dinámica de las plantaciones forestales en diversas escalas espaciales y temporales para así identificar desafíos de ocupación futuros. En primer lugar, el uso de datos satelitales a resolución media con MODIS ha permitido la detección y la cuantificación tanto de las cortas como de las cubiertas forestales estables desde la Octava Región del Bío-Bío al sur continental de la Décima Región de Los Lagos. El uso de imágenes LANDSAT ha permitido reconocer el ciclo de rotaciones de las plantaciones industriales a la escala de dos regiones. Finalmente, se ha establecido una clasificación multi-temporal como base para el estudio de los cambios de ocupación y de utilización de los suelos (LUCC) en la comuna de San Juan de la Costa. Así, entre 1986 y 2008, la progresión de los monocultivos en detrimento del bosque nativo y de otros tipos de ocupación del suelo alcanza 3366 ha y 6132 ha respectivamente. A pesar que la identificación de factores explicativos relacionados con el análisis retrospectivo posee una gran complejidad dentro del sistema, cuatro escenarios prospectivos han podido ser propuestos. Estos, permiten obtener una visión panorámica de la dinámica futura de las plantaciones forestales, y también del bosque nativo. Mientras que los escenarios predictivo e intensivo reflejan una expansión de las plantaciones mono-específicas en 2017 y 2026, los escenarios exploratorio y “eco-centrado” revelan un comportamiento contrario, con una recuperación del bosque nativo y un decrecimiento de las plantaciones en 2035. El cruce de los escenarios muestra un grado de congruencia espacial capaces de proponer, en una perspectiva de gestión, informaciones complementarias de ayuda a la decisión.

PALABRAS CLAVE: Chile, silvicultura intensiva, multiescalar, cambio de ocupación y uso del suelo, modelización espacial, sistema complejo, prospectiva, escenarios.

ABSTRACT: Southern Chile forest cover represents a major environmental issue. The native forest, integrated into the Valdivian Ecoregion (35°S–48°S), belongs to ecosystems with the highest conservation priority in the world. The application of the Decree Law 701 in 1974 generated the expansion of pines and eucalyptus monocultures in Southern Chile. The intensification of silvicultural practices, combined with the substitution of native forested ecosystems, reappraises their sustainability on both short and mid-term. This study wishes to apprehend and anticipate timber plantation dynamics on several spatial and temporal scales to identify tomorrow's land occupation issues. In a first phase, the use of MODIS medium-resolution remotely sensed data enables the detection and quantification of timber cutting and stable forests from the 8th region of the Bio-Bio to the continental south of the 10th region of Los Lagos. In a second phase, turning to LANDSAT images enables to specify the rotation cycle of industrial plantations on a scale of two regions. Finally, a multi-date classification is used to build a data base in order to study land use and cover changes in the municipality of San Juan de la Costa. Between 1986 and 2008, the spread of monoculture at the expense of native forest and other types of land occupation reaches respectively 3 366 ha and 6 132 ha. Even though the identification of the explanatory factors together with retrospective analysis highlights the complexity of the system, four prospective scenarios are offered. They give us a panoramic vision of the timber plantations' future dynamics, as well as those of the native forest. If the predictive and intensive scenarios express an expansion of the monospecific plantations in 2017 and 2026, the exploratory and “eco-centered” scenarios bring a vision that goes against the grain, with a resurgence of native forest and a decline in plantations by 2035. The crossing of the scenarios establishes a degree of spatial congruence and brings information that can help decision-making.

KEYWORDS: Chile, intensive silviculture, multi-scale, land use and cover change, spatial modeling, complex system, prospective, scenarios.