

Détection des plantations forestières par imagerie satellite MODIS dans le Sud du Chili

Martin Paegelow, Nicolas Maestripieri, Nicolas Saez Villalobos, Dario Toro Balbontin

▶ **To cite this version:**

Martin Paegelow, Nicolas Maestripieri, Nicolas Saez Villalobos, Dario Toro Balbontin. Détection des plantations forestières par imagerie satellite MODIS dans le Sud du Chili. M@ppemonde, 2012, 106, 20 p. en ligne. halshs-01063621

HAL Id: halshs-01063621
https://shs.hal.science/halshs-01063621

Submitted on 12 Sep 2014

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

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

M@ppemonde

Détection des plantations forestières par imagerie satellite MODIS dans le Sud du Chili

Martin Paegelow, Nicolas Maestripieri, Nicolas Sáez Villalobos, Dario Toro Balbontín

Université Toulouse 2-Le Mirail, CNRS UMR 5602 GEODE

Résumé.— Dans le Sud du Chili, de nombreuses plantations forestières remplacent progressivement la plus grande forêt tempérée humide australe, connue pour sa biodiversité. L'objectif est de repérer et de cartographier ces plantations par le biais de données de télédétection : l'indice de végétation NDVI du satellite MODIS. Le profil temporel de cet indice permet de distinguer les coupes forestières et les incendies. Il est cartographié pour une partie montagneuse de cette zone (cordillère et précordillère littorales) et les résultats sont croisés avec diverses sources statistiques et cadastrales, et comparés à des relevés de terrain.
Chili • MODIS • NDVI • Plantations forestières

Abstract.— In southern Chile, large forest plantations have progressively replaced the largest temperate rainforest in the southern hemisphere, renowned for its biodiversity. This study aims to detect and map these plantations using remote sensing, MODIS NDVI data. The temporal profile of this vegetation index distinguishes between logging and forest fires. Southern Chile's coastal Cordillera and Precordillera have been mapped and the results compared with various statistical and cadastral data, as well as with field observations.
Chili • Forest plantations • MODIS • NDVI

Resumen.— En el sur de Chile importantes superficies de plantaciones forestales sustituyen al bosque húmedo templado, particularmente rico en biodiversidad y el más extenso en el hemisferio sur. Este estudio busca detectar y cartografiar estas plantaciones utilizando datos de teledetección: el NDVI del satélite MODIS. El perfil temporal de este índice permite discriminar las cortas forestales y los incendios. Se realiza una cartografía sobre la cordillera y precordillera costeras continental del sur del país cuyos resultados son cruzados con diversas estadísticas, catastrales y relevamientos de terreno.
Chile • MODIS • NDVI • Plantaciones forestales

La cordillère littorale et la cordillère des Andes sont recouvertes, dans le Sud du Chili, d'une forêt tempérée humide à la biodiversité reconnue et abritant des espèces emblématiques, dont l'alerce, un arbre connu pour sa très grande longévité. S'étendant sur plus de 1 000 km Nord-Sud, cet ensemble dit « valdivien » constitue une écorégion qui est aussi le lieu de vie de nombreux groupes indigènes. Cette zone est affectée aujourd'hui par de profonds changements. Les plantations monospécifiques (pins ou eucalyptus) de type industriel modifient ce milieu, ainsi que l'exploitation illégale de l'alerce, souvent après incendie volontaire (seul l'arbre vivant est protégé). L'ampleur des plantations, notamment dans la cordillère littorale, remet

en question l'intérêt écologique et la valeur patrimoniale de la région. Les sources statistiques existantes et le cadastre forestier ne permettent pas de cartographier ce phénomène, qui n'a fait jusqu'ici l'objet que d'études locales ou régionales. On propose ici une cartographie de l'évolution récente, en prenant appui sur des données satellitaires MODIS acquises en 2000 et 2008.

La première partie de l'article présente la zone d'étude (1), ses caractéristiques environnementales et son évolution actuelle. Dans la deuxième partie, on discute les caractéristiques des données MODIS, en proposant des prétraitements et une méthode de détection des coupes forestières et des replantations. L'un des principaux problèmes est lié au fait que le signal de discrimination des replantations — une chute caractéristique de l'indice de végétation — peut se confondre avec des incendies.

Les résultats obtenus sont enfin comparés, pour validation, aux données statistiques et cadastrales disponibles, ainsi qu'à des relevés de terrain effectués par les auteurs.

1. Problématique, zone d'étude et objectifs

1.1. La forêt tempérée humide aujourd'hui

Au Chili, la surface totale couverte par des forêts naturelles atteint 13,4 millions d'hectares, ce qui représente 18 % du territoire national (INFOR, 2008) dont plus de 95 % appartiennent à la forêt humide tempérée (CONAF, 1999). Cette dernière est définie notamment par des critères climatologiques (2) ; elle est répartie le long de la cordillère des Andes sur les territoires argentin et chilien entre le 38e et le 55e parallèle sud (écorégion valdivienne). Elle est la forêt tempérée de l'Amérique du Sud la plus étendue et représente plus de la moitié de la surface totale des forêts tempérées de l'hémisphère Sud (Donoso, 1998). La majorité de la forêt humide tempérée est distribuée le long de la cordillère de la Côte et de la cordillère des Andes (fig. 1 et 2). Sa valeur écologique s'explique, entre autres, par son isolement géographique actuel (encadré 1) : elle est circonscrite par le Pacifique (O), les steppes argentines (E), le désert chilien (N) et la toundra patagonienne (S), sans connexion avec d'autres biomes forestiers. La richesse de la forêt est plus grande dans la cordillère de le Côte car, étant moins élevée que les Andes, elle a constitué un refuge climatique lors des dernières glaciations. Considérée communément comme une « île biogéographique », cette forêt humide tempérée est caractérisée par son haut degré d'endémisme, qui va jusqu'à 50 % (Donoso, 1993 ; Armesto *et al.*, 1996 ; Kalin-Arroyo, 1996). Elle a été classée comme un point chaud de biodiversité (Myers *et al.*, 2000). Elle est considérée par le WWF et la Banque mondiale comme l'une des écorégions les plus menacées du monde (Dinerstein *et al.*, 1995).

Certaines espèces arborées sont connues pour leur longévité record. L'alerce (*Fitzroya cupressoides*) peut atteindre 50 mètres de hauteur et vivre plus de 3000 ans (WWF, 2005) ; on peut trouver des individus âgés de 3500-4000 ans dans la cordillère de la Côte (Muñoz Pérez, 2005).

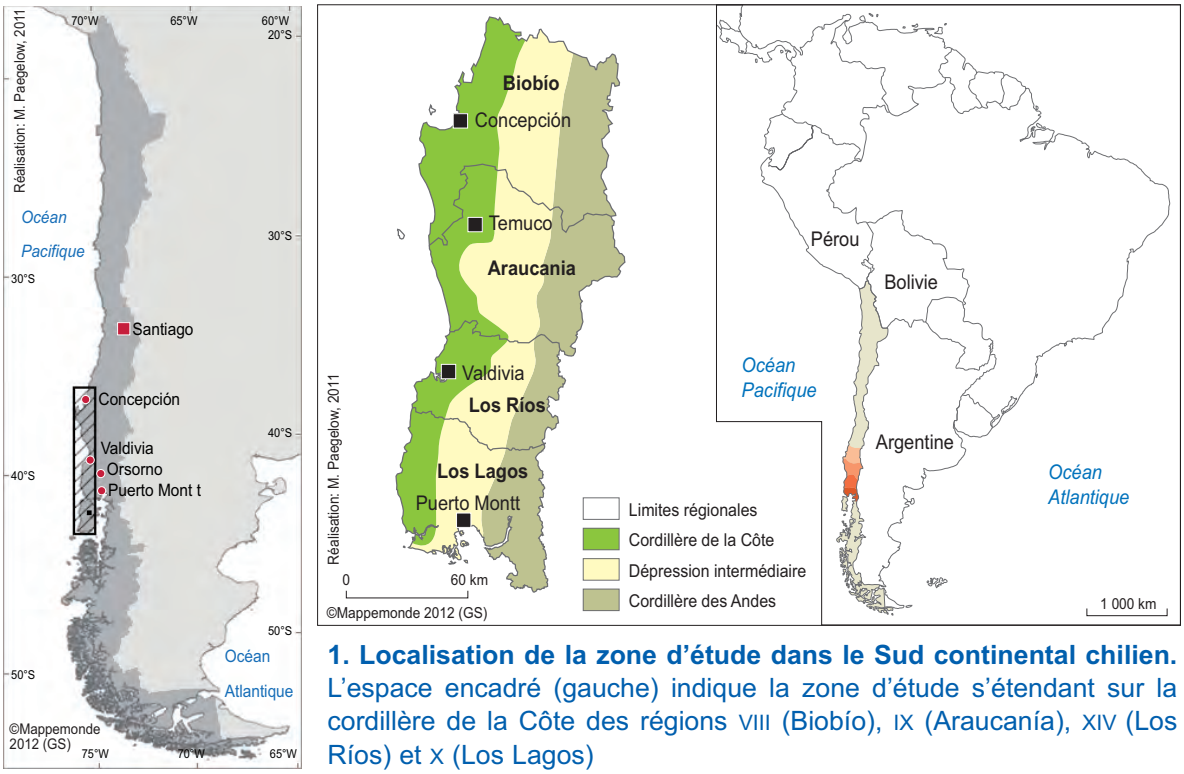
Malgré son intérêt remarquable, cette forêt ne fait pas l'objet d'une gestion adéquate. Des plantations d'espèces exotiques à croissance rapide (30 m³/ha/an pour *Pinus radiata*, entre 45-50 m³/ha/an pour les eucalyptus) se substituent souvent à celles, plus lentes, de la forêt naturelle (entre 4 et 7,5 m³/ha/an) (Quintanilla, 1995). Ces plantations sont le fait, pour la majorité d'entre elles, d'entreprises trans-nationales cherchant à satisfaire la demande mondiale croissante en bois et papier.

D'autres périmètres sont eux incendiés, soit accidentellement, soit délibérément en vue de l'exploitation illégale de l'alerce ou, plus rarement, pour être transformés en zones pastorales ou agricoles.

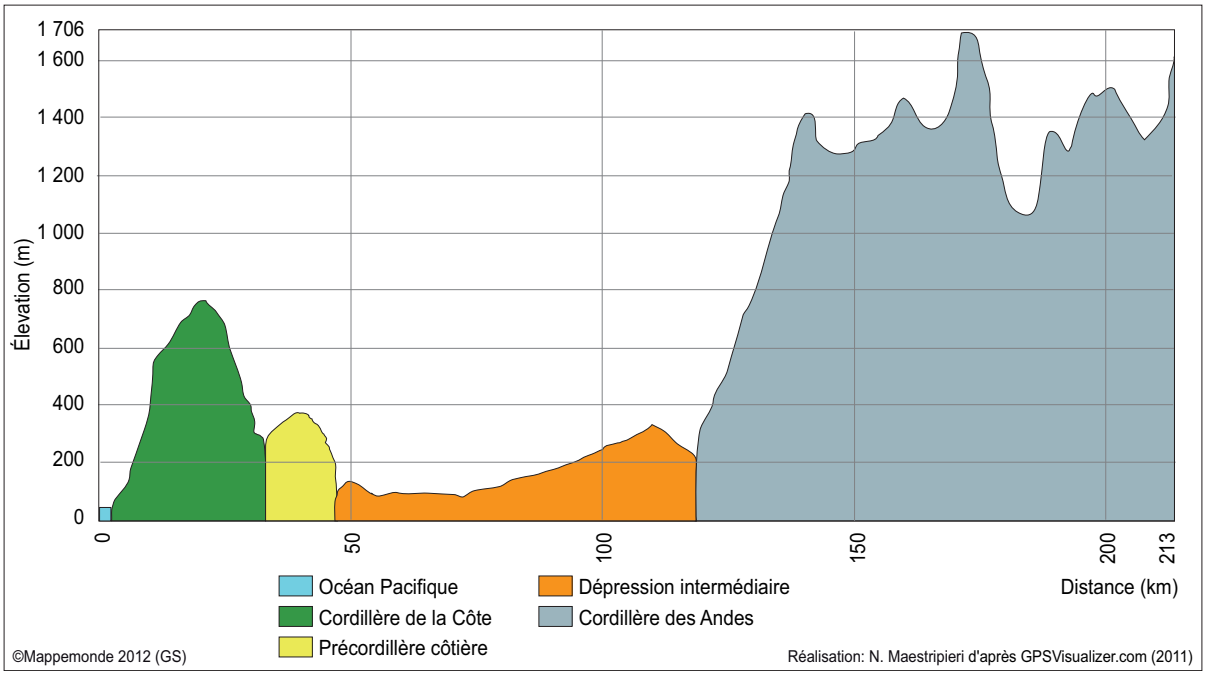
À partir des années 1970, l'essor des plantations forestières d'espèces exotiques (Lara *et al.*, 1996) est devenu la première cause de la destruction de la forêt naturelle ou *bosque nativo* (Donoso, Lara 1996). Selon des études de la Banque centrale du Chili et de la CONAF (Corporación nacional forestal, 1999 ; Arnold, 1998), la substitution de la forêt humide tempérée par des plantations d'espèces exotiques expliquerait 60 % de la réduction des surfaces de la forêt naturelle. Selon Wilken (1998, 1997), les surfaces naturelles déboisées sont remplacées à 63 % par des plantations forestières, tandis que 18 % sont affectées à un autre usage (prairies et pâturages principalement) ; 16 % des déboisements correspondent à des incendies et 3 % à des coupes illégales.

1. Repères géographiques

La zone d'étude s'étend sur la cordillère de la Côte du Sud chilien continental. Son organisation se présente sous la forme d'étroites trois bandes Nord-Sud fortement différenciées, tant sur le plan physico-géographique que socio-économique : la dépression centrale — lieu principal de l'activité économique, concentrant les voies de communication terrestres et les principales villes — prise en sandwich entre deux chaînes de montagne, la cordillère des Andes à l'est et la cordillère littorale qui la sépare du Pacifique. Ce massif littoral se subdivise lui-même en deux entités que nous avons confondues pour des raisons de lisibilité sur la carte de situation (fig. 1) : la cordillère littorale proprement dite et la précordillère (fig. 2). Séparée par une faille géologique, la précordillère présente des altitudes et des pentes moins fortes. Ce fait, conjugué à sa proximité avec l'artère économique que constitue la dépression centrale, explique qu'on y trouve l'essentiel des plantations forestières. Notre d'étude s'étend sur quatre régions administratives (du Nord au Sud) : le Biobío (VIIIe région), l'Araucania (IXe région), Los Ríos (XIVe région) et Los Lagos (Xe région). Il est à noter que la XIVe région (Los Ríos) est récente et faisait partie intégrante, jusqu'au début des années 2000, de la région de Los Lagos (Xe région) dont elle constituait les provinces septentrionales. Selon la date de parution, les statistiques font référence à l'organisation administrative ancienne ou à l'actuelle. La période couverte par notre étude (2000 à 2008) étant à cheval sur cette réorganisation territoriale, nous avons fait le choix de nous référer dans cet article aux anciennes limites. Ainsi ce que nous appellerons « région X » correspond aux actuelles régions X et XIV.



1. Localisation de la zone d'étude dans le Sud continental chilien. L'espace encadré (gauche) indique la zone d'étude s'étendant sur la cordillère de la Côte des régions VIII (Biobío), IX (Araucanía), XIV (Los Ríos) et X (Los Lagos)

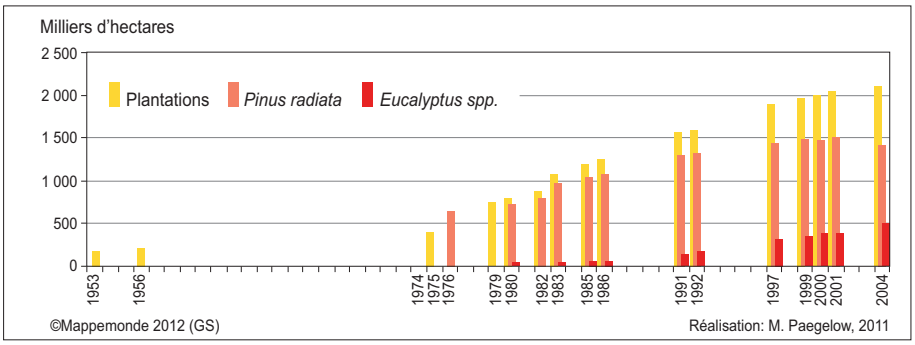


2. Profil topographique ouest/est du Sud chilien (parallèle S 40.7°)

Les espèces exotiques plantées sont quasi exclusivement le *Pinus radiata* et deux eucalyptus : *Eucalyptus globulus* et *E. nitens*. Pins et eucalyptus représentent plus de 92 % de la surface plantée entre 2000 et 2006 dans la région de Los Lagos (Xe région) et plus de 99 % dans la région de Biobío (VIIIe) (INFOR, 2008). Introduites ponctuellement dès la fin du XIXe siècle, ces espèces se caractérisent par leur large spectre écologique et leur croissance volumétrique exceptionnelle.

Alertées par une multiplication d'études alarmantes qui soulignaient une dégradation des sols par érosion massive (Barrué-Pastor, 2004 ; Echeverría *et al.*, 2006 ; Toro Balbontín, 2007), les autorités chiliennes ont mis en place à partir des années 1960 une politique de reforestation à l'échelle nationale afin de protéger les sols. Basée dans un premier temps sur des espèces autochtones, la plantation d'espèces allochtones est devenue majoritaire depuis les années 1970.

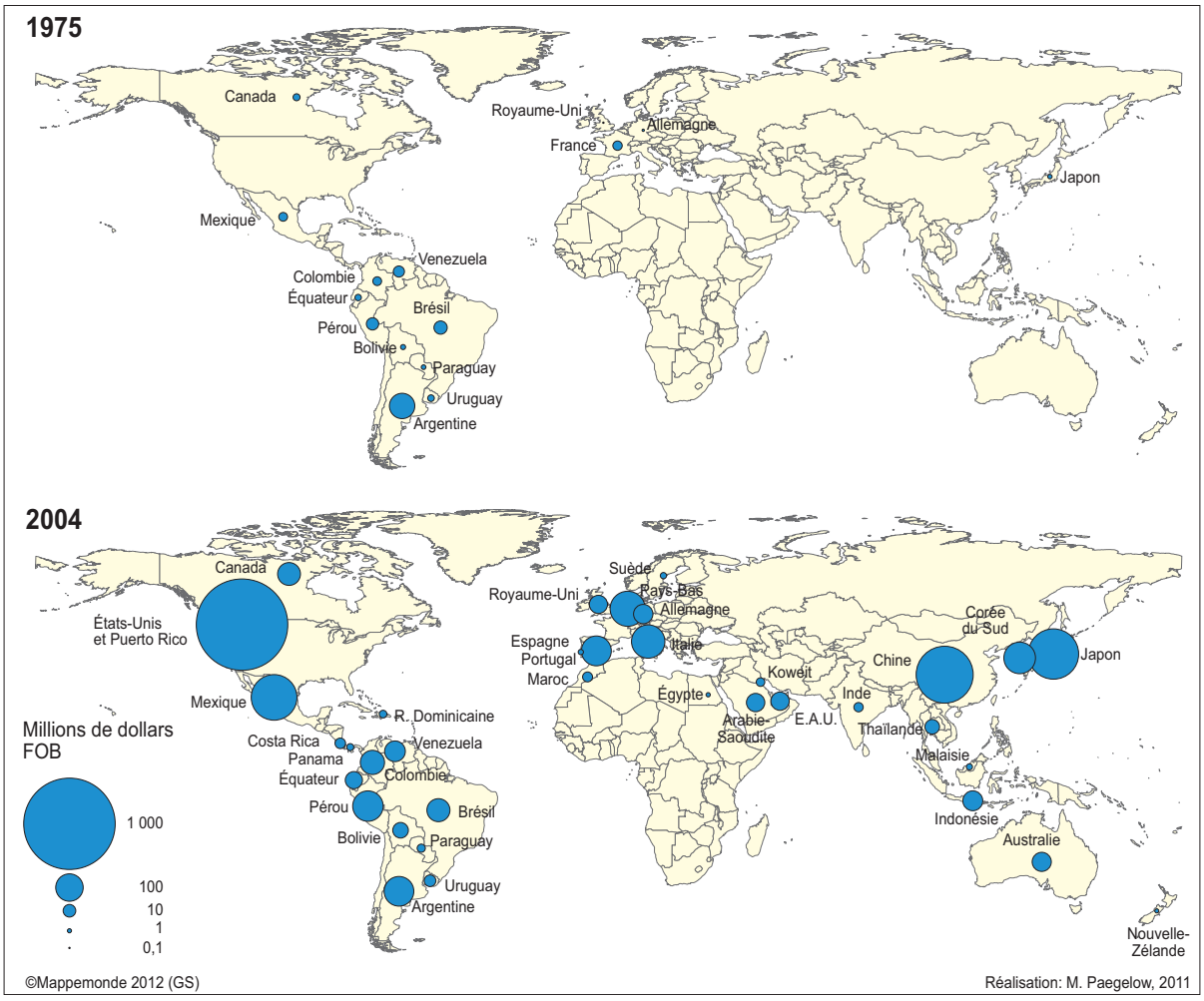
La surface couverte par les plantations forestières a quadruplé entre 1975 (environ 500 000 ha) et 2000 (2 millions ha) (fig. 3).



3. Évolution entre 1953 et 2004 de la surface recouverte par des plantations au Chili et principales espèces plantées (sources : Scott, 1954, 1960 ; Katz *et al.*, 1999 ; INFOR, 1978, 1982, 1983, 1986, 1989 et 2005 ; Menéndez, 2005)

Après le coup d'État de 1973, la loi 701 d'incitation aux plantations est votée (CONAF, 1999). Elle s'accompagne d'une vague de privatisations et s'inscrit dans un contexte économique mondial qui favorise une tout autre logique d'occupation de l'espace. Le processus de reforestation laisse place à la replantation industrielle massive (en pins et eucalyptus) destinée principalement, jusqu'au milieu des années 1990, à l'industrie de pâte à papier japonaise (3). Après 1998, les États-Unis deviennent le principal marché tous produits forestiers confondus (pâte à papier, copeaux, bois d'œuvre, planches…). Ils sont talonnés par la Chine depuis 2005 (INFOR, 2008). Alors que la foresterie n'avait qu'une importance minime dans l'économie chilienne des années 1960, elle est aujourd'hui le deuxième secteur exportateur du pays, derrière l'activité minière (fig. 4).

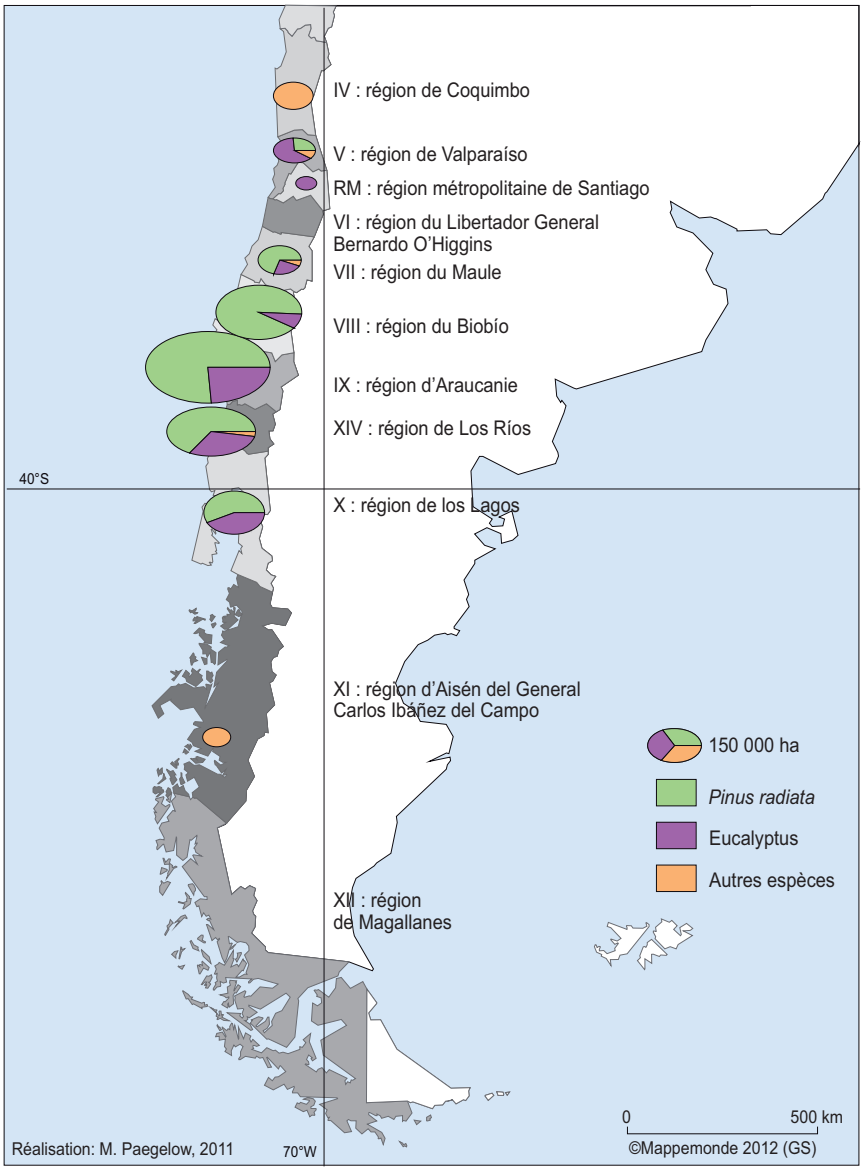
La figure 5 donne une idée de la répartition des plantations forestières, qui se concentrent essentiellement dans les régions VII à X. À l'intérieur de ces régions, les plantations s'étendent en majorité sur la précordillère et la cordillère littorales, une bande large de quelques dizaines de kilomètres seulement (fig. 2).



4. Volume et destination des exportations chiliennes de produits forestiers, 1975 et 2004
Remarque : aux données représentées sur la carte pour l'année 2004, il convient d'ajouter 39,3 millions de dollars US à destination d'autres pays (source : selon données INFOR, 2005).

Sur les questions environnementales liées à l'essor des plantations (perte en biodiversité, épuisement des sols) se greffe une question sociale de premier plan, celle des conditions de vie de la minorité mapuche. Installés pour l'essentiel dans le Sud chilien, et notamment dans les régions touchées par les plantations à caractère industriel, les Mapuches représentent la fraction de la population indienne autochtone la plus nombreuse et la plus directement concernée par ce changement radical d'occupation du sol. Les diverses formes d'éviction des Mapuches (vente, baux…), accompagnées par le transfert de la gestion de l'espace de l'échelle locale à l'échelle nationale, voire mondiale, aggravent encore leur situation sociale et économique, provoquant à la fois perte identitaire et augmentation du chômage (Barrué-Pastor, 2004 ; Catalan *et al.*, 2005 ; CORMA, 2002 ; Toro Balbontín, 2007).

Pour toutes ces raisons, l'État chilien cherche aujourd'hui à limiter le phénomène de substitution des forêts naturelles par des plantations monospécifiques. Reste à savoir si la récente entrée en vigueur d'une loi de protection de la forêt naturelle, votée en 2008, va changer la donne (4).



5. Surface recouverte par des plantations forestières selon les espèces et les régions en 2004 (source : INFOR, 2005)

1.1. Objectifs

Il reste difficile de spatialiser précisément le phénomène des plantations forestières. La statistique fournit certes des données récentes, mais surtout à l'échelle régionale. Pour certains indicateurs, on dispose de données statistiques communales. Il existe aussi un ensemble de plans cadastraux numériques localisant les plantations adultes et les jeunes plantations, mais les dates de mise à jour varient suivant les régions. Le premier objectif des recherches présentées ici consiste à évaluer le potentiel de l'imagerie satellite MODIS afin de détecter les coupes forestières précédant, au moins dans deux cas sur trois (plus encore sur les sites observés et enquêtés), une plantation par des espèces dites exotiques. Il s'agit ainsi d'aboutir à une cartographie spatio-temporelle du phénomène. Un croisement des résultats alors obtenus avec les autres sources de données (statistiques, cadastre, imagerie Google Earth et observations de terrain) permettra à la fois d'évaluer l'apport des images MODIS et la qualité des données officielles.

2. *Méthodologie et données*

2.1. MODIS – images NDVI basse résolution spatiale, haute résolution temporelle : apports et limites pour le suivi des plantations forestières

Le choix de l'imagerie MODIS (encadré 2), disponible depuis 2000, s'explique par plusieurs raisons : sa gratuité, la taille des scènes qui est adaptée à l'étendue géographique du phénomène étudié et sa haute résolution temporelle (une image tous les 1 à 2 jours) qui compense sa faible résolution spatiale (pixel de 250 m à 500 m de côté pour les données spectrales utilisées). En l'occurrence, nous n'utilisons que l'indice de végétation (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index), le rapport entre le proche infrarouge et le rouge visible, qui traduit l'intensité de l'activité chlorophyllienne.

Le recours aux images MODIS pour les études de la déforestation est fréquent depuis les années 2003-2004. Étant donné les caractéristiques du capteur, de nombreuses applications concernent de vastes territoires et en première ligne la forêt amazonienne (Morton *et al.*, 2005 ; Ferreira *et al.*, 2007). Les travaux parus insistent sur la possibilité de suivre la déforestation quasiment en temps réel (Shimabukudo *et al.*, 2004) en la détectant par recours à l'indice de végétation (Correira *et al.*, 2006).

L'imagerie satellite est complétée par cinq sources de données, utilisées à des fins de comparaison :

• Les statistiques forestières (région, commune) : INFOR (2008), statistiques reprises par l'Instituto Nacional de Estadística, INE (2008).
• Les statistiques sur les incendies : CONAF (2011).
• Le cadastre : indication des plantations forestières (CONAF, 1999 ; CONAF, 2008) pour 2006 pour les régions IX (Araucanía) et X (Los Lagos) et pour 1998 pour la région VIII (Biobío). Ces plans cadastraux numériques comportent deux catégories : les plantations adultes (en principe de plus de 4-5 ans) et les plantations jeunes dont la mise en place est plus récente.
• L'imagerie Google Earth, présentant, selon l'échelle d'affichage, un patchwork d'images satellites et de photographies aériennes dont la résolution spatiale la plus

haute est quasi métrique (assemblage de plusieurs dates s'étalant sur plusieurs années et couverture non systématique).
• Les observations de terrain et les relevés GPS.

2. MODIS : caractéristiques et sélection des données

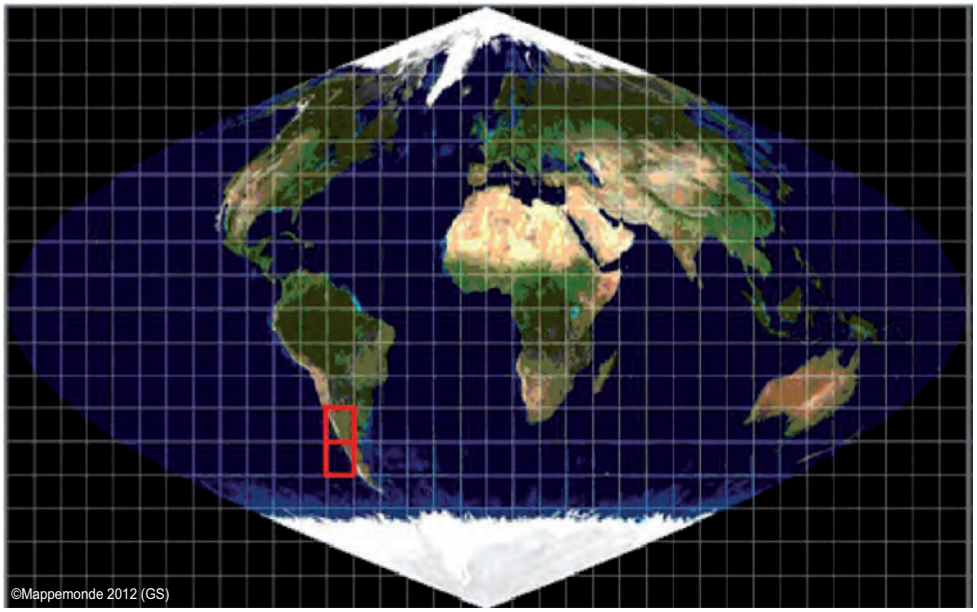
MODIS est un satellite ayant une orbite basse à défilement (altitude 705 km) à haute sensibilité radiométrique (enregistrement du signal sur 12 bits) qui opère dans 36 bandes spectrales entre 0.4 et 14.4 µm correspondant au spectre du visible et des infrarouges proche, moyen et thermique. Ces différents canaux opèrent à une résolution spatiale allant de 250 m à 1 km (NASA, 2010). Les canaux du rouge visible et du PIR (proche infrarouge) opèrent à la résolution spatiale maximale (pixel de 250 x 250 m) autorisant ainsi le calcul de l'indice de végétation qui tire profit de la signature spectrale de la végétation active, caractérisée par une réponse minimale dans le rouge visible et maximale dans le PIR. Un autre atout de MODIS est qu'il enregistre la qualité (couverture nuageuse, qualité d'enregistrement…) par pixel alors que des satellites de type SPOT ne fournissent qu'un indice de qualité globale par scène ou fraction de scène. Étant donné qu'une grande partie de la surface terrestre est fréquemment sous couvert nuageux – comme le sud chilien continental – la haute répétitivité temporelle autorise la constitution d'images composées dont les valeurs radiométriques proviennent de plusieurs images successives dans le temps. L'opérateur du satellite, le LP DAAC (Land Process Distribution Active Archive Center) localisé à l'USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center à Sioux Falls, South Dakota, propose ainsi des résumés bi-hebdomadaires (16 jours) constituant un puzzle des meilleurs enregistrements en termes de qualité de données.
Les images MODIS sont gratuites et ont été téléchargées sur le site de l'USGS (US Geological Survey) (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/wist). Nous avons téléchargé sur ce serveur ftp des indices de végétation (MODIS-Terra Végétation Indices 16-day L3 GLOBAL 250 m SIN GRID V005) couvrant la partie continentale chilienne située entre 72 et 74° W et 36 à 42° S (il s'agit de 2 tuiles de 4800 lignes / colonnes couvrant chacune environ un espace de 10° latitude/longitude) (fig. 6). Afin d'analyser la variation de l'indice de végétation NDVI au cours du temps, nous avons sélectionné quatre images par an entre mars 2000 et février 2008 (les recensements statistiques et les données cadastrales les plus récentes sont de 2006-2007). Cette série temporelle d'une image par saison sur un peu plus de huit ans (33 images) est néanmoins interrompue à trois reprises pour la 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 sans couverture nuageuse). Ainsi la série diachronique MODIS pour cette étude est composée de 28 images de haute qualité au format HDF EOS en projection sinusoïdale (fig. 7).

2.2. Méthodologie

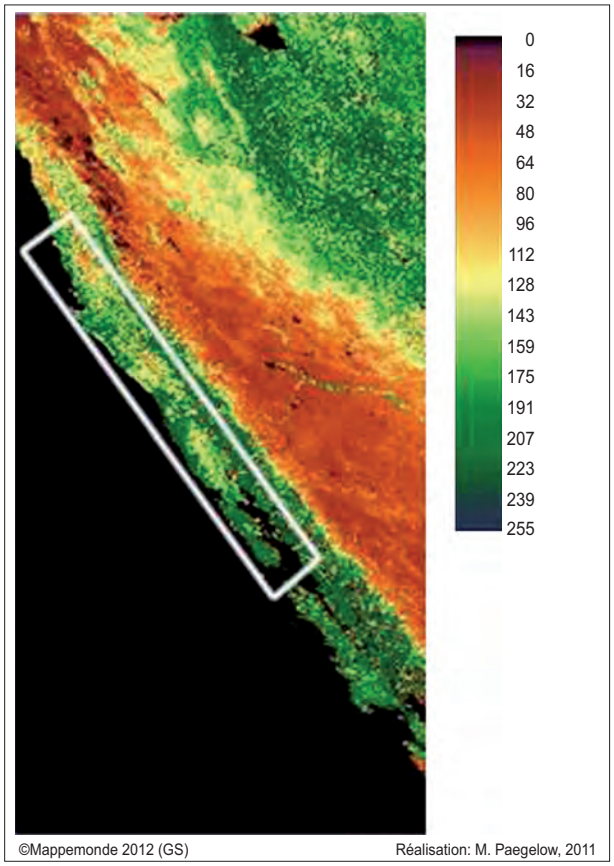
Les images ont été importées sous Idrisi en changeant la projection sinusoïdale (fig. 6, 7 et 8) en projection UTM faisceau 19 Sud. En outre, le codage radiométrique a été ramené à 256 niveaux (8 bits), les tuiles concaténées et la zone de travail (cordillère et précordillère littorales) extraite. Une dernière homogénéisation concerne la côte pacifique (mixels océan/terre) et a consisté en un découpage selon le plus petit dénominateur commun (limite côtière présentant des pixels de qualité « acceptable » selon la terminologie MODIS pour l'ensemble de la série d'images ; cf. zones en noir dans la fig. 8).

Traitements d'image

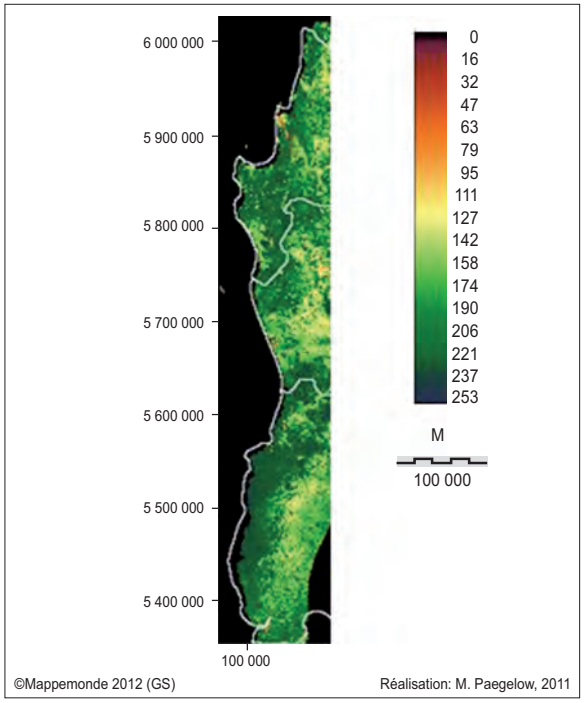
L'hypothèse de base est que l'indice de végétation exprime l'intensité de l'activité chlorophyllienne. Tenant compte, en outre, de la taille du pixel (6.25 ha), il est illusoire de viser une distinction entre les forêts plurispécifiques et les plantations monospécifiques, voire une discrimination spécifique de ces dernières. En revanche, une comparaison pluriannuelle des niveaux de l'indice de végétation fera ressortir les différences entre :
• les types d'occupations du sol ayant une variabilité chlorophyllienne saisonnière prononcée (cultures annuelles et surfaces en herbes dans une moindre mesure),
• les surfaces caractérisées par un haut niveau de l'indice de végétation peu affectées par les rythmes saisonniers (surfaces boisées),



6. Tuiles MODIS en projection sinusoïdale
En rouge les 2 tuiles concernant les cordillère et précordillère littorales du Sud chilien continental.



7. MODIS, image NDVI du 18/02/08 (résumé bi-hebdomadaire (3-18/02/2008) en projection sinusoïdale
L'image est l'assemblage de 2 dalles de 4800 colonnes/lignes. L'extension géogra-phique (résolution 250 m) est de 1200 km (WE) sur 2400 km (NS). L'encadré blanc correspond à la zone d'études (fig. 8).



8. Extraction de la zone d'étude (cordillère et précordillère littorales et partie ouest de la dépression centrale correspondant aux régions VIII, IX et X) reprojetée en UTM 19 sud
En blanc le découpage administratif régional. Données manquantes sur la côte pacifique : mixels océan/terre.

• les surfaces s'exprimant par un indice de végétation généralement bas (eaux de surfaces, sols nus, bâti) et les coupes forestières (ou 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.

Rupture de l'indice de végétation égale coupe forestière ?

Nous interpréterons ces ruptures caractéristiques de l'indice de végétation pour la grande majorité (des 2/3 aux 4/5) d'entre elles, pouvant se produire aussi bien en forêt naturelle que sur des plantations arrivées à maturité (rotation de 6-12 ans), que sur des coupes de surfaces destinées à faire l'objet de plantations forestières monospécifiques. Selon toutes nos observations *in situ* et de nombreux entretiens avec des acteurs locaux, y compris les paysans, une coupe forestière (plantation ou forêt naturelle) est généralement suivie, dans les régions concernées, d'une plantation. Nous n'avons pas pu constater, dans les régions étudiées, de coupes au profit d'autres usages (prairies et pâturages notamment), bien que ce phénomène soit attesté dans le pays (voir supra). De ce fait, nous supposons qu'il est moins fréquent dans ces régions que dans le reste du Chili.

Après coupe, la plantation n'est pas forcément immédiate. Le terrain est généralement nettoyé, avant d'être préparé pour la plantation (fertilisants et herbicides) qui, elle, a lieu, le plus souvent, avant la reprise de la saison pluvieuse (automne austral). Entre la coupe et la plantation, 1 à 2 ans, exceptionnellement 3, peuvent donc s'écouler. Cela rend délicate l'utilisation des données du cadastre forestier, car celui-ci recense l'occupation du sol à l'instant *t* et peut enregistrer comme diminution des surfaces forestières une situation provisoire. Au niveau mondial, il existe des normes qui prennent en compte l'évolution du couvert végétal sans remettre en cause le classement d'un espace donné en zone forestière. Les experts du Global observation of forest and land cover dynamics (GOGFC-GOLD, 2010) soulignent ainsi qu'un changement de densité de couverture (coupe) qui n'est pas suivi d'un changement d'utilisation du sol ne remet pas en cause son classement en tant que forêt.

Outre la transformation d'espaces boisés en prairies et en pâturages, phénomène que nous jugeons assez marginal pour le secteur et la période envisagés, la troisième explication possible d'une baisse prononcée et prolongée de l'indice de végétation est que la surface en question ait été incendiée. L'ampleur des incendies est néanmoins faible. On constate une diminution des surfaces brûlées vers le Sud où la quantité et la répartition des précipitations sur l'année limitent ce phénomène (CONAF, 2011). Dans le Biobío, la moitié des incendies (environ 43 000 ha sur la période 2000-2009) affecte les plantations tandis que le phénomène décroît d'un facteur 20 dans la région de Los Lagos (au total 4 400 ha incendiés sur la même période) et touche pour les trois quarts la végétation arborescente naturelle : cela correspond à l'exploitation illégale de l'alerce sur les cimes de la cordillère littorale.

Les incendies représentent — pour la période et l'aire d'études considérées — un cinquième de la surface des plantations. La moitié de cette surface incendiée affecte les plantations forestières (zones destinées à la replantation) tandis qu'un quart des feux détruit une végétation de type matorral dont le profil de l'indice de végétation est distinct de celui des espaces forestiers. En conclusion, la marge d'erreur induite par

les incendies est de l'ordre de 5 %, une imprécision encore plus faible si l'on considère que l'essentiel des plantations forestières est concentré dans la précordillère littorale alors que les incendies affectant la forêt naturelle se produisent principalement dans la cordillère de la Côte (fig. 2).

Nous reviendrons sur cette imprécision plus en détail dans la partie qui traite de la validation des résultats (encadré 3).

3. Méthodologie du traitement d'image

Les travaux ayant généré les résultats les plus probants sont des simples classifications d'images non supervisées et, au sein de cette famille, 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). La classification commence par initialiser sur la base d'un premier échantillon les centroïdes des classes et y affecte les pixels les plus proches (distance euclidienne) tout en recalculant les centroïdes des classes jusqu'à ce que ces derniers deviennent stables. Ce processus heuristique dans le sens de l'optimisation combinatoire, minimise la somme des carrés des erreurs et est sensible à la taille de l'échantillon, à l'initialisation des centroïdes (en l'occurrence aléatoire) et au nombre de classes dont on recommande un nombre élevé au début (ici 16, pouvant se fusionner en cours de traitement) (Richards, Jia, 1999). Le paramétrage de stabilisation du nombre et de la position des centres de classes appliqué correspond à moins de 1 % de pixels migrant d'une classe à une autre au cours de 50 itérations tout en fusionnant les clusters de moins de 1 % en surface avec les classes les plus proches. Comme indiqué plus haut, nous avons pris soin de subdiviser la zone d'étude selon un graduant nord-sud (les régions administratives) afin de réduire l'amplitude du calendrier phénologique dont les variations perturbent la classification et, de fait, la détection des coupures de l'indice de végétation NDVI en milieu forestier.

Les classes obtenues sont ensuite caractérisées par l'extraction de l'image classée du profil moyen l'indice de végétation pluriannuel afin d'identifier trois familles de comportement de cet indice : les espaces forestiers stables sur la période 2000 à 2008, les coupes forestières et l'espace restant. Enfin, pour la catégorie signifiant déforestation, l'année du minimum NDVI a été calculée afin de dater l'événement et de le comparer aux sources de données externes.

Post-traitements

La validation des résultats repose, dans une première approximation, sur la comparaison des surfaces forestières indiquées dans les statistiques régionales et les classifications sur images.

Une analyse plus fine, centrée cette fois sur les plantations proprement dites, compare la catégorie « coupes forestières » avec les statistiques et le cadastre. Enfin, étant donné la variété des résultats de cette mise en relation, nous avons eu recours aux photographies aériennes disponibles sous Google Earth et, pour les secteurs visités, aux observations de terrain. Nous traiterons dans cette partie la région VIII, où les plantations sont très grandes, et la région X où les plantations sont moins grandes et plus récentes, pour aboutir finalement à une cartographie de l'ensemble du littoral du Sud continental chilien. Cette cartographie est encore approximative pour la région IX, faute de relevés de terrain systématiques.

3. *Résultats et validation*

3.1. Les cartographies télédétectées et leur croisement avec des sources statistiques et le cadastre

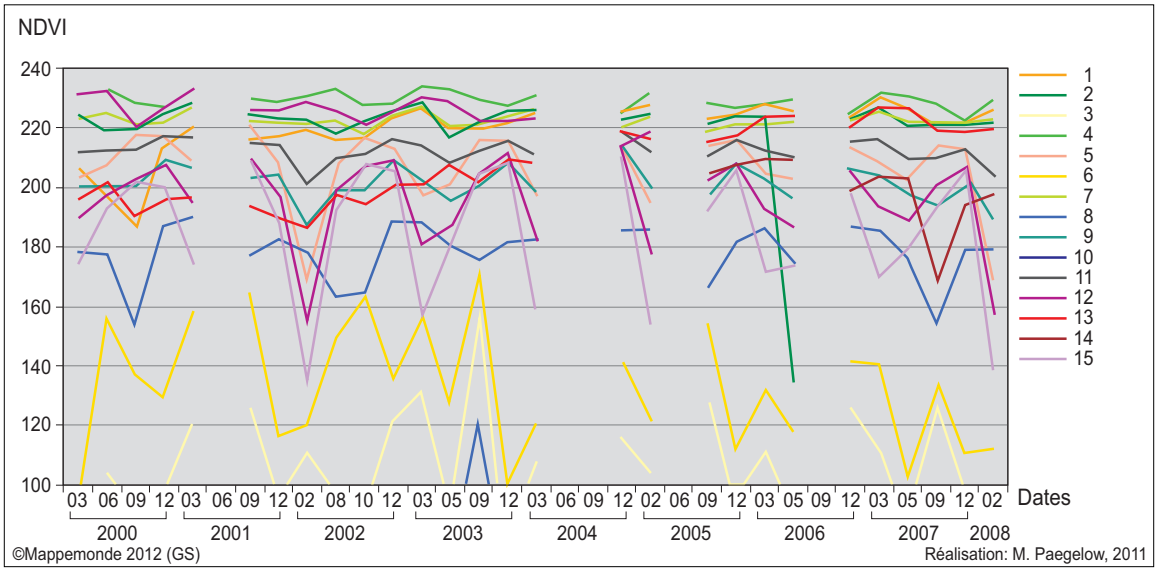
Des classifications KMEANS ont été réalisées séparément sur la région VIII (Biobío) et la région X (Los Lagos) dans ses anciennes limites incluant ainsi la nouvelle région XIV. Nous présentons ici graphiquement les résultats sur la région X. Une analyse des profils temporels des classes créées (fig. 9) permet de distinguer différentes catégories d'occupation du sol :

• un profil de l'indice de végétation en « dents de scie » traduit une ample variabilité de l'activité chlorophyllienne saisonnière (exemples classes 3, 6 et 15) caractéristique des cultures annuelles, voire des surfaces en herbe ou composites (amplitude moindre, exemple classe 10) ;
• une courbe temporelle de l'indice de végétation à un niveau très bas (exemple classe 8 dont on ne voit que le pic en 2003 sur la figure 9) traduit des eaux de surface et espaces marécageux ;
• un profil de l'indice de végétation peu variable et situé toujours à un niveau élevé (supérieur à 210) indique un couvert végétal à forte activité chlorophyllienne quelle que soit la saison : les forêts (forêts naturelles et plantations) (exemple : classes 2, 4 et 7 en teintes vertes) ;
• un profil apparenté aux espaces forestiers stables, défini par un niveau de l'indice de végatation 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 en régénération (*renoval*) ;
• enfin, la figure 9 montre des classes dont le profil est, pour l'essentiel de la période considérée (mars 2000 à février 2008), semblable à celui des espaces forestiers, mais qui connaissent soit une hausse, soit une baisse significative d'activité chlorophyllienne. Les classes 1 et 13 (traits épais en orange et rouge) traduisent une hausse de l'indice de végétation : la classe 1 connaît une remontée rapide fin 2000 - début 2001 tandis que la classe 13 dessine une augmentation, en faisant abstraction de l'influence saisonnière, continue et lente. C'est seulement à partir de la fin 2004 que la courbe s'apparente à celles des classes « Forêt ». L'interprétation des vitesses inégales d'augmentation de l'indice de végétation est délicate faute de données complémentaires et d'un historique plus long : une plantation immédiate (classe 1) et une plantation plus tardive après une régénération spontanée de la végétation (classe 13) sont les hypothèses les plus plausibles. La classe 14 (marron épais) montre l'exemple inverse : un comportement forestier jusqu'à la fin de l'année 2004 puis une forte chute en deux temps. Ces profils traduisent les coupes forestières (faisant abstraction de la possibilité d'incendies et de la conversion en prairies ou en pâturages, assez peu fréquentes dans la précordillère littorale).

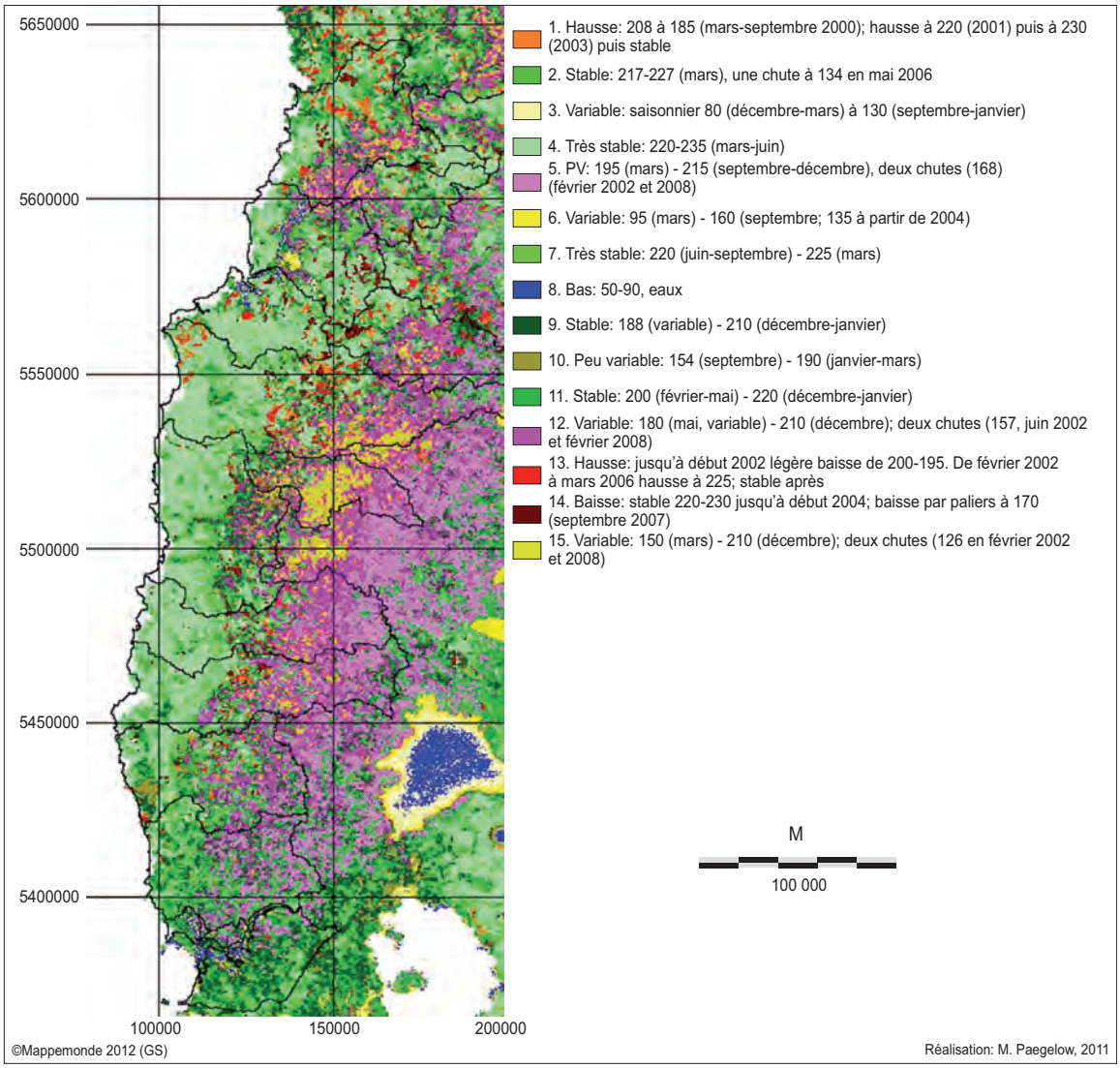
La figure 10 montre la carte correspondant aux profils. Sa légende est dans le même ordre. La figure 11 en est une simplification regroupant les classes 2, 4, 7 et 11 en tant que forêts/plantations stables et les classes 1, 13 et 14 comme coupes forestières.

Une première comparaison entre les classifications MODIS et les statistiques officielles de l'INE (2007) pour l'ensemble de l'espace forestier (tableau 1), opérée pour les régions VIII et X, aboutit à une concordance quasi parfaite des surfaces.

Si l'on focalise sur les plantations seules, le croisement entre les classes « coupes forestières » résultant de l'analyse de l'imagerie MODIS et les statistiques de l'INFOR (pour la période 2000 à 2006 à l'échelle régionale) fait apparaître quelques différences (tableau 2). Pour les deux régions étudiées, le traitement d'images conduit à une étendue des coupes forestières plus grande (16,5 % pour la VIII^{e} région ; 19,6 % en région X) que la somme des plantations et des incendies (cf. argumentation pour la prise en compte de ceux-ci dans la partie 2) selon les statistiques.



9. Profils NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) de mars 2000 à février 2008 issus de la classification non supervisée KMEANS sur la série de 28 images NDVI des cordillère et précordillère littorales de la région X (anciennes limites incluant la nouvelle région XIV)



10. Classification KMEANS sur la série de 28 images NDVI des cordillère et précordillère littorales de la région X (anciennes limites incluant la nouvelle région XIV)

Cet écart peut s'expliquer, pour le moins en partie, par une reconversion de l'espace forestier en pâtures ou terres agricoles — possibilité déjà évoquée quoique non observée — ce qui diminuerait autant la précision et l'intérêt de la méthode proposée pour discriminer rapidement et sur des grandes surfaces les plantations forestières. Une autre explication pour cette « surdétection » serait l'inexactitude des statistiques dans la mesure où le recensement enregistre l'occupation du sol à un moment donné et non l'usage de l'espace qui, après une coupe ou un incendie, reste très majoritairement forestier. En attendant des analyses complémentaires, il est probable que les deux hypothèses se combinent. Les incendies sont nettement plus étendus dans le Biobío (VIII) — avec un cumul surfacique proche de 30 % des surfaces plantées — que dans la région de los Lagos (X, 11 %). Une autre différence régionale est à prendre en considération : si les incendies recensés dans les plantations forestières représentent environ la moitié du total des surfaces brûlées et ceux affectant la végétation naturelle un tiers dans la région VIII, les proportions sont tout autres dans le Sud (région X) : seuls 4 % des incendies ont lieu dans les plantations alors que leur proportion atteint 90 % dans les espaces à végétation naturelle, sachant que l'ampleur surfacique est environ dix fois moindre que dans le Biobío. Mais la valeur de cette comparaison est limitée par le fait que les statistiques utilisées concernent la période allant de 2000 à 2006 (alors que la série MODIS s'étend jusqu'au début de l'année 2008) ce qui peut, en partie au moins, expliquer le surplus des coupes détectées avec MODIS. La seconde limite à la comparaison est le fait que notre aire d'étude est limitée aux cordillère et précordillère littorales alors que les statistiques englobent aussi la dépression centrale et les Andes (région). Ce décalage des périmètres géographiques n'affecte cependant pas les plantations (quasi inexistantes dans la dépression centrale et la chaîne des Andes beaucoup mieux protégée). En ce qui concerne les incendies, le recours aux statistiques communales des incendies de la CONAF (2011) pour la période 2000-2009 permet de filtrer les communes de l'aire d'étude. Pour la région VIII, nous obtenons presque les mêmes chiffres tandis que la surface incendiée dans la région X est moitié moins vaste dans l'aire d'étude (la différence correspond à des feux étendus dans la partie insulaire de la région).

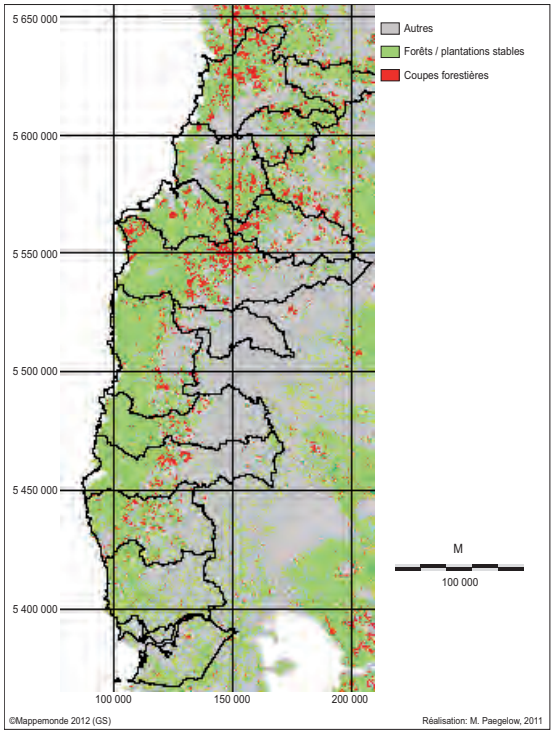
1. Tableau de comparaison des surfaces boisées détectées sur l'imagerie MODIS et indiquées dans les statistiques de l'INE (2007)

Région	Statistiques INE, 2007 Catégories : forêt native, plantations, matoral (ha)	MODIS par classification KMEANS Catégories : forêt et plantations stables, coupes forestières (ha)	Différence (MODIS – INE) en %
Région VIII	1 200 223	1 232 375	+ 2.61
Région X	891 034	898 292	+ 0.81

2. Surfaces détectées comme coupes forestières sur images MODIS, plantations et incendies selon les statistiques de l'INFOR (2008). Toutes les données pour la période 2000- 2006, en ha pour les régions VIII et X

Région	MODIS coupes forestières	INFOR Plantations	INFOR Incendies	Surplus MODIS (en %)
Région VIII	432125	271803	88880	16.5
Région X	112794	81619	9037	19.6

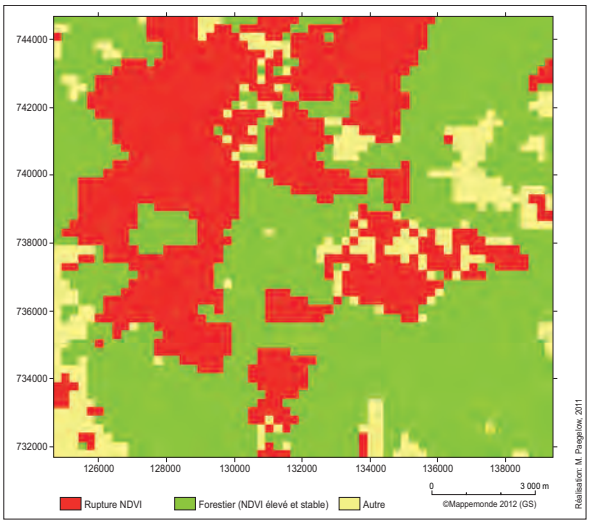
Cette analyse souligne le poids globalement faible de la composante « incendies » dans la détection des ruptures de l'indice de végétation en milieu forestier et valide l'hypothèse que ces ruptures signifient très majoritairement des coupes forestières suivies de plantations. Retenons que les données statistiques ont une assise géographique et temporelle légèrement différente, ce qui limite la comparabilité tout en pouvant expliquer la surestimation MODIS. À cela s'ajoutent les coupes illégales dans le Sud chilien (région X) visant l'exploitation lucrative quoique interdite du bois d'alerce, ce qui pourrait expliquer, au moins en partie, la surestimation par télédétection comparée aux sources statistiques pour cette région.



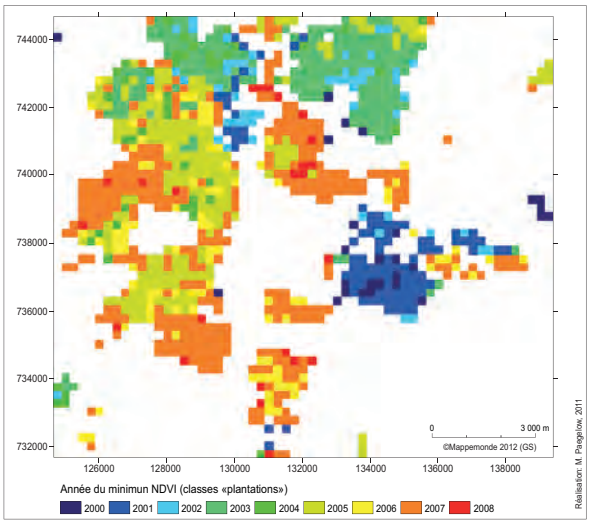
11. Coupes forestières et forêts stables (2000-2008) dans les précordillère et cordillère littorales du sud continental chilien (région X) ; simplification de la fig. 9 avec superposition des limites communales

Enfin, une mise en relation avec le cadastre forestier de 2006/2007 (CONAF, 2008) aboutit à des résultats peu cohérents. Ce plan cadastral numérique distingue deux catégories : des plantations jeunes dont l'âge est inférieur à cinq ans et des plantations adultes (plantations remontant à cinq ans ou plus lors de l'établissement en 2006/2007). Par exemple, pour le territoire de la région X analysé par MODIS (cordillère et précordillères littorales, fig. 11), les jeunes plantations, d'après le cadastre de la CONAF, occupent 39 894 ha et les plantations adultes 182 713 ha. Les déboisements détectés à l'aide des images MODIS seraient ainsi presque trois fois plus étendus. Sur l'ensemble du Sud chilien environ la moitié des jeunes plantations du cadastre coïncident avec les résultats de l'analyse des images MODIS. En observant cette correspondance à l'échelle locale, les situations varient de la non-coïncidence évidente à la correspondance quasi parfaite comme l'exemple ci-dessous le démontre (fig. 12 à 18). Il s'agit d'une fenêtre d'environ 15 x 15 km, situé dans le Nord de la IXe région. La figure 12 est une simplification de la classification KMEANS (ici : les coupes forestières en rouge, l'espace forestier en vert clair). La figure 13 indique l'année du minimum NDVI pour les pixels de la classe « coupes forestières » — autrement dit l'année de la coupe. La figure 14 y superpose le cadastre forestier de 2006-2007 (plantations jeunes en bleu, plantations adultes en violet). On peut y voir, notamment dans le secteur ouest et sud-ouest que le cadastre de 2006-2007 recense des plantations adultes alors que l'imagerie MODIS suggère des nouvelles coupes forestières — et par conséquent des replantations (teintes jaunes à rouges correspondant aux coupes intervenues entre 2006 et début 2008). La figure 15 est une photographie aérienne de résolution métrique de 2006, disponible sur Google Earth. Les teintes claires traduisent des coupes récentes alors que les teintes foncées expriment les plantations adultes ; la qualité de ces photographies aériennes numériques permet, en zoomant, de reconnaître les lignes de plantations et, à

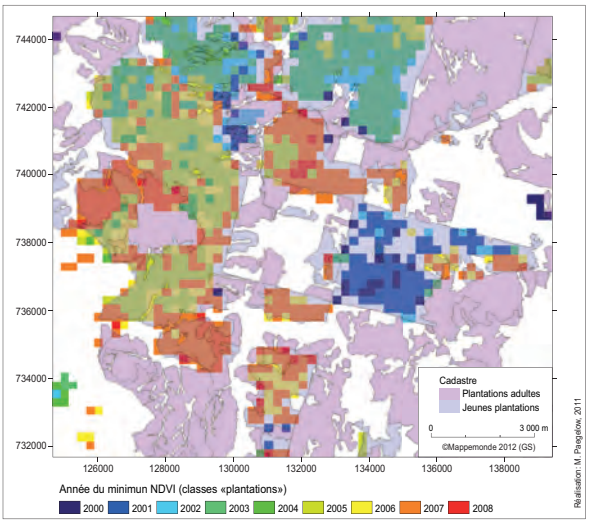
d'autres endroits, les fûts coupés. Enfin, les teintes intermédiaires correspondent à différents stades de jeunes plantations, pas encore complètement recouvrantes. La figure 16 est une superposition de l'année des coupes forestières selon MODIS (min. NDVI) sur la photographie aérienne. À part la parfaite correspondance géométrique, on remarque des coupes postérieures à la prise de la photographie aérienne (ouest et sud-ouest). La figure 17 superpose le cadastre forestier à la photographie aérienne et souligne la superposition géométrique des deux documents. Enfin, la figure 18 superpose, en mode de transparence la classification KMEANS (fig. 12) à la photographie aérienne. Les teintes vertes traduisent l'espace forestier stable tandis que les teintes roses correspondent aux coupes visibles sur les deux documents. Enfin, la teinte en rouge foncé exprime des coupes forestières visibles sur les images MODIS mais pas sur la photographie aérienne. Un croisement avec les données de la figure 13 nous montre qu'il s'agit de coupes postérieures à la date de la prise de vue.



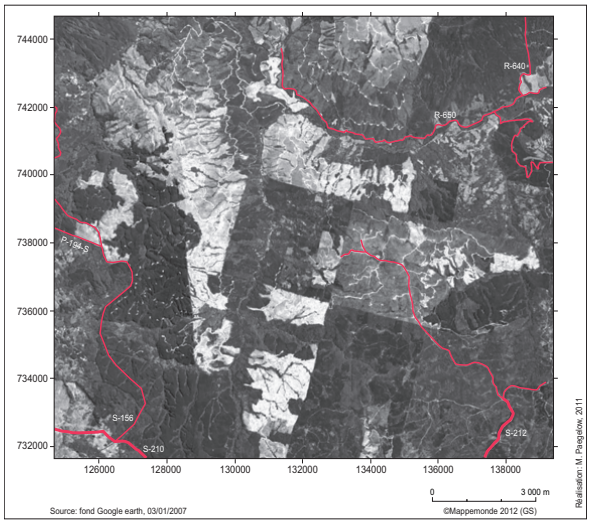
12. Coupes forestières (en rouge) selon images MODIS, nord de la région IX



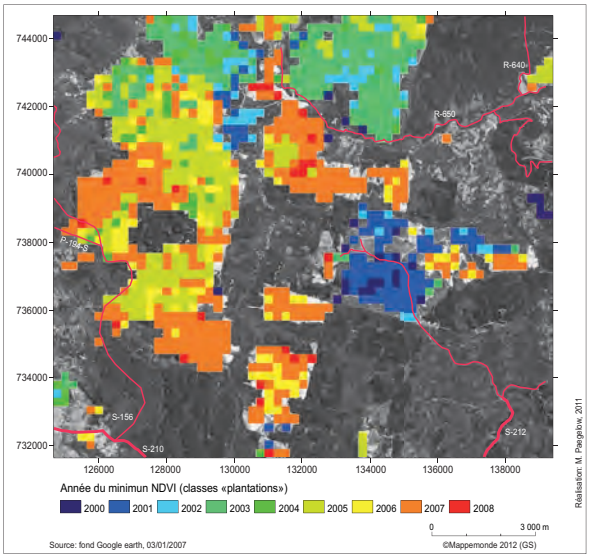
13. Année de minimum de NDVI pour la classe « Coupes forestières »



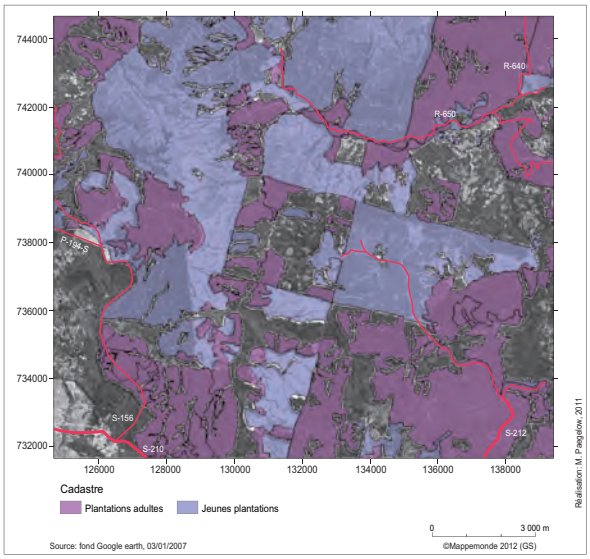
14. Superposition du cadastre forestier, en bleu : jeunes plantations, en violet : plantations adultes



15. Photographie aérienne correspondante (2006) disponible sous Google Earth



16. Superposition des coupes forestières selon MODIS (ici leur année de minimum NDVI) sur la photographie aérienne Google Earth



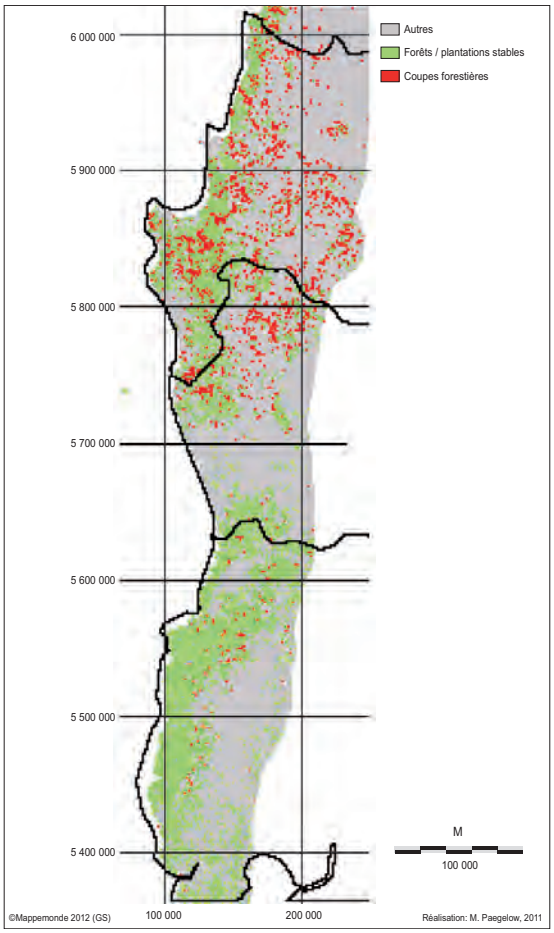
17. Superposition du cadastre forestier sur la photographie aérinne Google Earth



18. Classification MODIS simplifiée (fig. 11) sur photographie aérienne. Les teintes roses correspondent aux coupes visibles sur les deux documents ; les surfaces en rouge foncé traduisent des coupes forestières détectées par MODIS postérieures à la date de la photographie aérienne (2006).

Étant donné la parfaite correspondance entre les différentes sources sur certains secteurs et en tenant compte d'une certaine marge d'erreur dans les résultats de l'analyse d'image satellite, liée aussi bien aux traitements qu'à la résolution spatiale comparativement très faible, il convient de s'interroger sur la signification du cadastre forestier. Ce dernier englobe, à l'échelle de la zone d'étude, plusieurs dates de mise à jour. En outre, il recense l'état du terrain au moment du relevé. Ainsi une plantation ou une forêt récemment coupée est recensée comme sol nu ou terrain vague et comme surface en herbe si la coupe date de quelques mois bien que ces terrains soient très majoritairement destinés à la (re-)plantation.

Les observations sur le terrain avec relevés GPS, réalisés en 2008, confirment les résultats des traitements entrepris sur la série temporelle d'images MODIS : sur 62 relevés GPS — correspondant à 5 transects est-ouest dans les régions VIII, X et XIV — 60 correspondent à la cartographie MODIS. De ces relevés GPS, 35 ont été réalisés en zone de plantation industrielle de pins ou d'eucalyptus : 26 correspondent à la catégorie « Coupe forestière » et 7 à la catégorie « Forêt / Plantation stable » ce qui signifie que la plantation est plus âgée que la première image MODIS (février 2000) ; en seulement 2 cas, l'interprétation des images MODIS a abouti à un résultat erroné. Ajoutons que, sur l'image de la classification, les 26 relevés hors espace forestier (prairies, matorral, cultures) apparaissent correctement (catégorie « Autre ») dans leur totalité.



19. Coupes forestières et forêts/Plantations stables dans la précordillère et cordillère littorales du sud continental chilien : régions de Biobío (VIII), Araucania (IX) et Los Lagos (X, anciennes limites incluant la nouvelle région de Valdivia (XIV)

À l'issue de ces croisements avec l'ensemble des sources statistiques possibles et bien que les résultats obtenus par imagerie MODIS méritent d'être affinés et comportent une marge d'erreur, certes restreinte, en raison de la confusion possible avec les incendies, la télédétection donne lieu à une cartographie fiable et réalisable sur des territoires étendus. La figure 19 représente ainsi une cartographie d'ensemble de l'aire d'étude illustrant le gradient nord–sud du phénomène des plantations.

Conclusion et perspectives

Le recours à l'imagerie MODIS, compatible avec des zones d'étude de vaste ampleur, pour la détection des espaces forestiers et, en particulier, facilite la rapidité de leur détection et de leur cartographie. La fiabilité des traitements d'image mis en œuvre, somme toute assez simples, a été démontrée par comparaison à plusieurs sources et échelles. Si la correspondance au niveau régional et pour l'ensemble des espaces forestiers est quasi parfaite, la surface des coupes forestières détectées par MODIS est légèrement supérieure à celle des plantations recensées dans les statistiques. Cela est imputable à la fois à l'exploitation illégale, aux incendies, aux normes statistiques (occupation du sol au lieu d'usage du sol) et à la conversion d'espaces boisés en pâtures et en terres agricoles. Si la méthode de détection des coupes forestières ne permet pas de discriminer les coupes et les incendies, ces derniers n'induisent qu'une marge d'erreur très limitée. Une comparaison avec le cadastre forestier aboutit à un constat plus contrasté couvrant l'ensemble du champ des possibilités : on va d'une superposition quasi parfaite pour certains secteurs à une contradiction franche à d'autres endroits. Comme pour les autres sources mobilisées, le cadastre illustre de manière exemplaire les limites de l'exercice consistant à croiser et comparer ce qui n'est que partiellement comparable. Enfin, le recours aux photographies aériennes dont la résolution est 250 fois plus élevée, ainsi qu'aux relevés GPS de terrain confirme les résultats obtenus par imagerie satellite.

Une limite constatée dans cette étude est la difficulté de distinguer les plantations des forêts natives sur la seule base de l'indice de végétation à basse résolution spatiale. La solution consisterait à disposer d'une série temporelle d'images plus longue — 10 à 15 ans — supérieure au cycle de rotation des plantations. Les premières images MODIS datant de 2000, une étude entreprise vers 2015 devrait confirmer le potentiel de ce type de capteur pour un suivi environnemental à des échelles allant du régional au continental.

Un autre facteur limitatif de l'étude réside dans la spécificité de la nature des changements d'usage du sol du secteur étudié où les défrichements au profit de nouvelles terres agricoles ou de pâtures constituent un processus très minoritaire. Une application de la méthode exposée à d'autres espaces latino-américains devrait tenir compte de cette dynamique qui est cependant facilement identifiable par son profil temporel NDVI différent.

Cependant, à la lumière des résultats partiels et provisoires exposés, il paraît évident que l'usage de l'imagerie MODIS est particulièrement indiqué pour des études de la dynamique forestière portant sur des territoires vastes dépourvus de cartographies précises ou actualisées. En outre, les comparaisons entre l'imagerie satellite et les différentes statistiques disponibles soulignent aussi les limites inhérentes à ces dernières pour obtenir une quantification et spatialisation actualisées de la dynamique forestière.

Bibliographie

ARMESTO J., LEÓN-LOBOS A., ARROYO M. (1996). « Los bosques templados del sur de Chile y Argentina : Una Isla Biogeográfica ». In ARMESTO J., VILLAGRÁN C., KALIN-ARROYO M., dir. *Ecología de los bosques nativos de Chile*. Santiago de Chile : Editorial Universitaria, 469 p.

ARNOLD F. (1998). *Sustitución de Bosque Nativo en Chile, destrucción de un valioso Recurso Natural*. Santiago de Chile : Comité Nacional Pro Defensa de la Fauna y Flora (CODEFF), 39 p.

BARRUÉ-PASTOR M., dir. (2004). *Forêts et développement durable au Chili : indianité mapuche et mondialisation*. Toulouse : Presses universitaires du Mirail, coll. « Paysage et environnement », 286 p. ISBN : 2-85816-734-6

CATALÁN R., WILKEN P., KANDZIOR A., TECKLIN D., BURSCHEL H. (2005). *Bosques y comunidades del Sur de Chile*. Santiago de Chile : Editorial Universitaria, 359 p. ISBN : 956-11-1829-7

CONAF (1999). *Decreto Ley n° 701 sobre fomento forestal y ley de bosques*. Santiago : Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal, Gerencia de Normativas y Fiscalización, 76 p.

CORREIRA A.H., FORMAGGIO A.R., SHIMABUKURO Y.E., DUARTE V. (2006). « Evaluation of MODIS vegetation indices for detecting deforestation in Amazonia ». *Ambiente & Agua*., vol 1, n° 2, 13 p. http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/25/pdf_274 ; DOI : 10.4136/ambi-agua.12

CORMA (2002). *Chile, País forestal: una realidad que se consolida*. Santiago de Chile : CORMA, 200 p.

DINERSTEIN E., OLSON D., GRAM D., WEBSTER A., PRIMM S., BOOKBINDER M., LEDEC G. (1995). *A conservation assessment of the terrestrial ecoregions of Latin America and the Caribbean*. Washington : The World Bank, USAID, WWF, 129 p. ISBN: 0-8213-3295-3

DONOSO C., LARA A. (1996). « Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro ». In ARMESTO J., VILLAGRÁN C., KALIN-ARROYO M., dir. *Ecología de los bosques nativos de Chile*. Santiago de Chile : Editorial Universitaria, 469 p. ISBN : 956-11-1180-2

DONOSO C. (1998). *Forêts tempérées du Chili et d'Argentine. Variation, structure et dynamique*. Santiago de Chile : Editorial Universitaria.

EASTMAN J.R. (2009). *Idrisi Taiga. Guide to GIS and Image Processing*. Worcester : Clark Labs, 342 p. http://www.uwf.edu/gis/manuals/IDRISI_Taiga/TaigaManual.pdf

ECHEVERRÍA C., COOMES D., SALAS J., REY-BENAYAS J.-M., LARA A., NEWTON A. (2006). « Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests ». *Biological Conservation*, vol. 130, n° 4, p. 481-494. http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006320706000358 ; DOI : 10.1016/j.biocon.2006.01.017

FERREIRA N.C., FERREIRA L.G., HUETE A.R., FERREIRA M.E. (2007). « An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, n° 1-2, p. 47-62. http://dx.doi.org/10.1080/01431160600835861

GRENIER P. (2003). *Des tyrannosaures dans le paradis : la ruée des transnationales sur la Patagonie chilienne*. Nantes : L'Atalante, coll. « Comme un accordéon », 347 p. ISBN : 2-8417-2225-2

KALIN-ARROYO M., CAVIERES L., PEÑALOZA A., RIVEROS M., FAGGI A.M. (1996). « Relaciones fitogeográficas y patrones regionales de riqueza de especies en la flora del bosque lluvioso templado de Sudamérica ». In ARMESTO J., VILLAGRÁN C., KALIN-ARROYO M., dir. *Ecología de los Bosques Nativos de Chile*. Santiago de Chile : Editorial Universitaria, p. 71-99

LARA A., SOLARI M. E., RUTHERFORD P., THIERS O., TRECAMAN R. (1999). Couverture de la Végétation Originelle de l'Écorégion des Forêts Valdiviennes au Chili vers 1550. Université Austral de Chile – WWF. Contrat Nº FB49. Project "Preparation of a Bi-National Vegetation Map of The Valdivian Eco Región-Chilena Portion"

MORTON D.C., DEFRIES R.S., SHIMABUKURO Y.E., ANDERSON L.O., DEL BON ESPIRÍTO-SANTO F., HANSEN M., CAROLL M. (2005). « Rapid Assessment of Annual Deforestation in the Brazilian Amazon Using MODIS Data ». *Earth Interactions*, vol. 9, p. 1-22. DOI : 10.1175/EI139.1

MYERS N., MITTERMELER C.G., DA FONSECA G.A.B., KENT J. (2000). « Biodiversity hotspots for conservation priorities ». *Nature,* 403, p. 853-585. http://www.nature.com/nature/journal/v403/n6772/abs/403853a0.html ; DOI : 10.1038/35002501

MUÑOZ PEREZ C. (2005). « Alerce: El Padre Forestal de Chile ». Santiago de Chile: Chile Forestal, n° 312, p.30-35.

QUINTANILLA V. (1995). *Los Bosques templados costeros de Chile. Opúsculo explicativo del mapa de la vegetación (1:500.000)*. Toulouse : Université Toulouse III, Laboratoire d'Écologie Terrestre, 59 p.

RICHARDS J.A, JIA X. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. New York. Springer. ISBN: 3-540-64860-7

SHIMABUKUDO Y.E., DUARTE V., ANDERSON L.O., ARAI E., VALERIANO D.M., DEL BON ESPIRÍTO-SANTO F., AULICINTO L.C.M. (2004). « Deforestation detection in Brazilian Amazon region in a near real time using Terra MODIS daily data ». Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage, USA. http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370436

TORO BALBONTÍN 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*. Toulouse : Mémoire de Master 2, Université de Toulouse 2. 98 p.

WILKEN P. (1998). *La Sustentabilidad forestal en Chile. Aporte a una política integral de los bosques nativos y plantaciones exóticas*. Santiago de Chile : CODEFF. 62 p.

WWF Chile (2005). « Resumen visión para la biodiversidad de la Ecoregión de los bosques templados lluviosos de Chile y Argentina ». Programa Ecoregión Valdiviana. 15 p. http://awsassets.panda.org/downloads/resumen_vision_biodiversidad.pdf

Sources

CONAF, CONAMA, BIRF (1999). *Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales de Chile, Informe nacional con variables ambientales*. Chile. http://www.bcn.cl/carpeta_temas_profundidad/ley-bosque-nativo/archivos-pdf/Catastro.pdf

CONAF (2008). « Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales de Chile, Informe nacional con variables ambientales ». Actualisation 2006/07 du cadastre

de 1997/98 pour les régions VIII, IX, X et XIV. Données numériques fournies par la CONAF. Non publié.
CONAF (2011). *Estadisticas Occurancia y Dano por Comunas 1985 a 2011*. http://www.conaf.cl/proteccion/seccion-estadisticas-historicas.html
GOFC-GOLD (2010). Global Observation of Forest and Land Cover dynamics. http://www.fao.org/gtos/gofc-gold
INE (2007). *Compendio estadístico año 2007*. http://www.ine.cl
INFOR (1989). « Anuario forestal 1988 ». *Boletín Estadístico*, 11
INFOR (2005). « Anuario forestal 2004 ». *Boletín Estadístico,* 101
INFOR (2008). « Anuario forestal 2008 ». *Boletín Estadístico,* 121. http://biblioteca1.infor.cl:81/DataFiles/24888.pdf
NASA (2010). MODIS WEB: http://modis.gsfc.nasa.gov/

Notes

1. Cette étude a été soutenue par le programme ECOS-Sud Chili n° C07H03 intitulé « La forêt de la cordillère de la Côte continentale dans le sud du Chili : Dynamiques contemporaines et modélisations prospectives ».
2. Selon P.J. Alaback (Kalin-Arroyo *et al.*,1996), la forêt humide tempérée de l'hémisphère sud est définie par des précipitations annuelles supérieures à 1 400 mm, dont 10 % durant les mois d'été, une isotherme de janvier égale à 16° C et l'absence de feux naturels.
3. Le Japon produit 1,4 million de tonnes de papier en 1953 et 24,1 millions de tonnes trente ans plus tard. […] En 1994, 70% du commerce mondial de copeaux se fait en direction du Japon (Grenier, 2003).
4. Ley n° 20.283, Ministerio de Agricultura « Ley de recuperación de bosque nativo y fomento forestal ».

Adresses des auteurs

Martin Paegelow, Université Toulouse 2-Le Mirail, UMR 5602 GEODE. Courriel : paegelow@univ-tlse2.fr
Nicolas Maestripieri, Université Toulouse 2-Le Mirail, UMR 5602 GEODE. Courriel : maestrip@univ-tlse2.fr
Dario Toro Balbontin, Université Toulouse 2-Le Mirail, UMR 5602 GEODE. Courriel : dtoro@cncr.cl
Nicolas Saez Villalobos, Professeur, Universidad de Los Lagos, Osorno, Chili. Courriel : nsaez@ulagos.cl