

**Revue
Française de
Photogrammétrie et de
Télédétection**

Vol. 225 (2023)

Numéro généraliste



**Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection**



**Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection**



**Société
Française de
Photogrammétrie
et de Télédétection**

Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection

© Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection
Association formée sous le régime de la loi de 1901
Siège social : 73, avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex
e-mail : sfpt-bureau@sfpt.fr – web : sfpt.fr & rfpt.sfpt.fr

Rédactrice en chef : **Ewelina RUPNIK**

COMITE DE REDACTION

Jean-Stéphane BAILLY AgroParisTech	Cécile GOMEZ IRD Inde	Margareth SIMÕES EMBRAPA Brésil
Touria BAJJOUK IFREMER	Dominique GUYON INRA	Elisabeth SIMONETTO ESGT-CNAM
Agnès BEGUE CIRAD	Rafaele HENO IGN	Silva VALERO CESBIO
Thomas CORPETTI LETG-Rennes, UMR6554	Florent LAFARGE INRIA	Jan Dirk WEGNER ETH Zürich Suisse
Benoît DEFFONTAINES Université Gustave Eiffel UGE	Luc LAPIERRE Retraité, CNES	Olivier DE JOINVILLE Retraité DGAC
Nicolas DELBART Université Paris-Diderot	Marie-José LEFEVRE-FONOLLOSA Retraîtée, CNES	Pierre-Louis FRISON LaSTIG, Univ Gustave Eiffel
Jean-Marc DELVIT CNES	Jérôme PICARD CNRS-UMR 8586 PRODIG	Michael TONON Airbus
Sylvie DURRIEU INRAE	Laurent POLIDORI CESBIO	Aurélié SAND CNES
Cyrielle GUÉRIN CEA	Jean-Paul RUDANT LaSTIG, Univ Gustave Eiffel	David SHEEREN ENSAT

BUREAU DE LA SFPT

Présidente :	Aurélié SAND
Vice-Président :	Jean-Paul RUDANT
Secrétaire Général :	Michael TONON
Trésorier :	Luc LAPIERRE
Vice-trésorière :	Elisabeth SIMONETTO
Responsable du numérique :	Philippe ALBERT

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Philippe ALBERT GEOFIT	Olivier DE JOINVILLE Retraité DGAC	Aurélié SAND CNES
François BECIRSPAHIC IGN	Jean-Marc LAHERRÈRE CNES	Maxime SEGUIN Ministère de la Culture
Jean-Marc DELVIT CNES	Luc LAPIERRE Retraité, CNES	Elisabeth SIMONETTO ESGT / CNAM
Jean Baptiste FERET INRAE	Clément MALLET LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	Sylvia SYLVANDER CNES
Cyrielle GUERIN CEA	Sandrine MATHIEU ACRI-ST	Michaël TONON Airbus
Dominique GUYON INRAE	Nicolas PAPANODITIS LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	Cécile VIGNOLLES CNES
Raphaële HÉNO IGN	Jean-Paul RUDANT LaSTIG, UGE, IGN-ENSG	

CONTRIBUTION DE SPOT WORLD HERITAGE AUX SÉRIES TEMPORELLES D'OBSERVATIONS SATELLITAIRES OPTIQUES ET DÉCAMÉTRIQUES DES MONTAGNES FRANÇAISES

Zacharie Barrou Dumont¹, Simon Gascoin¹, Jordi Inglada¹
¹CESBIO, université de Toulouse, CNES/CNRS/IRD/INRAE/UPS

Résumé

Cet article présente la quantification de l'apport en termes de revisite, de la collection d'images historiques SPOT du pôle Theia, issues du programme SPOT WORLD HERITAGE. Cette quantification est faite par rapport aux archives d'images dans le visible et de résolutions spatiales décimétriques Landsat et ASTER sur les montagnes françaises pour la période 1986-2015. Durant cette période, les satellites SPOT 1 à 5 ont largement contribué au nombre d'acquisitions d'images, la collection Theia participant jusqu'à 36.6 % des dates d'acquisitions entre 1996 et 2005. La mise à la disposition du public de cette collection d'images exploitables offre une nouvelle fenêtre sur les dernières décennies pour des applications variées en écologie, hydrologie et aménagement du territoire.

Mots-clés: Spot World Heritage, Landsat, ASTER, Pyrénées, Alpes, fréquences temporelles

Abstract

This paper presents the quantification of the revisit contribution, of the Theia center's collection of historical SPOT images from the SPOT WORLD HERITAGE program in relation to Landsat's and ASTER's archives of optical images with decametric spatial resolutions over the French mountains between 1986 and 2015. During this period, the SPOT 1 to 5 satellites largely contributed to the number of acquisitions, with the Theia collection contributing up to 36.6% of the acquisition dates between 1996 and 2005. Making this collection of exploitable images available to the public offers a new window on the last decades for various applications in ecology, hydrology and land planning.

Keywords: Spot World Heritage, Landsat, ASTER, Pyrenees, Alps, temporal frequencies

1. Introduction

L'observation de la Terre par satellite est fondamentale, notamment pour mesurer l'évolution des écosystèmes sous la pression anthropique. Le programme américain Landsat, lancé en 1972, est emblématique à cet égard, chacun des satellites de Landsat 1 à Landsat 9 capturant des images de surfaces continentales avec des revisites de 8 ou 16 jours. Au début du programme, les données devaient être transmises à des stations de réception réparties à travers le monde. Avec les stations externes situées aux États-Unis, gérées par des coopérateurs internationaux (CI), 4 millions d'images se retrouvèrent stockées chez des CI en 2006, contre 1.9 millions dans les archives de l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS) [Goward *et al.*, 2006]. Cet éparpillement poussa l'USGS à lancer en 2010 la consolidation de l'archive globale Landsat (LGAC), qui regroupa les données en une archive centralisée, permettant d'augmenter significativement les profondeurs temporelles du Canada, de l'Australie, de la Chine, de l'Europe et de l'Afrique du Sud [Wulder *et al.*, 2016]. D'abord payantes, ces données de 15 à 120 mètres de résolutions, ortho-rectifiées et prêtes à être analysées, devinrent gratuites et ouvertes au public en 2008 [Woodcock *et al.*, 2008].

Cette ouverture, couplée avec le développement du *cloud computing*, mena à une forte augmentation de l'usage des images Landsat dans des études nécessitant des séries temporelles [Zhu *et al.*, 2019], notamment la cartographie à l'échelle mondiale des habitations humaines [Pesaresi *et al.*, 2016], du changement annuel des forêts entre 2000 et 2012 [Hansen *et al.*, 2013] et des lacs entre 1984 et 2015 [Pekel *et al.*, 2016], le suivi de zones humides en Chine sur quatre décennies [Yang *et al.*, 2020], ainsi que d'autres applications en éducation, aide humanitaire, agriculture, législation, assurances, sécurité du territoire, urbanisation, etc. [Miller *et al.*, 2013]. La convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques est en partie basée sur les données Landsat pour définir la convention de réduction des émissions produites par la déforestation et la dégradation des forêts (REDD+) [De Sy *et al.*, 2012].

Toutefois, la fréquence de huit jours minimum entre chaque image utile (en combinant deux satellites Landsat) n'est pas assurée en raison des difficultés techniques, de contraintes de mission et de la présence de nuages dans la zone d'étude. Une analyse réalisée avant la LGAC de la disponibilité des images ETM+ de Landsat 7 archivées aux États-Unis entre 2000 et 2002, montre qu'une même scène était acquise en moyenne huit fois par an, ce qui représente un tiers du nombre maximal possible d'acquisitions [Ju and Roy, 2008]. Une étude plus récente sur la

variabilité temporelle du nombre de pixels Landsat 1-8 utilisables a montré qu'après le filtrage les pixels par la présence de nuage, ombre de nuage, neige et glace, la majeure partie du monde incluant la France voyait une réduction d'au moins 30 % la quantité de données disponibles [Zhang *et al.*, 2022]. Le programme Landsat seul peut donc être insuffisant pour des applications nécessitant des fréquences de revisite encore plus élevées ou étant facilement affectées par la présence de nuages. Cela est par exemple le cas pour l'obtention de dates précises de stades phénologiques et de fenêtres temporelles critiques à la gestion des récoltes [Deines *et al.*, 2019] ou pour le suivi du manteau neigeux [Gascoin *et al.*, 2019].

L'USGS donne aussi un accès gratuit aux données de l'instrument *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) du satellite Terra, qui capture depuis 2000 des images avec des résolutions de 15 à 90 mètres. L'instrument ASTER ne permet cependant pas d'acquisitions systématiques et ne collecte en moyenne que 8 minutes de données par orbite héliosynchrone de 99 minutes, soit 650 scènes par jour [Abrams, 2002].

Avec le programme Satellites pour l'observation de la Terre (SPOT) [<https://spot.cnes.fr>], le Centre national d'études spatiales français (CNES) a lancé entre 1986 et 2002 cinq satellites d'observation de la Terre. Le programme fut ensuite repris par Airbus *Defense and Space* (DS) avec les SPOT 6 et 7. D'abord commercialisées par Airbus DS Geo (anciennement Spot Image), les images des SPOT 1 à 5 de 1986 à 2015, avec des résolutions de 5 à 20 mètres, sont en libre accès depuis 2015 *via* le programme SPOT World Heritage (SWH) [Nosavan *et al.*, 2017]. Un travail d'archivage et de regroupement fut mené sur les 25 millions de produits SPOT regroupés dans le catalogue REGARDS du CNES d'images de niveau 1A, c'est-à-dire non ortho-rectifiées (<https://regards.cnes.fr/>). En outre, ce programme permet le passage de 100.000 images SPOT au niveau de traitement 1C, c'est-à-dire après ajustement radiométrique et ortho-rectification. Le pôle de données et de services surfaces continentales Theia (<https://www.theia-land.fr/>) abrite ces données ainsi que d'autres images élevées au niveau 1C par la suite par le CNES ou lors de commandes de contributeurs internationaux. Au 1er novembre 2022, on dénombrait ainsi 112.687 images 1C disponibles, principalement au-dessus du territoire français et de l'Afrique.

Tout comme Landsat, SPOT répondait à un besoin de séries temporelles à résolution décimétrique pour des applications variées [Yang *et al.*, 2017], [Davranche *et al.*, 2010], [El Hajj *et al.*, 2009], [Polychronaki and Gitas, 2012]. SWH ouvre donc des perspectives nouvelles vis-à-vis de sujets

pour lesquels les fréquences temporelles de revisite de Landsat restent insuffisantes. Par exemple, [Latifi *et al.*, 2014] ont utilisé cinq images de Landsat 5 et 7 et six images de SPOT 2 et 4 pour l'extraction sur onze ans d'infestations de scolytes. Malgré son potentiel, l'archive SWH est encore méconnue et peu exploitée dans le domaine académique. Cela est probablement dû au fait qu'à la différence de Landsat, il est difficile d'estimer quelle est la revisite moyenne des images SPOT, puisque les acquisitions ont été réalisées à la demande, et non pas en mode systématique.

Dans le cadre du projet TOP « *Trajectories of agro-Pastoral systems in mountains: land management adaptations to climate, ecological and socio-economic changes* » (<https://anr.fr/Projet-ANR-20-CE32-0002>) financé par l'Agence nationale de la recherche, nous avons évalué l'apport en termes de revisite, de l'archive SPOT sur les massifs montagneux français. Les montagnes sont des territoires qui évoluent rapidement, à la fois sous l'effet des changements globaux et des pratiques locales. Ainsi, la déprise agricole entamée en France au début du XXe siècle a-t-elle causé une augmentation moyenne de l'étendue des forêts et une concentration des zones de pâturage. De fortes disparités régionales persistent néanmoins [Vicente-Serrano *et al.*, 2004]. Par ailleurs, le réchauffement climatique a entraîné une réduction des glaciers en altitude [Vidaller *et al.*, 2021], mais les tendances sur l'enneigement sont plus difficiles à détecter [López-Moreno, 2020]. Il est donc nécessaire de mobiliser au maximum les observations disponibles pour documenter l'évolution de la pression exercée sur les écosystèmes de montagne et comprendre leur évolution.

L'objectif de ce travail est donc de quantifier l'apport en termes de revisite des images historiques SPOT 1-5 sur les régions montagneuses françaises de 1986 à 2015. Ce travail se limite à la collection Theia, c'est-à-dire aux produits disponibles au niveau 1C (ortho-rectifiés) qui sont adaptés aux analyses impliquant le traitement massif de séries temporelles, contrairement aux produits au niveau 1A. Nous ne prenons pas en compte l'effet des nuages qui réduisent la revisite effective. Ce type d'évaluation a notamment été réalisé par Li et Roy (2017), afin d'évaluer le gain de revisite introduit par la mission Sentinel-2 depuis 2015. Dans le cas de SPOT, cette étude préalable devrait permettre de mieux faire connaître la plus-value de l'archive SWH auprès de la communauté scientifique française.

2. Données satellitaires

2.1. Landsat et ASTER

La collection 2 de l'USGS contient des données Landsat à trois niveaux de traitement [USGS, 2021]. Les produits de niveau 1 (L1) sont ortho-rectifiés et disponibles pour les Landsat 1 à 9 en comptes numériques pouvant être convertis en réflectance ou luminance au sommet de l'atmosphère. Les produits de niveau 2 (L2) sont disponibles pour les Landsat 4 à 9 en réflectances et températures de surface, et sont produits à partir des niveaux 1 ayant un angle zénithal solaire de moins de 76 degrés. Les produits de niveau 3 sont des données biophysiques prêtes pour analyse (par exemple : fraction d'enneigement). Les produits L1 de bonne qualité et propices aux séries temporelles sont classés Tier 1. Les autres, classés Tier 2, répondent au même standard radiométrique, mais n'atteignent pas les mêmes spécifications géométriques. Les produits ayant une bande en moyen infrarouge MIR (aussi appelé SWIR pour Short Wave InfraRed) n'apparaissent qu'à partir du lancement de Landsat le 4 en juillet 1982. Chaque produit couvre une surface de taille approximative de 173x183 km². Nous avons utilisé tous les produits L1 Tier 1 et Tier 2 de 1986 à 2015 (Landsat 4-8).

La collection ASTER contient les produits de niveau 1T ortho-rectifiés en luminance au niveau de l'instrument avec 14 bandes dans le visible et l'infrarouge (incluant le MIR et le thermique) [USGS, 2020]. En raison d'un dysfonctionnement, les bandes MIR ne sont plus disponibles depuis le 1er avril 2008. Chaque produit couvre une scène de 60x60 km².

L'USGS permet, *via* l'interface graphique EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), de télécharger dans un fichier de métadonnées les coordonnées des sommets des scènes présentes dans une zone et une période d'intérêt. Pour notre étude, nous avons extrait en octobre 2021 les coordonnées des sommets de toutes les scènes prises le jour par les Landsat 4 à 8 de niveau L1 Tier 1 et Tier 2, et par ASTER de niveau 1T et couvrant, complètement ou partiellement, les Pyrénées, les Alpes et le Massif Central, dans le territoire français, entre 1986 et 2015. Une couche vectorielle a été produite à partir des sommets pour chaque scène, et enregistrée dans un fichier *shapefile*.

2.2. SPOT World Heritage

La plateforme de distribution SWH du pôle Theia (<https://www.theia-land.fr/en/product/spot-world-heritage/>) contient des produits au niveau 1C. Directement téléchargeable depuis le site, chaque produit contient une image multispectrale ortho-rectifiée couvrant une scène de 60x60km² et en réflectances au sommet de l'atmosphère avec trois bandes verte, rouge et proche infrarouge de 10 mètres (SPOT-5) à 20 mètres de

résolution (SPOT 1-4) et une bande de 20 mètres de résolution dans le MIR (SPOT 4-5). Chaque produit vient aussi avec un fichier de métadonnées et des masques de saturations, de *nodata*, de données géophysiques (eau, nuages, neige) et de pixels utiles [THEIA, 2017]. Une vérification des produits au cours de cette étude a montré que la validité des masques n'est pas assurée. Ceux-ci ne sont donc pas pris en compte. Pour l'analyse, les produits SPOT 1 à 5 intersectant les Pyrénées, les Alpes ou le Massif Central dans le territoire français pendant la période de 1986 à 2015, ont été extraits de la plateforme Theia en octobre 2022. Pour chaque produit, nous avons extrait les sommets de la scène présente dans l'image (en excluant les *nodata*) et produit une couche vectorielle enregistrée dans un fichier *shapefile*.

3. Méthode

3.1. Cartographie des acquisitions

La figure 1 représente un quadrillage de 5x5 km² produit avec QGIS *via* l'intersection de la couche vectorielle « *world countries* » [ESRI, 2021] et de la couche vectorielle « *European mountain area* » [EEA,2008]. La taille minimale des carrés tronqués aux bordures des couches vectorielles est de 24 km². Pour chaque groupe, les couches vectorielles des acquisitions ont été appliquées au quadrillage, produisant un quadrillage où chaque carré représente la quantité d'acquisitions qui chevauchent au moins 50 % de la surface.

Bien qu'il soit possible d'extraire la géométrie des scènes Landsat dans Earth Explorer, la plateforme ne permet pour ASTER que l'extraction des sommets du raster contenant à la fois la surface utile et des *nodata* (figure 2). Cela conduit à la surestimation du nombre d'acquisitions ASTER dans les carrés de 5x5 km². La figure 2 montre aussi comment des scènes Landsat peuvent se chevaucher le long d'un tracé d'orbite (hachures rouges) et entre des tracés d'orbites adjacentes (hachures vertes). Alors qu'un chevauchement vert se fait entre différentes dates et augmente la fréquence de revisite, le chevauchement rouge de deux scènes consécutives le long d'une même trace d'orbite correspond à un doublon. Pour éviter de surestimer le nombre d'acquisitions d'images Landsat dans les zones rouges, nous avons fusionné les géométries de scènes prises le même jour par le même instrument. La même chose a été réalisée avec les données ASTER et SPOT. Cette méthode permet de ne pas compter les doublons dans le quadrillage. Nous comptons toutefois les acquisitions prises à la même date par des instruments différents, comme HRG de SPOT 5 et OLI de Landsat 8.

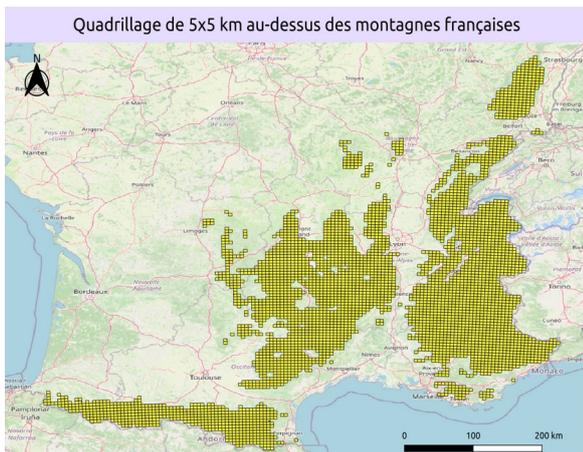


Figure 1: Quadrillage 5x5 km² des montagnes françaises

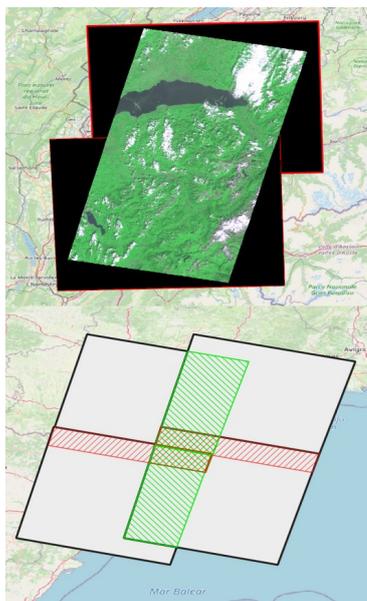


Figure 2: Haut: rasters de 2 scènes ASTER consécutives; Bas: Chevauchements le long d'un tracé (rouge) et entre deux tracés adjacents (vert) de scènes Landsat.

3.2. Cartographie de la contribution de SWH

On quantifie la contribution des données SWH du catalogue Theia aux séries temporelles d'observation satellitaires optiques en calculant, pour chaque carré du quadrillage et pour les périodes 1986-1995, 1996-2005, et 2006-2015, le rapport entre le nombre de dates où seul des acquisitions SWH sont présentes, et le nombre de dates où figurent des acquisitions de Landsat, ASTER ou de SWH.

La bande MIR jouant un rôle clé dans la détection de la neige et des surfaces en eau, nous avons créé un troisième groupe de données regroupant les scènes avec cette bande, et avons calculé la contribution de SWH pour la période 1986-2015.

4. Résultats

4.1. Cartographie des acquisitions

La carte inférieure de la figure 3 montre la distribution des acquisitions de scènes des montagnes françaises par les satellites SPOT 1 à 5 disponibles dans le catalogue THEIA au format L1C sur la période 1986-2015. Les secteurs comportant le plus grand nombre d'acquisitions sont situés dans les Pyrénées centrales, les Alpes françaises occidentales et le massif des Vosges. La moitié sud-est des alpes contient très peu de donnée (<100), car la collection SWH de Theia ne contient pas d'acquisitions prises dans cette zone avant 2009. La carte supérieure montre la distribution de l'ensemble des acquisitions utilisées (Landsat, ASTER, SWH) lors de l'étude.

La figure 3 nous donne déjà un premier aperçu de l'apport de SWH, avec les Pyrénées centrales affichant le maximum d'acquisition dans les deux cartes. Le catalogue Theia contribue pour 1 % à 30 % de l'ensemble des données disponibles dans chaque carré.

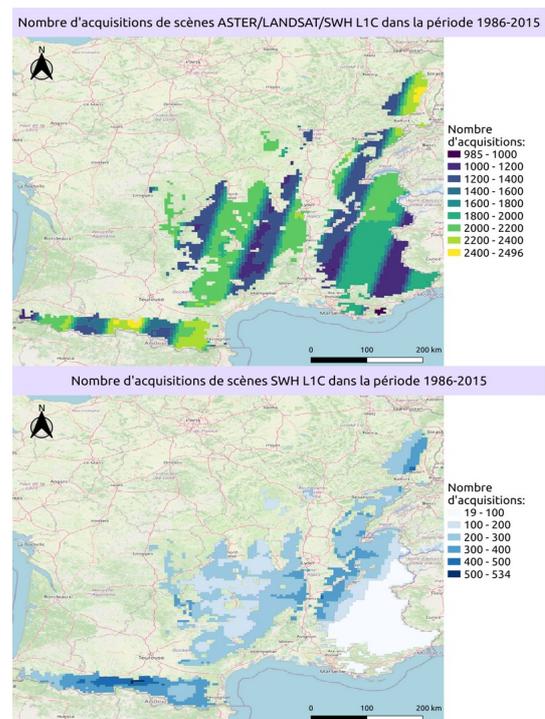


Figure 3 : Distribution des acquisitions dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015. Carte supérieure : collections SWH de THEIA, Landsat, et ASTER. Carte inférieure : collection SWH de THEIA.

4.2. Cartographie de la contribution de SWH

La carte supérieure de la figure 4 indique, pour chaque carré du quadrillage, le nombre de dates dans la période 1986-2015 auxquelles une ou des images avec bande MIR ont été acquises par Landsat, ASTER ou SWH. La carte inférieure indique le pourcentage de ces dates auxquelles seules des images SWH ont été acquises. Dans les Pyrénées ainsi que dans les Alpes occidentales, SWH contribue jusqu'à 19 % des dates avec acquisitions. Le pourcentage de contribution est plus fort en dehors des zones de chevauchement des scènes Landsat d'orbites adjacentes.

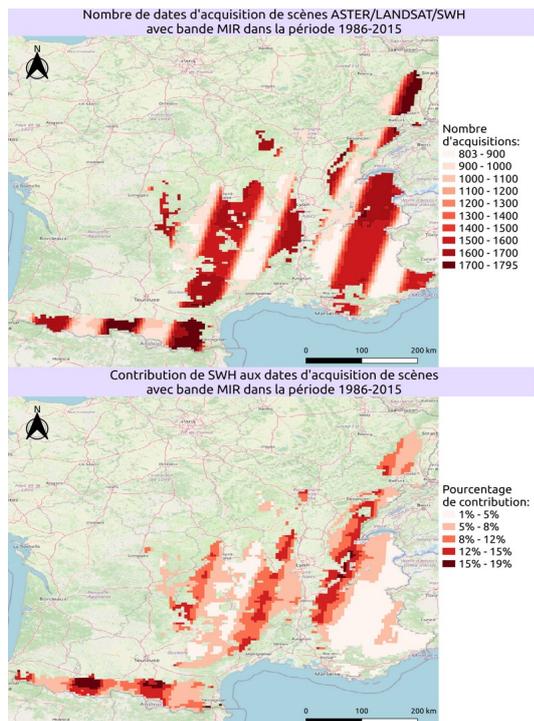


Figure 4 : Contribution de SWH aux acquisitions avec bande MIR dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015. Carte supérieure : Nombre de dates d'acquisitions SWH de THEIA, Landsat, et ASTER. Carte inférieure : Pourcentage des dates acquises seulement par SWH.

Pour les périodes 1986-1995, 1996-2005, et 2006-2015, la figure 5 indique, pour chaque carré du quadrillage, le nombre de dates auxquelles une ou des images ont été acquises par Landsat,

ASTER ou SWH, ainsi que le pourcentage de ces dates auxquelles seules des images SWH ont été acquises. Le sud-est des Alpes françaises est absent pour les périodes avant 2009 du fait de l'absence, à ce jour, de données SWH dans la collection Theia. Nous obtenons une moyenne de 11.2 % et un maximum de 32.7 % de contributions pour 2006-2015 (figure 5a), une moyenne de 16.8 % et un maximum de 36.6 % pour 1996-2005 (figure 5c), et une moyenne de 14.3 % et un maximum de 29.1 % pour 1986-1995 (figure 5e). Le nombre de dates d'acquisition a beaucoup augmenté entre 1986-1995 (figure 5f) et 1996-2005 (figure 5d), en passant d'une moyenne de 38.7 dates par an à 53.6 dates par an. Bien que l'on puisse percevoir une augmentation des dates d'acquisitions dans la période 2006-2015 (figure 5b), avec une moyenne de 55.8 dates par an, les valeurs maximales restent entre 700 et 800 dates (avec comme exception le centre des Pyrénées, qui peut atteindre 815 dates). Cela équivaut à des fréquences temporelles de 70 à 80 dates d'acquisitions par année, dans des régions où la contribution du catalogue Theia peut atteindre 20 %, soit 14 à 16 dates par années.

5. Discussion

Les résultats de cette étude ne tiennent pas, compte du contenu de chaque acquisition (pixels sans données, nuages). Il a été estimé qu'environ 50 % des pixels de l'instrument MODIS, dans les scènes au-dessus des Pyrénées, étaient masqués par des nuages entre 2000 et 2015 [Gascoin *et al.*, 2015]. On peut également noter la panne « SLC-off » de Landsat 7 qui, depuis 2003, a réduit à 78 % la quantité de pixels disponibles dans chaque scène [USGS, 2003]. Ainsi, il faut s'attendre à trouver moins de données disponibles dans les zones d'intérêt que le nombre d'acquisitions présentées dans cet article. Cependant, les images SPOT contiennent probablement moins de pixels nuageux que les images Landsat, puisque les images SPOT étaient acquises lorsque les conditions étaient jugées favorables par l'opérateur. L'intégralité du catalogue SWH n'étant pas encore disponible au niveau 1C, le CNES a mis en place un outil en ligne permettant à l'utilisateur de passer des images SWH 1A au niveau 1C (<https://swh-2a-carto.fr/>).

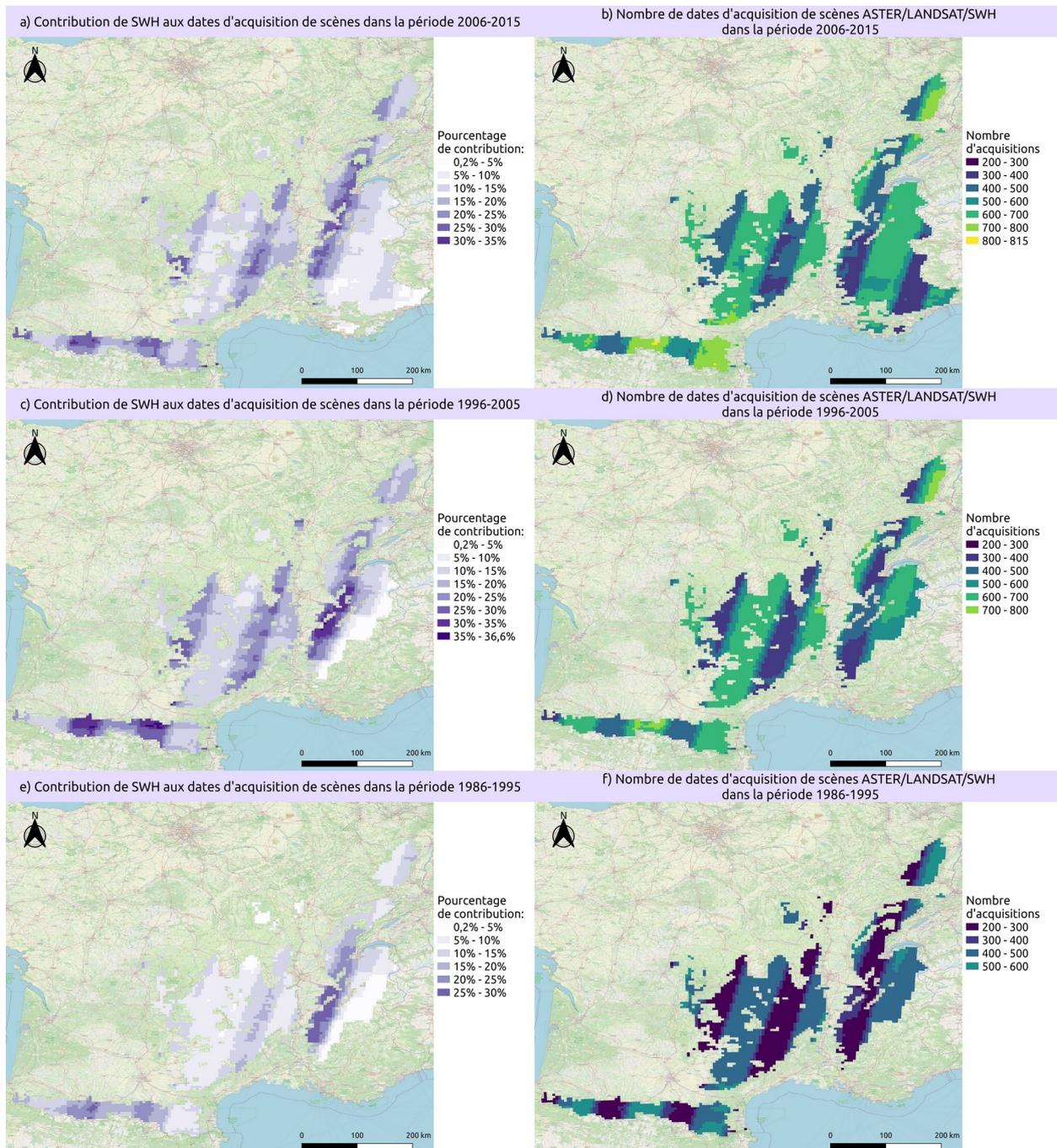


Figure 5 : Contribution de SWH aux acquisitions dans les montagnes françaises entre 1986 et 2015.

Gauche : Pourcentages de contribution aux dates d'acquisition pour les périodes a) 2006-2015 c) 1996-2005 d) 1986-1995.
 Droite : Nombre de dates d'acquisition de Landsat, ASTER et SWH pour les périodes b) 2006-2015 d) 1996-2005 f) 1986-1995.

6. Conclusion

Les régions de montagnes sont des témoins particulièrement sensibles des changements globaux. Le programme SWH augmente considérablement le nombre d'images optiques disponibles sur les massifs français en complément des archives Landsat et ASTER. En particulier, au cours de la décennie 1996-2005, la collection Theia peut contribuer jusqu'à 36,6 % du nombre de dates d'acquisition dans certains

secteurs. La revisite temporelle accrue qui en résulte ouvre des perspectives nouvelles permettant d'étudier les changements environnementaux complexes qui sont à l'œuvre dans ces territoires, comme la dynamique de l'enneigement, l'évolution des surfaces agricoles, du couvert forestier, les inondations, etc. La répartition des données dans la collection Theia n'est pas représentative de l'archive complète de SWH, qui est disponible dans le catalogue REGARDS, et une étude similaire pourrait être

menée à l'échelle globale afin d'identifier les régions et les thématiques qui bénéficieraient particulièrement de cette nouvelle source de données.

Remerciements

Ce travail est financé par l'Agence nationale de la recherche Trajectoires des systèmes agropastoraux en montagne : adaptation des pratiques aux changements climatiques, écologiques et socio-économiques - TOP ANR-20-CE32-0002).

Références

Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B., 2002. ASTER user handbook, version 2. Jet propulsion laboratory 4800, 135.

Davranche, A., Lefebvre, G., Poulin, B., 2010. Wetland monitoring using classification trees and SPOT-5 seasonal time series. *Remote Sens. Environ.* 114, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.009>

De Sy, V., Herold, M., Achard, F., Asner, G.P., Held, A., Kellndorfer, J., Verbesselt, J., 2012. Synergies of multiple remote sensing data sources for REDD+ monitoring. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 696-706. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.013>

Deines, J.M., Kendall, A.D., Crowley, M.A., Rapp, J., Cardille, J.A., Hyndman, D.W., 2019. Mapping three decades of annual irrigation across the US High Plains Aquifer using Landsat and Google Earth Engine. *Remote Sens. Environ.* 233, 111400. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111400>

El Hajj, M., Bégué, A., Guillaume, S., Martiné, J.-F., 2009. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices — The case of sugarcane harvest on Reunion Island. *Remote Sens. Environ.* 113, 2052-2061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.009>

ESRI, 2021. Countries WGS84 [WWW Document]. https://hub.arcgis.com/datasets/a21fdb46d23e4ef896f31475217cbb08_1?geometry=29.738,-86.311,5.832,89.339 (accessed 4.27.21).

European Environment Agency EEA, 2008, European Mountain Areas [WWW Document], <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/european-mountain-areas> (accessed 1.5.22).

Gascoïn, S., Grizonnet, M., Bouchet, M., Salgues, G., Hagolle, O., 2019. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data 22.

Gascoïn, S., Hagolle, O., Huc, M., Jarlan, L., Dejoux, J.-F., Szczypta, C., Marti, R., Sánchez, R., 2015. A snow cover climatology for the Pyrenees from MODIS snow products. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2337-2351. [https://doi.org/10.5194/hess-](https://doi.org/10.5194/hess-19-2337-2015)

19-2337-2015

Goward, S., Arvidson, T., Williams, D., Faundeen, J., Irons, J., Franks, S., 2006. Historical Record of Landsat Global Coverage. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72, 1155-1169. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1155>

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O., Townshend, J.R.G., 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* 342, 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Ju, J., Roy, D.P., 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. *Remote Sens. Environ.* 112, 1196-1211. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.08.011>

Latifi, H., Fassnacht, F.E., Schumann, B., Dech, S., 2014. Object-based extraction of bark beetle (*Ips typographus* L.) infestations using multi-date LANDSAT and SPOT satellite imagery. *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ.* 38, 755-785. <https://doi.org/10.1177/0309133314550670>

Li, J., Roy, D., 2017. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sens.* 9, 902. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>

López-Moreno, J.I., Soubeyrou, J.M., Gascoïn, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C., Morin, S., 2020. Long-term trends (1958-2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology* 40, 6122-6136. <https://doi.org/10.1002/joc.6571>

Miller, H.M., Richardson, L.A., Koontz, S.R., Loomis, J., Koontz, L., 2013. Users, uses, and value of Landsat satellite imagery: results from the 2012 survey of users (USGS Numbered Series No. 2013-1269), Users, uses, and value of Landsat satellite imagery: results from the 2012 survey of users, Open-File Report. U.S. Geological Survey, Reston, VA. <https://doi.org/10.3133/ofr20131269>

Nosavan, J., Moreau, A., Masse, A., Chausserie-Laprée, B., Caillet, C., 2017. Spot world heritage: spot 1-5 data curation and valorization with new enhanced swm products.

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., Belward, A.S., 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>

Pesaresi, M., Ehrlich, D., J. Florczyk, A., Freire, S., Julea, A., Kemper, T., Syrris, V., 2016. The global human settlement layer from landsat imagery, in: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Presented at the

- 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 7276–7279. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730897>
- Polychronaki, A., Gitas, I.Z., 2012. Burned Area Mapping in Greece Using SPOT-4 HRVIR Images and Object-Based Image Analysis. *Remote Sens.* 4, 424–438. <https://doi.org/10.3390/rs4020424>
- THEIA, 2017, Description des produits muscate l1c spot world heritage [WWW Document]. https://www.theia-land.fr/wp-content/uploads/2018/12/THEIA-NT-411-0406-CN_Ed0100_20171025.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS, 2003, Preliminary Assessment of the Value of Landsat 7 ETM+ Data following Scan Line Corrector Malfunction [WWW Document]. https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/SLC_off_Scientific_Usability.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS, 2020, AST_L1T Product User's Guide [WWW Document]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/647/AST_L1T_User_Guide_V3.pdf (accessed 31.10.22).
- U.S. Geological Survey USGS, 2021, A Landsat Collection 2 [WWW Document]. <https://pubs.usgs.gov/fs/2021/3002/fs20213002.pdf> (accessed 31.10.22).
- Vicente-Serrano, S.M., Lasanta, T., Romo, A., 2004. Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environ. Manage.* 34, 802–818. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0022-5>
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoïn, S., René, P., Berthier, E., Rico, I., Moreno, A., Serrano, E., Serreta, A., López-Moreno, J.I., 2021. Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011–2020. *Geophys. Res. Lett.* 48. <https://doi.org/10.1029/2021GL094339>
- Woodcock, C.E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S.N., Helder, D., Helmer, E., Nemani, R., Oreopoulos, L., Schott, J., Thenkabail, P.S., Vermote, E.F., Vogelmann, J., Wulder, M.A., Wynne, R., 2008. Free Access to Landsat Imagery. *Science* 320, 1011–1011. <https://doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>
- Wulder, M.A., White, J.C., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Belward, A.S., Cohen, W.B., Fosnight, E.A., Shaw, J., Masek, J.G., Roy, D.P., 2016. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sens. Environ.* 185, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.032>
- Yang, L., Wang, Lunche, Yu, D., Yao, R., Li, C., He, Q., Wang, S., Wang, Lizhe, 2020. Four decades of wetland changes in Dongting Lake using Landsat observations during 1978–2018. *J. Hydrol.* 587, 124954. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124954>
- Yang, M.-D., Chen, S.-C., Tsai, H.P., 2017. A Long-Term Vegetation Recovery Estimation for Mt. Jou-Jou Using Multi-Date SPOT 1, 2, and 4 Images. *Remote Sens.* 9, 893. <https://doi.org/10.3390/rs9090893>
- Zhang, Y., Woodcock, C.E., Arévalo, P., Olofsson, P., Tang, X., Stanimirova, R., Bullock, E., Tarrío, K.R., Zhu, Z., Friedl, M.A., 2022. A Global Analysis of the Spatial and Temporal Variability of Usable Landsat Observations at the Pixel Scale. *Frontiers in Remote Sensing* 3. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.894618>
- Zhu, Z., Wulder, M.A., Roy, D.P., Woodcock, C.E., Hansen, M.C., Radeloff, V.C., Healey, S.P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J.-F., Lyburner, L., Pahlevan, N., Scambos, T.A., 2019. Benefits of the free and open Landsat data policy. *Remote Sens. Environ.* 224, 382–385. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.016>

CARACTERISATION DES SURFACES PASTORALES EN RÉGION PACA PAR SIG ET TÉLÉDÉTECTION : QUESTIONS DE MÉTHODES ET PREMIERS RÉSULTATS

Imad SHAQURA¹, Jacques LASSEUR¹

¹INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE POUR L'AGRICULTURE, L'ALIMENTATION ET L'ENVIRONNEMENT (INRAE),
UMR SELMET INRAE, CIRAD, l'Institut Agro Montpellier, université de Montpellier
Bâtiment 22

2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier

1: Imad.Shaqura@inrae.fr

Résumé

Ces travaux ont pour objectif de caractériser les surfaces pastorales de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA) en termes de distribution spatiale et de diversité des formations végétales. Afin de caractériser l'emprise spatiale des espaces pâturés, nous avons analysé deux bases de données disponibles : le registre parcellaire graphique (RPG) issu des déclarations réalisées par les agriculteurs dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) et l'enquête pastorale (EP) effectuée à l'échelle des régions PACA et Rhône-Alpes. Nous avons ensuite caractérisé l'occupation du sol par télédétection en utilisant l'image SPOT 6, afin de distinguer cinq classes de milieux (forêts, landes fermées, landes ouvertes, pelouses, sol nu), à l'échelle d'un géo-terroir test de la région (Haut Verdon-Annot-Saint-André). Nos résultats montrent l'intérêt de produire une cartographie dédiée au pastoralisme par télédétection, selon une approche orientée objet comme voie de caractérisation de l'occupation du sol des espaces naturels pâturés, usuellement mal renseignée à cette échelle. À l'échelle du géo-terroir test, quelle que soit la source des données de spatialisation, l'usage futur de l'espace pastoral (60 %) est questionné, soit au regard des règles d'admissibilité de ces surfaces aux soutiens publics de la PAC (30 %), soit en termes d'accessibilité à moyen terme par les animaux, du fait de la forte dynamique de fermeture des milieux (30 % des surfaces déclarées appartenant à la catégorie landes fermées).

Mots-clés : Élevage pastoral, zone pastorale, télédétection, analyse spatiale, SPOT 6, occupation du sol

Abstract

The aim of this work is to characterize pastoral lands at the regional scale (Provence Alpes Côte d'Azur, south of France), in terms of spatial distribution and diversity of land cover. To identify spatial distribution, we based our study on two available databases: the graphic parcel register (RPG) gathering farmer's declarations within common agricultural policy and a the pastoral enquiry (EP) operated by local actors of Provence Alpes Côte d'Azur and Rhône Alpes regions. To analyze diversity of land cover, we used remote sensing analysis discriminating five classes of cover (forested areas, high density heathland, low density heathland, meadows, bare lands) at a smaller scale, named "géo-terroir" (Haut Verdon-Annot- Saint André). Our results illustrate usefulness of using dedicated remote sensing to describe land cover of grazed natural areas at large scale. Whatever the spatial data source at "géo-terroir" scale, a stronger use of pastoral areas (60 %) is questioned, according to admissibility rules of these areas within the CAP (30 %), or regarding to animal accessibility to forage resources considering vegetal dynamics and encroachment of these areas already composed of scrublands (30 % of grazed areas are already considered as high density heathland).

Keywords: livestock farming, pastoralism, remote sensing, spatial analysis, SPOT 6, land cover

1. Introduction

En Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA), l'élevage occupe une place importante dans le territoire régional. Malgré son poids économique plus faible que celui d'autres secteurs agricoles, tels que la viticulture, l'arboriculture et les grandes cultures, l'élevage reste structurant en termes d'aménagement de l'espace et de maintien du tissu socio-économique des zones rurales. Il contribue aussi à la valorisation des espaces naturels et écologiquement sensibles.

Le pâturage des animaux y est souvent la seule pratique humaine mise en œuvre. Contrairement à d'autres activités agricoles (labour, fauche, clôtures) qui sont clairement délimitées dans l'espace, l'activité pastorale possède une distribution spatiale difficilement renseignée, du fait de la mobilité des animaux et des pressions de pâturage qui varient selon les lieux et les années.

Or la caractérisation de la distribution spatiale des activités d'élevage est importante pour mieux analyser le rôle du pâturage au sein de la dynamique végétale des milieux pâturés. La bonne compréhension de cette interaction permet en effet d'associer l'élevage à des opérations de gestion des espaces (maintien de milieux ouverts favorable à la biodiversité végétale, prévention des incendies, etc.). Cette identification des espaces pâturés permet aussi de mieux gérer les relations entre l'activité pastorale et les autres activités dans un contexte de multi-usage des espaces (activités touristiques et sportives de pleine nature, chasse, etc.), en particulier sur le domaine public, qui constitue une part importante des surfaces pastorales.

Enfin, on peut anticiper d'importantes réorganisations spatiales des activités pastorales qu'il est important de qualifier, liées à moyen terme à l'adaptation aux changements globaux, et à court terme aux modalités de redéfinitions de l'éligibilité des surfaces pastorales aux soutiens financiers du premier pilier de la politique agricole commune (PAC). Ceux-ci sont en effet conditionnés à un coefficient d'admissibilité affecté à chacune des parcelles déclarées en fonction du taux de recouvrement du sol par des éléments non admissibles inférieurs à 10 ares (affleurements rocheux, éboulis, litière, végétations ligneuses réputées non adaptés au pâturage). Ce coefficient définit le prorata de surfaces des parcelles pouvant bénéficier des droits à paiement de base (DPB) de la PAC (ASP, 2018).

Le changement climatique est quant à lui susceptible de modifier la disponibilité en ressources pastorales, et donc les circuits de pâturage mis en œuvre par les éleveurs, des plaines littorales aux alpages. Pour autant, la mobilité des troupeaux leur confère la capacité de s'adapter à un changement de disponibilité et d'allocation des ressources fourragères selon les milieux et les saisons (Nettier, 2016).

Identifier, spatialiser et caractériser précisément les espaces pâturés est dès lors un enjeu fort pour les éleveurs et les territoires. Pour autant, l'évaluation des étendues et la localisation des terres pâturées à l'échelle régionale, donnent lieu à des appréciations très variables : le Conseil régional de PACA mentionne 400 000 ha de

surfaces pastorales, alors que l'atlas PACA de l'élevage herbivore (INTERBEV PACA-Corse, 2017) en relève 983 000 ha. De la même manière, deux sources de données géographiques sont disponibles, qui présentent des données divergentes : le registre parcellaire graphique (RPG) (Cantelaube et Carles, 2014) et l'enquête pastorale (enquête pastorale, 2014), qui évaluent respectivement les surfaces pastorales à 553 205 ha et 877 981 ha.

Nos travaux ont consisté à mieux caractériser l'espace pastoral de la région PACA en considérant la distribution spatiale et la diversité des formations végétales concernées. Dans un premier temps, il s'agira d'analyser la distribution spatiale des deux sources de données, le registre parcellaire graphique (RPG) et l'enquête pastorale (EP), ainsi que leurs niveaux de convergence/ divergence. Notre hypothèse concernant l'écart entre ces deux sources de données vectorielles, est que le RPG intègre les espaces les plus régulièrement utilisés, correspondant plutôt à des milieux ouverts, alors que l'EP est beaucoup plus large et considère des zones moins régulièrement pâturées, qui sont caractérisées par des niveaux de fermeture des milieux et d'embroussaillage plus marqués. Dans un second temps, des données issues de la télédétection seront utilisées (Image SPOT6) sur un espace test réduit, afin de caractériser plus finement les couverts végétaux de ces espaces et valider notre hypothèse.

2. Matériel et méthode

2.1. Zone d'étude

La région PACA, située au sud-est de la France, couvre une superficie de 31 400 km² (Figure 1). L'existence d'un gradient altitudinal marqué ainsi que la présence de formations végétales contrastées conduit à une organisation de l'espace régionale en grandes entités spatiales (le littoral méditerranéen, la zone alpine et les vallées du Rhône et de la Durance). Cette diversité de l'espace géographique a contribué à l'émergence de systèmes d'élevage adaptés, s'appuyant sur une forte mobilité saisonnière des troupeaux (transhumance) entre ces espaces. Le découpage en géo-terroirs (194) mis en place en 2000 par la direction régionale de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DRAAF), permet de distinguer des espaces homogènes en termes géomorphologiques et en termes d'orientations agricoles.

Un géo-terroir a été retenu pour conduire l'analyse exploratoire de la seconde phase de cette étude. Il s'agit du géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André », situé dans le département des Alpes-de-Haute-Provence (04) et qui recouvre une superficie de 611,28 km². Il s'agit d'un géo-terroir relativement diversifié, qui comprend des milieux préalpins et montagnards, et au sein duquel l'élevage occupe une place assez importante.

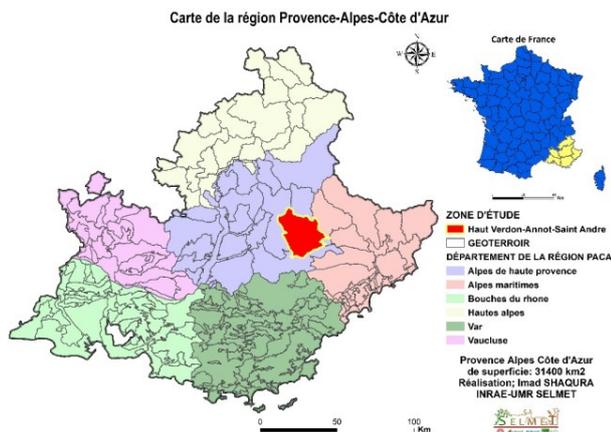


Figure 1 Carte de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur (Localisation du géo-terroir retenu pour la partie télédétection (en rouge))

2.2. Données vectorielles

Les données du RPG mobilisées concernent l'année 2014 afin de :

- i) Disposer d'une année de référence avant la mise en application de la PAC 2015 ;
- ii) Être synchrone avec la dernière enquête pastorale qui date de 2012/2014.

2.2.1. Le registre parcellaire graphique (RPG)

Depuis 2002, la France établit un registre des parcelles, le RPG, issu des déclarations PAC des agriculteurs et administré par l'agence de services et de paiement (ASP). Le RPG fournit une information géoréférencée annuelle sur l'occupation des sols. Les données donnent des informations non seulement sur l'occupation du sol, mais aussi sur les structures foncières pour chaque exploitation sur l'ensemble de la France. Jusqu'en 2015, les agriculteurs renseignaient leurs îlots de culture sur une ortho photographie au 1/5000. Selon la définition de l'ASP, un îlot « correspond à un ensemble contigu de parcelles culturales exploitées par un même agriculteur ». Cette base de données géoréférencées représente environ 27 millions d'hectares (6 millions d'îlots). De nature déclarative, elle couvre de manière assez exhaustive les terres agricoles des régions à dominante de grandes cultures et de prairies en France. Dans cette base de données, chaque îlot, au travers d'un identifiant anonyme, est rattaché à une exploitation et permet de caractériser l'activité agricole à cette échelle (Caloz et Collet, 2011), ou en lien avec une classe particulière d'occupation du sol. Depuis 2010, le système de projection est Lambert 93. Un conventionnement entre l'ASP et l'INRAE permet aux chercheurs de différentes unités de l'INRAE d'exploiter les données du RPG, niveau 4 d'information, mises à disposition par l'unité de service l'observatoire du développement rural (ODR) de l'INRAE. Nous avons choisi de ne pas exploiter, pour cette étude, les nouvelles modalités du RPG post 2015, afin de ménager le caractère synchrone entre nos deux sources de données (2014).

2.2.2. L'enquête pastorale (EP)

Les espaces pastoraux des zones de montagne sont principalement utilisés de manière saisonnière (estive), sous forme collective. Ces modes d'utilisation collectifs sont particulièrement mal renseignés dans les dispositifs usuels d'enquêtes agricoles réalisés à l'échelle individuelle (recensement agricole, en particulier). Trois enquêtes pastorales ont été réalisées à l'échelle du massif alpin depuis les années 1960. La dernière enquête pastorale a été réalisée en 2012-2014. Compte tenu de l'ampleur du dispositif d'enquêtes mobilisé (enquêtes exhaustives sur tout le territoire du massif), cette opération de recensement des surfaces pastorales de plus de 10 ha n'a lieu que tous les 10 à 15 ans dans le massif alpin et les territoires pastoraux des régions Rhône-Alpes et PACA. La définition retenue des surfaces recensées est la suivante :

Surfaces présentant toujours une ressource pastorale spontanée herbacée, arbustive et/ou arborée, dont la valorisation est réalisée exclusivement par le pâturage de troupeaux ovins, bovins, caprins ou équins (Enquête pastorale, 2014).

L'enquête pastorale se traduit notamment sous la forme d'une base de données géoréférencées. Les entités pastorales recensées sont localisées sur des fonds cartographiques IGN Scan 25 ou BD Ortho (à l'échelle 1/25 000, projection en Lambert 93). L'enquête pastorale porte sur deux grands types de surfaces pastorales, définis selon leurs fonctions pastorales : les unités pastorales (UP) à fonction spécialisée d'accueil des animaux durant la période estivale, et les zones pastorales (ZP) n'ayant pas de fonction spécialisée d'estive, et qui se caractérisent donc par leur fonction d'intersaison ou d'hivernage (pouvant néanmoins parfois accueillir des animaux l'été, en complément). La nomenclature du type de milieu recensé identifie les catégories suivantes : surface en herbe, landes, sous-bois pâturé et prés bois, et divers (très forte hétérogénéité). Ces données nous ont été fournies pour cette étude par le Centre d'études et de réalisations pastorales Alpes Méditerranée (CERPAM), qui est une association de développement agricole en charge des questions pastorales à l'échelle de la région PACA.

2.3. Image SPOT 6

L'image SPOT 6 du 8 juin 2014, a été fournie par EQUIPEX GEOSUD, qui a pour ambition première d'acquies chaque année une couverture nationale d'images satellites à haute résolution spatiale, acquise en période estivale en fonction du taux de couverture nuageuse toléré. Ces données satellitaires sont mises gratuitement à la disposition de tous les acteurs publics nationaux ayant préalablement adhéré au dispositif.

Les caractéristiques techniques des images SPOT 6 | 7 sont les suivantes :

- Les images acquises par ces satellites ont une fauchée de 60 km ;
- Les satellites SPOT 6 / 7 permettent une acquisition d'image en deux modes simultanément :

- Panchromatique de 1,5 m de résolution : ce produit inclut une seule bande dans les longueurs d'onde entre 0,45 µm et 0,745 µm,
- Multi-spectral de 6 m de résolution : se composent de quatre bandes spectrales : B1 (Rouge 0,530 µm-0,590 µm), B2 (Vert 0,760 µm - 0,695 µm), B3 (Bleu 0,455 µm - 0,525 µm), et B4 (PIR 0,760 µm - 0,890 µm).

premier objectif consiste à analyser les écarts entre les deux sources de données spatialisées (RPG et EP), permettant d'aboutir à une cartographie regroupant trois catégories d'espace, selon qu'ils sont communs aux deux bases ou spécifiques de l'une ou de l'autre. Le second objectif consiste à caractériser les milieux pâturés par la télédétection, en s'appuyant sur une image SPOT6. Nous avons ensuite réalisé un croisement de ces deux analyses.

2.3. Méthodes

2.3.1. Orientation générale

Pour caractériser les surfaces pastorales, nous avons mis en œuvre la méthodologie présentée en Figure 2. Le

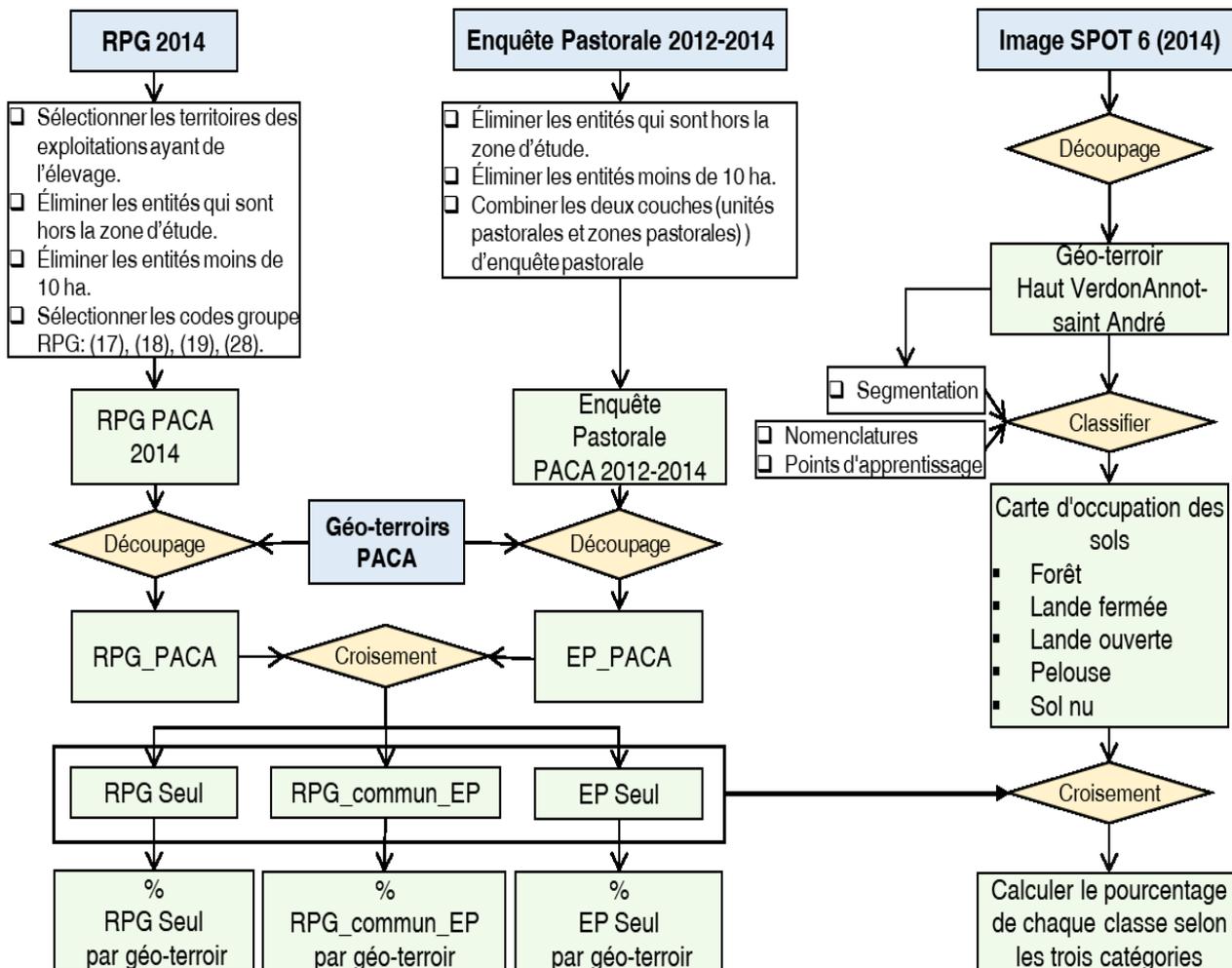


Figure 2 Schéma de la méthodologie retenue

2.3.2. Estimer l'étendue de l'espace pastoral régional

Ce travail se base sur les données vectorielles RPG de l'année 2014 et de l'enquête pastorale réalisée entre 2012 et 2014. La préparation et le traitement des données vectorielles a consisté à :

1. Éliminer les entités spatiales de moins de 10 ha dans le RPG, pour être homogène avec les données recueillies dans l'enquête pastorale.
2. Retenir pour le fichier de RPG les îlots dont le code du groupe concerne des zones pastorales, soit les codes groupe (17) estives landes, (18) prairies permanentes, (19) prairies temporaires, et (28) divers.
3. Combiner les deux couches (unités pastorales et zones pastorales) de l'enquête pastorale afin d'obtenir une seule couche pour la zone d'étude.
4. Redécouper les couches du RPG et de l'EP en géo-terroirs (figures 7 et 8 - annexe).

5. Créer les trois couches issues du croisement entre les bases de données du RPG et l'EP, (RPG_Seul, RPG_commune_EP, et EP_Seul), qui ont été réalisées avec l'outil de géo-traitement Intersection sous Arc Gis 10.4.1.
6. Après la création des trois couches, recalculer les surfaces des entités spatiales pour chaque catégorie, puis calculer le pourcentage de chaque catégorie pour les 194 géo-terroirs.

2.3.3. Caractériser les surfaces pastorales par télédétection

Cette étape a pour but de caractériser, à partir de méthodes de télédétection, les différentes unités d'espaces non cultivées pâturées, selon leur appartenance à l'une ou l'autre des catégories des bases de données traitées (commune aux deux ou spécifiquement présente dans l'une ou l'autre base), en les distinguant selon leur catégorie d'occupation du sol (forêts, landes fermées, landes ouvertes, sol nu). Le fait de classer les occupations du sol selon les niveaux de couverture ligneuse permet en effet de :

- a) Rendre compte de la pénétrabilité des espaces pour le pâturage des animaux ;
- b) Distinguer les espaces avec peu de ressources pâturables disponibles (sol nu, forêts) ;
- c) Rendre compte de la dynamique de fermeture des milieux par rapport à leur niveau d'embroussaillage ;
- d) Situer ces différentes entités en regard de l'évolution réglementaire d'admissibilité des surfaces au soutien de la PAC.

La classification de la zone d'étude est réalisée à partir de l'image SPOT 6 à 6 m de résolution spatiale (un pixel = 0,0036 ha). Nous calculons ensuite le pourcentage des différentes classes dans chaque entité pastorale selon les trois catégories obtenues dans la première phase d'analyse, afin d'avoir une vue précise du contenu de l'occupation des sols concerné par l'activité pastorale dans la région PACA.

Il existe de nombreuses méthodes de traitement des données satellitaires permettant de classer l'occupation du sol. La littérature nous a permis de cibler l'approche orientée-objet (Corbane *et al.*, 2004; Sparfel *et al.*, 2010; Sellin *et al.*, 2015; Dupuy et Gaetano, 2019). Cette approche ne traite pas le pixel de manière isolée, mais dans son contexte en regroupant des pixels au sein d'objets homogènes interprétés en se basant à la fois sur les attributs spatiaux (taille, forme, texture, ensemble, association spatiale) et sur les valeurs spectrales, ce qui améliore considérablement la qualité de l'information extraite des images à très haute résolution spatiale (Benz *et al.*, 2004).

Depuis les années 1990, la présence des capteurs à haute résolution et très haute résolution spatiale a fortement

contribué au développement des méthodes d'analyse et de traitement d'images satellitaires ou aériennes (De Kok *et al.*, 1999). Ces capteurs fournissent des images dont la résolution spatiale est inférieure ou égale à dix mètres. Avec cette amélioration de la résolution spatiale et le maintien de la même information spectrale, les objets sont de plus en plus difficiles à isoler par la seule approche par pixel (Caloz et Collet, 2011). Celle-ci entraîne notamment un effet « poivre et sel » sur les images (Blaschke, 2010) et montre les limites de la classification par pixel sur les zones très hétérogènes : « Plus la résolution spatiale est fine, plus l'hétérogénéité des objets à extraire croît, rendant les méthodes spectrales de moins en moins performantes. » (Sparfel *et al.*, 2010) « Par ailleurs, la multiplication des applications basées sur l'information satellitaire et la nécessité de pouvoir croiser les données issues de la télédétection et les données SIG au format vecteur, ont participé au développement de l'approche orientée objet auprès d'un public plus large. » (Hay et Castilla, 2006 ; Rossignol, 2012)

L'approche de classification supervisée (El kharki *et al.*, 2015) a été retenue pour classer l'image : des connaissances *a priori* sont utilisées pour la création des classes, celle-ci sont caractérisées à partir de la saisie des échantillons de terrain ou parcelles d'entraînement.

La méthode proposée pour classer les milieux a été mise en œuvre sur une zone test relativement complexe (hétérogénéité et diversité des entités pastorales) dans l'objectif de valider l'approche et de l'étendre ensuite à un géo-terroir entier : le géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André ». La préparation et le traitement des données rasters a consisté à :

1. Mobiliser l'image SPOT 6, de 8 juin 2014 déjà orthorectifiée.
2. Extraire la zone test dans le milieu préalpin à Saint-Geniez, Authon.
3. Définir de la nomenclature (Figure 3) : les classes ont été définies à dire d'expert en fonction de l'accessibilité et de la pénétration possible des animaux, en se rapprochant des critères de la définition de l'éligibilité aux soutiens de la PAC.
 - Forêt : correspond à une couverture très dense d'arbres et de végétaux. Elle est considérée comme étant ni accessible, ni pénétrable par les animaux.
 - Lande fermée : correspond à une couverture de végétaux non cultivés (ligneux ou non ligneux) composée d'arbres en croissance et de ligneux de moins de 1,5 m de hauteur. Elle est plus ou moins accessible, et pénétrable par les animaux.
 - Lande ouverte : elle correspond à une couverture de végétaux non cultivés de hauteur maximale inférieure à 30 cm intégralement accessible.
 - Pelouse : elle correspond à une couverture herbacée de végétation naturelle plus ou moins dense.

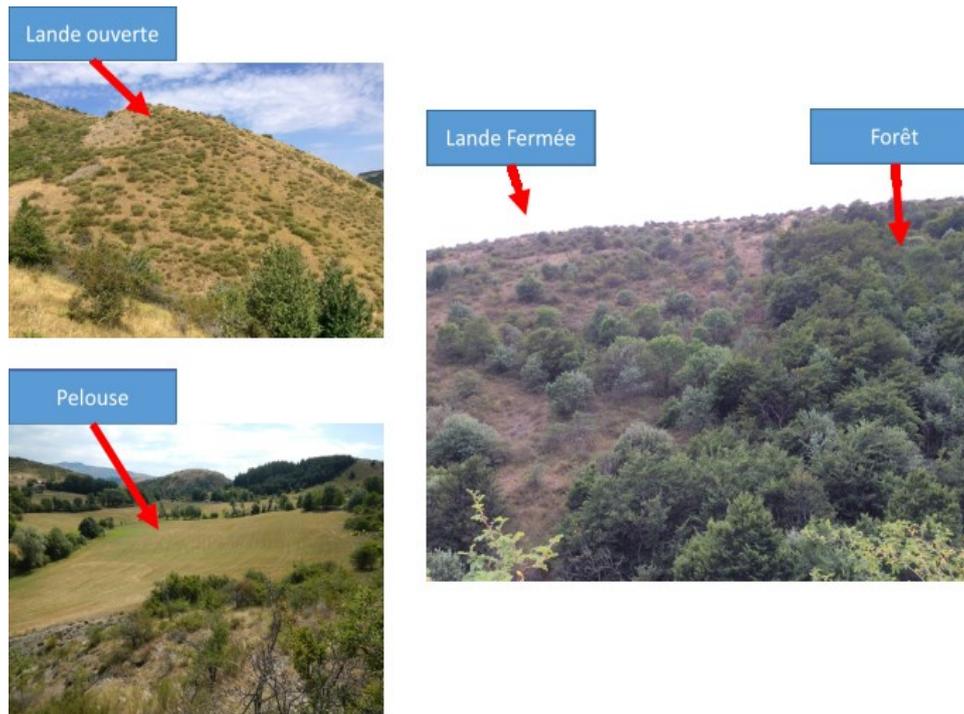


Figure 3 Photographies géo référencées utilisées pour la définition de la nomenclature des classes

(Crédit photos : P. Bonnet, Localisation : Saint Geniez, Authon (04))

4. Segmenter par fusion de régions en utilisant le critère d'homogénéité de Baatz et Schape (Baatz et Schäpe, 2000) combinant à la fois l'information spectrale et l'information spatiale. Cette méthode de segmentation par critère d'homogénéité est bien adaptée au traitement d'images à haute résolution (Lassalle *et al.*, 2015), car elle fournit des segments d'image plus précis, y compris pour des objets hétérogènes. La segmentation multi-résolution par le critère de Baatz et Schape nécessite de calibrer préalablement trois paramètres :
 - Définir l'échelle pour fixer une limite de seuil d'hétérogénéité des objets produits. Les objets sortant de la segmentation seront plus grands si les données sont homogènes, et plus petits si elles sont hétérogènes.
 - Définir l'homogénéité spectrale qui détermine l'importance relative de la radiométrie et le critère de fusion d'objet.
 - Définir l'homogénéité spatiale : il définit l'importance de la forme de l'objet, qui constitue une valeur importante pour caractériser des objets de forme compacte.
5. Mobiliser l'outil de statistiques de zone nous a permis de calculer la moyenne et l'écart-type par objet pour les quatre bandes spectrales de l'image, et ainsi de caractériser chaque objet de notre couche segmentée.
6. Créer notre jeu d'apprentissage à partir de la couche segmentée, réalisée en sélectionnant des objets en tant qu'échantillons de notre classe.
7. Effectuer la classification supervisée (Bayes) de l'image.
8. Évaluer la qualité de la classification par matrice de confusion
9. Valider sur le terrain la carte et collecter des points GPS de vérité de terrain pour chaque classe.

Cette méthode a été appliquée au géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André » qui recouvre une superficie de 611km², et pour lequel nous avons mobilisé les données d'apprentissage suivantes : 415 échantillons d'une surface totale de 661 ha, soit 50 objets par classe, sauf pour la classe sol nu, qui est très diversifiée (rochers, routes, chemins, terres agricoles nues, sol nu autour de la rivière). Afin d'atteindre une précision satisfaisante pour cette classe, nous avons augmenté le nombre d'échantillons à 163 objets. Ces données ont été acquises par photo-interprétation (Figure 10).

Après plusieurs tests de segmentation réalisés via l'application Generic Region Merging *GRM* qui est déjà intégrée dans OrfeoToolbox (Remote Module), nous avons retenu les paramètres suivants : seuil du critère : 100, homogénéité spectrale : 0,6 et homogénéité spatiale : 0,9 (figure 9).

3. Résultats

3.1 Estimation de l'étendue de l'espace pastoral régional

Le croisement entre les bases de données RPG et l'enquête pastorale nous a permis de :

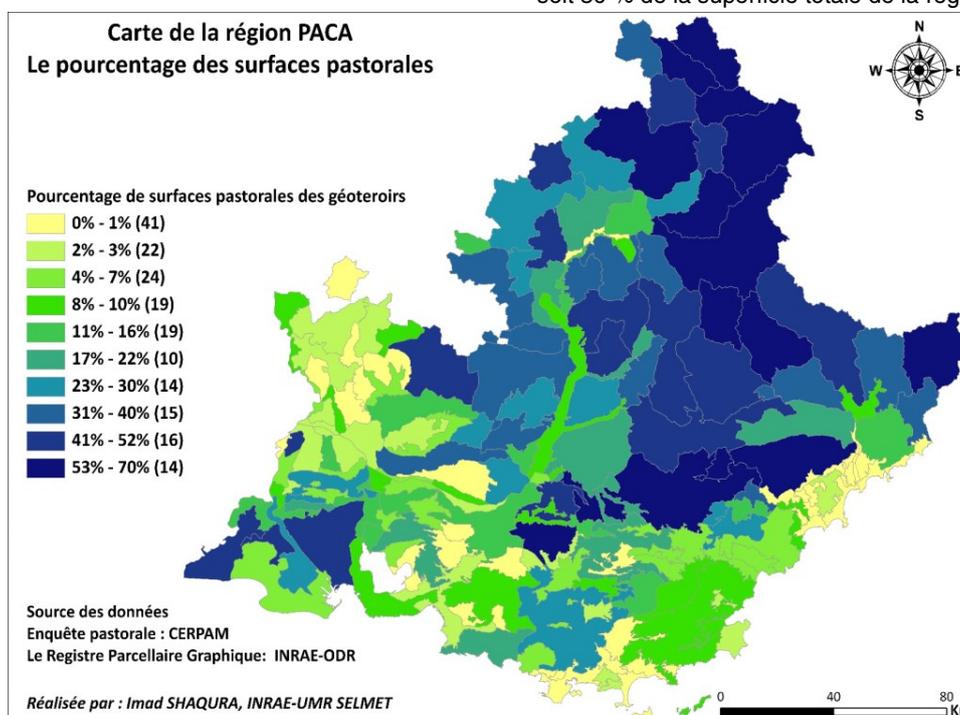


Figure 4 Pourcentage de surfaces pastorales des 194 géotéroirs (Enquête pastorale 2012/2014, le registre parcellaire graphique RPG 2014)

2. **Caractériser les niveaux de convergence entre ces deux bases de données.** Les surfaces déclarées au RPG sont distribuées entre des catégories d'occupation du sol déclarées : « les codes groupes ». Le tableau 1 présente le pourcentage de surface pour chacun de ces « code de groupe culture » liés au pâturage dans le RPG, et de manière commune avec l'enquête pastorale. Près de 84 % de la surface des estives landes et 77 % des surfaces de la catégorie « divers » (qui regroupent en grand nombre de surfaces d'estives) sont communes aux RPG et l'EP. On observe donc un niveau de convergence élevé pour ces types de surfaces. En revanche, seulement 50 % des surfaces de prairies permanentes sont communes aux deux bases de données. Cette situation révèle donc l'existence d'un fort niveau d'incertitude concernant le recensement de ce type de surfaces, alors que cette catégorie, par les enjeux environnementaux qui lui sont propres, est l'objet de beaucoup d'attention de la part des politiques publiques. Les prairies temporaires sont aussi caractérisées par un fort taux de divergence, qui peut s'expliquer par le fait que l'enquête pastorale n'est pas conçue initialement pour inventorier ce type de surfaces. (Tableau 1).

1. **Mieux décrire l'emprise de l'élevage sur le territoire de la région PACA.** La figure 4 représente, pour chaque géo-terroir, la proportion de surfaces pastorales, obtenue en cumulant l'ensemble des unités spatiales référencées dans l'EP ou le RPG. Ainsi, après rapprochement de ces deux bases de données, les zones pastorales et herbagères couvriraient en surfaces cumulées 954 240 ha, soit 30 % de la superficie totale de la région.

D'une manière globale, à l'échelle régionale, seulement 49 % de la superficie de l'enquête pastorale est commune avec celle du RPG.

Code du groupe de culture pastorale	RPG total (en ha)	RPG seul (en ha)	RPG commun EP (en ha)	RPG commun EP (en %)
17 Estives landes	374 634	60 478	314 156	84 %
18 Prairies permanentes	30 727	15 224	15 503	50 %
19 Prairies temporaires	18 838	12 311	6 527	35 %
28 Divers	99 707	22 633	77 074	77 %
Totale	523 906	110 646	413 260	

Tableau 1 Niveau de convergence entre Enquête pastorale et RPG.

Pour les quatre groupes de culture du RPG concernés par le pâturage, les surfaces sont comptabilisées en fonction de leur présence dans l'une ou l'autre des bases de données ou conjointement dans les deux. La dernière colonne 4 indique le pourcentage de surface commune aux deux bases, rapporté à la surface totale déclarée au RPG.

3. Les cartes présentées en figure 5 permettent d'analyser la distribution géographique des convergences/ divergences entre les deux bases de données. La figure 5.a qui représente les zones de convergence entre le RPG et l'EP, identifie clairement les zones d'estive (zone de montagne au nord-est de la région). À l'inverse, plusieurs zones se caractérisent par

une différence significative entre les deux bases de données. Pour l'EP seule (figure 5.b) il s'agit en particulier de la partie Sud de la région (les géo-terroirs des Bouches du Rhône, Var et Alpes Maritimes). Pour le RPG seul (figure 5.c) il s'agit plus particulièrement des géo-terroirs de l'ouest de la région.

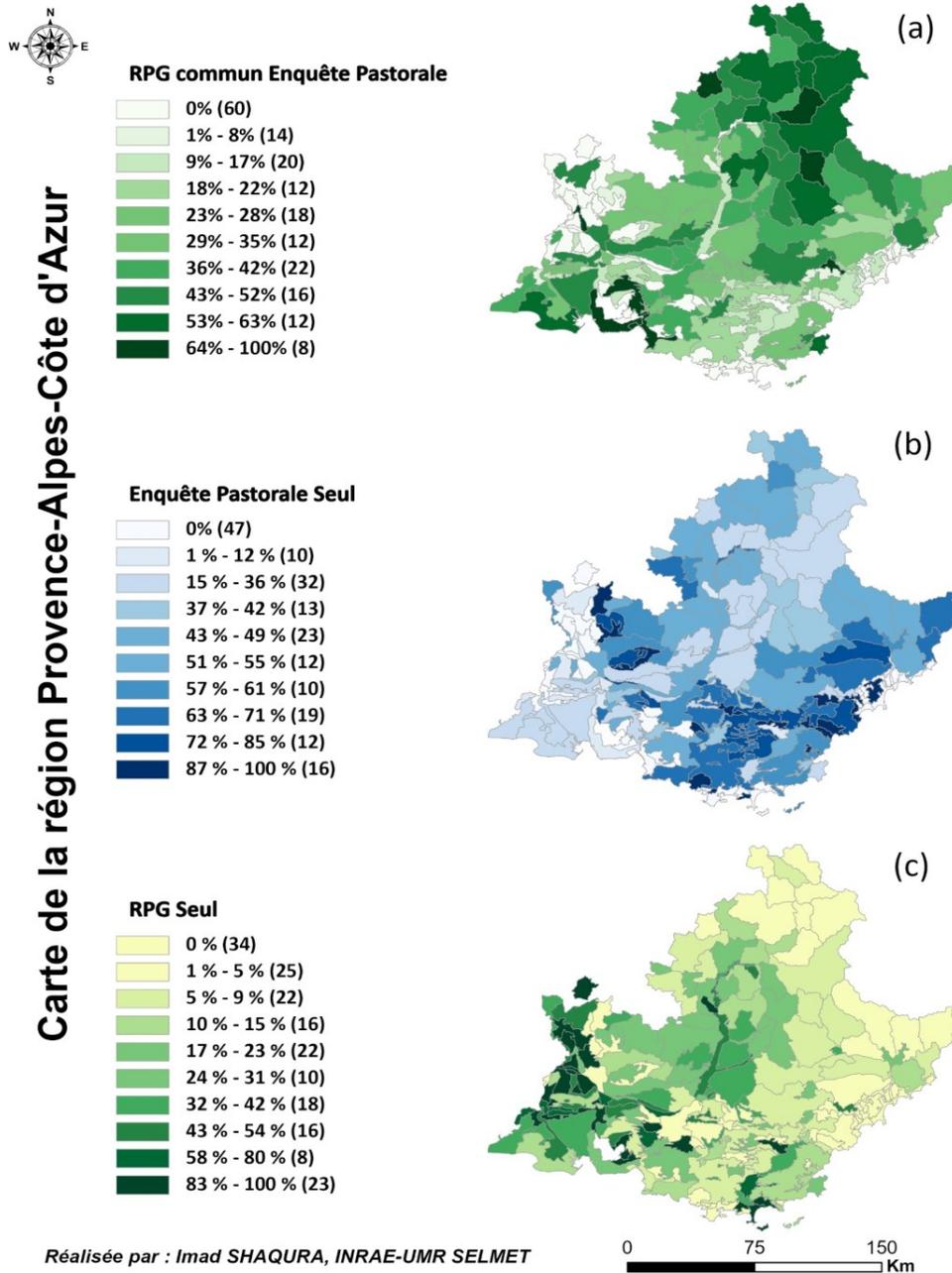


Figure 5 Distribution géographique des zones pastorales selon ces convergences/ divergences entre les deux bases de données à l'échelle des Géo-terroirs

4. L'EP et le RPG divergent ainsi très fortement en matière de surface couverte. Ces divergences varient selon les catégories de surface : on note une bonne convergence au niveau des pâturages d'altitude, une faible convergence pour les espaces de basse altitude,

surreprésentés dans l'enquête pastorale. On note ainsi une complémentarité entre ces sources pour identifier les espaces pâturés de la région. Il reste cependant difficile, à ce stade, d'en définir l'étendue « réelle ».

3.2. Caractériser les surfaces pastorales par télédétection

Les résultats du processus de classification d'images SPOT 6 sont satisfaisants, selon le rapport des matrices de confusion donné par l'algorithme de classification supervisée (Bayes) de QGIS, implémenté dans l'Orfeo ToolBox (OTB). Le carte d'occupation résultante est illustrée par la figure 6. La matrice de confusion pour la classification permet de connaître le pourcentage de pixels bien classés par rapport à la réalité. Nous avons une précision globale de 86,8 et un indice Kappa de 84,2. Selon la proportion de la précision utilisateur, les deux

classes, forêt (97,8) et sol nu (95,4), sont correctement classifiées (Tableau 2 - annexe).

Le tableau 3 montre les pourcentages des 5 classes dans les trois catégories, pour le géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André ». Les répartitions entre les différentes classes d'occupation du sol selon la source des données (EP et RPG) sont convergentes.

On peut souligner les faibles valeurs des surfaces forestières (respectivement 5 % et 2,8 %). La répartition entre les différentes catégories montre une légère surreprésentation de ces dernières dans l'enquête pastorale.

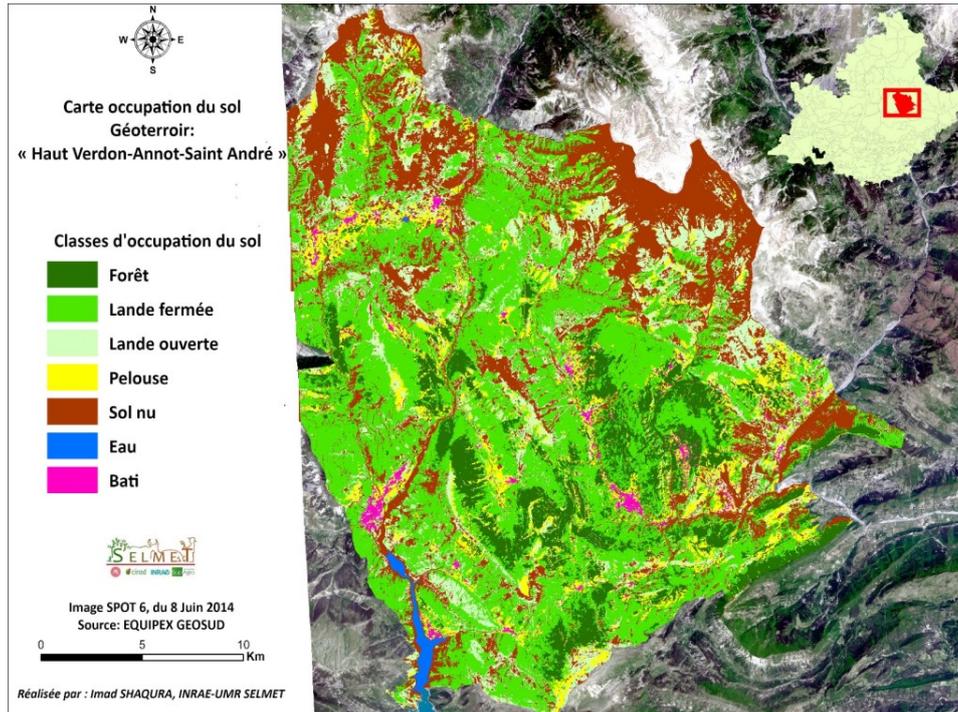


Figure 6 Carte d'occupation du sol du géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André »

À l'opposé, la classe sol nu est très représentée dans les bases de données EP et RPG, représentant respectivement 31 % et 32 % de la surface totale. L'importance des espaces d'estive de haute montagne dans ce géo-terroir explique ces fortes valeurs (Figure 11-annexe). Ces deux classes, forêt et sol nu, regroupent les surfaces dont l'admissibilité aux dispositifs de soutien de la PAC sont remises en cause.

La classe lande fermée représente la proportion de surface la plus élevée, quelle que soit la source des données obtenues (respectivement 36 % et 34 %). Compte tenu des dynamiques végétales à l'œuvre dans ce type de milieux, leur accessibilité par des animaux pourrait ainsi être remise en question dans le futur.

Enfin, selon les sources de données, les classes lande ouverte et pelouse, qui constituent les espaces pastoraux par excellence, ne représentent, en cumulé, que 28 % à 31 % des surfaces totales.

4. Conclusion et perspective

La caractérisation de l'espace pâturé, pour des activités d'élevage reposant sur la mobilité et concernant des espaces peu anthropisés aux statuts fonciers diversifiés, pose des problèmes méthodologiques spécifiques en regard d'autres activités agricoles ou d'élevage. Ceci suppose la mise en œuvre de méthodologies mobilisant un couplage entre des sources de données contrastées et le recours à des modes de caractérisation d'occupation du sol pour lesquels la télédétection présente un grand intérêt.

Notre étude en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) illustre la grande incertitude caractérisant la quantification de l'espace pâturé selon les sources de données utilisées, sans qu'il ne soit possible, à ce stade, d'arbitrer entre ces fortes divergences. Notre hypothèse de départ était que les espaces communs aux deux sources de données exploitées constitueraient l'espace le plus intensément utilisé par le pâturage, alors que les entités recensées uniquement dans l'enquête pastorale constitueraient un espace périphérique des territoires

pâturés, couverts de formations fortement ligneuses. Valider cette hypothèse suppose un croisement entre caractérisation des usages par le pâturage et occupation des sols. Compte tenu de l'absence de cartographies caractérisant les modes d'occupation du sol croisés avec les activités pastorales, nous avons eu recours à la télédétection pour constituer notre propre carte. Cette cartographie de l'occupation du sol des surfaces pastorales, réalisée à l'échelle d'un géo-terroir typique des Alpes du Sud, utilisant de l'image SPOT6 et classification orientée objet basée sur la méthode de segmentation par fusion de régions utilisant le critère Baatz et Shape, qui a donné des résultats de précision très satisfaisants. La bonne précision, notamment pour les classes lande ouverte, pelouses et lande fermées, ainsi que la comparaison avec l'occupation des sols de Thiaie (issue de classification des images satellites Sentinel de résolution spatiale de 10 m), illustre l'intérêt de la production d'une carte d'occupation du sol des surfaces pastorales à l'échelle régionale en utilisant l'image SPOT avec l'approche de classification orientée objet.

Cette proposition méthodologique nous a permis de caractériser les espaces pastoraux par télédétection. Toutefois, la précision de la classification des végétations spontanées pour les trois classes (lande ouverte, pelouses, lande fermée) pourrait être affinée, en intégrant l'indice textural (Alleaume *et al.*, 2018; Thierion *et al.*, 2014) de manière à augmenter le niveau de précision de ces trois classes. Une analyse de la dynamique pluriannuelle d'évolution de l'occupation du sol des espaces naturels pâturés dans les régions méditerranéennes française constituerait une étape ultérieure à ce travail.

Sur la base des résultats obtenus à l'échelle du géo-terroir « Haut Verdon-Annot-Saint-André », la très forte représentation des surfaces de sol nu et forêts d'une part, et de landes fermées d'autre part (65 à 70 % de surfaces cumulées selon les sources), illustrent la très grande fragilité de l'activité pastorale. En effet, que ce soit en regard des évolutions de la PAC, qui tend à exclure les espaces forestiers ou à couverts végétaux très faible des soutiens agricoles, ou en lien avec les dynamiques végétales à l'œuvre dans les landes fermées (en très grande proportion), l'activité pastorale risque à court terme de se trouver très fortement impactée.

Remerciements :

Nous tenons à remercier Madame Agnès BEGUE pour ses précieux conseils au cours de cette recherche.

5. Références

- Alleaume, S., Dusseux, P., Thierion, V., Commagnac, L., Laventure, S., Lang, M., Féret, J., Hubert-Moy, L. et Luque, S. (2018). *A generic remote sensing approach to derive operational essential biodiversity variables (EBVs) for conservation planning*. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(8), 1822-1836. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13033>
- ASP (2018). *Guide national d'aide à la déclaration du taux d'admissibilité des prairies et pâturages permanents*. <http://agriculture.gouv.fr/declaration-pac-comment-determiner-ladmissibilite-des-surfaces-de-prairies-et-paturages>
- Baatz, M. et Schäpe, A. (2000). *Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation*. *Angewandte Geographische Information Sverarbeitung*, 12, 12-23.
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I. et Heynen, M. (2004). *Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information*. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 58(3), 239-258.
- Blaschke, T. (2010). *Object based image analysis for remote sensing*. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 65(1), 2-16.
- Caloz, R. et Collet, C. (2011). *Analyse spatiale de l'information géographique*. PPUR Presses polytechniques. 384 p.
- Cantelaube, P. et Carles, M. (2014). *Le registre parcellaire graphique: des données géographiques pour décrire la couverture du sol agricole*. *Le Cahier des Techniques de l'INRA*, 58-64.
- Corbane, C., Baghdadi, N., Hosford, S., Somma, J. et Chevrel, S. (2004). *Application d'une méthode de classification orientée objet pour la mise à jour d'une carte d'occupation du sol: résultats sur ASTER et landsat ETM*. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 175 (2004-3), 13-26.
- De Kok, R., Schneider, T., Baatz, M. et Ammer, U. (1999). *Object based image analysis of high-resolution data in the alpine forest area*. *JointWS ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4: Sensors and Mapping FromSpace 1999*. Hannover, September 27-30., 9 p.
- Dupuy, S. et Gaetano, R. (2019). *Production des cartes de l'occupation du sol agricole à la Réunion*

- à partir d'images satellites 2016 – 2019. Rapport méthodologique. 61 p. http://agritrop.cirad.fr/594135/1/Rapport_carto_GABIR_2017-2018_v3.pdf
- El kharki, O., Mechbouh, J., Ducrot, D., Rouchdi, M. et Ngono, J. M. (2015). *Panorama sur les méthodes de classification des images satellites et techniques d'amélioration de la précision de la classification*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, (210), 23-38. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2015.259>
- Enquête pastorale. (2014). *Une nouvelle enquête pastorale 2012/2014 sur le Massif des Alpes et les territoires pastoraux des Régions Rhône-Alpes et Provence Alpes Côte d'Azur Principes, bases méthodologiques et modalités de valorisation des données*. 74 p. http://enquete-pastorale.irstea.fr/zone_telechargement.php
- Hay, G. J. et Castilla, G. (2006). *Object-based image analysis: strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT)* (p. 4-5). http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/4-c42/Papers/OBIA2006_Hay_Castilla.pdf
- INTERBEV PACA-Corse. (2017). *Atlas PACA de l'élevage herbivore*. 72 p. http://www.la-viande.fr/sites/default/files/documenttheque/atlas-provence-alpes-cote-d_azur-elevage-herbivore-w.pdf
- Lassalle, P., Inglada, J., Michel, J., Grizonnet, M. et Malik, J. (2015). *A Scalable Tile-Based Framework for Region-Merging Segmentation*. IEE transactions on geoscience and remote sensing, 53(10), 14 p.
- Nettier, B. (2016). *Adaptation au changement climatique sur les alpages. Modéliser le système alpage-exploitations pour renouveler les cadres d'analyse de la gestion des alpages par les systèmes pastoraux*. thèse sciences agricoles, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- Rossignol, H. (2012). *Méthode d'identification et de cartographie des terres agricoles en friches par télédétection à La Réunion*. <https://ead-shs.univ-st-etienne.fr/claroline/backends/download.php?url=LzlwMTlvMjAxMI9Sb3NzaWdub2wucGRm&cidReset=true&cidReq=M2SIGTRAVAU>
- Sellin, V., Magnanon, S., Gourmelon, F., Debaine, F. et Nabucet, J. (2015). *Etude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection*. Cybergeo: European Journal of Geography.
- Sparfel, L., Gourmelon, F. et Le berre, I. (2010). *Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière*. *Télédétection*, 8(4), 237-256.
- Thierion, V., Alleaume, S., Jacqueminet, C., Vigneau, C., Michel, K. et Luque, S. (2014). *The potential of Pléiades imagery for vegetation mapping: an example of grasslands and pastoral environments*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, (208), 105-110. <https://doi.org/10.52638/rfpt.2014.124>

Annexes :

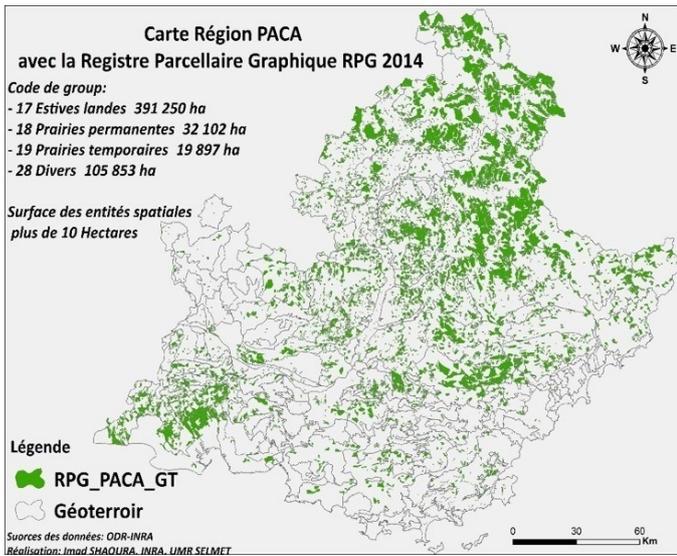


Figure 7 Carte du registre parcellaire graphique (RPG) prétraitée.

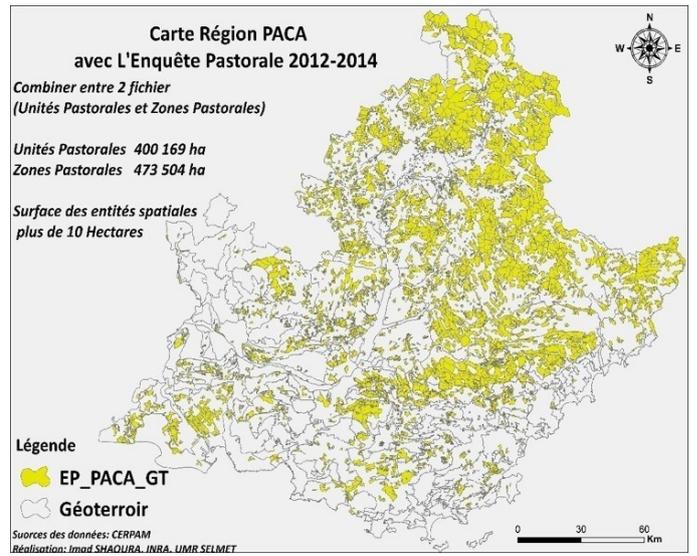
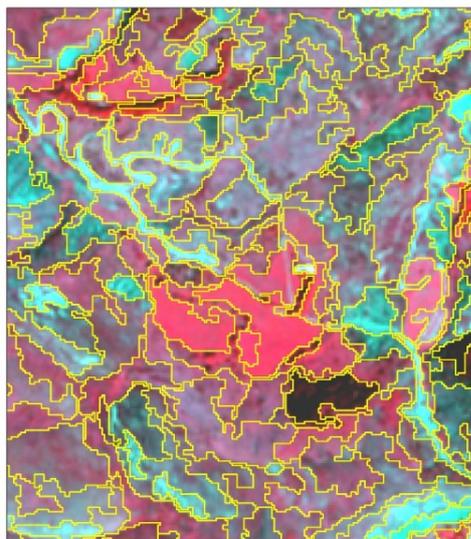


Figure 8 Carte de l'enquête pastorale (EP) prétraitée



Segmentation multi-résolution (Baatz et schape) Paramètre;
 1- Seuil du critère (th): 100
 2- Homogénéité spectrale (cw): 0.6
 3- Homogénéité spatiale (sw): 0.9

Réalisé par Imad SHAQURA, INRAE-UMR SELMET

Figure 9 Segmentation de la zone test dans le milieu préalpin à Saint-Geniez, Authon

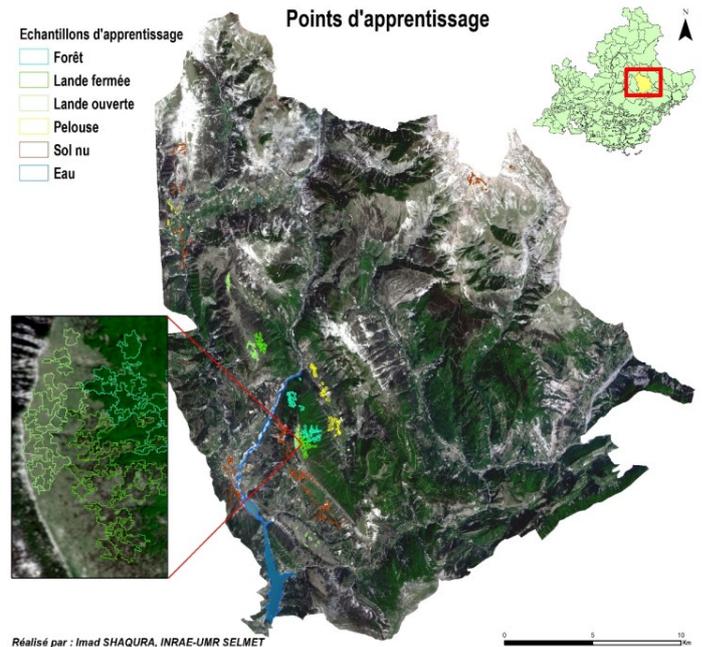


Figure 10 Point d'apprentissage

Classe	Forêt	Lande fermée	Lande ouverte	Pelouses	Sol nu	Eau	Précisions utilisateur	Erreur
Forêt	968	5	6	10	0	0	97,88	2,17
Lande fermée	10	854	91	60	0	0	84,14	18,85
Lande ouverte	0	162	669	195	22	0	63,84	56,65
Pelouses	4	48	101	840	8	0	83,92	19,17
Sol nu	0	1	46	6	1017	0	95,05	5,21
Eau	0	0	1	0	35	983	96,47	3,66
Précision Producteurs	98,57	79,81	73,19	75,61	93,99	100,00	Précision globale	86,80
Erreur	1,45	25,29	0,37	32,26	6,39	0,00	Kappa	84,16

Tableau 2 Matrice de confusion pour la classification de géo-terroir (Haut Verdon-Annot-Saint-André).

Classe	Catégorie Enquête pastorale seul		Catégorie RPG seul		Catégorie RPG commun avec l'enquête pastorale		Enquête pastorale		RPG	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Forêt	883,8	8,9	153,4	7,6	265,3	2,0	1149,2	5,0	418,7	2,8
Lande fermée	4065,0	40,7	915,7	45,4	4225,7	32,0	8290,8	35,8	5141,4	33,8
Lande ouverte	1400,2	14,0	297,9	14,8	3141,6	23,8	4541,8	19,6	3439,5	22,6
Pelouses	845,6	8,5	193,3	9,6	1211,5	9,2	2057,1	8,9	1404,8	9,2
Sol nu	2786,4	27,9	457,9	22,7	4341,8	32,9	7128,2	30,8	4799,7	31,6
Somme	9981,0	100	2018,2	100	13186,1	100	23167,1	100,0	15204,3	100

Tableau 3 Pourcentage de chaque classe dans les trois catégories (Haut Verdon-Annot-Saint-André).

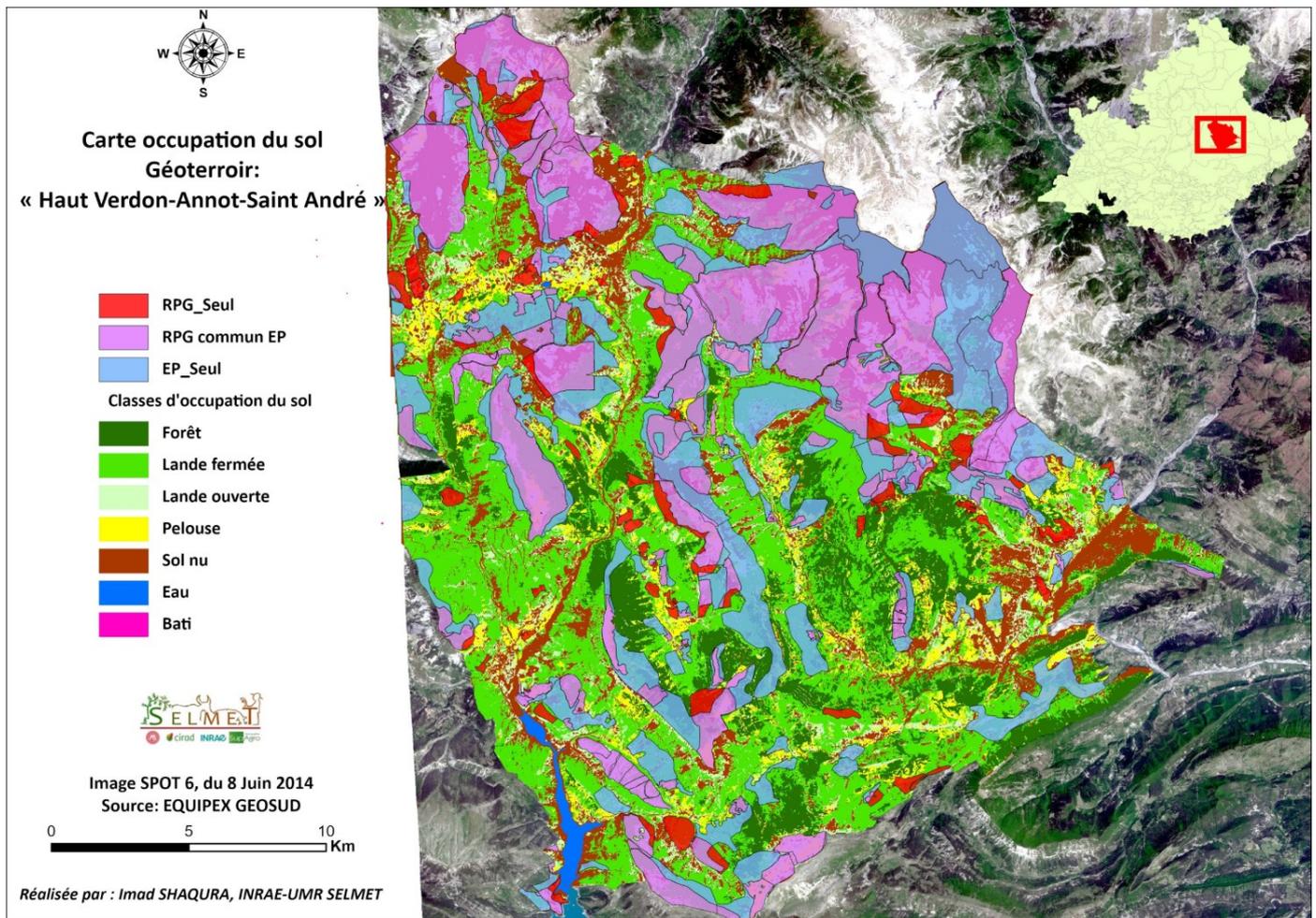


Figure 11 Localisation des trois catégories issues du croisement entre le registre parcellaire graphique (RPG) et l'enquête pastorale (EP), en fonction de leur présence dans l'une ou l'autre des bases de données ou conjointement dans les deux bases, dans le géoterritoir (Haut Verdon-Annot-Saint-André).

ANALYSE ET PRÉVISION DU MODE D'OCCUPATION DU SOL À PARTIR DE L'UTILISATION COMBINÉE DU MODÈLE DE LA THÉORIE DE L'ÉVIDENCE DE DEMPSTER-SHAFER ET DU MODÈLE CA-MARKOV : APPLICATION AUX BÂTIS DE LA VILLE DE GOMA EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

KWETU SAMBO Gloire¹, N'GUESSAN BI Vami Hermann², KOUAME Koffi Fernand²

1. Département de Géodésie, Observatoire Volcanologique de Goma, Goma, République Démocratique du Congo.
Tél : +243997509729, gloiresambo2@gmail.com, Ville de Goma, Province du Nord-Kivu, République Démocratique du Congo
2. Laboratoire de télédétection et SIG (LATSIG), Centre universitaire de recherche et d'application en télédétection (CURAT), université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire
Tél : +2250749216335, yami@outlook.com

RÉSUMÉ

Étant donné la présence de plusieurs risques volcaniques dans la ville de Goma en République démocratique du Congo et une évolution rapide des bâtis, il a été nécessaire de mettre en place une étude qui permettra de bien maîtriser cette évolution afin de limiter la vulnérabilité de la population face aux risques volcaniques. La présente étude traite de l'analyse et de la prédiction du mode d'occupation du sol dans la ville à travers plusieurs modèles. L'étude repose sur la combinaison des modèles de la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer et de Markov, qui ont servi respectivement pour effectuer la classification et la prédiction de l'évolution des bâtis. Les données satellitaires Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de Landsat-7 ont par ailleurs été utilisées pour effectuer l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol de 2001 à 2017. La validation du modèle a montré un coefficient de Kappa de 87,11 %, ce qui donne à voir une parfaite prédiction de la classe des bâtis. Cela a permis de faire une prédiction de l'évolution des bâtis de la ville de Goma jusqu'en 2030 et 2040. Il ressort de cette étude donc qu'en dépit des risques majeurs dans la ville, il existe une évolution rapide de la classe des bâtis, de l'ordre de 2,1 km² par an vers le nord et vers l'est de la ville. Ces changements d'occupation de sol et la mise en place d'une projection prédictive explicite, donneront aux décideurs un panel d'images du futur censé les aider dans leurs prises de décisions. Cela leur permettra aussi de comprendre la tendance évolutive des bâtis et la manière d'établir les zones d'exclusion dans l'extension urbaine et pour une meilleure gestion de la ville.

Mots-clés : Classification, Dempster-Shafer, CA-Markov, Prédiction, Evaluation Multi-critère, Urbanisation

ABSTRACT

Given the presence of several volcanic risks in the city of Goma in the Democratic Republic of Congo and a rapid evolution of buildings, it is necessary to set up a study which would make it possible to properly control this evolution in order to limit the vulnerability of the population in the face of volcanic hazards. This study deals with the analysis and prediction of the mode of land use in the city through several models. The combination of the Dempster-Shafer and Markov Evidence Theory models were used respectively to perform the classification and the prediction of the evolution of buildings. Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) satellite data from Landsat-7 was used to perform the analysis of land cover dynamics from 2001 to 2017. Model validation showed a Kappa coefficient of 87.11 %, which shows a perfect prediction of the class of Buildings. This made it possible to make a prediction of the evolution of buildings in the city of Goma until 2030 and 2040. It therefore appears that despite the major risks in the city of Goma, there is a rapid evolution of the class of buildings of the order of 2.1 km² per year to the north and east of the city. These changes in land use and the implementation of an explicit predictive projection therefore give decision-makers a panel of images of the future supposed to help them in their decision-making. This would also allow them to understand the evolutionary trend of buildings and how to establish exclusion zones in the urban extension and for a better city management.

Keywords: Classification, Dempster-Shafer, CA-Markov, Prediction, Multi-Criteria Assessment, urbanization

1. INTRODUCTION

Certains pays se trouvant au niveau des tropiques comptent parmi les zones les plus densément peuplées aux abords de volcans potentiellement actifs. C'est le cas de la ville de Goma, située en République démocratique du Congo. La croissance démographique urbaine est un problème majeur, car les expositions aux aléas d'origine volcanique deviennent de plus en plus importants (*Gaudru, 2008*). La ville de Goma, située à l'est de la RDC, connaît depuis plusieurs années, une croissance démographique très importante. Actuellement, cette ville répond à certains standards internationaux des villes modernes. La voirie urbaine aménagée, la sécurité alimentaire garantie, l'environnement assaini sont le résultat de plusieurs facteurs et forces contributives de la ville. Pour cette raison, les territoires proches de la ville comme Rutshuru, Masisi, Kalehe, Gisenyi et d'autres provinces, y déversent leurs populations.

Cela occasionne une pression sur la croissance démographique. En effet, en 2005, la population de la ville de Goma était estimée à 500 000 habitants, en 2012, elle dépassait déjà 900 000 habitants (*INS, 2014*) et en 2015, elle était estimée à 1,5 millions d'habitants (*Roland, 2020*). Cette augmentation rapide de la population, pousse ces derniers à occuper les milieux à fort risque volcanique.

Le Nyiragongo, localisé à une dizaine de kilomètres de la ville de Goma, est caractérisé par des éruptions fissurales et une présence de lave quasi permanente. Il fait partie des volcans les plus dangereux au monde. Ce volcan regorge de réseaux de fractures naissant à son sommet et traversant la ville en plusieurs points. Lors de l'éruption de 2002, les points de sortie des magmas étaient situés dans la ville, avec comme conséquence la destruction de plus de 80 % du poumon économique de celle-ci. Ces réseaux de fractures constituent actuellement les chemins de sortie privilégiés de magma au moment de l'éruption.

En vue de préserver durablement la population face à ces risques, il est important de diversifier les stratégies de gestion et de prédiction de l'occupation des sols. Le suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols ainsi que la mise en place d'une projection prédictive explicite, donneront aux décideurs un panel d'images du futur pouvant les aider dans la prise de décisions.

Pour mener à bien une telle étude, il s'avère important d'utiliser des données quantitatives et qualitatives fiables. Dans ces conditions, l'imagerie satellitaire et les systèmes d'informations géographiques (SIG) apparaissent comme une opportunité.

En effet, l'imagerie satellitaire permet de comprendre et de cartographier des phénomènes dynamiques tels que l'occupation du sol. Quant aux SIG, ils permettent d'organiser et de mieux structurer les informations recueillies

(*Kouassi, 2014*). Depuis quelques décennies, la modélisation et la projection de changement d'occupation des terres s'imposent comme un outil pertinent d'aide à la décision. Elles permettent d'analyser les politiques de planification territoriale dans le but d'évaluer et d'anticiper leurs impacts environnementaux (*Samie et al., 2017*).

De plus, ces dernières années, dans de nombreux travaux, les modèles qui impliquent la probabilité de changements d'une classe du sol à une autre ont été utilisés pour prédire l'évolution de l'occupation du sol. Plusieurs variantes des modèles markoviens ont été développés par (*Derrode et al. 2013, 2014*), (*Carincotte, 2006*), (*Pieczynsk, 2002, 2003, 2004*), (*Pieczynsk et al., 1994, 2005*), à savoir les chaînes de Markov, les champs de Markov, les arbres de Markov, les modèles de Markov couplés et triplés ou encore les modèles de Markov couplés à la théorie de Dempster-Shafer. Ces modèles markoviens ont considérablement amélioré les résultats de la classification des images, produisant ainsi de bons résultats.

Le modèle CA-Markov utilisé par *Kouassi, (2014)*, (*N'Guessan bi et al., 2017, 2022a, 2022b*) a permis de prédire l'évolution du couvert forestier dans la région de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire entre 2012 et 2020. *Thierry et al. (2018)* ont simulé les évolutions de l'utilisation du sol au moyen de Land Change Modeler pour modéliser les changements d'occupation des terres en région Soudanienne au nord-Ouest du Bénin. *Dodane et al., (2014)* ont utilisé le même modèle pour anticiper le futur du bassin versant de l'Yzeron, en périphérie lyonnaise en France. Ces modèles, couplés aux SIG, se sont révélés assez performants dans l'analyse des données, la simulation de probabilités du changement et l'amélioration des résultats prédictives (*Tewelde, 2011*).

Dans cette étude, la théorie de l'évidence de **Dempster-Shafer**, a été utilisée pour effectuer la classification supervisée. Cette théorie est très utile pour établir la valeur de l'information et concevoir la stratégie de collecte de données la plus efficace pour réduire l'incertitude (*Ronald, 2020*).

En effet, la théorie de Dempster-Shafer est meilleure, étant à même de gérer l'incertitude et l'ignorance. Les hypothèses de base de la théorie de Dempster-Shafer estiment que l'ignorance existe dans l'ensemble des connaissances et que la croyance, pour une hypothèse donnée, n'est pas nécessairement le complément de la croyance pour sa négation. Cette croyance représente le degré de preuve tangible à l'appui d'une hypothèse. En conséquence, les domaines possédant un intervalle de croyance élevée sont ceux dans lesquels de nouvelles preuves fourniront le plus grand degré d'information. La croyance représente la probabilité qu'une entité soit A ou B. En outre, elle a la capacité d'agréger de nouvelles preuves avec ces connaissances pour créer un nouvel état de connaissances, qui peut être interrogé sous la forme d'une sortie cartographique.

L'objectif général de cette étude est de contribuer à une meilleure gestion du territoire de la ville de Goma à travers une utilisation combinée de la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer pour la classification des unités d'occupation du sol, et du modèle de Markov pour la prédiction des zones de bâtis dans la ville de Goma. L'objectif est de produire un document d'aide à la décision à travers l'utilisation des cartes de prédiction de l'évolution du bâti.

D'une manière spécifique, ces travaux visent à :

- Cartographier la dynamique de l'état de l'occupation du sol dans la ville de Goma à l'aide des images ETM+ de Landsat-7 selon la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer ;
- Calibrer et prédire l'état de l'occupation du sol de la ville de Goma à l'aide du modèle CA-Markov ;
- Analyser statistiquement la dynamique historique (années 2001, 2009 et 2017) et l'évolution du bâti dans la ville de Goma aux horizons 2030 et 2040.

2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La ville de Goma est (**Figure 1**) située sur la rive nord du lac Kivu dans la vallée du Rift Albertin, la branche occidentale du système du rift Est-Africain, et à plus ou moins 1500 mètres d'altitude. Elle est le chef-lieu de la province du Nord-Kivu.

La ville de Goma est bâtie sur d'anciennes coulées de lave issues de la chaîne volcanique de Virunga, et principalement sur celles du volcan Nyiragongo, situé à 14 Km au nord. La chaîne de Virunga est constituée des volcans Nyamulagira (3,058 m), Nyiragongo (3,470 m), Mikeno (4,437 m), Karisimbi (4,507 m), Visoke (3,711 m), Sabinyo (3,634 m), Gahinga (3,500 m) et Muhavura (4,127 m) (**André et al., 2016**). La ville est limitée au Nord par le territoire de Nyiragongo, au Sud par le Lac Kivu (Province du Sud-Kivu), à l'Est par la république du Rwanda et à l'Ouest par le territoire de Masisi.

Dans les années 1800, 1977, 2002 et 2021, Goma a été victime de catastrophes naturelles volcaniques qui sont à l'origine de son relief accidenté.

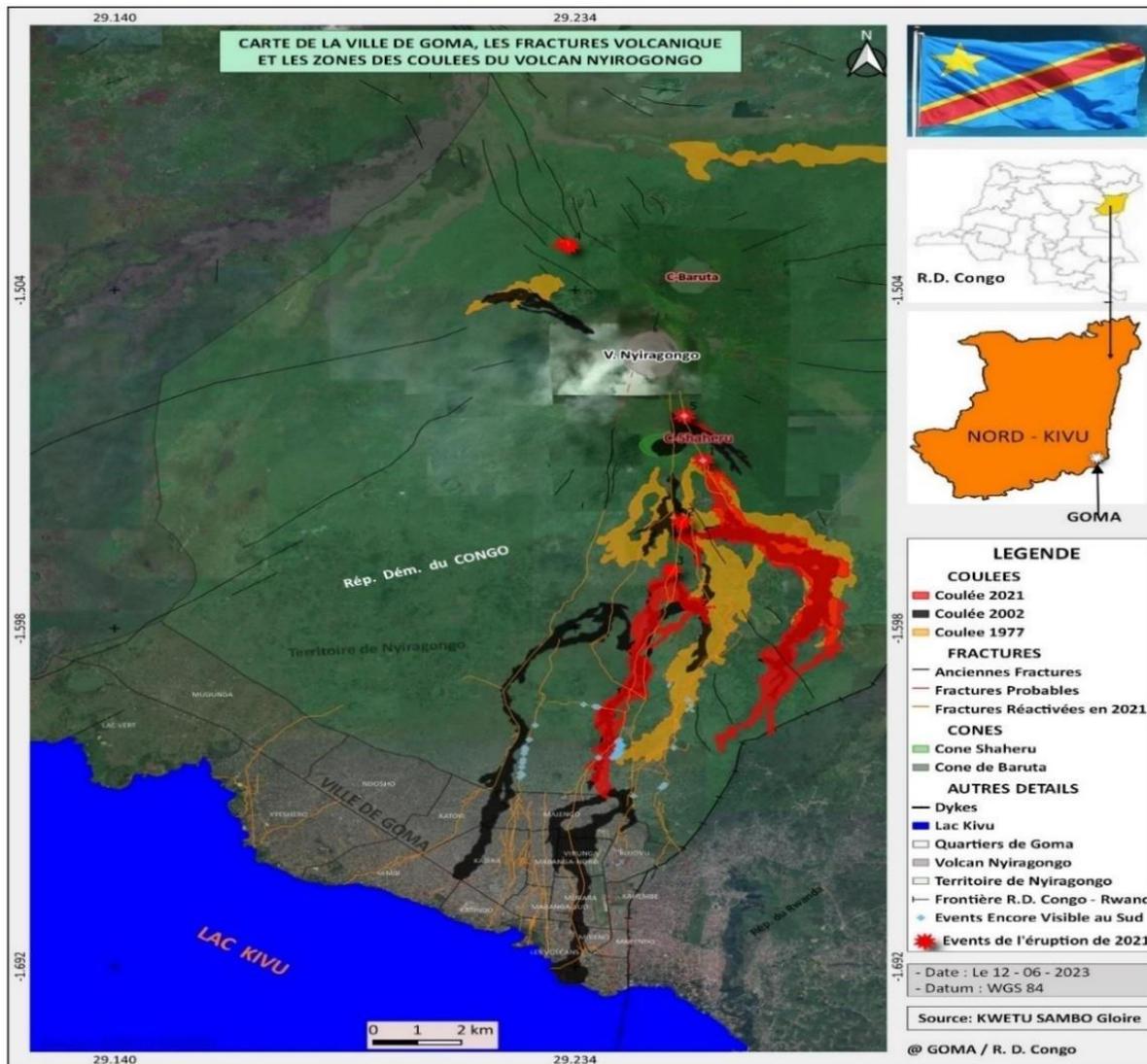


Figure 1 : Localisation de la ville de Goma, fractures volcaniques et coulées de 1977, 2002 et 2021

3. MATÉRIEL

3.1. Données satellitaires et cartographiques

Les images ETM+ (Enhanced Thématique Mapper Plus) ortho-rectifiées (Niveau L1T) provenant du satellite Landsat-7 ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Les images utilisées concernent les années 2001, 2009 et 2017 (**Tableau I**), avec une couverture nuageuse de moins de 3 % . Elles ont été acquises à partir du site <https://earthexplorer.usgs.gov/> .

Le radiomètre ETM+ permet d'offrir des images couvrant un champ d'observation de 185 km X 185 km, avec une résolution spatiale de 30 m en mode multispectral.

En plus de ces images Landsat, le modèle numérique de terrain (MNT) SRTM 30 m issu d'Earth-Explorer et une carte du réseau routier de 2014 issus des données de la mission de l'Organisation des Nations unies en République démocratique du Congo (MONUC), ont été utilisées dans l'évaluation multicritère.

Tableau I : Caractéristiques des images satellitaires utilisées

Capteurs	Image	Date d'acquisition	Résolution spatiale	Path-Row
LANDSAT-7	ETM+ 2001	11-12-2001	(B1 à B7) 30x30m	173-61
LANDSAT-7	ETM+ 2009	28-09-2009	(B1 à B7) 30x30m	173-61
LANDSAT-7	ETM+ 2017	21-01-2017	(B1 à B7) 30x30m	173-61

3.2. Logiciels

Les logiciels utilisés dans le cadre de notre étude sont :

- ❖ TerrSet 2020 pour la classification, la détection des changements, l'implémentation de la modélisation de l'occupation du sol, la prédiction et validation.
- ❖ Le plugin SCP sur QGIS, utilisé pour convertir les niveaux de gris en valeurs de réflectances, éliminer les effets atmosphériques et l'extraction de la zone d'étude.

4. MÉTHODES

4.1. Cartographie de l'occupation du sol à l'aide des images ETM+ de Landsat-7

4.1.1 Prétraitement et extraction de la zone d'étude

Après acquisition des images, les prétraitements supplémentaires, à savoir les corrections atmosphériques et radiométriques, ont été réalisées pour éliminer les effets de l'atmosphère et convertir les luminances en réflectances. L'étape suivante a donc consisté en l'extraction de la zone d'étude.

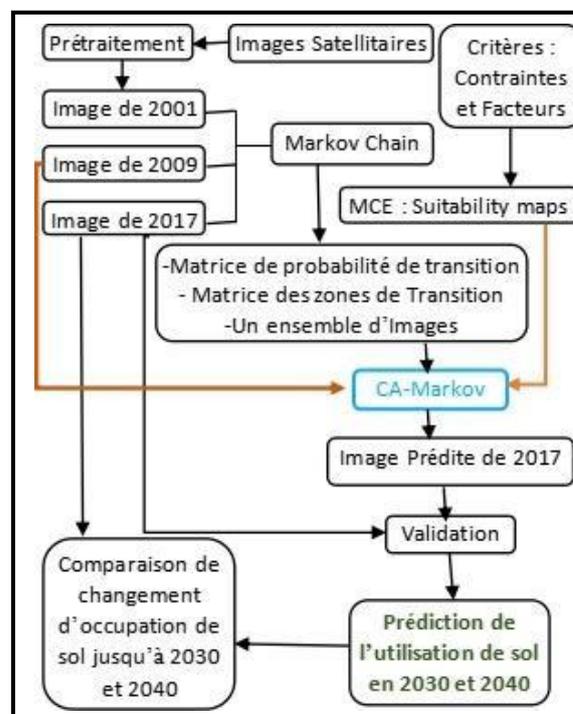


Figure 2. Synthèse méthodologique de la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer et de CA-Markov

4.1.2. Classification supervisée avancée des images ETM+ de landsat-7

La discrimination de types d'occupation de sol a été effectuée à partir de la composition colorée des images satellitaires ETM+ de Landsat-7 (Kheir et al., 2001 ; Vauboud, 2019) (Figures 2, 3, 4). La composition colorée utilise les bandes rouge, verte et proche infrarouge.

La classification supervisée a été réalisée à l'aide de la théorie de l'évidence de Dempster-Shafer. Cette théorie est très utile pour établir la valeur de l'information et concevoir une stratégie de collecte de données la plus efficace pour réduire l'incertitude (**Gordon et Shortliffe, 1985 ; Ronald, 2020**). Par rapport à la théorie bayésienne des probabilités, il est évident que la théorie de Dempster-Shafer est plus à même de gérer l'incertitude qu'implique l'ignorance. Dans cette étude sera utilisé le concept Belief (croyance), qui représente le degré de preuve tangible à l'appui d'une hypothèse. En conséquence, les domaines avec un intervalle de croyance élevée sont ceux pour lesquels de nouvelles preuves fourniront le plus grand degré d'information. En outre, ce concept a la capacité d'agréger de nouvelles preuves, afin de créer un nouvel état de connaissances qui peut être interrogé sous la forme d'une sortie cartographique pour la croyance, la plausibilité ou l'intervalle de croyance associé à toute hypothèse. Pour chaque élément de preuve saisi, des images d'attribution de probabilité de base (sous la forme d'images de nombres réels avec une plage de 0 à 1) sont requises avec une indication de leur hypothèse étayée.

Enfin, la qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient Kappa (**Congalton, 1991**). Afin de déterminer le changement, les superficies de différentes unités d'occupation de sol ont été définies en pourcentage de chacune des cartes d'occupation du sol.

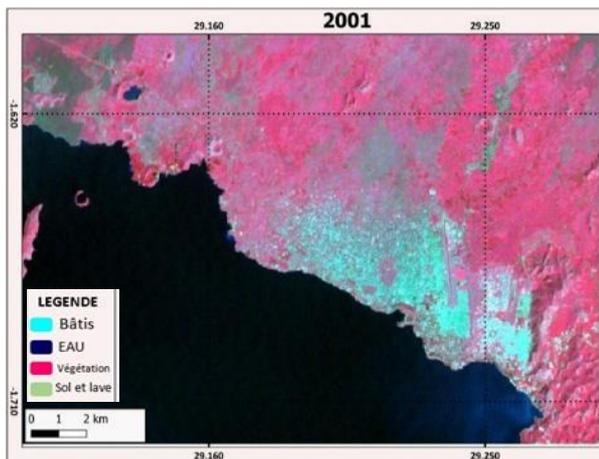


Figure 3 : Composition colorée de l'image de 2001

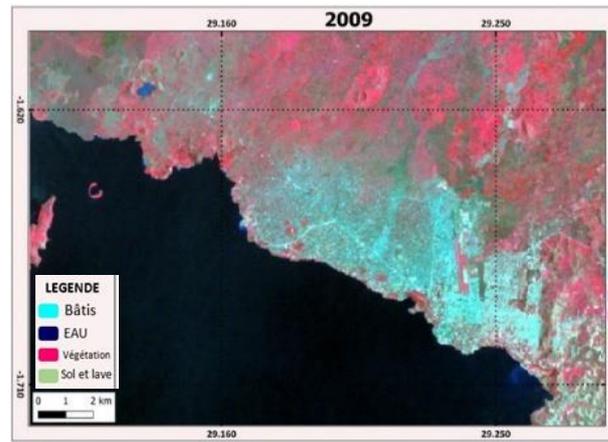


Figure 4 : Composition colorée de l'image de 2009

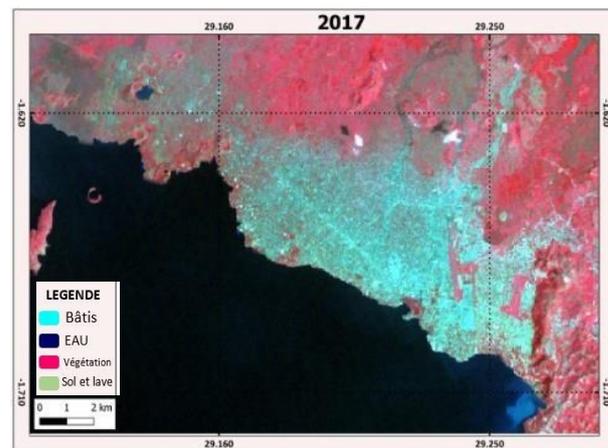


Figure 5 : Composition colorée de l'image de 2017

4.2. Calage et validation du modèle de prédiction

Le modèle de CA-Markov est utilisé pour ses performances et a été appliqué avec succès à plusieurs reprises dans des régions tropicales. Selon les travaux de (**Mas et al., 2011 ; Maestriperi, 2012**), le modèle CA-Markov a donné de meilleurs résultats que d'autres modèles (LCM, Dinamica et CLUE-S) dans la simulation de l'occupation du sol. Son utilisation permet de mettre en place une procédure de prévision de couverture du sol combinant les automates cellulaires et l'attribution de terres à objectifs multiples avec les chaînes de Markov et l'EMC (évaluation multicritère). Le calibrage du modèle se fait à partir de données antérieures, datant notamment de 2001 et 2009.

Ce modèle analyse deux images d'occupation du sol, datant de 2001 et 2009, et génère une matrice de probabilité de transition, une matrice de zones de transition et un ensemble d'images. Le changement est réparti sur plusieurs périodes par simple division, c'est-à-dire en supposant un taux de transition de probabilité conditionnelle constant.

4.2.1. Évaluation multicritère (ECM)

L'évaluation multicritère (MCE) permet alors de corriger les non-allocations spatiales des matrices de transition. Cette méthode permet d'orienter notre choix sur la base de plusieurs critères communs. 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. Les variables environnementales (réseau routier, pentes, altitude, Lac, Etc) , susceptibles d'avoir un effet sur la dynamique d'occupation du sol , sont identifiées et pondérées afin d'obtenir des cartes d'aide à la décision en intégrant un ensemble de critères mesurables et cartographiables. Les critères sont les éléments de base décisionnelle. Ils peuvent être évalués ou mesurés. Ils se composent de deux types de variables : les facteurs et les contraintes.

Les contraintes sont les critères booléens qui contraignent notre analyse à des régions géographiques particulières. Dans ce cas, les contraintes différencient les zones que l'on peut considérer comme propices au développement résidentiel de celles qui ne peuvent l'être sous aucune condition. Pour notre étude, les routes et le lac sont considérés comme des contraintes, étant donné qu'aucun développement de la ville ne peut toucher ces deux variables.

En revanche, 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, cette échelle d'indice permet de standardiser l'ensemble des facteurs en les rendant comparables. La phase de standardisation est effectuée grâce à une fonction d'appartenance de logique floue (Fuzzy). Ainsi, les facteurs sont comparés deux à deux dans une matrice de comparaison dite de Saaty, et ce en fonction de leur importance relative par rapport à l'objectif fixé. Dans ce travail, nous avons considéré deux contraintes, à savoir **(1) le lac et (2) les routes, ainsi que quatre facteurs dont (1) la distance des routes, (2) la distance de la zone de puissance, (3) la pente et (4) la distance du Lac.**

Enfin, les cartes d'aptitudes issues de l'ECM sont combinées aux cartes de probabilités de transition dérivant du calcul des chaînes de Markov.

4.2.2. CA-Markov

En s'appuyant sur les images de 2001 et 2009 issues de la classification, le processus a d'abord consisté à saisir l'image d'occupation du sol de base, qui est la dernière image d'occupation du sol utilisée avec MARKOV (l'image de 2009). Les cartes d'aptitude (groupées) produites par le module MCE ont été implémentées après que la zone de transition de Markov a été définie. La valeur 5 x 5 a été utilisée comme filtre de contiguïté. Le processus prend fin avec la production de la carte simulée et la validation des données.

La validation du modèle a également été effectuée à partir de la comparaison des surfaces d'une carte témoin (année 2017) et du résultat de la prédiction (année 2017), ainsi que sur la base de la comparaison des deux cartes. Les coefficients relatifs à cette évaluation sont le coefficient de Cramer's qui varie de 0,0 (pas de corrélation) à 1,0 (corrélation parfaite) (*N'Guessan bi et al., 2013,2017,2022a,2022b*) et les valeurs de Kappa. Ces dernières sont considérées comme excellentes pour des valeurs supérieures à 0,75 ; bonnes pour des valeurs comprises entre 0,40 et 0,75 ; et mauvaises pour les valeurs inférieures à 0,40 (*Sylla et hauhouot, 2016*). Une fois que le coefficient de Kappa montre un résultat satisfaisant, la prédiction est alors refaite à des dates futures de 2030 et 2040.

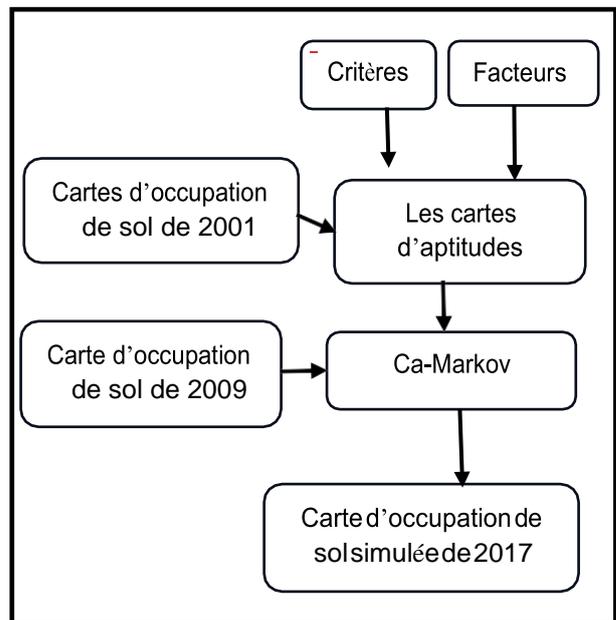


Figure 6 : Prédiction du changement d'occupation de sol à l'aide de Ca-Markov

5. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Cartographie de la dynamique de l'occupation du sol

Les classifications des images Landsat-7 ETM+ réalisées à partir de la composition colorée ont permis de mettre en exergue quatre types d'occupation du sol : les bâtis, l'eau, la végétation et le sol nu et lave (cf. fig 7, 8 et 9).

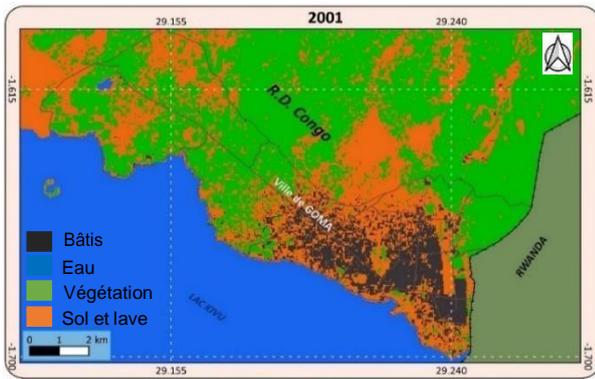


Figure 7 : Carte d'occupation du sol de l'image de 2001

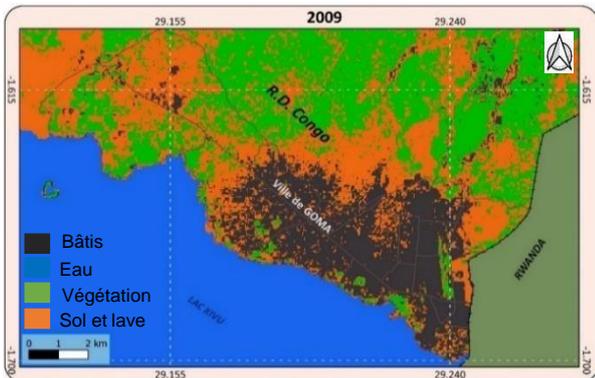


Figure 8 : Carte d'occupation du sol de l'image de 2009

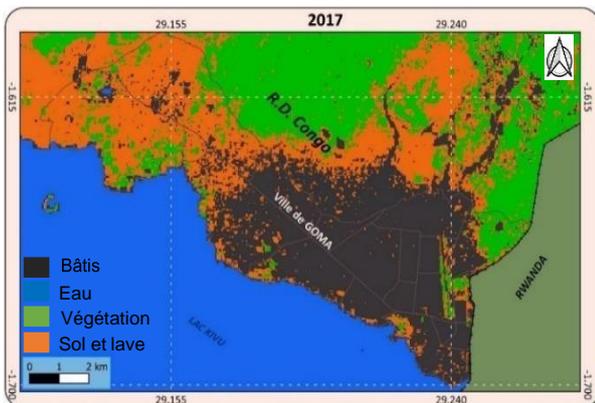


Figure 9 : Carte d'occupation du sol de l'image de 2017

La matrice de confusion utilisant les points de contrôle de chaque unité d'occupation du sol a permis de valider les résultats de la classification. Les coefficients de Kappa pour la classification de l'image de 2001, 2009 et 2017 sont respectivement de 99,92 %, 95,46 % et 97 %.

Remarquons que la superficie des bâtis évolue d'une façon exponentielle. Elle passe de 11,6 Km² à 45,0 Km² entre 2001 et 2017, le pourcentage des bâtis qui passant donc de 5,5 % en 2001 à 21,3 % en 2017. Cette évolution des bâtis entre 2001 et 2017 (Figure 10) indique un taux de changement annuel positif estimé à presque 2,087 Km²/an (Cfr Fig 10 et 11).

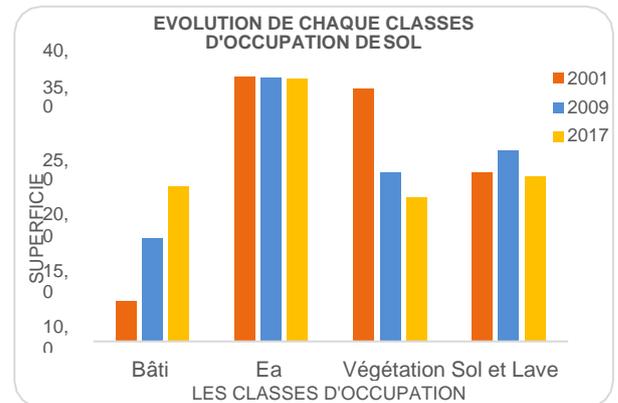


Figure 10 : Évolution globale de différentes classes d'occupation du sol de 2011, 2009 et 2017

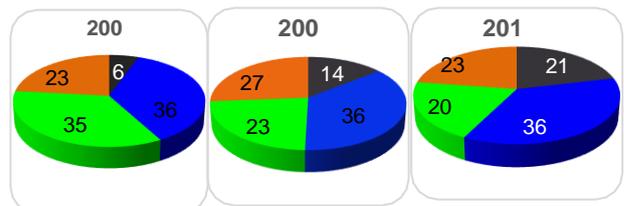


Figure 11 : Évolution globale de différentes classes d'occupation du sol de 2001, 2009 et 2017

On observe également une diminution de la proportion de la végétation, qui est passée de 34,8 % en 2001 à 19,9 % en 2017, la superficie de la végétation passant donc de 73,5 Km² en 2001 à 42,0 Km² en 2017, ce qui correspond à une diminution de 31,5 Km² (Figure 7,8 et 9). La proportion du sol nu est de 23,3 % en 2021, et 22,7 % en 2017 (cf. Fig. 10 et 11).

5.2. Prévision de l'état de l'occupation du sol

A. Résultat de la calibration du modèle de Markov

Le tableau II ci-dessous donne la probabilité pour que les bâtis deviennent de la végétation, du sol nu. Ces valeurs sont respectivement de 0,4 % et 5,99 %. En outre, les zones classées comme sol nu et lave sont parfois occupées par des constructions de nouveaux bâtis (27,02 %) et recolonisées par la végétation (17,01 %). Enfin, la végétation disparaît en grande partie, pour laisser la place aux sols nus (36,25 %) et à de nouveaux Bâtis (8,64 %). La classe eau ne subit pas une grande modification de sa superficie.

		2017			
2009		Bâtis	Eau	Végétation	Sol Nu
Bâtis		93,61	0,00	0,40	5,99
Eau		0,16	99,24	0,00	0,61
Végétation		8,64	0,00	55,11	36,25
Sol Nu		27,02	0,12	17,01	55,86

Tableau II : Probabilité de transition (en %) entre les types d'occupation du sol

B. Calibration et validation du modèle CA-Markov

Le modèle Ca-Markov permet de calculer un état futur pour 2017 (**Figure 12**) à partir des états connus à partir de l'observation des évolutions passées et de leur probabilité. La figure ci-dessous présente la carte d'occupation du sol de 2017, issue de la simulation réalisée avec CA-Markov.

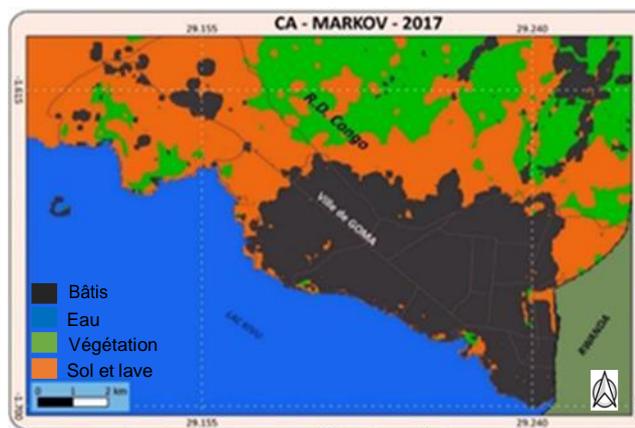


Figure 12 : Carte d'occupation du sol de 2017 prédite par le module CA-Markov

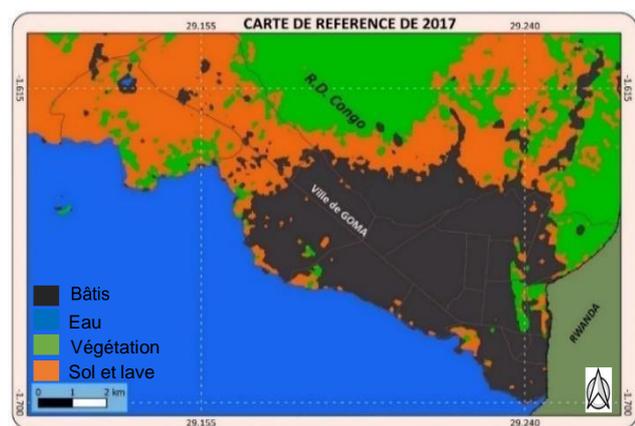


Figure 13 : Carte d'occupation de sol témoins de 2017

Catégories	CA-Markov 2017 (%)	Carte réelle 2017 (%)
Bâtis	23	21,3
Eau	38	36,2
Végétation	14	19,9
Sol et Lave	25	22,7

Tableau III : Comparaison entre les résultats du modèle CA-Markov et le témoin 2017 observée

Remarquons que le CA-Markov génère des résultats plus proches des valeurs issues de la classification de la carte d'occupation du sol témoins en 2017 (**Figure 13**). En considérant les pourcentages des bâtis, qui sont de 21.3 % pour la carte témoins et 22.7 % pour le sol et lave ; nous observons que ces

valeurs pour la carte simulée sont respectivement de 23 % et 25 %. Le coefficient de Kappa pour l'analyse spatiale de concordance entre ces deux cartes est de 78,8 % (Tableau IV).

En outre, afin de valider les résultats, il a été trouvé un coefficient de Cramer's V=0,8282. Cela représente donc une très bonne corrélation.

D'après l'interprétation du coefficient de Kappa en fonction de la valeur Kappa de Cohen, les valeurs supérieures à 75 % ou plus peuvent être considérées comme un excellent accord au-delà du hasard (*Altman, 1999 ; Landis et Koch, 1977*). Ainsi, la force du coefficient de Kappa calculé est estimée « **substantielle (accord fort)** ».

Classes	Bâtis	Eau	Végétation	Sol et Lav	Total
Bâtis	40257	166	386	5950	46773
Eau	444	77103	21	714	78284
Végétation	2452	2	21483	11474	35387
Sol et Lav	5652	7	7653	34024	47338
Total	48784	77278	29553	52181	219441

Coefficient de Kappa	78,80 %
Précision globale	84,07 %

Tableau IV : Matrice de confusion de la classification de l'image de 2017 et la prédiction de 2017

Étant donné que la zone d'étude se trouve dans une région intertropicale avec deux saisons, saison des pluies et saison sèche, la saisonnalité pourrait augmenter la confusion entre les classes de végétation et de sol nu et lave, diminuant la valeur du coefficient de Kappa. Il serait donc intéressant de proposer d'intégrer ce critère dans une nouvelle étude afin de valider cette hypothèse.

B. ÉVOLUTION DES BÂTIS ET PRÉDICTION DES UNITÉS D'OCCUPATION DE SOL 2001-2017

L'étude de validation se concentre sur l'analyse de l'évolution des bâtis entre 2001 et 2017 (**Figure 10 et 11**) afin de confirmer le modèle utilisé. Le résultat de cette validation constitue un bon argument pour effectuer, dans le futur, une bonne simulation de l'évolution des unités d'occupation de sol. Cette analyse permettra de bien comprendre la dynamique de la zone bâtis et de montrer l'importance de l'utilisation du modèle CA-Markov.

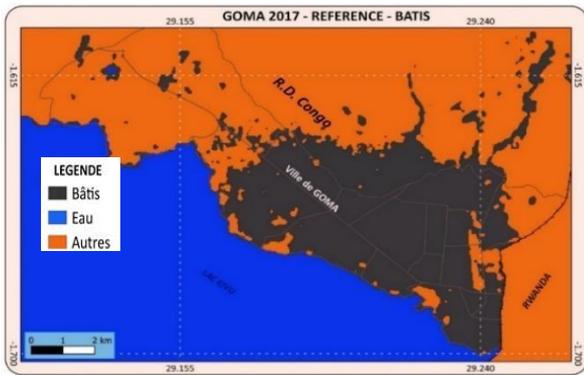


Figure 14 : Carte des bâties de 2017



Figure 15 : Carte des bâties prédite de 2017

Afin de valider les résultats, il a été trouvé un coefficient de Kappa de 87,11 % (Tableau V). Cela montre que la prédiction est parfaite.

Classes	Bâties	Eau	Total	ErrorCo
Bâties	41181	84	41265	0,001
Eau	337	76935	77272	0,004
Autres	7441	248	7689	1
Total (%)	48959	77267	126226	
Erreur	0,158	0,004	0,063	
Coefficient de Kappa	87,11 %			

Tableau V : Matrice de confusion de l'image de 2017 et la carte de CA-Markov 2017 des bâties et la classe de l'eau

Dans le détail, l'analyse visuelle montre que la concordance spatiale de ce modèle avec la carte de référence 2017 pour les bâties est réellement **excellente**, car largement supérieure à 75 % (Fig. 16) (N'Guessan bi et al., 2013, 2017, 2022a, 2022b)

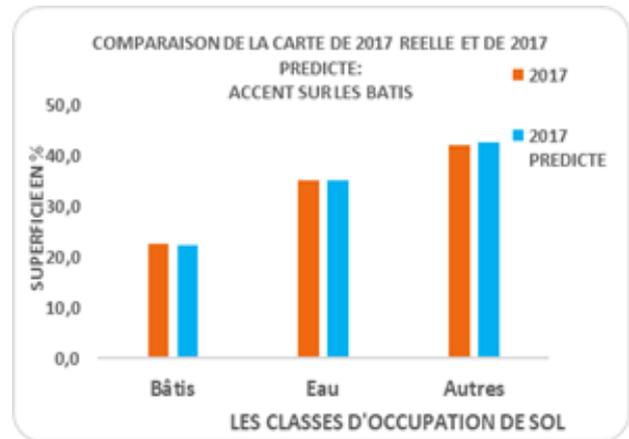


Figure 16 : Comparaison de la carte de 2017 et celle de 2017 prédite en se focalisant sur les zones de bâties

Les résultats de la simulation du modèle CA-Markov montrent que ce modèle présente des résultats plus pertinents pour la prédiction, d'où son utilisation pour prédire l'état de l'occupation du sol de la ville de Goma en 2030 et en 2040 (Figure 17 et 18). L'analyse des résultats nous montre que la superficie de la ville de Goma sera composée en 2030 de 30 % de bâties, 36,3 % de la classe eau, 14,1 % de la végétation et 19,6 % de sol nu-Lave (Tableau VI et Figure 17 et 18).

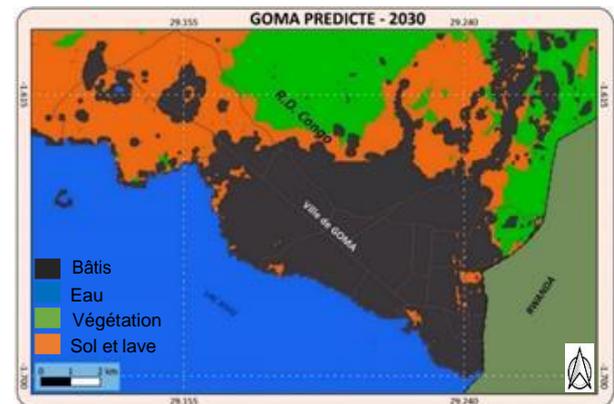


Figure 17 : Carte de l'occupation du sol de la ville de Goma à l'horizon 2030

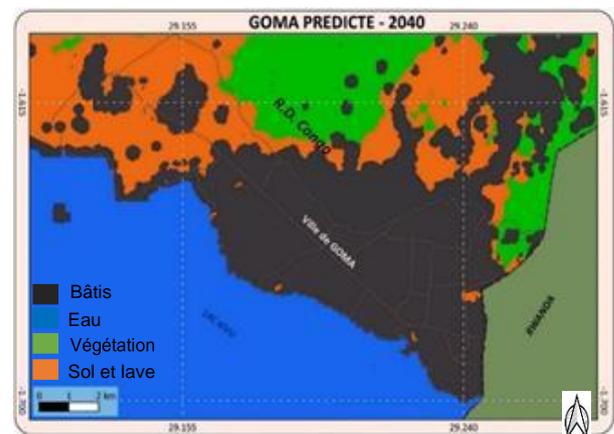


Figure 18 : Carte de l'occupation du sol de la ville de Goma à l'horizon 2040

Proportion des catégories prédites par CA-Markov 2030		Proportion des catégories prédites par CA-Markov 2040	
Catégories	Proportion (%)	Catégories	Proportion (%)
Bâti	30	Bâti	35,4
Eau	36,3	Eau	36
Végétation	14,1	Végétation	11,7
Sol nu et Lave	19,6	Sol nu et Lave	16,9

Tableau VI : Proportion des unités d'occupation de sol prédite à l'horizon 2030 et 2040

Les **Figures 19 et 20** montrent l'évolution des unités d'occupation de sol entre 2001 et 2017, ainsi que celles estimées pour 2030 et 2040 simulées. Il en résulte une évolution rapide des zones de bâtis, réalisée au détriment des autres unités d'occupation du sol. Ce phénomène serait dû à l'attractivité de la ville ainsi qu'à une mauvaise diffusion de l'information quant aux risques volcaniques dans cette zone urbaine.

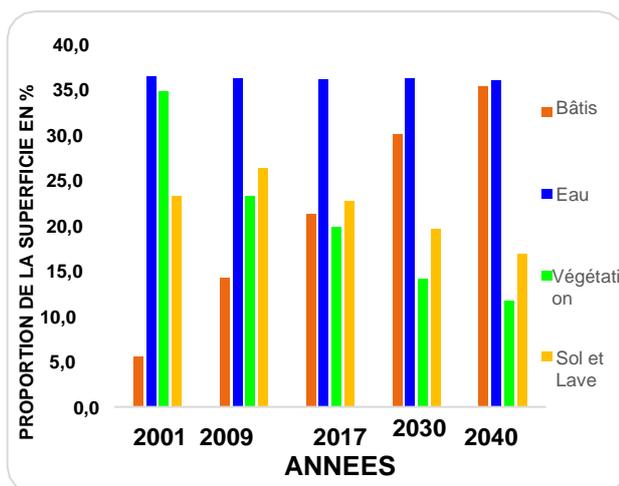


Figure 19 : Évolution globale des unités de l'occupation du sol entre 2001 et 2040 après prédiction en %

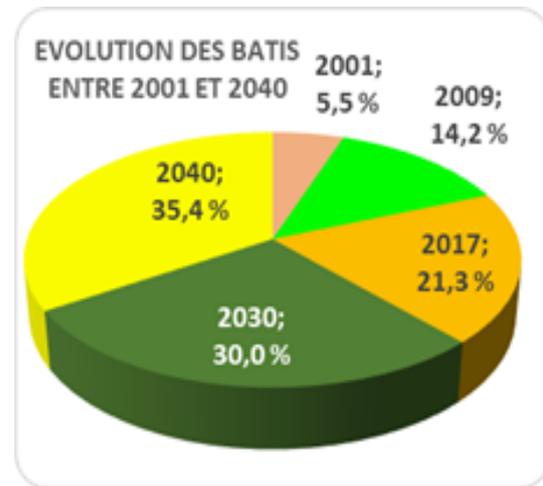


Figure 20 : Évolution des bâtis entre 2001 et 2040 après prédiction

La Figure 21 présente une carte de la ville de Goma avec les coulées de 1977, 2002 et 2021 et des fractures volcaniques. Ces endroits sont des sites à fort risque. Cette carte présente aussi l'évolution et la superficie des bâtis de 2001, 2009, 2017, ainsi que les simulations en 2030 et 2040. Elle montre combien la population se concentre toujours autour des zones à fortes risques volcaniques. Cette carte (**Figure 21**) pourrait être utilisée par les autorités dans leur prise de décisions, afin de protéger au maximum la population des risques volcaniques.

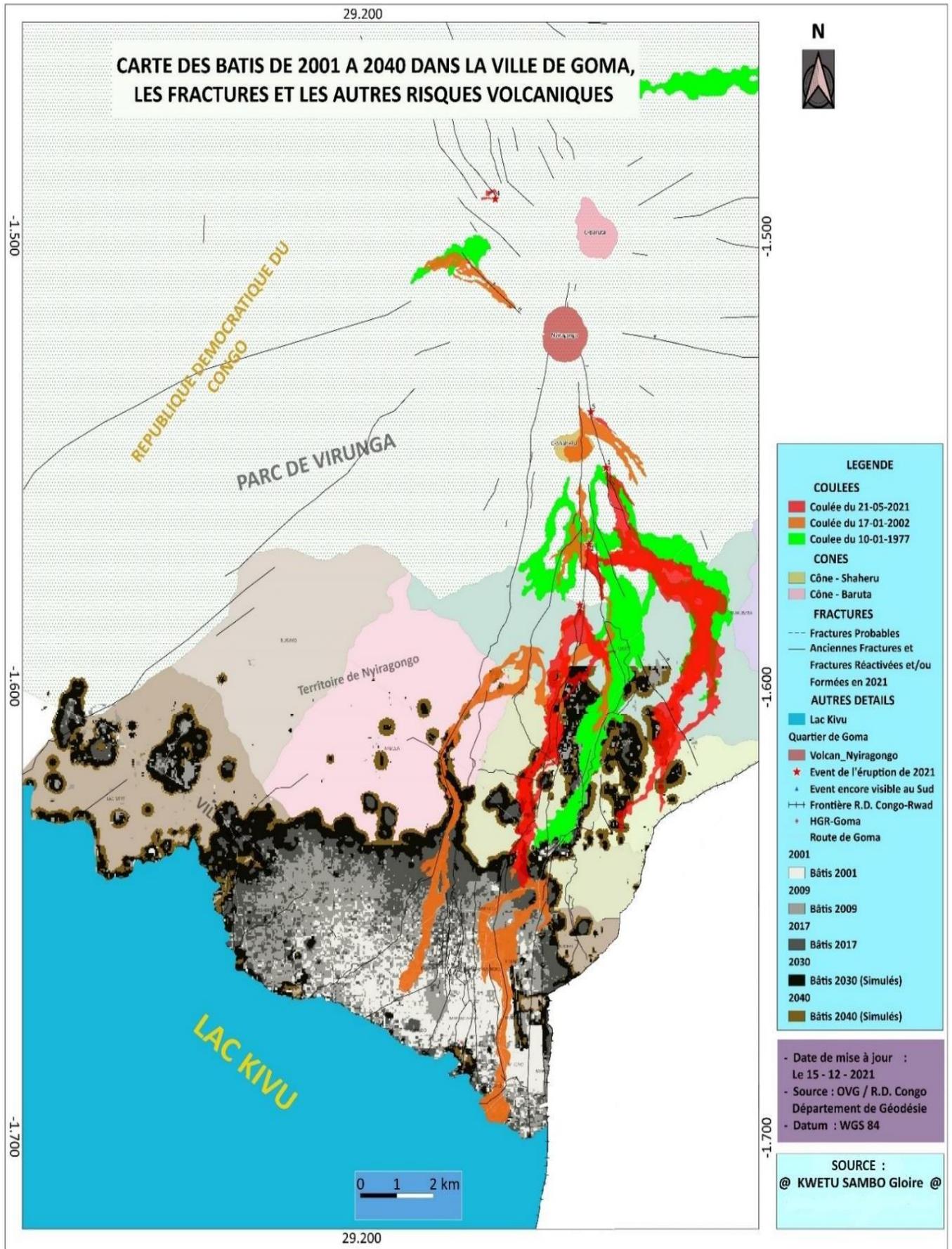


Figure 21 : Carte des bâtis, de 2001 à 2040, simulés dans la ville de Goma, avec les fractures et les autres risques volcaniques

Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection

Association formée sous le régime de la loi de 1901
Siège social : 73, avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex
e-mail : sfpt-bureau@sfpt.fr – web : sfpt.fr

Pour adhérer à la SFPT et recevoir la Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, il vous suffit de renseigner la fiche d'information que vous trouverez sur le site de la SFPT <https://www.sfpt.fr/sfpt/adhesion/> et l'adresser à sfpt-bureau@sfpt.fr

La SFPT est une Société Savante, fondée en 1959 sous le régime de la loi de juillet 1901. Elle fédère la communauté de photogrammétrie et télédétection en France et dans les pays francophones en réunissant les spécialistes de l'imagerie spatiale, aérienne et terrestre, et de leurs applications. La SFPT représente la France auprès de l'ISPRS (Société internationale de Photogrammétrie et télédétection) et fait rayonner la profession à travers l'organisation de colloques scientifiques, de la présente revue, de son site web et de sa newsletter.

Adhérer à la SFPT vous permet de rejoindre la communauté scientifique et industrielle nationale en photogrammétrie et télédétection, bénéficier de tarifs préférentiels dans les colloques que nous organisons, recevoir la revue trimestrielle, communiquer des informations via la Newsletter et le site web.

Membres donateurs



Membres bienfaiteurs



Membres de soutien



Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection,
Vol. 225 (1)

Sommaire

Contribution de SPOT World Heritage aux séries temporelles d'observation satellitaires des montagnes françaises <i>Barrou Dumont, Z., Gascoin, S., & Inglada, J.</i>	1
Caractérisation des Surfaces Pastorales en Région PACA par SIG et Télédétection : Questions de Méthodes et Premiers Résultats <i>Shaqura, I. & Lasseur, J.</i>	9
Analyse et prévision du mode d'occupation du sol à partir de l'utilisation combinée des modèles de Markov et de la théorie de l'Évidence de Dempster-Shafer : application aux bâtis de la ville de Goma en République Démocratique du Congo <i>Kwetu Sambo, G., N'Guessan H., & Kouame, K. F.</i>	23