Document generated on 04/23/2024 5:47 p.m.

**VertigO**
**La revue électronique en sciences de l'environnement**

# Reconstituer les trajectoires paysagères par photointerprétation semi-automatisée et télédétection : géohistoire d'un cône de déjection torrentiel en vallée de Maurienne (Savoie)

Thérèse Hugerot, Laurent Astrade, Estelle Ployon and Christophe Gauchon

Volume 17, Number 2, September 2017

URI: https://id.erudit.org/iderudit/1058203ar

See table of contents

Publisher(s)

Université du Québec à Montréal
Éditions en environnement VertigO

ISSN

1492-8442 (digital)

Explore this journal

Cite this article

Hugerot, T., Astrade, L., Ployon, E. & Gauchon, C. (2017). Reconstituer les trajectoires paysagères par photointerprétation semi-automatisée et télédétection : géohistoire d'un cône de déjection torrentiel en vallée de Maurienne (Savoie). *VertigO*, *17*(2).

Article abstract

This article proposes a methodology to interpret old aerial photography applied to the geohistorical study of torrential landscapes. Indeed, as a primary source, images are historical proxies which foremost advantages are to locate and spatialise forms of changes. The aim of these researches is to produce a cartographical following of landscapes dynamics, through this type of archive. To achieve such a purpose, we choose a landscape sensitive to changes (torrential fan), considering landscape entities which equilibrium conditions responds to the socio-environmental context of a torrential northern alpine valley. In this exploratory aim of diachronic reconstruction, the photo-interpretative technics and remote sensing were associated. In this article, we explain the potentialities of an object-oriented approach using as an example a time series of areal missions taken by the National Geographic Institute of France (IGN-F©). The results of this method give a spatial and normalised comprehension over the fifty last years.

Tous droits réservés © Université du Québec à Montréal et Éditions en environnement VertigO, 2017

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

# Reconstituer les trajectoires paysagères par photo-interprétation semi-automatisée et télédétection : géohistoire d'un cône de déjection torrentiel en vallée de Maurienne (Savoie)

Thérèse Hugerot, Laurent Astrade, Estelle Ployon et Christophe Gauchon

## Introduction

1 Par l'association des techniques de photo-interprétation et de télédétection, il s'agit de reconstituer l'évolution paysagère d'un cône de déjection torrentiel alpin. Notre démarche consiste à suivre l'évolution récente d'un paysage torrentiel en puisant dans les archives photographiques aériennes de l'Institut Géographique National (IGN©). Ce matériel de recherche a l'avantage d'être mobilisable rapidement et aux meilleures résolutions. En effet, les archives photographiques de l'IGN© inventorient les campagnes photographiques aériennes dont le recouvrement est supérieur à 10 $km^2$ ou supérieure à 50 photographies. Le fonds d'archives numériques regroupe, sur les soixante dernières années, une collection de photographies panchromatiques au 1 :15000 et au 1 :30000 prises avec une répétitivité de trois à dix ans selon la vitesse de transformation des paysages (Plu et Ducher 1988). Les premières campagnes photographiques régulières du Service Géographique de l'Armée débutent en 1939, ce qui limite l'étude au moment où, dans les Alpes du Nord, les territoires ruraux subissent le contrecoup des crises économiques et démographiques alors qu'en basse vallée affluent une population captée par l'industrie électrochimique (Onde, 1942). Le cône de déjection de Saint-Martin-de-la-Porte choisi pour illustrer cette étude couvre une superficie de 60 ha, soit près de 40 ha de

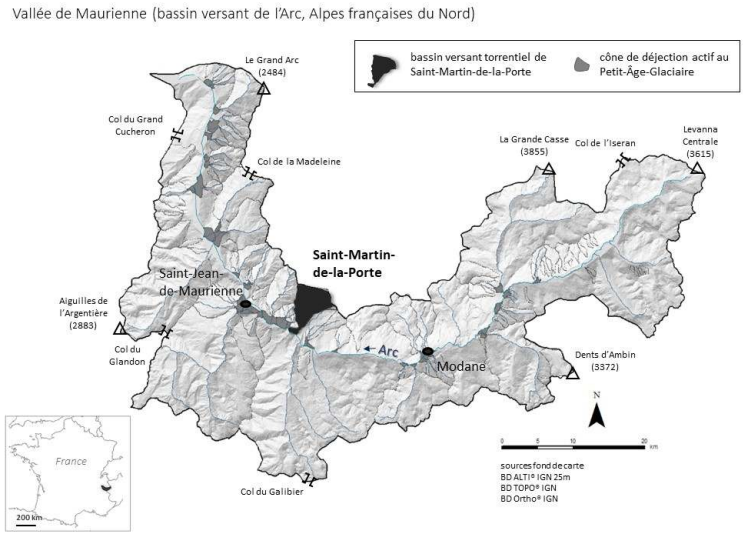
surface boisée et de friche et une extension du périmètre domanial de la Restauration des Terrains de Montagne sur 26 % du cône. Ce site présente des enjeux agricoles défendus depuis 1990 par une Association Foncière Pastorale, des enjeux de qualité paysagère rediscutés depuis l'implantation du chantier Lyon-Turin au pied du cône de déjection, ainsi que des enjeux d'aménagements développés autour du torrent de Saint-Martin et des axes autoroutiers et ferroviaires. Il s'agira de reconnaître les trajectoires paysagères de ce cône de déjection par la comparaison photographique en ciblant les dynamiques torrentielles et les formes d'occupation du sol. Ces trois enjeux antagonistes posent la question des trajectoires paysagères du cône de déjection aussi bien du point de vue de l'occupation des sols que de l'emprise torrentielle. Au regard des dynamiques paysagères et torrentielles récentes, la méthode de la comparaison photographique est mise en avant pour décrire les conditions d'équilibres du milieu (Baud et Reynard 2015). Cependant, la restitution cartographique attendue dans le cas présent est peu reproductible compte tenu de l'échelle d'analyse si l'on s'en tient à une méthode de digitalisation manuelle. Aussi, la télédétection présente un intérêt non négligeable du point de vue de l'automatisation des traitements. Le second atout de la télédétection est l'approche développée sur l'interprétation visuelle des images panchromatiques à partir des indices texturaux (Boyer, 2010 ; Haralick, 1979). En adaptant cette approche à des photographiques anciennes, il s'agit essentiellement de proposer une chaîne de traitement simplifiée construite en deux étapes que sont la définition des formes d'occupation du sol, par la segmentation, et leur classification. La superposition des documents anciens (cadastres, plans) avec la photographie aérienne a été utilisée pour contraindre et valider l'analyse. Elle intervient pour affiner le découpage des formes d'occupation du sol, selon l'approche dite orientée-objet. Elle consiste à segmenter l'image en entités avant de les regrouper par classe. Le résultat est une cartographique diachronique des formes paysagères sur un intervalle temporel de dix ans entre les années 1948 et 1996.

# Contextes de l'étude

## Le cône de déjection torrentiel de Saint Martin : un paysage témoin de la vulnérabilité torrentielle

2 Le paysage du cône de déjection est un marqueur privilégié pour interpréter la relation entre l'évolution d'un paysage torrentiel et les activités humaines. À l'interface entre les processus de versant et (Schneuwly-Bollschweiler et al. 2013). Situé à près de 750 m d'altitude sur la partie médiane de la vallée intra-alpine de l'Arc, en Maurienne (Alpes françaises) (Figure1). Le bassin versant du torrent de Saint-Martin creuse dans les gypses, les schistes et les cargneules qui marquent la zone houillère des Alpes du Nord où les processus d'érosion et de versant sont particulièrement actifs. La présence d'un glissement de terrain en rive droite du bassin de réception et le ravinement des berges explique la recharge sédimentaire rapide du lit l'origine des laves torrentielles. Lors de la crue de 2011, le volume de matériaux transporté par la lave est évalué à 20 000 m3 (Kuss, 2013).

**FIGURE 1. CARTE DE LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE SAINT-MARTIN EN VALLÉE DE MAURIENNE (BASSIN VERSANT DE L'ARC) / LOCATION MAP OF THE ALPINE ARC (ARC WATERSHED, MAURIENNE VALLEY).**




3 Le risque de lave exerce une contrainte sur les logiques d'occupation du sol. D'un point de vue paysager, le cône de déjection présente de nombreux indices de pratiques agricoles et viticoles. En témoigne l'abondance des murets et murgers dont on retrouve les premières mentions dans le cadastre Sarde de 1732. Si le paysage torrentiel de Saint-Martin-de-la-Porte se caractérisait jusque dans la décennie 1890 (Mougin, 1914) par une forte densité d'exploitation agricole, du fait de l'extrême morcellement parcellaire (3550 parcelles en 1732 contre 5378 parcelles en 1940), il est aujourd'hui partagé en deux rives distinctes : l'une boisée et l'autre urbanisée. En raison de la hauteur des berges, seule la rive droite a subi des dommages. Sur cette rive, l'engravement répété explique à la fois l'absence d'habitations et l'abondance des épierrements et des murets de protection. Ces talus artificiels, qui servaient à maintenir les terrasses de culture, sont actuellement masqués par la forêt. Les archives permettent d'attester de la vulnérabilité des cultures. Lors de la crue de référence en 1834 (ONF- BD-RTM Evénements, n.d.), une lave torrentielle recouvre de dépôts la rive droite du cône de déjection sur près d'un mètre de hauteur. Les relevés d'incidents n'apportent pas de précision supplémentaire quant à l'intensité de la catastrophe. Plus tardivement, les archives des Eaux et Forêts font état en 1877 de 5 ha de vignes emportés, de 500 m de route engravée ainsi que de l'édification d'une zone de dépôts sur la partie basse du cône. La combinaison entre une activité torrentielle à fort potentiel morphogène et les activités humaines font du cône du Saint Martin un site d'étude intéressant pour comprendre les interactions en vallée entre la torrentialité et l'occupation des sols.

4 La commune de Saint-Martin-de-la-Porte s'est implantée, en rive droite de l'Arc, elle comprend le bassin versant du torrent de Saint-Martin (Figure 2). Les 60 hectares de terres arables que représente le cône torrentiel ont, jusqu'au début du 20$^{e}$ siècle, réuni les conditions nécessaires pour le développement de l'agriculture et de la viticulture. Dans ce tronçon de la Maurienne, la basse vallée joue un rôle économique majeur, car elle polarise les activités industrielles et garantit la circulation depuis la France vers l'Italie avec le renforcement des infrastructures routières et ferroviaires (Marnezy, 1999) ouvertes au pied du cône de déjection. Le paysage actuel du cône de déjection du torrent de Saint-

Martin est avant tout le témoin d'une activité torrentielle contrainte par les ouvrages de protection (Figure 3). La construction d'un canal d'écoulement à la base du cône en 1878, des grands barrages à l'apex (1880, 1941), ainsi que de deux plages de dépôt ouvertes en contrebas en 1986 et 1995 ont pour but de retenir les laves en amont du cône et d'empêcher la divagation du lit. Du point de vue des aménagements, cette vulnérabilité torrentielle se trouve renforcée par l'accroissement constant de l'emprise anthropique en basse vallée.

**FIGURE 2. PAYSAGE ET AMÉNAGEMENTS TORRENTIELS DU CÔNE DE DÉJECTION TORRENTIEL DE SAINT-MARTIN (SAINT-MARTIN-DE-LA-PORTE, MAURIENNE) / LANDSCAPE AND LAND USE PLANNING OF THE SAINT-MARTIN'S TORRENTIAL FAN (SAINT-MARTIN-DE-LA-PORTE, MAURIENNE).**

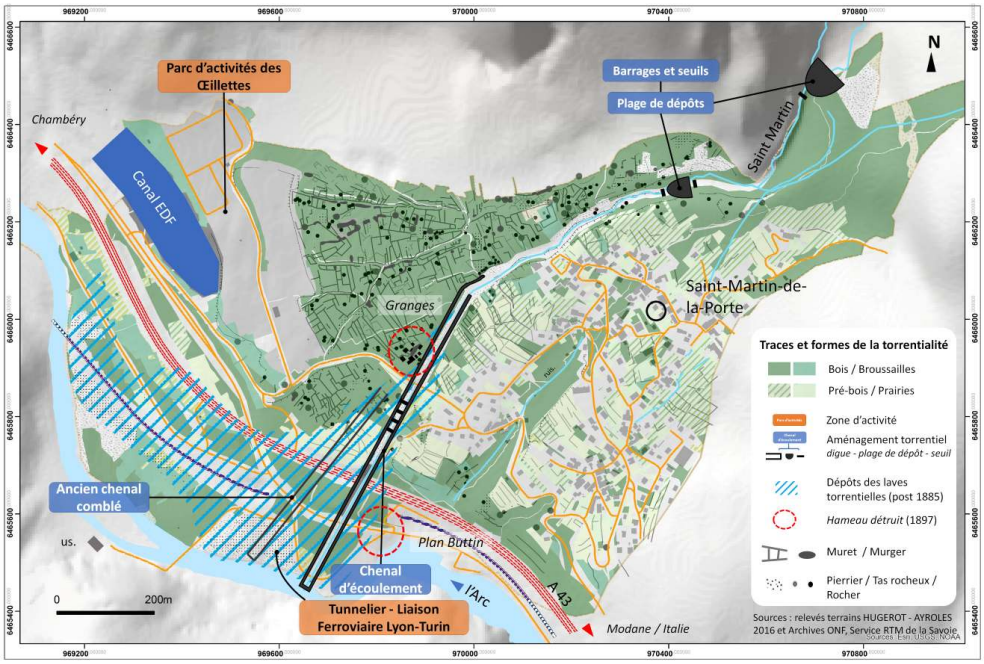
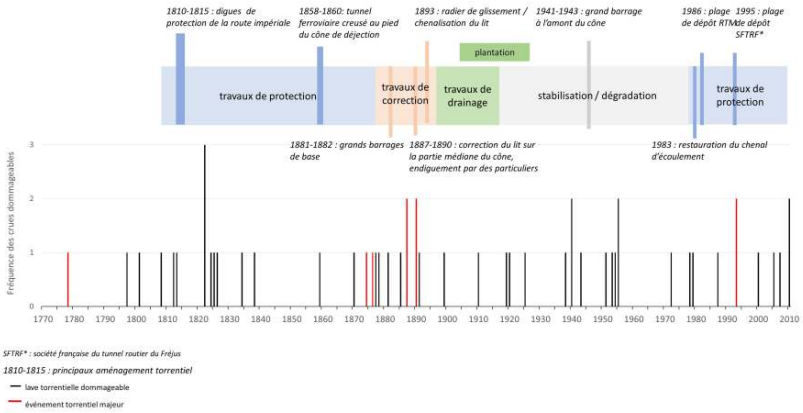


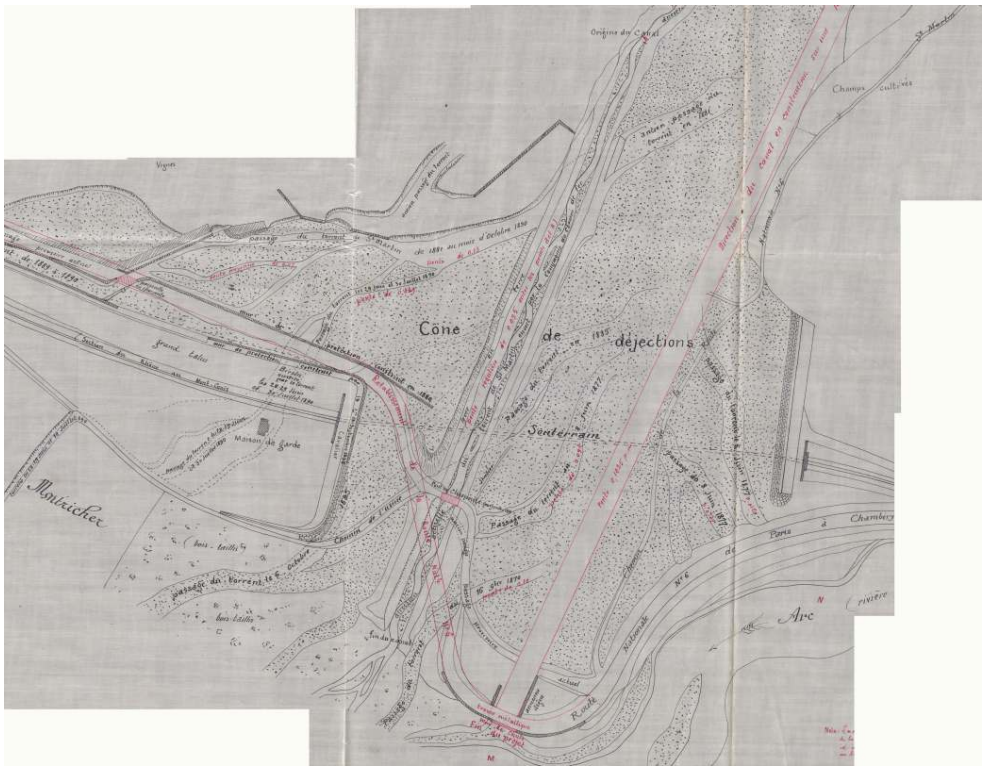

**FIGURE 3. CHRONOLOGIE DES CRUES ET DES TRAVAUX DE CORRECTION TORRENTIEL / CHRONOLOGY OF FLOODS AND TORRENTIAL CORRECTION WORKS.**




Source : ONF- BD-RTM Evénements, n.d., torrent de Saint-Martin, archives RTM-ONF73 (Séries J à L).

5 Les variations de l'emprise torrentielle sur le cône de déjection, en plein essor industriel, sont à l'origine d'une production cartographique abondante dès la deuxième moitié 19e siècle puisque les industries et les axes de communication ont été implantés principalement au pied des cônes de déjection (Figure 4), à proximité du lit de l'Arc. Chaque crue dommageable initie un projet de restauration. Le torrent de Saint-Martin est le premier torrent à bénéficier d'un projet de restauration torrentiel rédigé par le Service des Ponts et Chaussées en 1878.

**FIGURE 4. RECENSEMENT CARTOGRAPHIQUE DES LAVES TORRENTIELLES ET DES TRAVAUX DE CORRECTION, PLAN TERRIER AU 1 : 1000 (90 CM X 150CM) / MAPPING OF DEBRIS FLOWS AND CORRECTION WORKS, MAP 1 :1000 (90 CM X 150CM).**




Source : ONF- BD-RTM Evénements, n.d., torrent de Saint-Martin, archives RTM-ONF73 (Série A)

6 Les premiers travaux de correction menés s'étendent de 1880 à 1896, ils sont suivis par des travaux de drainage (1896-1920). À partir de la décennie 1920 jusqu'à la fin des années 1980, la politique de restauration s'essouffle : c'est la période de l'« observation puis de la dégradation » (Etcheverry, 2014). L'absence de documentation, aggravée par les crises politiques et économiques, ne permet pas rendre compte des modalités du ralentissement des travaux d'aménagement torrentiel et de ses effets sur le paysage torrentiel. Ce manque d'information sur les changements paysagers récents est d'autant plus important que les enjeux actuels qui concernent le cône de déjection et le torrent de Saint-Martin englobent les processus d'évolutions récents du paysage. De fait, ils rendent compte des logiques de renforcement des infrastructures lourdes de transport depuis les chantiers autoroutiers en 1990, des logiques de valorisation des anciennes terres de culture et enfin des logiques sensibilisation qui se rassemble autour des problématiques sociales et environnementales. Aussi est-il question de mettre en évidence les caractéristiques de ce

double processus à partir des formes paysagères et de l'occupation du sol sur le cône de déjection en puisant dans les archives photographiques de l'IGN©.

## Des photographies aériennes anciennes à un corpus d'images orthorectifiées

7 La couverture photographique de la France est régulière à partir de 1939 (Service géographique de l'armée puis l'Institut Géographique National - IGN©) avec un intervalle moyen de dix ans entre chaque mission aérienne. La constitution d'un corpus dépend de l'exploitabilité des clichés. En effet, ces photographies ont une échelle comprise entre 1 :10000 et 1 :30000, elles sont essentiellement effectuées sur la période estivale de juin à août, notamment pour avoir la plus faible couverture neigeuse sur les clichés. La focale, la trajectoire de l'appareil ainsi que les coordonnées de prises de vue sont consignées dans le certificat de calibration délivré à chaque mission. Sans prétraitement, ces photographies sont inexploitables dans la mesure où les déformations liées aux paramètres de prise de vue, mais aussi au relief ne permettent pas d'avoir une même échelle de prise de vue sur l'ensemble de l'image. En milieu de montagne, le relief est une contrainte majeure à prendre en compte ; l'effet de versant déforme considérablement les objets photographiés de sorte qu'ils ne rendent pas compte des surfaces vraies. Dans la mesure où ces prises de vues ont été réalisées pour un traitement photogrammétrique, elles présentent des caractéristiques de recouvrement et de régularité qui facilitent l'orthorectification. Les missions photographiques ont été prises avec environ 60 % de recouvrement entre deux clichés successifs pour autoriser une analyse stéréoscopique des images (Muraz et al., 1999). Cette correction géométrique est possible de nos jours par des méthodes, telles que la multicorrélation d'images, développées sur des interfaces accessibles. L'orthorectification a été réalisée avec le logiciel Agisoft-Photoscan. Malgré un faible contrôle sur les paramètres internes de calibration de l'appareil photographique, ce logiciel a l'avantage de proposer une chaîne de traitements simplifiée. Elle consiste à calibrer les caméras de prise de vue à partir de la focale, de la taille des pixels de l'image ainsi que des points de contrôles placés sur l'ensemble de la zone d'étude. Après l'alignement des caméras, le logiciel génère un relief drapé par les photographies (Modèle numérique de terrain). Plus le recouvrement des photographies est important, et plus la qualité de l'orthorectification est grande. Ce recouvrement dépend du nombre de clichés exploitables ainsi que de l'échelle de prise de vue. Le Tableau 1 récapitule les principales données utilisées pour le géoréférencement et l'orthorectification des images aériennes.

**TABLEAU 1. CALIBRATION ET RÉSOLUTION DES MISSIONS AÉRIENNES ORTHORECTIFIÉES POUR LE TRAITEMENT PAR TÉLÉDÉTECTION / CALIBRATION AND RESOLUTION OF ORTHORECTIFIED AERIAL MISSIONS USED FOR REMOTE SENSING.**

| Identifiant de la mission* | Echelle* | Date de prise de vue* | Distance focale* | Couverture de la mission* | Nombre de clichés exploitables **1 | Erreur Quadratique moyenne (pixel)**2 | Taille du pixel (m)**3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| R2 | 1/30000 | 26/08/1948 | 150 | Vallées transversales de Maurienne et Tarentaise | 22 | 0,162 | 1,3 |
| C3633-0031 | 1/10000 | 26/06/1957 | 302,082 | Vallée de l'Arc | 10 | 0,391 | 0,34 |
| C3534-0071 | 1/30000 | 27/08/1962 | 209,952 | Maurienne - Tarentaise | 9 | 0.315 | 0,99 |
| C3331-0013 | 1/15000 | 21/09/1972 | 152,700 | Maurienne - Tarentaise | 9 | 0,560 | 0,33 |
| C3330-0031 | 1/15000 | 08/07/1982 | 213,28 | Savoie | 17 | 0,589 | 0,38 |
| C96SAA1472 | 1/30000 | 04/08/1996 | 152,163 | Savoie | 22 | 0,525 | 0,5 |

Légende : * certificat de calibration délivré par la Photothèque Nationale (IGN-F). ** résultats de l'orthorectification : 1- le nombre de clichés exploitable détermine la couverture de la mission. Ils sont sélectionnés selon la qualité de l'image annoncée lors de l'alignement des photographies dans la procédure d'orthorectification ; 2 -l'erreur quadratique moyenne est la moyenne des différences calculée entre la valeur réelle et la valeur théorique des points de contrôles utilisés pour géoréférencer les photographies. La valeur réelle est obtenue à partir des coordonnées acquises sur Géoportail ; 3- La taille des pixels est un paramètre déterminé à la fin de l'orthorectification et optimisé par le logiciel en fonction des données fournies en entrée.

8 Dans cette étape essentielle de correction géométrique, le parti pris est de conserver une résolution spatiale maximale. La taille des pixels n'est ni généralisée, ni rééchantillonnée afin de conserver toute la profondeur de l'information de l'image. En exploitant une ortho-image par décennie, on assure un suivi à intervalles réguliers de l'occupation du sol. Compte tenu des écarts de précision, de résolution spatiale ainsi que des conditions de prise de vue, les ortho-images n'ont ni les mêmes échelles, ni les mêmes expositions. Ces différences peuvent être compensées de trois façons :

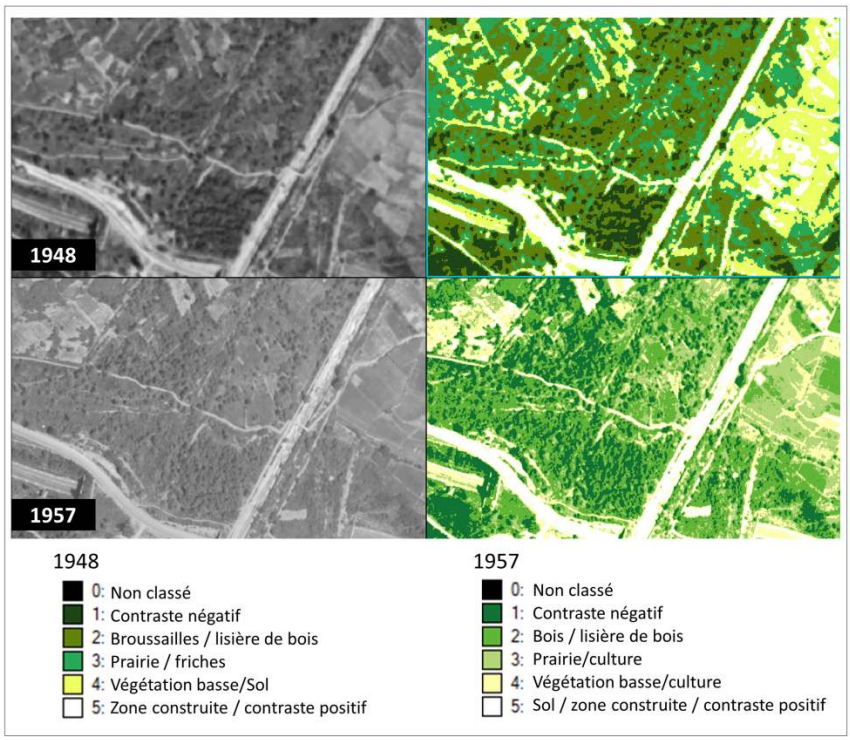
i. les conditions de prise de vue ont des conséquences sur les valeurs de teintes et de saturation de l'image. Le prétraitement des photographies en argentique consiste surtout à corriger les contrastes et les tonalités moyennes. Les valeurs des pixels extraites des photographies panchromatiques ont une dispersion homogène autour de nuances moyennes de gris qui ne permet pas de distinguer les tonalités extrêmes. Sur des photos de missions différentes qui n'ont pas les mêmes contrastes, il convient de travailler ces images pour les rendre plus homogènes et faciliter le traitement ultérieur. L'application de filtres atténue ou rehausse les contrastes ce qui améliore l'interprétation visuelle des images. Comme l'information spectrale n'est pas homogène en tout point de l'image, cette opération est surtout nécessaire pour améliorer la visualisation et faciliter l'interprétation texturée de l'image.

ii. la précision, déterminée par la taille du pixel et son équivalence métrique sur le terrain, permet de définir et d'isoler des types d'occupation du sol. La résolution est donnée par la taille initiale du cliché en fonction de la densité en pixels de l'image. Or, les photographies ne sont pas prises à la même échelle et avec les mêmes réglages de caméra. Il s'agit donc de prendre en compte cette différence d'informations dans les techniques d'interprétation. En effet, ces écarts de résolution et de précision limitent la reproductibilité des traitements. Une première observation des images, par classification non supervisée selon la méthode des minimums locaux (k-means), permet de constater visuellement le niveau d'interprétation en fonction de ces deux critères (Figure 5). La méthode des k-mean, le partitionnement des classes, sur l'ensemble des classes d'occupation du sol envisagées, sert à constater le partitionnement des informations de l'image et leur regroupement par classe. La classification réalisée sur une orthophotographie au 1 :30000 (1948) permet de

différencier visuellement plusieurs entités spatiales. Avec la même méthode, reproduite sur une orthophotographie au 1 :10000 (1957), les contours sont plus nets, mais la classification est un peu plus bruitée. La différence des échelles de prise de vue ne convient pas en principe pour la photo-comparaison. Aussi est-il intéressant d'utiliser la classification descendante hiérarchique pour s'affranchir pour partie des variations d'échelles et tout de même travailler en comparatif.

iii. dans l'exemple de classification précédent, l'effet du mitage des terres agricoles est bien identifié sur les deux images alors que les surfaces boisées en marge du chenal et du cône de déjection ne sont pas reconnues de la même manière. À moindre échelle, les contrastes forts de la photographie de 1948 permettent d'isoler les surfaces boisées de la végétation basse. Les teintes sombres correspondant aux ombres portées et à l'effet de versant sont confondues avec la végétation dense. À l'inverse, les zones de forte réflectance (toiture, route, eau), présentant des valeurs de brillance analogues, ont été regroupées en une seule entité. La photo-interprétation experte est donc nécessaire pour compléter la classification automatique. Pour ce faire, des surfaces sont extraites de la classification par des masques. Ces derniers sont générés à partir des fichiers de formes « route » et « bâti » issus de bases de données cartographiques de l'IGN© actuelle et sont reprises par digitalisation dans un SIG. Deux masques « bâti » et « routes » sont produits pour chacune des photographies. Ces informations contraignent la classification, elles excluent de l'interprétation de l'image toutes les surfaces imperméabilisées.

**FIGURE 5. CLASSIFICATIONS PAR PIXEL DES IMAGES DE 1948 ET 1957 PAR PIXEL NON SUPERVISÉES AVEC LA MÉTHODE DES CENTRES MOBILES (K-MEAN) / UNSUPERVISED IMAGE CLASSIFICATION PER PIXEL WITH THE METHOD OF MOBILE CENTERS (K-MEAN)**



# Analyse orientée objet des orthophotographies aériennes anciennes

## La détection d'objets cartographiques : une segmentation en deux étapes

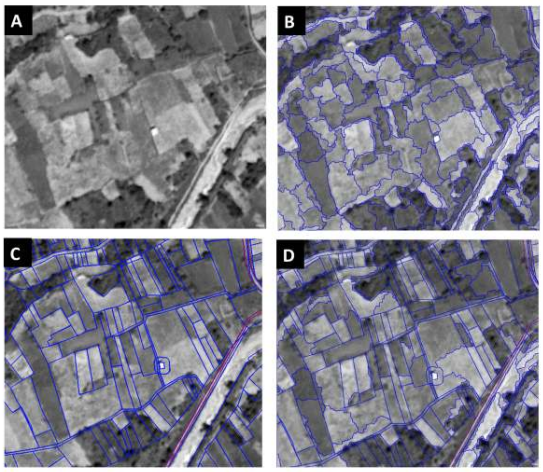
9 L'identification des unités d'usage, sur un territoire fragmenté où le mitage prévaut, revient à considérer en premier lieu la parcelle comme l'entité et l'échelle spatiale de référence. Cette lecture paysagère doit servir avant tout à ramener l'interprétation des images sur une base commune et sur une même échelle d'analyse. D'un point de vue géohistorique, le cône de déjection est pensé l'espace paradigmatique de la vulnérabilité torrentielle, où le parcellaire renvoi à des processus anthropiques d'occupation du sol (Meynier et al., 1970). Cette uniformisation par la parcelle admet en hypothèse de départ une dépendance entre les découpages spatiaux et la répartition des types hiérarchisés ou organisés de paysage. Le cadastre utilisé comme support d'analyse a été vectorisé sur le premier cadastre français dressé au 1 : 1000 de 1930 (Direction des services fiscaux de la Savoie, 1930), depuis sa confection la commune n'a pas connu de remembrements majeurs. En effet, ce parcellaire agricole ancien est encore présent dans le paysage sous la forme de murets et de murgers. Cette fossilisation du parcellaire dans le paysage est aussi présente sur la zone urbanisée du cône de déjection, en rive droite, notamment sur les terrains aménagés par l'association foncière pastorale de Saint-Martin-de-la-Porte. Le remaniement des parcelles aux alentours des deux zones récentes d'activités est intégré dans un autre fichier parcellaire qui s'ajuste temporellement aux deux dernières missions aériennes.

10 Les méthodes de segmentation de l'image servent à identifier des zones/secteurs/aires pour une interprétation par des algorithmes de formes ou de nature (Tilton, 2003 ; Anderson et al., 1976), elles augmentent la justesse et l'efficacité de la classification (Berberoglu et al. 2000). Dans le cas présent, la segmentation de l'image est réalisée avec l'outil de segmentation multi-résolution sur le logiciel eCognition. Les objets sont délimités puis renseignés par des attributs de formes, de contexte ou de texture. L'algorithme de segmentation en question fusionne en objets les groupes de pixels qui présentent, à une échelle donnée, des similarités de tonalité selon des ratios de forme et de compacité (Benz et al., 2004). Cette opération est complétée par les informations thématiques du premier cadastre français (1930), les entités du bâti et des routes.

11 L'extrait de la figure 6 présente trois méthodes de segmentations d'une ortho-image de 1962 préalablement filtrée par les algorithmes de convolution et de contraste. Il concerne la partie haute du cône de déjection, en rive droite du torrent du Saint-Martin (A). Le canal de dérivation est visible sur la partie droite. Les parcelles boisées se distinguent en marge ou à proximité des murgers. La première segmentation (B) est exécutée sur des indices de forme et de compacité médians. Plus la valeur de l'indice de forme est basse et plus la couleur est prise en compte dans la segmentation ; de la même manière, plus l'indice de compacité est élevé, plus la forme des objets est compacte. Avec les valeurs indiquées dans le tableau joint, les objets distinguent la végétation haute des parcelles enherbées. Le second type de segmentation (C) n'est réalisé qu'à partir des couches thématiques. La définition des formes est plus précise, mais elle est incapable d'isoler les zones de boisement à l'intérieur des parcelles. La combinaison des deux méthodes (D)

améliore et raffine la segmentation. Les unités d'usages sont dissociées à l'échelle parcellaire et infra-parcellaire ce qui permet de dissocier plusieurs types d'occupation du sol, ou encore la progression des surfaces boisées sur des friches. En considérant la possibilité qu'une parcelle ait plusieurs types d'occupation du sol, il est intéressant de conserver une segmentation infra-parcellaire si l'on veut observer des processus paysagers tels que la progression des marges forestière, le mitage ou l'ouverture paysagère.

**FIGURE 6. SEGMENTATION MULTI-RESOLUTION PAR LA MÉTHODE DESCENDANTE HIÉRARCHIQUE ET RÉSULTATS / BOTTOM-UP MULTRESOLUTION SEGMENTATION AND RESULTS.**




*A : image non segmentée*
*B : segmentation d'après les critères de forme et de compacité moyens*
*C : segmentation d'après les informations parcellaires, de routes et de bâti*
*D : segmentation d'après un indice de forme faible (avec une faible valeur, l'influence de la couleur est forte dans le processus de segmentation) un indice de compacité moyen, les informations parcellaires, de routes et de bâti*

| Paramètre d'échelle | Forme | Compacité | Nombre d'objet | Couche thématique de découpage | Image |
|---|---|---|---|---|---|
| - | - | - | - | - | A |
| 50 | 0,5 | 0,5 | 28112 | - | B |
| - | - | - | 15955 | Route, bâti, parcelle | C |
| 65 | 0,1 | 0,5 | 27003 | Route, bâti, parcelle | D |

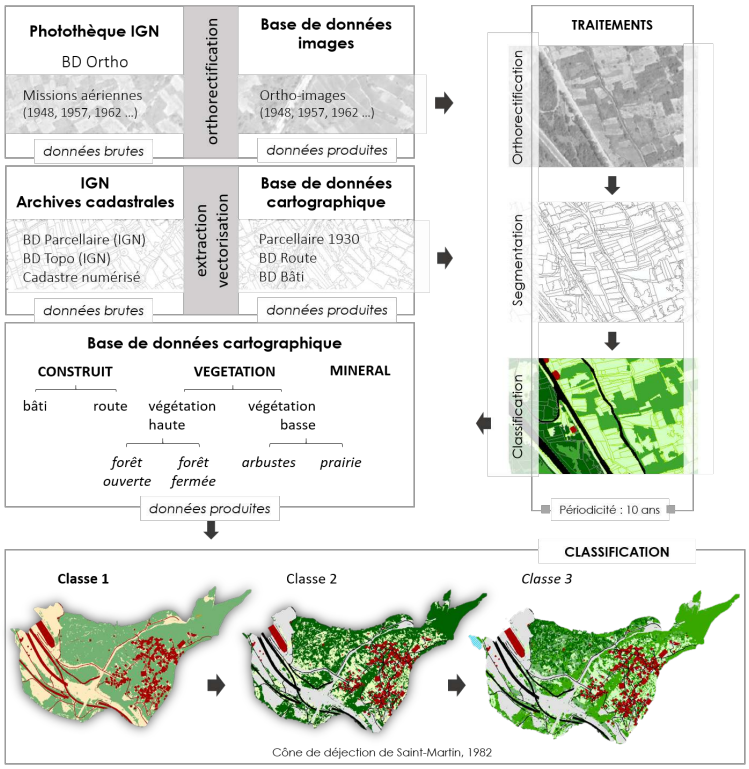
12 Dans la chaîne des traitements, deux étapes de segmentation sont nécessaires. La première partitionne l'image en objets (B), la seconde prend en compte l'information parcellaire pour effectuer le découpage (D). La validation du processus est faite par contrôle visuel, avec une fusion ou une segmentation manuelle des objets depuis le logiciel eCognition. Les paramètres de segmentation sont enregistrés puis réitérés, avec des ajustements apportés à l'échelle, sur l'ensemble de la série temporelle.

## La classification hiérarchique par règles de décision

13 La classification descendante hiérarchique de l'image est une approche structurée par des règles d'appartenance des objets regroupés en catégories d'occupation du sol. Plus l'échelle de prise de vue est grande et plus la classification est détaillée puisqu'il sera possible de repérer des sous-unités d'occupation du sol (Figure 7). Cette approche par hiérarchie de classe convient lorsque les classes sont définies par un nombre limité de critères. Une seule nomenclature est appliquée à toute la série d'images. Il est nécessaire de restreindre la nomenclature à une classification peu détaillée, mais suffisamment représentative du paysage étudié. Le choix des classes est fait par distinction visuelle

entre les principales composantes du paysage. Les éléments paysagers sont regroupés dans trois grands ensembles qui se retrouvent à chaque date dans la série temporelle. On a distingué comme premier niveau de lecture du paysage les surfaces construites, des terrains nus, de la végétation. Le minéral est associé aux dépôts d'origines anthropiques ou torrentiels, la végétation comprend les surfaces boisées ou en végétation basse de type arbustive et herbacée. À l'intérieur et entre ces trois grandes unités de paysage, la discrimination à l'intérieur de ces grands ensembles est rendue complexe par la proximité spectrale ou texturale des éléments paysagers (exemple sols nus – surfaces construites). À titre d'exemple, le type « minéral » rassemble les sols nus, les dépôts rocheux qui ont les plus fortes valeurs de brillance. Mais ces critères sont aussi partagés par d'autres entités, telles que les surfaces construites, les prés de fauche. Puisqu'il n'était pas possible de définir clairement à partir des photographies les dépôts torrentiels, du lit torrentiel et des terrains nus non construits, seule la classe « végétation » a été développée en deux sous catégories : végétation haute (forêt fermée/ouverte) - végétation basse (arbuste/prairie).

**FIGURE 7. TRAITEMENTS DE L'IMAGE : DE L'ORTHORECTIFICATION À LA CLASSIFICATION / PROCESSING OF THE IMAGE : FROM ORTHORECTIFICATION TO CLASSIFICATION.**




14 La méthode de classification hiérarchique réalisée sur l'ensemble des six orthophotos se base sur l'identification pour chaque orthophoto des paramètres discriminants des classes. Des règles de décision sont appliquées sur les différents paramètres en prenant pour point de départ de l'interprétation les trois classes principales d'occupation des sols. Ils classent les objets de l'image selon leurs caractéristiques visuelles. L'analyse orientée-objet repose soit sur la classification par plus proche voisin, soit sur la classification par fonctions d'appartenance. La première méthode identifie selon des échantillons de référence ou par un calcul optimisé des variables discriminantes les valeurs de chaque type d'occupation du sol (Selleron et Vidal, 2000). L'interprétation des images peut aussi

être affinée à partir des caractéristiques morphologiques de surface, à l'aide d'un modèle numérique de terrain (Simon et Tamru, 1998). La méthode utilisée ici est une approche dite *expertisée*, par détermination des fonctions d'appartenance. Comme la digitalisation par photo-interprétation, le choix des paramètres de classification est assuré par un contrôle visuel. L'objectif est ici d'identifier les paramètres de classification pertinents pour répondre à la problématique de cartographie du paysage à partir des photographies anciennes. Les paramètres visuels retenus pour la classification sont les indices de texture, de brillance et de valeur moyenne par objet (Tableau 2). Ces paramètres ont été développés pour l'interprétation des images panchromatiques (Haralick, 1979). Les valeurs des indices de chaque objet de l'image sont mesurées par une matrice de co-occurrence. Elle est représentée sous la forme d'une fenêtre d'analyse glissante, qui quantifie, selon une direction imposée, la relation d'occurrence de la valeur texturale d'un ensemble de pixels par rapport aux groupes de pixels voisins. (Coburn et Roberts, 2004). La direction est définie selon le motif texturé : les cultures sur le cône sont disposées en terrasse perpendiculairement au lit torrentiel. Les motifs de cultures sont donc identifiables par une fenêtre passante orientée dans la même direction du cône de déjection et du lit torrentiel.

15 Les classes sont isolées par le producteur par des valeurs seuil calculées pour chaque paramètre de classification. Ce bornage revient à attribuer des valeurs de reconnaissance à chaque variable d'appartenance qui définissent une classe. Elles sont exclusives d'une classe à l'autre. Ces fonctions posent des limites franches entre chaque classe de premier niveau de la classification, puis entre les sous-classes comprises dans le second niveau.

**TABLEAU 2. CARACTÉRISTIQUES DES CLASSES ET DES INDICES TEXTURÉS / FEATURE CLASSES AND TEXTURAL INDICES.**

| Types | Caractéristiques visuelles | 1948 | | 1957 | | 1962 | | 1972 | | 1982 | | 1996 | | Indices (nbre d'utilisation sur les 6 images) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Forêt fermée* | Tonalité et brillance basse.<br>Forte hétérogénéité, | non identifié | | [Brillance] <= 116 AND [GLCM Dissimilarité (quick 8/11)(135°)]>= 0,6 | [Brillance] <= 116 | [Brillance] < 75 AND [GLCM Entropie (quick 8/11)(135°)] < 3,2 | [Brillance] <= 59 | [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (135°)] <= 0,06 AND [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] > 3,4 | [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (135°)] <= 0,02 | [Brillance] * [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] <= 1,195 | [Brillance] < 114 | [Brillance] <= 128 AND 2,6 >= [GLCM Entropie (quick 8/11)(135°)] <= 3,2 AND [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] <= 0,087 | [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] <= 0,04 | Brillance (6)<br>second moment angulaire (3) |
| *Forêt ouverte* | Eléments texturaux de grande taille. | non identifié | | | SAUF "foret fermee" | | SAUF "foret fermee" | | SAUF "foret fermee" | | SAUF "foret fermee" | | SAUF "foret fermee" | Entropie (3)<br>Dissimilarité (2)<br>Contrast (1) |
| *Prairie, culture* | Tonalité moyenne et brillance forte,<br>Texture fine<br>Contraste avec les textures voisines faible | | SAUF "friche" | | SAUF "friche" | | SAUF "friche" | | SAUF "friche" | | SAUF "friche" | | SAUF "friche" | Brillance (4)<br>Moyenne-GLDV (3)<br>Contraste (2)<br>Entropie (1)<br>Dissimilarité (1)<br>second moment angulaire (2) |
| *Friche* | Contraste avec les textures voisines fort<br>Valeurs moyennes (confusion entre la végétation haute et basse) | SAUF "vegetation haute" | [Brillance] < 112 | SAUF "vegetation haute" | 13 => [Brillance] * [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] <= 42 AND [Brillance] < 148 | SAUF "vegetation haute" | [Brillance] < 92 AND [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] < 1,16 | SAUF "vegetation haute" | [Brillance] * [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] <= 10,8 | SAUF "vegetation haute" | 1,4 > [Brillance] * [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] <= 42 AND [Brillance] < 0,4 | SAUF "vegetation haute" | [Brillance] * [GLCM second moment angulaire (quick 8/11) (45°)] <= 0,13 AND [GLCM Contrast (quick 8/11) (45°)] >= 0,9 | Correlation (1)<br>Contrast (4)<br>second moment angulaire (3)<br>Dissimilarité (1)<br>Homogénéité (1)<br>Ecart type (1) |

Les indices texturaux peuvent être groupés en trois types de mesure, i. la taille des éléments texturaux (entropie, variance-covariance) ii. l'homogénéité (moment de la différence inverse, second moment angulaire, dissimilarité, homogénéité, contraste) et iii. l'organisation (entropie, probabilité maximale).
Le cas des espaces de friches s'applique partiellement à cette distinction puisque les anciennes parcelles sont mêlées aux parcelles de cultures récemment abandonnées. La progression arborée n'est pas égale sur l'ensemble du cône, ce qui permet de distinguer parmi la végétation haute des îlots en friche. Mais cette observation n'est que temporaire, sur les formes d'occupation récente la végétation haute ne permet pas la même application de ce raisonnement, même si la friche reste un espace à la frange des surfaces boisées.

16 La confusion entre les objets classés est essentiellement tributaire des défauts d'exposition qui n'ont été corrigés par le pré-traitement. Dans ce cas, une correction par reclassification manuelle de l'image est nécessaire. En reprenant les paramètres utilisés pour les trois principaux types d'occupation du sol (Tableau 2), nous avons identifié les paramètres des classes pour chaque orthophotographie. D'autre part, la variation de la qualité structurale et texturale, liée à la dimension des pixels, est un facteur de confusion supplémentaire dans la classification. Enfin, les surfaces en friche sont les plus délicates à reconnaître. L'interprétation visuelle est vite confrontée au problème d'association des

friches avec la végétation arborée. La frontière entre ces deux entités paysagères est partiellement résolue par des indices de différenciations comme l'indice de contraste.

17 Les cartes d'occupation du sol produites à partir de cette approche expertisée sont limitées par le manque de précision des images qui pose la question de la précision de la classification. Le contrôle visuel, la mesure de la précision de la classification ainsi que la comparaison avec des documents cartographiques anciens sont les trois outils de validation de cette approche.

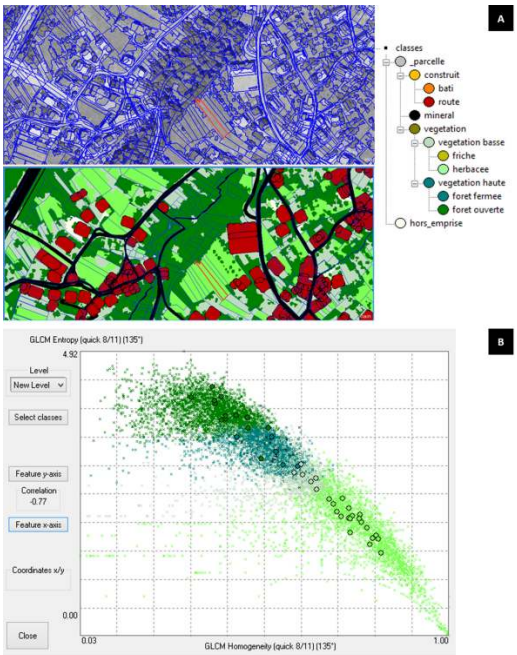
# L'évaluation de la méthode

## La cartographie des modes d'occupation du sol

18 L'approche expertisée est effectuée dans un premier temps par optimisation des seuils de classement grâce à une validation visuelle du modèle. Cette évaluation qualitative est faite sur le résultat cartographique et le diagramme de distribution des objets classés en fonction des paramètres de classification.

19 La figure 8 illustre les résultats obtenus à partir d'une classification de l'ortho-image de 1996. La végétation arborée, plus ombrée et moins uniforme que la végétation basse, est identifiée par des indices d'entropie, d'homogénéité et de brillance (Figure 8-A). Autrement dit, par une texture homogène et lissée, des contrastes faibles, une tonalité moyenne et une brillance forte. En reportant les valeurs de la classification sur un graphique présenté sous la forme d'un nuage de points (Figure 8-B), on peut identifier la dispersion des classes en fonction des valeurs d'entropie et d'homogénéité de chacun des objets de l'image. Ces indices résument globalement les fonctions d'appartenance des classes : la forêt, plus hétérogène dans les tonalités de gris que la prairie en est un exemple. On identifie une corrélation négative entre ces deux indices qui retranscrit cette gradation des textures de la végétation dense fermée à la végétation basse. Ainsi, la classe végétation basse est plus lissée par opposition à la végétation arborée. La classe « friche » est un entre-deux situé entre la végétation arborée et herbacée. Moins étalée que les autres classes d'occupation du sol, elle présente cependant de nombreuses similitudes visuelles avec la végétation arborée ouverte ; le critère d'homogénéité est en ce cas plus pertinent pour distinguer les friches de la végétation haute.

**FIGURE 8. PARAMÈTRES (A) ET RÉSULTATS GRAPHIQUES (B) DE LA CLASSIFICATION ORIENTÉE OBJET RÉALISÉE À PARTIR DES MISSIONS AÉRIENNES DE 1996 / PARAMETERS (A) AND GRAPHIC RESULTS (B) OF THE OBJECT-ORIENTED CLASSIFICATION BASED ON THE 1996 AERIAL PHOTOGRAPHIES.**




*A : résultat de la classification orientée objet B : diagramme de dispersion des valeurs d'entropie et d'homogénéité de chaque objet classé de l'image. Les surfaces enherbées sont à la fois plus lissées et n'ont pas de grande variation de tons de gris. Par conséquent, les objets classés en « herbacée » ont de grandes valeurs d'homogénéité et de faible valeur d'entropie.*

## Mesures de précision de la classification

20 Dans l'approche de classification expertisée, le choix des paramètres de classification est déterminé par la résolution et la précision de l'image. Lorsque l'échelle de prise de vue est petite et la taille des pixels supérieure à 0.5m, les paramètres de classification ne concernent que les indices de brillance et les niveaux de gris de l'image. Les indices d'entropie et de dissimilarité, choisis pour identifier les classes selon des valeurs d'organisation texturée et d'homogénéité sont les plus pertinents pour l'interprétation des images à meilleure résolution. En utilisant les indices de précision de la classification, on observe que la précision de la classification n'est pas nécessairement dépendante de l'échelle de prise de vue. Les images dont la taille du pixel est inférieure à 0,5 mètre ont de meilleurs indices de précision de classe. Donc, sur de grandes surfaces, la classification semi-automatisée à partir d'images à faible résolution et à faible précision comportera plus d'erreurs. De façon analogue, Marceau (Marceau et al., 1994a, 1994 b) fait remarquer que la classification faite à partir des photographies aériennes anciennes à résolution spatiale fine, sur de petits secteurs, présentera une plus grande de confusion dans la classification. Autrement dit, la segmentation est plus précise sur une échelle spatiale fine de l'image, mais les paramètres de classification ne suffisent pas à produire une meilleure interprétation. Leur efficacité est effectivement limitée par le bruitage de l'image qui introduit une confusion supplémentaire dans la classification. Les mesures de précision de la classification sont décrites par une matrice de confusion. La matrice de confusion sert à valider les résultats de la classification en utilisant des objets de validations sélectionnés dans l'image pour les comparer aux objets classés. Elle se présente sous la

forme d'un tableau croisant les classes observées et les classes prédites par le modèle. La précision de la classification est calculée par l'indicateur Kappa (KIA) sur une estimation qualitative des correspondances entre les classes théoriques et la réalité terrain (Tableau 3). Les valeurs moyennes sont comprises entre 0,75 et 0,89 avec des écarts entre les classes. Cela signifie que la classification évite 75 % à 89 % des erreurs obtenues par une procédure totalement aléatoire. Malgré la forte correspondance entre la classification produite et l'information contenue dans l'image, 20 % des données classées sont susceptibles d'être fausses. La confusion intra-classe forêt-fermée et forêt-ouverte est la plus courante ; pour des raisons similaires, les confusions entre les prairies et les surfaces en terre nue diminuent la précision du résultat. Ces confusions sont dues à des effets de bords des classes. Ils seront corrigés dans un second temps par interprétation photographique.

**TABLEAU 3. INDICES DE PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION KIA (EN POURCENTAGE), PRÉCISIONS PAR CLASSE ET PAR IMAGE / KAPPA INDEX OF AGREEMENT OF THE CLASSIFICATION, CLASSES AND IMAGES ACCURACIES.**

| KIA per Classe | Végétation arborée | Forêt fermée | Forêt ouverte | Broussailles et friches | Herbacée-prairie | KIA |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **1948** | 0,7872 | ND* | ND* | 0,7686 | 0,7745 | 0,754 |
| 1957 | - | 0,871662 | 1 | 1 | 0,7617 | 0,8948 |
| **1962** | - | **0.7936** | 0.9126 | 1 | 1 | 0.9216 |
| 1972 | - | 1 | **0,5977** | 0,8653 | 1 | 0,848 |
| 1982 | - | 0,77 | 1 | 0,813 | **0,731** | 0,805 |
| **1996** | - | 0,515 | **1** | 0,7604 | 0,872 | 0,7487 |

ND* : non défini (la taille du pixel ne permet pas de différencier ces deux niveaux d'occupation du sol)

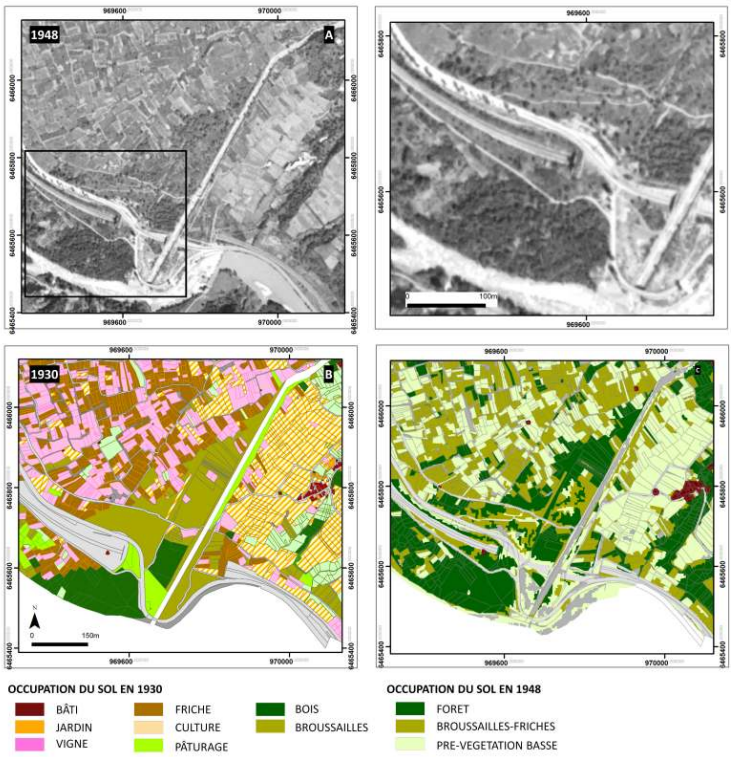
## Comparaison multi archives : le cadastre comme point de repère

21 Dans une perspective de comparaison diachronique, le cadastre français vectorisé de 1930 est un point de repère chronologiquement proche des premières missions aériennes. Le plan cadastral est un document cartographique élaboré sur l'arpentage des unités foncières dans un but fiscal et administratif. L'enquête parcellaire nous renseigne sur la nature des activités humaines sur le cône de déjection par la description des usages. La parcelle est délimitée selon la nature des cultures, la qualité du terrain et la valeur de la production (Baud, 2010). La mention de la « friche » dans la matrice cadastrale désigne l'abandon provisoire ou récent de la parcelle de culture sans valeur productive, tandis que le terme de « broussaille » renvoie aux terres incultes à végétation de type arbustive. Autant d'indications qui ne peuvent pas être interprétées sur une photographie à grande échelle. Par conséquent, le cadastre identifie les usages, alors que la photographie aérienne permet de dissocier l'occupation du sol. Le cadastre apporte ainsi une interprétation très complémentaire à la photographie aérienne. Compte tenu de l'écart temporel de 18 ans entre le cadastre et la première photographie aérienne, la comparaison n'identifie que les erreurs d'omission introduites dans le traitement. Par

exemple, les parcelles recensées en 1930, à la base du cône de déjection en « broussaille » sont cartographiées en tant que pré/végétation basse en 1948. Si l'on tient compte des conséquences de l'industrialisation ainsi que de la diminution de près de 50 % du nombre de cultivateurs de 1920 à 1935[1], la fermeture paysagère devrait être visible sinon maintenue sur ces parcelles en broussaille puisque la commune ne connaît pas de regroupement d'exploitation ni de remembrement du foncier agricole.

22 Les pratiques culturales sont aussi en cause dans les erreurs d'interprétation. De la même manière qu'il est difficile de discerner à partir d'une photographie aérienne ancienne les parcelles de culture des prairies, le risque de confusion entre la végétation haute et la végétation arbustive est élevé si les parcelles en question correspondent à des taillis. On peut aussi bien admettre que les parcelles de vignes non identifiables sur la photographie de 1948 ont pu être regroupées avec les broussailles/friches. Enfin, cette méthode de cartographie semi-automatisée ne convient pas pour définir des usages agricoles ou pastoraux, en particulier si ceux-ci ne coïncident pas avec un type bien distinct de paysage. C'est le cas des terres de pâtures mentionnées dans le cadastre sur la partie basse du cône de déjection. Elles ont été ouvertes sur les dépôts torrentiels. Comme le montre la figure 9, les parcelles identifiées « pâturage » en 1930 sont cartographiées en « bois », « broussailles/friches ». Ce biais fait de la fermeture paysagère un processus complexe à cartographier, car il ne tient pas compte des usages non apparents ou indistincts dans le paysage.

**FIGURE 9. OCCUPATION DU SOL SUR LA SECTION BASSE DU CÔNE DE DÉJECTION DU SAINT-MARTIN DÉCRITE PAR LE CADASTRE DE 1930 (B) ET EXTRAITE PAR LA TÉLÉDÉTECTION (C) RÉALISÉE SUR L'ORTHO-IMAGE DE 1948 (A) / LAND USE ON THE LOWER SECTION OF THE TORRENTIAL FAN OF THE SAINT-MARTIN TORRENTIAL FAN DESCRIBED BY THE 1930 CADASTRE (B) AND EXTRACTED BY REMOTE SENSING (C) CARRIED OUT ON THE ORTHOIMAGE OF 1948 (A)**



23 La résolution maximale théorique attendue varie entre 1,3 m et 0,3 m si l'on tient compte de la taille des pixels des photographies aériennes. Elle varie par endroits jusqu'à 3m avec les masques d'ombres portées en lisière de forêt. La précision de la classification pour l'ensemble de la série temporelle est comprise entre 74,8 % et 92 % en admettant aussi la part de confusion dans l'interprétation de l'image lorsque les pratiques culturales ne permettent pas d'identifier clairement un type d'occupation du sol à l'image du bois/ taillis et de la végétation arbustive. Au regard de l'exploitabilité des données, quelle tendance réelle dégager sur l'évolution récente du paysage ? L'exercice délicat de comparaison des classifications ne peut pas aboutir sans un contrôle, voire une correction affinée, des données par une photo-interprétation plus classique et manuelle.

# Résultats cartographiques

## L'illustration de processus récents

24 De quels processus les photographies aériennes anciennes sont-elles le témoin ? Cette question est posée sur une période où la production cartographique de la RTM s'interrompt. Elle signale aussi bien la cessation des travaux d'aménagement torrentiel que l'obsolescence de la politique de restauration des terrains de montagne. Du point de vue des pratiques agro-pastorales on a constaté en croisant le cadastre de 1930 à la carte d'occupation du sol de 1948 une progression des surfaces boisées aux dépens des broussailles et des parcelles de cultures. C'est donc à partir de ce premier constat qu'il s'agira de décrire un élément des trajectoires paysagères récentes sur l'ensemble du cône de déjection de Saint-Martin-de-la-Porte.

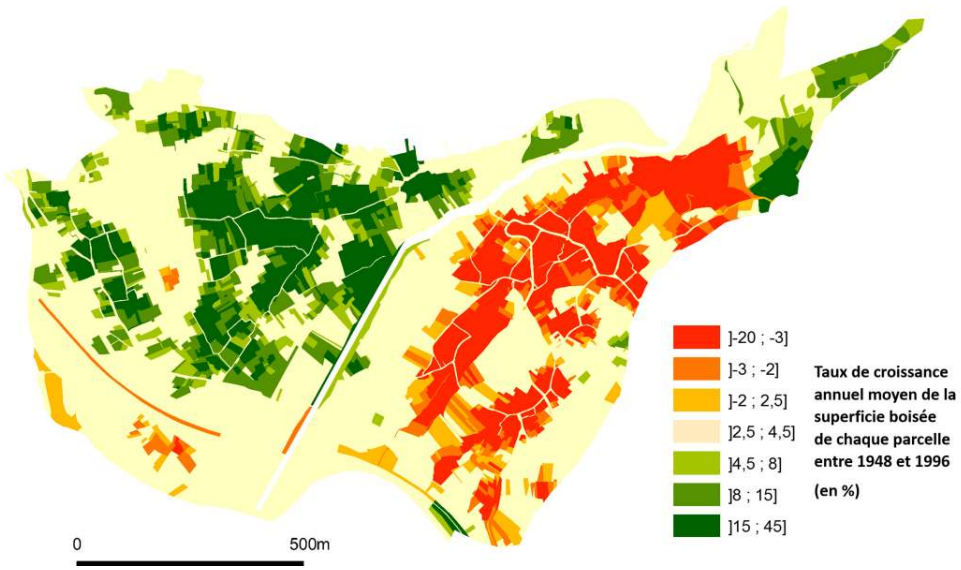
25 La superposition des cartes permet d'aborder les mutations et changements entre deux intervalles de temps. En quantifiant ces changements, on constate une augmentation de la proportion des surfaces boisées depuis 1948, soit 38 ha, et 1962, soit 63 ha de superficie boisée ce qui représente un peu plus de la moitié de la superficie totale du cône de déjection (Figure 10). Elle se stabilise aux alentours de 1972 et de 1996, malgré une reprise rapide de l'enfrichement entre 1972 et 1982. La cartographie compilée de ces états successifs souligne deux types d'occupation du sol distincts. L'un ouvert, mais morcelé et l'autre en voie de fermeture, avec le torrent du Saint-Martin pour ligne de fracture (Figure 11). Cette fermeture est freinée par deux trouées, l'une ouverte en 1970 lors de la construction du canal EDF et la zone d'activité des Œillettes l'autre réalisée dans les années 1990 avec la construction de l'autoroute. La végétation arbustive puis un premier stade de recolonisation forestière s'installent sur les parcelles en friche.

**FIGURE 10. ÉVOLUTION ET RÉPARTITION DU BOISEMENT SUR LE CÔNE DE DÉJECTION DE SAINT-MARTIN ENTRE 1948 ET 1996 / EVOLUTION AND DISTRIBUTION OF THE FOREST COVER OF SAINT-MARTIN'S TORRENTIAL FAN BETWEEN 1948 AND 1996.**

26 L'analyse de la distribution de la superficie boisée permet d'identifier la répartition de ces processus selon des ensembles spatiaux statistiquement significatifs. L'analyse est portée ici sur les usages du sol sur le cône de déjection. En considérant la parcelle comme une unité d'usage, les tendances spatiales ont été calculées à partir du taux de croissance annuel moyen du boisement par chaque parcelle. Le résultat cartographique nous permet de dissocier deux ensembles spatiaux de reboisement et de diminution de l'emprise forestière. C'est sur la section médiane, en rive droite du cône de déjection, que le taux d'accroissement des surfaces boisées par parcelles a été le plus important au cours de ces cinquante dernières années. En moyenne, depuis 1948, la superficie forestière a progressé de plus de 15 % par an. Sur les parcelles déjà gagnées par la forêt en 1948, le taux de croissance de la forêt est faible ; soit une moyenne de 2,5 % à 4,5 % de croissance par an. En rive gauche, la diminution des surfaces boisées donne un portrait en creux de l'étalement urbain. À proximité des zones construites, le taux annuel moyen de déboisement des parcelles est compris entre -3 % et -20 %. Sur cette rive gauche, seul l'apex du cône connaît un reboisement similaire à celui observé en rive droite. Ce phénomène est expliqué par la progression des marges forestières aux dépens des prairies de fauche. Deux axes de déboisement sont visibles le long deux dépressions topographiques majeures. Cette carte met en évidence le dernier stade d'un processus de fermeture paysagère présenté sur un intervalle de 50 ans. Elle consiste en la progression de la couverture forestière à mi-hauteur du cône de déjection. Elles succèdent aux friches ainsi qu'aux dernières parcelles de cultures signalées dans le cadastre. L'ouverture paysagère se propage en rive gauche, au profit de l'urbanisation. Ce processus remet en question la place des surfaces de cultures ainsi que les prairies, dans la mesure où celles-

ci sont gagnées par l'avancée de la forêt qui s'étend jusqu'au bas des versants. La mutation paysagère observée ici est donc la conséquence d'un double processus de fermeture et d'urbanisation. Cette mutation crée une disjonction des deux rives du cône de déjection en deux unités paysagères qui se distinguent par des processus antagonistes.

**FIGURE 11. ANALYSE DES TENDANCES SPATIALEMENT SIGNIFICATIVES DU BOISEMENT : IDENTIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES ÉMERGENTES SELON LES TAUX DE CROISSANCE MOYENS SUR LES INTERVALLES DE 1948-1996 / CLUSTER ANALYSIS OF SPATIALLY SIGNIFICANT TRENDS IN AFFORESTATION : IDENTIFICATION OF EMERGING CHARACTERISTICS ACCORDING TO GROWTH RATES OVER 1948-1996.**

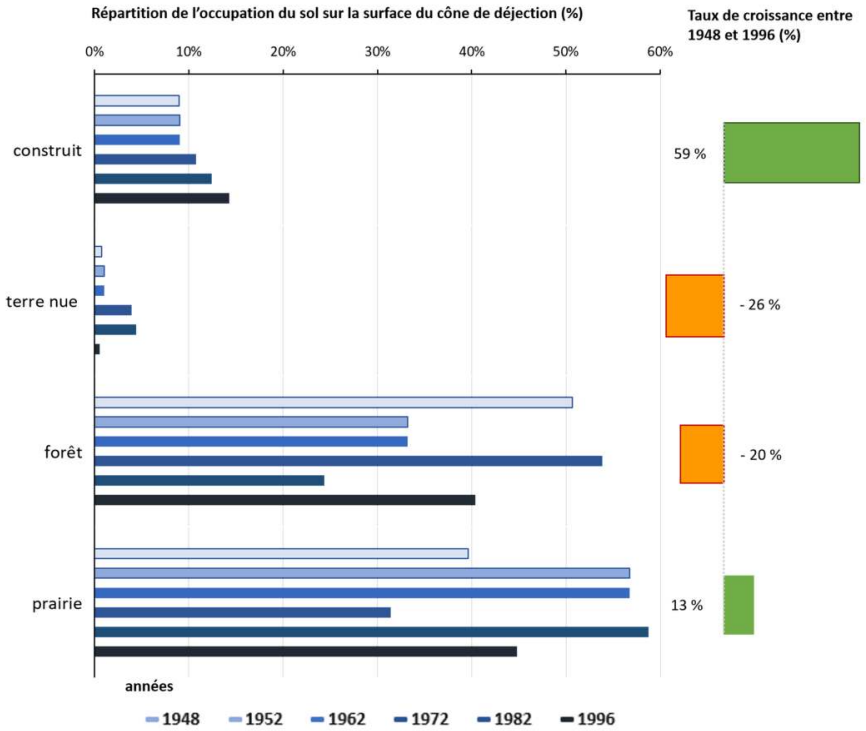



## Un paysage torrentiel marqués les grands aménagements

27 Le tronçon de la vallée incluant Saint-Martin-de-la-Porte est classé par la direction régionale de l'environnement (DIREN, 2005) dans la catégorie des *unités paysagères marquées par les grands aménagements*. Depuis l'industrialisation de la Maurienne, les aménagements routiers sont la principale cause de l'artificialisation du lit des torrents à laves situés en moyenne vallée. En supprimant l'exhaussement par la chenalisation du lit du torrent de Saint-Martin, les travaux d'aménagement ont aussi mis fin à l'aggradation du cône de déjection qui était encore actif en rive gauche au début du 20e siècle. En ce sens, aucune modification majeure du lit du torrent n'est visible sur le cône de déjection depuis 1948 à l'image de celles qui ont accompagné les premiers chantiers de correction torrentielle. Des risques de débordement par obstruction du pont ont été observés à l'amont du chenal d'écoulement après la crue de 2011, sans effets visibles en rive droite. Les affouillements observés après la dernière crue de 1983 sont ponctuels sur le chenal et ne concernent que le radier de glissement, les ouvrages de protections des berges (Etcheverry, 2014). Les ponts, les seuils et les ouvrages de protection sont impactés, mais ces épisodes de crues sont sans effet direct sur l'occupation du sol. En plus de la stabilisation du lit sur le cône, le renforcement des dispositifs de protection participe à la logique des grands aménagements de la vallée comme en témoignent les deux plages de dépôts. Elles sont construites en 1986 et 1995 pour laminer les crues et garantir le transit des crues sans débordement (Kuss, 2013). Les conséquences indirectes des aménagements torrentiels sont l'évolution rapide des zones anciennement touchées par la divagation du lit torrentiel, puisqu'en 50 ans, elles ont été réappropriées par les grands axes routiers.

Aussi, le changement paysager est plus intense lorsqu'il dépend de la contraction de l'emprise torrentielle à la base du cône de déjection (Figure 12). En effet, le développement des surfaces construites atteint près de 60 % et progresse avec le développement des infrastructures lourdes de transport.

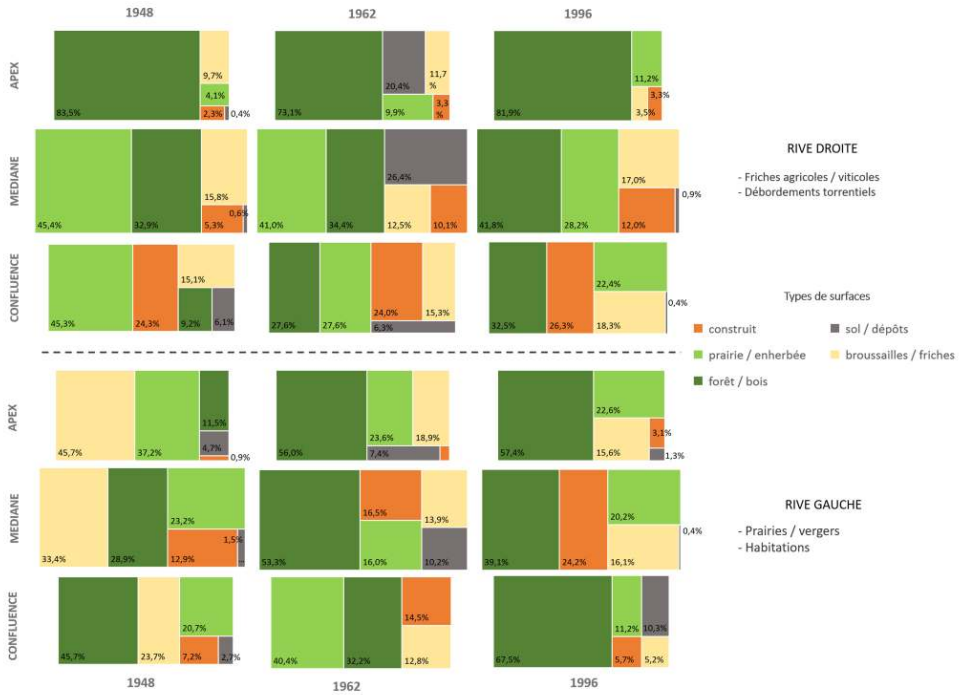
**FIGURE 12. TENDANCE PAYSAGÈRE DU CÔNE DE DÉJECTION / LANDSCAPE TEND OF THE TORRENTIAL FAN.**




28 La corrélation entre la progression des surfaces construites et la diminution des surfaces boisées est visible, mais à des proportions différentes entre les deux rives. Le processus de fermeture paysagère en rive droite apparaît comme un phénomène localisé puisque la superficie forestière diminue globalement de 20 % (7 ha). Dans le détail, en 1948, le recouvrement forestier représente 40 % de la superficie rive gauche, contre 60 % en rive droite. Cette répartition reste sensiblement identique jusqu'en 1996. C'est surtout sur la section médiane et basse du cône, autour des parcs d'activités implantés en rive droite, que la diminution de la superficie forestière prend de l'ampleur dès la fin des années 1950. Sur la rive opposée, cette tendance reste régulière et atteint un seuil en 1982. Cette relation inverse entre deux types d'occupation du sol s'observe également entre les « broussailles/friches » et « prairie/végétation herbacée ». La végétation arbustive de type « broussailles/friches » est prédominante en 1948 sur l'ancienne rive agricole, soit 85 % de la superficie. En 1996, elle est présente en lisière de forêt, à proximité des surfaces construites, sur les marges du cône de déjection. Ce type d'occupation du sol illustre un état de transition du paysage. Depuis 1948, le taux de croissance moyen des surfaces en broussaille est d'environ - 50 % sur la partie médiane du cône de déjection, elle est divisée par 4 à la confluence. À l'inverse, les surfaces en herbe progressent en fond de vallée. Cette singularité s'explique par le déboisement des terrains à proximité des surfaces bâties.

29 La figure 13 résume l'évolution de l'occupation du sol pour chaque unité du cône de déjection. Sur le cône de déjection, l'apex, la partie médiane et la confluence sont dissociés par une lecture morphologique du chenal et du cône (Harvey, 2012 ; Harvey et al., 2005). Elles répondent à une logique graduelle de vulnérabilité torrentielle, en théorie plus forte sur la confluence et faible à l'apex. La plupart des cônes de déjection sont marqués par des processus d'érosion à l'apex, des processus d'exhaussement ou de sapement des berges sur la section médiane et des processus d'avulsion sur la partie basse du cône (Harvey 1987). Ces processus hydromorphologiques ont un effet indirect sur la répartition des activités humaines (Antoine, 2011). On relève en premier lieu un gradient de boisement décroissant entre la partie haute et la partie basse du cône de déjection sur la rive marquée par les apports torrentiels. Cette répartition est globalement inversée en rive droite, puisqu'elle intègre dans son évolution les processus d'ouverture paysagère. Les autres modes d'occupation du sol ne répondent pas à cette logique graduelle amont-aval de répartition le long des versants. Les processus de vallée interviennent à la fois sur le développement de l'enveloppe urbaine autour des zones construites en rive gauche et sur le renforcement des infrastructures de transport en fond de vallée en rive droite.

**FIGURE 13. RÉPARTITION DES UNITÉS D'OCCUPATION DU SOL SUR CHAQUE SOUS-ENSEMBLE DE LA ZONE D'ÉTUDE / DISTRIBUTION OF LAND-USE UNITS ON EACH SPATIAL SUB-UNIT.**



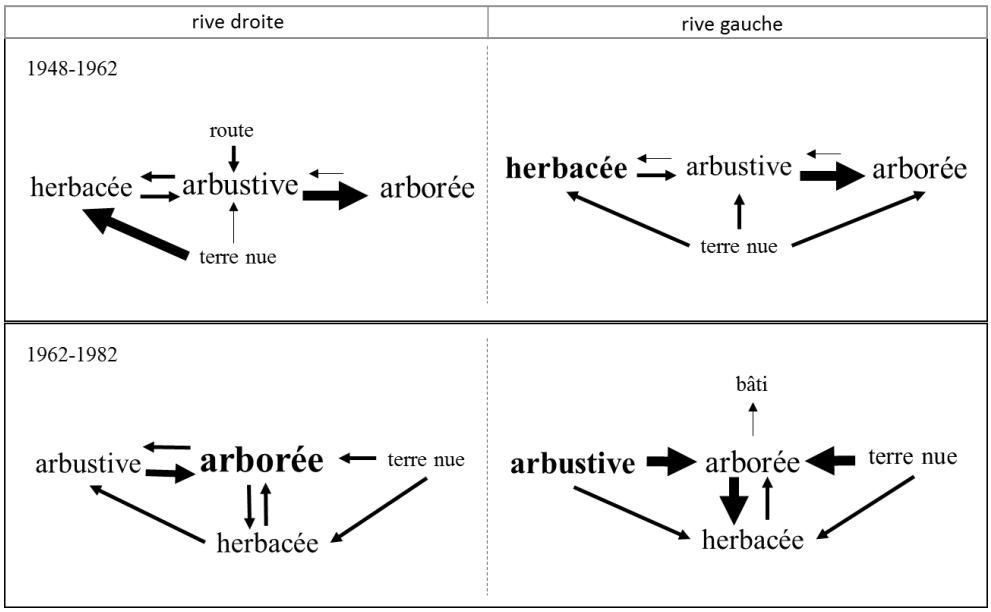

## Les points de rupture et les transitions paysagères

30 La décennie 1960 apparaît comme une période charnière qui se traduit par une recomposition des pratiques autour de nouvelles techniques agraires (Isambert, 1967). C'est aussi une période seuil, qui marque la fin d'un cycle de décroissance des zones en friche et en broussaille. Elles reprennent une lente progression entre 1972 et 1996. En décomposant les transitions paysagères autour de cette période, il est possible de dégager, à intervalles temporels égaux (1948-1962 et 1962-1982), deux phases de

transition paysagère. Les diagrammes de transition mettent évidence deux modèles de transition paysagère pour chacune des rives du cône de déjection (Figure 14). Dans le premier temps de ces modèles (1948-1962), les transitions arbustive-arborée sont les plus importantes en valeur absolue. Les dynamiques paysagères de ces modèles ne suivent pas le même schéma d'évolution sur la deuxième phase.

31 La principale transition paysagère en rive droite concerne la végétation arbustive ainsi que les surfaces en terre nue (déblais, chemins, murgers). Elle est révélatrice d'un processus d'enfouissement par la végétation arbustive et la forêt des traces des paysages agraires. L'équilibre entre la végétation herbacée, les zones arbustives et les surfaces boisées manifeste un état transitoire du paysage. La transition arbustive-arborée dans la deuxième phase de transition (1962-1982) met en avant la fermeture paysagère. Les modèles de transition en rive gauche sont influencés par la prédominance de la végétation herbacée, entre 1948-1962, puis de la végétation arbustive entre 1962-1982. Au regain de la friche amorcé dans la première phase de transition suivent la reprise du boisement et de la progression de la végétation basse.

**FIGURE 14. DIAGRAMMES DE TRANSITION DES UNITÉS D'OCCUPATION DU SOL SUR LA PARTIE MÉDIANE DU CÔNE DE DÉJECTION / TRANSITION DIAGRAMS OF LAND COVER UNITS ON THE MIDDLE PART OF THE TORRENTIAL FAN.**




32 L'étude diachronique de l'évolution de l'occupation du sol met en relief deux aspects de la trajectoire paysagère du cône de déjection. Le premier aspect est un double processus d'ouverture et de fermeture paysagère. Il débute par une première phase de revégétalisation spontanée sur l'ensemble du cône de déjection, puis de reprise du boisement et de progression de l'urbanisation. La première phase peut être comprise comme un temps de latence où la trajectoire paysagère s'ajuste à la reprise de l'emprise anthropique par l'intermédiaire des grands aménagements à la base du cône de déjection et autour des zones bâties. Le second aspect de la trajectoire est un effet de rives qui se caractérise par des processus d'évolution contraires. Cet effet de rives est présent lorsque la vulnérabilité torrentielle est plus présente sur l'une des deux rives du cône de déjection. Cet effet de rive est exacerbé par l'enclavement et la fermeture de la rive anciennement cultivée.

## Conclusion

33 Le recours à la photographie aérienne ancienne est justifié par le vide documentaire et cartographique qui caractérise un temps de rupture dans la politique de Restauration des Terrains de Montagne. Un modèle de traitement d'images a donc été proposé pour rendre comparable et interprétable le corpus de photographies aériennes dont les paramètres de prise de vue présentaient de grandes différences. Ce modèle a été calibré à partir d'une image avec pour objectif d'interpréter un grand nombre de données, à plusieurs échelles de traitement. L'approche développée ici est une méthode de classification orientée objet semi-automatisée et post-traitée par une technique de photo interprétation. Si elle n'est pas réplicable entre deux images d'une même série temporelle, cette méthode permet d'identifier les paramètres de classe réutilisables d'une image à l'autre. Ces paramètres discriminants ont été déterminés de façon expertisée pour chacune des images à partir d'indicateurs de structure et de texture développés pour les images panchromatiques. Seule l'information parcellaire sert de cadre spatial commun sur lequel se construit l'interprétation des modes d'occupation du sol. En tenant compte de ces limites, il a été possible de répliquer une chaîne de traitements (segmentation, classification hiérarchique), en modifiant les paramètres de classification. D'après les résultats cartographiques, la précision de la classification dépend de l'échelle de prise de vue et par conséquent de la qualité l'information texturée. Malgré le choix très large des combinaisons, les paramètres de classification ne permettent pas toujours la discrétisation des classes à cause des défauts d'exposition de la photographie, de la taille du pixel et de l'imprécision du découpage de l'image dans les zones de transition (lisière de bois, friche agricole).

34 La méthode ici proposée de cartographie de l'occupation du sol sur une série temporelle a l'intérêt de faciliter le croisement cartographique et chronologique des informations sur une échelle fine. L'identification des dynamiques spatiales par une entrée discursive sur la caractérisation d'une période de rupture dans la chronologie des aménagements torrentiels a surtout mis en évidence un phénomène de déprise rurale sur le cône de déjection torrentiel de Saint-Martin. Une double tendance de fermeture en rive gauche et d'ouverture paysagère en rive droite est lancée après une première phase d'évolution paysagère dominée par l'enfrichement. Sur ce dernier point, des problèmes d'interprétation persistent. Les éléments du paysage qui expriment un état de transition sont les plus difficiles à repérer sur les images aériennes anciennes. La confusion entre les modes d'occupation du sol rend plus hasardeuse l'interprétation des images. Pour compenser les difficultés de lecture, les archives cadastrales ont été utilisées comme point de repère temporel pour mettre en perspective les interprétations cartographiques.

35 Les cônes de déjection torrentiels en vallée de Maurienne présentent les mêmes problématiques d'aménagement et une chronologie des travaux de restauration comparable. Avec cette approche cartographique développée pour des missions aériennes anciennes de l'IGN©, on peut envisager de croiser les dynamiques d'occupation du sol pour comprendre le processus de progression rapide des marges forestières par rapport à l'urbanisation et la chenalisation des torrents sur les cônes de déjection. Des enjeux de valorisation sont présents sur les sites marqués par une vulnérabilité torrentielle, où l'activité agricole est maintenue par des mesures foncières pastorales pour l'irrigation et le défrichement. La reconnaissance des trajectoires d'occupation du sol, par cette

approche, sur des terrains gagnés par la friche et le boisement, l'identification des dynamiques récentes associant l'urbanisation et la préservation des prairies fourragères ouvre des perspectives de recherche dans l'étude des paysages torrentiels en vallée.

## BIBLIOGRAPHIE

Anderson, R. J., E. Hardy, J.T. Roach et R.E. Witmer, 1976, A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data, Professional Paper 964, *USGS Publications Warehouse*, 21 p.

Antoine, J-M., 2011, Vulnérabilité et adaptation des sociétés montagnardes à la torrentialité au cours du Petit Age Glaciaire dans les Pyrénées, *Sud-Ouest Européen*, pp. 53–66

Baud, D. et E. Reynard, 2015, Géohistoire d'une trajectoire paysagère dans la plaine du Rhône valaisan. Analyse du secteur entre Riddes et Martigny (1840-1965), *Norois*, pp. 15 –31

Baud, D., 2010, Étude des dynamiques d'occupation du sol et des paysages alpins : des archives cadastrales des Pays de Savoie aux Systèmes d'Information Géographique, thèse de doctorat de géographie, sous la direction de Alain Marnezy et de Jean-Paul Métailié, Université de Savoie, 349 p.

Benz, U. C., P. Hofmann, G. Willhauck, I. Lingenfelder et M. Heynen, 2004, Multi-Resolution, Object-Oriented Fuzzy Analysis of Remote Sensing Data for GIS-Ready Information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Integration of Geodata and Imagery for Automated Refinement and Update of Spatial Databases, vol 58 n 3–4, pp. 239–58

Berberoglu, S., C.D. Lloyd, P.M. Atkinson et P.J. Curran, 2000, The Integration of Spectral and Textural Information Using Neural Networks for Land Cover Mapping in the Mediterranean, *Computers & Geosciences*, 26.4, pp. 385–96

Coburn C. A. et B. Roberts, 2004, A Multiscale Texture Analysis Procedure for Improved Forest Stand Classification, *International Journal of Remote Sensing*, 25-20, pp. 4287–4308

Direction des Services fiscaux de la Savoie, 1930, Cadastre de Saint-Martin-de-la-Porte, Cote : 3P 7517, Plans cadastraux du premier cadastre français, Archives départementales de Savoie 73, 24 feuilles.

Direction régionale de l'environnement (DIREN), 2005, Les 7 familles de paysages en Rhône-Alpes. Des paysages pluriels pour un territoire singulier (rapport), Lyon, DIREN, 34 p.

Etcheverry, D., 2014, Rapport d'étude du bassin versant de Saint-Martin (RTM de Chambéry : Service de Restauration des Terrains en Montagne de Savoie), 118 p.

Haralick, R.M., 1979, Statistical and Structural Approaches to Texture, *Proceedings of the IEEE*, 67, pp. 786 –804

Harvey, A. M., 1987, Alluvial Fan Dissection: Relationships between Morphology and Sedimentation, *Geological Society of London* Special Publications, 35, pp. 87–103

Harvey, A. M., 2012, The Coupling Status of Alluvial Fans and Debris Cones: a Review and Synthesis, *Earth Surface Processes and Landforms*, 37.1, pp. 64–76

Harvey, A-M., A.E. Mather et M. Stokes, 2005, Alluvial Fans: Geomorphology, Sedimentology, Dynamics — Introduction. À Review of Alluvial-Fan Research, *Geological Society*, London, Special Publications, 251.1, pp. 1-7

Isambert, F-A., 1967, Mendras H., La fin des paysans, innovations et changement dans l'agriculture française, *Revue française de sociologie*, 8.4, pp. 577–579

Kuss, D., 2013, Etude de Risque, Torrent de Saint-Martin, ONF-RTM73 (RTM de Chambéry : Service de Restauration des Terrains en Montagne de Savoie), 120 p.

Marceau, D.J., P.J. Howarth et D.J. Gratton, 1994a, Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 1. The scale and spatial aggregation problem, *Remote Sensing of Environment*, 49.2, pp. 93–104

Marceau, D.J., P.J. Howarth et D.J. Gratton, 1994b, Remote Sensing and the Measurement of Geographical Entities in a Forested Environment. 2. The Optimal Spatial Resolution, *Remote Sensing of Environment*, 49.2, pp. 105-117

Marnezy, A., 1999, L'Arc et sa vallée. Anthropisation et géodynamique d'une rivière alpine dans son bassin versant, Thèse de doctorat, sous la direction de Michel Chardon, Université de Grenoble 1, 750 p.

Meynier, A., A. Hallaire et J. Peltre, 1970, Les paysages agraires, Paris, Armand Colin, 199 p.

Mougin, P., 1914, Les torrents de la Savoie, La fontaine de Siloé, Le champ régional, 1914, 1251 p.

Muraz, J., S. Durrieu, S. Labbe, V. Andreassian et M. Tangara. 1999, Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ? Ingénieries, *EAT- IRSTEA édition*, pp. 39-58

Onde, H., 1942, L'occupation humaine dans les grands massifs savoyards internes : étude critique, historique et démographique, Grenoble, Arthaud, 359 p.

ONF- BD-RTM Evénements, n.d., torrent de Saint-Martin, archives RTM-ONF73, [en ligne] URL : http://rtm-onf.ifn.fr

Plu, D. et G. Ducher, 1988, Availability of Aerial Photography and Space Images; the Photothèque at the IGN (F), France, *Photogrammetria*, 43.2, pp. 83–100

Schneuwly-Bollschweiler, M., Stoffel M. et F. Rudolf-Miklau, 2013, Dating torrential processes on fans and cones – Methods and their application for hazard and risk assessment, Dordrecht, Springer, pp. 33–49.

Selleron, G. et F. Vidal, 2000, Mise en évidence d'indicateurs de la dynamique biogéographique en moyenne montagne pyrénéenne par analyses multicsalaire et multitemporelle de photographies aériennes et d'images Satellitaires, *Cybergeo*, European Journal of Geography [En ligne], Dossiers, document 170, mis en ligne le 05 mai 2000, URL : http://cybergeo.revues.org/672; DOI : 10.4000/cybergeo.672

Simon, L. et B. Tamru, 1998, Cartographie biogéographique et dynamiques de paysage en montagne de Lure, *Mappemonde*, 49-1, pp. 26-31

Tilton, J.C., 2003, Analysis of Hierarchically Related Image Segmentations, *IEEE*, pp. 60–69

## NOTES

**1.** 6M 3073-3084, ADS73 liste nominative du recensement, Archives départementales de Savoie

## RÉSUMÉS

Cet article propose une méthodologie de traitement des photographies aériennes anciennes appliquée à l'étude géohistorique des paysages torrentiels. La photographie aérienne est un traceur temporel de première main dans la reconstitution diachronique des changements paysagers. L'enjeu de ces recherches est le suivi cartographique des dynamiques paysagères, en prenant pour modèle une entité un paysage sensible au changement - le cône de déjection torrentiel - dont les conditions d'équilibre témoignent du contexte socio-environnemental d'une vallée torrentielle des Alpes du Nord. C'est dans une perspective exploratoire de reconstitution diachronique que les techniques de photo-interprétation et de télédétection ont été associées. Aussi est-il question de montrer les potentialités d'une approche orientée objet pour reconstituer des trajectoires en prenant pour exemple une série chronologique de missions aériennes anciennes de l'IGN©. L'approche développée à partir d'une chaîne de traitements permet la comparaison d'images anciennes. Les résultats de cette méthode offrent une compréhension spatiale des dynamiques paysagères sur les cinquante dernières années. Par-delà l'exemple ici présenté, la méthode proposée permet d'envisager le traitement d'autres jeux de photographies aériennes d'archives et une application à d'autres cônes de déjection. Protocole

This article proposes a methodology to interpret old aerial photography applied to the geohistorical study of torrential landscapes. Indeed, as a primary source, images are historical proxies which foremost advantages are to locate and spatialise forms of changes. The aim of these researches is to produce a cartographical following of landscapes dynamics, through this type of archive. To achieve such a purpose, we choose a landscape sensitive to changes (torrential fan), considering landscape entities which equilibrium conditions responds to the socio-environmental context of a torrential northern alpine valley. In this exploratory aim of diachronic reconstruction, the photo-interpretative technics and remote sensing were associated. In this article, we explain the potentialities of an object-oriented approach using as an example a time series of areal missions taken by the National Geographic Institute of France (IGN-F©). The results of this method give a spatial and normalised comprehension over the fifty last years.

## INDEX

**Keywords :** semi-automated mapping, photo-interpretation, landscape, archives, images, old aerial photography
**Mots-clés :** cartographie semi-automatisée, photo-interprétation, paysage, archives, photographies aériennes anciennes

# AUTEURS


## THÉRÈSE HUGEROT

Doctorante en géographie, Laboratoire EDYTEM UMR5204/CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Campus scientifique, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France, courriel : therese.hugerot@univ-smb.fr

## LAURENT ASTRADE

Laboratoire EDYTEM UMR5204/CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Campus scientifique, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France

## ESTELLE PLOYON

Laboratoire EDYTEM UMR5204/CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Campus scientifique, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France

## CHRISTOPHE GAUCHON

Laboratoire EDYTEM UMR5204/CNRS, Université Savoie Mont Blanc, Campus scientifique, Pôle Montagne, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex, France