

**SUIVI SPATIO-TEMPOREL DES CALOTTES GLACIAIRES  
DE L'ANTISANA ET DU COTOPAXI (ÉQUATEUR):  
Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique**



Photographie: M.Collet, le Cotopaxi vu depuis Las Illinizas, Avril 2010

**Maële COLLET**

Mémoire de Master 2, Géographie et Aménagement, spécialité « Gestion de l'Environnement »

Promotion 2009-2010, Université de Rennes 2-Haute Bretagne, Rennes

Encadrement :

Samuel Corgne, Université de Rennes 2-Haute Bretagne, Rennes

Antoine Rabatel, Université Joseph Fournier, Grenoble

Marcos Villacís, Escuela Politécnica Nacional de Quito, Équateur



## Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier le personnel de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en Équateur et en particulier Bernard Francou de m'avoir donné la possibilité de réaliser ce stage. Je remercie également le SENACYT (Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología, Gouvernement de l'Équateur) ainsi que le directeur de l'École Polytechnique Nationale de Quito (EPN).

Merci également à mes tuteurs professionnels et universitaires, Samuel Corgne, Antoine Rabatel et Marcos Villacís, pour leur suivi, leurs conseils et leur disponibilité durant toute la durée de ce stage et lors de la rédaction de ce mémoire. Enfin, j'ai une pensée pour les étudiants de l'École Polytechnique Nationale et je les remercie pour leur accueil, leur bonne humeur quotidienne et l'amitié qu'ils m'ont témoignés.

Au-delà de ce stage, je souhaite remercier l'ensemble des professeurs que j'ai pu rencontrer tout au long de ma formation en Géographie que ce soit à l'Université de Nantes ou à l'Université de Rennes 2 qui m'ont beaucoup apporté et donné le goût d'apprendre.



Photo: M. Collet, sommet du Cotopaxi, mai 2010



## Préambule

L'élaboration de ce mémoire de Master 2 fait suite à un stage réalisé du 1<sup>er</sup> mars au 31 juillet 2010 à l'École Polytechnique Nationale de Quito en Équateur. Ce stage s'inscrit dans le cadre du programme de recherche de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) nommé GREAT ICE (Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude, Indicateurs Climatiques et Environnementaux). Le travail effectué a essentiellement porté sur le traitement et l'analyse d'images satellitales de type Landsat afin de retracer l'évolution spatiale et temporelle des calottes glaciaires des volcans de l'Antisana et du Cotopaxi. Ce travail constitue l'un des axes que souhaite développer la Jeune Équipe Associée à l'IRD (JEAI) avec laquelle j'ai travaillé durant ces cinq mois dont le nom est: « Identification et Modélisation des ressources en eau d'Altitude en fonction des variations du climat: vers la Gestion intégrée de l'eau dans les Andes de l'Équateur (IMAGE) ». Cette équipe est dirigée par Marcos Villacís, tuteur pédagogique du stage, et est basée au sein du Département d'Ingénierie Civile et Environnementale de l'École Polytechnique Nationale (EPN) de Quito.

Ce stage a été très enrichissant à plusieurs niveaux. Il m'a permis de développer ma capacité à travailler en autonomie et de renforcer mes compétences en cartographie, en Système d'Information Géographique (SIG) et en télédétection. J'ai aussi pu découvrir un sujet que je n'avais que peu abordé jusque là, les glaciers. J'ai eu la possibilité de participer à des ateliers de formation et d'accompagner les chercheurs sur le terrain, ce qui m'a beaucoup appris et fait découvrir le monde de la recherche. Enfin, d'un point de vue personnel, j'ai apprécié de partager des moments et de découvrir une culture et un pays passionnants, au contact des personnes que j'ai pu rencontrer tout au long de mon séjour en Équateur.



# Sommaire

**Remerciements**

**Préambule**

**Sommaire**

**Introduction**

## **PARTIE 1 : LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET GÉOGRAPHIQUE**

- 1.1 Présentation de la structure d'accueil et des programmes de recherche dans lesquels s'inscrit le stage
- 1.2 Présentation de la zone d'étude
- 1.3 Les programmes de recherches effectués et en cours sur la zone d'étude

## **PARTIE 2 : APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CALOTTES GLACIAIRES**

- 2.1 Définition, historique et principes de bases de la télédétection
- 2.2 La télédétection : un outil pertinent pour l'étude des glaciers de montagnes

## **PARTIE 3 : DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE**

- 3.1 Présentation des données et des outils
- 3.2 Méthodologie
- 3.2 Les difficultés rencontrées

## **PARTIE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

- 4.1 Évaluation des résultats
- 4.2 Analyse des variations de surface des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi de 1979 à 2010
- 4.3 Quels liens avec le climat ?

**Conclusion**

**Bibliographie**

**Table des matières**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Annexes**





## Introduction

Depuis la fin du Petit Age Glaciaire (fin du 19<sup>ème</sup> siècle), les glaciers des Andes, comme la majorité des glaciers du monde, sont en déclin et ce mouvement s'accélère depuis les années 1980. Le recul des glaciers, voire leur disparition, peut avoir des impacts importants en particulier sur l'hydrologie du fait du rôle régulateur des glaciers dans le régime des cours d'eau mais aussi sur la ressource en eau dont dépendent les populations locales pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et l'hydroélectricité. S'intéresser à ces glaciers et à leur évolution revêt donc un intérêt crucial pour le fonctionnement des milieux naturels et des sociétés. En outre, les glaciers constituent un élément privilégié pour l'étude des changements climatiques.

En effet, il s'agit d'un des éléments probablement le plus visible pour évaluer les changements climatiques puisque des modifications, même sensibles, dans les paramètres climatiques contrôlant les glaciers vont se traduire par des variations de longueur, de surface et de volume des glaciers. Les glaciers tropicaux sont d'autant plus réactifs à ces modifications qu'ils sont soumis toute l'année à un régime d'ablation, contrairement aux glaciers alpins, par exemple, qui connaissent une période d'accumulation en hiver et une période d'ablation en été. De ce fait, les glaciers tropicaux sont capables d'enregistrer des variations liées à des événements climatiques de courte durée (événements liés au phénomène ENSO<sup>1</sup>) comme de longue durée (Oscillation Décennale du Pacifique<sup>2</sup>, réchauffement climatique global).

C'est pour mieux comprendre les relations glacier-climat que depuis 1991 a été mis en place un réseau d'observation des glaciers dans les Andes tropicales par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et ses partenaires locaux. Les études portent sur une dizaine de glaciers répartis en Bolivie, au Pérou et en Équateur. En Équateur, les recherches se sont focalisées sur l'Antisana mais des études sont également réalisées sur le Cotopaxi, le Cayambe ou le Chimborazo.

Sur ces glaciers, ou à leur proximité, a été déployé un dispositif permettant de recueillir des données météorologiques, glaciologiques et hydrologiques. Ce suivi, qui s'accompagne de

---

<sup>1</sup> *El Niño-Southern Oscillation*, phénomène océanique et climatique généré par des interactions océan/atmosphère et qui se produit de façon plus ou moins régulière dans le Pacifique intertropical.

<sup>2</sup> L'Oscillation Décennale du Pacifique ou PDO en anglais pour *Pacific Decadal Oscillation* est un phénomène comparable à celui d'ENSO mais d'une amplitude plus large de l'ordre de 20 à 30 ans.



missions régulières sur le terrain, permet d'étudier la dynamique des glaciers et de comprendre l'effet que peuvent avoir certains événements climatiques sur ceux-ci mais aussi sur l'hydrologie et les ressources en eau liées à ces glaciers.

Pour cela, les scientifiques mesurent un certain nombre d'éléments dans le but de caractériser et d'analyser les variations de position, de surface et de volume des glaciers. En Équateur, jusqu'aujourd'hui ces mesures ont été réalisées pour l'essentiel à partir d'observations sur le terrain et de photographies aériennes. Cependant, ces études restent limitées à un nombre restreint de glaciers, principalement pour des raisons de logistique et de coût. C'est pourquoi il apparaît intéressant de se tourner vers l'exploitation d'images satellitales (télédétection spatiale) dont l'application pour l'étude des glaciers montre des résultats intéressants dans les Andes et ailleurs dans le monde<sup>3</sup>, et à partir de ces données, d'analyser l'évolution spatio-temporelle des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi à travers l'étude des variations de surface.

Mais en quoi la télédétection est-elle un outil privilégié pour l'étude des glaciers ? Comment ont évolué les glaciers équatoriens et en particulier ceux de l'Antisana et du Cotopaxi depuis le début des années 1980 ? Et enfin, comment se traduisent les effets de la variabilité et des changements climatiques sur ces glaciers ?

Après avoir évoqué le contexte scientifique et géographique dans lequel s'inscrit notre étude (partie 1), nous reviendrons sur les définitions et les principes de base de la télédétection, un outil particulièrement adapté à l'étude des glaciers (partie 2). Nous présenterons ensuite les données et la méthodologie utilisée (partie 3) en exposant les étapes mais aussi les limites de cette méthodologie. Enfin, après une présentation et une analyse des résultats, nous verrons les liens que l'on peut faire entre les évolutions constatées (recul, avancée, stagnation) et les variations climatiques que l'on peut observer et qui peuvent être liées à des événements de courts, moyens et longs termes, d'origine naturelle ou anthropique (partie 4).

---

<sup>3</sup> Voir notamment les travaux réalisés dans le cadre du programme international GLIMS (*Global Land Ice Measurement from Space*) destiné au suivi et de surveillance des glaciers du monde à partir de la télédétection.



## **PARTIE 1 : LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET GEOGRAPHIQUE**

Dans cette première partie, on présentera le contexte scientifique dans lequel s'inscrit l'étude avant d'évoquer le contexte géographique en s'attardant sur les principales caractéristiques des deux volcans étudiés.

### **1.1 Présentation de la structure d'accueil et des programmes de recherche dans lesquels s'inscrit le stage**

#### **1.1.1 L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)**

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) est un établissement public français à caractère scientifique et technologique placé sous la tutelle des Ministères de la Recherche et de la Coopération du gouvernement français. Il participe à des recherches scientifiques et techniques portant sur des thèmes variés relatifs aux sociétés et à leurs interactions avec les milieux et à l'environnement (risques naturels, gestion durable des ressources naturelles, santé, lutte contre la pauvreté...). Ces études sont destinées à accompagner le développement économique et social des pays émergents et en développement et à renforcer la coopération entre les chercheurs, les universités et autres institutions des différents pays.

L'IRD, qui s'est d'abord appelé l'Office de la Recherche Scientifique Coloniale (ORSC) puis l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM) a été créé en 1943. Il a pris le nom de l'IRD en 1999 et son siège a été déplacé de Paris à Marseille en 2008. Cet institut est implanté dans plusieurs villes en France, y compris dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer (7 implantations), et dans les pays du Sud, en Afrique, en Méditerranée, en Asie et en Amérique Latine (23 implantations). Au total, plus de 2200 personnes y travaillent.

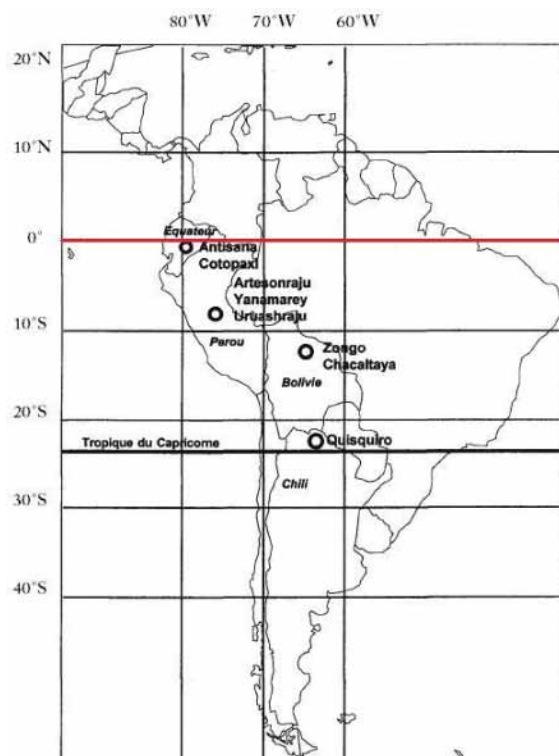
La présence de l'IRD en Équateur remonte aux débuts des années 1970 et les premières études ont porté sur le milieu rural avant de s'étendre à d'autres domaines. Aujourd'hui, une douzaine de programmes y sont en cours. Ils portent sur les milieux et risques naturels (risques sismiques et volcaniques, tsunamis), sur les ressources naturelles (biodiversité, ressources en eau) et sur les sociétés (étude de la vulnérabilité par rapport aux risques naturels et anthropiques notamment). Parmi ces programmes, le programme GREAT ICE (« Glaciers et Ressources en

Eau dans les Andes Tropicales - Indicateurs Climatiques et Environnementaux ») s'intéresse aux glaciers en abordant l'étude du climat, des ressources en eau et des risques glacio-volcaniques.

### 1.1.2 Le programme de recherche « Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales - Indicateurs climatiques et environnementaux » (GREAT ICE)

Le programme de recherche GREAT ICE, mis en place en 1991, est un programme régional initialement centré sur les Andes tropicales qui a pour objectif d'étudier l'évolution des glaciers tropicaux et l'impact des variations climatiques sur ceux-ci afin de mieux documenter et analyser l'évolution du climat et de mieux comprendre la relation glacier-climat.

Au niveau des Andes tropicales, une dizaine de glaciers font aujourd'hui l'objet d'un suivi régulier qui s'effectue par l'IRD et ses partenaires locaux (instituts météorologiques, gestionnaires des ressources en eau, universités et grandes écoles...). Deux de ces glaciers, l'Antisana (Équateur) et le Zongo (Bolivie) font partie du service d'observation Glacio Clim qui a pour but de constituer une base de données glacio-météorologiques à travers l'étude de différents glaciers au niveau international.

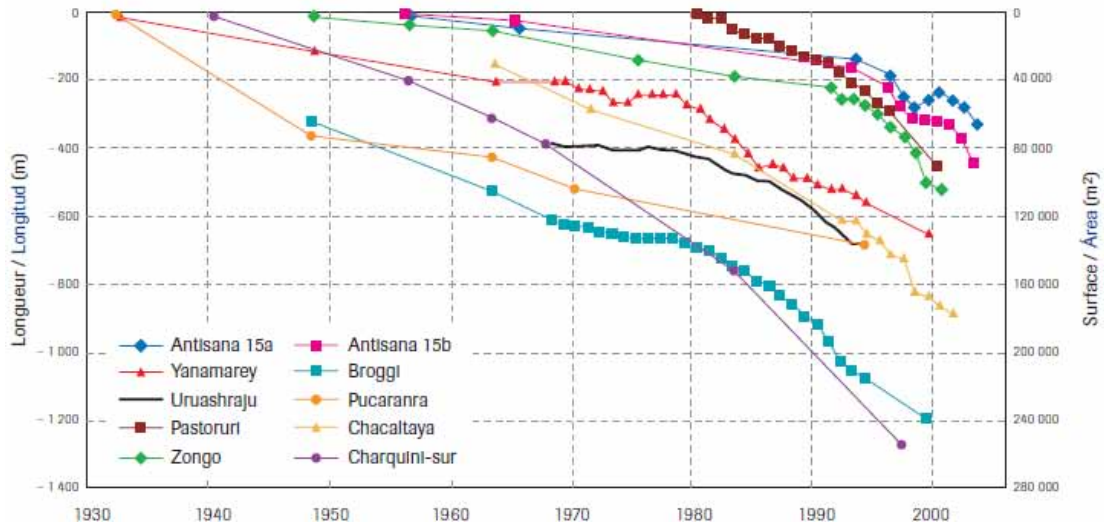


**Figure 1: Principaux glaciers étudiés dans le cadre du programme GREAT ICE**

*Le programme GREAT ICE s'est d'abord mis en place en Bolivie (1991) puis s'est progressivement étendu au Pérou et en l'Équateur (1994). On peut intégrer à ce programme le Chili dont les glaciers font l'objet d'un suivi plus ponctuel.*

Source : Francou B., 2000

Pour ce suivi, les bilans de masse<sup>4</sup>, vitesses d'écoulement, longueurs et/ou des superficies des glaciers sont mesurés directement sur le terrain ou estimés à partir de photographies aériennes, d'images satellitales. Les observations montrent une nette tendance au repli de ces glaciers tout au long du 20<sup>ème</sup> siècle, repli qui semble s'accélérer depuis les années 1980. Cette situation s'observe de manière significative sur la figure ci-dessous.



Source : Francou B. et Vincent C., 2007

**Figure 2: Évolution de la longueur et de la surface de dix glaciers tropicaux des Andes de 1930 à 2006**

Pérou: Yanamarey, Broggi, Pastoruri, Uruashraju, Cajap; Bolivie: Zongo, Chacaltaya, Charquini Sur; Équateur: Antisana (glacier 15, langues Alfa et Beta)

Le recul des glaciers et son accélération posent donc question. On sait que les glaciers constituent de bons indicateurs de la variabilité climatique du fait de leur sensibilité aux variations du climat et de leur réponse rapide à celles-ci, mais il est encore difficile d'établir de façon précise les relations entre les glaciers et le climat. La mise en place de ce réseau d'observations glaciologiques et hydrologiques dans les Andes tropicales permet donc la constitution d'une base de données importante.

Un autre axe est développé au sein du programme GREAT ICE, il concerne les risques glacio-volcaniques. Dans les Andes, la thématique des risques est abordée dans d'autres programmes de recherche de l'IRD, notamment dans le programme du PACIVUR (Programme andin de formation et de recherche sur la vulnérabilité et les risques en milieu urbain) mais au sein de GREAT ICE il s'agit plus précisément d'étudier l'impact des risques glacio-volcaniques

<sup>4</sup> Différence entre l'accumulation (gain de masse du glacier par apport de précipitation solide principalement) et l'ablation (fonte, sublimation)

comme les chutes de cendres, les coulées de lave ou encore les lahars<sup>5</sup> qui peuvent, au-delà des dégâts causés sur le plan humain, matériel et environnemental, perturber l'équilibre des glaciers et le fonctionnement hydrologique des cours d'eau d'origine nivo-glaciaire.

### **1.1.3 Présentation des objectifs du stage**

Au sein du programme GREAT ICE, il existe plusieurs équipes de recherche, regroupant des glaciologues, des hydrologues, des géologues ou encore des chimistes, sur des thèmes ou des sites d'études particuliers. Le stage que j'ai effectué était placé sous la tutelle administrative de l'IRD et intégré à une Jeune Equipe Associée à l'IRD (JEAI) IMAGE « *Identification et Modélisation des ressources en eau d'Altitude en fonction des variations du climat : vers la Gestion intégrée de l'eau dans les Andes de l'Équateur* » (cf. Annexe I). Cette équipe est dirigée par Marcos Villacís, tuteur pédagogique du stage et est basée à l'École Polytechnique Nationale (EPN) de Quito au sein du Département d'Ingénierie Civile et Environnementale.

L'étude de l'Antisana et du Cotopaxi a été privilégiée dans le cadre de ce travail du fait de la disponibilité des informations relatives à ces deux glaciers et de l'importance qu'ils présentent pour les bassins versants associés. Il apparaît donc intéressant, lorsque l'on souhaite étudier l'hydrologie et le devenir des ressources en eau, de disposer d'informations sur les glaciers.

Celles-ci peuvent provenir de plusieurs sources : documents historiques, observations et mesures sur le terrain, photographies aériennes ou images satellitaires. Les études passées et/ou en cours utilisent encore assez peu les images satellites alors qu'il s'agit d'une source d'information précieuse, plutôt bien adaptée à l'étude des glaciers. C'est donc autour de l'analyse et du traitement d'images satellitaires que s'est centré ce stage avec pour objectif de retracer l'évolution spatio-temporelle des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi. Pour cela, on a utilisé des images satellitaires issues du programme Landsat dont les premières images pour la zone d'étude, remontent à la fin des années 1970.

---

<sup>5</sup> Coulée de boue formée principalement de cendres et d'eau provenant de la fonte de la glace.



Le travail s'est déroulé en quatre étapes principales:

- 1- Sélection des images satellitales exploitables pour l'étude selon des critères spécifiques et prétraitement des images préparation (amélioration des images et combinaisons de bandes spectrales)
- 2- Traitement des images (délimitations, classifications et calculs d'indice permettant d'isoler les surfaces englacées des autres surfaces)
- 3- Rectification des résultats issus des traitements automatiques (corrections manuelles à partir d'une analyse visuelle) et calculs des superficies glaciaires
- 4- Analyse et interprétation des résultats

Ce sont ces étapes que le présent mémoire a pour objectif de détailler en prenant soin de citer et de prendre en compte les études passées et en cours liées au sujet. Mais avant de les développer, il est important de revenir sur le contexte géographique.

## **1.2 Présentation de la zone d'étude**

### **1.2.1 Généralités sur l'Équateur**

L'Équateur est un petit pays (283 560 km<sup>2</sup>) situé sur la côte occidentale de l'Amérique du Sud, entre le Pérou et la Colombie. Il est traversé par la ligne équatoriale et est bordé à l'Ouest par l'Océan Pacifique et à l'Est par la forêt Amazonienne. La Cordillères des Andes, qui traverse le continent sud-américain depuis le Venezuela jusqu'au Chili, passe au centre du pays et on compte dans le pays une cinquantaine de volcan dont beaucoup atteignent plus de 4000 mètres d'altitude.

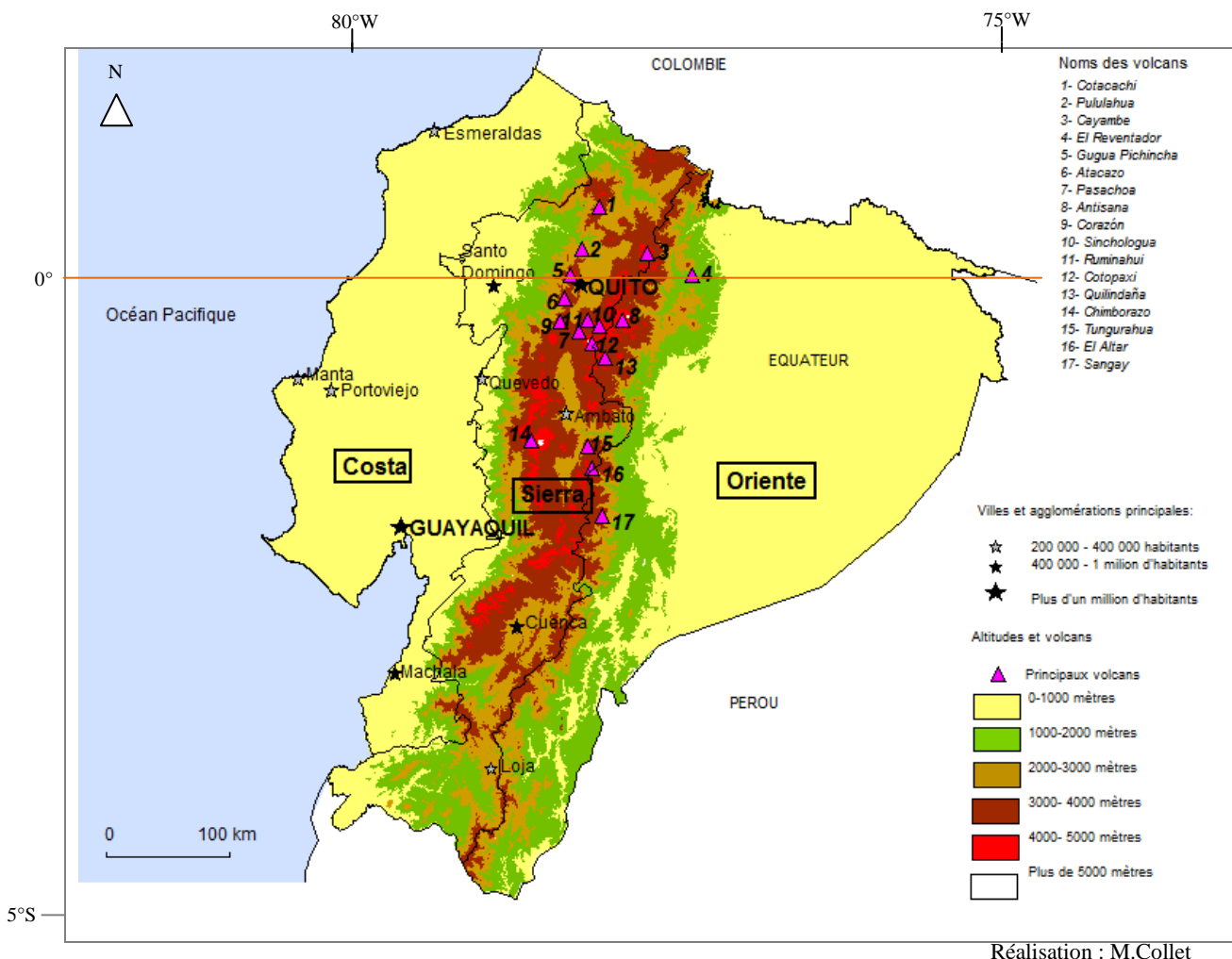
L'océan, la latitude et le relief sont sans doute les trois grands traits géographiques qui font de l'Équateur une terre de contrastes. Ceux ci s'observent au niveau de la topographie, du climat, de la végétation, des paysages et l'on pourrait aussi parler des contrastes culturels et humains. Si l'on s'en tient au point de vue géographique, on distingue d'Ouest en Est, trois grandes régions naturelles :

- la « *Costa* » s'étend de l'Océan Pacifique aux contreforts de la Cordillère occidentale des Andes et est constituée d'une basse plaine côtière et de quelques montagnes à l'Est ne dépassant pas 1000 mètres.

- la « *Sierra* » est une région au relief abrupt traversée par la Cordillère des Andes. Elle se compose de deux chaînes de montagnes (la Cordillère Occidentale et la Cordillère Orientale ou *Real*) séparées par des vallées densément peuplées.

- L'« *Oriente* » correspond à la région amazonienne et occupe plus de la moitié du territoire équatorien. On y distingue deux régions, les piémonts des Andes (3000 m à 300 m) à l'Ouest et les terres basses (150-300 m) à l'Est.

A ces trois régions il faut ajouter l'archipel des Galápagos situé à plus de 1000 km à l'Ouest des côtes. Cet archipel, rendu célèbre par Charles Darwin, compte 15 îles et plus de 40 îlots d'origine volcanique et abrite une biodiversité très riche, il bénéficie à ce titre d'une forte protection et est considéré comme patrimoine de l'humanité par l'UNESCO<sup>6</sup>.



**Figure 3 : Carte de l'Équateur (sans l'Archipel des Galápagos)**

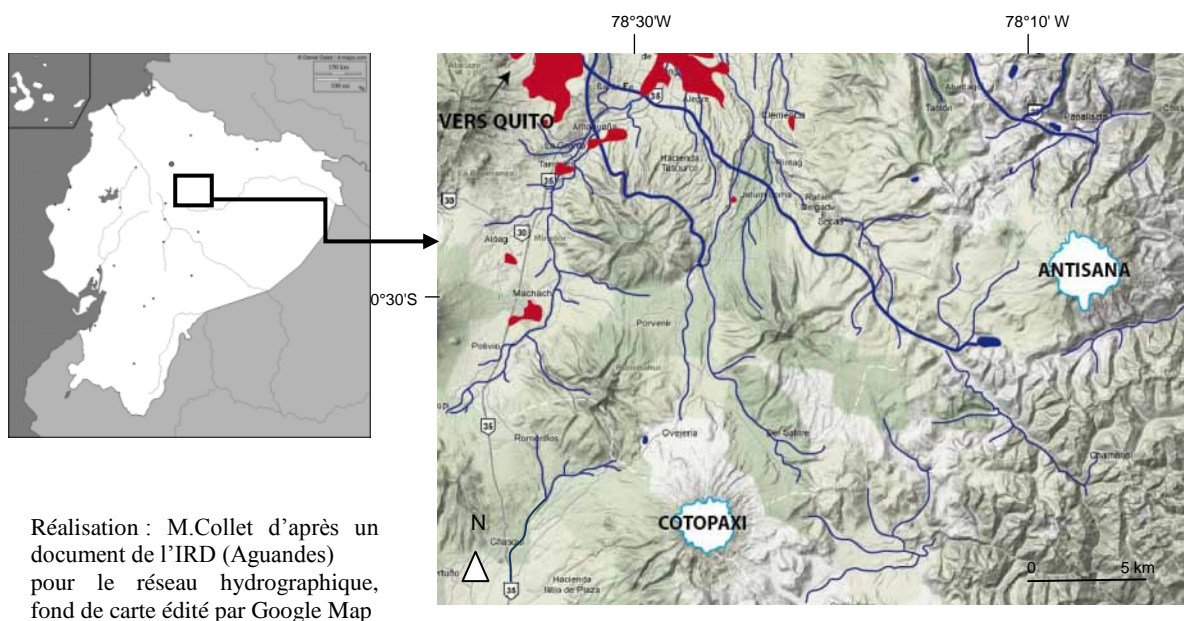
<sup>6</sup> Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO).

Du fait de sa position géographique (latitude, longitude, océan), de la topographie engendrée par la Cordillères des Andes (rôle pour la formation et le déplacement des masses d'air) et de la présence du Pacifique et de l'Amazonie (arrivée de masses d'air humide), l'Équateur présente une très grande diversité de climats dont les différences peuvent être considérables d'un lieu à l'autre y compris sur de courtes distances (Pourrut P., et al, 1994).

On peut ajouter à cela l'influence de deux phénomènes régionaux et/ou globaux, complexes et non négligeables du point de vue climatique. Le premier tient au fait que le pays est situé dans une zone de basses pressions atmosphériques, la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) dans laquelle convergent des masses d'air aux caractéristiques différentes ce qui joue beaucoup sur la circulation atmosphérique. Le deuxième facteur relève de la proximité de l'Océan Pacifique et de l'influence de certains courants marins comme le courant froid de Humbolt et des phénomènes climatiques tels que El Niño/La Niña.

### 1.2.2 Les Andes équatoriennes, l'Antisana et le Cotopaxi

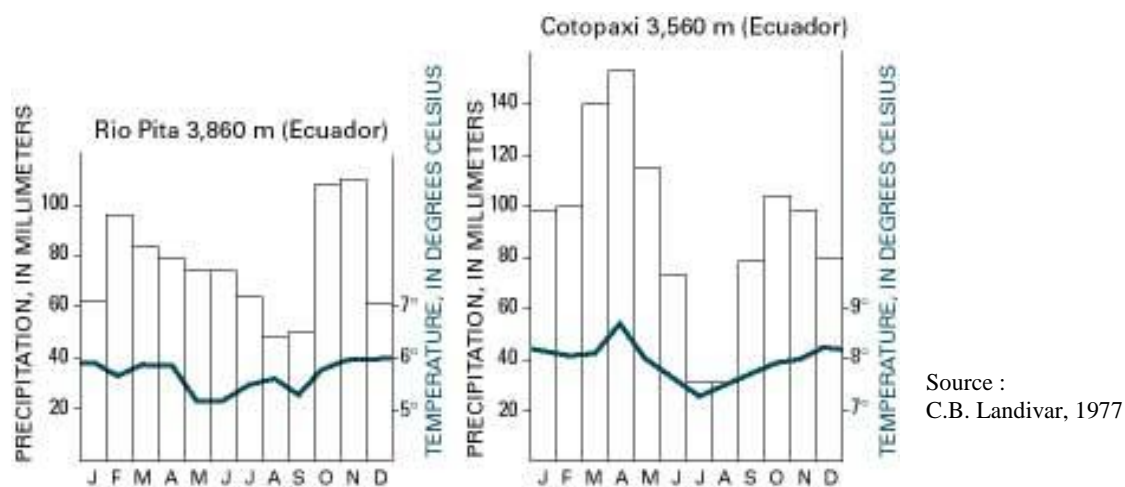
Les Andes équatoriennes se composent de la Cordillère Occidentale et de la Cordillère Orientale, qui est généralement plus large et plus élevée que la première avec des altitudes moyennes atteignant 4000 mètres. Elles sont séparées par un couloir étroit, « *l'avenue des volcans* » qui est situé entre 2500 et 3000 mètres.



**Figure 4:** Localisation des volcans de l'Antisana et du Cotopaxi

La zone d'étude est marquée par un climat équatorial humide de montagne. Les températures mensuelles ne présentent pas de variations importantes dans l'année mais les variations journalières ainsi que les variations interannuelles peuvent quant à elles être importantes. L'isotherme zéro degré se situe à environ 4700 mètres et le gradient thermique moyen est de 6,5°/ 1000 mètres.

Pour les précipitations, les variations saisonnières sont plus importantes avec des minima pour les mois de juillet à septembre et de novembre à janvier. Mais si l'on s'intéresse aux glaciers et donc aux hautes altitudes, il n'y a plus de saisonnalité claire, les précipitations et l'humidité de l'air sont constantes toute l'année.



**Figure 5: Températures et précipitations moyennes au niveau du Cotopaxi**

- L'Antisana

Le volcan de l'Antisana (0°28'S ; 78°09'W) est situé sur la Cordillère Orientale, à 40 km au Sud-Est de la ville de Quito et s'élève à 5767 mètres. Son extension Nord-Sud est de 14 kilomètres et les glaciers, qui représentaient en 2004 une superficie de près de 14 km<sup>2</sup> (Cáceres B., 2006), le recouvrent à partir de 4700 mètres pour le côté Est et 4800 mètres pour le côté Ouest.

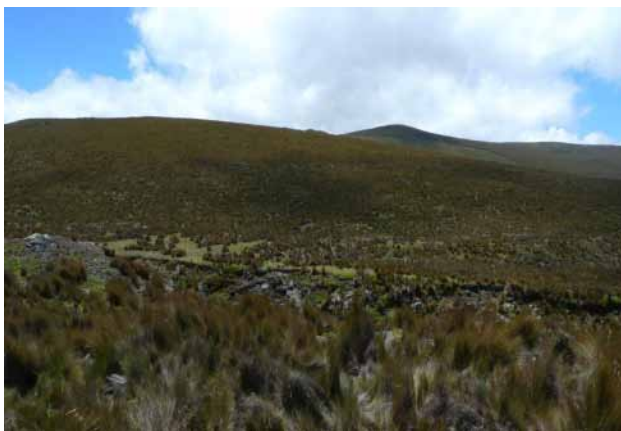
Il s'agit d'un strato-volcan actif dont la dernière éruption a eu lieu en 1801 et pour lequel la période de retour des cycles éruptifs est estimée entre 200 et 400 ans (B. Cáceres, 2001).



**Figure 6 : L'Antisana**

*L'Antisana, le quatrième plus haut volcan du pays, est constitué de deux sommets dont le plus haut atteint 5767 mètres.*

Photo : M.Collet, Réserve Écologique de l'Antisana, mars 2010



**Figure 7 : Le páramo**

*Le Páramo est une formation végétale d'altitude particulière des Andes septentrionales. Il est le refuge d'une riche biodiversité et est à ce titre parfois protégé par l'État, comme c'est le cas pour l'Antisana avec la création de la Réserve Écologique de l'Antisana (REA) en 1993 sur une superficie de 120 000 hectares.*

Photo : M.Collet, Réserve Écologique de l'Antisana, mars 2010

L'eau de la Réserve, dont une partie provient de la fonte des glaciers, représente un enjeu économique et social crucial puisque cette eau est utilisée pour l'irrigation, la production électrique et l'alimentation en eau potable. Cette dernière s'effectue à travers de nombreuses captations localisées dans la réserve et grâce à deux systèmes artificiels : la Mica au Sud Ouest de l'Antisana et Papallacta au Nord. Ces installations sont gérées par l'EMAAP-Q (*Empresa Publica Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito*) et contribuent à l'alimentation en eau potable des communautés avoisinantes ainsi que de 600 000 habitants des quartiers sud de Quito. Pour répondre à la demande croissante en eau de ces régions urbaines de grands travaux d'aménagements sont prévus sur plusieurs cours d'eau, dont certains de l'Antisana, dans le cadre du *Projet Rios Orientales* proposé par l'EMAAP-Q.



Photo : M.Collet, Réserve  
Écologique de l'Antisana,  
juin 2010

**Figure 8:** Apport d'eau d'origine glaciaire

*Point de confluence entre deux cours d'eau d'origine différente : glaciaire et non glaciaire où le cours d'eau d'origine glaciaire apparaît plus turbide du fait de sa charge sédimentaire.*

#### - Le Cotopaxi

Le volcan du Cotopaxi ( $0^{\circ} 38' S$  ;  $78^{\circ} 26' W$ ) est situé au Nord de la Cordillère Orientale, à 55 kilomètres au Sud-Est de Quito et à 40 kilomètres au Nord-Est de la ville de Latacunga. Il s'agit du deuxième sommet du pays (5897 m) après celui du Chimborazo (6268 m). Il présente une forme conique symétrique dont le diamètre de base mesure 22 kilomètres. En 2007, la superficie glaciaire totale du volcan était estimée à 12,68 km<sup>2</sup> (Carceres B., et al, 2008).



Photo :  
M. Collet,  
Cotopaxi,  
mai 2010

**Figure 9:** Le sommet du Cotopaxi

*Le volcan du Cotopaxi s'élève à 5897 mètres d'altitude, il présente une forme conique quasiment symétrique et fait figure de symbole pour le pays.*

De la même façon que pour l'Antisana, les cours d'eau représentent un enjeu important pour les écosystèmes et pour les besoins des sociétés. Le réseau de drainage du Cotopaxi est formé de trois cours d'eau principaux qui se dirigent vers différentes vallées : le rio Pita au Nord, le Cutuchi au Sud et le rio Tamboyacu à l'Est.

Les espaces environnant le volcan constituent un milieu écologique riche et diversifié, ce qui a conduit à la création le Parc National du Cotopaxi, un des sites les plus fréquentés du pays.

Mais bien que ce volcan suscite l'admiration, il est l'un des plus dangereux du monde. Il fait partie, comme l'Antisana, des strato-volcans actifs. D'après les informations fournies par l'Institut Géophysique de l'EPN, chargé de l'étude et du suivi des volcans d'Équateur, le Cotopaxi aurait présenté dix-neuf périodes d'activité depuis l'arrivée des espagnols, la période de retour est estimée entre 150 et 200 ans et la dernière en date a eu lieu en 1877.

Depuis 1904, le Cotopaxi est entré dans une période dite « de calme » même s'il peut montrer des regains d'activités sismiques et volcaniques à certaines périodes. Depuis 2001 par exemple, le volcan connaît régulièrement des activités sismiques et, de temps en temps, des fumeroles s'échappent de son cratère. Les séismes, nuées de fumées ardentes, chutes de cendres, coulées de laves et lahars sont les événements redoutés et leur survenu peut toucher les populations des villes proches (Latacunga, Quito) et avoir des conséquences sur l'hydrologie et les ressources en eau (déstabilisation des cours d'eau, atteintes aux ouvrages hydrauliques, fonte subite de la glace...). Ces menaces impliquent le maintien d'un réseau de surveillance permanent du volcan et la mise en place de mesures de prévention.



**Figure 10 : Roches volcaniques du Cotopaxi**

*La présence de roches d'origine volcanique et les traces des coulées de lave dispersées aux alentours du volcan, témoignent de l'activité volcanique passée du Cotopaxi.*

Photo : M. Collet,  
Cotopaxi, mai 2010

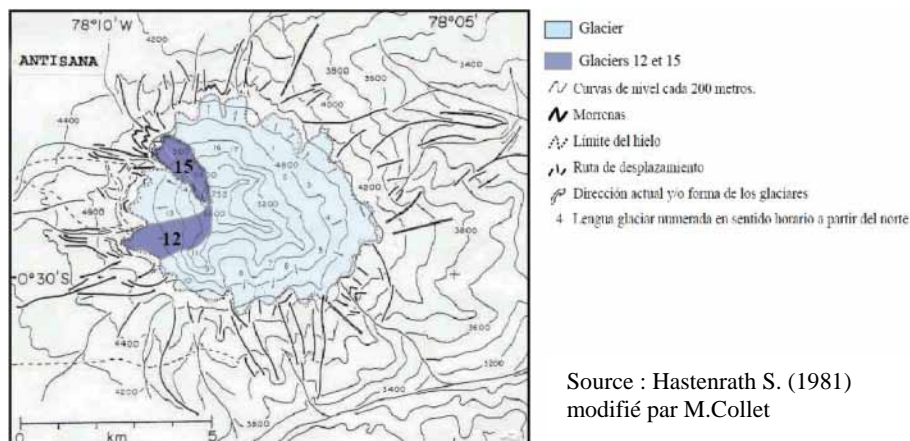
On comprend mieux pourquoi l'étude des glaciers de volcans comme ceux de l'Antisana et du Cotopaxi est essentielle tant du point de vue environnemental et socio-économique que du point de vue scientifique. Le but des recherches peut avoir divers objectifs (réduction de la vulnérabilité, préservation de l'environnement, planification des ressources en eau...) mais elles passent toutes par une meilleure connaissance du milieu naturel et une meilleure compréhension des liens entre les différents compartiments de la géosphère (atmosphère, biosphère, lithosphère, cryosphère et hydrosphère).

### 1.3 Les programmes de recherches effectués et en cours sur la zone d'étude

Contrairement aux glaciers situés aux latitudes moyennes, les glaciers tropicaux ne sont étudiés que depuis peu de temps : jusque dans les années 1990 seul le glacier Lewis du Mont Kenya (S.Hastenrath, 1977 ; S.Hastenrath et al., 1995) et quatre glaciers de la Cordillère Blanche au Nord du Pérou (G.Thompson et al., 1984 ; A.Ames et al., 1988) faisaient l'objet de suivis réguliers. Les études se sont développées dans les Andes sous l'impulsion de l'IRD et des organismes comme l'INAMHI (Instituto Ecuatoriano de Meteorología e hidrología) et l'EMAAP-Q (Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua potable de Quito). Les glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi font partis des sites étudiés.

#### 1.3.1 Les glaciers 12 et 15 de l'Antisana, un suivi régulier depuis 1994

Pour l'Antisana, deux glaciers sont plus particulièrement suivis, il s'agit, d'après le découpage d'Hastenrath S. (1981), des glaciers 12 (*Los Crespos*) et 15 (langues  $\alpha$  et  $\beta$ ), situés sur le versant Ouest de l'Antisana.



Source : Hastenrath S. (1981)  
modifié par M.Collet

**Figure 11:** Les glaciers 12 et 15 de l'Antisana



Afin d'étudier et d'analyser l'évolution de ces deux glaciers, plusieurs méthodes sont utilisées depuis 1994. Elles ont pour but de mesurer :

- Les bilans de masse : ils sont estimés à l'échelle mensuelle (depuis 1995 pour le glacier 15 et depuis 2004 pour le glacier 12) à partir de pluviomètres, de limnigraphes et de balises installées dans les zones d'ablation et d'accumulation. Des forages et des mesures à l'aide de radars pour calculer l'épaisseur de glace sont également réalisés.
- La géométrie des glaciers : des observations et mesures *in situ* permettent de déterminer la configuration géométrique, la longueur et la superficie des langues glaciaires. Mais on peut également avoir recours à la photogrammétrie et à la télédétection, qui permettent d'accéder à des informations plus reculées dans le temps. On a, jusqu'aujourd'hui, surtout utilisé la photogrammétrie.
- Des données météo-hydrologiques : diverses données sont recueillies à l'aide d'une série d'appareils de mesures disposés sur les glaciers ou sur le *páramo*, jusqu'à 10 kilomètres en aval des glaciers. Des stations hydrologiques (Los Crespos et Humbolt sur l'Antisana) et météorologiques ont également été installées.



**Figure 12: Station météorologique installée à 4 800 mètres sur le Cotopaxi**

*Plusieurs stations météorologiques sont installées sur l'Antisana et le Cotopaxi. Elles sont complétées par des instruments ponctuellement placés sur les sites d'études (zone glaciaire et páramo). Ce dispositif permet de recueillir des données météorologiques de manière permanente et en temps réel.*

Photo : M.Collet, Cotopaxi, mai 2010

Les résultats de ces observations et mesures ainsi que leur analyse font l'objet de rapports annuels établis par les chercheurs de l'IRD, de l'INAMHI et de l'EMAAP-Q.

Le tableau suivant est issu du rapport de l'année 2007 et fait apparaître les superficies glaciaires du glacier 15.

**Tableau 1: Évolution de la superficie du glacier 15 de l'Antisana entre 1956 et 2007**

| Año  | Area $\alpha$ | Area $\beta$ | Area Total | %     | % de Reducción 1956-2007 | % de Reducción 1993-2007 |
|------|---------------|--------------|------------|-------|--------------------------|--------------------------|
| 1956 | 465802        | 501835       | 967638     | 100,0 | 0,0                      | ---                      |
| 1965 | 439519        | 485076       | 924595     | 95,6  | 4,4                      | ---                      |
| 1993 | 375412        | 429262       | 804673     | 83,2  | 16,8                     | 0,0                      |
| 1996 | 351710        | 419926       | 771636     | 79,7  | 20,3                     | 4,1                      |
| 1997 | 340749        | 406431       | 747180     | 77,2  | 22,8                     | 7,1                      |
| 1998 | 333356        | 403950       | 737305     | 76,2  | 23,8                     | 8,4                      |
| 1999 | 342117        | 408331       | 750448     | 77,6  | 22,4                     | 6,7                      |
| 2000 | 365464        | 428634       | 794098     | 82,1  | 17,9                     | 1,3                      |
| 2001 | 346139        | 412772       | 758911     | 78,4  | 21,6                     | 5,7                      |
| 2002 | 322614        | 387266       | 709879     | 73,4  | 26,6                     | 11,8                     |
| 2003 | 308616        | 358023       | 666639     | 68,9  | 31,1                     | 17,2                     |
| 2004 | 300207        | 351494       | 651701     | 67,3  | 32,7                     | 19,0                     |
| 2005 | 282511        | 337490       | 620001     | 64,1  | 35,9                     | 22,9                     |
| 2006 | 276860        | 330740       | 607600     | 62,8  | 37,2                     | 24,5                     |
| 2007 | 271322        | 324125       | 595447     | 61,5  | 38,5                     | 26,0                     |

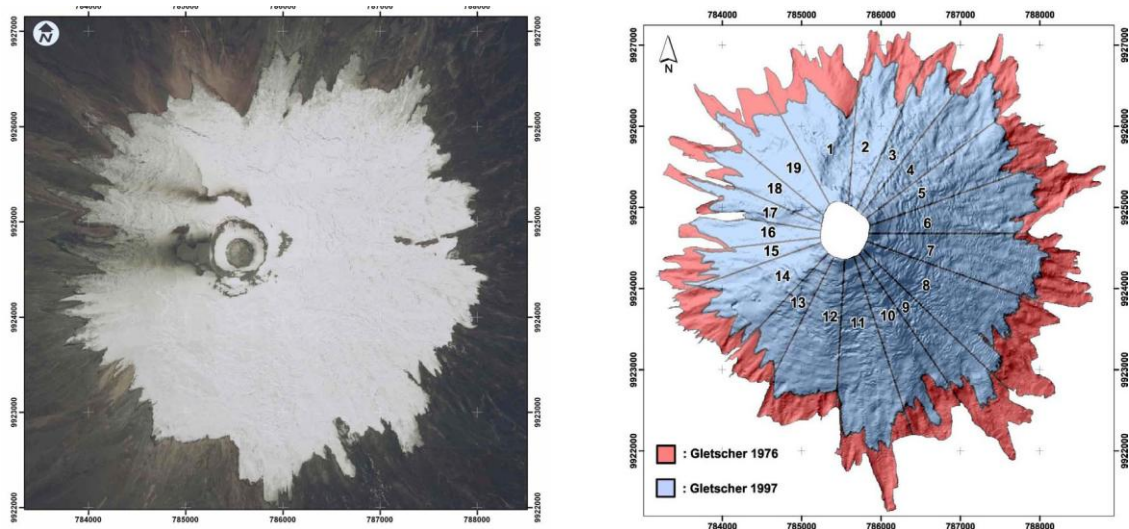
Source : IRD, INAMHI,EMAAP-Q, Avril 2009

*Les résultats sont obtenus à partir de la photogrammétrie pour 1956 et 1965 et de mesures effectuées sur le terrain pour les dates ultérieures (1993-2007). On peut constater une diminution assez marquée entre 1956 et 2007, puisque la superficie du glacier 15 est passée de 0,968 km<sup>2</sup> à 0,595 km<sup>2</sup> ce qui représente une diminution de 38,5% de la surface en un peu plus de cinquante ans. A la lecture de ces chiffres, on s'aperçoit également que le recul s'est accéléré : le glacier a perdu 16,8% de sa surface entre 1956-1993(période de 37ans) alors que durant les quinze dernières années (1993-2007) il a perdu 26% de sa surface.*

### 1.3.2 Étude des glaciers du Cotopaxi par photogrammétrie

L'étude de l'évolution des surfaces glaciaires du Cotopaxi est motivée par la nécessité de quantifier le volume de glace et le contenu en eau des glaciers afin de mieux connaître les risques qui se présenteraient en cas d'éruption du volcan. Outre des mesures sur le terrain, elle se base sur l'analyse et le traitement de photographies aériennes. Pour la zone, quatre photographies sont disponibles : 1956, 1963, 1976 et de 1997.

Une fois les images traitées et ortho-rectifiées, les contours des glaciers sont tracés numériquement et l'on peut suivre l'évolution de ce contour à différentes dates, calculer la superficie du glacier, relever les positions et estimer les longueurs des différentes langues glaciaires. Il a été montré qu'entre 1956 et 1976, le glacier a peu évolué. Par contre, le recul a été net entre 1976 et 1997 puisqu'on estime pour cette période une diminution d'environ 30% de la superficie glaciaire totale du Cotopaxi.



Source : Jordan E.,2003, Cáceres,B.,2005

**Figure 13: Etude des superficies glaciaires du Cotopaxi à partir de la photogrammétrie**

*Ces clichés présentent une bonne qualité d'image et permettent, après ortho-rectification, de délimiter (sauf en cas de dépôt de neige fraîche) les contours des glaciers. En comparant les résultats obtenus à différentes dates, on peut suivre l'évolution du glacier.*

La superficie totale du glacier du Cotopaxi est passée de 19,2 km<sup>2</sup> en 1976 à 11,8 km<sup>2</sup> en 2006 soit une diminution de près de 38,5% en 30 ans (B. Cáceres et al., 2008). Cette diminution et le rythme de celle-ci est similaire à celle observée pour l'Antisana ainsi que pour bien d'autres glaciers des Andes tropicales. Cette situation est préoccupante et doit être étudiée au regard des données climatiques et à travers l'étude de l'influence que peuvent avoir certains événements climatiques sur les glaciers.

Les études menées sur les glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi permettent donc d'avoir une idée de leur évolution au cours du temps. Mais on peut voir que pour l'Antisana seuls deux glaciers sont étudiés et pour le Cotopaxi, du fait de la rareté des missions de photographies aériennes, seule une photographie par décennie est disponible. Ainsi, l'utilisation d'images satellitales, prises beaucoup plus régulièrement et offrant la possibilité d'effectuer des traitements numériques s'avèrent être un bon moyen de compléter les données obtenues par d'autres méthodes.



## **PARTIE 2 : APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CALOTTES GLACIAIRES**

Depuis quelques décennies, l'essor des technologies d'observation de la Terre a permis de collecter une grande quantité d'informations sur la planète ce qui permet d'améliorer la connaissance de la Terre et la compréhension de certains phénomènes tels que la circulation atmosphérique ou océanique. L'engouement de plus en plus marqué envers ces technologies peut être motivé par divers objectifs (stratégique ou politique, météorologie, aménagement du territoire, gestion environnementale...) et s'appliquer à de nombreux domaines (climatologie, océanologie, hydrologie, agriculture, sciences de la société...). En outre, du fait de la disponibilité des informations, de leur objectivité et de la possibilité d'obtenir des informations à des échelles spatiales et temporelles variables, ces technologies jouent un rôle majeur quant à l'étude et au suivi de phénomènes environnementaux (pollution, feu de forêt, déforestation, désertification...).

Dans le vocabulaire scientifique, l'observation de la Terre depuis les airs ou depuis l'espace ainsi que le traitement, l'analyse et l'utilisation des informations qu'elle permet d'obtenir, est appelée « télédétection ». Depuis sa naissance, avec les premières photographies aériennes, la télédétection n'a cessé de se développer du fait des progrès considérables observés dans les domaines de l'aérospatiale, de l'informatique et de l'imagerie. Le recours de plus en plus fréquent et l'extension des champs d'application de la télédétection a également permis de perfectionner les techniques de traitement et d'analyse d'images satellites, ce qui en fait un outil de plus en plus opérationnel.

Après avoir rappeler les définitions, l'histoire et les principes de bases de la télédétection, on verra que son utilisation pour l'étude des glaciers et plus particulièrement pour leur suivi est intéressante et présente plusieurs avantages.

## 2.1 Définitions, historique et principes de bases de la télédétection

### 2.1.1 Définition et historique de la télédétection

- Eléments de définitions

La télédétection, dans son sens général, peut être définie comme : « *L'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.* » (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, France, 1988).

Si l'on se base sur cette définition, très vaste, l'œil humain peut être considéré comme un instrument de télédétection. Les objets observés peuvent également être des objets de l'espace. Alors, ici, lorsque nous parlerons de télédétection nous parlerons plus précisément de télédétection aérospatiale (ou spatiale si elle fait entrer en jeu des satellites artificiels). Celle-ci va reposer sur la mesure et l'analyse des variations du rayonnement électromagnétique<sup>7</sup> des objets ou des surfaces terrestres qui sont enregistrées au moyen de capteurs embarqués à bord de plates-formes aéroportées (ballons, avions) ou spatiales (satellites). C'est donc à partir des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par des objets ou des surfaces qu'un capteur peut acquérir de l'information sur ceux-ci : nature, état, forme, propriétés optiques et physico-chimiques...

La définition que propose le Centre Canadien de Télédétection (CCT) permet de clarifier ce dernier point : « *La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information* » (Centre Canadien de Télédétection, CCT)

---

<sup>7</sup> Le rayonnement électromagnétique est une forme de propagation de l'énergie dans l'espace sous la forme d'une onde.

- De la photographie aérienne aux images satellitales : bref historique de la télédétection

La télédétection a vu le jour avec les premières photographies aériennes prises à bord de cerfs-volants, de fusées ou de ballons vers la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle. Son usage relevait alors plutôt de l'événementiel et de la curiosité. Ce n'est qu'avec la Première Guerre Mondiale que la photographie aérienne sera considérée comme une source d'information utile notamment à des fins stratégique et militaire. Les progrès réalisés dans les domaines de l'optique (photographie couleur, infrarouge, perfectionnement des appareils optiques) et de l'aviation (mise au point et développement de l'aéroplane et de l'avion) accompagnent son développement.

Quelques décennies plus tard, l'utilisation de la photographie aérienne s'étend à d'autres domaines et elle devient une des sources principales d'informations pour la cartographie des territoires, le contrôle et le suivi des ressources naturelles (prospection pétrolière, gestion des ressources en eau, suivi de la végétation...). Les principes de photo-interprétation et de photogrammétrie sont également plus précisément établis.

Une nouvelle ère pour la télédétection s'ouvre avec la conquête de l'espace et l'apparition des images satellitales. En 1957, les soviétiques lancent le premier satellite artificiel (Spoutnik) et en 1959, les premières images de la Terre vue de l'espace sont révélées par le satellite américain Explorer VI. Très vite, les premiers satellites destinés à des observations météorologiques et climatiques sont mis en orbite (série TIROS, METEOSAT). Plusieurs États prennent conscience du potentiel que peuvent offrir ces satellites et de nombreux programmes nationaux et internationaux (LANDSAT, SPOT, RADARSAT, METEOSAT...) sont mis en place. En juillet 1972, la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), lance un satellite spécialement conçu pour l'observation des surfaces terrestres, avec le programme ERTS (rebaptisé plus tard LANDSAT I). Le lancement du satellite SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) en 1986, dans le cadre d'un programme français en collaboration avec la Suisse et la Belgique, joue lui aussi un rôle moteur dans le développement de la télédétection et des programmes d'observation de la Terre.

Depuis le lancement de ces premiers satellites d'observation de la Terre, les progrès des capteurs ont été considérables, avec au-delà du perfectionnement du matériel lui-même, une

amélioration des résolutions spatiales<sup>8</sup>, spectrales<sup>9</sup> et temporelles<sup>10</sup>. Parallèlement à ces développements qui ont permis d'accroître la précision et la quantité des données fournies par les satellites, ce sont les avancées dans les domaines de l'informatique et des connaissances propres à la télédétection (analyse, traitement et interprétation des données notamment) qui lui ont permis de se développer.

### **2.1.2 Principes de base de la télédétection**

On peut rappeler que tout corps dont la température est supérieure au Zéro absolu (-273,15°C) émet de multiples rayonnements, dans des longueurs d'ondes différentes dont les caractéristiques vont dépendre des propriétés physiques et chimiques du corps et de sa localisation dans l'espace. À partir de là, on peut concevoir qu'en captant et en enregistrant le rayonnement électromagnétique d'un objet, on peut acquérir de l'information sur celui-ci : c'est le principe de base de la télédétection. Cette information peut porter sur la position des objets, leurs dimensions et leurs formes mais aussi sur leurs propriétés optiques (absorption, réflexion, transmission) et physico-chimiques (température, teneur en eau, en chlorophylle...).

#### **- Le processus de télédétection**

Pour que le processus de télédétection se réalise, il faut qu'il y ait une interaction entre trois éléments : une cible, une source d'énergie et un capteur. La cible correspond à l'objet ou à la portion de la surface terrestre que l'on souhaite étudier. Lorsque celle-ci reçoit l'énergie, elle peut, en fonction de la longueur d'onde, de la nature ou/et les conditions de sa surface, l'absorber, la transmettre ou la réfléchir. La source d'énergie est l'élément qui « éclaire » la cible en émettant une onde électromagnétique. Il peut s'agir d'une énergie naturelle comme le Soleil (télédétection passive) ou d'une énergie artificielle (télédétection active). Le capteur, enfin, va mesurer l'énergie réfléchie ou émise par la cible. Ce signal va ensuite être retransmis vers une station de réception qui traduit ce signal en une image numérique.

---

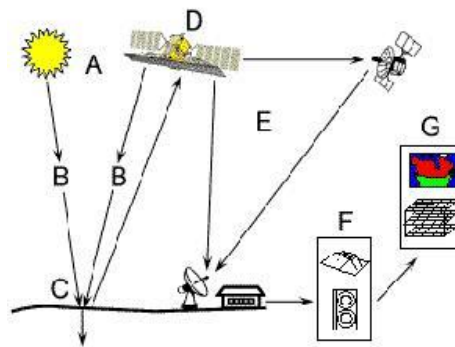
<sup>8</sup> La résolution spatiale fait référence au niveau de détail qu'il est possible d'atteindre pour une image. On peut dire qu'elle correspond à la taille d'un pixel. Elle est passée de quelques kilomètres (premières images prises de l'espace) à 80 mètres (Landsat MSS 1972) puis a atteint 30 mètres (Landsat TM), 20 et 10 mètres (Spot 5).

<sup>9</sup> La résolution spectrale correspond à l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de longueurs d'ondes différentes. On parle de haute résolution spectrale lorsque que le capteur est sensible à des différences spectrales fines (intervalles de longueurs d'ondes étroits).

<sup>10</sup> La résolution temporelle correspond au temps entre deux passages du même satellite au dessus du même point.



Le schéma suivant, extrait du site Internet du Centre Canadien de la Télédétection (CCT) permet d'illustrer les différentes étapes de ce processus.



Source : Centre canadien de télédétection (CCT)

**Figure 14 : Le processus de télédétection**

*A-Source d'énergie qui illumine la cible*

*B- Les interactions entre le rayonnement et l'atmosphère*

*C-Interaction de l'énergie avec la cible (phénomène d'absorption, de diffusion et de transmission)*

*D-L'énergie émise par la cible est captée puis enregistrée par le capteur*

*E-L'énergie enregistrée est transmise à une station de réception et transformée en image numérique*

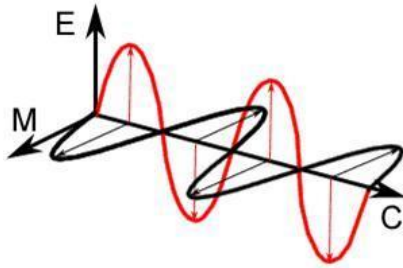
*F,G- L'image peut être analysée, traitée et interprétée et l'information de cette image peut être utilisée*

Au cours de certaines étapes, le rayonnement électromagnétique traverse une partie de l'atmosphère, or celle-ci est composée de gaz (dioxyde de carbone, ozone...) d'aérosols et de vapeur d'eau qui peuvent affecter le rayonnement électromagnétique et donc modifier le signal, élément qu'il est nécessaire de prendre en compte lors de l'identification et de la caractérisation de l'objet.

#### - Ondes et rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique (REM) peut naître de différentes sources : du soleil (domaine du visible, du proche et du moyen infrarouge), d'une source artificielle ou encore du sol (domaine de l'infrarouge thermique et des micro-ondes). Le rayonnement électromagnétique renvoie en fait à la propagation de l'énergie dans l'espace qui prend la forme d'une onde caractérisée par deux champs étroitement liés : champ magnétique et champ électrique. D'après la théorie des ondes, les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière, la propagation de l'onde est rectiligne et sa direction est perpendiculaire au plan des deux champs.

**Figure 15: Schéma d'une onde électromagnétique**



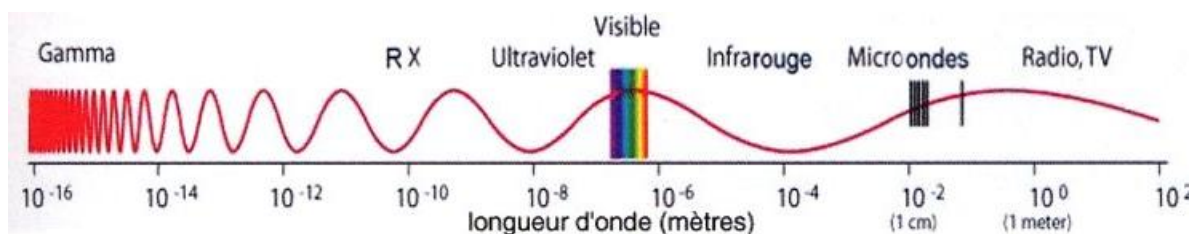
*Une onde est caractérisée par deux champs étroitement liés : le champ électrique (E) et le champ magnétique (M). (C) étant la vitesse de la lumière.*

Source : Centre canadien de télédétection (CCT)

Le rayonnement électromagnétique se propage sous forme d'ondes à des fréquences (nombre d'oscillations effectué par unité de temps) et des longueurs d'onde (distance entre deux points homologues de l'onde) très variées qui dépendent principalement du milieu et des propriétés physico-chimiques des objets et en particulier de leur température. On peut donc avoir des rayonnements électromagnétiques qui transportent beaucoup d'énergie et d'autres moins. L'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique est détectée par les capteurs utilisés en télédétection. Enfin, vu la gamme très étendue de fréquences et de longueurs d'onde, on a l'habitude de décomposer le rayonnement électromagnétique, c'est ce que l'on appelle le spectre électromagnétique.

- Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est un classement du rayonnement électromagnétique en fonction des fréquences et des longueurs d'ondes. Les ondes électromagnétiques sont hiérarchisées des plus courtes longueurs d'ondes (rayons gamma, rayons X) aux plus grandes longueurs d'ondes (micro-ondes, ondes radio). Du fait de la transparence de l'atmosphère, seules certaines parties du spectre électromagnétique sont exploitables en télédétection : les hyperfréquences (micro-ondes), l'infrarouge, le visible (seule partie du spectre détectable par l'œil humain) et l'ultraviolet.

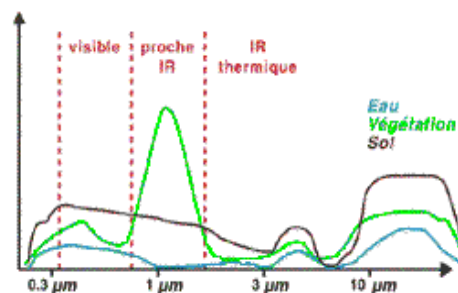


**Figure 16: Le spectre électromagnétique**

Source : Site Internet de l'ESA (European Space Agency)

- Les signatures spectrales

Chaque type d'objet ou de surface a des caractéristiques spécifiques en termes de rayonnement électromagnétique et se comporte donc de manière différente selon les longueurs d'ondes. Les rayonnements réfléchis par les objets en fonction de la longueur d'onde sont appelés signatures spectrales. L'analyse de ces signatures spectrales permet d'identifier les objets et de déterminer certaines de leurs propriétés. Les données se présentent sous une forme numérique ce qui est intéressant puisque cela permet des traitements des données (combinaisons des données issues de différentes bandes spectrales, extraction de certains objets ou surfaces du fait des caractéristiques de leurs rayonnements...). En cela, les images satellitales se différencient grandement des photographies aériennes.



Source : EOedu (Site internet éducatif pour la découverte de l'observation de la Terre par satellite)

**Figure 17:** Signatures spectrales de l'eau, de la végétation et du sol

- De la mesure du rayonnement électromagnétique à l'obtention d'images satellites

Les capteurs enregistrent le rayonnement électromagnétique des cibles à un moment donné dans une ou plusieurs bandes spectrales et codent cette information sous forme de valeur numérique (précision en général de 256 niveaux) . Cette valeur est associée à des coordonnées géographiques (X;Y) correspondant à la position de chaque point de l'espace étudié et on obtient ainsi une matrice composée de pixels qui va former l'image satellite.

L'acquisition continue et régulière des données et la nature des données fait de la télédétection satellitaire un outil particulièrement adapté au suivi dans le temps et dans l'espace de milieux ou de phénomènes particuliers. Le potentiel de la télédétection est aujourd'hui reconnu et les champs de son application s'étendent. L'application de la télédétection pour l'étude des glaciers de montagnes représente un intérêt non négligeable pour ces milieux particulièrement difficiles d'accès et pour lesquelles l'information manque souvent.

## **2.2 La télédétection : un outil pertinent pour l'étude des glaciers de montagnes**

Bien qu'ils soient considérés comme des indicateurs clés pour étudier les évolutions du climat, peu de glaciers dans le monde font l'objet de suivis réguliers et, sauf exception, nous disposons de peu d'informations quant à leur état, leur évolution et leur fonctionnement. Cela est dû principalement à des raisons logistiques notamment du fait de la spécificité des milieux de montagnes. L'entrée en scène de la télédétection fait évoluer les choses et permet de compléter les observations effectués sur le terrain et de contribuer à une meilleure connaissance et compréhension des glaciers.

### **2.2.1 Avantages de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des glaciers de montagnes**

Si l'application de la télédétection à l'étude des glaciers est relativement récente (1975-1976) et il s'agit d'un outil assez bien adapté pour l'étude des glaciers.

Tout d'abord, la télédétection permet de s'affranchir des conditions parfois extrêmes imposées par le milieu montagnard qui rendent difficile la collecte d'information. L'altitude, les conditions climatiques propres à l'environnement de montagne et les risques que peuvent représenter des missions sur le terrain (crevasses, tempêtes, avalanches...) ainsi que les coûts rendent délicates et limitent les expéditions sur le terrain.

L'observation satellitale permet également d'acquérir de l'information sur des massifs de vastes étendues puisque les capteurs peuvent couvrir des surfaces importantes (scène de 60 km de côté pour SPOT et de 185 km pour LANDSAT) et sur des glaciers jusqu'alors peu étudiés, souvent écartés des études du fait de la difficulté que représente leur accès (éloignement, altitude). Les satellites à haute résolution spatiale permettent, de plus, d'avoir accès à des informations relativement précises. Les résolutions spatiales des capteurs SPOT 5 sont de 5 mètres en mode panchromatique<sup>11</sup> et de 10 mètres en mode multi-spectral<sup>12</sup>, pour le capteur ETM de Landsat 7, elles sont respectivement de 15 mètres et de 30 mètres.

---

<sup>11</sup> En mode panchromatique, le capteur mesure la réflectance dans une seule bande spectrale. Cela permet d'obtenir des images de très haute résolution. Il sert principalement à obtenir des informations fines quant à la géométrie des objets ou des surfaces (forme, dimension, superficie)

<sup>12</sup> En mode multispectral, le capteur mesure la réflectance des objets ou surfaces dans plusieurs bandes spectrales. Ce mode est utilisé pour obtenir des informations de type qualitatif grâce à l'étude des signatures spectrales des objets ou surfaces, ce qui permet leur discrimination.

De manière plus générale, le recours à la télédétection présente des avantages du fait de la régularité des enregistrements et de l'accès à jusque parfois plus de trente ans d'archive, ce qui est particulièrement intéressant lorsque l'on s'intéresse aux évolutions de certains milieux ou/et à l'impact de certains phénomènes sur ceux-ci.

Enfin, cette source d'information est peu coûteuse et facilement accessible puisqu'une grande partie des images satellites sont disponibles librement et gratuitement sur Internet.

Malgré tout, cette méthode connaît des limites du fait des contraintes imposées par le milieu notamment celles relatives au relief. La topographie et l'altitude peuvent en effet engendrer des déformations géométriques et des biais par rapport aux valeurs des pixels causés par les effets d'ombre portée. Il existe également des contraintes liées à la nébulosité pour laquelle seules les technologies radar (télédétection active) peuvent s'affranchir, et cette limite est d'autant plus importante que les surfaces au sol au niveau des glaciers évoluent très rapidement en fonction des paramètres climatiques (chute de neige fraîche, fonte). Certaines de ces limites peuvent être atténuées grâce des corrections radiométriques et géométriques qui utilisent des méthodes statistiques ou grâce à l'étude en parallèle de documents cartographiques (cartes topographique, modèle numérique de terrain).

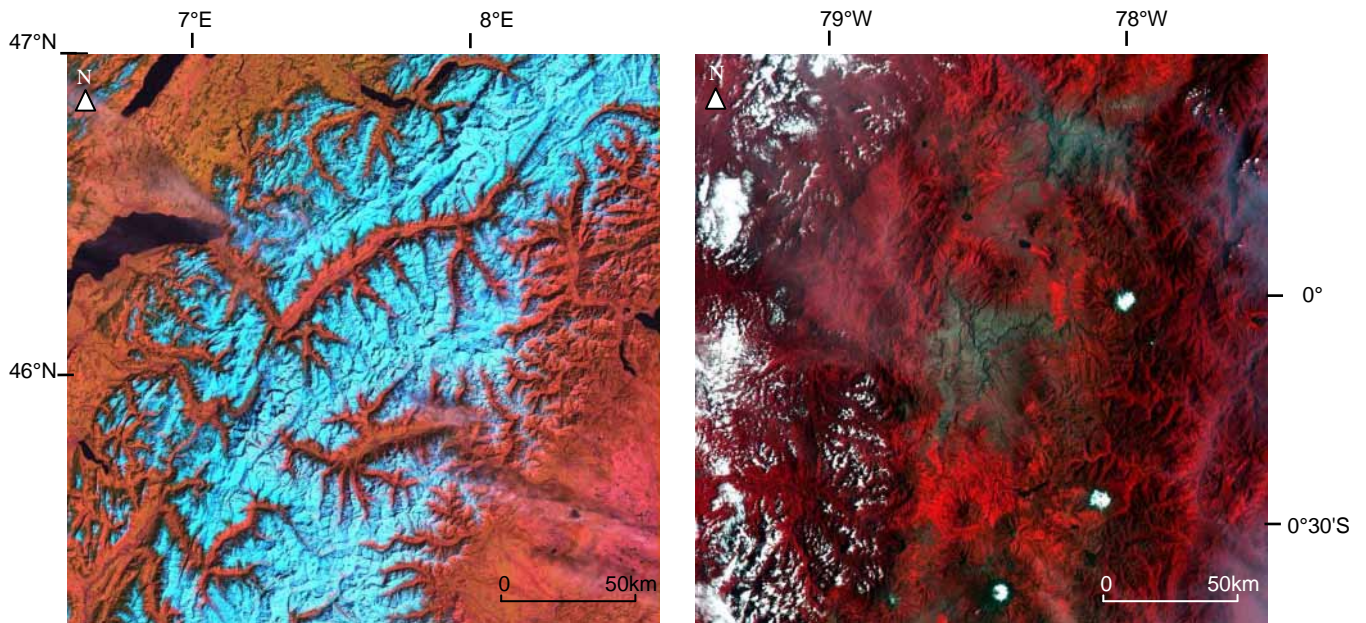
La télédétection représente finalement un grand intérêt pour l'étude des glaciers de montagne et est un outil adapté et complémentaire des données relevées sur le terrain pour caractériser et analyser le suivi de l'évolution des glaciers

### **2.2.2 Exemples d'applications de la télédétection à l'étude des glaciers de montagnes**

Pour suivre l'évolution d'un glacier, on étudie principalement les fluctuations de la position de son front et ses variations de surface, de volume et de vitesse d'écoulement. Pour cela, on peut effectuer des mesures et des observations sur le terrain (mesures directes, radars, relevés par GPS) mais on peut aussi utiliser des cartes topographiques et géologiques, des photographies aériennes et des images satellitaires.

A partir d'images satellitaires, il est relativement aisé de mesurer les variations de longueur et de surface d'un glacier. Pour cela on délimite les contours des glaciers à partir de méthodes manuelles ou automatiques. La méthode automatique, réalisable à partir des logiciels de traitements d'images satellitaires, se base sur l'analyse des signatures spectrales des surfaces au

sol à travers des algorithmes. La neige et la glace, de par leurs caractéristiques spectrales (forte réflexion dans le visible et le proche infrarouge, plus faible dans le moyen infrarouge) se distinguent bien des autres surfaces au sol (roche, végétation) mais plus difficilement des nuages comme l'illustre la figure suivante.



Identifiant: LE71950282000081EDC00  
21/03/2000, Landsat 7 Capteur ETM+  
Massif des Alpes, France, Italie, Suisse

Identifiant : LM20100601979035AAA03  
04/02/1979, Landsat 2, Capteur MSS  
Cordillère des Andes, Équateur

(Source USGS-Glovis)

### **Figure 18 : Images satellitales et glaciers**

*Sur ces deux images satellitales, combinant les bandes spectrales 2,4 et 5, les glaciers apparaissent de couler cyan-blanc, la végétation en rouge, l'eau en noir. La confusion glace-neige/nuage est courante, d'où l'importance de retenir des images avec une faible nébulosité.*

On peut alors en comparant des images satellitales d'une même zone et après les avoir corrigées géométriquement étudier les variations portant sur la position du front d'un glacier, de sa longueur et/ou de sa superficie. Mais si ces indications donnent une idée de l'évolution des glaciers, elle dépend largement de la dynamique propre du glacier et de sa morphologie, c'est pourquoi on préfère souvent s'intéresser aux variations de volumes, c'est-à-dire au bilan de masse. Sur le terrain, on estime le bilan de masse à partir des quantités de neige ou/et de glace que le glacier a gagné ou perdu en un an. Le calcul de ce bilan à partir de la télédétection s'effectue à travers l'étude de la topographie et de la ligne d'équilibre du glacier. Cette ligne qui délimite la zone d'accumulation de la zone d'ablation, peut être repérée sur les images

satellitaires. L'étude des variations de sa position en altitude est généralement utilisée pour l'estimation du bilan de masse.

L'application de la télédétection présente donc un potentiel intéressant quant à l'étude des glaciers de montagne. Plusieurs études ont été appliquées à des glaciers situés dans les Alpes (Dedieu J-P. et Reynauld L., 1991; Rabatel A., et al 2002), l'Himalaya (Berthier E. et al, 2007) ou les Andes tropicales (Racoviteanu A., et al, 2008; Poveda G. et Pineda K., 2009). On peut plus largement se référer aux travaux réalisés dans le cadre du programme international GLIMS (*Global Land Ice Measurement from Space*) ou encore ceux réalisés au sein du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE) du CNRS<sup>13</sup>, laboratoire associé à de l'Université de Grenoble 1.

Pour l'étude des glaciers dans les Andes tropicales, le recours à la télédétection est tout de même encore assez peu utilisé. Dans le cadre de ce travail, l'étude des variations des superficies glaciaires à travers le traitement d'image Landsat a été privilégiée pour retracer l'évolution spatio-temporelle des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi.

---

<sup>13</sup> Centre National de la Recherche Scientifique





## **PARTIE 3 : DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE**

Afin de retracer l'évolution spatio-temporelle des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi, ce sont les données issues des capteurs des satellites Landsat qui ont été utilisées. Les images satellitales acquises par ce capteur proposent une bonne résolution spatiale et les premières images datent de 1977. Les données utilisées et la méthodologie appliquée pour la réalisation de cette étude vont être décrites ici.

### **3.1 Présentation des données et des outils**

#### **3.1.1 Les images satellitales issues du capteur Landsat**

Depuis le lancement en 1972 du premier satellite destiné à l'observation de la Terre, le programme Landsat s'est beaucoup développé en améliorant notamment les différentes résolutions spatiale, spectrale et temporelle des capteurs et l'offre d'images satellitales est intéressante tant par la quantité d'images disponibles et que par l'accessibilité de celles-ci.

Sur le serveur internet Glovis<sup>14</sup> de l'*United States Geological Survey*<sup>15</sup> (USGS) une grande quantité d'images satellitales provenant de différents programmes (Landsat, Spot, Aster..) et capteurs (Landsat MSS, TM, ETM+...) est mise à disposition.

Les scènes correspondent à la portion de territoire qu'enregistre le capteur lors du passage du satellite sur cette zone. L'Équateur est couvert par treize scènes Landsat de 185 km<sup>2</sup> de côté dont celle qui nous intéresse est la scène comprise entre les 0°56'18"S et 0°41'30"N et les longitudes 79°14'22"W et 77°32'33"E correspondant à la scène 10-60.

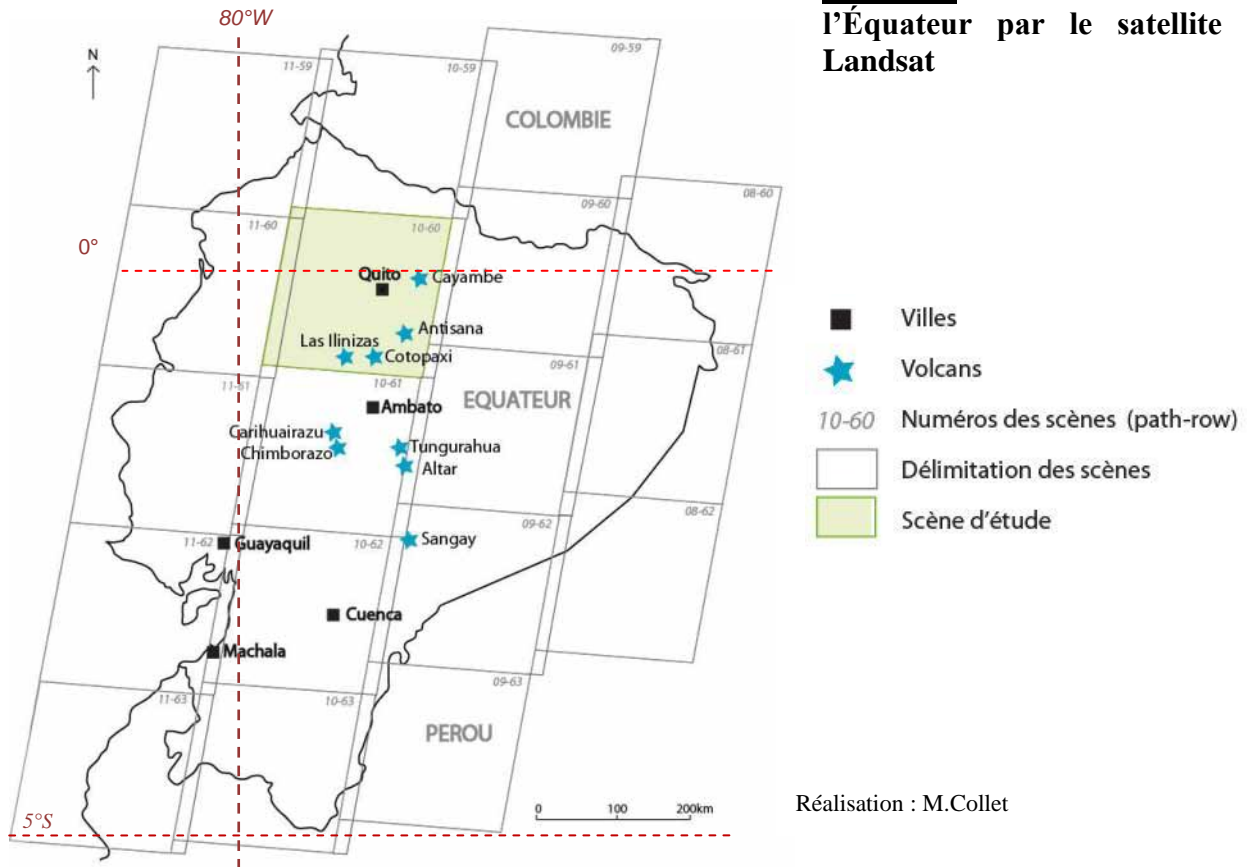
Les deux figures suivantes montrent le découpage en scène Landsat du pays ainsi que le détail de la scène que l'on a retenu pour cette étude (relief et population).

---

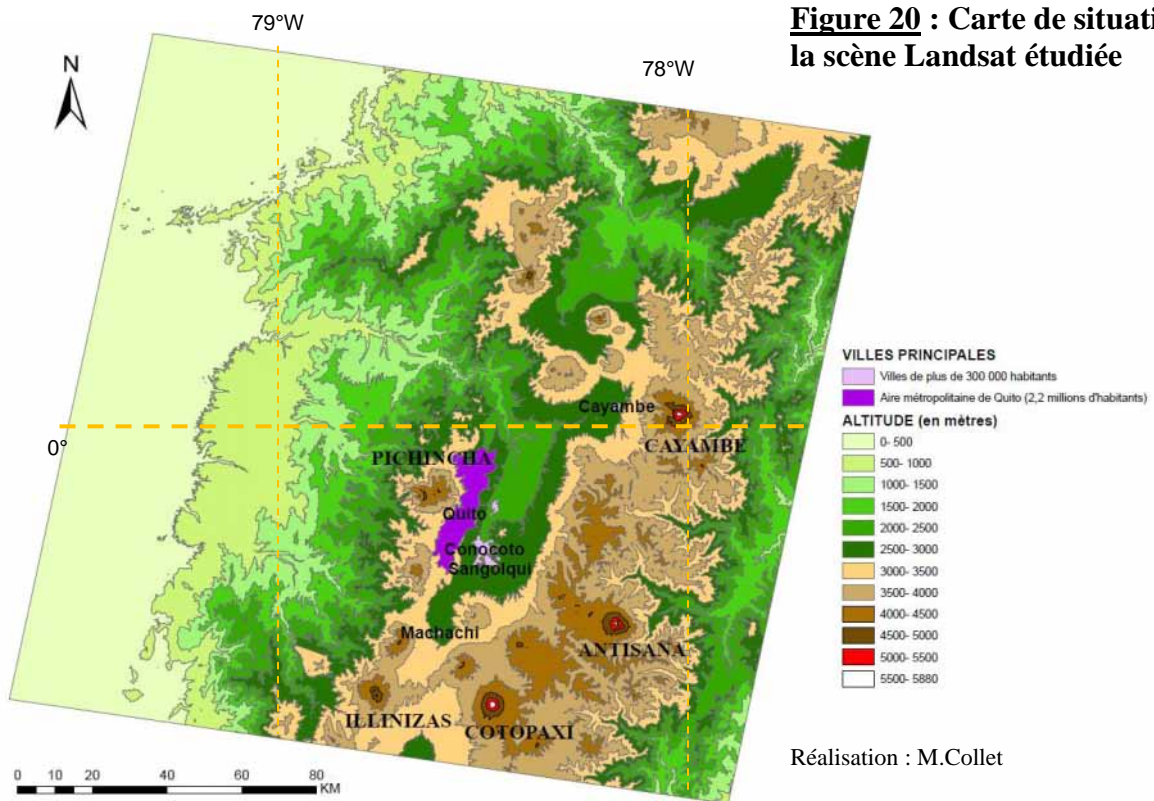
<sup>14</sup> *The Global Visualization Viewer* (<http://glovis.usgs.gov>)

<sup>15</sup> Agence américaine rattachée au Département de l'Intérieur des États-Unis.

**Figure 19: La couverture de l'Équateur par le satellite Landsat**



**Figure 20 : Carte de situation de la scène Landsat étudiée**



La première prise de vue de la scène a été enregistrée en août 1977 et entre cette date et le mois d'avril 2010 on compte 322 images. Pour certaines années il peut y avoir jusqu'à 30 images alors que pour d'autres années, il n'y en a aucune (cf. Annexe 2). Mais toutes les images ne sont cependant pas exploitables. La sélection des images exploitables et finalement retenues est basée sur l'observation et l'évaluation des paramètres suivants :

*1- Les résolutions spatiale et spectrale des images* : les images satellitaires ne présentent pas les mêmes niveaux de précision et d'information puisqu'elles proviennent de capteurs dont les niveaux technologiques varient. Cet élément est à prendre en compte en particulier lorsque pour une même période il existe des images provenant de capteurs différents.

*2- La qualité de l'image liée à l'état des capteurs* : des défauts peuvent apparaître du fait de défaillances liées au capteur. Cela se traduit par la présence de rayures qui masquent une partie plus ou moins importante de l'information.

*3- La couverture nuageuse sur la zone d'intérêt* : pour les capteurs passifs qui ne peuvent s'affranchir des conditions atmosphériques, la nébulosité représente une grande contrainte. Et, du fait de sa position géographique (zone intertropicale) et de la disposition du relief (Cordillère des Andes d'axe nord-sud, hautes altitudes), notre zone d'étude et en particulier les deux volcans sont souvent couverts de nuages ce qui rend de nombreuses scènes inexploitables.

*4-La date d'acquisition de l'image* : du fait des conditions climatiques (précipitations et vents notamment) la période septembre-mars apparaît la plus adaptée pour étudier les glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi, on s'est donc limité à cette période pour le choix des images.

Une fois ces critères appliqués, un grand nombre d'images sont écartées et seuls une vingtaine d'images peuvent être considérées comme exploitables. Le tableau suivant dresse la liste de ces images ainsi que leurs principales caractéristiques : nom, capteur, satellite, taux d'ennuage et remarques complémentaires suite à l'analyse visuelle des images. Les 13 images finalement retenues apparaissent en grisé (cf. aussi annexe 3).

**Tableau 2 : Liste des images Landsat exploitables pour l'étude**

**Landsat 1-3 MSS**

| Identifiant               | Date      | Couverture nuageuse* | Remarques   |
|---------------------------|-----------|----------------------|---|
| LM20100601979035<br>AAA03 | 2/02/1979 | CC totale: 20%       | Pas de nuages sur les 2 volcans que nous étudions. L'image nécessite des corrections géométriques.<br>Enfin, compte tenu de la résolution spatiale (80m au lieu de 30m pour les images suivantes), cette image est moins précise que les suivantes. |

**Landsat 4 -5 TM**

| Identifiant               | Date       | Couverture nuageuse*                 | Remarques   |
|---------------------------|------------|--------------------------------------|---|
| LT501006019860<br>82XXX15 | 23/03/1986 | CC totale : 50%, CC S-E :<br>40 %    | Présence de nombreux nuages sur l'Antisana excepté pour la partie ouest. Alentours du Cotopaxi nuageux mais zone englacée dégagée.  |
| LT501006019870<br>21XXX03 | 21/01/1987 | CC totale : 50%, CC S-E :<br>40 %    | Cotopaxi très couvert, Antisana dégagé excepté de légers nuages au nord.  |
| LT501006019870<br>37XXX02 | 06/02/1987 | CC totale : 60%, CC S-E:<br>50 %     | Cotopaxi couvert. Antisana dégagé mais présence importante de neige au nord ouest.  |
| LT501006019870<br>85XXX05 | 26/03/1987 | CC totale : 20%, CC S-E:<br>10 %     | Bonne visibilité pour le Cotopaxi. Très couvert sur l'Antisana.   |
| LT401006019873<br>17XXX03 | 13/11/1987 | CC totale : 60%, CC S-E:<br>40 %     | Certaines zones de l'Antisana et du Cotopaxi sont touchées par des nuages de petites tailles, notamment les extrémités des glaciers |
| LT501006019910<br>32XXX02 | 02/01/1991 | CC totale : 50%, CC S-E:<br>10 %     | Nuages à l'ouest du Cotopaxi et présence d'un voile. Très bonne visibilité pour l'Antisana.   |
| LT501006019912<br>88XXX02 | 15/10/1991 | CC totale : 40%, CC S-E: 0<br>%      | Absence de nuages et très bonne visibilité pour les deux volcans.   |
| LT501006019913<br>52XXX03 | 18/12/1991 | CC totale : 60%, CC S-E:<br>40 %     | Absence de nuages sur le Cotopaxi mais présence de neige et de grésil notamment au sud. Antisana très couvert.                      |
| LT501006019962<br>54XXX01 | 10/09/1996 | CC totale : 40%, CC S-E:<br>20 %     | Nuages très présents sur les parties orientales des deux volcans.   |
| LT501006019962<br>86XXX01 | 12/10/1996 | CC totale : 40%, CC S-E st<br>: 30 % | Absence de nuages mais présence d'un voile, notamment sur la partie Sud Est.  |
| LT501006019983<br>55XXX01 | 21/12/1998 | CC totale : 30%, CC S-E: 0<br>%      | Neige et grésil à l'ouest du Cotopaxi, nuage à l'est. Bonne visibilité pour l'Antisana.   |

## Landsat 7 ETM

| Identifiant               | Date       | Couverture nuageuse*                   | Remarques  |
|---------------------------|------------|--|--|
| LE7010060199930<br>2EDC00 | 29/10/1999 | CC totale : 54%, CC S-E:<br>41 %       | Bonne visibilité pour le Cotopaxi.<br>Nuages importants sur l'Antisana.  |
| LE7010060199931<br>8EDC00 | 14/11/1999 | CC totale : 40%, CC S-E: 7<br>%        | Bonne visibilité pour les deux<br>volcans.   |
| LE7010060200100<br>3EDC00 | 03/01/2001 | CC totale : 44%, CC S-E:<br>10 %       | Nombreux nuages de petite taille au<br>niveau du Cotopaxi. Antisana<br>dégagé.   |
| LE7010060200125<br>9EDC00 | 16/09/2001 | CC totale : 41%, CC S-E: 6<br>%        | Nombreux nuages de petite taille au<br>niveau des deux volcans   |
| LE7010060200127<br>5EDC00 | 02/10/2001 | CC totale : 47%, CC Sud-<br>est : 27 % | Partie orientale des deux volcans<br>couverte de nuages  |
| LE7010060200130<br>7EDC00 | 03/11/2001 | CC totale : 36%, CC S-E: 3<br>%        | Très bonne visibilité pour les deux<br>volcans   |
| LE7010060200402<br>8ASN01 | 28/01/2004 | CC totale : 29%, CC S-E: 3<br>%        | Absence de nuages sur les deux<br>volcans. Effets visibles d'une reprise<br>d'activité volcanique pour le<br>Cotopaxi.<br>Présence de rayures sur l'image. |
| LE7010060200436<br>4ASN00 | 29/12/2004 | CC totale : 40%, CC S-E:<br>11 %       | Absence de nuages sur le Cotopaxi.<br>Nuages au Sud Est de l'Antisana.<br>Présence de rayures sur l'image  |
| LE7010060200600<br>1EDC00 | 01/01/2006 | CC totale : 64%, CC S-E:<br>40 %       | Partie occidentale du Cotopaxi très<br>couverte. Antisana dégagé excepté<br>un nuage au sud. Présence de rayures<br>sur l'image                            |
| LE7010060200703<br>6EDC00 | 05/02/2007 | CC totale : 40%, CC S-E t :<br>7 %     | Assez bonne visibilité pour les deux<br>volcans. Présence de rayures sur<br>l'image  |
| LE7010060200924<br>9ASN00 | 06/09/2009 | CC totale : 41%, CC S-E:<br>11 %       | Assez bonne visibilité pour les deux<br>volcans. Présence de rayures sur<br>l'image  |
| LE7010060201001<br>2EDC00 | 12/01/2010 | CC totale : 70%, CC S-E:<br>94 %       | Trainées de nuages présentes.<br>Présence de rayures sur l'image   |

\*CC S-E correspond au quart Sud-Est de la scène Landsat.

*Les taux de couverture nuageuse pour la scène entière et pour la partie Sud Est sont données à titre informatif, ils ne sont pas forcément des critères de sélection pertinents puisqu'il est possible d'obtenir un taux de couverture nuageuse très faible mais un ennuagement important au niveau des deux glaciers étudiés, empêchant l'utilisation de cette image, et inversement. Ainsi, nous avons préféré effectuer une analyse visuelle des images plutôt que d'appliquer un filtre déterminant une limite (maximale ou minimale) de taux de couverture nuageuse acceptable, comme il est possible de le faire.*

### 3.1.2 Autres types de données utilisées et/ou consultées

Au-delà des images satellitaires, des documents (autres que des textes) ont pu être utilisés et/ou consultés pour les besoins de l'étude. Les informations tirées de ces documents, lorsqu'ils sont directement intégrés à nos documents graphiques ou cartographiques, sont mentionnées au bas des figures.

- *Cartes topographiques* permettent d'étudier le contexte géographique (relief, toponymie, réseau hydrographique, courbes de niveaux...).
- *Photographies aériennes* fournissent une information précise du fait de leur résolution spatiale élevée. Pour la zone étudiée, il existe des photographies aériennes pour les années 1956, 1976, 1997 et 2003. Les études réalisées par photogrammétrie (E. Jordan, B. Caceres) nous ont permis d'intégrer des données antérieures à 1979, date de la première image satellite que nous avons traitée.
- *Le Modèle Numérique de Terrain*<sup>16</sup> de la zone d'étude a été utile pour la délimitation des bassins versants et pour l'étude de la morphologie des langues glaciaires.
- *Le Système d'Information Géographique (SIG)* fournit un certain nombre d'informations qui ont pu servir pour la réalisation de cartes générales.

### 3.1.3 Les outils utilisés

Les prétraitements et traitements des images satellites ont été réalisés à partir des logiciels de traitements d'images de télédétection IDRISI ANDES et ENVI. La numérisation et la création de cartes ont été réalisées avec les logiciels libres Gv SIG.

Pour le passage entre les différents logiciels, lorsqu'il s'agit de données géo-référencées, il est parfois nécessaire d'effectuer des transformations au niveau des projections. De plus, compte tenu de la position géographique de la zone d'étude, celle-ci est considérée selon les cas dans l'hémisphère sud ou dans l'hémisphère nord.

Le système de projection retenu est le suivant: **WGS 84: UTM Zone 17 SUD**

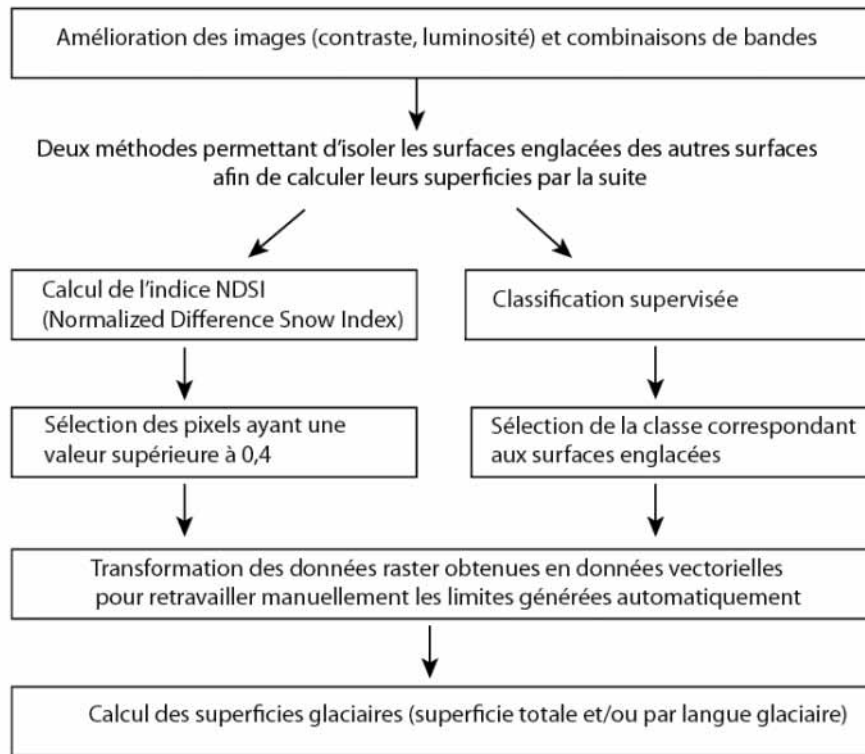
Nous disposons donc au total de documents d'origines variées et surtout de 13 images satellitaires auxquelles nous allons appliquer une méthodologie précise, reprenant des procédés de traitement et d'analyse propre à la télédétection (combinaisons de bandes spectrales, classifications, calculs d'indice...) afin de retracer l'évolution dans le temps et dans l'espace, des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi.

---

<sup>16</sup> Représentation, sous forme numérique, du relief d'une région donnée.

## 3.2 Méthodologie

Une fois les prétraitements appliqués, une méthodologie a été mise au point dans le but d'isoler les surfaces englacées des autres surfaces et de calculer leurs superficies. Le schéma suivant synthétise cette méthodologie, chaque étape étant détaillée par la suite.



**Figure 21:** Schéma de la méthodologie appliquée pour l'étude des superficies glaciaires

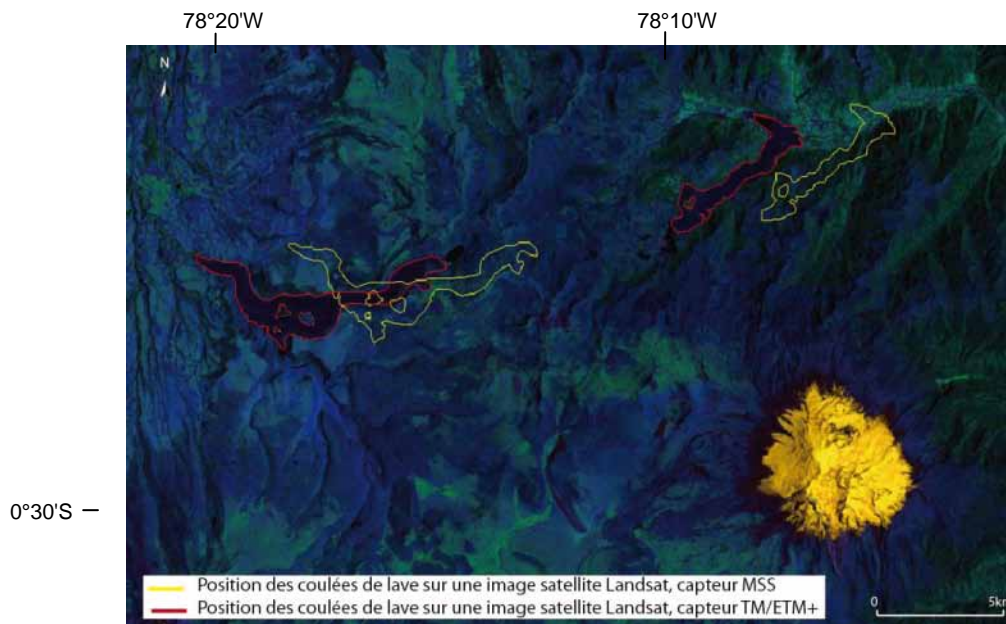
### 3.2.1 Prétraitements des images

Les images acquises par les satellites peuvent présenter des distorsions géométriques et radiométriques du fait de la stabilité de la plate forme, du capteur, de la rotation de la Terre ou encore de l'atmosphère. Ces facteurs contribuent à l'altération du signal électromagnétique enregistré par les capteurs puisqu'ils peuvent modifier les valeurs numériques associées aux pixels, leurs distributions et leurs positions sur l'image. Une partie de ces distorsions peut être corrigée à l'aide de procédés utilisant le plus souvent des modèles et des algorithmes. Certains de ces problèmes sont directement corrigés au niveau des centres qui reçoivent les images, tandis que d'autres doivent être corrigés ultérieurement par les utilisateurs qui procèdent alors à des corrections géométriques et radiométriques qui constituent la phase de prétraitement de l'image.

- les corrections géométriques

Les distorsions géométriques constituent un problème inhérent à la télédétection, d'une part parce qu'il s'agit de représenter des données en trois dimensions sur une image en deux dimensions et d'autre part parce que les images sont prises par des capteurs éloignés de la surface terrestre. Ce deuxième élément nécessite la prise en compte des facteurs tels que la rotation de la terre, la courbure de la terre, le relief, ainsi que des facteurs liés aux capteurs : vitesse de déplacement, altitude, mouvement et stabilité de la plate forme... Dans la plupart des cas, il est possible de réduire ces distorsions géométriques en appliquant des modèles mathématiques permettant d'effectuer des transformations afin de corriger la position des pixels.

Les images satellitales de 1987 à 2010, fournies par le serveur Glovis-USGS, sont corrigées à l'aide d'un MNT et de points de contrôles. Elles présentent une précision et un niveau de correction suffisant pour ce travail. L'image de 1979 présente un niveau de correction géométrique inférieur mais toutefois assez satisfaisant<sup>17</sup>. En effet, en comparant les images satellites de 1979 avec les suivantes, on s'aperçoit qu'il existe un décalage systématique en X;Y mais les formes et les dimensions des objets sont conservés.



**Figure 22 : Décalages géométriques entre les images Landsat de capteurs différents**

Cette figure fait apparaître les positions de deux coulées de lave sur des images provenant de différents capteurs (1979: capteur MSS et 1991: capteur TM). Ces objets ont été choisis comme référence car ils restent stables sur le long terme, contrairement aux lacs, rivières ou encore la végétation. On compte un écart d'environ 3 700 mètres en moyenne mais les dimensions des objets sont conservés.

<sup>17</sup> Level 1G, systematic geocorrection.



On considère alors qu'il n'est pas nécessaire de corriger davantage l'image de 1979 dans le cadre de notre étude sur les glaciers.

- *les corrections radiométriques*

Les corrections radiométriques consistent à corriger les effets liés à l'atmosphère et ceux liés à des problèmes au niveau des capteurs.

Les effets liés à l'atmosphère concernent les capteurs passifs c'est-à-dire dont la source d'énergie est la radiation solaire. En traversant l'atmosphère, les signaux enregistrés par les satellites peuvent subir des altérations du fait de la présence de particules. Afin de corriger ces altérations, des modèles de corrections atmosphériques ont été mis au point (Rahman H. et Dedieu G., 1994). Ils prennent en compte des paramètres physiques de l'atmosphère (composition de l'atmosphère, température, humidité, pression...) et des paramètres optiques des capteurs (indice de réfraction, réflectance..). Ces informations relatives sont difficiles à obtenir d'où notre choix de ne pas effectuer ce type de corrections. Aussi, du fait de la haute altitude (donc de la moindre épaisseur de l'atmosphère) et de la faiblesse de la pollution anthropique, nous avons considéré qu'elles n'étaient pas nécessaires pour notre étude.

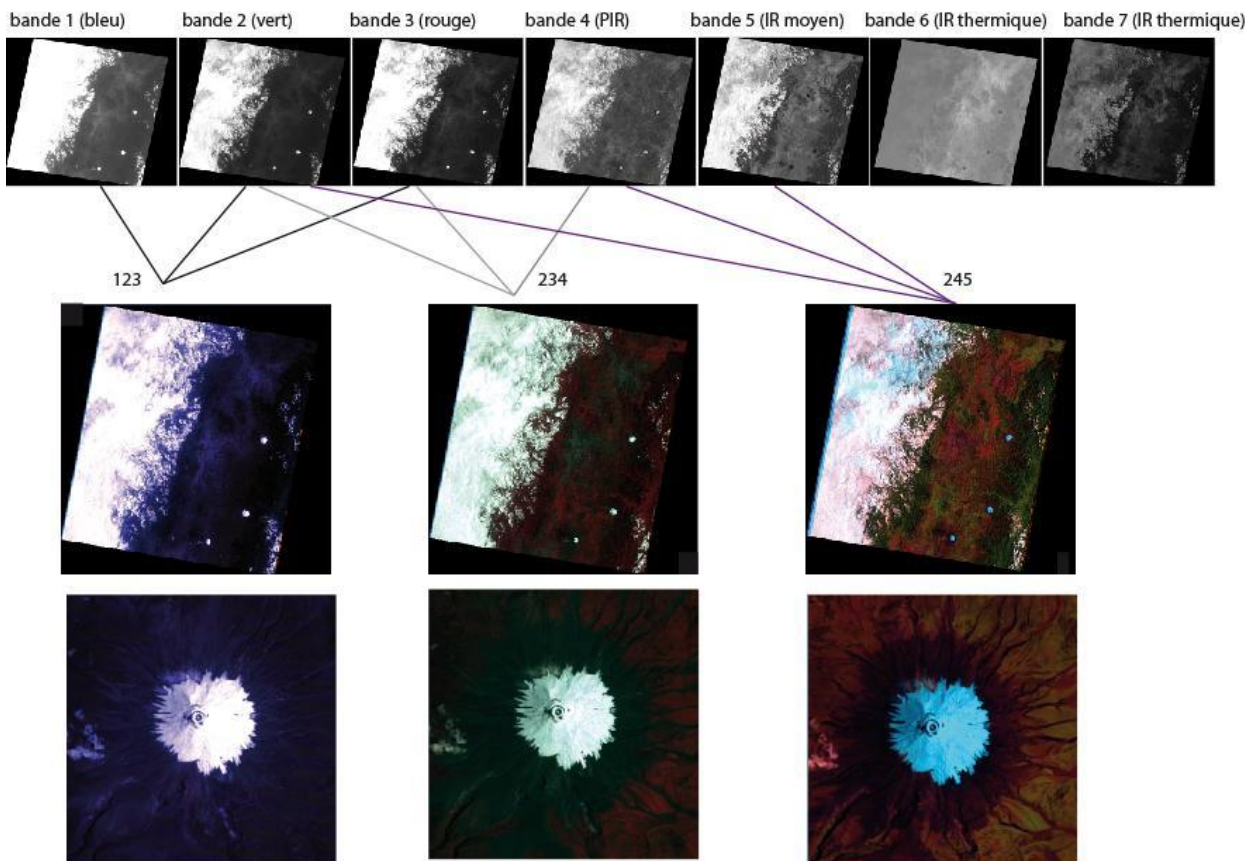
Les effets liés aux dysfonctionnements des capteurs peuvent quant à eux engendrer des erreurs quant à la valeur des pixels sur une ou plusieurs bandes spectrales, voir ne fournir aucune information, c'est le phénomène de "*stripping*" qui se traduit par la présence de bandes sur l'image. La correction de ces effets est complexe puisqu'on ne peut pas remplacer l'information manquante, mais seulement en faire une estimation en extrapolant les données connues. Ce phénomène marque plusieurs images de notre série. Des procédés ont été utilisés pour estimer l'information manquante (cf. 3.3.1).

### **3.2.2 Amélioration des images et combinaisons de bandes spectrales**

Une fois les images corrigées, il existe différents moyens d'«améliorer» l'image, cela permet de faciliter les analyses visuelles des images et d'affiner les traitements numériques.

Cette opération se base sur la modification des contrastes, de la luminosité ou de la netteté des images à l'aide de fonctions spécifiques. L'amélioration des contrastes a permis de rendre plus visible les différences de tons entre les pixels associés aux glaciers et les autres pixels. Les autres fonctions ont été testées mais induisent le plus souvent une perte d'information au niveau des glaciers.

Un autre moyen de faciliter l'interprétation des images consiste à créer des combinaisons de bandes (trois bandes au maximum) et à associer à chacune d'entre elle une couleur fondamentale (bleu, vert ou rouge). Cette méthode que l'on nomme plus communément «composition colorée» permet l'affichage simultané de trois images enregistrées dans différentes bandes du spectre. Le choix des bandes spectrales à utiliser va dépendre des bandes spectrales disponibles et de l'étude elle-même puisque certaines combinaisons peuvent être plus adaptées à des utilisations plutôt qu'à d'autres.



Réalisation : M.Collet

**Figure 23: Exemple de combinaisons colorées**  
*(extraits de l'image Landsat du 15/10/1991, capteur TM)*

*123 : La composition « vraies couleurs » qui associe les bandes du visible aux trois couleurs fondamentales.*

*234 : La composition « infrarouge fausses couleurs » qui fait intervenir les bandes du vert, du rouge et de l'infrarouge. Cette composition est très utilisée pour étudier la végétation.*

*245 : La composition "245" associe les bandes du vert, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.*

La composition colorée 245 a servi de base pour le travail. Il s'agit d'une des compositions les plus adaptées pour l'étude des glaciers (Paul F., 2004). Une fois les améliorations d'image et la combinaison de bandes effectuées, nous pouvons passer à l'étape de traitement de l'image et mettre en application des techniques nous permettant de différencier et d'isoler les surfaces glaciaires des autres surfaces.

### 3.2.3 Classification et calculs d'indices permettant de discriminer les surfaces englacées des autres surfaces

Le but étant d'estimer les superficies des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi à partir des images satellitales, on va dans un premier temps identifier et délimiter ces zones. Pour cela, il existe plusieurs méthodes. Certaines s'appuient sur une analyse visuelle et des délimitations manuelles à partir de compositions colorées, d'autres se basent sur des méthodes de classification ou de calculs entre les bandes spectrales (ratios de bandes et indices). L'utilisation de l'une ou de l'autre méthode dépend des caractéristiques des capteurs (résolution spatiale et spectrale du capteur), de l'image (qualité de l'image, effet d'ombre...) et enfin, du niveau de précision que l'on souhaite atteindre.

#### - *Les délimitations manuelles*

Les premières études de télédétection appliquées aux glaciers dates de 1975. A cette époque, Ostrem G. (1975) et Rott H. (1976) ont proposé des méthodes de délimitations manuelles des glaciers à partir de compositions colorées. Cette méthode, bien que laborieuse, est encore utilisée et parvient à des résultats intéressants (Hall A. et al., 1992, Williams J. et al., 1991).

#### - *Les méthodes de classification*

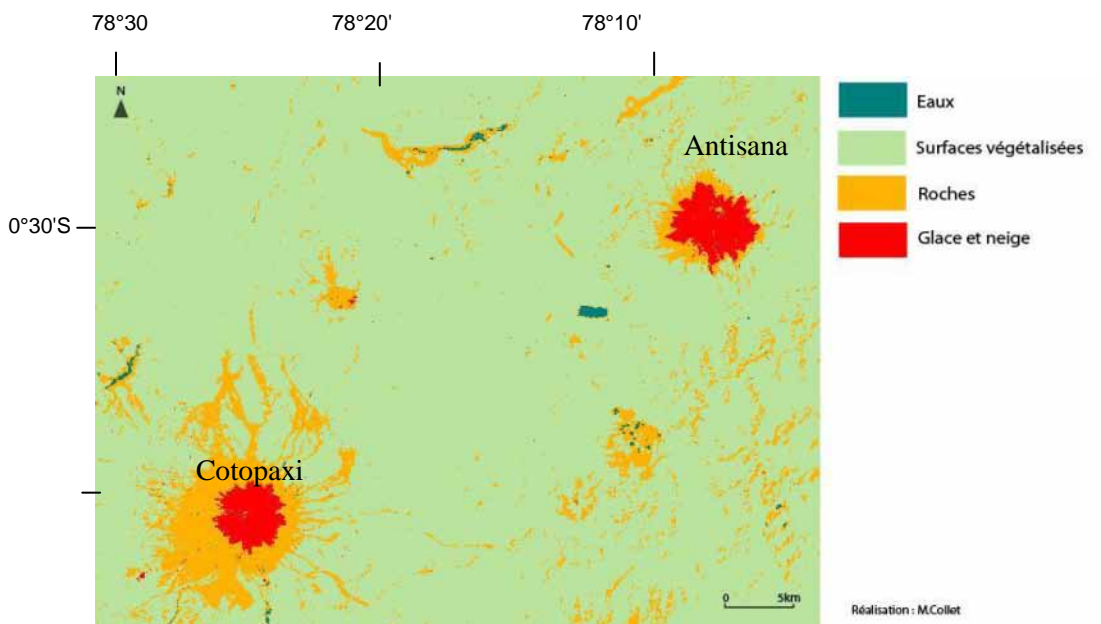
Les classifications sont utiles pour la réalisation de cartes thématiques ou pour l'étude de types de surfaces en particulier, puisqu'elles permettent d'identifier sur une image, les éléments ayant des caractéristiques spectrales similaires et de les regrouper en différentes catégories, leur nombre et leur choix dépendant des objectifs et du niveau de précision souhaité. Il existe deux types de classification, la classification non supervisée pour laquelle les pixels d'une image sont classés en fonction de leur caractéristique spectrale de manière automatique et la classification supervisée pour laquelle l'utilisateur détermine lui-même les classes à partir d'échantillons représentatifs. Dans les deux cas, les classifications se basent sur des méthodes statistiques (seuillages, classification par distance minimale, classification par maximum de ressemblance...). Pour plus d'informations on peut se référer aux ouvrages généraux sur la télédétection (Bonn F. et Rochon G., 1992; Girard C.M., 1989; Robin M., 1995).

Pour l'image du 2 février 1979, c'est la méthode de classification supervisée par maximum de vraisemblance (*maximum likelyhood*)<sup>18</sup> qui a été retenue en définissant quatre catégories

---

<sup>18</sup> Il apparaît en effet que cette méthode de classification est une des plus adaptées pour isoler les surfaces englacées (Gratton et al., 1990; Sidjak et Wheate, 1999).

représentant les principaux types de surfaces de la zone d'étude. À partir de cette classification il est possible de ne garder que la classe neige/glace puis de calculer les superficies voulues.



**Figure 24 : Classification supervisée de l'image Landsat du 2/02/1979, capteur MSS**  
 Cette classification permet de délimiter les types de surfaces au sol. Du fait des objectifs de cette classification, le nombre de classes est limité. Elle permet cependant de bien délimiter les contours des glaciers.

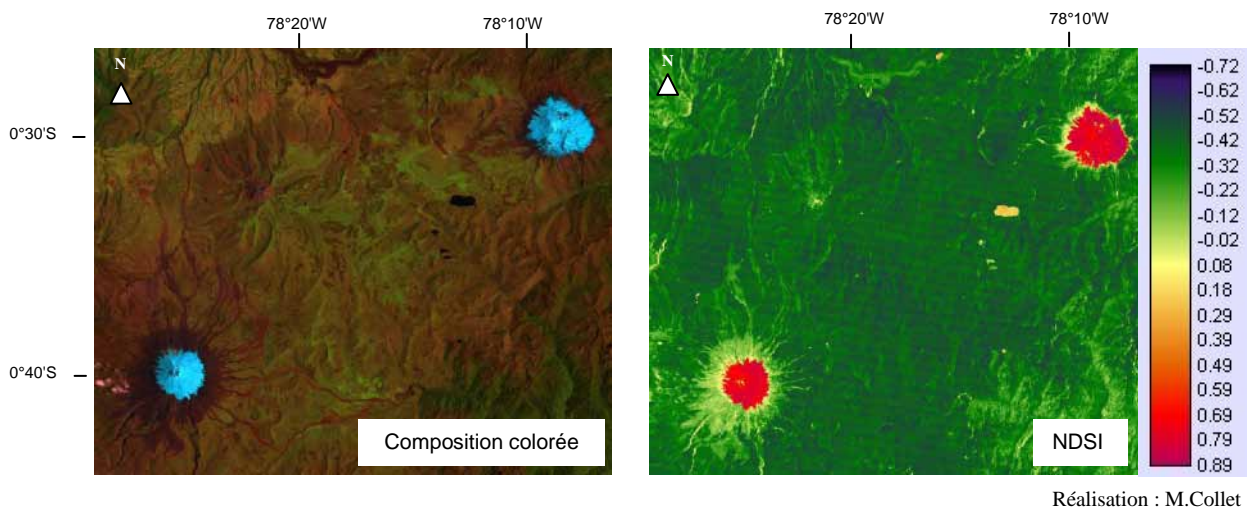
- *Les ratios de bandes et les indices*

La nature des données de télédétection permet d'effectuer des opérations entre les données des différentes bandes spectrales. Ces opérations, que l'on appelle généralement ratios de bandes ou rapports de bandes, sont très variées. Les types d'opérations ainsi que les bandes spectrales utilisées dépendent principalement des caractéristiques spectrales des objets que l'on souhaite étudier. Pour l'étude de la neige et de la glace, surfaces qui présentent une importante réflectance dans le visible et une forte absorption dans l'infrarouge proche et moyen, on utilise des bandes du visible (B2 ou B3) et de l'infrarouge proche ou moyen (B4, B5). Pour l'étude des glaciers on utilise principalement les rapports suivant: B3/B5 (Rott H., 1994) et B4/B5 (Hall A. et al., 1987).

Un indice a également été mis au point par Dozier J. (1989) et Hall A. et al. (1995), le «*Normalized Difference Snow Index*» (NDSI). Cet indice ressemble dans ses principes de calcul à celui, plus connu, du «*Normalized Difference Vegetation Index*» (NDVI) utilisé pour l'étude de la végétation. Le NDSI fait intervenir dans son calcul les bandes spectrales du vert(B2) et du moyen infrarouge (B5) de la façon suivante :

$$\text{NDSI} = \frac{\text{bande 2} - \text{bande 5}}{\text{bande 5} + \text{bande 2}}$$

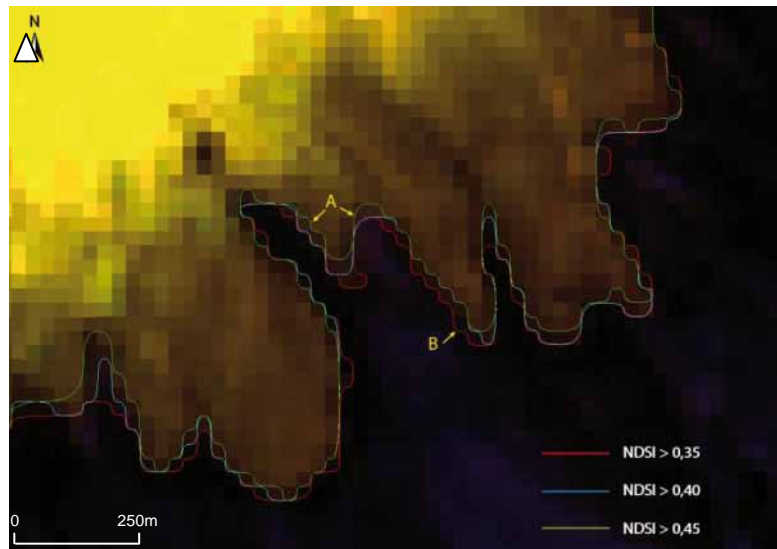
Une fois ce calcul réalisé, une nouvelle image est générée. On détermine un seuil permettant de définir à partir de quelle valeur de pixel on peut considérer qu'il s'agit de surface enneigée ou englacée. En général, les pixels enregistrant une valeur supérieure à 0,4 peuvent être considérés comme de la neige ou de la glace. À noter que ce seuil peut varier selon les situations et que le NDSI doit être utilisé avec précaution (effet d'ombre, erreurs possibles...). Le NDSI reste cependant une des méthodes les plus appropriées et efficaces pour l'étude de la neige ou de la glace. C'est cette méthode qui a été utilisée pour les images Landsat de 1987 à 2010.



**Figure 25: Composition colorée et NDSI**  
(extraits de l'image Landsat du 15/10/1991, capteur TM)

Sur la nouvelle image on distingue bien les glaciers qui apparaissent de couleur rouge, il s'agit maintenant de déterminer la valeur du seuil qui permet de prendre en compte le mieux possible ces surfaces. Pour cela, différents seuils compris entre 0,35 et 0,50 ont été testés. Il y a, comme le montre la figure ci-après, des différences relativement importantes entre ceux-ci. Mais on s'aperçoit finalement que le seuil 0,40 est celui qui prend le mieux en compte les surfaces englacées, notamment celles situées en partie basse, aux extrémités des langues glaciaires.

Cette information étant essentielle pour l'étude nous retiendrons le seuil  $NDSI > 0,40$  comme étant le seuil permettant de discriminer les surfaces englacées des surfaces non englacées.



Réalisation : M.Collet

**Figure 26 : Génération du NDSI et définition de seuils  
(extrait de l'image Landsat du 15/10/1991, capteur TM)**

*Tracés des limites de l'indice NDSI aux seuils de 0,35 ; 0,40 et 0,45 superposés à l'image Landsat du 15 /10/1991, capteur TM, zoom sur le Sud-Est du Cotopaxi pour apprécier la qualité de ces seuils. La limite  $NDSI > 0,45$  met de coté certains pixels qui pourtant font partie des surfaces englacées (cas A), et au contraire, la limite  $NDSI > 0,35$  prend en compte des pixels correspondant à d'autres surfaces, des roches par exemple (cas B).*

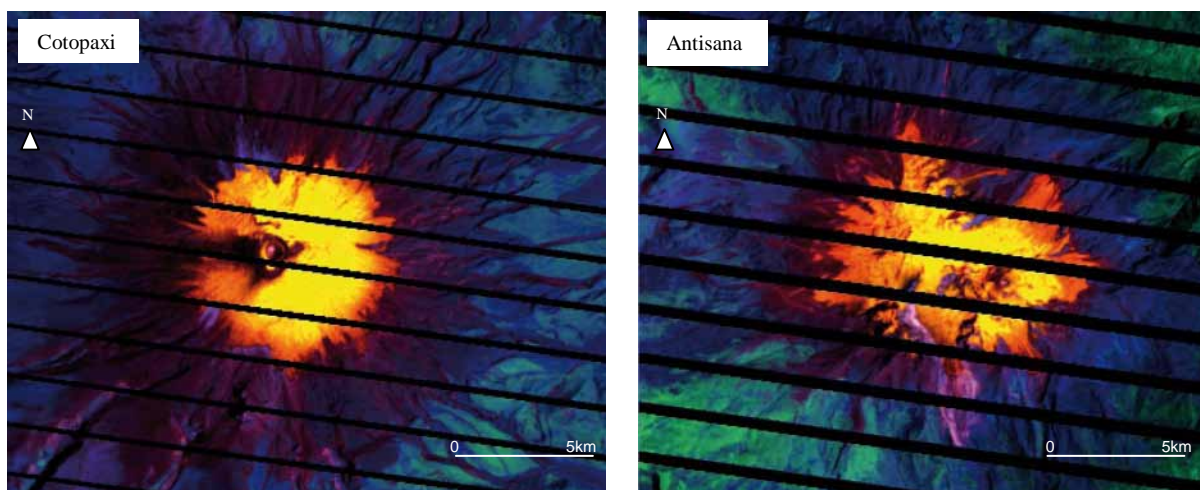
Une fois ces tests et observations faits, nous pouvons extraire les surfaces couvertes par les pixels ayant une valeur supérieure à 0,4. Mais cette méthode est loin d'être parfaite et il est nécessaire de corriger les limites créées de manière automatique. Pour cela, après avoir transformé les données (de type raster) en données vectorielles, on a utilisé un logiciel de SIG pour la numérisation, l'ajustement des contours et les calculs des superficies. La correction des limites issues du NDSI constitue une étape assez longue mais indispensable, elle permet de limiter les erreurs et de prendre en compte au mieux la totalité des surfaces glaciaires.

Deux méthodes (classification supervisée pour l'image de 1979, calcul du NDSI pour les autres images) ont donc été appliquées à nos images satellites dans le but d'isoler les surfaces englacées de l'Antisana et du Cotopaxi, de tracer leur contour et de calculer leur superficie. Certaines limites de la méthode sont cependant à prendre en compte lors de l'application de la méthodologie et lors de l'analyse des résultats. Elles peuvent être d'ordre technique et directement liées aux capteurs mais elles peuvent aussi être imposées par des facteurs naturels, comme les conditions climatiques ou l'activité volcanique, qui peuvent altérer une partie de l'information. On propose néanmoins des moyens d'atténuer ces limites, quitte à écarter certaines zones de l'étude.

## 3.2 Les difficultés rencontrées

### 3.3.1 Données manquantes du fait de la défaillance du capteur

Les images du satellite Landsat 7 enregistrées depuis le mois de mai 2003 sont affectées par des bandes d'informations manquantes du fait de la défaillance du capteur ETM+. Cette défaillance apparue le 31 mai 2003 concerne plus précisément un défaut affectant le système d'acquisition SLC (Scan Line Corrector) qui correspond au système de correction de lignes de balayage. Les scientifiques des laboratoires de l'USGS, de la NASA et de la *Landsat 7 Science Team* estiment que sur une scène 20% n'est pas affecté par ce manque d'information (zone centrale) et que cette défaillance induit une perte d'information de 22% pour chaque scène. Des méthodes complexes ont été mises au point pour pallier cette perte d'information en utilisant les principes d'interpolation<sup>19</sup>. Ces rayures peuvent être problématiques pour le tracé des contours des glaciers puisque les deux calottes glaciaires sont touchées par 4 à 5 bandes, d'une largeur de 151 mètres pour le Cotopaxi et de 272 mètres pour l'Antisana.



**Figure 27** : Un manque d'information due à une défaillance du capteur du satellite Landsat 7

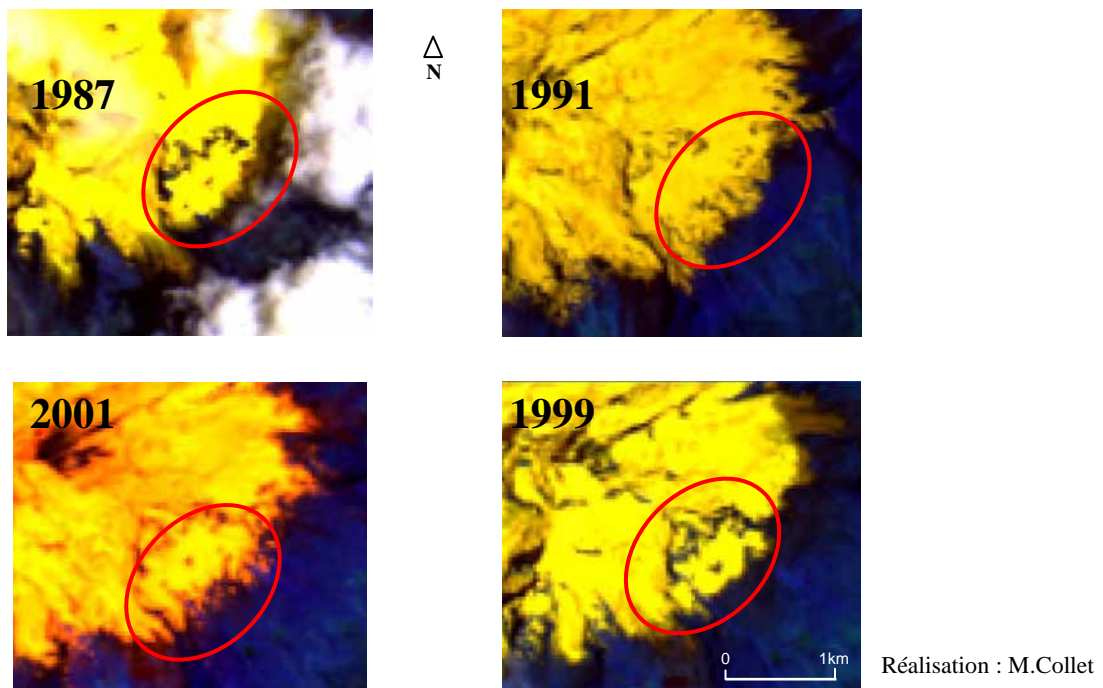
*(Extrait de l'image Landsat du 28/01/2004, capteur ETM+)*

Le tracé du contour des glaciers pour ces images a donc été estimé à partir d'une analyse visuelle (cf. Annexe 4).

<sup>19</sup> Voir "*Preliminary assessment of the value of Landsat 7 ETM+ data following Scan Line Corrector Malfunction*" USGS, NASA, Landsat 7 Science Team, 16 juillet 2003.

### 3.3.2 Une différenciation neige/glace délicate

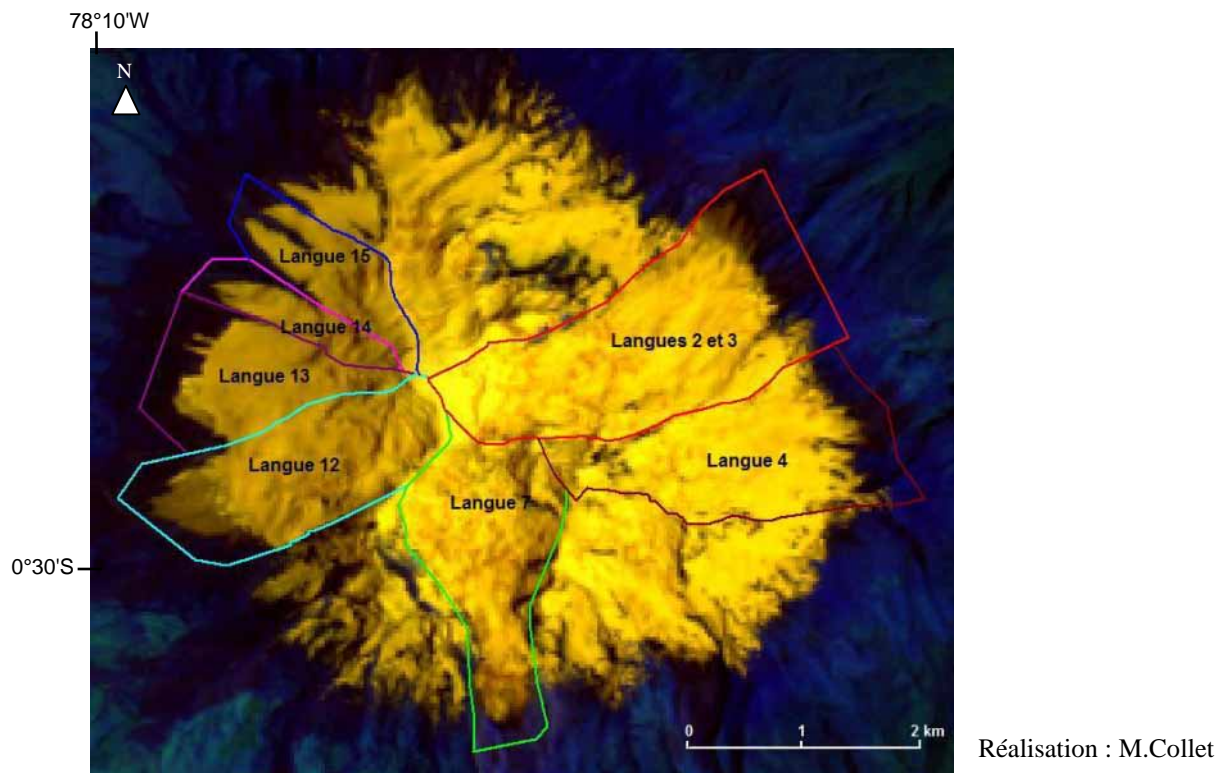
Les réflectances de la neige fraîche et de la glace sont si proches qu'il est très délicat de différencier ces deux éléments à partir d'images satellitales. Alors, si l'on souhaite se centrer sur l'étude des seuls glaciers, il faut prendre en considération les possibles dépôts de neige s'accumulant à certains endroits après des chutes de neige et les écarter de l'étude pour éviter de cartographier de la neige et de la prendre en compte dans le calcul des superficies des glaciers. Ce problème concerne essentiellement l'Antisana.



**Figure 28 : Une différenciation neige/glace délicate**  
(*extrait des images Landsat, zoom sur le Sud Est de l'Antisana*)

Par rapport à ce problème, il semble donc plus prudent de limiter l'étude aux langues glaciaires pour lesquelles la confusion neige/glace ne se présente pas. Le choix des langues glaciaires à retenir s'est fait à partir de l'analyse visuelle des images satellitales et des informations relatives au terrain obtenues à partir des SIG et du Modèle Numérique de Terrain (limites de bassins versants, altitudes...) en prenant en compte également des découpages précédents (découpages du glacier établi par Hastenrath S. (1981) et celui établie par l'IRD et ses partenaires pour les glaciers 15 et 12).





**Figure 29 : Découpage retenu pour l'étude des langues glaciaires de l'Antisana (extrait de l'image Landsat du 15/10/1991, capteur TM)**

Sept langues glaciaires ont été retenues pour l'étude. Les autres langues ont été écartées du fait de leurs caractéristiques morphologiques favorables à l'accumulation de neige.

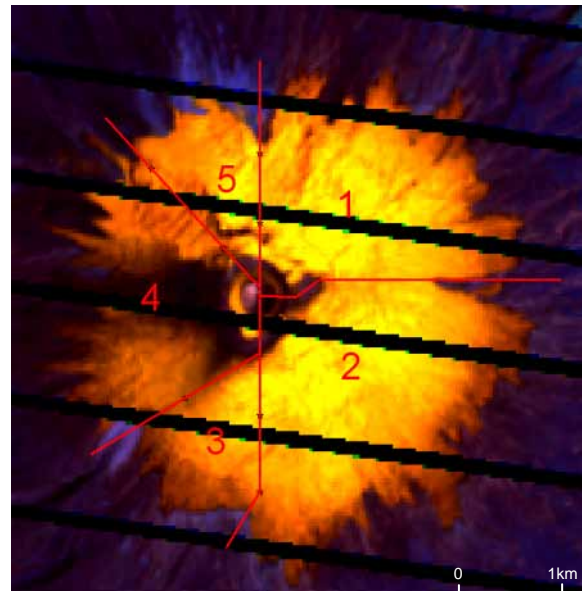
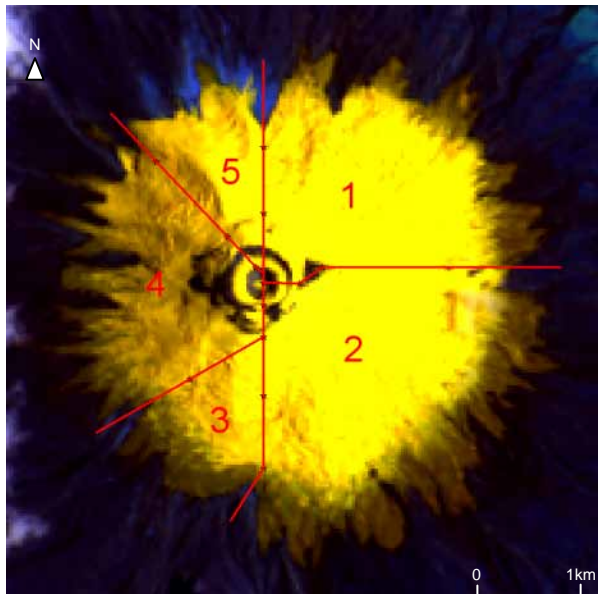
### 3.3.3 Influence de l'activité géothermique sur les glaciers du Cotopaxi

Si le Cotopaxi n'est pas concerné par le problème de confusion neige/glace, son activité volcanique nous oblige à effectuer cette fois encore un découpage de la calotte glaciaire.

Depuis le mois d'octobre 2001, les sismologues et vulcanologues ont constaté une reprise d'activité du volcan or, certaines de ces activités contribuent à l'augmentation de la température au sol, ce qui accélère la fusion de la glace. Ce phénomène s'observe bien sur les images Landsat de 2004, 2007, 2009 et 2010. Les secteurs Ouest sont particulièrement touchés : on constate une fusion importante du glacier sur le secteur Ouest et une déstabilisation des glaciers pour le secteur Nord Nord Ouest. Le découpage retenu présenté sur la figure suivante.

Image Landsat du 26/03/1987, capteur TM

Image Landsat du 28/01/2004 capteur ETM+,



Réalisation : M.Collet

**Figure 30: Découpage du Cotopaxi permettant de prendre en compte l'activité volcanique enregistrée depuis 2001**

1 : Nord Est (NE), 2 : Sud Est (SE), 3 : Sud Sud-Ouest (SSW), 4 : Ouest (W) et 5 : Nord Nord-Ouest (NNW)

Ce découpage, en cinq secteurs est important puisqu'il permet de ne pas associer la diminution des glaciers observée depuis la fin 2001 aux conditions climatiques, mais à l'activité géothermique du volcan.

Après une présentation des données utilisées, la méthodologie retenue pour l'étude a été décrite. Celle-ci peut rencontrer certaines limites qu'il est possible d'atténuer quitte à laisser parfois de côté certaines zones. C'est à partir de cette méthodologie que l'on a pu retracer l'évolution des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi dont les résultats vont être exposés et analysés maintenant.

## PARTIE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats portant sur les superficies des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi obtenus à partir de la télédétection permettent de confirmer les tendances observées quant à l'évolution de ces glaciers à partir d'autres méthodes: les glaciers ont perdu près de 40% de leur surface entre 1979 et 2007. Après avoir estimé les taux d'erreurs liés à la taille des pixels que peut engendrer la méthode par télédétection, on présentera et analysera les résultats. On verra notamment que les variations constatées sont étroitement liées aux fluctuations climatiques, qu'elles soient dues à des phénomènes climatiques opérant sur des temps courts (événements ENSO) ou plus longs (Oscillation décennale du Pacifique et réchauffement atmosphérique).

### 4.1 Évaluation des résultats

#### 4.1.1 Calculs des erreurs liés à la taille des pixels

La principale source d'erreur qui intervient dans le calcul des superficies des langues glaciaires est liée au tracé des périmètres de ces langues glaciaires.

La précision de ce tracé est fixée à un pixel, c'est-à-dire à 30 mètres (résolution spatiale des capteurs TM et ETM), ou à 80 mètres pour le capteur MSS. L'erreur sur la surface est calculée à partir du périmètre et de la résolution spatiale des capteurs.

Dans ce calcul d'erreur, on estime en fait la superficie d'une « surface tampon » incluant le périmètre que l'on a délimité. Cette « surface tampon » correspond à l'incertitude maximale liée à la résolution spatiale des images. L'erreur sur la surface du glacier correspond donc à plus ou moins la moitié de cette incertitude totale.

$$\varepsilon_{Si} = \frac{1}{2} * P_i * TP_i / 1000000 \quad (1)$$

où,

$\varepsilon_{Si}$  = erreur sur la surface du glacier pour une année  $i$ , en  $km^2$

$P_i$  = périmètre du glacier pour une année  $i$ ; en  $m$

$TP_i$  = taille du pixel de l'image utilisée pour une année  $i$ , en  $m$

Pour calculer ensuite l'erreur relative, on effectue le rapport de l'erreur sur la surface avec la surface du glacier ou de la langue glaciaire.

$$\sigma_{Si} = \epsilon_{Si} / Stot_i \quad (2)$$

où,

$\sigma_{Si}$  = erreur relative sur la surface de l'année  $i$ , en %

$Stot_i$  = surface totale du glacier pour l'année  $i$ , en  $km^2$

Pour chaque année, nous avons donc calculé l'erreur relative dans le calcul des superficies glaciaires par secteur ou par langues glaciaires étudiés et pour la superficie totale des calottes (voir aussi Annexe 5).

**Tableau 3: Erreur relative estimée pour le calcul des superficies glaciaires de l'Antisana (en%)**

|               | Langues<br>2-3 | Langue<br>4 | Langue<br>7 | Langue<br>12 | Langue<br>13 | Langue<br>14 | Langue<br>15 | Superficie<br>totale |
|---------------|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|
| <b>1979*</b>  | 13,64          | 14,37       | 20,33       | 13,74        | 20,56        | 23,47        | 21,15        | 10,04                |
| <b>1987-1</b> | -              | -           | 9,17        | 5,70         | 9,44         | 13,10        | 11,65        | -                    |
| <b>1987-2</b> | -              | -           | 7,68        | 7,51         | -            | -            | 12,38        | -                    |
| <b>1991</b>   | 4,40           | 7,04        | 7,43        | 5,55         | 9,58         | 11,42        | 11,09        | -                    |
| <b>1996-2</b> | -              | -           | -           | 5,89         | 8,79         | 13,06        | 10,66        | -                    |
| <b>1998</b>   | 6,32           | 9,45        | 9,97        | 6,97         | 9,49         | 13,29        | 12,15        | 3,96                 |
| <b>1999</b>   | 5,00           | 9,25        | -           | 5,36         | 8,54         | 12,07        | 10,83        | -                    |
| <b>2001</b>   | 5,07           | 8,91        | 6,99        | 6,15         | 8,92         | 11,67        | 11,28        | -                    |
| <b>2004</b>   | 6,20           | 10,38       | 12,03       | 7,25         | 9,93         | 11,58        | 11,43        | 7,39                 |
| <b>2007</b>   | -              | 10,62       | 11,92       | 7,05         | 10,63        | 11,45        | 13,25        | 7,33                 |
| <b>2009</b>   | 4,42           | 6,10        | -           | 5,42         | 9            | 11,56        | -            | -                    |
| <b>2010</b>   | 5,125          | 6           | 7,02        | 5,34         | 9,23         | 11,13        | -            | -                    |

\* Capteur MSS, résolution de 80 mètres

**Erreur relative moyenne :**

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| 1979 (capteur MSS)              | <b>18,18 %</b> |
| 1987-2010 (capteurs TM et ETM+) | <b>8,84 %</b>  |

L'erreur relative moyenne correspond à la moyenne des erreurs relatives calculées pour chacune des langues étudiées de l'Antisana.

**Tableau 4: Erreur relative estimée pour le calcul des superficies glaciaires du Cotopaxi (en %)**

|               | Nord Est (NE) | Sud Est (SE) | Sud Sud-Ouest (SSW) | Ouest (W) | Nord Ouest (NW) | Superficie totale |
|---------------|---------------|--------------|---------------------|-----------|-----------------|-------------------|
| <b>1979*</b>  | 11,62         | 9,77         | 15,52               | 23,89     | 18,61           | 9,81              |
| <b>1987-1</b> | -             | -            | 6,97                | 10,89     | 8,95            | -                 |
| <b>1987-2</b> | 5,71          | 5,40         | 7,69                | 12,18     | 8,37            | 5,60              |
| <b>1991</b>   | 5,55          | 4,69         | 7,18                | 10,08     | 9,52            | 4,83              |
| <b>1996-1</b> | 5,22          | -            | -                   | -         | -               | -                 |
| <b>1996-2</b> | -             | -            | 7,13                | 9,67      | 9,79            | -                 |
| <b>1998</b>   | -             | -            | 7,45                | -         | -               | -                 |
| <b>1999</b>   | 5,40          | 4,84         | 7,45                | -         | -               | -                 |
| <b>2001</b>   | 6,01          | 4,95         | 7,02                | 10,26     | 8,05            | 5,07              |
| <b>2004</b>   | 5,66          | 5,45         | 7,30                | 12,87     | 10,84           | 5,53              |
| <b>2007</b>   | 6,86          | 5,52         | 7,24                | 13,04     | 10,25           | 5,92              |
| <b>2009</b>   | 5,39          | 4,65         | 6,91                | 10,54     | 9,58            | 4,58              |
| <b>2010</b>   | 6,13          | 5,07         | -                   | -         | 9,36            | -                 |

**Erreur relative moyenne :**

|                                 |                |
|---------------------------------|----------------|
| 1979 (capteur MSS)              | <b>15,88 %</b> |
| 1987-2010 (capteurs TM et ETM+) | <b>7,71 %</b>  |

*L'erreur relative moyenne correspond à la moyenne des erreurs relatives calculées pour chacun des secteurs du Cotopaxi.*

\* Capteur MSS, résolution de 80 mètres

Les erreurs relatives varient entre de 5 et 15% pour les données de 1987 à 2010 et entre 9 et 24% pour celles de 1979 dont l'image présente une résolution spatiale moins élevée. L'erreur relative pour la période 1987-2010 pour l'ensemble des calottes est de 8,8% pour l'Antisana et de 7,7% pour le Cotopaxi ce qui est satisfaisant pour notre étude. Une autre façon d'évaluer la précision de la méthode est de comparer les résultats obtenus par télédétection et ceux obtenus avec les relevés topographiques ou par photogrammétrie.

#### 4.1.2 Comparaison des résultats obtenus à partir de méthodes différentes

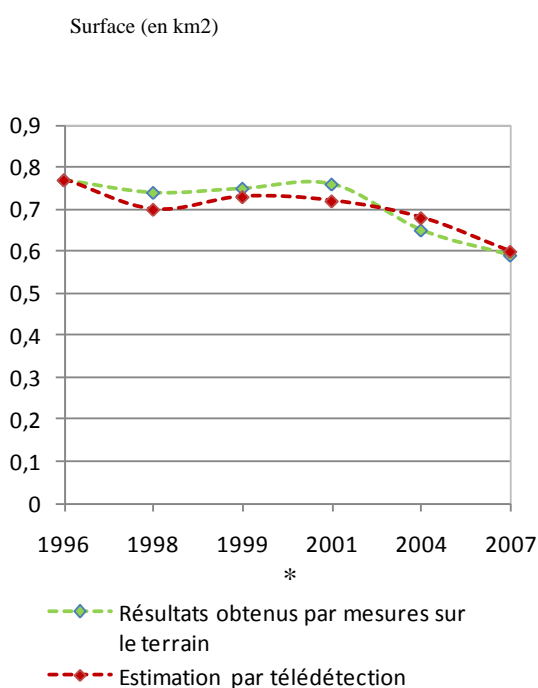
Pour la période 1996-2007, il est possible de confronter les résultats obtenus par télédétection avec ceux obtenus dans le cadre des études menés par l'IRD et ses partenaires issus de relevés topographiques sur les glaciers 15 et 12 de l'Antisana puisque les contours de ces glaciers sont effectués à partir d'une même base.

**Tableau 5 : Comparaison de résultats obtenus pour le calcul de la superficie du glacier 15 à partir de deux méthodes : mesures sur le terrain et estimation par télédétection**

|      | Superficies glaciaires de la langue glaciaire 15 (en km <sup>2</sup> ) |                              |                 |
|------|--|------------------------------|-----------------|
|      | Mesures sur le terrain*  | Estimation par télédétection | Différence en % |
| 1996 | 0,77   | 0,77                         | 0               |
| 1998 | 0,74   | 0,7                          | -5,41           |
| 1999 | 0,75   | 0,73                         | -2,67           |
| 2001 | 0,76   | 0,72                         | -5,26           |
| 2004 | 0,65   | 0,68                         | 4,62            |
| 2007 | 0,59   | 0,6                          | 1,69            |

\*B. Cáceres et al., 2009

L'écart entre les deux méthodes peut aller jusqu'à 5,41%. La différence moyenne est égale à 3,28%.



**Figure 31: Évolution de la superficie glaciaire du glacier 15 entre 1996 et 2007 à partir de deux méthodes : mesures sur le terrain et estimation par télédétection**

\*B. Cáceres et al., 2009

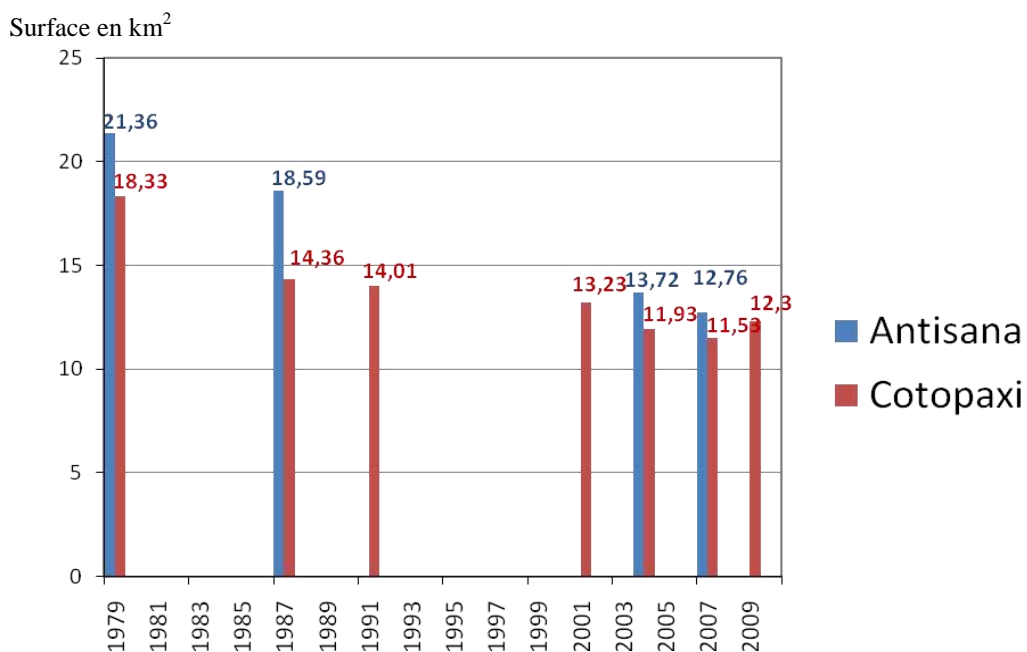
La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes indique une différence de l'ordre de 3,28% en moyenne, ce qui peut être considéré comme assez faible. Les résultats obtenus à partir des deux méthodes suivent effectivement une courbe d'évolution semblable (cf. Figure 32) pour le glacier 15. En ce qui concerne le glacier 12, la comparaison n'est possible qu'entre les données de deux dates (2004 et 2007) ce qui est peu représentatif.

Après avoir calculé les taux d'erreur liés à la taille des pixels et comparer les résultats avec ceux d'une autre méthode, on peut étudier de plus près les résultats obtenus à partir de la télédétection. Ceux ci sont alors à considérer avec un taux d'erreur compris entre 7 et 9 %, qui correspondent à l'erreur liée aux pixels que nous avons calculé.

## 4.2 Analyse des variations de superficie des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi de 1979 à 2010

Un des premiers éléments que l'on peut étudier pour apprécier l'évolution des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi est l'étendue des superficies globale des calottes glaciaires.

Cependant, ce calcul n'est pas toujours faisable du fait, d'une part, de la qualité de l'image (conditions atmosphériques, état des capteurs) et d'autre part, de la présence de phénomènes particuliers pouvant fausser les calculs de superficies comme des chutes de neige avant l'acquisition des images. De ce fait, pour étudier les superficies totales des glaciers, les données ne sont disponibles que pour un nombre de dates limité. Toutefois celles-ci sont suffisamment espacées dans le temps pour apprécier l'évolution des glaciers. Les résultats obtenus montrent que les glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi ont perdu respectivement 40,26% et 37,10% de leurs superficies totales entre 1979 et 2007.



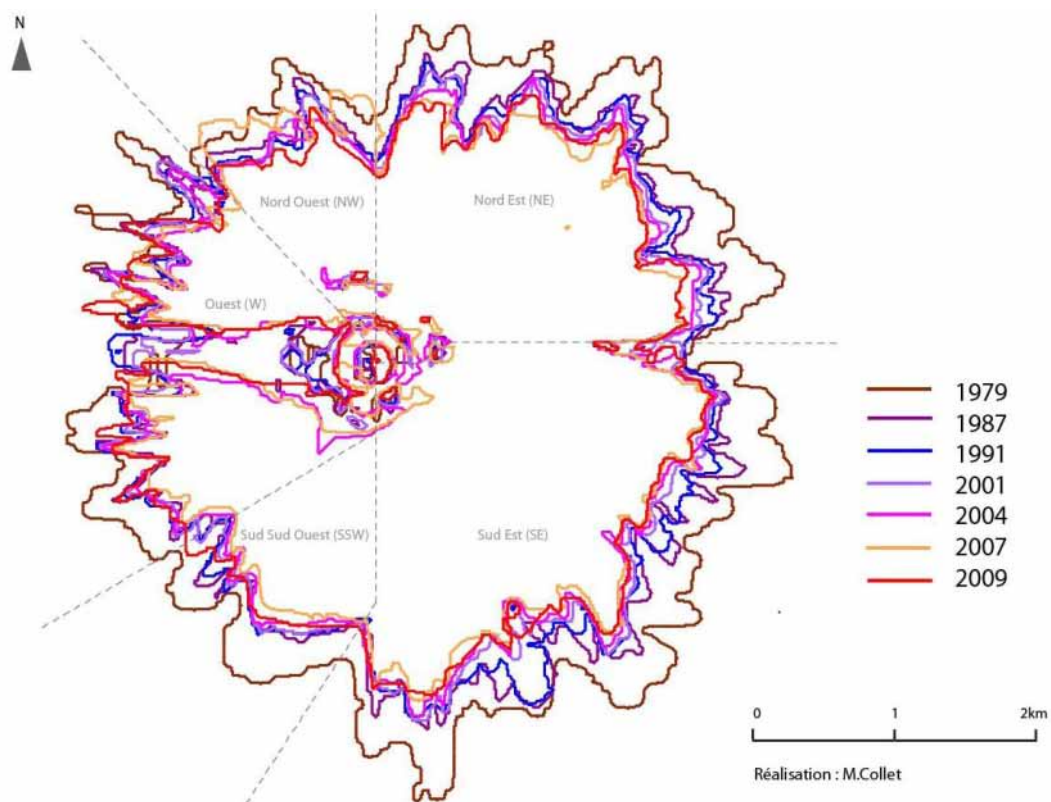
**Figure 32 : Évolution de la superficie des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi entre 1979 et 2009**

Les superficies recouvertes par les glaciers sont passées de 21,36 km<sup>2</sup> à 12,76 km<sup>2</sup> pour l'Antisana et de 18,33 km<sup>2</sup> à 11,53 km<sup>2</sup> pour le Cotopaxi entre 1979 et 2007. Ils ont donc respectivement perdu 8,6 et 6,8 km<sup>2</sup> de glace, soit près de 40% de leur superficie glaciaire totale en l'espace de 28 ans. Nous allons revenir plus précisément sur l'évolution des

superficies glaciaires pour chacun des deux volcans en se concentrant sur les superficies totales mais aussi sur l'étude par secteurs et par langues glaciaires, qui permettent de mettre en avant certains éléments, d'écartier des phénomènes pouvant porter à confusion et enfin d'avoir accès à une source d'informations plus grande puisque l'on peut utiliser un nombre d'images satellitales plus important.

#### 4.2.1 Cas du Cotopaxi

Sept images satellitales présentent des conditions favorables pour l'étude de la superficie englacée totale du Cotopaxi. Les résultats des traitements réalisés à partir de ces images permettent d'apprécier l'évolution de ces superficies et de faire le constat d'un retrait glaciaire progressif depuis 1979.



**Figure 33:** Évolution de la superficie totale du Cotopaxi entre 1979 et 2009

D'après les résultats, entre 1979 et 2009, le Cotopaxi a perdu 32,9 % de sa superficie glaciaire, ce qui correspond à une perte moyenne de 1,10 % par an. Mais cette diminution a été



irrégulière. On peut diviser le temps en trois périodes de 10, 12 et 8 ans afin d'observer le rythme de la déglaciation.

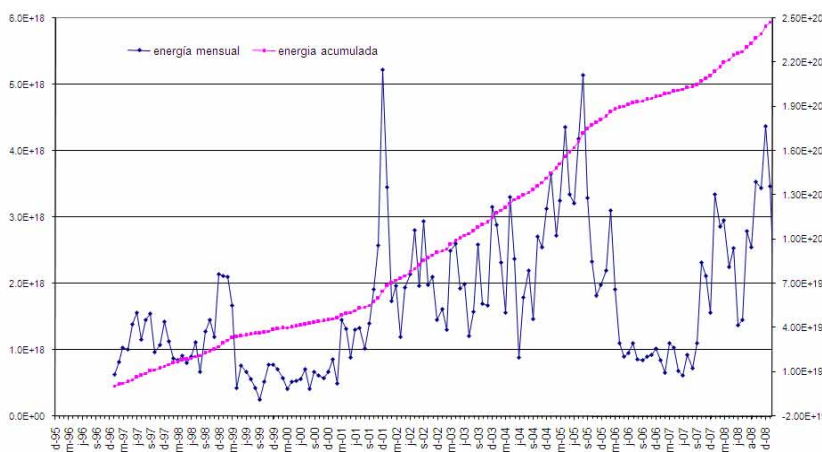
**Tableau 6: Une diminution des glaciers irrégulière dans le temps**

|                  | Taux de variation (en%) | Taux de variation annuel (en %/an) |
|------------------|-------------------------|------------------------------------|
| <b>1979-2009</b> | -32,90                  | -1,10                              |
| <b>1979-1991</b> | -25,39                  | -2,12                              |
| <b>1991-2001</b> | -6,59                   | -0,66                              |
| <b>2001-2009</b> | -7,03                   | -0,88                              |

La première période (1979-1991) est celle qui connaît le rythme de diminution le plus important : les glaciers perdent en moyenne 2,12 % de leur surface chaque année contre 0,66 et 0,88 % pour les deux périodes suivantes (1991-2001 et 2001-2009).

A noter également que les glaciers ont perdu 15% de leur surface en l'espace de seulement 6 ans (2001-2007) ce qui est important mais qui s'explique par l'entrée du volcan dans une période d'activité depuis octobre 2001, ce qui a entraîné une forte fusion de la glace sur la partie occidentale du volcan.

En octobre 2002, un des principaux pics d'activité enregistré, près de 40% de la paroi supérieure occidentale du volcan était complètement découverte (Institut Géophysique de l'École Polytechnique Nationale de Quito, 2002). La fusion subite de la glace peut provoquer un certain nombre de dommages en aval.



Source : Institut Géophysique de l'École Polytechnique National de Quito

**Figure 34: Évolution de l'activité volcanique du Cotopaxi depuis 1996**

Évolution de l'énergie libérée par événement pour la période 1996-2008. La courbe rose correspond au cumul de l'énergie libérée par événement. L'augmentation de celle-ci accroît le risque d'éruption. La courbe bleue fait référence à l'énergie mensuelle libérée et montre bien l'augmentation de la fréquence des événements depuis le mois d'octobre 2001.

Des comportements irréguliers sont également observés pour la même période sur le secteur Nord Ouest (NW), elles peuvent être associés à l'activité sismique qui peut déstabiliser les glaciers. Ces deux « anomalies » (fusion importante et comportements irréguliers) sont assez visibles sur la Figure 34 (cf. aussi Annexe 6).

- Étude par secteur

Une étude par secteur est donc un complément d'analyse nécessaire puisqu'elle permet d'isoler les parties touchées par l'activité interne du volcan, activité qui n'a pas de lien direct avec le climat.

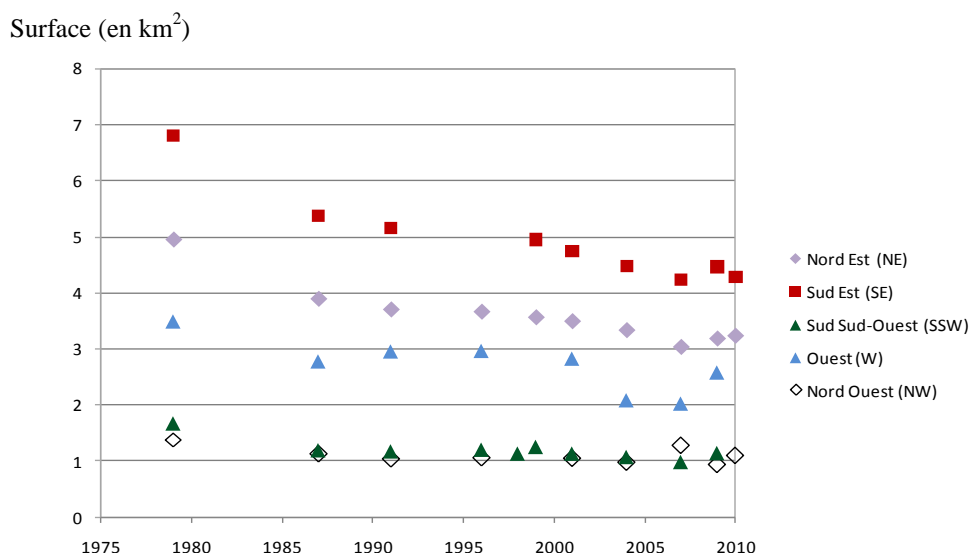
**Tableau 7: Évolution des superficies glaciaires du Cotopaxi par secteur entre 1979 et 2010**

| Superficies<br>(en km <sup>2</sup> ) | Nord Est<br>(NE) | Sud Est<br>(SE) | Sud Sud-Ouest<br>(SW) | Ouest (W) | Nord Ouest<br>(NW) | Superficie<br>totale |
|--------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------|--------------------|----------------------|
| <b>1979</b>                          | 4,95             | 6,81            | 1,67                  | 3,52      | 1,38               | 18,33                |
| <b>1987-1</b>                        | -                | -               | 1,19                  | 2,79      | 1,11               | -                    |
| <b>1987-2</b>                        | 3,89             | 5,38            | 1,19                  | 2,78      | 1,12               | 14,36                |
| <b>1991</b>                          | 3,7              | 5,15            | 1,17                  | 2,96      | 1,03               | 14,01                |
| <b>1996-1</b>                        | 3,66             | -               | -                     | -         | -                  | -                    |
| <b>1996-2</b>                        | -                | -               | 1,2                   | 2,97      | 1,05               | -                    |
| <b>1998</b>                          | -                | -               | 1,13                  | -         | -                  | -                    |
| <b>1999</b>                          | 3,56             | 4,95            | 1,25                  | -         | -                  | -                    |
| <b>2001</b>                          | 3,49             | 4,74            | 1,13                  | 2,83      | 1,04               | 13,23                |
| <b>2004*</b>                         | 3,33             | 4,48            | 1,07                  | 2,08      | 0,97               | 11,93                |
| <b>2007</b>                          | 3,03             | 4,23            | 0,98                  | 2,02      | 1,27               | 11,53                |
| <b>2009</b>                          | 3,18             | 4,47            | 1,14                  | 2,58      | 0,93               | 12,3                 |
| <b>2010</b>                          | 3,23             | 4,29            | -                     | -         | 1,09               | -                    |

*A partir de cette date, les secteurs Ouest (W) et Nord Ouest (NW) sont touchés par l'activité volcanique du Cotopaxi*

**Taux de variation (en%):**

|                  |        |        |        |        |        |        |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <b>1979-2010</b> | -34,75 | -37,00 | -      | -      | -21,01 | -      |
| <b>1979-2009</b> | -35,76 | -34,36 | -31,74 | -26,70 | -32,61 | -32,90 |
| <b>1979-2007</b> | -38,79 | -37,89 | -41,32 | -42,61 | -7,97  | -37,10 |
| <b>1979-2001</b> | -29,49 | -30,40 | -32,34 | -19,60 | -24,64 | -27,82 |



**Figure 35: Évolution des glaciers du Cotopaxi par secteur entre 1979 et 2010**

A la lecture de ces résultats on peut voir qu'il existe une différence en termes de taux de variations et de comportement entre les différentes langues glaciaires des versants (Cf. Annexe 7)

- Étude par versants (Est-Ouest)

Étudier l'évolution des versants Est et Ouest séparément peut être intéressant dans le sens où ces deux versants ne sont pas soumis aux mêmes influences climatiques : on suppose que le versant Est reçoit davantage de précipitations que le versant Ouest du fait de l'influence des masses d'air humide en provenance de l'Amazonie.

**Tableau 8: Un recul plus marqué pour le versant Est**

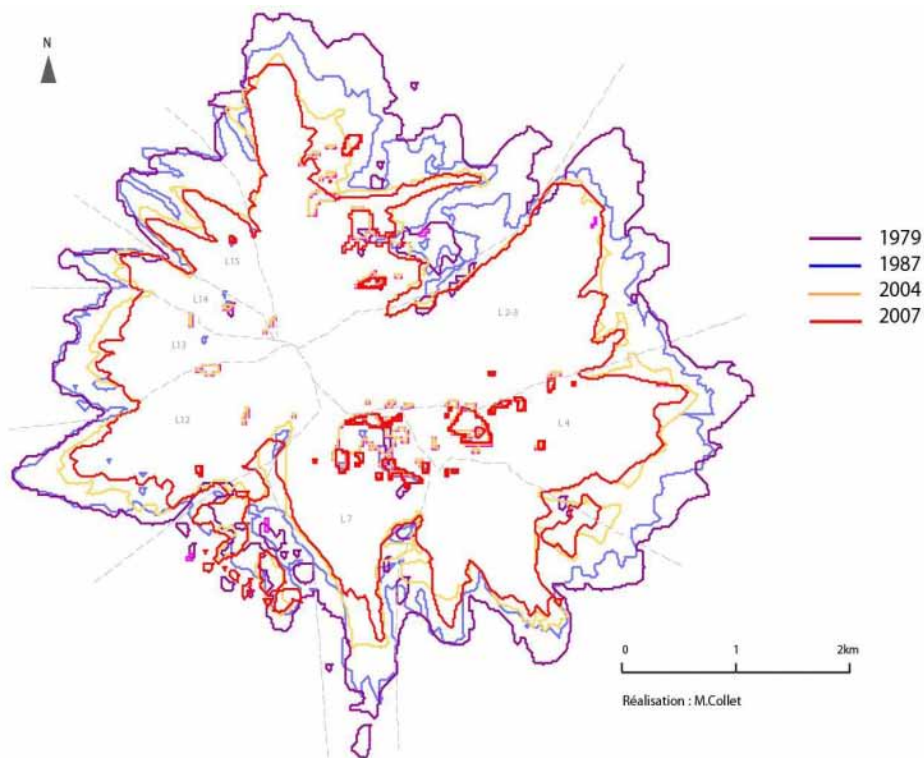
| Superficies en km <sup>2</sup> | EST    | OUEST  | Superficie totale |
|--------------------------------|--------|--------|-------------------|
| <b>1979</b>                    | 11,76  | 6,57   | 18,33             |
| <b>1987-2</b>                  | 9,27   | 5,09   | 14,36             |
| <b>1991</b>                    | 8,85   | 5,16   | 14,01             |
| <b>2001</b>                    | 8,23   | 5      | 13,23             |
| <b>2004</b>                    | 7,81   | 4,12   | 11,93             |
| <b>2007</b>                    | 7,26   | 4,27   | 11,53             |
| <b>2009</b>                    | 7,65   | 4,65   | 12,3              |
| <b>Taux de variation (en%)</b> |        |        |                   |
| <b>1979-2001</b>               | -30,02 | -23,90 | -27,82            |
| <b>1979-2009</b>               | -34,95 | -29,22 | -32,90            |

Mais si l'on fait cette une distinction, on s'aperçoit qu'entre 1979 et 2001, le versant Est a perdu 30 % de sa superficie glaciaire alors que le versant Ouest n'a perdu que 24 %, soit une différence de l'ordre de 6 % entre les deux versants.

Il semble que cet écart ne soit pas du à des conditions climatiques différentes entre les deux versants mais qu'il s'explique davantage par la géométrie des langues glaciaires qui présentent des différences notables notamment en terme de pente, de surfaces d'accumulation, et de la position des fronts des glaciers.

#### 4.1.2 Cas de l'Antisana

Pour étudier les superficies totales des glaciers de l'Antisana, le nombre d'images satellites exploitables est plus limité que pour le Cotopaxi. En effet, du fait de la morphologie du volcan, il est assez fréquent d'observer des dépôts de neige fraîche s'accumulant entre les parois, ce qui rend difficile la différenciation de neige/glace, comme nous l'avons vu dans la partie 3.3. Seules quatre images ont pu être utilisées pour délimiter la calotte glaciaire dans sa totalité. La calotte glaciaire de l'Antisana est passée de 21,36 à 12,76 km<sup>2</sup> entre 1979 et 2007, ce qui représente une diminution de 40,26% en 28 ans.



**Figure 36:** Évolution de la superficie de la calotte glaciaire de l'Antisana entre 1979 et 2009

De la même façon que pour le Cotopaxi, on peut étudier les rythmes de cette évolution. Le taux moyen de variation annuel entre 1979 et 2007 est proche de celui qu'enregistre le Cotopaxi puisqu'il s'élève à 1,44 %/an pour l'Antisana contre 1,32 %/an pour le Cotopaxi.

**Tableau 9: Rythme de l'évolution des superficies glaciaires de l'Antisana entre 1979 et 2007**

|                  | Taux de variation (en%) | Taux de variation annuel (en %) |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| <b>1979-2007</b> | -40,26                  | -1,44                           |
| <b>1979-1987</b> | -12,97                  | -1,62                           |
| <b>1987-2007</b> | -31,36                  | -1,57                           |

- Etude par langues glaciaire

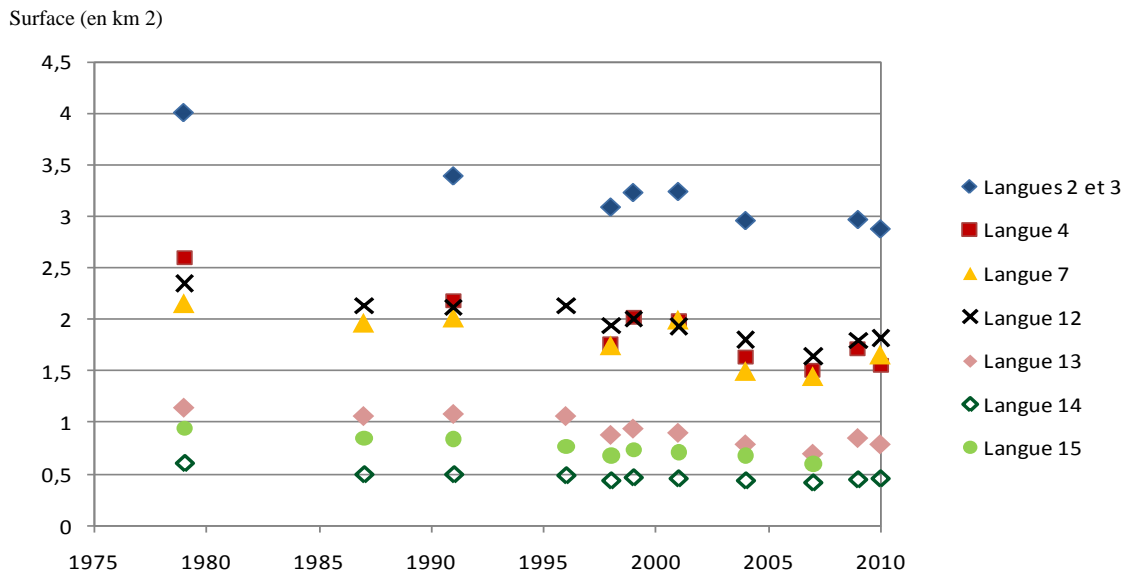
L'étude par langues glaciaires permet d'avoir accès à un nombre plus important de données puisqu'on a pu utiliser plus d'images satellitales. De plus, il est possible d'ajouter à aux résultats ceux obtenus photogrammétrie (Jordan E.,2003, Cáceres,B., 2005) pour les années 1956, 1965 et 1976.

**Tableau 10: Évolution de quelques langues glaciaires de l'Antisana entre 1956 et 2010**

Surface (en km<sup>2</sup>):

|                                  | Langues 2 et 3 | Langue 4 | Langue 7 | Langue 12 | Langue 13 | Langue 14 | Langue 15 |
|----------------------------------|----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1956</b>                      | -              | -        | -        | 2,39*     | -         | -         | 0,93*     |
| <b>1965</b>                      | -              | -        | -        | 2,37*     | -         | -         | 0,92*     |
| <b>1976</b>                      | -              | -        | -        | 2,35*     | -         | -         | 0,92*     |
| <b>1979</b>                      | 4              | 2,6      | 2,16     | 2,35      | 1,14      | 0,6       | 0,94      |
| <b>1987-1</b>                    | -              | -        | 1,97     | 2,13      | 1,06      | 0,49      | 0,85      |
| <b>1987-2</b>                    | -              | -        | 1,98     | 2,12      | -         | -         | 0,86      |
| <b>1991</b>                      | 3,39           | 2,18     | 2,02     | 2,12      | 1,08      | 0,49      | 0,84      |
| <b>1996-1</b>                    | -              | -        | -        | -         | -         | -         | -         |
| <b>1996-2</b>                    | -              | -        | -        | 2,13      | 1,06      | 0,48      | 0,77      |
| <b>1998</b>                      | 3,09           | 1,77     | 1,75     | 1,94      | 0,88      | 0,43      | 0,68      |
| <b>1999</b>                      | 3,23           | 2,02     | -        | 2         | 0,94      | 0,46      | 0,73      |
| <b>2001</b>                      | 3,24           | 1,99     | 2        | 1,93      | 0,9       | 0,45      | 0,71      |
| <b>2004</b>                      | 2,96           | 1,64     | 1,5      | 1,8       | 0,79      | 0,43      | 0,68      |
| <b>2007</b>                      | -              | 1,5      | 1,45     | 1,64      | 0,7       | 0,41      | 0,6       |
| <b>2009</b>                      | 2,97           | 1,72     | -        | 1,79      | 0,85      | 0,44      | -         |
| <b>2010</b>                      | 2,88           | 1,56     | 1,66     | 1,82      | 0,79      | 0,45      | -         |
| <b>Taux de variation (en %):</b> |                |          |          |           |           |           |           |
| <b>1956-2007</b>                 | -              | -        | -        | -31       | -         | -         | -35       |
| <b>1979-2010</b>                 | -28,00         | -40,00   | -23,15   | -22,55    | -30,70    | -25,00    | -         |
| <b>1979-2007</b>                 | -              | -42,31   | -32,87   | -30,21    | -38,60    | -31,67    | -36,17    |

\*Jordan E.,2003, Cáceres,B., 2005



**Figure 37: Évolution de la superficie de quelques langues glaciaires de l'Antisana entre 1979 et 2010**

L'analyse de ces données montre que les langues glaciaires n'ont pas toutes évolué de la même façon depuis 1979. Certaines ont vu leur superficie stagner durant toute la première moitié de la période considérée avant de connaître une diminution plus sensible ; c'est le cas des langues 13, 14 et 15, dont la perte de surface se fait plus particulièrement sentir à partir des années 1996-1998. D'autres connaissent des reculs plus notables, les langues 4 et 13 sont les langues qui connaissent les plus importantes variations, elles ont respectivement perdu 42 % et 38,4 % de leur surface durant la période 1979-2007 (cf. annexe 6)

Effectuer des comparaisons entre l'évolution des langues glaciaire selon leur exposition (Est/Ouest) s'avère plus difficile que pour le Cotopaxi étant donné la configuration bien plus complexe de la calotte glaciaire de l'Antisana. De plus, quelques des langues glaciaires ont été écartées de l'étude et celles-ci se trouvent majoritairement dans la partie Est.

Par rapport à tous ces résultats, on peut voir que le recul des superficies des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi est important et représente un taux approximativement semblable pour les deux glaciers, il est de l'ordre de 38-40% pour la période 1979 et 2007. Mais on l'a vu, cette évolution est irrégulière dans l'espace et dans le temps.

Dans l'espace, une partie des différences d'évolution observées entre les langues, secteurs ou versants s'explique en grande partie par leur géométrie (forme, taille des objets étudiés, surface d'accumulation) leur position (exposition, altitude) mais aussi par la géomorphologie des sites.

Il est plus difficile d'intégrer à ces motifs de différenciation les effets liés à la climatologie vu l'échelle de temps sur laquelle porte l'étude (30 ans). Mais il est certain que l'influence des masses d'air en provenance du bassin Amazonien, notamment en terme de précipitations, explique des différences pouvant exister entre les langues glaciaires des versant Est et Ouest. Cependant, il faudrait remonter au-delà des années 1980 pour étudier ce phénomène.

L'évolution n'est pas non plus régulière dans le temps puisqu'on peut noter des périodes d'ablation, de stagnation mais aussi d'avancés. Ces dernières ont été particulièrement notables pour les périodes 1999-2001 et 2007-2020. Il s'agit en fait de réponse de la part des glaciers à des variations dans les paramètres climatiques les contrôlant, ce que l'on va aborder maintenant.

### **4.3 Quels liens avec le climat ?**

L'évolution des glaciers dépend pour l'essentiel des conditions climatiques et c'est pour cette raison que les glaciers constituent de précieux indicateurs pour évaluer l'ampleur des changements climatiques. Alors, après avoir reconstitué l'évolution des superficies des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi et constaté leur recul, il peut être intéressant d'étudier les conditions climatiques auxquelles ont été soumis les glaciers et de voir dans quelle mesure leur évolution (recul, mais aussi stagnation et avancée) est liée aux fluctuations du climat.

#### **4.3.1 Des glaciers très sensibles aux oscillations climatiques de courte durée**

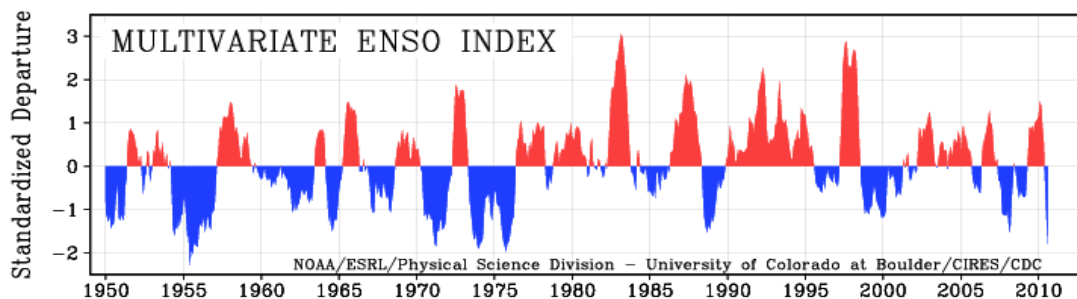
L'Équateur, par sa position géographique particulière (sur la ligne de l'Équateur, dans la Zone de Convergence Intertropicale) présente un climat complexe soumis à divers phénomènes climatiques. Le climat de l'Équateur ne présente pas de variabilité annuelle importante (saisonnalité peu marquée) mais il existe des variabilités interannuelles que l'on peut relier principalement au phénomène ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*).

El Niño désigne à l'origine l'apparition d'un courant saisonnier chaud le long des côtes Ouest de l'Amérique du Sud, qui sont habituellement bordées par un courant froid le « courant du Pérou » ou « courant de Humboldt ». Ce réchauffement anormal des eaux a des répercussions sur la circulation océanique et atmosphérique (affaiblissement des alizées, déplacement de l'anticyclone de l'Île de Pâques) et ses impacts sur le climat peuvent se faire sentir à une

échelle très large. Il est associé à un cycle de variation de la pression atmosphérique, l'oscillation australe, d'où le nom « *El Niño-Southern Oscillation* ».

Les événements ENSO ont une périodicité qui varie de deux et sept ans et un événement peut durer entre 12 et 18 mois. La fin d'un événement El Niño (phase chaude) est en général suivi par son inverse La Niña (phase froide). Ces événements se traduisent par des conditions climatiques anormales et leurs répercussions peuvent être redoutables. Lorsqu'ils sont de forte intensité, ils peuvent être dévastateurs et engendrer des crises économiques (pêche, agriculture) et des catastrophes naturelles (pluies torrentielles, glissements de terrain, tornades, sécheresse...).

Afin de caractériser les événements ENSO, plusieurs indices ont été mis au point. Parmi ceux-ci, l'indice Enso multivarié, ou MEI pour *Multivariate Enso Index* en anglais, est calculé à partir de six variables climatiques<sup>20</sup> sur le Pacifique tropical. Les valeurs positives de cet indice représentent la phase chaude (El Niño) et les valeurs négatives, la période froide (La Niña). On voit bien qu'ils ne se manifestent pas de la même manière et ont des intensités, des fréquences, des déroulements et des durées variables.



Source :Site internet de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

**Figure 38:** Les événements ENSO de 1950 à 2010 (Multivariate Enso Index, MEI)

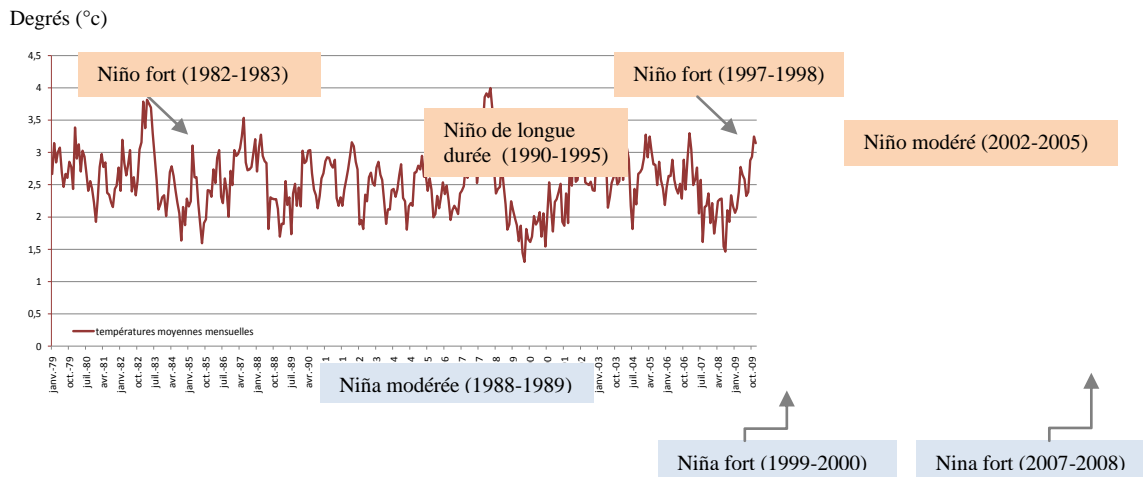
Les événements ENSO ont des répercussions sur la circulation atmosphérique et leurs effets se font sentir sur les glaciers tropicaux qui réagissent rapidement à ces variations climatiques. Plusieurs chercheurs ont mis en évidence le lien existant entre la variation de ces glaciers et les événements ENSO (Francou B. et al., 2000, Thompson G. et al., 1984, Vuille M. et al., 2000). On constate en effet que les périodes de forte ablation coïncident avec des périodes chaudes d'El Niño marquées par une augmentation de la température et les périodes pour lesquelles les

<sup>20</sup> La pression de surface, la composante zonale et méridienne du vent de surface, la température de surface de la mer, la température de l'air en surface et la couverture nuageuse



glaciers avancent ou stagnent coïncident avec les périodes La Niña, marquées par des températures plus froides et des précipitations plus importantes. Le décalage entre l'événement et les répercussions sur les glaciers est estimé à deux/trois mois.

En Équateur, le facteur température est le principal facteur qui contrôle les glaciers. Or, les températures sont fortement liées aux phénomènes ENSO comme le montre la figure suivante.



Réalisation : M.Collet, d'après les données de la station ORE de l'Antisana pour la période 2003-2009 et d'après les données de réanalyse du modèle CEP/NCAR pour la période 1979-2003.

**Figure 39: Évolution des températures au niveau de l'Antisana de 1979 à 2009 et lien avec les épisodes El Niño/La Niña**

Lors des périodes chaudes d'El Niño, les températures sont en général plus élevées et on a un déficit des précipitations neigeuses. La couverture neigeuse est alors souvent moins importante ce qui réduit l'albédo, augmente la quantité de rayonnement absorbé par la surface et donc l'ablation. La situation inverse se produit lors des épisodes froids de La Niña au cours desquels les glaciers peuvent connaître une atténuation du recul voire des avancées.

Lorsque l'on confronte les fluctuations des données de températures ou de l'indice MEI avec les fluctuations des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi, un lien évident apparaît. On peut illustrer ce propos en calculant les taux de variations pour la dernière période par exemple qui a été marqué par la succession d'événements El Niño, La Niña de forte intensité.

**Tableau 11: Impact des événements El Niño/La Niña sur les langues glaciaires de l'Antisana entre 1996 et 2010**

Taux de variation (en %) :

|                  | Langues 2 et 3 | Langue 4 | Langue 7 | Langue 12 | Langue 13 | Langue 14 | Langue 15 |
|------------------|----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1996-1998</b> | -              | -        | -        | -8,92     | -16,98    | -10,42    | -11,69    |
| <b>1998-2001</b> | 4,85           | 12,43    | 14,29    | -0,52     | 2,27      | 4,65      | 4,41      |
| <b>2001-2004</b> | -8,64          | -17,59   | -25,00   | -6,74     | -12,22    | -4,44     | -4,23     |
| <b>2007-2010</b> | -              | 4        | 14,48    | 10,98     | 12,86     | 9,76      | -         |

Pour la période 1996-1998, par exemple, on peut noter un recul prononcé des calottes glaciaires étudiées par rapport aux années précédentes. Les langues 12, 13, 14 et 15 de l'Antisana<sup>21</sup> ont perdu en moyenne 12% de leurs superficies entre 1996 et 1998. Cela peut s'expliquer par l'événement El Niño très intense de 1997-1998 qui a provoqué de grandes catastrophes et quelques mois après son apparition, les glaciers ont réagi à cette variation, d'où le retrait notable constaté sur les images satellitaires de 1998 et de 1999.

Les périodes d'avancées des glaciers sont elles aussi à mettre en relation avec le phénomène ENSO. Les épisodes La Niña de 1999-2000 et de 2007-2008 ont également eu de fortes répercussions sur les glaciers qui ont enregistré quelques mois après des avancées notables et qu'on observe pour les années 2009 et 2010 lors de notre étude.

Ainsi, les glaciers sont des indicateurs de la variabilité climatique et en particulier des oscillations climatiques de courte durée comme le sont celles de l'ENSO. L'étude de ces phénomènes permet d'expliquer la variabilité interannuelle observée au niveau de l'évolution des glaciers mais elle ne permet pas d'expliquer le retrait des glaciers en lui-même (pourquoi les glaciers reculent plus qu'ils n'avancent ?) ni l'accélération de ce retrait depuis les années 1980.

#### **4.3.2 L'évolution du climat et l'accélération du recul des glaciers depuis les années 1980 : des origines naturelles et anthropiques**

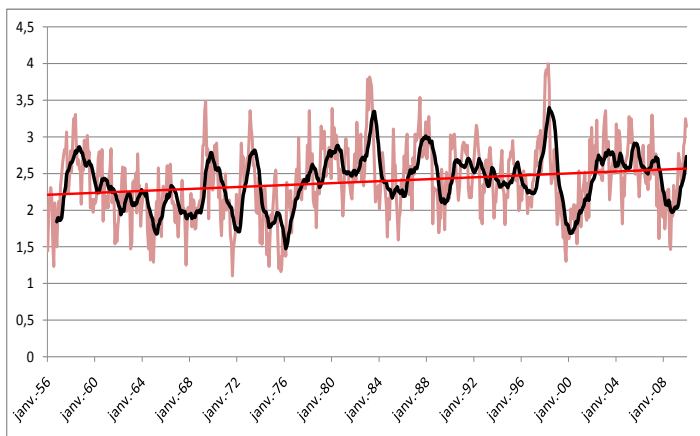
Le recul des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi, tout comme celui de bien d'autres glaciers tropicaux des Andes, a été très important depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle et la tendance semble encore plus marquée depuis les années 1980. Cette situation fait suite aux évolutions que connaît le climat et qui sont notamment liées au réchauffement atmosphérique.

<sup>21</sup> Il s'agit des langues glaciaires pour lesquelles le calcul du taux de variation 1996-1998 est possible.

- Constat : des paramètres climatiques qui évoluent

La variation des glaciers à long terme (recul généralisé) que nous constatons est principalement due à l'évolution de paramètres climatiques qui contrôlent les glaciers. Parmi ceux-ci, la température joue un rôle majeur et son augmentation a des influences directes sur les glaciers puisque la température contrôle l'état de la couche de neige et donc l'albédo. La température détermine également le niveau de la limite des précipitations pluie/neige et plus celle-ci est élevée, moins les glaciers peuvent se reconstituer.

Dans les Andes tropicales (1°N-23°S), l'élévation de la température est estimée à 0,68°C entre 1939 et 1999 et le taux d'augmentation a varié au cours de la période puisqu'il a été établi à +0,11°C/décennie pour 1939-1998 et à +0,15°C par décennie entre 1950 et 1994 ce qui montre un réchauffement (Vuille M., Bradley R.S., 2000, Vuille M. et al. 2003).



Réalisation : M.Collet, d'après les données de la station ORE de l'Antisana pour la période 2003-2009 et d'après les données de réanalyse du modèle CEP/NCAR pour la période 1956-2003.

**Figure 40: Évolution des températures de 1949 à 2007 enregistrées par la station météorologique ORE (Antisana)**

D'autres paramètres climatiques que la température peuvent être étudiés. Les précipitations, par exemple, qui permettent l'accumulation sont importantes pour le maintien des glaciers. Cependant leurs variations à long terme sont beaucoup moins faciles à caractériser que celles de la température. Au niveau des Andes tropicales, des études menées ont montré qu'il existait des disparités entre les différentes régions, l'Équateur, le centre et le Nord du Pérou auraient enregistré une augmentation des précipitations entre 1950 et 1994 alors qu'elles

auraient diminué au Sud du Pérou et en Bolivie (Vuille et al, 2003 ; Haylock et al, 2006). Il serait enfin intéressant d'étudier l'évolution d'autres paramètres comme l'humidité ou le taux de couverture nuageuse, évolution qui sont cependant difficiles à estimer sur le temps long et sur des surfaces de petite taille car ces paramètres sont, comme la précipitation, très hétérogènes.

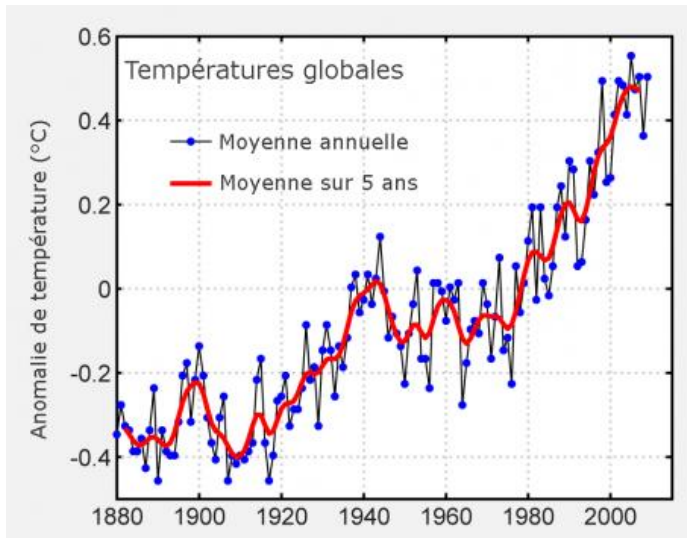
Ce réchauffement des températures atmosphériques, constaté depuis les années 1980 peut s'expliquer par deux phénomènes : l'Oscillation Décennale du Pacifique qui est entrée dans une période chaude à cette même époque et le réchauffement atmosphérique d'origine anthropique.

- Influence de l'oscillation décennale du Pacifique

L'oscillation décennale du Pacifique est un phénomène climatique comparable au phénomène ENSO puisqu'il s'agit également d'une anomalie dans les températures de surface des eaux du Pacifique. Cependant elle suit une trajectoire un peu différente et présente surtout une amplitude bien plus grande puisque chaque période (chaude/froide) peut persister entre 20 et 30 ans. Elle peut donc expliquer des différences de températures atmosphériques à long terme. L'entrée de la PDO dans une phase chaude en 1977 coïncide avec l'augmentation de la température observée dans les Andes tropicales et avec le début de la phase de recul accéléré de la plupart des glaciers tropicaux.

- Le réchauffement climatique d'origine anthropique

Durant les 400 000 dernières années, le climat de la Terre a traversé plusieurs cycles de réchauffement et de refroidissement planétaire. Mais le réchauffement observé depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle est très rapide et cette fois-ci il ne serait pas uniquement d'origine naturelle mais serait accentué par l'activité humaine du fait de l'augmentation des gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère depuis l'ère industrielle. Au niveau mondial, on estime que l'augmentation de la température de la surface de la Terre a été de 0,74°C entre 1906 et 2005 et de 0,65°C rien que pour la période 1956-2005. Ce taux pourrait atteindre 1,8 à 4°C d'ici 2100 selon les différents scénarios établis par le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat).



**Figure 41 : Evolution de la température globale de 1880 à 2000**

*Différence de température globale moyenne de surface par rapport à la moyenne 1961-1990, sur la période 1880-2009*

Source : Science et vie

Au niveau des Andes tropicales, l'augmentation de la température a été estimée à  $0,68^{\circ}\text{C}$  entre 1939 et 1999 (Vuille and Bradley, 2000, Vuille et al. 2003), avec une augmentation plus importants depuis la fin des années 1970. Outre les conséquences directes que cette augmentation peut avoir sur les glaciers, elle peut avoir des influences sur les phénomènes océaniques et atmosphériques dont ceux que l'on a évoqués. Si l'on se reporte à l'indice MEI qui retrace les périodes ENSO (cf. Figure 39), on peut remarquer qu'à partir de la fin des années 1970, les événements El Niño sont à la fois plus fréquents et plus intenses que pour la période précédente. On peut suggérer qu'il s'agit là d'une des conséquences du réchauffement atmosphérique et de l'une des explications de l'accélération du recul des glaciers depuis 1980.

Les fluctuations des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi observées pour la période 1979-2010 sont, en conclusion, étroitement liés au climat. Cela s'observe bien lors d'événements climatiques de courte durée comme les événements ENSO où la réactivité des glaciers, notamment lorsqu'il s'agit d'événement intense, est nette : les glaciers marquent des avancées (La Niña) ou des reculs (El Niño). Mais plus largement, on peut associer le retrait marqué des glaciers (perte de 38 à 40% de la superficie entre 1979 et 2007) aux évolutions climatiques et en particulier au réchauffement atmosphérique qui s'observe depuis les années 1980.



## Conclusion

Les recherches menées sur les glaciers des Andes tropicales mettent en évidence un recul des glaciers depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle. Ce recul, plus ou moins rapide suivant les périodes, semble s'accélérer depuis les années 1980. Si tous les glaciers ne connaissent pas des variations synchrones et/ou d'ampleur similaire du fait de leur taille, de leur exposition ou de l'importance de leur zone d'accumulation, les résultats ont montré qu'ils suivent la même tendance.

En Équateur, les études menés par l'IRD et ses partenaires sur les bilans de masse et la géométrie des glaciers (longueurs, superficies, position du front des glaciers...) pour l'Antisana et le Cotopaxi mettent en évidence ce même constat : le Cotopaxi aurait perdu près de 40% de sa superficie glaciaire depuis 1976 et il est probable qu'il en soit de même pour l'Antisana, le glacier 15, ayant perdu 38,5% de sa surface pour la même période (Jordan E., 2003; Cáceres B. et al., 2008).

Les résultats obtenus à partir de la télédétection, dont la méthodologie a été présentée au cours de ce mémoire, aboutissent aux mêmes observations. Le travail, centré sur l'étude des variations des superficies de l'Antisana et du Cotopaxi, a pu apporter des résultats intéressants tout en démontrant l'intérêt que pouvait susciter l'exploitation des images satellitales pour l'étude de l'évolution des glaciers (fréquence des enregistrements, données disponible depuis la fin des années 1970, possibilité de réaliser des traitements numériques...). Nous avons néanmoins souligné les limites de la méthodologie qui peuvent avoir des origines techniques ou être liées à des phénomènes naturels.

L'étude de l'évolution des surfaces glaciaires permet, de rendre compte des évolutions du climat. Les glaciers constituent, en effet, l'un des meilleurs indicateurs de variabilité climatique et leur étude est privilégiée dans l'étude des changements climatiques. On sait aussi que les glaciers tropicaux sont de très bons indicateurs des oscillations de courte durée comme les phénomènes ENSO (El Niño/la Niña). Ceci permet d'étudier autant la variabilité climatique interannuelle que la variabilité climatique s'opérant à plus long terme (comme par exemple les oscillations climatiques de plus longue durée ou celles liées à des évolutions de paramètres climatiques notamment ceux concernant les températures atmosphériques).





Il serait intéressant de réaliser un suivi de l'évolution des bilans de masse à l'aide des données de télédétection comme cela est déjà effectué pour plusieurs autres glaciers du monde. En effet, les bilans de masse constituent un indicateur encore plus performant que celui de l'évolution des superficies puisque les variations de ces dernières peuvent dépendre de paramètres non climatiques liés à la dynamique propre à chaque langue glaciaire.

Enfin, nous pouvons conclure en rappelant l'intérêt de ces études et la mise en place de réseaux d'observation et de surveillance des glaciers au niveau international pour établir des bases de données permettant de mieux caractériser et de mieux connaître les glaciers eux mêmes, les mécanismes les contrôlant et la relation glacier-climat. Ce dernier point est d'autant plus important que l'on se trouve dans une situation assez préoccupante où l'on observe un recul généralisé des glaciers, dont le recul s'accélère depuis les années 1980, en partie du fait du réchauffement climatique. Dans ce contexte, il apparaît indispensable de pouvoir retracer et de comprendre les évolutions du climat, cela permet en effet de prévenir les conséquences que la fonte des glaciers peut provoquer sur les plans environnementaux, économiques et humains.



## Bibliographie

### Ouvrages :

BONN F., ROCHON G., 1992, *Précis de télédétection: Principe et méthodes*, Presse universitaire du Québec/AUPELF, Vol. 1, 485 p.

BONN F.J, 1994, *Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone*. Presses de l'Université du Québec et Agence de coopération culturelle et technique, 532 p.

CHUVIECO E., 1996, *Fundamentos de Teledetección Espacial* - 3<sup>ème</sup> édition, Madrid, Rialp, 568 p.

B.FRANCOU et C.VINCENT, 2007, *Les Glaciers à l'épreuve du climat*, IRD Editions - Editions Belin, 276 p.

GIRARD M.C., GIRARD C.M., 1999, *Traitement des données de télédétection*, Edition Dunod, 529 p.

LANDÍVAR C.B., 1977, *El clima y sus características en el Ecuador*, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Quito, 83 p.

ROBIN M., 1995, *La télédétection: des satellites aux systèmes d'information géographiques* Coll. fac géographie, Nathan Université, 320 p.

AVERY T.E., LENNIS G., 1992, *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 512 p.

### Rapports :

CÁCERES B.; RAMÍREZ J.; FRANCOU B.; EISSEN J.P.; TAUPIN J.D.; JORDAN E.; UNGERRECHTS L.; MAISINCHO L.; BARBA D.; CADIER E.; BUCHER R.; PEÑAFIEL A.; SAMANIEGO P.; MOTHES P., 2004 *Determinación del volumen del casquete de hielo del volcán Cotopaxi*, INAMHI, IRD, IG-EPN, INGEOMINAS, EMAAP-Q, Quito. 53 p.

CADIER E., MAISINCHO L., ULLOA D., MELLA R., MOTHES P., SCHAEFFER M., FRANCOU B., RIVERO D., JORDAN E., UNGERRECHTS L., BARBA D., DAVID E., SAMANIEGO P., 2007, Segunda campaña de mediciones de los glaciares del volcán Cotopaxi, 19 al 27 de enero 2007, Informe provisional, INAMHI; IRD-LGGE, IG-EPN, Instituto de Geofísica de la Escuela Politécnica Nacional CECS (Centro de Estudio de Glaciología y Cambio Climático Chile), Quito; 37 p.

CÁCERES B., MAISINCHO L., TAUPIN J.D., DECHAULUX F., CHAZARIN J.P., FRANCOU B., LAVAL R., CADIER E., 2006, *El glaciar 15 del Antisana (Ecuador). Balance de masa, topografía, meteorología, hidrología y balance de energía (año 2004)*. Informe IRD-INAMHI- EMAAP-Q, Quito, Ecuador, 164 p.

CÁCERES B., MAISINCHO L., MANCIATI C., LOYO C., CUENCA E., VILLACIS M., PAREDES D., GARCÉS A., LAVAL RÉMY, MAILLER S., BUCHER R., DELACHAUX F., FREIRE D., CHAZARIN JEAN-PHILIPPE, FRANCOU BERNARD, CADIER ERIC, 2007, *Glaciares del Ecuador : Antisana y Carihuayrazo : balance de masa, topografía, pluviometría, meteorología y hidrología : informe del año 2005*, Quito, IRD, INAMHI, EMAAP-Q, 140 p.

CÁCERES B., MAISINCHO L., MANCIATI C., LOYO C., CUENCA E., VILLACÍS M., FREIRE D., FRANCOU BERNARD, CADIER ERIC, GUAMANZARA C. (collab.), 2008, *Glaciares del Ecuador : Antisana y Carihuayrazo : balance de masa, topografía, pluviometría, meteorología e hidrología : informe del año 2006*, Quito, IRD, INAMHI, EMAAP-Q, 90 p.

CÁCERES B., MAISINCHO L., MANCIATI C., LOYO C., CUENCA E., ARIAS M., ROJAS M., FRANCOU B., VILLACÍS M., ROSERO S., CADIER E., GARRETA P., 2009, *Glaciares del Ecuador : Antisana y Carihuayrazo : balance de masa, topografía, pluviometría, meteorología e hidrología : informe del año 2007*, 126 p.

CACERES B., RAMIREZ J., FRANCOU B., EISSEN J.P., TAUPIN J.D, JORDAN E. UNGERRECH L., MAISINCHO L., BARBA D., CADIER E., BUCHER R., PENAFIEL A., SAMANIEGO P., MOTHE P., 2004, *Determinacion del volumen del casquete de hielo del volcan Cotopaxi*, IRD, IG-EPN, INGEOMINAS, INAMHI, EMAAP-Q, 54 p.

SOLOMON S., D. QIN, MANNING M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. AND MILLER H.L., 2007, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 810p.

USGS, NASA, LANDSAT 7 SCIENCE TEAM, 2003 "*Preliminary assessment of the value of Landsat 7 ETM+ data following Scan Line Corrector Malfunction*", 86 p.

## Articles

AMES A., KASER G. ZAMORA M., 1990, *Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru*, Annals of Glaciology, Vol. 14, pp. 136-40.

AMES A., HASTENRATH S., 1981, *Recession of Yanamarey Glacier in the cordillera Blanca, Peru, during the 20<sup>th</sup> century*, Journal of glaciology Vol.41, número 137, pp.191-196.

BERTHIER E., 2008, *Recul des glaciers de montagne : que nous apprennent les satellites ?* La Météorologie 32 - n° 63, 12p.

BERTHIER E., ARNAUD Y., RAJESH K., SARFARAZ A., WAGNON P., & CHEVALLIER P., *Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India)*. Remote Sensing of Environment, Vol. 108, número 3, pp. 327-338

CÁCERES B., 2003, *Estudio de la evolución del glaciar 15 del Antisana de 1956 al 2001 utilizando fotogrametría y topografía y su relación con los eventos climáticos regionales*, Revista Politécnica, Monografía de recursos minerales 2, Volumen 24, Número 2.

CÁCERES B., JORDAN E., FRANCOU B., PEÑAFIEL A., 2007, *Actualización de la evaluación geométrica del Casquete Glaciar del Volcán Cotopaxi, utilizando fotogrametría digital*,. Revista Oro y Petróleo, Colegio de Ingenieros en Geología Minas y Petróleo

CACERES B., FRANCOU B., FAVIER V., BONTRON G., TACHKER P., BUCHER R., TAUPIN J-D., VUILLE M., MAISINCHO L., DELACHAUX F., CHAZARIN J- P., CADIER E., VILLACIS M., *El glaciar 15 del Antisana : investigaciones glaciológicas y su relación con el recurso hídrico = Glacier 15, Antisana, Ecuador : its glaciology and relations to water resources*, publié suite au Congrès: Climate variability and change : hydrological impacts , Flow Regimes from International Experimental and Network Data N°5, La Havane , CUBA (2006), IAHS Publ. 308, pp. 479-482.  
*climate change in the tropical Andes: observations and model results*, Climatic Change, Vol. 59(1-2), pp. 75-99.

DEDIEU J-P , BORNICCHIA F., KERKACHE R., PELLA H., 1997, *Apport des informations de texture en télédétection pour l'étude de l'occupation des sols*, Revue de géographie alpine Vol. 85, Numéro 85-3, pp. 9-26.

DEDIEU J.-P, REYNAUD L., 1991, *Télédétection appliquée aux bilans glaciaires dans les Alpes françaises*, Photo interprétation, vol. 30, n°2, pp. 55-59.

DOZIER J. 1989: *Spectral signature of alpine snow cover from Landsat 5 TM*, Remote Sensing of Environment, Vol.28, pp. 9-22.

DOZIER J., MARKS D. 1987, *Snow mapping and classification from Landsat Thematic Mapper data*, Annals of Glaciology, Volume 9, 97-103.

DOZIER J., 1984, *Snow reflectance from Landsat 4 Thematic Mapper*, Geoscience and Remote Sensing, Vol. 22, pp.323-328.

- ESCOBAR F., CASASSA G., POZO V., 1995, *Variaciones de un glaciar de montaña en los Andes de Chile central en las últimas dos décadas*, Boltín del Instituto Francés de Estudios Andinos, Vol. 24, número 3, pp. 683-695.
- FRANCOU B., VUILLE M., WAGNON P., SICART J. E., MENDOZA J. 2003, *Tropical climate change recorded by a glacier during the last decades of the XXth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°*. Journal of Geophysical Research , Vol.108
- FRANCOU, B., E. RAMIREZ, B. CÁCERES, B. & J. MENDOZA, 2000, *Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century. Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador*, Ambio, Vol 29, pp. 416-422.
- FRANCOU, B., VUILLE, M., FAVIER, V. & CÁCERES, B., 2004: *New evidences of ENSO impacts on glaciers at low latitude : Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'*, Journal of Geophysical Research, Vol.109.
- FRANCOU. B, 2000, *Les glaciers, indicateurs de la variabilité climatique dans les Andes tropicales, un programme de recherche de l'IRD (Ex ORSTOM)*, Revue de Géographie alpine Vol 88, pp 129-136.
- GRATTON D. J., HOWARTH P. J. AND MARCEAU D. J., 1990, *Combining DEM parameters with Landsat MSS and TM imagery in a GIS for mountain glacier characterization*, Geosciences and Remote Sensing, Vol. 28, pp.766-769.
- HALL F.G., HUENNRICH K.F., GOETZ S.J., SELLERS P.J., and NICKESON P.J., 1992. *Satellite remote sensing of surface energy balance : success, failures and unresolved issues* , Journal of Geophysical Research, Vol. 97, número 17, pp 19061-19089.
- HALL D. K., BENSON, C. S. AND FIELD, W.O.1995, *Changes of glaciers in Glacier Bay, Alaska, using ground and satellite measurements*, Physical Geography, Vol. 16, pp.27 - 41.
- HALL D.K., ORMSBY, J. P., BINDSCHADLER, R. A., SIDDALINGAIAH, H. 1987: *Characterization of snow and ice zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data*, Annals of Glaciology, 9, 104-108.
- HASTENRATH S., 1981, *The glaciation of the Ecuadorian Andes*: Rotterdam, A.A. Balkema Publishers, 159 p.
- HASTENRATH S.,1987, *Continued decrease of ice-flow velocity at Lewis glacier, Mount Kenya, East Africa*, Journal of Glaciology, Vol 33, Numéro 113
- HAYLOCK, M.R., PETERSON T., ALVES L.M., AMBRIZZI T., ANUNCIACÃO Y.M.T, BAEZ J., BARROS V.R., BERLATO M.A. and Co-authors, 2006, *Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature*. Journal of Climate, Vol. 19, 1490-1512.
- JORDAN, E., UNGERRECHTS, L., CÁCERES, B., PEÑAFIEL, A., FRANCOU, B., 2005, *Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997*. Hydrological Sciences, Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 50; número 6, pp. 949-961.
- ØSTREM, G. 1975: *ERTS - 1 data in glaciology - an effort to monitor glacier mass balance from satellite imagery*, Journal of Glaciology, 15, pp.403-415.
- POURRUT P. sous la direction de. 1994, *L'eau en Equateur : principaux acquis en hydroclimatologie*, Collection Etudes et thèses, Edition de l'ORSTOM, 147 p.
- POURRUT P., GOMEZ G., 1998, *Variations climatiques et ressources en eau en Amérique du Sud : importance et conséquences des événements El Niño*, Bulletin de l'Institut Français des Etudes Andines, tome 27, número 3, p 449-457.
- POUYAUD B., 2005, *Glaciers of the Tropical Andes: Indicators of the Global Climate Variability*, in Global Change and Mountain Regions: A state of knowledge overview, pp. 197-204.

POVEDA G., Pineda K., 2009, *Reassessments of Colombia's tropical glacier retreat rates: are they bound to disappear during the 2010-2020 decade?*, *Advances in Geosciences*, Vol. 22, pp. 107-116.

RABATEL A., J-P. DEDIEU, L. REYNAUD, 2002, *Suivi du bilan de masse glaciaire par télédétection : application au Glacier Blanc (Massif des Ecrins, France) entre 1985 et 200*, *Revue de géographie alpine*, Vol 90, pp. 99-109.

RACOVITEANU A., ARNAUD Y., WILLIAMS M.W., J.ORDONEZ, 2008, *Decadal Changes in Glacier Parameters in the Cordillera Blanca, Peru*, *Remote Sensing, Journal of Glaciology* 54 (186), pp. 499-510.

RAHMAN H., DEDIEU G., 1994, *SMAC : a Simplified Method for the Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum*, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.16, 123-143.

RAUP B, RACOVITEANU A., SINGH KHALSA S. J., HELM C., ARMSTRONG R, ARNAUD Y., 2007, *The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change*, *Global and Planetary Change*, Volume 56, Issues 1-2, pp. 101-110.

ROTT, H. 1976, *Analyse der Schneeflächen auf Gletschern der Tiroler Zentralalpen aus Landsat Bildern*, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 12, 1-28.

ROTT, H. 1994: *Thematic studies in alpine areas by means of polarimetric SAR and optical imagery*, *Advances in Space Research*, 14, 217-226.

SIDJAK, R. W. AND WHEATE, R. D. 1999: *Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data*, *International Journal of Remote Sensing*, 20, 273-284.

THOMPSON G., MOSLEY E., and MORALES ARNAO B., 1984, *El Niño - Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya ice cap, Peru*. *Science*, Vol 226, numéro 4670 pp. 50-53.

VINCENT C., 2002, *Fluctuations des bilans de masse des glaciers des alpes françaises depuis le début du 20ème siècle au regard des variations climatiques*, *La Houille Blanche*, Vol.8, 5p.

VINCENT C., RIBSTEIN P., FAVIER V., WAGNON P., FRANCOU B., LE MEUR E., SIX D., 2005, *Glacier fluctuations in the Alps and in the Tropical Andes*, *Geosciences, Comptes-rendus Géoscience de l'Académie des Sciences*, 337, pp.97-106.

VUILLE M, FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B., BRADLEY, R., 2008, *Climate change and tropical Andean glaciers: past, present and future*, *Earth-Science Review*, Volume 89, pp. 79-96.

VUILLE M., BRADLEY R.S., WERNER M., KEIMIG F., 2003: *20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results*, *Climatic Change*, Vol. 59 (1-2), pp. 75-99.

WILLIAMS, R. S., JR., HALL, D. K. AND BENSON, C. S. (1991), *Analysis of glacier facies using satellite techniques*, *Journal of Glaciology*, 37, 120-127.

## Thèses universitaires

FAVIER V. 2004. *Etude du bilan d'énergie de surface et de la production des écoulements de fonte d'un glacier des Andes d'Equateur: Relation glacier-climat en zone tropical*, Thèse Université de Montpellier II, 243p.

PAUL, F. (2004): *The new Swiss glacier inventory 2000 - Application of remote sensing and GIS*. PhD Thesis, Department of Geography, University of Zurich, 198 p.

SORUCO A. 2008 *Etude du retrait des glaciers depuis cinquante ans dans les bassins hydrologiques alimentant en eau la ville de La Paz en Bolivie (16°S)*, Thèse Université Joseph Fournier Grenoble, 244p.

VILLACIS, M.,2008, *Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Cas du volcan Antisana*, Thèse Université Montpellier II, 219 p.

## Sites Internet

Centre Canadien de Télédétection (CCT) : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>

Centre national de la recherche scientifique: <http://www.cnrs.fr>

Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento: <http://www.emaapq.gov.ec>

Site internet éducatif pour la découverte de l'observation de la Terre par satellite : <http://www.eoedu.belspo.be>

European Space Agency (ESA) : <http://www.esa.int>

Global Land Ice Measurements from Space : <http://www.glims.org>

Google : <http://www.google.fr>

Google Earth: <http://www.earth.google.com>

Institut de Recherche pour le Développement : <http://www.ird.fr>

Instituto Geofísico – Escuela Politécnica Nacional : <http://www.igepon.edu.ec>

Instituto Nacional de Meteorología en Hidrología : <http://www.inamhi.gov.ec>

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement : <http://www.lgge.ujf-grenoble.fr>

Maison de la télédétection : <http://www.teledetection.fr>

Ministerio del Ambiente Ecuador : <http://www.ambiente.gob.ec>

National Oceanic and Atmospheric Administration: <http://www.noaa.gov/>

Science Direct : <http://www.sciencedirect.com>

Science et vie : <http://www.science-et-vie.com>

The USGS Global Visualization Viewer: <http://glovis.usgs.gov>

The Landsat program : <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

United States Geological Survey: <http://www.usgs.gov>





# Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| Remerciements   | 3         |
| Préambule   | 5         |
| Sommaire  | 7         |
| Introduction  | 9         |
| <b>PARTIE 1 : LE CONTEXTE SCIENTIFIQUE ET GEOGRAPHIQUE</b>  | <b>13</b> |
| <b>1.1 Présentation de la structure d'accueil et des programmes de recherche dans lesquels s'inscrit le stage</b>                                     | <b>13</b> |
| 1.1.1 L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD)   | 13        |
| 1.1.2 Le programme de recherche « Glaciers et Ressources en Eau dans les Andes Tropicales - Indicateurs climatiques et environnementaux » (GREAT ICE) | 14        |
| 1.1.3 Présentation des objectifs du stage   | 16        |
| <b>1.2 Présentation de la zone d'étude</b>  | <b>17</b> |
| 1.2.1 Généralités sur l'Équateur  | 17        |
| 1.2.2 Les Andes équatoriennes, l'Antisana et le Cotopaxi  | 19        |
| <b>1.3 Les programmes de recherches effectués et en cours sur la zone d'étude</b>   | <b>24</b> |
| 1.3.1 Les glaciers 12 et 15 de l'Antisana, un suivi régulier depuis 1994  | 24        |
| 1.3.2 Étude des glaciers du Cotopaxi par photogrammétrie  | 26        |
| <b>PARTIE 2 : APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LE SUIVI DE L'ÉVOLUTION DES CALOTTES GLACIAIRES</b>   | <b>29</b> |
| <b>2.1 Définitions, historique et principes de bases de la télédétection</b>  | <b>30</b> |
| 2.1.1 Définition et historique de la télédétection  | 30        |
| 2.1.2 Principes de base de la télédétection   | 32        |
| <b>2.2 La télédétection : un outil pertinent pour l'étude des glaciers de montagnes</b>   | <b>36</b> |
| 2.2.1 Avantages de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des glaciers de montagnes   | 36        |
| 2.2.2 Exemples d'applications de la télédétection à l'étude des glaciers de montagnes   | 37        |
| <b>PARTIE 3 : DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.1 Présentation des données et des outils</b>   | <b>41</b> |
| 3.1.1 Les images satellitales issues du capteur Landsat   | 41        |
| 3.1.2 Autres types de données utilisées et/ou consultées  | 45        |
| 3.1.3 Les outils utilisés   | 46        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.2 Méthodologie</b>  | <b>47</b> |
| 3.2.1 Prétraitements des images  | 47        |
| 3.2.2 Amélioration des images et combinaisons de bandes spectrales   | 49        |
| 3.2.3 Classification et calculs d'indices permettant de discriminer les surfaces englacées des autres surfaces                       | 51        |
| <b>3.2 Les difficultés rencontrées</b>   | <b>55</b> |
| 3.3.1 Données manquantes du fait de la défaillance du capteur  | 55        |
| 3.3.2 Une différenciation neige/glace délicate   | 56        |
| 3.3.3 Influence de l'activité géothermique sur les glaciers du Cotopaxi  | 57        |
| <br>   |           |
| <b>PARTIE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>  | <b>59</b> |
| <br>   |           |
| <b>4.1 Evaluation des résultats</b>  | <b>59</b> |
| 4.1.1 Calculs des erreurs liés à la taille des pixels  | 59        |
| 4.1.2 Comparaison des résultats obtenus à partir de méthodes différentes   | 61        |
| <br>   |           |
| <b>4.2 Analyse des variations de superficie des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi de 1979 à 2010</b>                             | <b>63</b> |
| 4.2.1 Cas du Cotopaxi  | 64        |
| 4.1.2 Cas de l'Antisana  | 68        |
| <br>   |           |
| <b>4.3 Quels liens avec le climat ?</b>  | <b>71</b> |
| 4.3.1 Des glaciers très sensibles aux oscillations climatiques de courte durée   | 71        |
| 4.3.2 L'évolution du climat et l'accélération du recul des glaciers depuis les années 1980 : des origines naturelles et anthropiques | 74        |
| <br>   |           |
| Conclusion   | 79        |
| Bibliographie  | 87        |
| Table des matières   | 89        |
| Table des figures  | 91        |
| Tables des tableaux  | 92        |
| Annexes  | 93        |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Principaux glaciers étudiés dans le cadre du programme GREAT ICE  | 14 |
| Figure 2: Évolution de la longueur et de la surface de dix glaciers tropicaux des Andes de 1930 à 2006  | 15 |
| Figure 3 : Carte de l'Équateur (sans l'Archipel des Galápagos)  | 18 |
| Figure 4: Localisation des volcans de l'Antisana et du Cotopaxi   | 19 |
| Figure 5: Températures et précipitations moyennes au niveau du Cotopaxi   | 20 |
| Figure 6 : L'Antisana   | 21 |
| Figure 7 : Le páramo  | 21 |
| Figure 8: Apport d'eau d'origine glaciaire  | 22 |
| Figure 9: Le sommet du Cotopaxi   | 22 |
| Figure 10 : Roches volcaniques du Cotopaxi  | 23 |
| Figure 11: Les glaciers 12 et 15 de l'Antisana  | 24 |
| Figure 12: Station météorologique installée à 4 800 mètres sur le Cotopaxi  | 25 |
| Figure 13: Étude des superficies glaciaires du Cotopaxi à partir de la photogrammétrie  | 27 |
| Figure 14 : Le processus de télédétection   | 33 |
| Figure 16: Le spectre électromagnétique   | 34 |
| Figure 15: Schéma d'une onde électromagnétique  | 34 |
| Figure 17: Signatures spectrales de l'eau, de la végétation et du sol   | 35 |
| Figure 18 : Images satellitales et glaciers   | 38 |
| Figure 19: La couverture de l'Équateur par le satellite Landsat   | 42 |
| Figure 20 : Carte de situation de la scène Landsat étudiée  | 42 |
| Figure 21: Schéma de la méthodologie appliquée pour l'étude des superficies glaciaires  | 47 |
| Figure 22 : Décalages géométriques entre les images Landsat de capteurs différents  | 48 |
| Figure 23: Exemple de combinaisons colorées   | 50 |
| Figure 24 : Classification supervisée de l'image Landsat du 2/02/1979, capteur MSS  | 52 |
| Figure 25: Composition colorée et NDSI  | 53 |
| Figure 26 : Génération du NDSI et définition de seuils  | 54 |
| Figure 27 : Un manque d'information due à une défaillance du capteur du satellite Landsat 7   | 55 |
| Figure 28 : Une différenciation neige/glace délicate  | 56 |
| Figure 29 : Découpage retenu pour l'étude des langues glaciaires de l'Antisana  | 57 |
| Figure 30: Découpage du Cotopaxi permettant de prendre en compte l'activité volcanique enregistrée depuis 2001  | 58 |
| Figure 31: Évolution de la superficie glaciaire du glacier 15 entre 1996 et 2007 à partir de deux méthodes : mesures sur le terrain et estimation par télédétection | 62 |
| Figure 32 : Évolution de la superficie des glaciers de l'Antisana et du Cotopaxi entre 1979 et 2009   | 63 |
| Figure 33: Évolution de la superficie totale du Cotopaxi entre 1979 et 2009   | 64 |
| Figure 34: Évolution de l'activité volcanique du Cotopaxi depuis 1996   | 65 |
| Figure 35: Évolution des glaciers du Cotopaxi par secteur entre 1979 et 2010  | 67 |
| Figure 36: Évolution de la superficie de la calotte glaciaire de l'Antisana   | 68 |
| Figure 37: Évolution de la superficie de quelques langues glaciaires  | 70 |
| Figure 38: Les événements ENSO de 1950 à 2010 (Multivariate Enso Index, MEI)  | 72 |
| Figure 39: Évolution des températures au niveau de l'Antisana de 1979 à 2009 et lien avec les épisodes El Niño/La Niña  | 73 |
| Figure 41: Evolution des températures de 1949 à 2007 enregistrées par la station météorologique ORE (Antisana)  | 75 |
| Figure 42 : Evolution de la température globale de 1880 à 2000  | 76 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1: Évolution de la superficie du glacier 15 de l'Antisana entre 1956 et 2007</b>  | 26 |
| <b>Tableau 2 : Liste des images Landsat exploitables pour l'étude</b>  | 44 |
| <b>Tableau 3: Erreur relative estimée pour le calcul des superficies glaciaires</b>  | 60 |
| <b>Tableau 4: Erreur relative estimée pour le calcul des superficies glaciaires</b>  | 61 |
| <b>Tableau 5 : Comparaison de résultats obtenus pour le calcul de la superficie du glacier 15 à partir de deux méthodes : mesures sur le terrain et estimation par télédétection</b> | 62 |
| <b>Tableau 6: Une diminution des glaciers irrégulière dans le temps</b>  | 65 |
| <b>Tableau 7: Évolution des superficies glaciaires du Cotopaxi par secteur entre 1979 et 2010</b>  | 66 |
| <b>Tableau 8: Un recul plus marqué pour le versant Est</b>   | 67 |
| <b>Tableau 9: Rythme de l'évolution des superficies glaciaires de l'Antisana</b>   | 69 |
| <b>Tableau 10: Évolution de quelques langues glaciaires de l'Antisana entre 1956 et 2010</b>   | 69 |
| <b>Tableau 11: Impact des événements El Niño/La Niña sur les langues glaciaires de l'Antisana entre 1996 et 2010</b>   | 74 |

# ANNEXES

## Listes des annexes

### **Annexe 1 :**

Description du programme de la Jeune Équipe Associée à l'IRD (JEAI) IMAGE

### **Annexe 2:**

Listes des images Landsat enregistrées et disponibles sur le serveur USGS – Glovis

### **Annexe 3 :**

Images Landsat retenues pour l'étude

### **Annexe 4 :**

Défaillance du capteur Landsat 7 depuis mai 2003: exemple de tracé réalisé pour délimiter les surfaces glaciaires de l'Antisana

### **Annexe 5 :**

Évolution des surfaces et des périmètres des langues glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi entre 1979 et 2010 (résultats obtenus par télédétection)

### **Annexe 6:**

Évolution des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi de 1979 à 2007

### **Annexe 7 :**

Évolution des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi par langues glaciaires et par secteurs de 1979 à 2010



**Annexe 1 : Description du programme de la Jeune Équipe Associée à l'IRD  
(JEAI) IMAGE**



Institut de recherche  
pour le développement

**Programme Jeunes Equipes associées à l'IRD (JEAI)**

**Appel à proposition 2008**

**Equipe**

|  |                 |
|--|-----------------|
| Acronyme : <b>IMAGE</b>  | Pays : Equateur |
| Nom : <b>Identification et Modélisation des ressources en eau d'Altitude en fonction des variations du climat : vers la Gestion intégrée de l'eau dans les andes de l'Equateur</b> |                 |
| Date de création : Septembre 2008  |                 |
| Nom/prénom du responsable : VILLACIS Marcos  |                 |
| Nombre de chercheurs statutaires : 6   |                 |
| Nombre de doctorants associés : 1 Doctorant et 6 master  |                 |
| Budget total demandé : 59 K€   |                 |
| Institution de rattachement : Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN)   |                 |
| Institution de rattachement : Instituto Geofísico (IG) de la EPN   |                 |
| Institution de rattachement : Departamento de Geología (DG) de la EPN  |                 |
| Institution de rattachement : Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)   |                 |

**Unité de recherche de l'IRD partenaire (jusqu'au 31 décembre 2008, puis projet du LMI « Great Ice »)**

|  |                     |
|--|---------------------|
| Nom : Glaciers et Ressources en Eau d'Altitude : Indicateurs de Changements Environnementaux                                 | Acronyme : GREATICE |
| Code : 032   |                     |
| Nom/prénom du directeur : Bernard Francou  |                     |
| Nom/prénom du correspondant de l'équipe : Eric Cadier  |                     |
| Lieu et structure d'implantation : HSM Montpellier (jusqu'au 31 décembre 08), puis LTHE et LGGE (Grenoble) + HSM Montpellier |                     |
| Ancienneté du partenariat avec (le noyau ancien de) l'équipe : <b>depuis 1994.</b>   |                     |

**Programme de recherche**

|   |
|---|
| Titre du programme de recherche : <b>Ressource en eau d'altitude dans les Andes de l'Equateur : Aléas climatique et glacio-volcanique</b>   |
| Mots-clés : Glacier, Climat, Ressource en eau, Risque glacio-volcanique, Tropiques, Andes, Equateur   |
| <b>Résumé du Programme de Recherche</b>   |
| L'objectif de cette JEA est a) d'ouvrir un nouveau champ de recherche complétant les travaux réalisés par l'Unité Greatice R032 (prochainement séparée entre HSM et le LTHE) et et renforçant le futur LMI "Greatice", et b) de regrouper des chercheurs autour de nouvelles recherches et techniques dans les domaines suivants:   |
| <u>i) Processus glacio-hydro-météorologiques et leur rôle dans la ressource en eau</u>  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Evolution spatio-temporelle des couvertures glaciaire et nivales depuis 50 ans et projections futures</li><li>• Ressources hydriques de bassins d'altitude à forte/faible couverture glaciaire.</li><li>• Ressources hydriques de bassins d'altitude sans glaciers (páramos).</li></ul>   |
| <u>ii) Conséquences du changement climatique</u> : Modélisation de l'évolution des ressources en eau des bassins d'altitude en fonction des divers scénarios (GIEC) du changement climatique  |
| <u>iii) Risque glacio-volcanique</u> : Amélioration de l'estimation du volume des glaciers et et l'intensité des lahars du Cotopaxi par des techniques géophysiques (radar) et le croisement de données glacio-volcanologiques (SIG)  |
| Les chercheurs se regrouperont autour d'outils qu'il faudra développer ou renforcer et qui seront des pôles de formation  |
| <ul style="list-style-type: none"><li>• Un laboratoire de photogrammétrie/téledétection, ses équipements, ses logiciels et son savoir faire</li><li>• Des techniques de modélisation hydro-glaciologique et de flux de lahars</li><li>• Des techniques plus spécifiques comme le GPR (Ground Penetration Radar) qui permettent de sonder/mesurer l'épaisseur des glaciers ou des différentes couches des lahars, des mesures de variations isotopiques de la glace, de l'eau de pluie, des rivières ou souterraines et des mesures de météorologie fines (flux turbulents et radiatifs pour modéliser la fonte, l'ETP etc.)</li></ul> |
| <b>Liens et cohérence avec le programme de recherche de l'Unité de recherche IRD partenaire:</b>  |
| L'UR 032 Greatice a démarré ses recherches en Equateur (région clef pour la compréhension des mécanismes du climat)   |

en 1994 et y a obtenu des résultats déterminants (par exemple les processus de fonte de surface, la relation entre le recul des glaciers et "El Niño" dans le Pacifique ou avec le réchauffement de ces 30 dernières années), qui ont été publiés au plus haut niveau.

Greatice, maintenant séparée entre deux UMR (HSM et LTHE), continuera à assurer le fonctionnement du site de l'ORE Glacioclim à l'Antisana avec ses partenaires traditionnels (l'INAMHI et l'EMAAP-Q) qui sont associés, avec l'EPN, dans un LMI (appelé aussi "Greatice"), porté par Bernard Francou, qui vient d'être déposé.

Un bilan des activités de Greatice sur 12 ans montre deux lacunes: i) les données obtenues portent sur un site (Antisana), alors que des techniques, comme la photogrammétrie permettent d'étendre les recherches pour estimer les surfaces/volumes des glaciers et de leur variations à d'autres massifs ii) une formation (doctorat, masters) limitée à quelques individus qu'il faut étendre à l'échelle d'une équipe

Greatice qui prévoit de continuer avec ses partenaires "historiques" (INAMHI et EMAAP-Q) son ORE Glacioclim (mesures sur ses glaciers instrumentés), en hydrologie (effort porté vers la modélisation) et prévoit de participer aux activités de la JEAI IMAGE qui se concentreront justement sur les deux lacunes signalées : spatialisation par photogrammétrie/télé-détection/SIG et formation d'une équipe scientifique équatorienne autour de ces thèmes

Greatice contribuera aussi à la modélisation glaciers/climat/hydrologie en mettant à disposition ses données et à à disposition et en faisant appel aux compétences de ses partenaires (LGGE) etc.

Ces thèmes sont porteurs, les réflexions avancées et les données à disposition, ce qui permettra d'arriver rapidement à des publications. La conjoncture est particulièrement favorable (i) retour en Equateur de Marcos Villacis, avec lequel nous travaillons depuis 8 ans, (ii) centrage de l'équipe dans une grande université équatorienne (Escuela Politecnica Nacional-EPN), (iii) financement acquis d'une partie du projet par la SENACYT (équivalent de l'ANR en Equateur) et surtout (iv) la présence d'un vivier d'étudiants (il y a actuellement 6 étudiants en maîtrise autour de Greatice)

Greatice pourra intervenir en appui, par des missions de chercheurs français, par des stages, des encadrements de maîtrises et de thèses auprès de jeunes chercheurs équatoriens.

L'appui de chercheurs à la partie "lahars" de l'IG apportera des compétences indispensables dans ce domaine.

Greatice et IMAGE seront donc complémentaires et s'appuieront mutuellement

#### **Autres activités (formation, animation scientifique, valorisation-transfert)**

##### **Résumé du projet d'équipe en matière de formation, animation scientifique, valorisation-transfert**

Formation: Un des objectifs principaux de la JEAI IMAGE est de constituer une équipe de recherche stable dans le domaine de la glaciologie/hydrologie des bassins d'altitude, qui aurait vocation, à son terme, de prendre à son compte une partie de l'héritage de l'équipe IRD Greatice, organisée (ou pas) en LMI. Potentiel vivier pour cette JEAI, six étudiants équatoriens suivent actuellement un master dans notre thématique (quatre dans le cadre du projet Prefalc développé à Quito par l'EPN et l'Université de Nice-Sofia-Antipolis et deux à Greatice-HSM et l'EPN). Sans compter, l'implication des deux ingénieurs de l'INAMHI qui sont formées aux côtés de Greatice depuis huit ans.

Des chercheurs de l'UR Greatice (B. Francou, E. Cadier, P. Wagnon, J.D. Taupin, E. Sicart), de la Jeune Equipe de Bolivie GRANT (E. Ramirez), Equatoriens (IGM, EPN), d'autres Universités françaises (JP. Dedieu (LTHE) ou C. Vincent (LGGE)), tous candidats à participer au LMI Greatice ont manifesté leur intérêt pour ce projet et pourront participer à son encadrement ou à son partenariat.

Animation scientifique: Dans sa thèse, Marcos Villacis a abordé la plupart des thèmes proposés par IMAGE ce qui le qualifie pour coordonner et animer ce projet.

Cette JEAI, à l'instar de la JEAI GRANT en Bolivie, viendra renforcer le réseau latino-américain du Groupe de Travail Neige et Glaciers tropicaux (GTNH) créé avec l'appui de l'IRD et de l'UNESCO en 2004.

Valorisation transfert : Le changement climatique, le recul des glaciers et l'évolution des ressources en eau constituent l'une des préoccupations majeures en Equateur. De ce fait ils bénéficient de l'intérêt et de l'appui d'institutions comme l'EMAAP-Q chargée de l'alimentation en eau de la ville de Quito, le Ministère de l'environnement et l'INAMHI (chargés des problèmes liés au changement climatique, la Banque Mondiale soucieuse de mieux connaître et de réduire les coûts induits par le changement climatique.

Ces institutions seront attentives aux résultats d'IMAGE, (évolutions des ressources en eau, risque) pour pouvoir les valoriser pour le développement.



**Annexe 2: Listes des images Landsat enregistrées et disponibles  
sur le serveur USGS – Glovis**

| Année             | Nombre d'images | Satellite      | Type de capteur |
|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1977              | 1               | Landsat 2      | MSS             |
| 1978              | -               | -              | -               |
| 1979              | 3               | Landsat 2 et 3 | MSS             |
| 1980              | -               | -              | -               |
| 1981              | -               | -              | -               |
| 1982              | -               | -              | -               |
| 1983              | -               | -              | -               |
| 1984              | 1               | Landsat 4 et 5 | MSS             |
| 1985              | 12              | Landsat 4 et 5 | MSS, TM         |
| 1986              | 19              | Landsat 4 et 5 | MSS, TM         |
| 1987              | 16              | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1988              | 4               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1989              | 5               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1990              | 8               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1991              | 14              | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1992              | -               | -              | -               |
| 1993              | -               | -              | -               |
| 1994              | -               | -              | -               |
| 1995              | -               | -              | -               |
| 1996              | 9               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1997              | 8               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1998              | 7               | Landsat 4 et 5 | TM              |
| 1999              | 18              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2000              | 31              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2001              | 24              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2002              | 19              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2003              | 11              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2004              | 16              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2005              | 13              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2006              | 20              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2007              | 17              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2008              | 17              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2009              | 19              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |
| 2010 (janv-avril) | 10              | Landsat 5 et 7 | TM, ETM         |

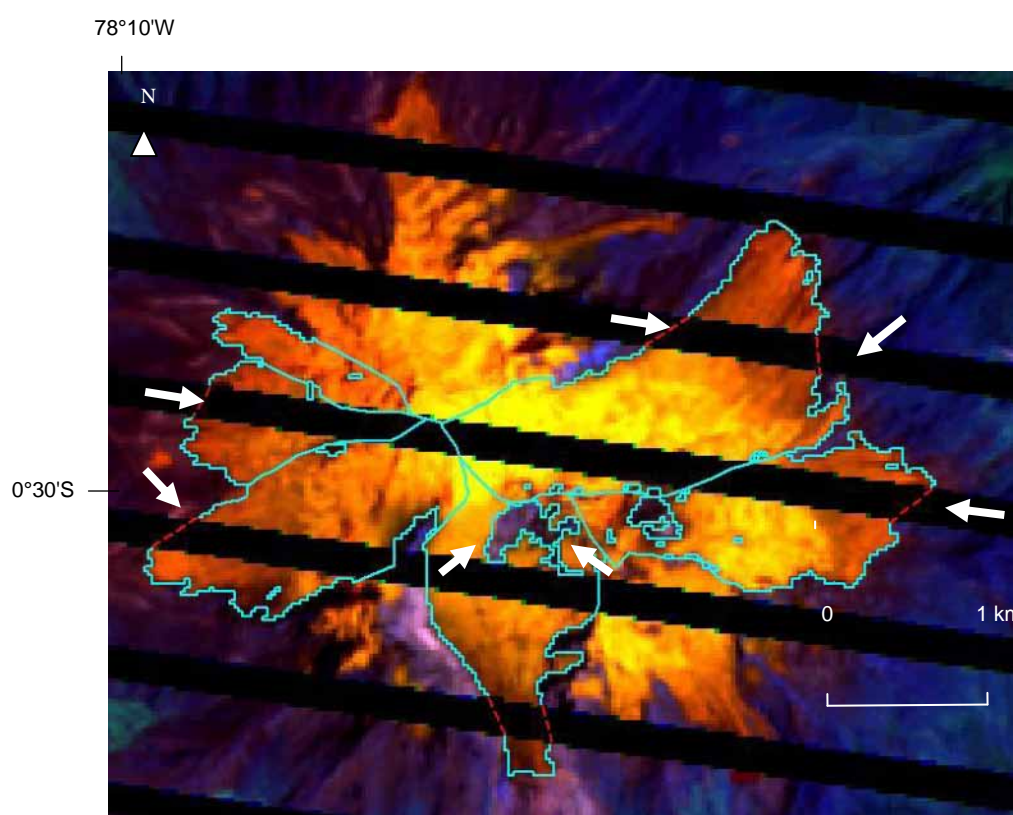
### Annexe 3 : Images Landsat retenues pour l'étude

| ID                        | CC* | Date       | Type de capteur |
|---------------------------|-----|------------|-----------------|
| ID: LM20100601979035AAA03 | 20% | 04/02/1979 | MSS             |
| ID: LT50100601987085XXX05 | 20% | 26/03/1987 | TM              |
| ID: LT40100601987317XXX03 | 60% | 13/11/1987 | TM              |
| ID: LT50100601991288XXX02 | 40% | 15/10/1991 | TM              |
| ID: LT50100601996254XXX01 | 40% | 10/09/1996 | TM              |
| ID: LT50100601996286XXX01 | 40% | 10/12/1996 | TM              |
| ID: LT50100601998355XXX01 | 30% | 21/12/1998 | TM              |
| ID: LE70100601999318EDC00 | 40% | 14/11/1999 | ETM+            |
| ID: LE70100602001003EDC00 | 44% | 03/01/2001 | ETM+            |
| ID: LE70100602001307EDC00 | 37% | 03/11/2001 | ETM+            |
| ID: LE70100602004028ASN01 | 29% | 28/01/2004 | ETM+ SLC-off ** |
| ID: LE70100602007036EDC00 | 40% | 05/02/2007 | ETM+ SLC-off ** |
| ID: LE70100602009249ASN00 | 41% | 06/09/2009 | ETM+ SLC-off ** |
| ID: LE70100602010012EDC00 | 70% | 12/01/2010 | ETM+ SLC-off ** |

\*CC: Couverture nuageuse

\*\*ETM + SLC-off: défaillance du capteur, information manquante

### Annexe 4 : Défaillance du capteur Landsat 7 depuis mai 2003 : exemple de tracé réalisé pour délimiter les surfaces glaciaires de l'Antisana



Extrait de l'image Landsat du 28/01/2004, capteur ETM+

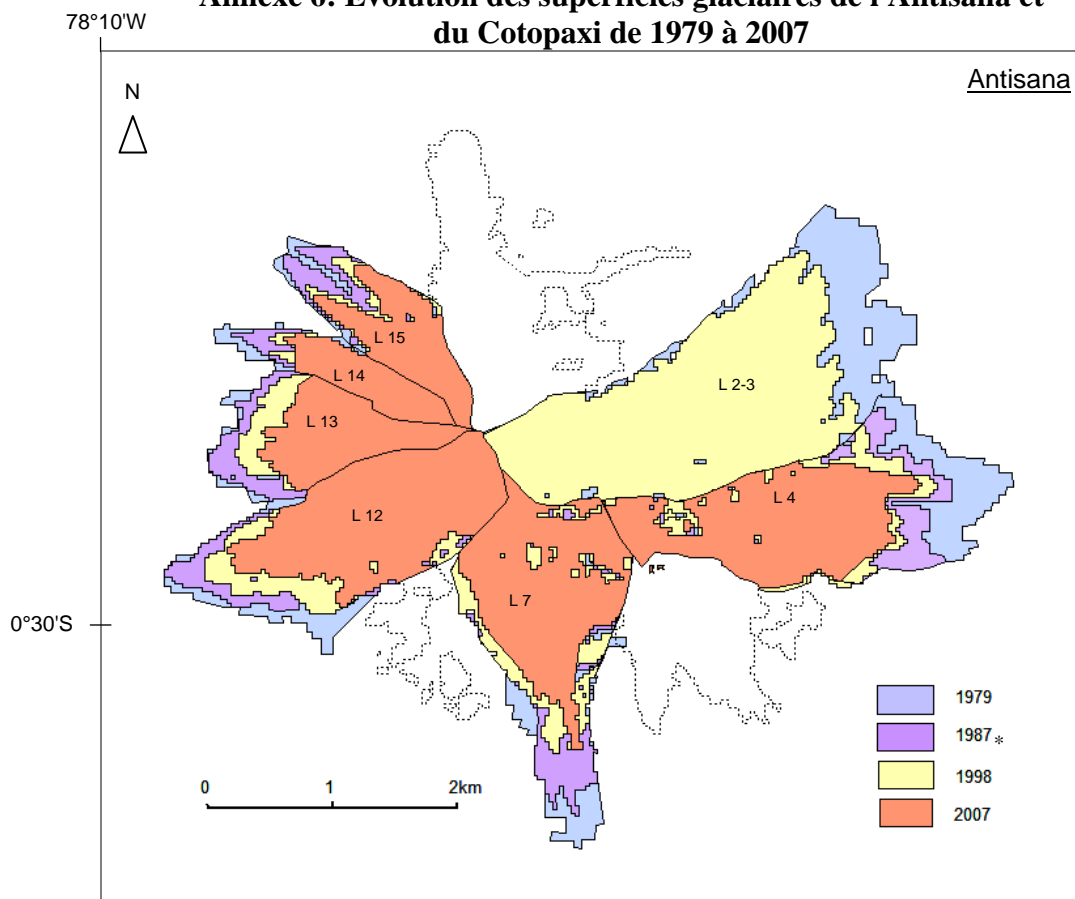
**Annexe 5 : Évolution des surfaces et des périmètres des langues glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi entre 1979 et 2010**

|               | Langues 2 et 3                |                  | Langue 4                      |                  | Langue 7                      |                  | Langue 12                     |                  | Langue 13                     |                  | Langue 14                     |                  | Langue 15                     |                  | Superficie totale             |                  |   |
|---------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|---|
|               | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) |   |
| <b>1979</b>   | 4                             | 13,64            | 2,6                           | 9,34             | 2,16                          | 10,98            | 2,35                          | 8,07             | 1,14                          | 5,86             | 0,6                           | 3,52             | 0,94                          | 4,97             | 21,36                         | 53,59            |   |
| <b>1987-1</b> | -                             | -                | -                             | -                | 1,97                          | 12,04            | 2,13                          | 8,09             | -                             | 1,06             | 6,67                          | 0,49             | 4,28                          | 0,85             | 6,6                           | -                | - |
| <b>1987-2</b> | -                             | -                | -                             | -                | 1,98                          | 10,14            | 2,12                          | 10,62            | -                             | -                | -                             | -                | -                             | 0,86             | 7,1                           | -                | - |
| <b>1991</b>   | 3,39                          | 9,94             | 2,18                          | 10,23            | 2,02                          | 10,01            | 2,12                          | 7,85             | 1,08                          | 6,9              | 0,49                          | 3,73             | 0,84                          | 6,21             | -                             | -                |   |
| <b>1996-2</b> | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                | 2,13                          | 8,37             | 1,06                          | 6,21             | 0,48                          | 4,18             | 0,77                          | 5,47             | -                             | -                |   |
| <b>1998</b>   | 3,09                          | 13,02            | 1,77                          | 11,15            | 1,75                          | 11,63            | 1,94                          | 9,02             | 0,88                          | 5,57             | 0,43                          | 3,81             | 0,68                          | 5,51             | 17,34                         | 45,74            |   |
| <b>1999</b>   | 3,23                          | 10,76            | 2,02                          | 12,46            | -                             | -                | 2                             | 7,15             | 0,94                          | 5,35             | 0,46                          | 3,7              | 0,73                          | 5,27             | -                             | -                |   |
| <b>2001</b>   | 3,24                          | 10,96            | 1,99                          | 11,82            | 2                             | 9,32             | 1,93                          | 7,91             | 0,9                           | 5,35             | 0,45                          | 3,5              | 0,71                          | 5,34             | -                             | -                |   |
| <b>2004</b>   | 2,96                          | 12,24            | 1,64                          | 11,35            | 1,5                           | 12,03            | 1,8                           | 8,7              | 0,79                          | 5,23             | 0,43                          | 3,32             | 0,68                          | 5,18             | 13,72                         | 67,57            |   |
| <b>2007</b>   | -                             | -                | 1,5                           | 10,62            | 1,45                          | 11,52            | 1,64                          | 7,71             | 0,7                           | 4,96             | 0,41                          | 3,13             | 0,6                           | 5,3              | 12,76                         | 62,35            |   |
| <b>2009</b>   | 2,97                          | 8,75             | 1,72                          | 6,99             | -                             | -                | 1,79                          | 6,47             | 0,85                          | 5,1              | 0,44                          | 3,99             | -                             | -                | -                             | -                |   |
| <b>2010</b>   | 2,88                          | 9,84             | 1,56                          | 6,24             | 1,66                          | 7,77             | 1,82                          | 6,48             | 0,79                          | 4,86             | 0,45                          | 3,34             | -                             | -                | -                             | -                |   |

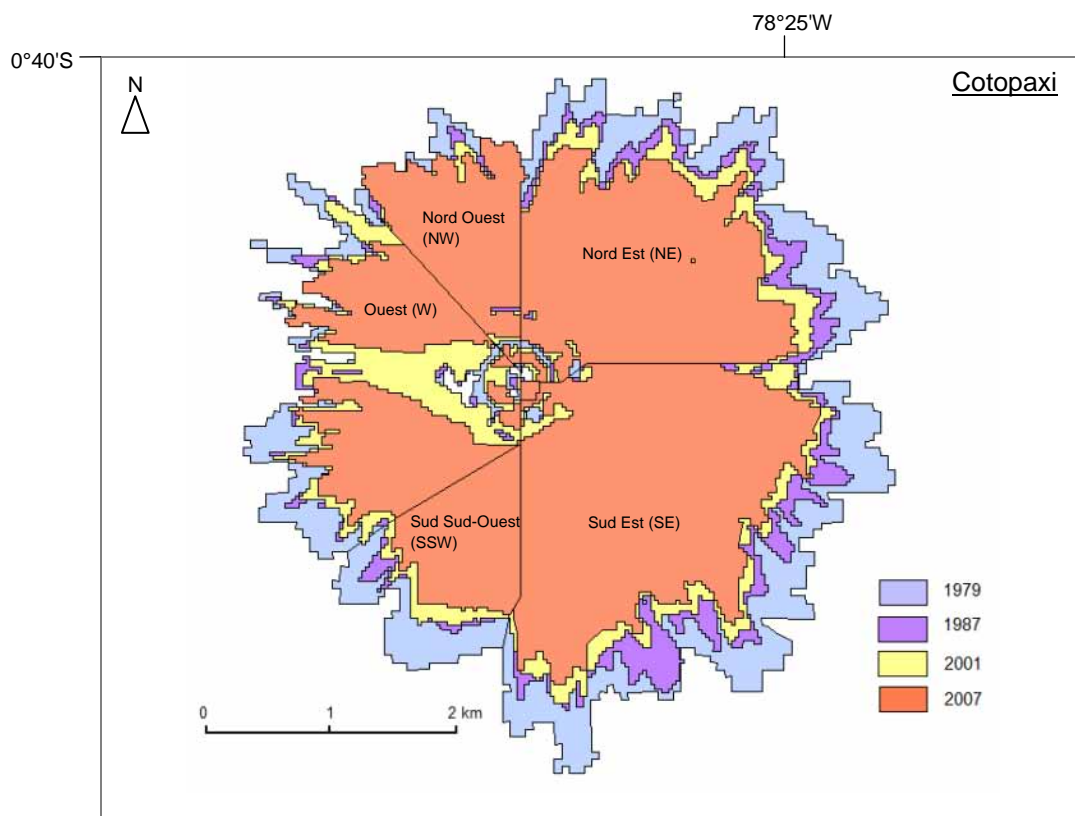
  

|               | Nord Est (NE)                 |                  | Sud Est (SE)                  |                  | Sud Sud-Ouest (SSW)           |                  | Ouest (W)                     |                  | Nord Ouest (NW)               |                  | Superficie totale             |                  |
|---------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
|               | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) | Surface (en km <sup>2</sup> ) | Périmètre (en m) |
| <b>1979</b>   | 4,95                          | 14,38            | 6,81                          | 16,64            | 1,67                          | 6,48             | 3,52                          | 21,02            | 1,38                          | 6,42             | 18,33                         | 44,95            |
| <b>1987-1</b> | -                             | -                | -                             | -                | 1,19                          | 5,53             | 2,79                          | 20,25            | 1,11                          | 6,62             | -                             | -                |
| <b>1987-2</b> | 3,89                          | 14,82            | 5,38                          | 19,37            | 1,19                          | 6,1              | 2,78                          | 22,57            | 1,12                          | 6,25             | 14,36                         | 53,57            |
| <b>1991</b>   | 3,7                           | 13,69            | 5,15                          | 16,09            | 1,17                          | 5,6              | 2,96                          | 19,89            | 1,03                          | 6,54             | 14,01                         | 45,09            |
| <b>1996-1</b> | 3,66                          | 12,74            | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                |
| <b>1996-2</b> | -                             | -                | -                             | -                | 1,2                           | 5,7              | 2,97                          | 19,14            | 1,05                          | 6,85             | -                             | -                |
| <b>1998</b>   | -                             | -                | -                             | -                | 1,13                          | 5,61             | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                |
| <b>1999</b>   | 3,56                          | 12,81            | 4,95                          | 15,98            | 1,25                          | 6,21             | -                             | -                | -                             | -                | -                             | -                |
| <b>2001</b>   | 3,49                          | 13,98            | 4,74                          | 15,63            | 1,13                          | 5,29             | 2,83                          | 19,36            | 1,04                          | 5,58             | 13,23                         | 44,71            |
| <b>2004</b>   | 3,33                          | 12,57            | 4,48                          | 16,29            | 1,07                          | 5,21             | 2,08                          | 17,85            | 0,97                          | 7,01             | 11,93                         | 44               |
| <b>2007</b>   | 3,03                          | 13,85            | 4,23                          | 15,56            | 0,98                          | 4,73             | 2,02                          | 17,56            | 1,27                          | 8,68             | 11,53                         | 45,48            |
| <b>2009</b>   | 3,18                          | 11,42            | 4,47                          | 13,85            | 1,14                          | 5,25             | 2,58                          | 18,13            | 0,93                          | 5,94             | 12,3                          | 37,55            |
| <b>2010</b>   | 3,23                          | 13,19            | 4,29                          | 14,5             | -                             | -                | -                             | -                | 1,09                          | 6,8              | -                             | -                |

## Annexe 6: Évolution des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi de 1979 à 2007

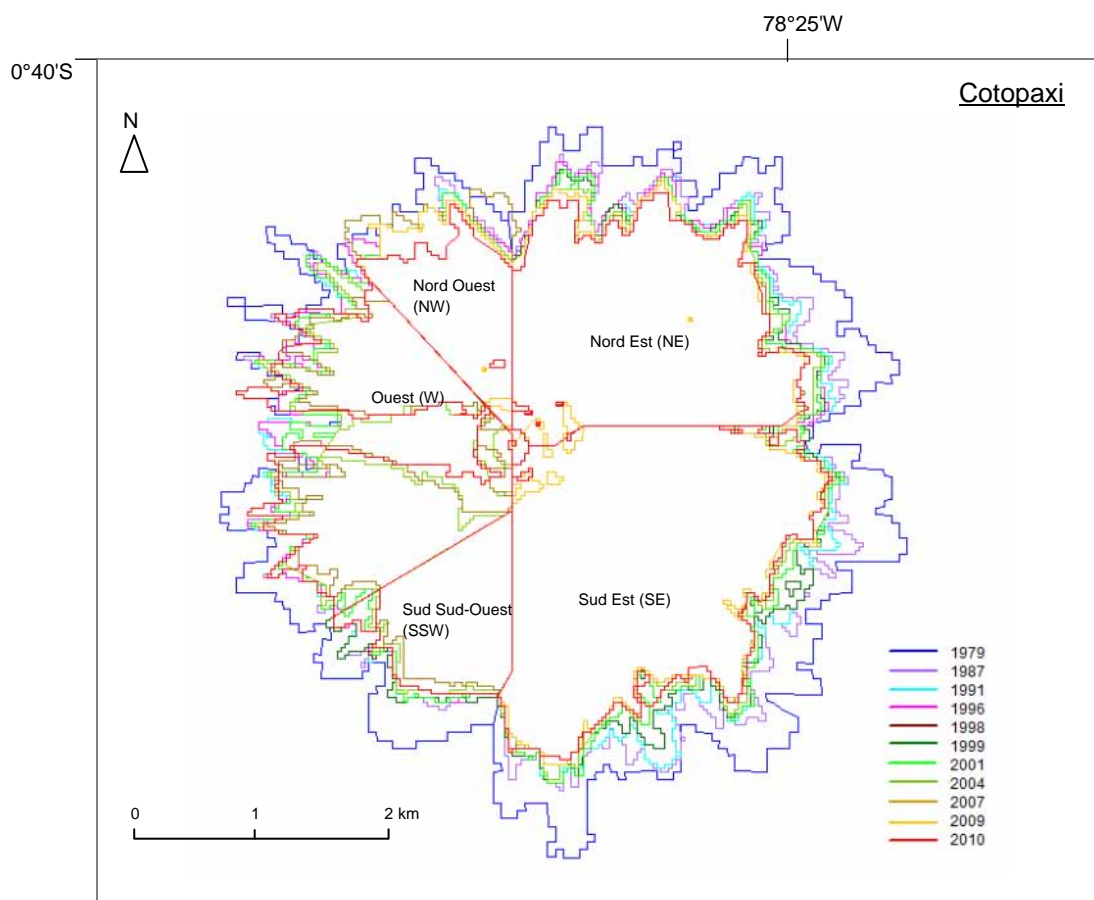
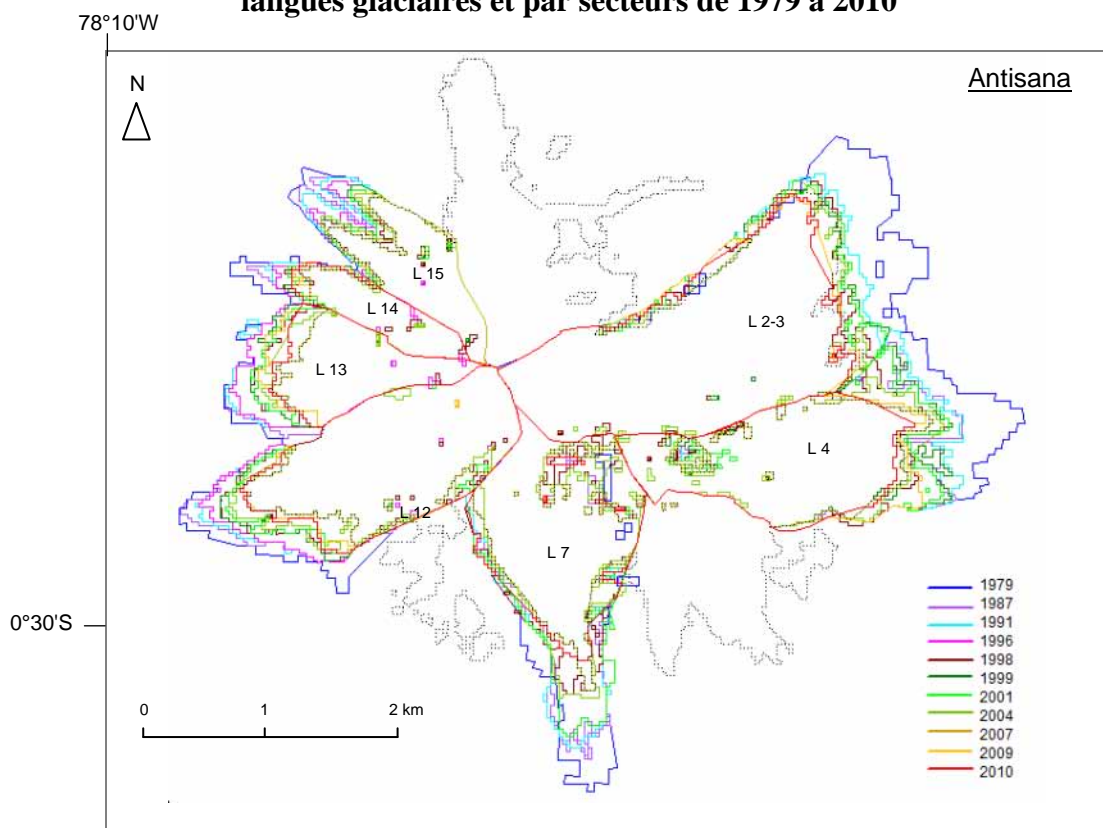


*\*Information manquante pour les langues 2-3 en 2007*



Réalisation : M.Collet

**Annexe 7 : Évolution des superficies glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi par langues glaciaires et par secteurs de 1979 à 2010**



Réalisation : M.Collet

## **Résumé**

### **Suivi spatio-temporel des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi (Équateur) : Analyse par télédétection dans un contexte de changement climatique**

Depuis 1991 un réseau d'observation et de surveillance des glaciers a été mis en place par l'Institut de Recherche pour le Développement et ses partenaires locaux dans les Andes tropicales. Les études, qui portent sur une dizaine de glaciers au Pérou, en Bolivie et en Équateur ont pour but d'étudier la relation glacier-climat à travers l'étude de l'évolution et de la dynamique des glaciers et de comprendre l'effet que peuvent avoir certains événements climatiques sur ceux-ci mais aussi sur l'hydrologie et les ressources en eau liées à ces glaciers.

Ce mémoire est centré sur l'étude des calottes glaciaires de l'Antisana et du Cotopaxi, deux grands volcans d'Équateur. Cette étude mobilise la télédétection pour mieux caractériser et comprendre les variations dans le temps et dans l'espace des superficies de ces glaciers. Le travail, réalisée à partir d'images Landsat, pour la période 1979-2010, permet de compléter les études effectuées sur le terrain ou par photogrammétrie sur l'ensemble ou sur une partie des glaciers des deux volcans.

*Mots clefs : télédétection, glacier, climat, Équateur, Andes tropicales, Cotopaxi, Antisana*

## **Resumen**

### **Evolución tempo-espacial de los casquetes glaciares del Antisana y del Cotopaxi (Ecuador): análisis por teledetección en un contexto de cambio climático**

Desde el año 1991, existe una red de monitoreo de los glaciares en la cordillera de los Andes en Latinoamérica. La cual fue creada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD, sus siglas en Francés), conjuntamente con las instituciones locales. Los estudios, se encuentran concentrados sobre una docena de glaciares ubicados en Perú, Bolivia y Ecuador. Tienen como objetivo, estudiar la relación clima-glaciar, a través del estudio de la evolución y de la dinámica de los glaciares, así como comprender los posibles efectos de ciertos eventos climáticos en los glaciares, su hidrología y aprovechamiento de recursos hídricos asociados a los mismos.

Esta tesis se centra en los casquetes glaciares del Antisana y del Cotopaxi, dos grandes volcanes del Ecuador. Se moviliza la teledetección para caracterizar y comprender mejor las variaciones tempo-espaciales de sus superficies. Este estudio, fue realizado a partir de imágenes satelitales Landsat para el período comprendido entre 1979 – 2010. El presente trabajo podrá servir en un futuro, como complemento a los trabajos realizados a partir de medidas topográficas o de fotogrametría, los cuales fueron efectuados en ambos glaciares.

*Palabras claves: teledetección, glaciares, clima, Ecuador, Andes tropicales, Cotopaxi, Antisana*