

Cartographie satellitaire de la couverture glaciaire des cordillères andines du Pérou

Autor(en): **Silverio, Walter / Jaquet, Jean-Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Archives des sciences [2004-ff.]**

Band (Jahr): **67 (2014)**

Heft 2

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-738376>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Cartographie satellitaire de la couverture glaciaire des cordillères andines du Pérou

Walter SILVERIO¹ et Jean-Michel JAQUET²

Ms. reçu le 27 juin 2014, accepté le 8 août 2014

Abstract

Remote-sensing based glacial cover cartography of Peruvian cordilleras. – We present a glacial cover cartography of the twenty Peruvian Andean cordilleras, based on the Normalized Difference Snow Index (NDSI) and the [Band4 / Band5] ratio computed from Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ imagery. According to our estimates, at the beginning of our century, the total glacial cover was of the order of 1550 km², showing a retreat of more than 25% compared to 1970 values in all the studied cordilleras.

Keywords: Remote sensing, Landsat, Andes, Normalised Difference Snow Index, Glaciology

Résumé

Une cartographie de la couverture glaciaire pour l'ensemble des vingt cordillères andines du Pérou a été réalisée sur la base de l'indice de neige normalisé et le rapport [Bande4/Bande5], calculés à partir des images des satellites Landsat 5 TM et Landsat 7 ETM+. Selon nos estimations, à la fin du XX^e siècle et au début de ce millénaire, la couverture glaciaire totale était de l'ordre de 1550 km², montrant un retrait généralisé de plus de 25% dans tous les massifs du pays, comparé aux valeurs de 1970.

Mots-clés: Télédétection, Landsat, Andes, Indice de Neige normalisé, Glaciologie

1. Introduction

Au Pérou, les glaciers jouent un rôle important dans le cycle hydrologique. Leur fonte pallie le manque d'eau dû à la variabilité climatique et à la répartition inégale des précipitations dans le temps et dans l'espace. Le rôle de ces glaciers sur les ressources hydriques locales est donc très loin d'être négligeable. Que ces réservoirs se tarissent, l'agriculture, l'élevage et les villes perdront une ressource qui leur permet de passer sans encombre les longues saisons sèches (Francou et Wagnon, 1998). En 2005, pour une population voisine de vingt-huit millions d'habitants, 61% des péruviens habitaient le bassin versant du Pacifique, 34% celui de l'Atlantique et 5% celui du lac Titicaca (tableau 1). Pour la même année, Lima concentrait près

de huit millions d'habitants, soit 28% de la population péruvienne. Ces populations dépendent donc des glaciers pour leur approvisionnement en eau potable, l'irrigation de la côte désertique et l'alimentation des centrales hydroélectriques (Francou et Vincent, 2007).

Table 1: Concentration de la population et des glaciers par bassin versant (année 2005).

Bassin versant	Population en 2005	Concentration de la population 2005 (%)	Réserve hydrique des glaciers (%)
Atlantico	9 586 250	34	57
Pacífico	17 007 468	61	40
Titicaca	1 294 075	5	3
Total	27 887 793 hab.		

Les données sur la population proviennent du projet PACC. La réserve hydrique est notre estimation.

¹ Avenue de Gallatin 15, CH-1203 Genève

² Auteur correspondant : 29 Frémis, CH-1241 Puplinge. E-mail: jean-michel.jaquet@unige.ch

La conjonction d'une croissance démographique, d'une augmentation de la demande en eau et de ressources en diminution peut être la cause de conflits entre usagers (Silverio et Jaquet, 2012). Il est donc important de disposer d'informations sur la couverture glaciaire qui soient fiables et collectées à des intervalles de temps appropriés, au moyen d'une méthodologie parfaitement documentée. C'est le but que nous nous sommes donné dans ce travail.

2. Historique

Selon Kaser et Osmaston (2002), les glaciers péruviens couvraient en 1970 une superficie de 1972 km², représentant 71 % de tous les glaciers tropicaux du monde. Sur la base de l'analyse et restitution des photos aériennes de 1955, 1962 et 1970, le premier inventaire des glaciers du Pérou a débuté en 1978 à l'Institut Géologique, Minier et Métallurgique

(INGEMMET, institution étatique péruvienne), et a été achevé, en 1988, dans les bureaux de l'« Empresa Régional Electronorte Medio » (Ames et al., 1988). D'après ce document, l'ensemble des dix-huit cordillères couvrait alors (Fig. 1) une superficie de 2041 km², les cordillères Volcánica et Barroso n'ayant pas été cartographiées (Ames et al., 1988) « car les photos aériennes étaient prises très tôt, juste après une chute de neige, ce qui a empêché de distinguer correctement les surfaces englacées des autres » (Alean et Ames, 1994). Toutefois, d'après l'analyse d'images satellitaires (Landsat MSS), l'USGS avait estimé une superficie de 15 km² pour la cordillère Volcánica et 20 km² pour Barroso. Mais l'USGS indique ni la date exacte de la prise des images, ni la méthodologie utilisée. Par la suite, il n'y a pas eu d'inventaire sérieux de la superficie des glaciers (Kaser et al. 2003), bien qu'au Pérou, on évoquât souvent l'existence d'un retrait glaciaire, mais sans pour autant avancer de chiffres.

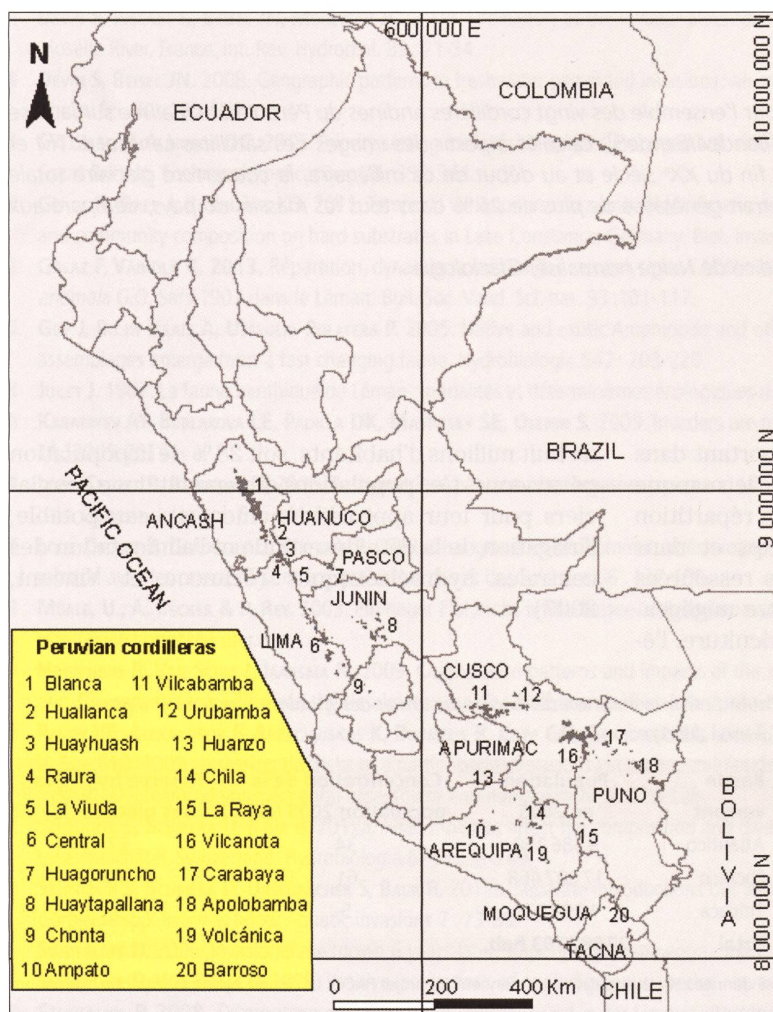


Fig. 1 : Localisation des 20 cordillères dans le territoire péruvien (géoréférencées dans le système de coordonnées Universal Transverse Mercator (UTM, zone sud 18).

Le premier inventaire glaciaire du Pérou a été réalisé à partir de l'analyse de données de types et de dates divers (Ames et al., 1988). Les sources d'information n'étaient donc pas homogènes pour l'ensemble des massifs. Bien entendu, le contexte socio-économique du Pérou, ainsi que la taille des cordillères, n'ont pas permis d'avoir une uniformité dans l'information, puisqu'une campagne de prises de vues de photos aériennes demande beaucoup d'investissement. Toutefois, il faut saluer l'effort consenti par le pays pour réaliser ce premier inventaire (Silverio et Jaquet, 2005).

3. Conditions hydro-climatiques

Depuis le Pacifique, en passant par la Cordillère des Andes et jusqu'au bassin amazonien, le Pérou ne compte pas moins de huit étages écologiques (Pulgar Vidal, 1987). D'après l'IGN (Institut Géographique National, 1989), le Pérou a une superficie de 1285216 km², dont la *Costa* (région côtière) occupe 12% du territoire national, la *Sierra* (région andine) 28% et la *Selva* (région amazonienne) 60%. Durant l'année, il ne pleut pratiquement pas dans la région côtière, dont l'approvisionnement en eau dépend

essentiellement des précipitations et de la fonte glaciaire dans le domaine andin. Dans celui-ci, il pleut presque six mois par année; le reste du temps, ce sont les glaciers qui garantissent l'eau pour l'agriculture, l'élevage, la consommation humaine et la production de l'électricité. Quant à la région amazonnienne, elle est humide toute l'année.

Au Pérou, il y a donc une distribution très hétérogène des ressources hydriques : celles-ci sont insuffisantes dans les bassins versants (BV) du Pacifique et du lac Titicaca, et abondantes dans celui de l'Atlantique. A cela s'ajoute la concentration de la population (tableau 1) et des activités économiques dans la région côtière (BV du Pacifique), où les précipitations sont rares (Silverio, 2007).

En outre, le Pérou compte 12201 lacs, qui sont localisés dans la région andine et dont la plupart sont d'origine glaciaire. Le pays est sillonné d'un millier de rivières, dont 381 drainent vers le Pacifique, 564 vers

l'Atlantique et 62 vers le lac Titicaca. Les rivières des régions côtières et de la Sierra (dont une partie alimente le BV du lac Titicaca) ont un régime irrégulier et saisonnier: elles disposent d'eau entre décembre et avril, soit durant la période des précipitations. Le reste de l'année, ce sont les glaciers andins qui régulent le débit d'un grand nombre de rivières (Silverio, 2007).

4. Données

Les données que nous avons utilisées dans cette étude pour la cartographie glaciaire sont les images des satellites Landsat 5 TM et Landsat 7 ETM, d'une résolution de 30 m. Ce choix obéit au fait que ces images étaient disponibles gratuitement sur Internet. Une vingtaine de scènes (approximativement 180 km par 180 km) couvrent l'ensemble des cordillères du Pérou. Idéalement, les images devraient avoir été acquises durant la même année pour toutes les cordillères. Cela n'a malheureusement pas été possi-

Table 2: Superficie glaciaire (km²), par massifs et totale, obtenue à l'aide des images satellitaires. Les superficies pour 1955, 1962 et 1970 proviennent de Ames et al., (1988). Voir la figure 1 pour localiser les vingt cordillères.

Id	Cordilleras	Premier inventaire de glaciers		Présente étude	Images satellitaires- (path/row); partie cartographiée
		Photo aérienne (année)	Couverture glaciaire (km ²)	Couverture glaciaire (km ²)	
1	Blanca	1962-1970	723	591	TM - 11 août 1996 / (08/66-67); tout
2	Huallanca	1962	21	11	TM - 11 août 1996 / (08/66-67); tout
3	Huayhuash	1962	85	67	TM - 11 août 1996 / (08/66-67); tout
4	Raura	1962	55	37	TM - 08 septembre 1997 / (07/67); tout
5	La Viuda	1962	29	9	TM - 28 juillet 2005 / (07/67); nord ETM - 26 juin 2002 / (07/68); sud
6	Central	1962	117	72	ETM - 26 juin 2002 / (07/68); nord (majeure partie) TM - 16 octobre 2002 / (07/69); sud (petite partie) TM - 03 août 2004 / (06/69); sud-est (très petite partie)
7	Huagoruncho	1962	23	12	TM - 08 septembre 1997 / (07/67); tout
8	Huaytapallana	1962	59	37	TM - 03 Août 2004 / (06/68); tout TM - 30 juin 2009 / (06/68); tout
9	Chonta	1962-1970?	18	2	TM - 14 juin 2003 / (06/69); tout
10	Ampato	1962	147	67	TM - 23 juin 2005 / (04/71); tout
11	Vilcabamba	1962	38	128	TM - 18 juin 1998 (04/69); est (majeure partie) TM - 08 mai 1998 (05/69); ouest (petite partie)
12	Urubamba	1962	41	32	TM - 18 juin 1998 (04/69); tout
13	Huanzo	1962	37	5	TM - 20 juillet 1998 / (04/70); tout
14	Chila	1955	34	6	TM - 23 juillet 2005 / (04/71); tout
15	La Raya	1962	11	6	PACC: TM - 04 août 2006 / (03/70); nord TM - 05 septembre 2006 / (03/71); sud
16	Vilcanota	1962-1970?	418	344	PACC: TM 23 juillet 1996 / (03/69-70); tout
17	Carabaya	1962	104	63	TM - 16 juillet 1996 / (02/70); sud-est TM - 23 juillet 1996 / (03/69 -70); est (majeure partie)
18	Apolobamba	1962	81	61	TM - 16 July 1996 / (02/70); tout
19	Volcánica	-	-	2	TM - 5 septembre 2006 / (03/71); tout
20	Barroso	-	-	8	TM - 01 août 1996 / (03/72); tout
Total			2041	1560	
				1550	

Table 3 : Changement de couverture glaciaire par massifs et totale (km²), par rapport au premier inventaire des glaciers (Ames et al. 1988) et les estimations d'USGS (1998). Chiffres arrondis à l'unité.

Cordilleras	(I)	(II)	(III)	Changement de couverture par rapport à (%)	
	Premier inventaire de glaciers 1955-1970	Couverture glaciaire USGS (1998) 1975	Couverture glaciaire (présente étude) 1996-2009	Ames et al. (1988) (I)	USGS (1998) (II)
Blanca	723	723	591	-18	-18
Huallanca	21	22	11	-48	-50
Huayhuash	85	88	67	-21	-24
Raura	55	57	37	-33	-35
La Viuda	29	29	9	-69	-69
Central	117	176	72	-38	-59
Huagoruncho	23	48	12	-48	-75
Huaytapallana	59	35	27	-54	-23
Chonta	18	42	2	-89	-95
Ampato	147	105	67	-54	-36
Vilcabamba	38	173	128	+337	-26
Urubamba	41	23	32*	-22	+39
Huanzo	37	158	5	-86	-97
Chila	34	52	6	-82	-88
La Raya	11	88	6	-45	-93
Vilcanota	418	539	344	-18	-36
Carabaya	104	100	63	-39	-37
Apolobamba	81	102	61	-25	-40
Volcánica	/	15	2	-	-87
Barroso	/	20	8	-	-60
Total	2041	2596	1550	-24	-40

Souligné : différence anormale entre (I) et (II). Astérisque : différence anormale entre (II) et (III).

ble, car la couverture nuageuse oblitère fréquemment les reliefs. Les dates d'acquisition des images sont reportées dans le tableau 2 ; elles sont comprises entre 1996 et 2009. Les images satellitaires entre 1996 et 2006 ont permis de cartographier l'ensemble des vingt massifs. Mais, vu les résultats ambigus (par rapport aux chiffres du premier inventaire et ceux d'USGS) pour la Cordillère Huaytapallana, une nouvelle cartographie a été établie pour 2009 (tableau 3). Il est prévu d'en faire de même pour la Cordillera Urubamba (tableau 3) avec des images plus récentes. Une image mosaïque (path/row : 8/66-67) du satellite Landsat 5 TM du 11 août 1996 a été fournie par UNEP/DEWA/GRID-Sioux Falls (USA). Elle a permis de cartographier les Cordillères Blanca, Huallanca et Huayhuash et a aussi été utilisée dans nos recherches précédentes sur la Cordillera Blanca (Silverio et Jaquet, 2003b et 2005). Vingt-trois images ont été téléchargées du site <http://glovis.usgs.gov/>. Elles ont servi à cartographier dix-sept cordillères (tableau 2). Deux images proviennent du projet «Programa de Adaptación al Cambio Climático» en Cuzco y Apurímac, Perú (PACC) », projet financé par la Direction du Développement et de la Coopération, Confédération Helvétique (<http://www.ddc.admin.ch>). Elles ont permis la cartographie glaciaire de Vilcanota et la partie nord de La Raya.

5. Méthode

Afin de faire correspondre les limites administratives d'INEI (2003) à toutes les cordillères, les images satellitaires ont été reprojctées dans le système de coordonnées Universal Transverse Mercator (UTM), zone 18 sud. Toutes les images ont une résolution de 30 m.

La couverture glaciaire de la Cordillera Blanca a été estimée sur la base de l'Indice de Neige Normalisé (NDSI : Normalized Difference Snow Index), calculé à partir des nombres digitaux (Silverio et Jaquet, 2003a ; Silverio et Jaquet, 2005). Cet indice a été développé par Hall et al. (1995) et associe deux bandes du capteur TM. Il se définit par l'équation suivante :

$$NDSI = [TM2 - TM5] / [TM2 + TM5]$$

Selon Dozier (1989), le NDSI permet la distinction entre neige, sol, rochers et nuages. Sidjak et Wheate (1999) ont démontré l'efficacité de cet indice dans la cartographie de la neige en terrain accidenté. Le NDSI fournit une image nette de la limite entre la langue glaciaire et la moraine environnante, et permet une intercomparaison entre la position de la glace nue d'une année à l'autre (Hall et al., 2001).

En outre, le NDSI (qui met en rapport les bandes 2 et 5 du capteur TM) ainsi que la division entre bandes 4 et 5 du TM, sont applicables aussi aux bandes équivalentes du capteur ETM+, car elles ont la même radiométrie (NASA, 2013).

Pour les autres cordillères et les petits massifs Rosco et Pelagatos localisés au nord de la Cordillera Blanca (Silverio et Jaquet, 2005; USGS, 1998), on a utilisé le rapport des bandes [TM4/TM5] à partir des nombres digitaux (Paul et al., 2002; Raup et al., 2007), car l'opération est plus simple que pour le NDSI. Les rapports de bandes spectrales permettent de minimiser, voire supprimer, les différences d'illumination dues à la topographie (Colby, 1991). Ces rapports doivent être calculés à partir de canaux peu corrélés (visible et PIR) et, idéalement, après élimination du bruit additif (Bonn et Rochon, 1993). Aucune brume n'étant visible sur les images, cette dernière opération n'a pas été jugée nécessaire (Silverio et Jaquet, 2003a). Le rapport [TM4/TM5] est couramment utilisé dans les études glaciologiques (Hall et al., 1987; Paul, 2002; Paul et al., 2002; Paul et al., 2004; Williams et al., 1991). Albert (2002), dans une étude méthodologique sur Quelcaya (Cordillera Vilcanota, sud du Pérou; Fig. 1) a montré qu'il existe une différence de seulement 2% entre les résultats obtenus par le NDSI et [TM4/TM5].

6. Résultats

La superficie de la couverture glaciaire calculée dans notre étude pour les vingt cordillères se trouve dans le tableau 2, ainsi que la référence des images utili-

sées dans chaque cas. On peut y ajouter les remarques suivantes (pour la localisation des Cordilleras voir la figure 1).

Cordilleras Blanca, Huallanca et Huayhauash: une mosaïque (path/row: 08/66-67) des images de Landsat 5 TM du 11 août 1996 a permis de les cartographier. Un extrait de cette mosaïque a été utilisée pour les cordillères *Rosco* (0.24 km²) et *Pelagatos* (1.1 km²). Leur superficie a été incluse dans celle de la Cordillera Blanca.

La Raya (partie nord) et *Vilcanota*: la cartographie glaciaire a été réalisée dans le cadre du projet PACC. Pour La Raya, étant donné que les coordonnées mentionnées dans le premier inventaire des glaciers (Ames et al., 1988) différaient de celles données par l'USGS (1998), nous avons retenu ces dernières, qui permettent une cartographie plus complète du massif.

Carabaya: cette cordillère se trouvant à cheval sur deux orbites / rangées de Landsat, trois images ont dû être utilisées: la majorité de la couverture a été cartographié avec deux images du 23 juillet 1996 (03/69 et 03/70), la partie est avec la TM du 23 juillet 1996 (03/70) et sa partie sud-est avec le TM du 16 juillet 1996 (02/70). Comme dans cette dernière image il y avait présence de neige, la limite des glaciers a été tracée à l'aide du Modèle Numérique d'Altitude dérivé du SRTM, version 3, téléchargé du site (www.srtm.csi.cgiar.org; dernière visite novembre 2009): seules les superficies neigeuses localisée au-dessus de 5000 m ont été considérées comme glaciers, conformément aux conditions régnant dans la Cordillera Blanca selon Racoviteanu et al. (2008), et indiqué par le panneau officiel de la Fig. 2.



Le tableau 2 présente également, pour comparaison, les résultats du premier inventaire des glaciers péruviens avec les dates des photos aériennes utilisées. Le tableau 3 reprend ces résultats et y ajoute les superficies glaciaires obtenues par l'USGS (1998), ainsi que les pourcentages de décroissance ou croissance entre dates ou études. Au niveau national, à la fin du XX^e siècle

Fig. 2: Panneau officiel indiquant l'altitude inférieure (5000 m) du glacier Pastoruri (localisé au sud de la Cordillera Blanca) (photo W Silverio, 2013)

et au début de ce millénaire, nous estimons la couverture glaciaire du Pérou à 1550 km² pour la période entre 1996 et 2009. Ce chiffre représente 76 % de la superficie du premier inventaire glaciaire (2041 km²; Ames et al., 1988) datant des années 50-70, indiquant une perte de 24 %. Concernant les chiffres avancés par USGS (1998) (2596 km² pour 1975), nos résultats en représentent les 60 %. Il y aurait donc eu une perte de 40 % dans la superficie glaciaire (tableau 3) entre 1975 et 1996-2009. Par rapport aux deux sources, il y a bien eu un retrait significatif dans tous les massifs péruviens.

7. Discussion

7.1. Problème de l'hétérogénéité des données

Pour l'analyse diachronique des variations de la couverture glaciaire dans les Andes péruviennes, nous avons été contraints de nous baser sur trois inventaires (indiqués par *I*, *II* et *III* dans le tableau 3) ayant fait appel à des données de types divers (photos aériennes panchromatiques, imagerie satellitaire Landsat MSS, TM ou ETM+). En outre, à l'exception du présent inventaire (*III*), les méthodes cartographiques utilisées par nos prédécesseurs ne sont pas documentées de manière explicite. Cet état de fait impose donc de la prudence dans la comparaison précise des superficies glaciaires au cours du temps.

L'évolution de la couverture glaciaire entre la fin du XX^e siècle (*III*) et les périodes antérieures (*I*, *II*), exprimée en pourcentage dans le tableau 3, montre une diminution générale dans toutes les cordillères, à deux exceptions près (Vilcabamba et Urubamba; voir plus bas). Au vu de la magnitude des chiffres (de -18 à près de -100 %), l'estimation de cette décroissance globale peut être considérée comme fiable.

Toutefois, si l'on regarde de plus près les chiffres du tableau 3, on remarque un certain nombre d'anomalies qui vont à l'encontre de la tendance générale; elles sont classifiables en deux catégories: (1) la superficie donnée par l'USGS (*II*, tableau 3) est clairement supérieure à celle du premier inventaire (*I*, tableau 3); (2) la superficie estimée dans notre étude (*III*) excède celle de l'USGS. La première catégorie d'anomalies concerne les cordillères Central, Huagoruncho, Chonta, Vilcabamba, Huanzo, Chila, La Raya, Vilcanota et Apolobamba.

Pour Huaytapallana, par rapport à nos résultats de 2004 (37 km²), les choses sont un peu paradoxales: perte de la couverture glaciaire de 63 % par rapport au premier inventaire des glaciers et gain de 1 %, par rapport aux chiffres de l'USGS (1998) (tableau 2).

C'est pourquoi, afin de vérifier la tendance, nous avons réalisé une nouvelle cartographie pour 2009. Cette année-là, la Cordillera Huaytapallana avait une superficie glaciaire de 27 km² (tableau 3). Cela indique, qu'entre 2004 et 2009, Huaytapallana a perdu 27 % de sa couverture glaciaire. Par rapport aux chiffres du premier inventaire, la perte (1962-2009) a été de 54 % (tableau 3).

Vilcabamba et Urubamba (tableau 3) présentent aussi des anomalies. Dans le premier cas, on observe un accroissement de 337 % par rapport au premier inventaire et une décroissance de 26 % par rapport aux résultats de l'USGS. Dans le deuxième cas, ces chiffres correspondent à -22 % et +39 %, respectivement. Selon l'UGRH (2013), pour les cordillères Huaytapallana, Vilcabamba et Urubamba, le premier inventaire des glaciers a été réalisé de manière partielle et, par conséquent, il est possible que les chiffres de l'USGS (1998) soient sur/sous-estimés, ce qui expliquerait la divergence avec nos résultats.

Lors du premier inventaire des glaciers, la superficie glaciaire des cordillères Volcánica et Barroso n'avait pas été cartographiée. Ceci a été réalisé par l'USGS (1998), mais nous ne connaissons pas l'année de l'estimation. Si l'on admet les chiffres de l'USGS (1998), le retrait glaciaire a été très significatif dans les deux massifs, respectivement de 84 % et de 62 % (tableau 3).

Dans ce travail, nous n'avons pas fait la différenciation des sous-classes (glace, neige de différente texture; voir Hall et al., 1987, 1988; Williams et al., 1991), car l'objectif principal était d'estimer la superficie glaciaire pour l'ensemble de vingt cordillères du Pérou à partir d'une même source d'information, les images satellitaires. Bien que la date des images varie entre 1996 et 2009, à cause de la disponibilité des données et les conditions atmosphériques régnant sur les massifs concernés, toutes les scènes TM ou ETM+ ont la même résolution (30 m). En plus, le rapport des bandes [TM4/TM5] ou [ETM+4/ETM+5] et le NDSI (Dozier, 1989; Hall et al., 2001; Sidjak et Wheate, 1999; Silverio et Jaquet, 2005) sont connus pour discriminer les glaciers et non-glaciers, et la ratio [TM4/TM5] est couramment utilisée pour déterminer la couverture glaciaire (Albert, 2002; Hall et al., 1987; Paul, 2002; Paul et al., 2002; Paul et al., 2004; Williams et al., 1991). Pour ces raisons, nous estimons que nos résultats sont représentatifs. A cela on peut ajouter que les bandes spectrales du TM et du ETM+ ont les mêmes longueurs d'onde (bande 2: 0.52-0.60 μm ; bande 4: 0.76-0.90 μm ; bande 5: 1.550-1.750 μm) (NASA, 2013; Bannari et al., 2004). De ce fait, le NDSI et le rapport [Bande4/Bande5] peuvent être appliqués tant au TM qu'à l'ETM+.

7.2. Réalité et conséquences du retrait glaciaire au Pérou

Les Andes péruviennes ont subi un retrait glaciaire généralisé les 20 dernières années du XX^e siècle. Durant la même période, la population du pays s'est accrue, accentuant la demande hydrique pour l'eau potable et les diverses activités économiques (Silverio et Jaquet, 2012). Aucun massif n'a été épargné (tableau 3), mais les grands massifs comme la Cordillera Blanca ou Vilcanota ont mieux résisté. Par contre les petits massifs de moins de 20 km² de superficie ont perdu plus de 50% de leur couverture. Par exemple, la Cordillera Chonta a passé de 18 km² (Ames et al., 1988) à 2 km² de couverture glaciaire en 2003. Un cas similaire s'est produit avec la Cordillera Volcánica, de 15 km² (USGS, 1998), il ne reste que 2 km² (tableau 3).

Vuille et Bradley (2000) ont démontré que dans les Andes, la température moyenne s'est accrue de 0.10-0.11°C par décennie depuis 1939, et que ces valeurs ont triplé (0.32-0.34°C par décennie) les 25 dernières années du XX^e siècle. Pour la Cordillera Blanca, Mark et Seltzer (2005) estiment que la température moyenne entre 1962 et 1999 a crû de 0.26°C par décennie. Dans la même région, Racoviteanu et al. (2008) ont observé qu'entre 1970 et 1999, la température moyenne annuelle a augmenté « significativement ». En outre, Bradley et al. (2009) estiment que l'isotherme de 0°C s'est élevée en altitude dans les Andes Tropicales localisées au sud de l'Equateur, et que les observations météorologiques au sommet du Quelcaya 5680 m (Cordillera Vilcanota) indiquent que la température maximale journalière, entre octobre et mai, est souvent supérieure à 0°C. Ces conditions affectent les glaciers en haute altitude, qui perdent ainsi de leur masse. A cela on peut ajouter la baisse des précipitations, surtout pendant la période d'El Niño (Silverio et Jaquet, 2012). Durant cet épisode, des pluies diluviennes s'abattent sur la côte nord du Pérou, tandis que la région andine et l'altiplano sont touchés par la sécheresse. Il en résulte moins de précipitations solides (neige) pour le renouvellement des glaciers.

Plusieurs études rendent compte du retrait glaciaire dans les Andes péruviennes. Dans la Cordillera Blanca: Ames et Francou (1995), Francou et al. (1997), Francou et Vincent (2007), George (2004), Mark et Seltzer (2005), Silverio et Jaquet (2005). Pour la Cordillera Ampato, on peut signaler Peduzzi et al. (2010), Racoviteanu et al. (2007), Silverio et Jaquet (2012) et dans la Cordillera Vilcanota Brecher et Thompson (1993), Thompson et al. (2006) et Salzmann et al. (2013). D'après Bradley et al. (2006) le retrait glaciaire est généralisé dans toute la Cordillère des Andes, ce qui indique qu'il faut pren-

dre conscience du problème. Les décideurs devraient d'avantage mettre en place des politiques d'adaptation pour éviter des futurs conflits entre les divers usagers de l'eau. Il faudrait déjà commencer avec des mesures d'économie et de stockage de l'eau. Selon Vergara et al. (2007), au Pérou, le retrait rapide des glaciers aurait des conséquences économiques se chiffrant, pour le secteur énergétique, entre 212 million et 1.5 milliards de dollars.

Bien entendu, les résultats de cartographie glaciaire obtenus par imagerie satellitaire devraient être vérifiés par des observations sur le terrain. Cependant, celles-ci demandent un gros investissement, tant économique que technique. Au Pérou, pour l'ensemble des vingt massifs, moins de dix glaciers sont sous surveillance, la plupart étant localisés en Cordillera Blanca. Malheureusement, avec les changements politiques, les observations glaciologiques n'ont pas été réalisées avec la continuité requise. Pourtant, ces glaciers devraient être suivis de près, car la plupart des villes du pays en dépendent pour leur eau potable, surtout durant la saison sèche, et pour les projets d'irrigation, l'activité minière et la production d'électricité.

Dans la Cordillera Blanca (glacier de Pastoruri) Silverio et Jaquet (2005) ont observé que le retrait du front par les relevés topographiques (17 ma⁻¹: retrait moyen des années 1990) et ceux obtenus par télédétection (17.2 ma⁻¹: retrait moyen entre 1987 et 1996) sont très proches. Cela présente un argument en faveur de l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la cartographie des glaciers. Ceci est d'autant plus valable que la topographie des cordillères est très accidentée, avec des glaciers souvent localisés dans des endroits inaccessibles, ce qui complique les observations sur le terrain. Malgré des difficultés occasionnelles, comme le problème de couverture nuageuse sur les images, la télédétection satellitaire est donc un outil indispensable pour le monitoring et la cartographie glaciaire. Cette technique permet aussi d'avoir une vue synoptique des glaciers, tout en suivant l'évolution des lacs pro-glaciaires, qui se développent à cause du retrait (Silverio et Jaquet, 2003b).

Ces lacs ne sont retenus que par de fragiles moraines, et leurs débordements provoqués par des séismes ou des avalanches sont une menace pour les populations locales, d'où le besoin de leur surveillance. Là encore, ce suivi devrait être couplé avec des observations sur le terrain pour éviter les fausses alarmes, ce qui est arrivé pour le lac Palcacocha, dans la Cordillera Blanca en 2003. Début avril, après l'analyse de deux images ASTER du 5 novembre 2001 et du 8 avril 2003, la NASA publiait dans sa page web un article sur un possible désastre dans les Andes impliquant Palcacocha. La nouvelle faisait référence à la détec-

tion d'une fissure sur le glacier pouvant provoquer sa chute dans le lac, ce qui représenterait une menace pour Huaraz (Silverio, 2007). La nouvelle avait créé la panique à Huaraz, et la population était partie se réfugier sur les pentes de la Cordillera Negra. Durant l'été 2003, nous avons constaté sur le terrain que c'était en réalité une barre rocheuse, d'environ 100 m de hauteur, qui avait été prise pour la fameuse « fissure » : c'est le retrait glaciaire qui avait mis à nu cette falaise (Silverio, 2007).

8. Conclusion

Etant donné les conditions climatiques et la topographie très accidentée des Andes péruviennes, l'imagerie satellitaire à résolution de 30 m s'avère très utile pour la cartographie glaciaire. Dans ce sens, Landsat TM ou ETM+ offrent une combinaison optimale entre taille des scènes (185x185 km) et la résolution spatiale, d'autant plus que les images sont désormais gratuites. Toutefois, des observations sur le terrain sont nécessaires pour valider les résultats de « laboratoire ».

Selon nos estimations, à la fin du XX^e siècle et au début de ce siècle, la couverture glaciaire des vingt cordillères du Pérou était d'environ 1550 km². Par rapport au premier inventaire des glaciers effectué vers 1960-70, la perte est en moyenne de 24%. En considérant les chiffres avancés par l'USGS (1998), la perte serait de 40%. Le retrait a été constaté dans la totalité des vingt massifs couvrant la partie andine du Pérou, mais avec une résistance à la fonte plus élevée dans les grands massifs que dans les petits.

Un suivi synoptique des fluctuations de la couverture glaciaire est important, eu égard au rôle de stockage hydrique assuré par les glaciers dans un contexte d'une pression accrue sur les ressources en eau, pouvant générer de sérieux conflits d'usage.

Remerciements

Nous remercions Mark Ernst, ancien collaborateur de UNEP/GRID-Sioux Falls (DEWA), USGS EROS Data Center, SD Dacota (USA) pour la fourniture de l'image mosaïque de 1996 (path/row: 6/66-67), l'United State Geological Survey (USGS) pour la mise à disposition des images satellitaires en ligne (<http://glovis.usgs.gov/>) et Ron Witt, directeur du PNUE-GRID Genève pour la relecture du résumé anglais. Les commentaires de Pascal Peduzzi ont été d'une grande utilité et ont permis d'améliorer une première version de l'article.

Références

- ALBERT, T. 2002. Evaluation of remote sensing techniques for ice-area classification applied to the tropical Quelccaya ice cap, Peru. *Polar Geography*, 26(3): 210-226.
- ALEAN J, AMES A. 1994. *Inventaire des glaciers du Pérou. Les Alpes*, 3^e trimestre, año 70, 122-137 (revue du club alpin Suisse).
- AMES A, DOLORES S, VALVERDE A, EVANGELISTA P, CORCINO J, GANVINI W, ZUÑIGA J. 1988. *Glacier inventory of Peru*, Empresa Regional Electronorte medio HIDRANDINA S. A., Unit of glaciology and Hydrology Huaraz, Peru, 105 p.
- AMES A, FRANCOU B. 1995. Cordillera Blanca, Glaciares en la Historia. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24 (1), 37-64.
- BANNARI A, TEILLET P, LANDRY R. 2004. Comparaison des réflectances de surfaces naturelles dans les bandes spectrales homologues des capteurs TM de Landsat-5 et ETM+ de Landsat-7. *Téledétection* 4 (3) 263-275. <http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20041029081717.pdf> (dernière visite, le 5 octobre 2011)
- BONN F, ROCHON G. 1993. Précis de Télédétection, volume 1 : principes et méthodes. Presses de l'Université de Québec et AUPELF, Sainte-Foy, 485 p.
- BRADLEY RS, VUILLE M, DIAZ HF, VERGARA W. 2006. Threats of Water Supplies in the Tropical Andes. *Science*, 312, 1755-1756.
- BRADLEY RS, KEIMIG FT, DIAZ HF, HARDY DR. 2009 Recent changes in freezing level heights in the Tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions. *Geophysical Research Letters*, 36 (L17701), doi:10.1029/2009GL037712, 2009.
- BRECHER HH, THOMPSON LG. 1993. Measurement of the retreat of Qori Kalis glacier in the tropical Andes of Peru by terrestrial photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59 (6), 1017-1022.

- COLBY JD. 1991. Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, n°5, p. 531-537
- DOZIER J. 1989. Spectral signature of Alpine snow cover from Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*, **28**, 9-22.
- FRANCOU B, RIBSTEIN P, POUYAUD B. 1997. La fonte des glaciers tropicaux. *La Recherche* 302 (octobre) 34-37.
- FRANCOU B, WAGNON P. 1998. Cordillères andines, sur les hauts sommets de Bolivie, du Pérou et d'Equateur, Glénat, Grenoble, 127 p.
- FRANCOU B, VINCENT CH. 2007. Les glaciers, à l'épreuve du climat. IRD Editions (IRD = Institut de Recherche pour le Développement) et Editions Belin, Paris, 274 p.
- GARREAUD R, VUILLE M, CLEMENT AC. 2003. The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Paleo*, 194, 5-22.
- GEORGES C. 2004. The 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca (Perú). *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36 (1), 100-107.
- HALL DK, ORMSBY JP, BINDSCHADLER RA, SIDDALINGAIAH H. 1987. Characterization of snow and ice reflectance zones on glacier using Landsat Thematic Mapper Data. *Annals of Glaciology*, vol. 9, p. 104-108.
- HALL DK, CHANG ATC, SIDDALINGAIAH H. 1988. Reflectances of Glaciers as Calculated Using Landsat-5 Thematic Mapper Data. *Remote Sensing of Environment*, 25, 311-321.
- HALL DK, RIGGS GA, SALOMONSON VV. 1995. Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data. *Remote Sensing of Environment*, **54**, 127-140.
- HALL DK, BAYR K, BINDSCHADLER RA, SCHÖNER W. 2001. Changes in the Pasterze Glacier, Austria, as Measured from the Ground and Space. 58th Eastern Snow Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 7 p. http://www.easternsnow.org/proceedings/2001/Hall_1.pdf (dernière visite, le 6 mai 2011)
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN). 1989. Atlas del Perú, Lima. Ed. IGN.
- INEI (Institut National de Statistique et Informatique). 2003. Mapa Digital del Perú 2002 (carte digitale (shapes) des limites administratives par Départements, Provinces et Districts). www.inei.gob.pe
- IPCC. 2007. Summary for Policymaker. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds)]. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KASER G, OSMASTON H. 2002. Tropical Glaciers. Ed. Cambridge University Press et UNESCO, Cambridge, UK, 207 p.
- KASER G, JUEN I, GEORGES C, GOMEZ J, TAMAYO W. 2003. The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the Cordillera Blanca, Perú. *Journal of Hydrology*, 282, 130-144.
- MARK BG, SELTZER GO. 2005. Evaluation of recent glacier recession in the Cordillera Blanca, Peru (AD 1962-1999): spatial distribution of mass loss and climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, 24, 2265-2280.
- NASA. 2013. <http://landsat.gsfc.nasa.gov> (dernière visite 27.4.2013)
- PAUL F. 2002. Combined Technologies Allow Rapid Analysis of Glacier Changes. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. 83 (23), 253 and 260-261.
- PAUL F, KAAB A, MAISCH M, KELLENBERGER T, HAEBERLI W. 2002. The new remote sensing-derived Swiss glacier inventory. I. Methods. *Annals of Glaciology*, **34**: 355-361.
- PAUL F, KAAB A, MAISCH M, KELLENBERGER T, HAEBERLI W. 2004. Rapid Disintegration of alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21402, doi:10.1029/2004GL020816.
- POUYAUD B, VIGNON F, YERREN J, SUAREZ W, VEGA F, ZAPATA M, GOMEZ J, TAMAYO W, RODRIGUEZ A. 2003. Glaciares y recursos hídricos en la cuenca del río Santa. Rapport IRD-SENAMHI-INRENA (document interne), 66 p.
- PEDUZZI P, HEROLD C, SILVERIO W. 2010. Assessing high altitude thickness, volume and area changes using field, GIS and remote sensing techniques: the case of Nevado Coropuna (Peru). *The Cryosphere*, **4**, 313-323. Available online at: <http://www.the-cryosphere.net/4/313/2010/tc-4-313-2010.pdf> (dernière visite, le 10 février 2011)
- PULGAR VIDAL JAVIER. 1987. Geografía del Perú: las ocho regiones naturales, la regionalización transversal, la microrregionalización, Lima, PEISA (Promoción Editorial Inca S. A.).
- RACOVITEANU AE, MANLEY WF, ARNAUD Y, WILLIAMS MW. 2007. Evaluating digital elevation models for glaciological applications: An example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes. *Global Planetary Change*, **59**, 110-125.
- RACOVITEANU AE, ARNAUD Y, WILLIAMS MW, ORDÓÑEZ J. 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54 (186), 499-510.
- RAUP B, KÄÄB A, KARGEL JS, BISHOP MP, HAMILTON GL, PAUL F, RAU F, SOLTESZ D, KHALSA SJ. 2007. Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) project. *Computers & geosciences*, **33**(1): 104-125
- SALZMANN N, HUGGEL C, ROHRER M, SILVERIO W, MARK BG, BURNS P, PORTOCARRERO C. 2013. Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *The Cryosphere* **7**, 103-118. Available online at <http://www.the-cryosphere.net/7/103/2013/>
- SIDJAK RW, WHEATE RD. 1999. Glacier mapping of the Illecillewaet Icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation model data. *International Journal of Remote Sensing* vol. 20, n° 2, 273-284
- SILVERIO W, JAQUET J-M. 2003a Cartographie provisoire de la couverture du sol du Parc national Huascarán (Pérou), à l'aide des images TM de Landsat. *Télé-détection*, vol. 3, n° 1, p. 69-83.

- SILVERIO W, JAQUET J-M. 2003b. Cartographie satellitaire des aléas naturels liés aux glaciers dans la Cordillera Blanca (Pérou), entre 1970 et 2000. *Archives des Sciences Genève*, 56 (1), 39-58.
- SILVERIO W, JAQUET J-M. 2005. Glacial Cover Mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) Using Satellite Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95, 342-350.
- SILVERIO W, JAQUET J-M. 2012. Multi-temporal and multi-source cartography of the glacial cover of Nevado Coropuna (Arequipa, Peru) between 1955 and 2003. *International Journal of Remote Sensing* 33 (18), 5876-5888.
- SILVERIO W. 2005. Análisis de los parámetros climáticos de las estaciones en la región del Nevado Coropuna (6425 m.s.n.m.), Arequipa, Perú. Informe preparado para la GTZ-Arequipa-PERU (COPASA), en le marco del Proyecto "Estudio del Retroceso Glaciar en el Nevado Coropuna, Arequipa, Perú. 16 p. (documento interno)
- SILVERIO W. 2007. Application des SIG pour une gestion durable des ressources hydriques de la Cordillera Blanca (Pérou). Thèse en géographie, Université de Genève, Suisse, 234 pp.
- THOMPSON LG, MOSLEY-THOMPSON E, BRECHER H, DAVIS M, LEÓN B, LES D, LIN P-N, MASHIOTTA T, MOUNTAIN K. 2006. Abrupt tropical climate change : past and present. *Proceeding of the National Academy of Science (PNAS)*, 103 (28), 10536-10543. (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0603900103)
- UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS (UGRH), AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. 2013. Inventario Nacional de glaciares y lagunas : Glaciares. Autoridad Nacional del Agua, Huaraz-Lima, p ? (non publié).
- USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY). 1998. Glaciers of Perú. Professional Paper 1386-I-4. <http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/peru/index.html> (dernière visite, le 30 novembre 2011)
- VERGARA W, DEEB AM, VALENCIA AM, BRADLEY RS, FRANCOU B, ZARZAR A, GRÜN WALDT A, HAEUSSLING SM. 2007. Economic Impact of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 88 (25), 261 and 264.
- VUILLE M, BRADLEY R. 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes. *Geophysical Research Letters*, 27 (23), 3885-3888.
- WILLIAMS RS, HALL DK, BENSON CS. 1991. Analysis of glacier facies using satellite techniques. *Journal of Glaciology*, vol. 37, n° 125, p. 120-128.