



Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya (Pérou méridional, Andes Centrales)

Etienne Juvigné, Jean-Claude Thouret, Isabelle Loutsch, Sébastien Lamadon,
Manfred Frechen, Michel Fontugne, Marco Rivera, Jasmine Dávila, Jersy
Mariño

► To cite this version:

Etienne Juvigné, Jean-Claude Thouret, Isabelle Loutsch, Sébastien Lamadon, Manfred Frechen, et al..
Retombées volcaniques dans des tourbières et lacs autour du massif des Nevados Ampato et Sabancaya
(Pérou méridional, Andes Centrales). Quaternaire, 2008, Téphras et séquences quaternaires, 19 (2),
pp.157-173. 10.4000/quaternaire.3362 . hal-02470528

HAL Id: hal-02470528

<https://hal.science/hal-02470528>

Submitted on 19 Oct 2020

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

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

RETOMBÉES VOLCANIQUES DANS DES TOURBIÈRES ET LACS AUTOUR DU MASSIF DES NEVADOS AMPATO ET SABANCAYA (PÉROU MÉRIDIONAL, ANDES CENTRALES)



Etienne JUVIGNÉ¹, Jean-Claude THOURET², Isabelle LOUTSCH¹,
Sébastien LAMADON², Manfred FRECHEN³, Michel FONTUGNE⁴,
Marco RIVERA⁵, Jasmine DÁVILA⁶ & Jersy MARÍÑO⁵

RÉSUMÉ

Des recherches multidisciplinaires ont été réalisées à partir de coupes et carottes extraites de tourbières et d'un lac, au Pérou méridional, dans la région volcanique du massif des Nevados Ampato, Sabancaya et Hualca Hualca, proche du canyon du Río Colca et de la ville d'Arequipa. L'objectif majeur de la présente recherche est de compléter la partie holocène d'un modèle téphrostratigraphique du Pérou méridional, portant sur les cinquante derniers milliers d'années. Les sites étudiés sont plus particulièrement la grande tourbière de Sallalli et les rives de la Laguna Mucurca. La tourbière de Sallalli se trouve sur le piémont oriental du Massif Ampato-Sabancaya ; elle a été barrée par des moraines remontant à la dernière glaciation ainsi que par des coulées de lave au SE. La séquence tourbeuse de Sallalli comprend au moins cinq téphras. Les niveaux les plus récents consistent en retombées pliniennes de verres rhyolithiques dont l'attribution est discutée entre l'éruption du Huaynaputina en 1600AD et une autre du Misti qui a eu lieu entre 800 cal BC et 200 cal AD. Les autres téphras sont des produits hétérogènes d'origine phréatomagmatique émis probablement par le Sabancaya, voire l'Ampato pendant les périodes respectives suivantes : 150 cal AD à 100 cal BC, 150 à 420 cal BC, 2100 à 2500 cal BC et 7420 à 7750 cal BC. Les dépôts lacustres récents de la Laguna Mucurca à l'ouest du Nevado Ampato renferment notamment un téphra hétérogène d'une éruption phréatomagmatique, qui aurait eu lieu entre 920 et 760 cal BC ; il serait issu de l'un des cônes proches, situé dans le champ des volcans monogénétiques de Huambo sur la marge sud du Río Colca.

Mots-clés : Andes centrales, Pérou, Nevado Ampato, Nevado Sabancaya, volcans, téphrostratigraphie, téphrochronologie, ¹⁴C, Holocène.

ABSTRACT

VOLCANIC ASH-FALLS IN PEAT-BOG AND LAKES AROUND NEVADOS AMPATO AND SABANCAYA MASSIF (SOUTHERN PERU, CENTRAL ANDES)

Multidisciplinary investigations have been carried out on sections and sediment cores from a lake and peat bogs in the Western Cordillera in the Central Andes of Southern Peru, around Nevados Ampato, Sabancaya and Hualca Hualca volcanic massif. More than 850,000 inhabitants of the city of Arequipa and the Colca valley are concerned by further activities of those volcanoes. The aim of the current study is to complete the Holocene tephrostratigraphical model for southern Peru in which about 40 tephras are distributed within the past 50,000 years. The tephras described in this paper have been discovered in two sites: the large peat-bog of Sallalli at the southern piedmont of the Sabancaya volcano, and the Laguna Mucurca, a salar (brine lake) 15 km W of Nevado Ampato. The Sallalli peat-bog is located in a glacially shaped piedmont, which has been dammed by recent moraines and lava flows 10 km SE of the summit of Nevado Sabancaya. The peat section, which spans a large part of the Holocene period (since ca. 9650 yr), encompasses at least five tephras. The most recent ones consist in plinian ash-falls characterized by rhyolitic glass shards that can be linked either with the AD 1600 eruption of the Huaynaputina volcano (120 km to the ESE) or with an eruption of the Misti volcano (60 km to the SE) that occurred between 800 cal BC and 200 cal AD. The other tephras consist in phreatomagmatic products of local origin likely erupted by the Sabancaya volcano, or by the Ampato volcano, within the periods bracketed as follows: (i) 150 cal AD and 100 cal BC; (ii) 150 and 420 cal BC; (iii) 2100 and 2500 cal BC; and (iv) 7420 et 7750 cal BC. The recent lacustrine deposits of the Laguna Mucurca host traces of a plinian ash-fall from Huaynaputina volcano and a scoriaceous tephra of phreatomagmatic origin. The latter was emplaced between 920 and 760 cal BC. This tephra has probably been produced by one of the neighbouring cones located in the field of monogenic volcanoes close to Huambo on the southern edge of the Río Colca valley.

Key-words: Central Andes, Peru, Nevado Ampato, Nevado Sabancaya, volcanoes, tephrostratigraphy, chronology, Holocene.

¹ Laboratoire de Géologie du Quaternaire, Université de Liège, Sart Tilman, Bât 12A, 4000, Liège, Belgique. Courriel : ejuvigne@ulg.ac.be

² Laboratoire Magmas et Volcans, UMR 6524 CNRS, OPGC et IRD, Université Blaise Pascal, 5 rue Kessler, F-63038 Clermont-Ferrand cedex, France. Courriel : thouret@opgc.univ-bpclermont.fr

³ Geochronology and Isotope Hydrology, Universität Hannover, Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Deutschland

⁴ LSCE, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Domaine du CNRS, Bât. 12, 91198 Gif-sur-Yvette cedex, France.

⁵ INGEMMET, Instituto Nacional Geológico-Minero y Metalúrgico, Avenida Canada, San Borja, Lima, Peru.

⁶ IGP, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Peru.

1 - INTRODUCTION

Des recherches téphrostratigraphiques dans le cadre morpho-sédimentaire glaciaire et périglaciaire de la Cordillère occidentale du Pérou méridional (fig. 1) ont permis de découvrir plus de 40 téphras recouvrant une période de 50.000 ans (tab. 1). Ce programme mené depuis plusieurs années met notamment en exergue les risques encourus par un million d'habitants vivant dans cette zone (Thouret *et al.*, 2001, 2002a).

Une dizaine de volcans actifs ou potentiellement actifs sont situés à une distance de 20 à 150 km des villes d'Arequipa (850 000 habitants), Moquegua et Tacna (200 000 personnes chacune) et de nombreuses villes plus petites. Neuf volcans sont réputés actifs : Nevado Sara Sara, Nevado Sabancaya, El Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Nevado Tutupaca, Yucamane et Casiri (fig. 1). Six d'entre eux (Huaynaputina, Misti, Ubinas, Nevado Sabancaya, Nevado

Tutupaca et Yucamane) ont connu au moins une éruption depuis la conquête espagnole en 1540. Par le fait qu'ils sont couverts de glace et de neige, ces volcans « Nevados » représentent nécessairement une menace quotidienne en cas d'éruption, voire même simplement de réchauffement. La vallée du Colca où habitent environ 30 000 personnes est devenue une destination touristique importante. Elle est particulièrement exposée à l'activité du Nevado Sabancaya, dont la dernière éruption, vulcanienne, a commencé en 1986 et a duré jusqu'en 1998 (Thouret *et al.*, 1994). Après 1998, son activité a considérablement diminué (Gerbe & Thouret, 2004). Depuis mars 2006, l'Ubinas est entré dans une crise éruptive phréatique puis vulcanienne modérée, qui dure encore aujourd'hui (Thouret *et al.*, 2005). L'éruption plinienne et ignimbritique du Huaynaputina en 1600 AD, la plus importante dans toutes les Andes durant l'histoire récente, a produit un volume de téphra de 12 km³ (Thouret *et al.*, 1997, 2002b) à 20 km³ (Adams *et al.*, 2001).

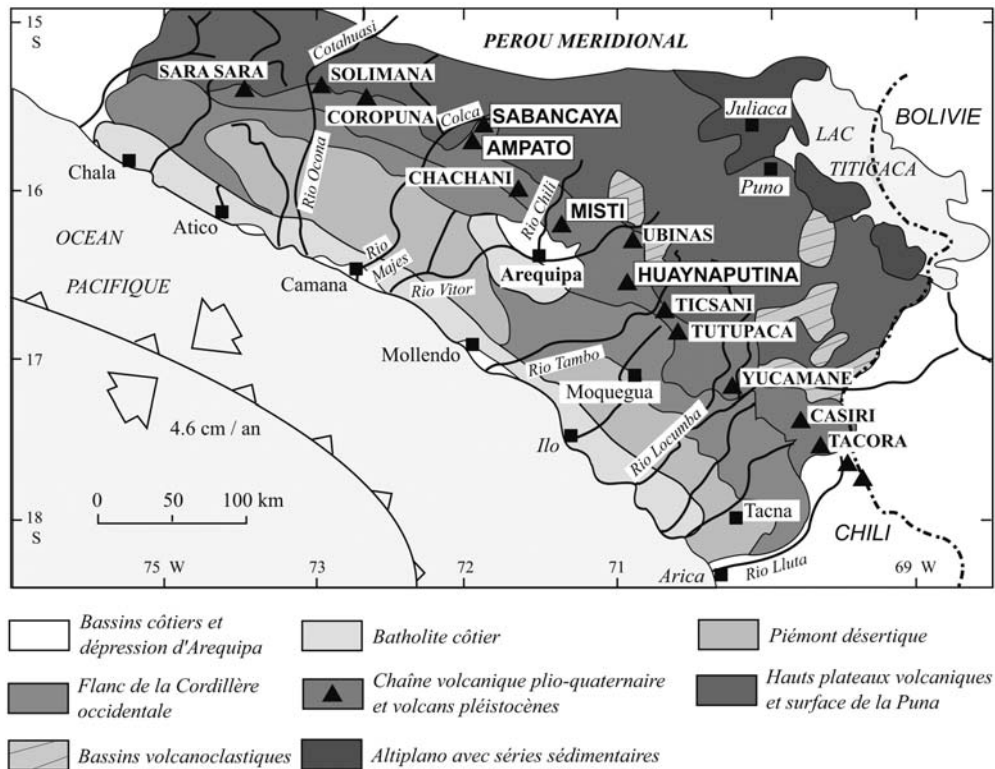


Fig. 1 : Localisation de la chaîne volcanique pléistocène et holocène au Pérou méridional (Thouret *et al.*, 2001).

Fig. 1: Location of the volcanic range of Pleistocene and Holocene age in southern Peru (Thouret *et al.*, 2001).

Tab. 1 : Stratigraphie et chronologie des téphras du Pléistocène supérieur et de l'Holocène découverts dans la chaîne volcanique au sud du Pérou (Thouret *et al.*, 2002a). Les rectangles gris mettent en exergue les huit dépôts de retombées de ponces les plus dispersés (>1000 km²) et les plus volumineux (≥ 1 km³). Les téphras du tableau 1 ont été trouvés autour de onze strato-volcans, dômes ou champs de lave dans la Cordillère occidentale, du nord-ouest au sud-est (fig. 1, 2 et 3) : (1) le volcan subactif Nevado Sara Sara (5600 m) à 180 km à l'WNW d'Arequipa ; (2) le complexe de dômes dormant du Nevado Coropuna (6380 m) ; (3) le champ monogénétique de Orcopampa-Andahua-Huambo à mi-distance des Nevados Coropuna et Ampato-Sabancaya (Delacour *et al.*, 2007) ; (4) le Nevado Sabancaya, dômes actifs (5980 m) et le strato-volcan Nevado Ampato, subactif ou dormant (fig. 4 ; Gerbe & Thouret, 2004) ; (5) le volcan actif (fumerollien) El Misti (5820 m) dont le cratère est à 17 km du centre de la ville d'Arequipa et dont la dernière éruption date du XV^e siècle (Thouret *et al.*, 2001) ; (6) le salar (lac salé) de la Laguna Salinas (4300 m) à mi-distance des édifices El Misti et Ubinas ; (7) l'Ubinas (5600 m), appareil le plus actif du Pérou au cours de l'histoire (Thouret *et al.*, 2005) ; (8) le Huaynaputina (4600 m), site de la plus grande éruption historique dans les Andes en 1600 (Thouret *et al.*, 1999) ; (9) Les dômes fumerolliens du Ticsani (5470 m), au nord de la ville de Moquegua ; (10) le volcan actif Nevado Tutupaca (5815 m) à l'est du Ticsani ; (11) le volcan actif Yucamane (5450 m) près de la ville de Candarave au NE de Moquegua.

VOLCANS	SARA-SARA	COROPUNA strato-volcan et dômes	ANDAHUA HUAMBO ORCOPAMPA champ monogénique	NEVADOS AMPATO et SABANCAYA dômes-coulées	EL MISTI STRATO-VOLCAN	UBINAS STRATO-VOLCAN	HUAYNAPUTINA CENTRE VOLCANIQUE	TICSANI CUMULO-DÔMES	TUTUPACA strato- volcan	YUCAMANE strato- volcan
PERIODE										
HISTORIQUE	AD 1500		cen AD 1400-1600 cône Chilcayoc Groupe Andahua	1990-98 phmag / vulc 1750 - 1784 AD ph cen 1460 ± 30 cen ≥ 1680 ± 30 <i>Téphra du Huaynaputina</i> ret > 1790 ± 110	1784-1787 ph 1677 cen 1440-80 AD cen 1304-1398 AD cen 655-865 AD	actif depuis 1552 cen ph, phmag cp sco 1677 AD 980 ± 60 ret p, cp	février - mars 1600 = cp, CP, def (dacite)		1902, 1862 1802 1780	1787
	2000 ans BP			ret < 2955 ± 80	ret p, CP 430 AD - 160 BC 2300 - 2050 cen < 2370 ± 90 lh, CP 2770 ± 190	Dépôt d'avalanche > 3670 ± 60				
HOLOCENE	5000		<i>Téphra de Mucurca</i> 2650 ± 50 ret sc cône Keyoc < 2810-2970 ± 50 cen cen 4060 ± 50 cônes Ticsho et Puca Mauras Groupe Andahua et Huambo	<i>Téphra de Sallalli</i> ret > 4500 ± 125 cp coulée de lave < 5440 ± 40 flanc SW 8770 ± 50 ret 8520 ± 80	CP 6390 ± 50 CP 8140 ± 80	> 7480 ± 40 ret p, cp	< 7480 ± 40 ret p, cp 9700 ± 190 ret p, cp	trois dômes	avalanche de dôme CP	
	10 000	ret p, cp	Groupe Andahua et Huambo	coulées de lave à blocs volumineuses	~ 10 600 ± 240 cp ; ret p 1 et 2, cp dac ; ret p 3	11 280 ± 70 11 480 ± 220 cp, CP, def		11 600 ± 80 ret p, cp	cp	
TARDI GLACIAIRE	15 000		Groupe Orcopampa cônes émoussés et coulées de lave		~ 13 640 ± 330 cp et ret p 4 : contemporain du retrait glaciaire	14 690 ± 200				
	20 000				20 960 ± 380/360 cp					
PLEISTOCENE SUPERIEUR	25 000				CP 24 840 ± 480					
	30 000	27 200 ± 300 cen			CP 31 200 ± 1330 CP 33 400 ± 2800 / 2160 CP 33 900 ± 3200 / 2300					
	35 000									
	40 000	37 370 ± 1010 / 1160 cen			CP 38 300 39 680 ± 1370 / 1170 CP 40 200 ± 820/740					
	45 000	> 44 500 cp			CP 43 970 ± 1180 / 1030 CP 47 350 ± 2100 / 1700 CP 48 640 ± 2270 / 1170				cp 44 000 ± 2130 / 2910	
	50 000 ans BP	> 49 200								

cen : retombée de cendre ; ret p : retombée de ponce ; ret sc : retombée de scories ; cp : coulée pyroclastique (CP = volumineuse) ;
def : déferlante pyroclastique ; c sco coulée de scories et cendres ; ph : phreatique ; phmag : phreatomagmatique ; st : strombolien ; and andésite ; dac dacite.
 dépôt volumineux de retombée > 1 km³ ; en italiques : téphras identifiés dans le massif de l'Ampato-Sabancaya (cet article).

Tab. 1: Stratigraphy and chronology of upper Pleistocene and Holocene tephtras, which have been found in the volcanic range in southern Peru (Thouret et al., 2002a). Grey boxes highlight the eight most dispersed (>1000 km²) and most voluminous (≥ 1 km³) pumice-fall deposits. Tephtras of table 1 have been identified around eleven stratovolcanoes, domes or lava fields in the Western Cordillera, that are, from Northwest to Southeast (fig. 1, 2 and 3): (1) the subactive Nevado Sara Sara volcano (5600 m) 180 km to the WNW of Arequipa; (2) the dormant dome complex that forms Nevado Coropuna (6380 m); (3) the monogenetic field of Orcopampa-Andahua-Huambo at mid-distance between Nevados Coropuna and Ampato-Sabancaya (Delacour et al., 2007); (4) Nevado Sabancaya that consists of active domes (5980 m), and the subactive or dormant Nevado Ampato stratovolcano (fig. 4; Gerbe & Thouret, 2004); (5) the active (fumarolic) El Misti stratovolcano (5820 m) whose crater lies 17 km only away from the city centre of Arequipa, and which last erupted by mid XVth century (Thouret et al., 2001); (6) the salar (brine lake) of Laguna Salinas (4300 m) at mid-distance between El Misti and Ubinas edifices; (7) Ubinas, the most historically active stratovolcano (5600 m) in southern Peru (Thouret et al., 2005); (8) Huaynaputina (4600 m), the site of the largest historical eruption in the Andes, which occurred in AD 1600 (Thouret et al., 1999); (9) the fumarolic domes of Ticsani (5470 m), north of the city of Moquegua; (10) the active Nevado Tutupaca stratovolcano (5815 m) east of Ticsani; (11) the active Yucamane stratovolcano (5450 m) near the city of Candarave NE of Moquegua.

Cet article décrit des téphras holocènes découverts dans une tourbière et un lac salé sur les piémonts est et nord-ouest du massif des Nevados Ampato et Sabancaya. Il enrichit en cela les résultats acquis antérieurement dans le projet TESSOPE (Thouret *et al.*, 2000, 2002a).

2 - LE MASSIF DE L'AMPATO-SABANCAYA-HUALCA HUALCA

Le massif de l'Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca s'est édifié à proximité du versant méridional du canyon du Río Colca (fig. 2). Le Nevado Ampato est un grand strato-volcan que le Nevado Sabancaya prolonge vers le Nord par des dômes-coulées chevauchant un linéament orienté SW-NE. Le Nevado Hualca-Hualca est également un grand strato-volcan très proche au NNW du complexe précédent mais davantage érodé. Ces appareils atteignent les altitudes respectives de 6280 m (Ampato), 6040 m (Sabancaya) et 6025 m (Hualca Hualca) qui, de ce fait, dominent de 1500 à

2000 m l'Altiplano portant les tourbières et lacs périphériques. Les dômes et les coulées de lave du Nevado Sabancaya, qui surmontent le substratum volcanique daté de 0,6 Ma environ (Gerbe & Thouret, 2004), couvrent une superficie de 70 km² environ, et occupent un volume approximatif de 25 km³. Au moins dix coulées de lave à blocs, de composition andésitique à dacitique subalcaline, et d'âge holocène, se sont épanchées sur une distance de 8 km vers le NW et le SE (fig. 2). Une coulée à blocs située sur le flanc NW du volcan repose sur une tourbe dont l'âge ¹⁴C est d'environ 5400 ans BP (Lamadon, 1999). Des dépôts de coulées pyroclastiques à blocs et cendre reposent en alternance avec des retombées subaériennes ; ils sont observés jusqu'à 9 km du sommet et sont attribués à l'activité explosive du Nevado Sabancaya ou de l'Ampato durant le Pléistocène supérieur.

Les tourbières et les *salars* (lagunes salées), situées sur les piémonts et dans les vallées glaciaires autour des strato-volcans cités plus haut sont des pièges sédimentaires qui ont pu enregistrer, entre autres, des retombées volcaniques (téphras) tant d'origine locale

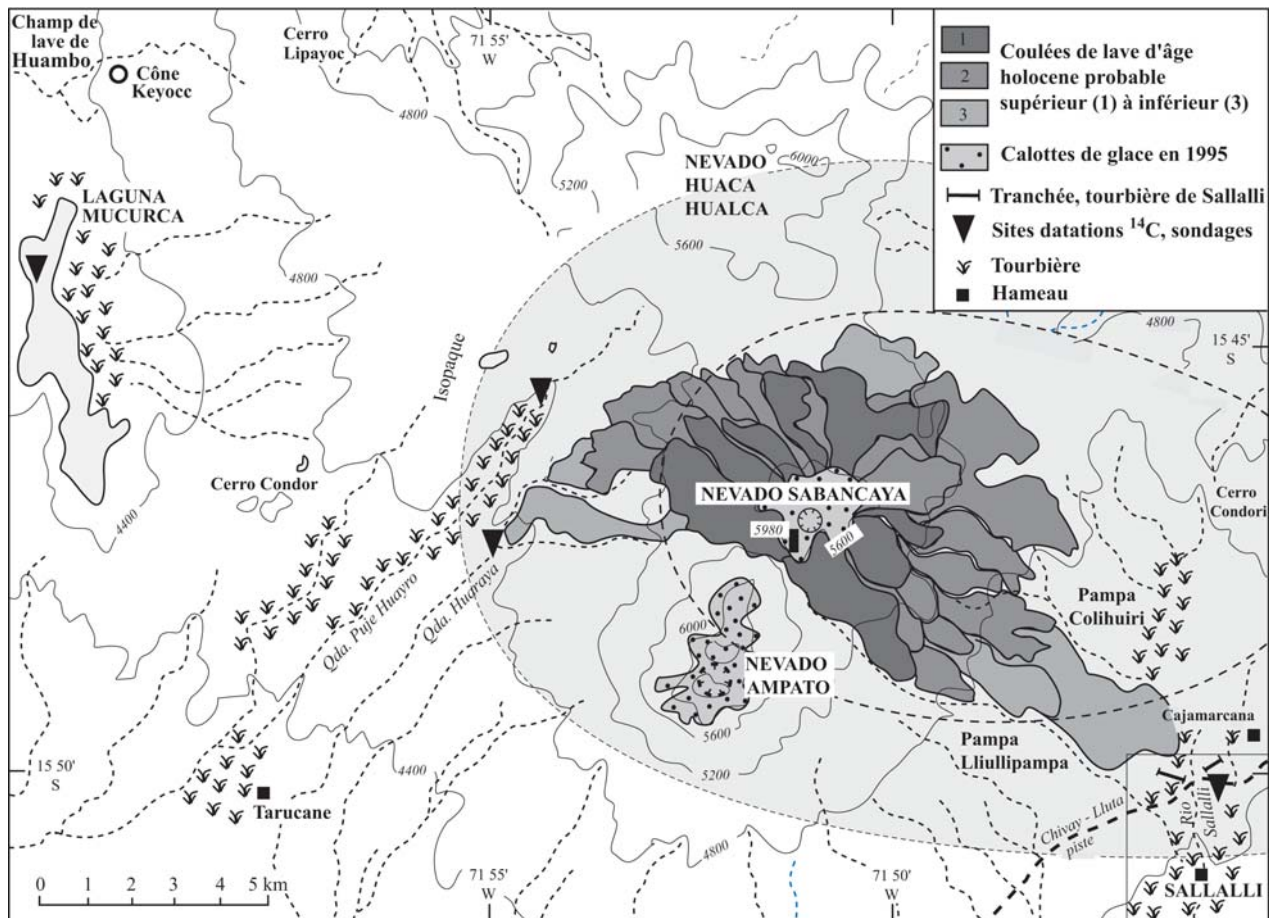


Fig. 2 : Nevados Ampato, Sabancaya et Hualca-Hualca ; la tourbière de Sallalli-Cajamarca et le lac salé de Mucurca, ainsi que le canyon du Río Colca.

Le lobe des retombées de l'éruption récente du Sabancaya (1990-1998) est représenté par deux isopaques. Dans le coin inférieur droit de la figure, le rectangle délimite la tourbière, dont les sites étudiés sont représentés en détail à la figure 2B.

Fig. 2: Nevados (ice-clad volcanoes) Ampato, Sabancaya and Hualca Hualca; peat bog of Sallalli-Cajamarca and Mucurca brine lake (salar), as well as the canyon of the Río Colca river. The lobe of tephra dispersed during the last eruption of Nevado Sabancaya (1990-1998) is schematically shown by two isopachs. In the lower right corner, a rectangle outlines the peat bog in which sites for peat cores and ¹⁴C dating are shown in fig. 2B.

que distale, comme l'illustrent le salar de la Laguna Salinas à 40 km à l'est d'Arequipa (Juvigné *et al.*, 1997), et les grands salars de Bolivie (Risacher & Fritz, 1991 ; Risacher, 1992). Ainsi avons-nous recherché des téphras, d'une part dans des tourbières sur le piémont oriental de l'Ampato et du Sabancaya (Sallalli et Cajamarcana), et d'autre part sur le piémont NW dans la Laguna Mucurca. De tels sites sont nécessairement postérieurs à la déglaciation des piémonts. La présente étude chronostratigraphique ne pouvait donc remonter au-delà de 15 000 ans (Juvigné *et al.*, 1997 ; Thouret *et al.*, 2002a), voire 21 000 ans dans la mesure où, sur la base de nouvelles datations par cosmonucléides, le maximum glaciaire a été daté dans le sud du Pérou à 34 000 ans BP et le début du retrait à 21 000 ans BP (Smith *et al.*, 2005 ; Mark *et al.*, 2004). Cependant, ces âges plus anciens ont été obtenus sur des moraines dans la Cordillère orientale, dont l'environnement climatique est et était différent de celui de la Cordillère occidentale, probablement moins humide.

3 - ACTIVITÉ VOLCANIQUE RÉGIONALE PENDANT L'Holocène ET LA PÉRIODE HISTORIQUE

Le Nevado Sabancaya est le seul volcan du massif de l'Ampato-Sabancaya-Hualca qui a une activité historique connue ; il domine directement les piémonts étudiés ici. Thouret *et al.* (1994) ont rassemblé les données relatives à l'activité volcanique post-glaciaire dans ce massif ; elle est limitée en principe à celle du Nevado Sabancaya et résumée ci-après.

A des moments encore indéterminés de l'Holocène, le Sabancaya a construit deux dômes-coulées, avec de volumineuses coulées de lave à blocs de composition andésitique puis dacitique, et étalées sur plus de 40 km² (Thouret *et al.*, 1994). Des dépôts, les uns de retombées subaériennes, et les autres de coulées de scories et lapilli ponceux, ont également été observés dans des affleurements de sédiments volcanoclastiques post-glaciaires.

Sur la base de la présence d'une lamine de cendre volcanique reconnue dans une tourbière du piémont oriental du Nevado Sabancaya, ce volcan aurait eu une éruption phréatomagmatique vers 8500 ans BP (Juvigné *et al.*, 1998), soit environ 8000 cal BC.

Au pied du Nevado Sabancaya, une coulée de lave à blocs s'est étalée en bordure de la dépression à un moment encore indéterminé de l'Holocène. Quelques chroniques datant du XVIII^e siècle mentionnent deux phases d'activité de ce volcan, d'abord en 1752, puis en 1784-85 (Travada y Córdova, 1958). Par la suite, de 1785 à 1986, une activité fumerollienne faible et très sporadique a été relatée.

En novembre 1986, l'activité fumerollienne s'est accentuée. Des fractures se sont ouvertes, la glace s'est crevassée et un cratère s'est ouvert dans la glace, puis dans les laves du dôme-coulée septentrional. L'éruption du Nevado Sabancaya a été presque continue, mais

modérée, de mai 1990 à 1998. Cette éruption a mis fin à une phase de repos de 200 ans environ.

Entre mai 1990 et décembre 1994, l'activité du Sabancaya a adopté un caractère explosif, particulièrement intense lors de la crise du 28 mai au 5 juin 1990. Pendant ces neuf jours, un des panaches s'éleva jusqu'à une hauteur de 5000 m au-dessus du cratère, et ses retombées cendreuse furent retrouvées jusqu'à environ 20 km vers l'est du volcan (Thouret *et al.*, 1994). L'activité volcanique modérée entre 1990 et 1994 a consisté en une série de brèves explosions séparées par des intervalles de repos de 15 à 60 minutes. Elles produisirent des colonnes éruptives hautes de 0,5 à 3 km, intercalées dans de longues périodes de dégazage. Le matériau juvénile rassemble des fragments de lave non altérés, noirs et vitreux, de composition andésitique à dacitique (Thouret *et al.*, 1994, 1995). Bien que le volume apparent de téphra émis ait été faible (0,025 km³), les retombées furent assez largement dispersées sur près de 250 km².

Après 1994, l'activité s'est poursuivie de façon plus faible, plus sporadique et essentiellement phréatique. La nature des projections du Nevado Sabancaya a changé au cours du temps. Au départ, la part de xénolithes était très élevée (85-90 % en octobre 1990) à la faveur de l'ouverture de la cheminée, puis elle a diminué (40-50 % en décembre 1992) au profit de fragments de magma juvénile jusqu'en 1994. Dans l'ensemble, le magma juvénile a une composition d'andésite potassique (Gerbe & Thouret, 2004).

Un échantillon comprenant l'ensemble de ces retombées a été prélevé dans la tourbière de Sallalli, et il a été examiné dans le cadre du présent travail où il va être question d'identifier des téphras de composition hétérogène. La distribution granulométrique est unimodale avec un mode entre 125 µm et 250 µm ; le plus gros élément atteint 16 mm, la fraction poussiéreuse (< 63 µm) représente 12 % de l'ensemble. On y trouve un large éventail de composants : scories gris foncé, débris de coulée de lave gris foncé, traces de verres bruns ou incolores, minéraux felsiques (essentiellement feldspaths et très secondairement quartz), minéraux mafiques (micas bruns, clinopyroxènes, orthopyroxènes et amphiboles). Une telle variété atteste un mélange des différents matériaux accumulés dans et sur le cône, et repris ou remobilisés lors de l'ouverture et de l'élargissement de la cheminée.

4 - LA TOURBIÈRE DE SALLALLI, RÉSULTATS

La tourbière de Sallalli-Cajamarcana est située sur le piémont oriental du Nevado Sabancaya (16°45'S, 71°48'W) à une altitude de 4400 m (fig. 2 et 3). Elle occupe une dépression entourée par des cordons morainiques, et affectée de nombreuses dépressions thermokarstiques (*kettle holes*) développées dans des dépôts glaciaires et fluvio-glaciaires. Le Rio Sallalli draine la dépression et se jette dans le Rio Parcomayo sur le piémont sud du massif étudié.

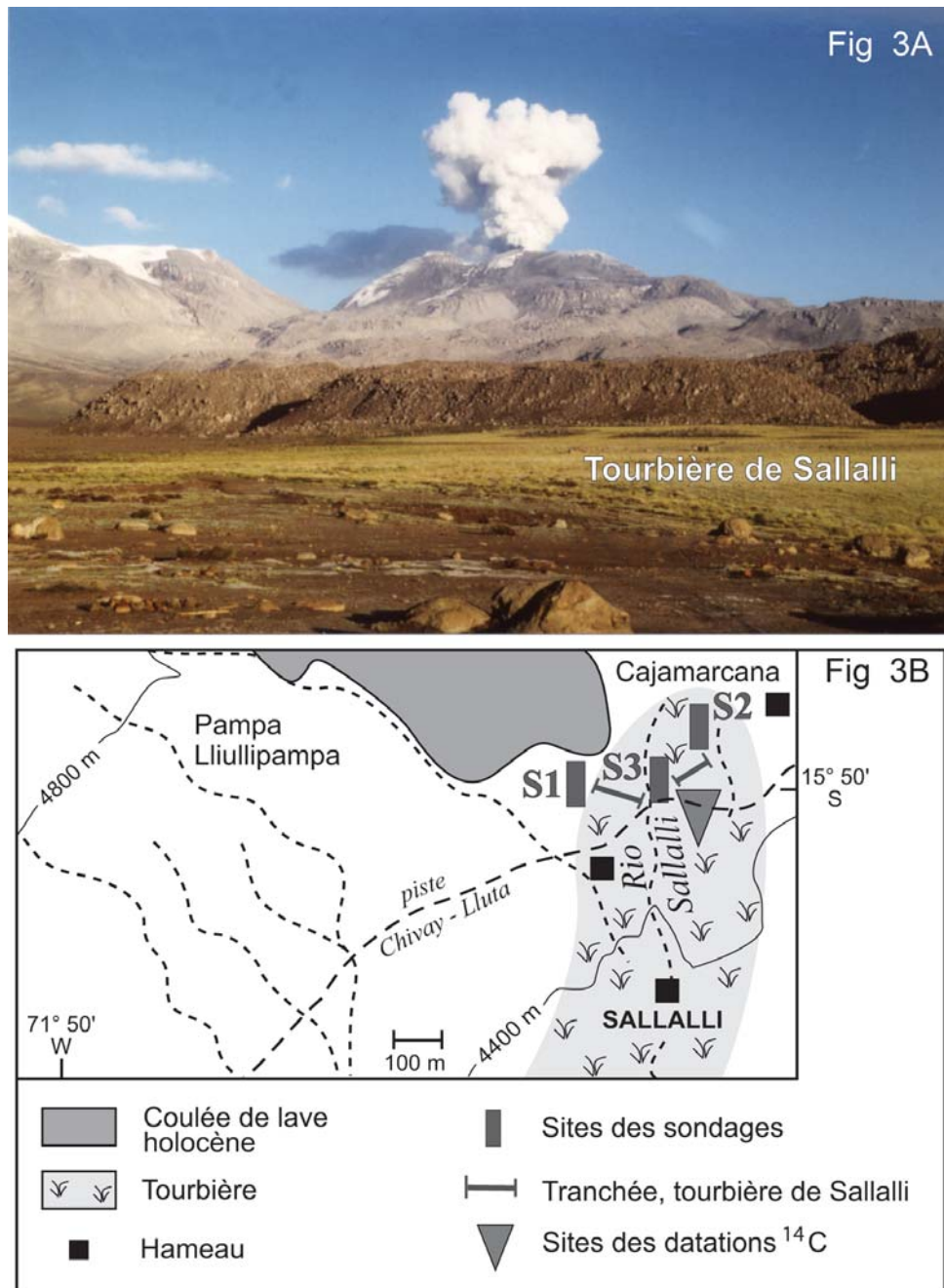


Fig. 3 : A. Le Sabancaya en éruption en mai 1996 (photo J.-C. Thouret) et la tourbière de Sallalli envahie par des coulées de lave à blocs de l'Holocène supérieur ; **B.** Position des sites étudiés dans la tourbière de Sallalli. Ce secteur est localisé dans la figure 2.

Fig. 3: A. Nevado Sabancaya erupting in May 1996 (photograph JC Thouret) and peat bog of Sallalli, which has been partly covered by block-lava flows sometime during the upper Holocene. B. Location of studied sites in the peat bog. This area is located in Fig. 2.

Un affleurement tourbeux, correspondant à la berge de rive gauche du Rio Sallalli (fig. 4 : Coupe A), a été étudié antérieurement (Juvigné *et al.*, 1998). Il couvre essentiellement le début de l'Holocène entre 9650 ± 170 aBP (Lv-2110, soit 8400-9250 cal BC) et 8330 ± 120 aBP (Lv-2121, soit 7080-7580 cal BC ; âges calibrés avec le modèle de Stuiver *et al.*, 1998). Cet âge le plus ancien obtenu à la base des séquences étudiées fournit une limite chronologique minimale pour la déglaciation du piémont étudié. L'affleurement tourbeux comprend quatre niveaux sableux dont un a été identifié comme téphra (Juvigné *et al.*, 1997) correspondant à une éruption phréatomagmatique du

Sabancaya, qui aurait eu lieu vers 8520 ± 80 aBP (Lv-2107), soit entre 7420 et 7750 cal BC. Nos nouvelles recherches ont porté sur une fouille en tranchée et des carottes extraites au moyen d'une sonde russe (fig. 3A).

4.1 - FOUILLE EN TRANCHÉE

Une tranchée d'une centaine de mètres de longueur environ a été réalisée sur la rive droite du Rio Sallalli (fig. 4) et, sur le tronçon où le sable et gravier n'a pas été atteint, des sondages ont été exécutés sur le fond

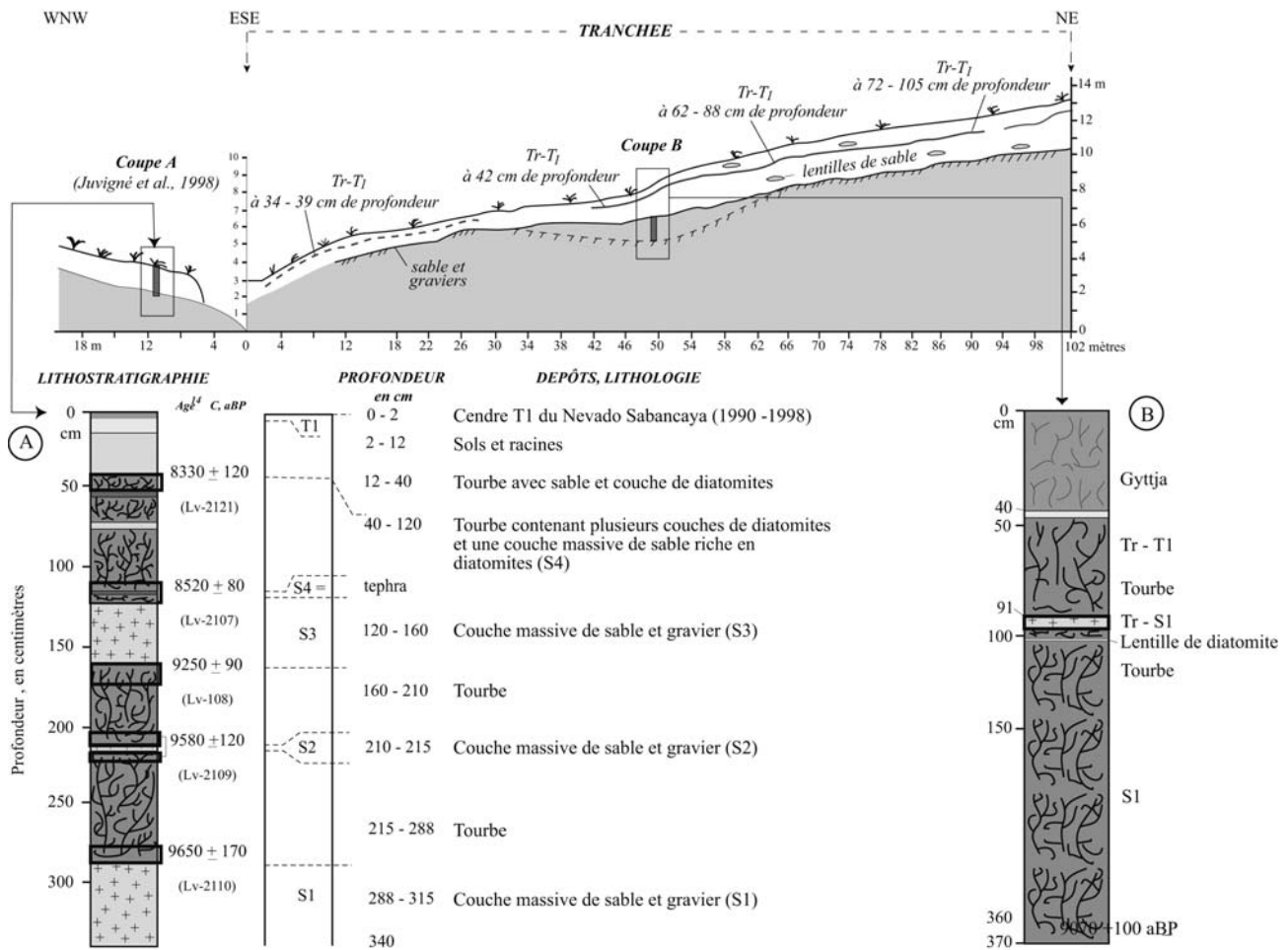


Fig. 4 : Coupes dans le vallon du Rio Sallalli. Coupe A, étudiée par Juvigné *et al.* (1998) ; Coupe B, paroi de la tranchée (de 0 à 150 cm), prolongée par une carotte de sondage (S1).

Fig. 4: Cross sections in the small-scale Rio Sallalli valley: cross section A has been studied by Juvigné *et al.* (1998); cross section B is the 0 to 150 cm-deep trench wall, which has been deepened by the S1 core drilled in the peat bog.

pour mesurer l'épaisseur totale de la tourbe, qui atteint localement 370 cm sous la surface. C'est à cet endroit de plus forte épaisseur de tourbe qu'à partir du fond un carottage a été effectué (fig. 4 : Coupe C + sondage S1).

4.1.1 - Un téphra

Sur la paroi de la tranchée, il existe des lentilles, dont une d'une quarantaine de mètres de longueur, pouvant atteindre 3 cm d'épaisseur et prolongée par d'autres occurrences éparées ; elles se situent à une profondeur variant entre 34 et 105 cm. La taille de l'élément le plus gros est de 2 mm. La détermination au microscope polarisant dans la classe de 105 à 420 μm fait apparaître une majorité de micropores et de verres volcaniques vacuolaires incolores. Le verre est de composition rhyolithique à tendance potassique (voir tab. 2 et fig. 8). La fraction cristalline se répartit en 80 % de minéraux felsiques (essentiellement des feldspaths) et 20 % de minéraux mafiques (dont 2 % de mica brun). Dans un échantillon de minéraux denses séparés dans le bromoforme, les minéraux ferromagnésiens (autres que les micas bruns) consistent en clinopyroxènes

vert à brun clair (57 %), orthopyroxènes (22 %) et amphiboles (21 %).

Les feldspaths consistent essentiellement en oligoclase potassique et andésine et secondairement en labrador (tab. 3). Dans la classification de Morimoto (1989), l'orthopyroxène est de l'enstatite (hyperssthène) et les clinopyroxènes se répartissent de part et d'autre de la limite des champs de l'augite et du diopside (tab. 3). Dans la classification de Leake *et al.* (1997), les amphiboles sont calciques du type magnésio-hornblende. Il s'agit d'un téphra provenant d'une éruption plinienne ; nous l'appelons Tr-T1 (**T**ranchée, **T**éphra **1**).

Un échantillon de tourbe de 3 cm d'épaisseur comprenant le téphra a été daté par le ^{14}C et a fourni un âge de 300 ± 50 aBP (Beta-126965), soit entre 1460 et 1670 cal AD.

Dans la mesure où au moment de la retombée le téphra existait nécessairement en nappe continue, la structure lenticulaire atteste le remaniement au moins partiel du téphra. Dans ce contexte, seul le vent peut avoir été responsable de ce remaniement.

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	OR	AB	AN
Feldspaths												
60,37	0	24,01	0,21	0,02	0,03	6,38	7,58	0,99	99,59	5,54	64,47	29,98
60,23	0,05	23,62	0,35	0	0,01	6,03	7,92	1,07	99,28	5,88	66,25	27,85
61,65	0,02	23,39	0,28	0,01	0	5,4	8,07	1,19	100,01	6,61	68,16	25,21
60,83	0	23,91	0,24	0	0,01	5,98	7,86	1,07	99,90	5,95	66,21	27,83
60,43	0	23,85	0,26	0	0,05	6,11	7,81	1,06	99,57	5,86	65,74	28,38
53,86	0,1	26,79	0,55	0,01	0,02	10,24	5,72	0,5	97,79	2,81	48,84	48,34
59,29	0,03	24,01	0,27	0	0,01	6,25	7,71	1,02	98,59	5,69	65,14	29,16
53,35	0,04	28,36	0,71	0	0,04	11,53	4,94	0,46	99,43	2,59	42,52	54,87
58,97	0,09	22,75	0,26	0,03	0,02	6,06	7,94	0,99	97,11	5,47	66,48	28,04
61,34	0,05	23,95	0,27	0	0	6,1	7,96	0,94	100,61	5,19	66,59	28,2
58,41	0,01	24,3	0,71	0	0,02	0,01	7,38	0,78	91,62	4,35	62,75	32,88
60,18	0,01	23,77	0,21	0,02	0,01	5,84	7,81	0,97	98,82	5,46	66,87	27,65
Orthopyroxène										EN	FS	WO
53,06	0,59	1,34	16,38	0,39	25,92	1,9	0,08	0	99,66	70,64	25,64	3,72
Clinopyroxènes										EN	FS	WO
51,51	0,64	1,43	9,18	0,18	15,98	19,28	0,66	0,06	98,92	45,54	14,97	39,49
49,87	0,63	1,35	9,02	0,24	15,68	20,12	0,75	0,09	97,75	44,37	14,7	40,93
51,73	0,23	0,87	7,94	0,49	14,29	22,67	0,53	0,16	98,91	40,48	13,39	46,13
52,22	0,21	0,75	8,27	0,54	14,27	22,27	0,46	0,04	99,03	40,53	14,03	45,44
51,97	0,19	0,77	8,26	0,43	14,72	22,52	0,53	0,05	99,44	41,15	13,62	45,23
Amphiboles												
46,65	1,52	5,95	12,6	0,41	15,57	11,82	1,42	0,7	96,65			
46,19	1,95	7,22	12,2	0,42	14,04	11,33	1,57	0,87	95,78			
47,37	1,28	6,23	11,7	0,39	15,54	11,35	1,52	0,75	96,11			

Tab. 3 : Composition chimique de minéraux du téphra Tr-T1 de la tranchée de Sallalli.

Tab. 3: Geochemical composition of the minerals of the Tr-T1 tephra found in the trench dug out in the Sallalli peat bog.

4.1.2 - Quelques autres lentilles minérales

Cinq niveaux de lentilles minérales de faible extension (décimètre) ont été examinés.

L'un d'entre eux, situé une cinquantaine de centimètres sous le téphra, est un sable de composition hétérogène dont les grains essentiels sont des scories gris foncé, des débris de coulée de lave gris foncé, des feldspaths et des minéraux mafiques divers : micas bruns, clinopyroxènes, hypersthènes et amphiboles. Par comparaison avec le téphra récent du Sabancaya, ce sable peut être un téphra de retombée phréatomagmatique ; nous l'appelons Tr-S1 (**Tranchée, Sable 1**). Quatre autres niveaux consistent essentiellement en diatomite.

4.2 - SONDAGE S1

A l'endroit de la coupe B, depuis le fond de la tranchée (150 cm) jusqu'à la base du sondage S1 (à 370 cm), la tourbe est pratiquement pure jusqu'au refus sur du matériau minéral meuble. La tourbe de base (360-370 cm) a été datée de 9070 ± 100 aBP (Hv-24659), soit entre 8125 et 8020 cal BC. Compte tenu de cet âge, on peut admettre que le matériau minéral sous-jacent qui a provoqué le refus de la sonde russe devrait être l'épais téphra phréatomagmatique connu dans la coupe A, sur la berge toute proche du Rio Sallalli (Juvigné *et al.*, 1997).

4.3 - SONDAGE S2

La carotte S2 a été prélevée sur le versant de rive droite, environ 400 m à l'amont de la tranchée (fig. 3B) et à proximité de la limite de la tourbière. Les résultats des analyses sont représentés à la figure 5.

De la surface jusqu'à 165 cm, la tourbe est d'apparence pure et l'âge du segment de 145 à 165 cm a été daté de 2050 ± 70 aBP (Lv-2184) soit entre 210 cal BC et 130 cal AD.

Sous la tourbe, la difficulté d'enfoncer la sonde a provoqué la perturbation des sédiments, et la stratigraphie présentée constitue un essai de reconstitution :

- de 165 à 185 cm, un sable gravillonneux de distribution granulométrique bimodale dont le plus gros grain atteint 32 mm ; nous l'appelons S2-S1 (**Sondage 2- Sable 1**).
- de 185 à 195 cm, sable de composition hétérogène, riche en verres vacuolaires incolores. Il s'agit de 87 % de cendre (mode principal d'environ 250 µm) avec une faible fraction poussiéreuse (13 %). La composition chimique des verres correspond à de la rhyolithe potassique (voir plus loin, fig. 8). Dans les frottis de minéraux denses entre 105 et 420 µm, on trouve 63 % de clinopyroxènes, 18 % d'orthopyroxènes (hypersthène) et 19 % d'amphiboles. Il s'agit d'un téphra provenant d'une éruption plinienne ; nous l'appelons S2-T1 (**Sondage 2, Téphra 1**).

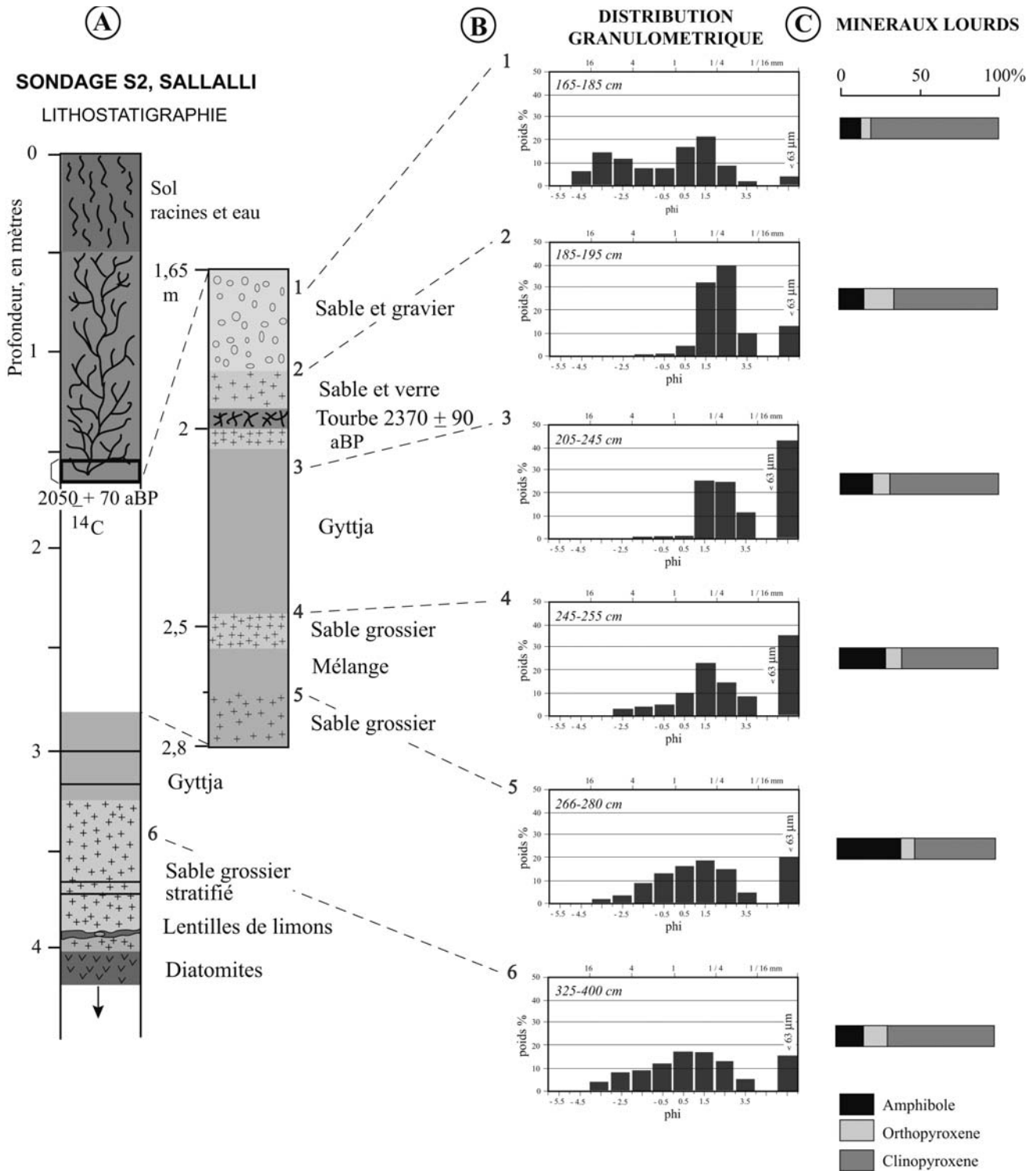


Fig. 5 : A. Lithostratigraphie de la carotte du sondage S2 ; B. Distribution granulométrique des couches minérales ; C. Minéraux denses de plus de 105 µm des mêmes couches.

Fig. 5: A. Lithostratigraphy of the S2 core; B. Grain size distribution of the mineral layers; C. Heavy minerals exceeding 105 µm in these mineral layers.

c) De 195 à 205 cm, une couche de tourbe a donné un âge de 2370 ± 90 aBP (GrN-25586, soit entre 800 cal BC et 200 cal AD).

De 205 à 325 cm, l'essentiel de la masse a une texture argileuse et contient de nombreuses frustules de diatomées et de la matière organique végétale diffuse (gyttja). Des niveaux sableux à gravillonneux sont intercalés dans ce gyttja : de 205 à 210 cm, de 245 à 255 cm, de 265 à 280 cm. De 325 à 400 cm, du sable

grossier apparemment stratifié (voir plus haut : perturbation par sondage) est présent dans la partie inférieure du gyttja. Chacune de ces couches sableuses contient une fraction fine qui peut être en partie héritée du gyttja hôte, qui a pu y pénétrer en profitant de la porosité. La fraction sablo-gravillonneuse de ces couches est constituée d'une grande variété d'éléments : débris de coulées de lave, scories basaltiques, cristaux variés, felsiques (feldspaths et quartz) et

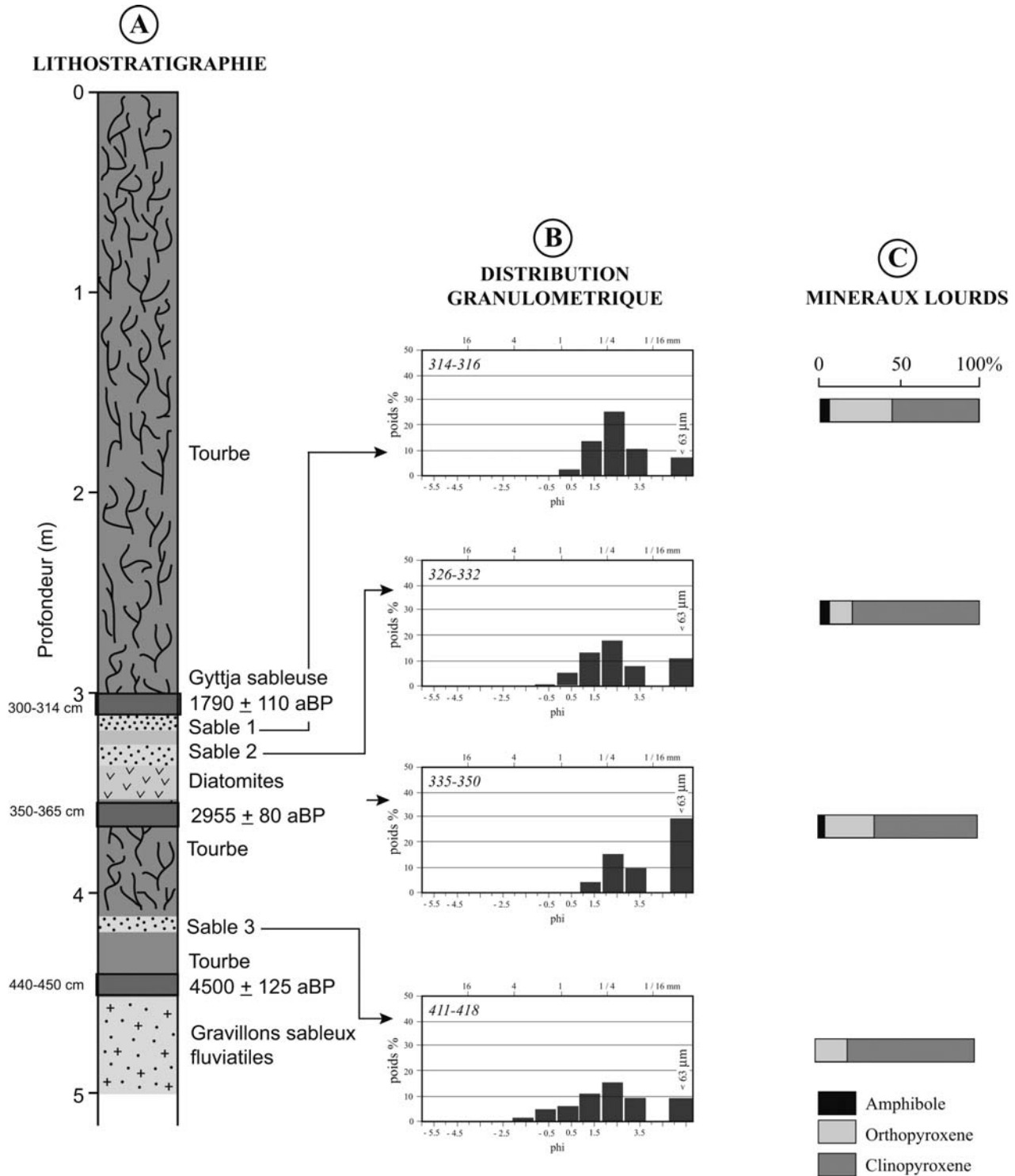


Fig. 6 : A. Lithostratigraphie de la carotte du sondage S3 ; B. Distribution granulométrique des couches minérales ; C. Minéraux denses excédant 105 μm des mêmes couches (C).

Fig. 6: A. Lithostratigraphy of the S3 core; B. Grain size distribution of the mineral layers; C. Heavy minerals exceeding 105 μm in these mineral layers.

mafiques (clinopyroxènes, orthopyroxènes, micas bruns, amphiboles). Par comparaison avec le téphra récent du Sabancaya, ces sables peuvent être des téphras de retombées phréatomagmatiques ; nous les appelons respectivement : (i) 205-210 cm = S2-S2 (Sondage 2- Sable 2) ; (ii) 245-255 cm = S2-S3 (Sondage 2- Sable 3) ; (iii) 266-280 cm = S2-S4 (Sondage 2- Sable 4) ; (iv) 325-340 cm = S2-S5 (Sondage 2- Sable 5). Par comparaison avec le téphra

récent du Sabancaya, ces sables pourraient être des produits d'éruptions phréatomagmatiques.

4.5 - SONDAGE S3

Le point de prélèvement de la carotte S3 se situe dans une dépression thermokarstique (*kettle hole*) à environ 500 m au nord de la tranchée du Rio Sallalli

(fig. 3B). Les résultats des analyses sont représentés à la figure 6.

De la surface jusqu'à 450 cm de profondeur, on recoupe essentiellement de la tourbe à macrorestes, dans laquelle sont intercalées trois couches sableuses (314-316 cm ; 326-332 cm ; 411-418 cm) et une diatomite (335-350 cm). La sonde a été bloquée à 5 m de profondeur dans une couche de gravillon d'au moins 50 cm d'épaisseur. Ce gravillon sableux de base (450-500 cm), par la granularité et la variété de ses éléments, devrait avoir été déposé par le ruissellement.

Les couches sableuses (sables 1, 2 et 3) sont toutes de couleur gris foncé à noire. Leurs bords inférieurs et supérieurs sont nets. Leurs granularités respectives présentent un seul mode entre 125 et 250 μm , assorti d'un bon classement. La part de la fraction limono-argileuse est comprise entre 8 % et 10 % (dont des diatomées). Du point de vue minéralogique, on y retrouve l'éventail classique propre à cette région volcanique : scories gris foncé, débris de coulée de lave gris foncé, traces de verres bruns ou incolores, minéraux felsiques (essentiellement feldspaths et très secondairement quartz), minéraux mafiques (micas bruns, clinopyroxènes, orthopyroxènes (hypersthène) et amphiboles). L'ensemble de ces caractéristiques, et notamment les limites supérieures et inférieures nettes ainsi que l'isolement dans la séquence, permet d'attribuer ces trois couches à des retombées d'éruptions phréatomagmatiques. Nous les appelons respectivement : (i) 314-316 cm, S3-T1 (= Sondage 3- Téphra 1) ; (ii) 326-332 cm, S3-T2 (= Sondage 3- Téphra 2) ; (iii) 411-418 cm S3-T3 (= Sondage 3- Téphra 3).

Trois échantillons de tourbe ont été datés : (1) de 300 à 314 cm : 1790 ± 110 aBP (Hv-24660, soit entre 115 et 395 cal AD) ; (2) de 350 à 365 cm : 2955 ± 80 aBP (Hv-24662, soit entre 1290 et 1015 cal BC) ; (3) de 440 à 450 cm : 4500 ± 125 aBP (Hv-24661, soit entre 3365 et 2920 cal BC). Par extrapolation linéaire et en décomptant l'épaisseur des trois téphras, les résultats des trois datations permettent de conférer les âges approximatifs suivants aux trois téphras : S3-T1 : entre environ 150 cal AD et 100 cal BC ; S3-T2, entre environ 150 cal BC et 420 cal BC ; S3-T3, entre environ 2100 cal BC et 2500 cal BC.

5 - LAGUNA MUCURCA, RÉSULTATS

Le salar de la Laguna Mucurca est situé sur le piémont NW des volcans Ampato – Hualca Hualca ($15^{\circ}42'S$, $72^{\circ}01'W$) à 4300 m d'altitude et à proximité des cônes et des champs de lave de Huambo (fig. 2). Dans la partie septentrionale de la Laguna Mucurca, une carotte a été prélevée au bord du lac, à un moment (avril 1995) où le niveau était bas. Le site de sondage a été choisi le plus loin possible des dépôts de ruissellement, qui s'étalent en cônes de déjection au pied des versants en pente forte fermant la dépression. Les résultats des analyses sont représentés à la figure 7.

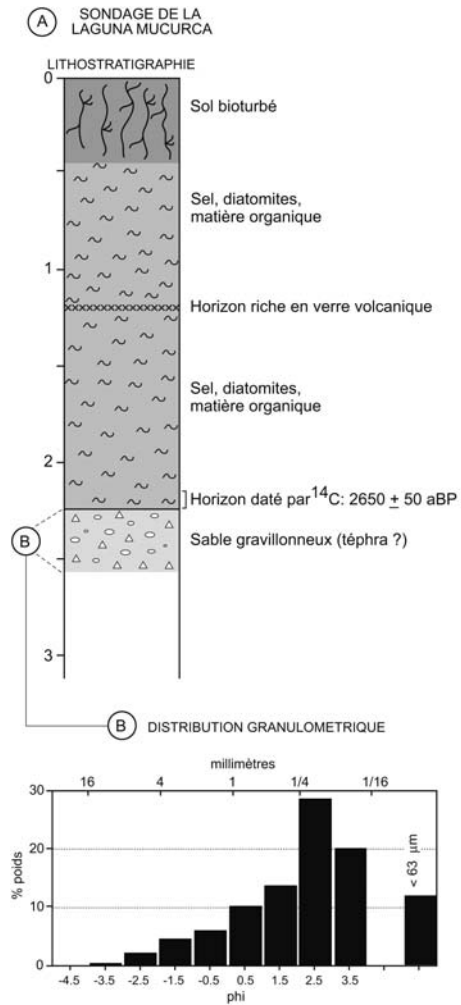


Fig. 7 : Lithostratigraphie de la carotte de la Laguna Mucurca ; A. Position du niveau riche en verre volcanique ; B. Distribution granulométrique du sable gravillonneux sous 225 cm.

Fig. 7: Lithostratigraphy of the core drilled in the Laguna Mucurca; A. Location of the layer rich in volcanic glass; B. Grain size distribution of the gravel sand layer below 225 cm in depth.

Jusqu'à 225 cm de profondeur (fig. 7), la séquence consiste en un sédiment hôte limono-argileux riche en diatomées et matières organiques et contenant des cristaux de sel dans des proportions variables. La couleur d'ensemble est généralement vert olive avec des horizons plus foncés que d'autres en fonction de la teneur en matière organique. Aucune stratification n'est perceptible dans cette séquence. Un sol peu développé se présente dans l'horizon supérieur. A 225 cm de profondeur, il existe un contact brutal entre la formation décrite ci-dessus et une couche essentiellement sablo-gravillonneuse qui n'a pu être traversée entièrement, mais a néanmoins été prélevée sur 25 cm d'épaisseur. La tranche de 210 à 225 cm de dépôt lacustre surmontant immédiatement cette couche a donné un âge de 2650 ± 50 aBP (GrN-21575), soit entre 920 et 760 cal BC. Le dépôt sablo-gravillonneux immédiatement sous-jacent devrait être de peu antérieur à cet âge.

5.1 - UN HORIZON RICHE EN VERRES VACUOLAIRES INCOLORES

En l'absence de stratification visible dans la séquence jusqu'à 225 cm de profondeur, la recherche de verres volcaniques été réalisée au microscope. Pour ce faire, la carotte a été divisée en segments de 10 cm de hauteur. A 120 cm de profondeur, on trouve une quantité très élevée de verres vacuolaires incolores et de nombreux feldspaths enrobés de verre de composition rhyolithique et potassique (voir plus loin tab. 2 et fig. 8). Ces produits appartiennent donc à un téphra issu d'une retombée plinienne d'origine allochtone ; nous l'appelons LM-T1 (Laguna Mucurca- Téphra 1). La détermination de l'association minéralogique du téphra n'a pas été possible en raison, d'une part de la faible concentration de matériau téphrique, et d'autre part de la présence de minéraux volcaniques dans le sédiment hôte dans lequel le téphra est dispersé.

5.2 - DESCRIPTION DU SABLE GRAVILLONNEUX (225-250 cm)

Le matériau est essentiellement sableux (75 %), secondairement gravillonneux (13 %) et limono-argileux (12 %, dont une part de diatomées). La distribution

est unimodale avec un mode entre 125 et 250 μm . L'élément le plus gros atteint 16 mm.

A la loupe binoculaire, on distingue : a) des phénocristaux sialiques libres, surtout des feldspaths ; b) des scories contenant des microcristaux ; c) des débris de coulée de lave gris foncé, anguleux ou émoussés ; d) des scories rougeâtres (faciès oxydé de cœur de cône) anguleuses ou émoussées ; e) quelques cristaux mafiques. Au microscope polarisant et dans la classe 105-420 μm , on trouve 90 % de clinopyroxènes verts souvent automorphes, 5 % d'orthopyroxènes (hypersthène) et 5 % d'amphiboles de pléochroïsme vert à brun. Par comparaison avec le téphra récent du Sabancaya, ce sable peut être un téphra de retombée phréatomagmatique ; nous l'appelons LM-S1 (Laguna Mucurca, Sable 1).

6 - DISCUSSION

Trois niveaux de téphra, chacun le plus récent dans leur site, sont caractérisés par la dominance de verres incolores vacuolaires de composition rhyolithique et potassique (tab. 2, fig. 8). Tous les téphras plus anciens ont la propriété commune d'avoir une texture très

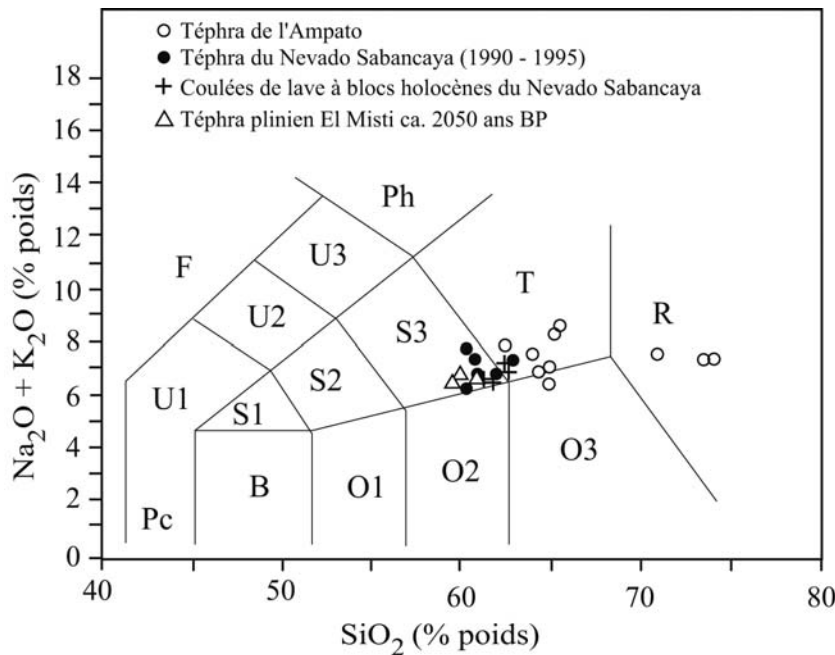


Fig. 8 : Détermination dans la classification TAS (Le Bas *et al.*, 1986) des verres des sites de la tranchée de Sallalli et de la carotte de Mucurca, ainsi que de ceux des stratotypes des produits du Huaynaputina à Quinistacas (dépôts pliniens primaires) et à Paso Coalaque (dépôts post-pliniens). F= Foidite ; Pc= Picrobasalte ; U1= Basanite, si $Ol_{nr} > 10\%$ ou Téphrite, si $Ol_{nr} < 10\%$; U2= Phonotéphrite ; U3= Téphriphonolithe ; Ph= Phonolithe ; B= Basalte alcalin, si $Ne_{nr} > 0$ ou Basalte subalcalin, si $Ne_{nr} < 0$; S1= Trachybasalte : Hawaïte, si $(Na_2O-2) > K_2O$ (%-p) ou Trachybasalte potassique, si $(Na_2O-2) < K_2O$; S2= Trachyandésite basaltique : Mugéarite, si $(Na_2O-2) > K_2O$ (%-p) ou Shoshonite, si $(Na_2O-2) < K_2O$; S3= Trachyandésite : Benmoréite, si $(Na_2O-2) > K_2O$ (%-p) ou Latite, si $(Na_2O-2) < K_2O$; T= Trachyte, si $Q_{nr} < 20\%$ ou Trachydacite, si $Q_{nr} > 20\%$; O1= Andésite basaltique ; O2= Andésite ; O3= Dacite ; R= Rhyolithe. Noter : en T et R : adjectif "hyperalkalin" pour $(Na_2O+K_2O)_{mol}/(Al_2O_3)_{mol} > 1$ - et en dehors de S1 à S3 : sodique pour $(Na_2O-4) > K_2O$ et potassique pour $(Na_2O-4) < K_2O$.

Fig. 8: TAS diagram (after Le Bas *et al.*, 1986) showing the geochemical fields of the glasses found in the Sallalli trench and in the Mucurca core, as well as the glasses of the stratotypes of the Huaynaputina deposits at Quinistacas (plinian-fall deposits) and at Paso Coalaque (post-plinian pyroclastic deposits). Captions in fields: F= Foidite; Pc= Picrobasalte; U1= Basanite, if $Ol_{nr} > 10\%$ or Tephrite, if $Ol_{nr} < 10\%$; U2= Phonotephrite; U3= Tephriphonolite; Ph= Phonolite; B= Alkali Basalt, if $Ne_{nr} > 0$ or Subalkali basalt, if $Ne_{nr} < 0$; S1= Trachybasalte: Hawaïte, if $(Na_2O-2) > K_2O$ (w-%) or potassic Trachybasalt, if $(Na_2O-2) < K_2O$; S2= Basaltic trachyandesite: Mugearite, if $(Na_2O-2) > K_2O$ (w-%-p) or Shoshonite, if $(Na_2O-2) < K_2O$; S3= Trachyandesite: Benmoreit, if $(Na_2O-2) > K_2O$ (w-%) or Latite, if $(Na_2O-2) < K_2O$; T= Trachyte, if $Q_{nr} < 20\%$ or Trachydacite, if $Q_{nr} > 20\%$; O1= Andésite basaltique; O2= Andésite; O3= Dacite; R= Rhyolithe. Adjectives: (i) for boxes T et R: "hyperalkaline" if $(Na_2O+K_2O)_{mol}/(Al_2O_3)_{mol} > 1$; (ii) sodic if $(Na_2O-4) > K_2O$ and potassic if $(Na_2O-4) < K_2O$ (not available for boxes S1, S2 and S3).

hétérogène, qui comprend l'ensemble des produits existant dans les strato-volcans locaux ainsi que dans les dépôts dispersés aux alentours par le vent et le ruissellement. Dans ces conditions la distinction entre téphra et dépôts volcanoclastiques est avant tout fondée sur l'isolement dans les séquences tourbeuses et la netteté des contacts entre les deux matériaux.

6.1 - LES TÉPHRAS À VERRES RHYOLITHIQUES

Des niveaux de microponces et verres ont été trouvés dans trois sites : la tranchée (Tr-T1) et le sondage S2 de Sallalli (S2-T1), ainsi que la Laguna Mucurca (LM-T1). Tous ces verres ont la même composition chimique de rhyolithe à tendance potassique (tab. 2, fig. 8). Malgré l'identité géochimique des verres de la tranchée et du sondage S2 de Sallalli, leurs âges ^{14}C respectifs excluent qu'ils soient mis en corrélation.

Dans la tranchée de Sallalli, la datation ^{14}C obtenue pour Tr-T1 délimite la période comprise entre 1460 et 1670 cal AD pendant laquelle une seule retombée poncée très largement dispersée est connue, celle du Huaynaputina survenue en février-mars 1600 AD (Navarro Oviedo *et al.*, 2000).

Dans la carotte S2, le téphra S2-T1 est encadré par deux âges ^{14}C qui le situent entre 130 cal AD et 800 cal BC. Pendant cette période une éruption plinienne du Misti a eu lieu ; elle a été datée par Thouret *et al.* (1995) à 1920 ± 200 aBP, puis redatée plus précisément à 2050 aBP à Arequipa par Thouret *et al.* (2001), soit entre 400 cal BC et 340 cal AD (nous écrivons Misti-BC/AD pour indiquer que cette éruption se situe aux environs du passage à l'ère chrétienne).

Dans la carotte de Mucurca, le seul âge ^{14}C disponible est de 920-760 cal BC à 210-225 cm, alors que les verres LM-T1 se trouvent à 120 cm de profondeur ; ici la corrélation est donc possible tant avec l'éruption du Huaynaputina-1600 AD qu'avec celle du Misti-BC/AD, mais en cas de vitesse de sédimentation constante au cours des deux derniers millénaires, l'appartenance au Misti prend l'avantage.

Si l'on compare la composition des verres à celle des produits du Huaynaputina-1600AD dans les deux stratotypes proches du volcan (Loutsch, 1999), alors, ils ne peuvent correspondre qu'aux produits de la phase post-plinienne (tab. 2, fig. 8). Aucune comparaison n'est possible avec les produits pliniens du Misti-BC/AD, car les analyses des ponces de ce dernier ont été pratiquées uniquement en roche totale (tab. 2). Par ailleurs, des analyses 'roche totale' des produits du Huaynaputina-1600AD ont montré que le magma est dacitique (Loutsch, 1999 ; Thouret *et al.*, 1999, 2002a ; Adams *et al.*, 2001), donc normalement moins différencié que le verre. Quand il s'agit des produits du Misti-BC/AD, il faudrait donc raisonner avec des écarts non rigoureux pour discuter l'origine des verres.

Par ailleurs, le minéral mafique dominant dans les stratotypes des produits du Huaynaputina-1600AD est l'amphibole (environ 90 %), suivie de l'apatite, puis

seulement les deux pyroxènes (Loutsch, 1999). A Sallalli, dans Tr-T1, il n'y a que 21 % d'amphiboles, les pyroxènes sont dominants, et il n'y a pas d'apatite. Il faut aussi signaler que le tri sélectif, lors du transport atmosphérique du Huaynaputina à Sallalli (environ 120 km), aurait dû augmenter la part d'amphibole par rapport aux pyroxènes (Juvigné, 1983). Enfin, il faut encore remarquer que l'association de minéraux denses de Tr-T1 est identique à celle de S2-T1. Si le téphra Tr-T1 provient du Huaynaputina-1600AD, sa composition minéralogique ne peut s'expliquer par sa contamination par des minéraux locaux lors du remaniement éolien dont la retombée primaire a été l'objet peu après sa retombée (voir plus haut).

En conclusion, sur la base de l'âge ^{14}C et de la composition des verres, le téphra Tr-T1 de la tranchée de Sallalli devrait correspondre aux produits post-pliniens de l'éruption du Huaynaputina-1600AD, mais il faut alors admettre une contamination *in situ* pour expliquer la pauvreté en amphiboles de l'association de minéraux denses. Par ailleurs, le téphra S2-T1 de Sallalli devrait provenir d'une éruption du Misti-BC/AD. Quant au niveau de verres rhyolithiques de Mucurca (LM-T1), il s'accommode davantage de l'éruption du Misti-BC/AD. En défendant l'hypothèse de deux retombées poncées dans la région, il faut alors s'étonner des lacunes stratigraphiques qui font que les deux téphras n'ont été trouvés ensemble dans aucun des sites étudiés. Rappelons ici que ce sont deux âges ^{14}C incompatibles qui empêchent la corrélation globale des trois occurrences de verres rhyolithiques.

6.2 - TROIS NOUVEAUX TÉPHRAS D'ORIGINE PHRÉATOMAGMATIQUE

La carotte du sondage S3 de la tourbière de Sallalli contient trois téphras bien individualisés dans la tourbe. Il constitue ainsi la séquence téphrostratigraphique de référence. Par comparaison avec le téphra récent du Sabancaya, leur composition minéralogique variée atteste leur origine phréatomagmatique, et leur granularité cendreuse est en faveur d'une origine locale (Ampato ou Sabancaya). Leurs âges respectifs sont : S3-T1, entre environ 150 cal AD et 100 cal BC ; S3-T2, entre environ 150 cal BC et 420 cal BC ; S3-T3, entre environ 2100 cal BC et 2500 cal BC.

6.3 - LE SECTEUR DU RIO SALLALLI

Téphrostratigraphie. Dans la carotte S2, le sable gravillonneux S2-S1 qui recouvre le téphra Misti-BC/AD ne peut guère être attribué qu'au ruissellement, car le site est en bordure de la tourbière ; ce matériau est nécessairement postérieur à l'éruption du Misti-BC/AD, il est particulièrement grossier et n'a été trouvé nulle part ailleurs.

Quant aux trois niveaux de sable qui se trouvent dans la séquence de gyttja du sondage S2 et sous la tourbe

datée entre 800 cal BC et 200 cal AD, ils peuvent être corrélés comme suit :

- S2-S2 (205-210 cm) avec S3-T1 (entre environ 150 cal AD et 100 cal BC) ;
- S2-S3 (245-255 cm) avec S3-T2 (entre environ 150 cal BC et 420 cal BC) ;
- S2-S4 (266-280 cm) avec S3-T3 (entre environ 2100 cal BC et 2500 cal BC).

Cette tentative de corrélation entre les sites S2 et S3 implique que les téphras correspondants soient également présents dans la séquence de la tranchée et de la carotte S1 qui remontent jusqu'à environ 8100 cal BC. Or, une seule lentille sableuse de composition minéralogique adéquate y a été reconnue sous le téphra du Huaynaputina (coupe C). Il faut donc accepter des lacunes stratigraphiques dans la tranchée et le sondage S1.

Géomorphologie dynamique. La coupe transversale recoupant les observations faites sur les deux versants du vallon du Rio Sallalli (fig. 4) montre que leurs couvertures tourbeuses respectives correspondent à des périodes très différentes : entre environ 9000 et 7000 cal BC en rive gauche, et la période d'environ 8000 cal BC à aujourd'hui sur un replat de rive droite. Cette situation interpelle le géomorphologue.

L'actuel fond de vallée du Rio Sallalli à l'endroit de la coupe de rive gauche était le fond d'une dépression thermokarstique (*kettle hole*) lors de la déglaciation, la formation de la tourbe y a été intense au début de l'Holocène et la retombée d'un téphra d'origine phréatomagmatique y a eu lieu (Juvigné *et al.*, 1998). - L'épaisseur de tourbe a dû y être supérieure à l'actuelle.

Dans cette zone à peine libre de glace, le Rio Sallalli se mettait en place sous la forme de déversements lacustres en série d'un *kettle hole* à l'autre. Il a alors dérivé sur le versant droit de sa vallée, en glissant vers sa gauche (vers l'Est) et en érodant la tourbe supérieure du *kettle hole*. C'est aux environs de 7000 cal BC que le ruisseau s'est encaissé à l'endroit de son lit actuel. Dans ce modèle d'évolution, la tourbification a pratiquement cessé en rive gauche en raison du drainage favorisé par une forte dénivelée, tandis qu'en rive droite, elle se poursuivait sur une pente plus faible, voire un replat.

6.4 - UN TÉPHRA PHRÉATOMAGMATIQUE DANS LA LAGUNA MUCURCA

Le niveau du lac a nécessairement été plus élevé qu'aujourd'hui après la période 920 à 760 cal BC (cf. âge ¹⁴C) pour permettre une sédimentation lacustre sur plus de 225 cm à l'endroit du sondage. Ce haut niveau a dû exister jusqu'à un moment très récent, puisque après la retombée du téphra à verres rhyolithiques (Misti-BC/AD ou Huaynaputina-1600AD), 120 cm de dépôts lacustres se sont encore accumulés. Le bas niveau actuel du lac serait donc extrêmement récent, voir partiellement saisonnier.

Dans la logique de la ressemblance des éléments de description du sable gravillonneux de Mucurca LM-S1 avec ceux du téphra récent du Sabancaya, ce matériau peut aussi être considéré comme un téphra d'une éruption phréatomagmatique. D'après l'âge du sédiment

Volcan source	Chronologie aBP	cal	Téphra (ou matériau daté) position stratigraphique nature symbole	Tourbière Tranchée et coupe A	Sallalli Sondages S1, S2, S3	Laguna Mucurca	Origine et dispersion proche	lointaine
N. Sabancaya	1990-98		téphra vulcanien et phm				x	
N. Sabancaya	1752-1784 AD		endre (rare)				x	
Huaynaputina	300 ± 50	1600 AD	Tr-T1 cendre (dacite) plinienne daté dans tourbe	X	x S2-T1	<i>LM-T1 ??</i>		X 125 km Est Moquegua
<u>N. Sabancaya</u>	1790 ± 110	100 cal BC à 150 Cal AD	Tephra phm? S2-S2, S3-T1	lacune	x dans S2, S3	x LM-S1	x	
<u>N. Ampato</u>	(2050 ± 70)	420 à 150 cal BC	(Tourbe)					
<u>N. Sabancaya</u>		420 à 150 cal BC	sable-téphra	lacune	x dans S2, S3		x	
<u>N. Ampato</u>		(800 cal BC - 200 cal AD)	(Tourbe)					
<u>El Misti</u>	2370 ± 90	800 cal BC à 200 cal AD	<u>Tr-S1 retombée plinienne ponceuse</u>	<u>X</u>	<u>x S2-T1</u>	<u>LM T1 ?</u>		X 60 km SE 400 cal BC - 340 cal AD à Arequipa
			(Tourbe)					
<u>Cerro Keyoc</u>	> 2650 ± 50	> 920-760 cal BC	<u>scorie LM-T1</u>			X		
<u>N. Sabancaya</u>	4500 ± 125	2500 à 2100 cal BC	Téphra phm? S2-S4, S3-T3	lacune	x dans S2, S3 ??		x	
<u>N. Ampato</u>								
<u>N. Sabancaya</u>	8520 ± 80	7750 à 7420 cal BC	S4 téphra phm	x			x	
<u>N. Ampato</u>								
	9070 ± 100	(8125-8020 cal BC)	(Tourbe)					
			Tephra phm sous-jacent	x coupe A	x sous S1			
	9650 ± 170	9250 cal BC	Age maximum de la tourbière, un peu postérieure à la déglaciation à Sallalli (4400 m)					

Notes :

Nom volcan source = **en gras** : avéré ; **souligné** : probable ; en italiques : possible

x = présent X abondant et dispersé au moins régionalement

Tephra phm= téphra phréatomagmatique

Tab. 4 : Volcans sources et téphras datés : corrélations locales et régionales proposées.

Tab. 4: Volcanoes identified as sources and dated tephras: proposed correlations at local and regional scales.

lacustre immédiatement sus-jacent, elle aurait eu lieu au début du dernier millénaire BC ou peu avant. Pour établir une corrélation avec le site de référence S3 et le téphra S3-T3 de la tourbière de Sallalli, il faudrait remonter à environ 2100-2500 cal BC, mais le matériau est plus grossier ici. Cependant, il existe des cônes stromboliens à seulement 4 km au nord de la lagune, et parmi eux, le cône Keyocc qui est le plus proche (fig. 2) et le plus récent. C'est cette seconde hypothèse que nous privilégions ici en raison de la forte épaisseur et de la granularité de lapilli du matériau.

7 - CONCLUSIONS

Dans la région du massif des Nevados Ampato - Sabancaya et Hualca Hualca (Cordillère occidentale au sud du Pérou), une tranchée et quatre sondages ont permis d'investiguer la période comprise entre 9250 cal BC et aujourd'hui, et plusieurs téphras ont été mis en évidence (tab. 4).

Un niveau de verres rhyolithiques qui se présente dans trois sites ne peut être attribué avec certitude à l'une ou l'autre des deux éruptions pliniennes récentes connues (Huaynaputina-1600 AD ou Misti-BC/AD).

Tous les téphras plus anciens ont la propriété commune d'avoir une composition très hétérogène manquant d'originalité minéralogique, puisqu'ils contiennent l'ensemble des produits existant dans les strato-volcans Ampato et Sabancaya, et de ce fait dans tous les dépôts périphériques. Ils devraient correspondre à des faciès de débouchage et/ou des éruptions phréatomagmatiques. Le plus ancien a été émis lors d'une éruption du Nevado Sabancaya vers 8500 cal BC. Les suivants datent successivement des périodes suivantes : 2100 à 2500 cal BC, 150 à 420 cal BC et 150 cal AD à 100 cal BC.

Dans la Laguna Mucurca, un téphra d'origine phréatomagmatique a également été trouvé, qui est de peu antérieur à la période comprise entre 920 à 760 cal BC, et il a probablement été émis par le cône Keyocc, tout proche.

Les lacunes stratigraphiques avérées dans les différents sites étudiés portent à croire que la récurrence de l'activité volcanique holocène dans le Massif de l'Ampato-Sabancaya est plus fréquente (mais de volume limité) que ne le montrent les résultats acquis dans la présente étude.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les partenaires péruviens de l'Institut Geofísico del Perú et de Ingemmet, ainsi que l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) au Pérou, qui ont appuyé le travail de terrain, ainsi que la *Commission on Tephrochronology and Volcanism* (COTAV-INQUA), qui a soutenu le programme TESSOPE au Sud du Pérou de 1995 à 1999.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS N.K., DE SILVA S., SELF S., SALAS G., SCHUBRING S., PERMENTER J.-L., & ARBESMAN K., 2001 - The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, Southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, **62**, 493-518.
- COBEÑAS G., 2007 - *Etude pétrologique des produits éruptifs holocènes du volcan El Misti*. Travail d'Etude et de Recherche de Master 1 Géologie (non publié). LMV, Université Blaise Pascal, 25 p.
- DA SILVA I., & ZIELINSKI G., 1998 - Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, **393**, 397-498.
- DELACOUR A., GERBE M.-C., THOURET J.-C., WÖRNER G., & PAQUEREAU P., 2007 - Magma evolution of Quaternary minor volcanic centres in Southern Peru, Central Andes. *Bulletin of Volcanology*, **69**, 6, 581-606.
- GERBE M.-C., & THOURET J.-C., 2004 - Role of magma mixing in the petrogenesis of lavas erupted through the 1990-98 explosive activity of Nevado Sabancaya in South Peru. *Bulletin of Volcanology*, **66**, 541-561.
- JUVIGNÉ E., 1983 - Les variations minéralogiques dans les retombeées de 1982 du volcan El Chichon (Chiapas, Mexique) et leur intérêt pour la téphrostratigraphie. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **106**, 311-325.
- JUVIGNÉ E., THOURET J.-C., GILOT E., GOURGAUD A., LEGROS F., URIBE M., & GRAF K., 1997 - Etude téphrostratigraphique et bioclimatique du Tardiglaciaire et de l'Holocène de la Laguna Salinas, Pérou méridional. *Géographie Physique et Quaternaire*, **51** (2), 219-231.
- JUVIGNÉ E., THOURET J.-C., GILOT E., LECLERCQ L., & GOURGAUD A., 1998 - L'activité du volcan Nevado Sabancaya (Pérou) au cours de l'Holocène. « Hommes et Volcans », *Quaternaire*, **9** (1), 45-51.
- LAMADON S., 1999 - *Fluctuations glaciaires et téphrostratigraphie dans les montagnes intertropicales : une revue et application dans les Andes du Sud Pérou (massifs des Nevados Ampato et Coropuna)*. Mémoire de DEA (non publié), Université Blaise Pascal, 180 p.
- LEAKE B.E., BIRCH W.D., GILBERT M.C., GRICE J.D., HAWTHORNE F.C., KATO A., KISH H.J., KRIVOVICHEV V.G., LINTHOUT K., LAIRD J., MARESH W.V., NICKEL E.H., ROCK N.M.S., SCHUMACHER J.C., SMITH, D.C., STEPHENSON N.C.N., UNGARETTI L., WHITTAKER E.J.W., & YOUZHI G., 1997 - Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy*, **9**, 623-651.
- LE BAS M.J., LE MAITRE R.W., STRECKEISEN A., ZANETTIN B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, 1986 - A chemical classification of volcanic rocks based on the total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, **27**, 745-750.
- LOUTSCH I., 1999 - *Récurrence de l'activité volcanique au Pérou méridional durant les trois derniers millénaires*. Mémoire Licence de géographie, Laboratoire de géomorphologie, Université de Liège, 71 p.
- MARK B.G., SELTZER G.O., & RODBELL D.T., 2004 - Late Quaternary Glaciations of Ecuador, Peru and Bolivia. In J. Ehlers & P.L. Gibbard (eds.), *Quaternary glaciations - Extent and chronology, Part III: South America, Asia, Africa, Australasia, Antarctica*. Developments in Quaternary Science, Elsevier, Amsterdam, Vol. 2, 151-163.
- MORIMOTO N., 1989 - Nomenclature of Pyroxenes. *Canadian Mineralogist*, **27**, 143-156.
- NAVARRO OVIEDO R., JARA R.L.A., THOURET J.-C., SIEBE C., & DÁVILA J., 2000 - The AD 1600 eruption of Huaynaputina as described in early Spanish chronicles (translated from: "La reventazón del Huaynaputina en 1600", In "Antología del valle de Omate" por R. Navarro, 1994). *Boletín Sociedad geológica del Perú*, **90**, 121-132.
- RISACHER F., 1992 - Les salars de l'altiplano de Bolivie. *La Vie des Sciences*, Gauthier-Villars, Paris, **9**, 1, 39-62.
- RISACHER F., & FRITZ B., 1991 - Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. *Chemical Geology*, **90**, 211-231.

- SMITH J.A., SELTZER G.O., FARBER D.L., RODBELL D.T., & FINKEL R.C., 2005 - Early local Last Glacial Maximum in the tropical Andes. *Science*, **308**, 5722, 678-681.
- STUIVERT M., REIMER P.J., & BRAZIUNAS T.F., 1998 - High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, **40**, 3, 1127-1151.
- THOURET J.-C., GUILLANDE R., HUAMAN D., GOURGAUD A., SALAS G., & CHOROWICZ J., 1994 - L'activité actuelle du Nevado Sabancaya (Sud Pérou) : reconnaissance géologique et satellitaire, évaluation et cartographie des menaces volcaniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **1**, 165, 49-63.
- THOURET J.-C., LEGROS F., GOURGAUD A., SALAS G., JUVIGNÉ E., GILOT E., URIBE M., & RODRIGUEZ A., 1995 - Un exemple de prévision des risques volcaniques au Pérou méridional (région d'Arequipa), fondé sur l'étude de l'activité éruptive récente du strato-volcan El Misti. *Compte-Rendus de l'Académie des Sciences (Géomatériaux)*, Paris, **320**, série IIa, 923-929.
- THOURET J.-C., DAVILA J., RIVERA M., EISSEN J.-PH., GOURGAUD A., LE PENNEC J.-L., & JUVIGNÉ E., 1997 - L'éruption explosive de 1600 au Huaynaputina (Pérou), la plus volumineuse de l'histoire dans les Andes centrales. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences (Géomatériaux)*, Paris, **325**, 931-938.
- THOURET J.-C., DAVILA J., & EISSEN J.-PH., 1999 - Largest historic explosive eruption in the Andes at Huaynaputina volcano, south Peru. *Geology*, **27** (5), 435-438.
- THOURET J.-C., JUVIGNÉ E., LOUSCH I., & CHAVEZ CHAVEZ J.A., 2000 - Activité volcanique historique et sacrifices humains chez les Incas au Pérou méridional. In E. Juvigné & J.-P. Raynal (eds.), *Tephros, chronologie, archéologie. Les dossiers de l'Archéo-Logis I*. CDERAD, Goudet, 219-226.
- THOURET J.-C., SUNI J., FINIZOLA A., FORNARI M., LEGELEY-PADOVANI A., & FRECHEN M., 2001 - Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. *Geological Society of America Bulletin*, **113**, 12, 1593-1610.
- THOURET J.-C., JUVIGNÉ E., MARIÑO J., MOSCOL M., LOUSCH I., DÁVILA J., LEGELEY-PADOVANI A., LAMADON S., & RIVERA M., 2002a - Late Pleistocene and Holocene tephro-stratigraphy and chronology in Southern Peru. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, **93**, 45-61.
- THOURET J.-C., DÁVILA J., JUVIGNÉ E., GOURGAUD A., & BOIVIN P., 2002b - Reconstruction of the AD 1600 explosive eruption at Huaynaputina volcano, Peru, based on geologic evidence and Spanish chronicles. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **115**, 3-4, 529-570.
- THOURET J.-C., RIVERA M., WÖRNER G., GERBE M.-C., FINIZOLA A., FORNARI M., & GONZALES K., 2005 - Ubinas: evolution of the historically most active volcano in Southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, **67**, 557-589.
- TRAVADA y CÓRDOVA (1752), 1958 - *El suelo de Arequipa convertido en cielo (Historia general de Arequipa)*. Primer festival del libro Arequipeño, edición 1958, 15 p.