

# Étude téphrostratigraphique et bio-climatique du Tardiglaciaire et de l'Holocène de la Laguna Salinas, Pérou méridional

## Late Glacial and Holocene Tephrostratigraphical and Bioclimatical Research of the Laguna Salinas, Southern Peru Tephrostratigraphische und bioklimatische Untersuchungen zur Spätglazial und Holozän der Laguna Salinas, Südperu

Étienne Juvigné, Jean-Claude Thouret, Étienne Gilot, Alain Gourgaud, Kurt Graf, Louis Leclercq, François Legros et Miguel Uribe

Volume 51, numéro 2, 1997

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/033120ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/033120ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

### Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

### ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

### Citer cet article

Juvigné, É., Thouret, J.-C., Gilot, É., Gourgaud, A., Graf, K., Leclercq, L., Legros, F. & Uribe, M. (1997). Étude téphrostratigraphique et bio-climatique du Tardiglaciaire et de l'Holocène de la Laguna Salinas, Pérou méridional. *Géographie physique et Quaternaire*, 51(2), 221-233. <https://doi.org/10.7202/033120ar>

### Résumé de l'article

La présente étude est une contribution à la connaissance de l'évolution de l'environnement tardiglaciaire et holocène des régions andines. En raison de la présence de volcans à proximité de la ville d'Arequipa (800 000 habitants), l'accent est mis sur la récurrence de l'activité volcanique et il est démontré que sept téphras majeures ont recouvert la région après le dernier maximum glaciaire. La Laguna Salinas est une dépression fermée d'origine volcano-tectonique du département d'Arequipa (Pérou méridional) qui constitue un piège sédimentaire dont des carottes ont été extraites des niveaux couvrant les quinze derniers millénaires. L'ensemble des analyses multidisciplinaires (téphras, pollen, diatomées, datation au <sup>14</sup>C) réalisées sur ces carottes et des coupes accessibles autour de la lagune ont conduit à rétablissement d'un modèle stratigraphique actuellement unique pour le Tardiglaciaire et l'Holocène du Pérou méridional.

# ÉTUDE TÉPHROSTRATIGRAPHIQUE ET BIO-CLIMATIQUE DU TARDIGLACIAIRE ET DE L'HOLOCÈNE DE LA LAGUNA SALINAS, PÉROU MÉRIDIONAL

Étienne JUVIGNÉ\* (1), Jean-Claude THOURET (2), Étienne GILOT (3), Alain GOURGAUD (4), Kurt GRAF (5), Louis LECLERCQ (6), François LEGROS (7) et Miguel URIBE (8) ; respectivement : (1) Université de Liège, Département de géographie physique, Sart-Tilman, Bât. 12, 4000 Liège, Belgique ; (2) ORSTOM, Instituto geofísico del Peru, Lima, Peru ; (2,4,7) CRV et URA 10-CNRS, Université Blaise-Pascal, 5, rue Kessler, 63000 Clermont-Ferrand, France ; (3) Université de Louvain, Laboratoire de datation  $^{14}\text{C}$ , 2, chemin du Cyclotron, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique. ; (5) Universität, Geographisches Institut, 8057 Zürich, Schweiz ; (6) Université de Liège, Station scientifique des Hautes Fagnes, 137, Route de Botrange, 4950 Waimes, Belgique ; (8) Instituto geofísico del Peru, Oficina de Arequipa, B19, Urbanización La Marina, Cayma, Arequipa, Peru.

**RÉSUMÉ** La présente étude est une contribution à la connaissance de l'évolution de l'environnement tardiglaciaire et holocène des régions andines. En raison de la présence de volcans à proximité de la ville d'Arequipa (800 000 habitants), l'accent est mis sur la récurrence de l'activité volcanique et il est démontré que sept téphras majeures ont recouvert la région après le dernier maximum glaciaire. La Laguna Salinas est une dépression fermée d'origine volcano-tectonique du département d'Arequipa (Pérou méridional) qui constitue un piège sédimentaire dont des carottes ont été extraites des niveaux couvrant les quinze derniers millénaires. L'ensemble des analyses multidisciplinaires (téphras, pollen, diatomées, datation au  $^{14}\text{C}$ ) réalisées sur ces carottes et des coupes accessibles autour de la lagune ont conduit à l'établissement d'un modèle stratigraphique actuellement unique pour le Tardiglaciaire et l'Holocène du Pérou méridional.

**ABSTRACT** *Late glacial and Holocene tephrostratigraphical and bioclimatical research of the Laguna Salinas, southern Peru.* This study is a contribution to the Late glacial and Holocene environmental changes in the Andean Cordillera. Due to the presence of volcanoes near Arequipa city (800,000 inhabitants), particular importance is given to the frequency of volcanic activity and it is demonstrated that seven major tephras have covered the area after the last glacial maximum. Laguna Salinas is a volcano-tectonic closed basin in the Arequipa Department (southern Peru) which acts as a sediment trap in which cores were taken that correspond to the last 15,000 years. A multidisciplinary research (tephras, pollen, diatoms,  $^{14}\text{C}$ -dating) of a core as well as tephrostratigraphical investigations of nearby roadcuts have allowed to realize the first chronostratigraphical model for the Late Glacial and Holocene periods of southern Peru.

**ZUSAMMENFASSUNG** *Tephrostratigraphische und bioklimatische Untersuchungen zur Spätglazial und Holozän der Laguna Salinas, Südperu.* Die vorliegende Arbeit stellt einen Beitrag zur Kenntniss von Umweltveränderungen im Spät und Postglazial in den Anden dar. Da die südperuanische Stadt Arequipa (800 000 Einwohner) zwischen Vulkanen eingebettet ist, wird beim Studium dieser Region ein besonderer Akzent auf den Rückgang der vulkanischen Aktivität und Fördertätigkeit gelegt. Dabei haben sich für die Zeit seit dem letzten Hochglazial sieben Haupttephren ergeben. Die Laguna Salinas erstreckt sich im südperuanischen Departement Arequipa in einem vulkano-tectonischen Becken, das als eigentliche Sedimentfalle wirkt. Darin wurden in einer Kernbohrung Proben genommen, die zeitlich die letzten 15 000 Jahre abstecken. Tephralagen, Pollen, Diatomeen,  $^{14}\text{C}$ -Alter wurden multidisziplinär untersucht. Zusammen mit dem Studium umliegender Aufschlüsse konnte eine stratigraphische Pioniermodell bzw Referenzprofil für Südperu entwickelt werden.

## INTRODUCTION

Dans la Cordillère des Andes, il existe des calderas et des dépressions synclinales qui fonctionnent comme pièges sédimentaires, voire comme dépressions salines, depuis le Néogène. Les grands bassins évaporitiques de l'altiplano bolivien en sont des exemples remarquables qui ont fait l'objet d'études stratigraphiques et économiques (ex. : Risacher, 1993). Ce sont les hauts lieux de l'accumulation des proxydata destinées à la reconstitution des paléoclimats andins. Leur altitude élevée (plus de 3500 m) et leur position au pied de hautes montagnes (plus de 5000 m) volcaniques et englacées de façon répétitive au cours du Quaternaire offrent aussi la possibilité d'y étudier les phases de glaciation-déglaciation, la récurrence des épisodes volcaniques et la relation de ceux-ci avec les variations climatiques à l'échelle mondiale.

Notre investigation s'inscrit dans la lignée des études des dépôts quaternaires, effectuées par l'ORSTOM (Institut français de Recherche scientifique pour le Développement en Coopération) sur l'altiplano péruvien et bolivien (Servant-Vildary, 1978 ; Lavenu, 1984 ; Dejoux et Ittis, 1992) et des paléoenvironnements holocènes et pléistocènes dans les Andes centrales (Servant et Fontes, 1984 ; Wirmann et Oliveira Almeida, 1987 ; Markgraf, 1989 ; Wright *et al.*, 1989 ; Selzer, 1990 ; Mourguiart *et al.*, 1992 ; Dejoux et Ittis, 1992 ; Messerli *et al.*, 1993 ; Graf, 1994 ; Servant *et al.*, 1995 ; Argollo et Mourguiart, 1996). L'essentiel des travaux relatifs à l'évolution des paléoenvironnements du Quaternaire en Amérique du Sud et même dans l'ensemble de l'hémisphère sud ont été synthétisés par Clapperton (1990, 1993).

La Laguna Salinas est une dépression fermée située dans le Pérou méridional, en bordure de la Cordillère occidentale, dans le département d'Arequipa à 16°22' S, 71°08' O et à 4300 m d'altitude (fig. 1A). À ce jour, cette lagune n'a pas été étudiée. L'étude préliminaire qui en est présentée ici montre qu'elle est appelée à s'inscrire dans la série des grandes dépressions précitées dès que des sondages profonds y auront été réalisés. Comme le montre l'étude téphrochronologique des formations du Tardiglaciaire et de l'Holocène que nous y avons réalisée, la Laguna Salinas offre notamment la possibilité de déterminer la récurrence de l'activité volcanique explosive de trois volcans proches : le Misti, l'Ubinas et le Huaynaputina (fig. 1). Cette étude revêt un intérêt humain particulier par la présence de la ville d'Arequipa (800 000 habitants) au pied du Misti et à portée de retombées pliniennes de l'Ubinas et du Huaynaputina (fig. 1). Dans cette optique, le présent travail s'ajoute à une première estimation des risques réalisée récemment sur les dépôts du flanc méridional du Misti (Thouret *et al.*, 1995).

## CADRES GÉOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE

Trois volcans qui ont une activité éruptive connue depuis la conquête espagnole se trouvent à proximité de la Laguna Salinas : le Misti, l'Ubinas et le Huaynaputina (fig. 1B). Le Misti et le Huaynaputina ont eu des éruptions cataclysmiques respectivement au début de notre ère (Thouret *et al.*, 1995) et en 1600 A.D. (documents historiques). L'Ubinas vient de se

réveiller (avril 1996). D'autres strato-cônes volcaniques pléistocènes aujourd'hui disséqués sont également très proches (fig. 1B) : le Pichu Pichu au bord sud-est, le Chachani à l'ouest et divers strato-cônes volcaniques au nord. Dans un tel contexte, la structure englobant la Laguna Salinas correspond probablement à une dépression volcano-tectonique. Dans sa partie orientale, la dépression endoréique se présente comme une structure quasi-circulaire de 12 km de diamètre, ouverte dans des terrains volcaniques du Néogène (Formation Chila), en partie recouverte par des sédiments volcanoclastiques pléistocènes (Formation Barroso).

Les massifs montagneux périphériques les plus élevés, notamment le Pichu Pichu (5200 m), présentent d'anciens cirques glaciaires orientés vers la dépression. Des moraines terminales sont présentes à proximité de ces cirques vers 4500 m d'altitude. À l'aval de ces moraines, les piémonts sont formés de dépôts d'épandage (*outwash*) et de cônes de déjection, dont les parties en aval sont recouvertes par des dépôts lacustres et palustres.

Le fond de la dépression, pratiquement plat, est occupé par un lac dont la profondeur ne dépasse pas 2 m et la surface, 35 km<sup>2</sup>. Les changements annuels du niveau du lac entraînent des variations considérables de sa surface. Le lac fonctionne aujourd'hui comme un salar ou *sebkha* et il est exploité pour le chlorure, le sulfate de sodium et pour le bore. La *sebkha* est entourée par une plaine marécageuse discontinue et de faible pente (1 %).

## MÉTHODOLOGIE

La méthodologie générale a consisté à sonder les formations lacustro-palustres supérieures de la Laguna Salinas à l'aide d'une sonde manuelle à carottier russe (description *in* Beaulieu et Reille, 1978) jusqu'à atteindre un niveau constitué de matériaux trop grossiers pour être traversés. Le présent article rapporte les résultats d'études multi-disciplinaires qui ont été effectuées sur les carottes ; il s'agit d'analyses de téphras, de détermination du pollen et des diatomées, ainsi que de datations par la méthode du <sup>14</sup>C qui démontrent que les résultats obtenus se situent dans les quinze derniers milliers d'années.

Une étude des affleurements (talus routiers) entourant la lagune a permis de décrire des couches de téphras et des dépôts proglaciaires qui existent nécessairement dans la série des dépôts lacustro-palustres où ils ne pourront être prélevés et traversés que par un sondage industriel profond en préparation.

## TÉPHROSTRATIGRAPHIE

L'étude téphrostratigraphique des carottes de la Laguna Salinas et des talus routiers environnants a permis de reconnaître plusieurs couches de retombées de produits pyroclastiques. Leur description macroscopique et la détermination de leurs composants à la loupe binoculaire, au microscope polarisant et à la microsonde ont permis de regrouper ces retombées en sept téphras.

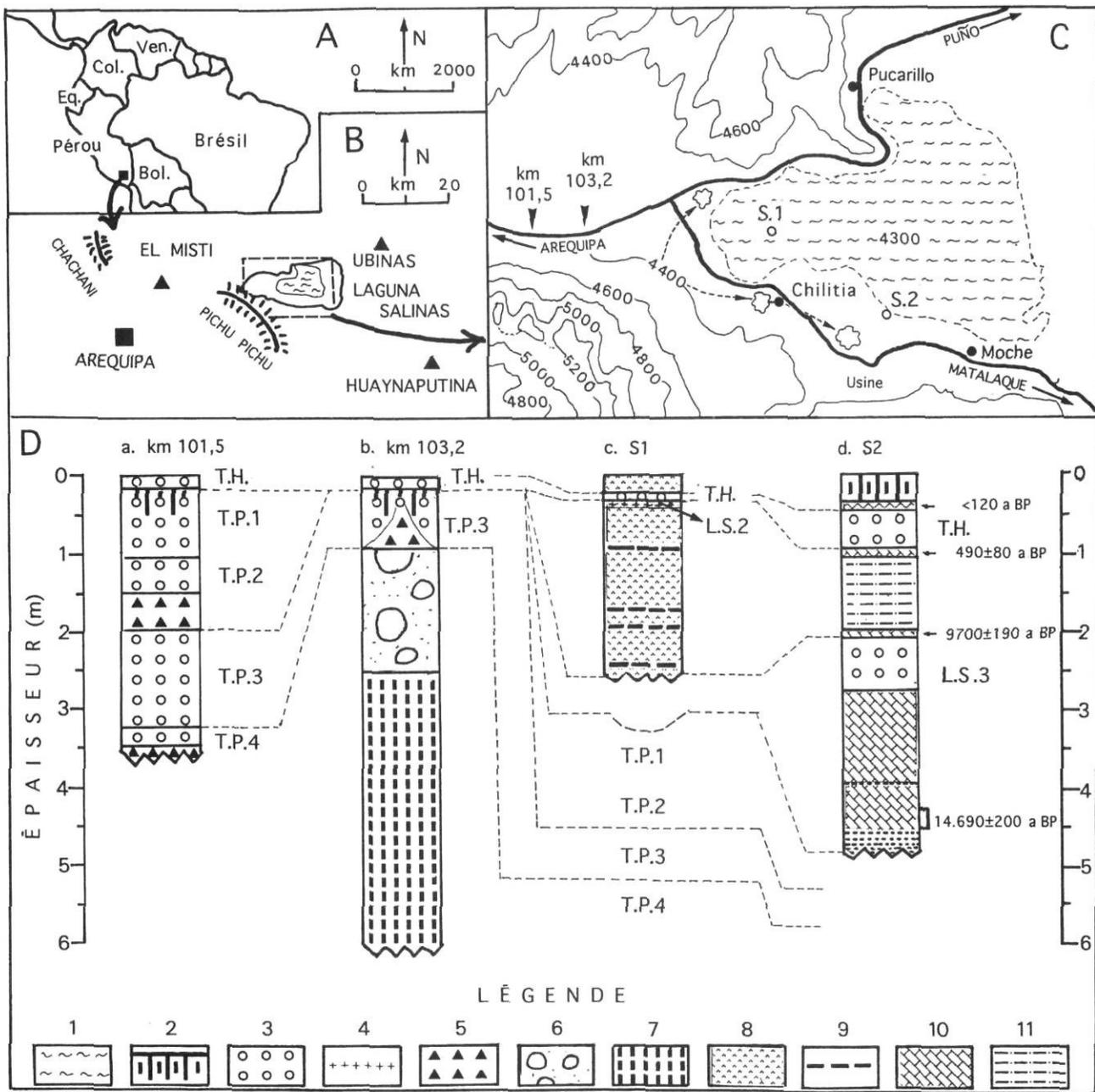


FIGURE 1. Localisation de la Laguna Salinas (A et B) et des séquences étudiées (C). Description des séquences étudiées (D) : a) route Arequipa-Puno, road-cut at km 101,5 ; b) route Arequipa-Puno, km 103,2, entre le Misti et la Laguna Salinas, carrière ; c) S1 et S2, sondages au carottier russe. Abréviations des téphras : T.H., téphra du Huaynaputina ; LS.2, téphra de Laguna Salinas 2 ; LS.3, téphra de Laguna Salinas 3 ; T.P.1 à 4, téphras poncuses 1 à 4 des km 101,5 de la route Arequipa-Puno ; T.P., téphra poncuse du km 103,2 de la route Arequipa-Puno. Légende. 1, niveau maximal du lac ; 2, pédogenèse ; 3, téphras poncuses ; 4, téphra scoriacée noire ; 5, dépôt éolien ; 6, dépôt glacio-torrentiel ; 7, dépôt proglaciaire ; 8, dépôt de sel ; 9, mégacristaux de sel ; 10, tourbe ; 11, alternance de niveaux salins, éoliens et limono-argileux lacustres.

Location of Laguna Salinas (A and B) and coring sites (C). Description of studied sequences (D): a) road Arequipa-Puno, road-cut at km 101.5 ; b) road Arequipa-Puno, km 103.2, pit ; c) S1, core taken with a "russian corer" ; d) S2, core taken with a "russian corer". Abbreviations of tephra beds : T.H., Huaynaputina Tephra ; LS.2, Laguna Salinas Tephra 2 ; LS.3, Laguna Salinas Tephra 3 ; T.P.1 to 4, pumiceous tephra beds 1 to 4 at km 101.5 (road Arequipa-Puno) ; T.P., pumiceous tephra at km 103.2 (road Arequipa-Puno). Legend. 1, uppermost level of the lake ; 2, pedogenesis ; 3, pumiceous tephra ; 4, black scoria tephra ; 5, eolian deposit ; 6, debris flow ; 7, proglacial deposit ; 8, salt deposit ; 9, megacrystals of salt ; 10, peat ; 11, alternance de niveaux salins, éoliens et lacustrine clayey silt.

## 1. Téphras autour de la Laguna Salinas

Une couverture pyroclastique, épaisse de plusieurs mètres, est visible tout le long de la route allant de Arequipa à la Laguna Salinas. Les deux coupes les plus proches de la lagune sont décrites ci-dessous. Elles se situent respectivement aux kilomètres 101,5 et 103,2 (fig. 1C), à environ 20 km à l'est du volcan Misti. Elles se localisent sur le piémont du flanc nord du Pichu Pichu, à environ 300 m en aval de moraines frontales abandonnées à courte distance des cirques glaciaires.

### 1. Coupe de la route Arequipa-Puno, kilomètre 101,5 (fig. 1D)

– De 0 à 10 cm. Cendre ponceuse dont l'essentiel n'est pas encore stabilisé dans le sol. Sur la base des récits espagnols, cette téphra est attribuée à l'éruption de février 1600 A.D. du volcan Huaynaputina (T.H.).

– De 10 à 40 cm. Un sol humifère est développé sur environ 30 cm d'épaisseur ; sa texture est essentiellement sableuse avec, à l'état dispersé, quelques ponces ocre et des xénolithes de petite taille ( $\phi < 2$  cm).

– De 40 à 105 cm. Dépôt massif à granoclassement normal, contenant 90 % de ponces pratiquement blanches ( $\phi < 8$  cm) et 5 % de xénolithes ( $\phi < 2$  cm). La roche totale est de l'andésite (fig. 2). Les minéraux denses consistent en orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun (hypersthène, 70 %), amphibole brune (25 %) et clinopyroxène vert (5 %). Téphra plinienne T.P.1.

– De 105 à 145 cm. Dépôt massif à granoclassement normal, contenant 50 % de ponces ocre ( $\phi < 5$  cm) et 50 % de xénolithes ( $\phi < 5$  cm) vitreux denses avec fractures radiales et bordures figées. La roche totale est andésitique (fig. 2) et contient 0,2 % de corindon normatif (tabl. I) qui atteste un léger lessivage *in situ*. Les minéraux denses consistent en orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun (hypersthène, 15 %), amphibole brune (80 %) et clinopyroxène vert (5 %). Dans ses 10 cm supérieurs, cette couche présente une ébauche de pédogenèse ainsi qu'un faible contenu en sable gris moyen d'origine éolienne. Téphra plinienne T.P.2.

– De 145 à 180 cm. De haut en bas : (i) 5 cm de sable gris foncé d'origine éolienne ; (ii) 15 cm de lapilli ponceux ocre ( $\phi < 2$  cm) ; (iii) 10 cm de sable gris foncé ; (iiii) 10 cm de lapilli grossiers surtout lithiques, formant des lits de matériaux remaniés.

– De 180 à 315 cm. Dépôt massif à granoclassement normal, contenant 90 % de ponces pratiquement blanches et parfois roses par oxydation ( $\phi < 6$  cm) et 10 % de xénolithes ( $\phi < 3$  cm). La roche totale est dacitique (fig. 2) et contient 0,27 % de corindon normatif qui atteste un léger lessivage *in situ*. Les minéraux denses consistent en orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun (hypersthène, 30 %), amphibole brune (70 %) et des traces de clinopyroxène vert. Dans les 30 centimètres supérieurs, la couleur des ponces passe à l'ocre probablement à la suite de la migration d'oxyde de fer du niveau surincombant. Téphra plinienne T.P.3.

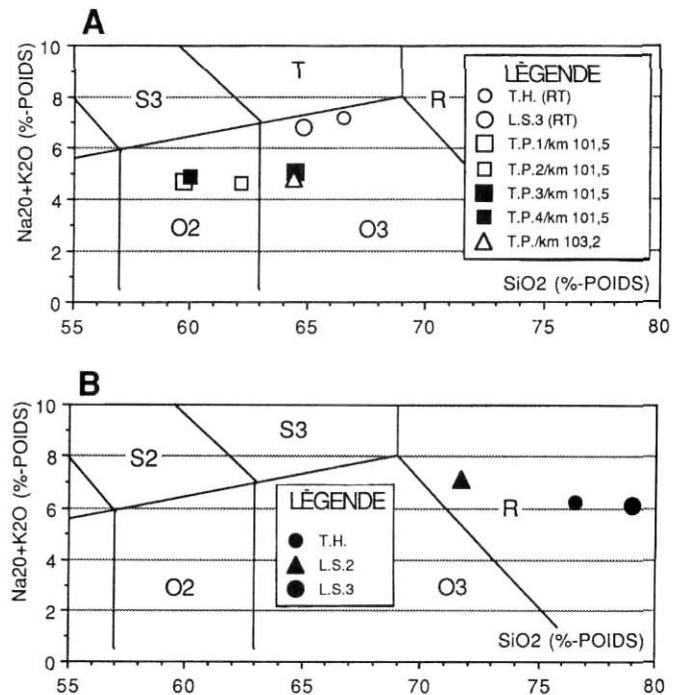


FIGURE 2. Détermination des téphras de la Laguna Salinas et de sa bordure occidentale d'après la classification TAS (Le Bas *et al.*, 1985). Extrait de la classification TAS : S3, trachyandesite ; T, trachyte/trachydacite ; O2, andésite ; O3, dacite ; R, rhyolithe. Les abréviations utilisées pour les téphras sont celles de la figure 1D. Le contenu en éléments majeurs est exposé au tableau I. A, Analyses de roche totale (RT) ; B, analyses sur verre (V).

*Determination of tephra beds from Laguna Salinas and from its western margin after the TAS classification (Le Bas et al., 1985). Abbreviations for tephra beds are those of Figure 1D. Content of major elements is presented in table 1. A, analyses of bulk rock (RT); B, analyses of single glass shards (V). Part of the TAS classification: S3, trachyandesite; T, trachyte/trachydacite; O2, andesite; O3, dacite; R, rhyolite.*

– De 315 à 340 cm. Dépôt massif à granoclassement normal, contenant 80 % de ponces ocre ( $\phi < 3$  cm) et 20 % de xénolithes ( $\phi < 2$  cm). Dans les 15 centimètres inférieurs, la part des xénolithes augmente jusqu'à environ 50 %. La partie supérieure est enrichie d'un peu de sable éolien gris moyen. La roche totale est andésitique (fig. 2). Les minéraux denses consistent en orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun (hypersthène, 85 %), amphibole brune (10 %) et clinopyroxène vert (5 %). Dans les 30 centimètres supérieurs, la couleur des ponces passe à l'ocre probablement à la suite de la migration d'oxyde de fer du niveau surincombant. Téphra plinienne T.P.4.

– Sous 340 cm. Lits d'éléments remaniés cendreaux avec beaucoup de fragments lithiques.

### 2. Route Arequipa-Puno, kilomètre 103,2 (fig. 1D)

– La téphra du Huaynaputina (T.H.) et le sol actuel (0 à 40 cm) sont identiques à ceux de la coupe du kilomètre 101,5.

– De 40 à 90 cm. Deux formations différentes : (i) la formation inférieure est un sable gris moyen accumulé sous forme

TABLEAU I

Composition chimique (éléments majeurs) et composition normative des téphras de la Laguna Salinas et de la bordure occidentale de celle-ci

	Laguna Salinas LvN	Laguna Salinas LvN	Laguna Salinas CF	Laguna Salinas LvN	Laguna Salinas LvN	km 101,5 LvN	Route Arequipa - Laguna Salinas km 101,5 LvN	km 101,5 LvN	km 101,5 LvN	km 103,2 LvN
	T.H. (RT)	T.H. (V)	L.S.2 (V)	L.S.3 (RT)	L.S.3 (V)	T.P.1	T.P.2	T.P.3	T.P.4	T.P.
SiO <sub>2</sub>	66,51	76,51	71,66	64,82	78,97	59,72	62,17	64,44	59,93	64,41
TiO <sub>2</sub>	0,68	0,22	1,13	0,8	0,21	1,13	0,87	0,79	1,12	0,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,87	14,41	14,16	16,57	13	17,34	18	17,11	16,89	17,23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0,05	0,2	0,03	0,03	0,17
FeOt	4,63	1,04	3,64	4,35	0,67	7,24	5,2	4,94	6,83	4,99
MnO	0	0,04	0,06	0,14	0,04	0,25	0,14	0,15	0,16	0,11
MgO	1,81	0,21	0,61	1,81	0,09	3,71	2,48	1,98	3,56	1,9
CaO	4,13	1,25	1,54	4,65	0,87	6,86	6,23	5,44	6,54	5,37
Na <sub>2</sub> O	4,16	2,48	2,56	4	2,21	2,51	2,54	2,6	2,68	2,52
K <sub>2</sub> O	3	3,8	4,58	2,79	3,88	2,16	2,11	2,45	2,18	2,3
Norme CIPW pour Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO=0,15										
cm	0	0	0	0	0	0,08	0,29	0,05	0,05	0,25
Il	1,29	0,41	2,15	1,53	0,4	2,16	1,66	1,5	2,14	1,62
Or	17,73	22,49	27,1	16,51	22,98	12,76	12,52	14,51	12,89	13,62
Ab	35,27	21	21,71	33,91	18,75	21,27	21,49	22,05	22,69	21,39
An	13,02	6,2	7,66	18,98	4,35	29,65	30,91	26,99	27,61	26,65
Co	0	3,93	2,16	0	3,54	0	0,19	0,27	0	0,81
Mg	0,99	0,22	0,79	0,94	0,14	1,33	1,11	1,06	1,47	1,07
Qz	18,18	43,95	33,36	16,65	48,86	14,13	19,41	22,5	13,91	23,74
Di-Mg	2,94	0	0	1,7	0	2,12	0	0	2,2	0
Di-Fe	3,31	0	0	1,71	0	1,49	0	0	1,79	0
Hy-Mg	3,15	0,52	1,54	3,71	0,23	8,26	6,18	4,94	7,86	4,95
Hy-Fe	4,07	1,22	3,48	4,28	0,69	6,68	6,16	6,06	7,32	5,84

Les abréviations désignant les téphras sont celles de la figure 1D. Pour le calcul de la norme le FeO<sub>i</sub> a été divisé sur la base du rapport Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO=0,15.

Les analyses ont été effectuées : (LvN) à Louvain-la-Neuve (Belgique) au moyen d'une microsonde Cameca SX50 calibrée à 6,6 nA, 15 kV, et 6 secondes (surface irradiée ≈10×10 μm) ; (CF) à Clermont-Ferrand sur Cameca Camebax calibrée à 6 nA, 15 kV et 7 secondes ; surface irradiée ≈10×10 μm.

Pour effectuer les analyses sur roche totale par microsonde, des micro-échantillons ont été fondus avec autant de fondant ; ceci explique la nécessité de normaliser les parts à 100 %.

Un tableau des résultats détaillés des analyses peut être obtenu sur demande à l'adresse de É. Juvigné.

de petites dunes (quelques décimètres de hauteur et environ 3 m de longueur) ; (ii) la formation supérieure est une retombée plinienne massive à granoclassement normal, contenant 90 % de ponces blanches et parfois oxydées (ø<6 cm) et 10 % de xénolithes (ø<3 cm). Le contact entre les deux formations se présente en forme de guirlande. La roche totale est dacitique (fig. 2). La norme (tabl. I) contient un peu de corindon (0,81 %) qui atteste un léger lessivage *in situ* de la roche. Les minéraux denses consistent en orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun (hypersthène, 45 %), amphibole brune (55 %) et des traces de clinopyroxène vert. Le sommet de ces deux formations est tronqué et le contact avec la base du sol actuel est brutal.

– De 90 à 240 cm. Dépôt hétérométrique massif à matrice fine et dont les blocs atteignent un mètre de diamètre. Il s'agit d'un dépôt de coulée boueuse, mise en place probablement par un écoulement glacio-torrentiel.

– Sous 240 cm et jusqu'au moins 650 cm (base de la carrière). Dépôt finement stratifié de lentilles atteignant quelques centimètres d'épaisseur ; leur texture est alternativement limoneuse, sableuse ou graveleuse. Dans cette dernière fraction, les ponces ocre roulées dominent. Il s'agit d'un dépôt d'épandage proglaciaire.

### 3. Corrélation entre les coupes des kilomètres 101,5 et 103,2

La coupe du kilomètre 101,5 est la plus complète du point de vue téphrostratigraphique. Elle contient cinq retombées pliniennes qui ont une épaisseur totale d'environ 3,5 m : la téphra du Huaynaputina (T.H., T.P.1, T.P.2, T.P.3 et T.P.4). En raison de leur granulométrie particulièrement grossière, les téphras T.P.1 à T.P.4 ne peuvent être attribuées qu'à un volcan proche, à savoir le Misti ou l'Ubinas. Du point de vue chronostratigraphique, le sol actuel est suffisamment

développé pour que les matériaux qui le constituent soient presque entièrement altérés. Toutefois, il n'est pas possible d'en déduire un âge minimal pour le complexe sous-jacent de téphras. La présence de minces couches de dépôts remaniés au sommet des lits de ponces T.P.2, T.P.3 et T.P.4 atteste de courtes périodes, de durées non mesurables, séparant les téphras pliniennes.

En se fondant sur la composition chimique du magma (tabl. 1 ; fig. 2) et le contenu en minéraux denses, la téphra plinienne de la coupe du kilomètre 103,2 peut être mise en corrélation avec la retombée plinienne T.P.3 de la coupe du kilomètre 101,5. Dans les deux cas, la roche totale est une dacite à amphibole brune dominante et orthopyroxène fortement pléochroïque vert à brun avec seulement des traces de clinopyroxène. Les grandes quantités de ponces incorporées dans les dépôts fluvioglaciaires de la coupe du kilomètre 103,2 appartiennent donc vraisemblablement à la retombée plinienne T.P.4 et peut-être à d'autres immédiatement antérieures qui ne seraient pas conservées dans la coupe du kilomètre 101,5. En poursuivant cette même route vers Puno, l'épaisse couverture de téphras n'existe plus et les rares affleurements ne montrent que des dépôts morainiques ou fluvioglaciaires. Ceci laisse croire que les téphras y sont retombés sur un manteau nival ou sur la glace et ont ensuite disparu lors de la fonte.

En conclusion, la coupe du kilomètre 103,2 montre que la retombée plinienne T.P.4 s'est déposée au cours de la fonte des glaciers et que la retombée T.P.3 s'est faite sur une morphologie dunaire. L'absence de pédogenèse importante au sommet de chaque retombée plinienne indique que ces retombées se sont probablement succédé rapidement.

## 2. Téphras dans la Laguna Salinas

### 1. DESCRIPTION

À l'intérieur de la Laguna Salinas, la retombée de cendre ponceuse du Huaynaputina (1600 A.D.) est présente en surface sur tout le pourtour de la sebkha. L'activité éolienne dans la lagune depuis au moins quatre siècles est attestée par l'intense remaniement de cette téphra qui peut atteindre 1 m d'épaisseur dans des concavités de piémont et des dunes.

Une tranchée de 3 mètres de profondeur, ouverte autour de l'usine exploitant le bore de la sebkha (fig. 1C), montre essentiellement des dépôts fluvioglaciaires, couverts par la seule téphra du Huaynaputina. En raison de la courte distance (6 km) séparant la lagune de la coupe du kilomètre 101,5, les téphras observées dans cette dernière doivent être présentes dans la lagune. Deux sondages ont été effectués au carottier russe dans la Laguna Salinas (fig. 1C) : l'un au bord du lac en bas niveau (S1) et l'autre dans la zone marécageuse (S2), juste à l'aval du cône de déjection sur lequel est construite l'usine exploitant la sebkha.

#### Sondage S1

Le sondage S1 (fig. 1D) a traversé un dépôt dont la texture est sablo-limoneuse. Son matériau consiste en cristaux de sels (notamment du sulfate de calcium et du chlorure de sodium) et en sable d'origine éolienne. Plusieurs couches de

mégacristaux de chlorure de sodium ont été observées ; les plus épaisses (2 à 3 cm) se trouvent vers 90,170,190 et 240 cm de profondeur. Le sondage a été arrêté à 250 cm de profondeur en raison de la trop forte résistance offerte par le sédiment à la pénétration de la sonde. De 23 à 28 cm de profondeur, se trouve une téphra de cendre ponceuse (S1/T23-28 dans le texte qui suit ; T.H. sur la fig. 1D). À 35 cm de profondeur, il existe une lamine de cendre scoriacée noire d'environ 5 mm d'épaisseur (S1/T35 dans le texte qui suit ; L.S.2 sur la fig. 1D).

#### Sondage S2

La carotte du sondage S2 contient les unités suivantes.

- De 0 à 32 cm. Sol développé dans de la cendre ponceuse remaniée du Huaynaputina (T.H.).
- De 32 à 40 cm. Tourbe sableuse contenant des racines de la végétation actuelle.
- De 40 à 90 cm. Téphra ponceuse (S2/T40-90 dans le texte ; T.H. sur la fig. 1D).
- De 90 à 100 cm. Tourbe.
- De 100 à 190 cm. Séquence à stratification laminaire avec alternance de couches constituées principalement de microcristaux de sels, de sable éolien et d'une composante plus fine de texture limono-argileuse.
- De 190 à 200 cm. Tourbe.
- De 200 à 270 cm. Téphra ponceuse (S2/T200-270 dans le texte ; L.S.3 sur la fig. 1D).
- De 270 à 385 cm. Tourbe.
- De 385 à 390 cm. Argile limoneuse finement litée.
- De 390 à 445 cm. Tourbe.
- De 445 à 470 cm. Argile fortement gléyifiée contenant quelques lapilli lithiques épars.
- À 470 cm. Carottier bloqué par une formation grossière non déterminable.

### 2. DATATIONS PAR LE <sup>14</sup>C

Quatre échantillons du sondage S2 ont été datés par la méthode du <sup>14</sup>C. Ils proviennent des profondeurs suivantes (en centimètres) : 32 à 40, 90 à 100, 190 à 200, 430 à 445 (fig. 1D). Les racines ont été extraites à l'aide d'une loupe dans toute la mesure du possible ; elles étaient nettement plus nombreuses dans les deux échantillons supérieurs. En raison de la subsistance éventuelle de radicules qui auraient échappé au prélèvement, les âges obtenus doivent donc être considérés, dans chaque cas, comme des valeurs minimales. Tous les échantillons ont été prétraités avec HCl<sub>1%</sub> et la mesure isotopique a été faite sur le méthane dans un compteur proportionnel.

a) Tourbe de 32 à 40 cm : moins de 120 BP (Lv-2122). Ce résultat donne un âge minimal à la téphra immédiatement sous-jacente.

b) Tourbe de 90 à 100 cm : 490±80 BP (Lv-2127). En référence aux tables de calibrage publiées dans *Radiocarbon* (1993, 35 : 1), cet échantillon est à situer entre 1300 et 1600 A.D. et plus probablement au XV<sup>e</sup> siècle ; il constitue un âge maximal pour la téphra immédiatement sus-jacente.

c) Tourbe de 190 à 200 cm : 9700±190 BP (Lv-2106). Cet échantillon surmonte immédiatement la téphra T200-270 et lui confère donc un âge minimal. De plus, il correspond pratiquement à la transition Tardiglaciaire-Holocène.

d) Tourbe de 430 à 445 cm : 14.690±200 BP (Lv-2183). Cet échantillon a été choisi pour dater le début de la formation de la séquence tourbeuse qui va de 445 à 270 cm. Il atteste que la formation grossière qui a empêché la poursuite du sondage (téphra ou dépôt fluvioglaciaire ?) est antérieure au début du Tardiglaciaire.

### 3. DESCRIPTION DES TÉPHRAS DES SONDAGES S1 ET S2

#### a. Téphra supérieure de la Laguna Salinas : S1/T23-28 et S2/T40-90

**Faciès.** La couche est dans l'ensemble gris très clair. Il s'agit essentiellement de ponces.

**Granulométrie.** C'est une cendre très grossière à fine dont le mode se situe dans la classe de la cendre moyenne (fig. 3). Il n'y a que des traces de lapilli dont le plus gros élément ne dépasse pas 3 mm. La taille moyenne est de 485 µm. D'après la classification de Folk et Ward (1957), ce matériau est modérément classé (indice 0,86) pratiquement symétrique (indice -0,78), et mésokurtique (indice 1,021).

**Magma.** La roche totale est une dacite (tabl. I ; fig. 2) et le verre de la rhyolithe potassique. Toutefois, la présence de 3,9 % de corindon normatif atteste un lessivage *in situ* du verre qui est nettement plus pauvre en Fe, Mg, Ca et Na que la roche totale.

**Minéraux.** Les feldspaths sont essentiellement des plagioclases  $An_{28}$  à  $An_{56}$  : andésine (11 grains), labrador (4) et oligoclase (2). L'anorthose  $Or_{26}$  est aussi présente (1 grain). Les minéraux ferromagnésiens sont essentiellement : a) de l'amphibole verte à vert brunâtre, qui dans la classification de Leake (1978), est calcique et riche en magnésium (hornblende tschermakitique, hornblende magnésienne, hornblende édénitique) ; b) du mica brun (biotite/phlogopite).

**Corrélation.** Le faciès et la granulométrie de cette téphra sont identiques à ceux de la téphra du Huaynaputina qui existe en surface partout dans la région. L'âge au  $^{14}C$  de l'échantillon de tourbe prélevé sous T40-90 et daté du XV<sup>e</sup> siècle (voir plus haut) confirme cette corrélation. L'épaisseur de la téphra du Huaynaputina (50 cm) à l'endroit étudié en S2, est nettement supérieure à celle de la couche observée en place en plusieurs points de la sebkha (5 à 8 cm ; voir S1/T23-28). Ceci implique qu'une partie des matériaux a été transportée par remaniement à l'endroit du sondage S1 avant l'enfouissement par la tourbe postérieure (profondeur 32 à 40 cm). La position du site dans une concavité au pied d'un cône de déjection se prête particulièrement bien à l'accumulation secondaire, tant par ruissellement que par remaniement éolien.

#### b. Téphra scoriacée noire L.S.2 (fig. 1D)

**Faciès.** La couche est noire. Il s'agit de scories noires. Quelques-unes sont limpides et de couleur miel. Il existe environ 20 % d'autres grains et notamment des cristaux libres de sels,

de quartz et de feldspaths. Compte tenu du fait que ces mêmes cristaux constituent l'essentiel du sédiment hôte, il n'est pas possible d'établir la part des xénolithes éventuels de la téphra.

**Granulométrie.** C'est une cendre fine à très fine dont le mode se situe vers 125 µm (fig. 3) ; aucun grain ne dépasse 250 µm. La taille moyenne est de 111 µm.

**Magma.** L'impossibilité de débarrasser les vésicules des scories de sels qui y ont cristallisé a empêché les analyses sur roche totale. Le verre consiste en rhyolithe potassique (tabl. I ; fig. 2). La norme contient 2,16 % de corindon, ce qui atteste un lessivage *in situ* du verre.

**Minéraux.** Les feldspaths sont essentiellement des plagioclases  $An_{44-65}$  : andésine et labrador (11 grains). Les minéraux ferromagnésiens consistent en orthopyroxène (40 %), en clinopyroxène (40 %), en amphibole brune (20 %) et en traces d'olivine. Dans la classification de Morimoto (1988), l'orthopyroxène est de l'enstatite  $En_{66-76}$  et le clinopyroxène est uniquement de l'augite  $En_{47-51}-Fs_{13-15}-Wo_{36-40}$ . L'olivine est de la forstérite  $Fo_{78}$ .

**Âge.** En se basant sur une vitesse de sédimentation-cristallisation constante dans les 35 cm supérieurs à l'endroit du sondage S1, on peut estimer l'âge de la téphra L.S.2. Comme les 23 cm de sédiment surmontant la téphra du Huaynaputina représentent 400 ans, on peut estimer les 7 cm séparant L.S.2 de L.S.1 à environ 120 ans. Ceci place la retombée L.S.2 aux environs de 1480 A.D.

**Corrélation.** La téphra scoriacée noire L.S.2 est observée sur tous les flancs du Misti, immédiatement sous la téphra du Huaynaputina. Elle atteint au maximum 5 centimètres d'épaisseur, notamment sur les piémonts est, sud et nord du volcan. Bien que millimétrique, elle est encore visible à l'est de la Laguna Salinas en direction de Ubinas. Cette téphra scoriacée noire doit être attribuée à l'éruption du Misti que les témoignages oraux transmis aux conquérants espagnols placent entre 1440 et 1470 A.D. (Chavez-Chavez, 1992).

#### c. Téphra ponceuse inférieure L.S.3 (fig. 1D)

**Faciès.** Sa composante essentielle consiste en ponces. Son épaisseur à l'endroit du sondage excède probablement celle de la retombée initiale, si on se réfère à l'exemple de la téphra S2/T40-90 (voir plus haut).

**Granulométrie.** C'est une cendre très grossière à très fine, dont le mode se situe dans la classe de la cendre moyenne (fig. 3). Il n'y a que 2 % de poussière (<62,5 µm) et 4 % de lapilli dont le plus gros ne dépasse pas 4 mm. La taille moyenne est de 438 µm, et d'après la classification de Folk et Ward (1957), ce matériau est mal classé (indice 1,203), pratiquement symétrique (indice 0,094) et faiblement leptokurtique (indice 1,434).

**Magma.** Les analyses à la microsonde montrent que les ponces fondues (roche totale) consistent en dacite (tabl. I ; fig. 2) et que les verres sont de la rhyolithe potassique (tabl. I ; fig. 2). La présence de 3,5 % de corindon normatif atteste un lessivage *in situ* du verre qui est nettement plus pauvre en Al, Fe, Mg, Ca et Na que la roche totale.

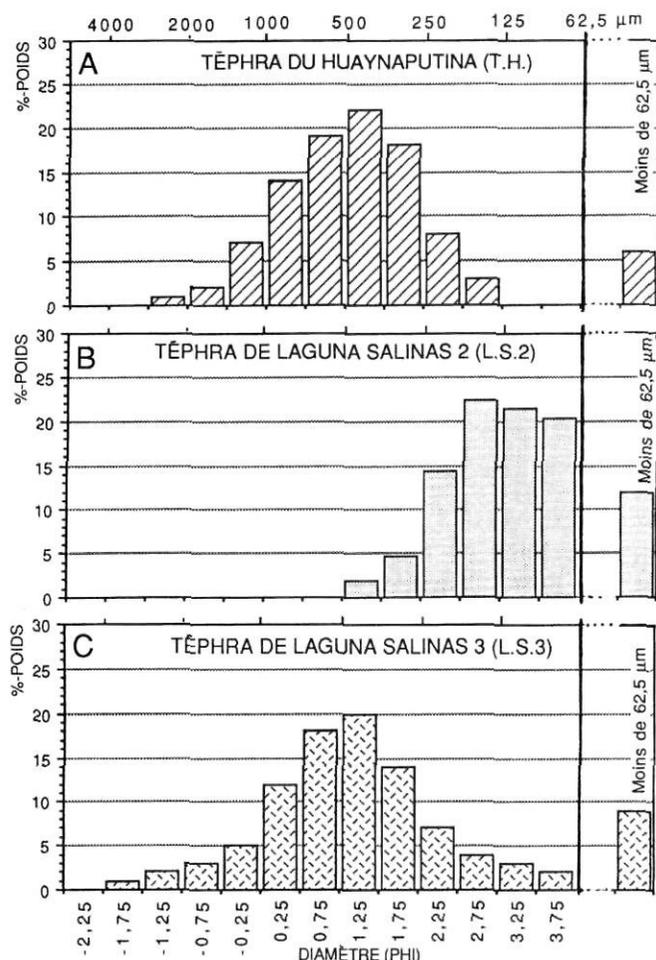


FIGURE 3. Granulométrie des trois téphras trouvées dans les carottes de sondages de la Laguna Salinas. Les abréviations désignant les téphras sont celles de la figure 1D.

Grain-size distribution of the three tephra beds present in cores S1 and S2 of Laguna Salinas. Abbreviations for tephras are those of Figure 1D.

**Minéraux.** Les feldspaths sont essentiellement des plagioclases : labrador (8 grains) et andésine (3) de composition  $An_{34}$  à  $An_{64}$ . Les minéraux ferromagnésiens sont essentiellement de l'orthopyroxène (75 %) et de l'amphibole brune (25 %). Dans la classification de Morimoto (1988), l'orthopyroxène est de l'enstatite  $En_{72}$  à  $En_{74}$ . Dans la classification de Leake (1978), l'amphibole est calcique et riche en magnésium (hornblende tschermakitique, tschermakite, hornblende magnésio-hagstingsitique).

**Corrélation.** Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'attribuer la téphra S2/T200-270 à un volcan déterminé. Toutefois, on peut remarquer que la granulométrie de cette téphra est semblable à celle de la téphra du Huaynaputina de 1600 A.D. au même endroit et pourrait faire partie d'un lobe plus ancien, d'extension et d'orientation semblables, provenant du même volcan. Près de Quinistaquillas (département de Moquegua, à 15 km au sud du Huaynaputina et sous la téphra de 1600 A.D.), nous avons vu en affleurement une téphra plinienne aux caractéristiques semblables

à celle de la téphra S2/T200-270 ; elle est légèrement pédogénésée dans sa partie supérieure.

### 3. Synthèse des résultats téphrochronologiques

Dans la lagune, on trouve de la surface vers la profondeur : a) la téphra du Huaynaputina (T.H.) retombée en 1600 A.D. ; une téphra scoriacée noire L.S.2 (S1/T35) retombée vers 1480 A.D. et une téphra ponceuse L.S.3 (S2/T200-270) à la transition Tardiglaciaire-Holocène. Ces téphras constituent les trois dernières retombées volcaniques dans la région de la Laguna Salinas.

Immédiatement à l'ouest de la lagune, on trouve de haut en bas la téphra du Huaynaputina puis les téphras T.P.1 à T.P.4. Ces quatre dernières ont une granulométrie nettement plus grossière que la téphra ponceuse inférieure (S2/T200-270) de la Laguna Salinas ; elles ne se trouvent donc pas dans la séquence du sondage S2 et ne peuvent être présentes dans la lagune qu'à des niveaux plus anciens qu'environ 14 690 BP. Toutefois, les téphras T.P.1, T.P.2 et T.P.3 sont postérieures à la phase de fusion majeure des glaciers würmiens et la téphra T.P.4 est contemporaine de cette phase.

Inversement, la téphra S2/T200-270 n'a pas été trouvée dans les coupes environnant la L.S., soit qu'elle ait été mobilisée par la fonte glaciaire, érodée, ou qu'elle fasse partie du matériau pyroclastique altéré par pédogenèse dans le sol actuel.

La présente recherche téphrostratigraphique est véritablement pionnière pour la partie méridionale du Pérou. Les résultats ne peuvent donc être discutés dans le cadre de connaissances existantes. Dans cette mesure, la succession téphrochronologique décrite ici fait office de premier modèle de référence. Les six retombées pliniennes (T.H., L.S.3, T.P.1 à 4) attestent chacune d'explosions violentes qui ont profondément modifié l'environnement régional. Elles devraient aussi avoir provoqué des modifications climatiques mineures à grande échelle, conformément à la relation connue entre le climat et la présence dans la stratosphère de volumes importants de poussières volcaniques et d'aérosols (voir par exemple : Hammer *et al.*, 1981 ; Francis, 1993).

### ANALYSE POLLINIQUE

La séquence tourbeuse comprise entre 200 et 400 cm dans la carotte S2 a permis la réalisation d'un diagramme pollinique (fig. 4). Son interprétation est discutée sur la base des conditions environnementales actuelles.

#### 1. L'ENVIRONNEMENT ACTUEL

L'interprétation des données polliniques est basée sur la connaissance de la situation écologique et sur la méthodologie décrite par Graf (1992). Du point de vue climatique, la Laguna Salinas se trouve dans la région semi-aride de la Cordillère occidentale. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 200 et 300 mm (Hoffmann, 1975) et tombent surtout pendant les mois d'été, de novembre à mars. Les températures mensuelles varient peu. En raison du manque de données climatiques relatives à cette région, nous évoquerons celles des stations boliviennes. À Ulla Ulla située

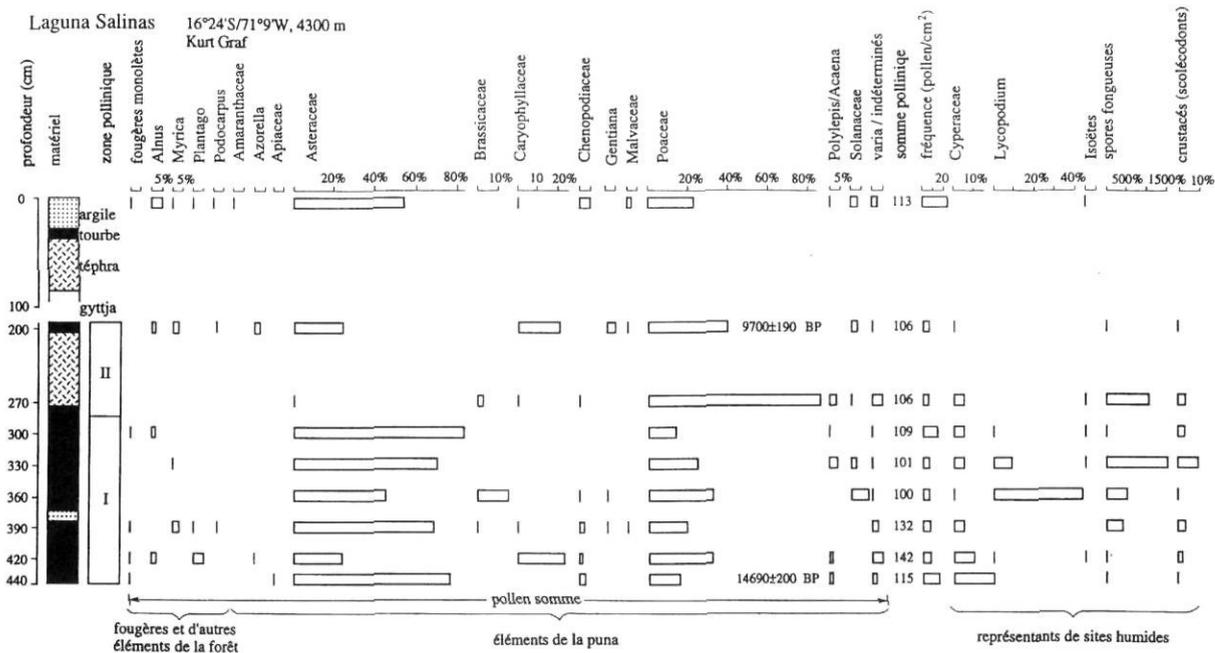


FIGURE 4. Diagramme pollinique de la séquence tourbeuse allant de 200 à 440 cm du sondage S2.

Pollen diagram of the peat sequence 200 to 440 cm (depth) of core S2.

dans la Cordillère orientale (15°4'S ; 69°15'O, 4460 m), on a enregistré en moyenne 5,7 °C en janvier et 2,4 °C en juillet (Anuarios Meteorologicos, 1975-1979). Toutefois, les écarts moyens journaliers peuvent atteindre 15 °C, ce qui implique des gelées nocturnes régulières en hiver. Les précipitations annuelles sont de 453 mm dans la pampa de Ulla Ulla, tandis qu'à Charana (17°35'S ; 69°27'O ; 4060 m), en Cordillère occidentale, elles sont de 396 mm. À Charana, les températures moyennes mensuelles sont de 5,1 °C en juillet et 9,8 °C en janvier (Anuarios Meteorologicos, 1975-1979) ; ces valeurs sont très proches de celles de Ulla Ulla malgré la différence d'altitude de 400 m entre les deux stations.

En ce qui concerne la végétation, on distingue trois régions principales dans les Andes : a) le flanc occidental (aride) ; b) la « puna » (hautes Andes) ; c) le flanc oriental (humide). En montant de la côte du Pacifique jusqu'à 3500 m, la végétation désertique est dominée par les Poaceae, les Cactaceae et les Chenopodiaceae. Ces plantes herbacées sont accompagnées par des arbres xérophitiques (*Prosopis*, *Schinus*) et des arbustes (*Asteraceae*, *Leguminoseae*). La « puna », qui est une formation typique des hautes Andes entre 3500 et 4800 m, contient beaucoup d'arbustes (*Asteraceae*, *Ephedra*, *Leguminoseae*, *Solanaceae*), des plantes herbacées (*Azorella*-*Apiaceae*, *Brassicaceae*, *Campanulaceae*, *Caryophyllaceae*, *Geraniaceae*). Dans la zone la plus élevée, nommée « puna brava », on trouve : a) dans les zones sèches, des *Asteraceae*, (*Hypochoeris*, *Senecio*, *Werneria*) et des *Rosaceae* arbustives (*Polylepis*) ; b) dans les zones humides, des *Cyperaceae* (*Carex*), des *Juncaceae* (*Distichia*, *Oxychloe*), *Gentiana*, *Isoetes* et *Lycopodium*. Sur la retombée orientale des Andes, à partir de 3500 m, on trouve une forêt avec *Alnus*, *Cecropia*-

*Moraceae*, *Myrica*, *Plantago* et beaucoup de fougères. Dans les sites un peu moins humides, croissent aussi des sapins andins (*Podocarpus*) et des bruyères (*Ericaceae*).

## 2. LE DIAGRAMME POLLINIQUE

La Laguna Salinas est située dans la « puna » à 4300 m d'altitude. Des échantillons de tous les niveaux de la carotte S2 ont été traités pour en extraire le pollen, mais seule la séquence tourbeuse comprise entre 200 et 400 cm a fourni des quantités suffisantes de pollen (100 à 150 grains ; fig. 4, somme pollinique) pour permettre la discussion de l'évolution de la végétation. Les datations au <sup>14</sup>C montrent que cette séquence correspond essentiellement au Tardiglaciaire (voir plus haut : âges au <sup>14</sup>C).

Sur toute la hauteur de la séquence, les signaux de la paléovégétation sont très uniformes : des graminées steppiques (*Poaceae*), des plantes en coussins (*Pycnophyllum*-*Caryophyllaceae*) et des arbustes (surtout *Asteraceae*) sont dominants. En plus, certaines plantes de sites humides sont fréquentes (*Cyperaceae*, *Lycopodium* et la fougère *Isoetes*). Cette végétation peu variée montre que des conditions arides ou semi-arides ont existé dans la région tout au long de la formation de la séquence tourbeuse. Ce sont surtout les changements de température qui justifient les changements observés dans les spectres polliniques. Quand le climat se réchauffait, l'évaporation augmentait donc et intensifiait la sécheresse.

La phase Salinas-I est caractérisée par du pollen de plantes typiques d'un « tolar », représentée sur l'altiplano par des arbustes de « tola » de la famille des *Asteraceae* (*Baccharis*, *Parastrephia*) et accompagnés par quelques herbes

(Brassicaceae, Caryophyllaceae et Poaceae). La présence de pollen de *Polylepis* dans cet ensemble fait penser à la végétation de la Charana (fig. 5). Toutefois, l'abondance de pollen de Cyperaceae implique des conditions froides et humides qui permettaient le développement intense de la végétation locale. On trouve donc peu de pollen provenant de régions éloignées, ce qui justifie également l'absence dans la lagune du pollen de Cactaceae et de Chenopodiaceae connues dans le désert côtier péruvien. Il y a 15 000 ans, le climat était donc un peu moins sec et plus froid qu'aujourd'hui.

La phase Salinas-II reflète une période nettement plus sèche. On y observe beaucoup de pollen de Poaceae, représentant une steppe désertique comme celle de la pampa d'Ulla Ulla et semblable à celle qui existe aujourd'hui autour de la Laguna Salinas. En plus des Poaceae, on trouve *Azorella* (plante en coussin de la famille des Apiaceae), des Caryophyllaceae (*Pycnophyllum*) et des Malvaceae (exclusivement *Nototriche*). Cette association est semblable à celle des hautes Andes représentée par la figure 6. Les parts de taxons allochtones (*Alnus*, *Myrica*, *Podocarpus*), amenés de la forêt orientale par les alizés sont peu élevées. Les parts de Cyperaceae sont aussi assez faibles. Dans l'ensemble, on peut penser que la végétation locale était pauvre et que l'origine du pollen était essentiellement locale. On peut déduire de cette situation que la température et l'évaporation étaient plus élevées qu'actuellement.

En conclusion, l'évolution de la paléovégétation telle qu'elle est décrite ci-dessus montre que la phase Salinas-II fut plus sèche et moins froide que la phase Salinas-I.

### 3. SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS PALYNOLOGIQUES DANS LE CONTEXTE ANDIN

Les diagrammes polliniques du Tardiglaciaire sont rares dans cette partie des Andes et les sites les plus proches auxquels ils se rapportent sont : a) en Bolivie près de La Paz (Ybert, 1984), Rio Chuquiaguillo (16°27'30"S ; 68°5'50"O ; 3950 m) ; b) au Chili septentrional (Baied, 1991), la Laguna

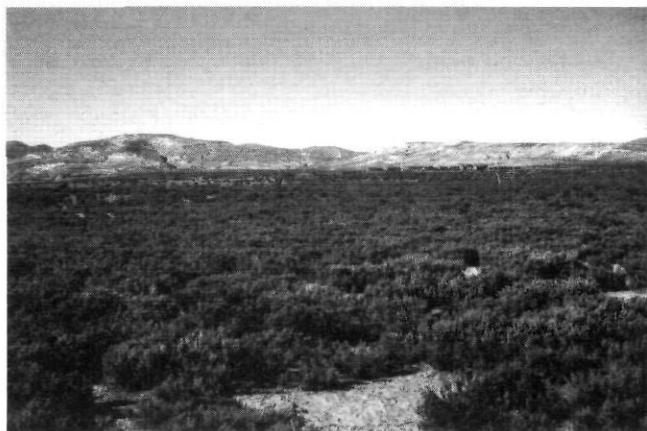


FIGURE 5. La formation végétale appelée « tolar » dans la Cordillère occidentale près du lac Titicaca (17°10'S ; 69°10'O, 4000 m).  
Vegetation called « tolar » in the western cordillera near Lake Titicaca (17°10'S ; 69°10'O, 4000 m).



FIGURE 6. Plantes typiques de la « puna brava » près de Casapalca (11°39'S ; 76°15'O, 4800 m) : Poaceae, *Aciachne* (à gauche, en bas) et *Calamagrostis* (à gauche, en haut), Caryophyllaceae (*Pycnophyllum*, coussin au centre) et Asteraceae (*Perezia*, à droite, en bas).

Typical plants of « puna brava » near Casapalca (11°39'S ; 76°15'O, 4800 m) : Poaceae, *Aciachne* (bottom left) and *Calamagrostis* (top left), Caryophyllaceae (*Pycnophyllum*, pillow at centre) and Asteraceae (*Perezia*, bottom right).

Seca (18°11'S ; 69°14'30"O ; 4500 m) ; c) dans le désert d'Atacama entre 23°S et 24°S (Graf, 1994).

Sur la base de l'ensemble des quelques résultats palynologiques existants, on peut conclure que le climat tardiglaciaire au Pérou méridional et dans les régions voisines précitées fut identique. Il était en général plus humide que le climat actuel.

Il est, par contre, différent du climat tardiglaciaire des Andes septentrionales qui était moins humide (Graf, 1996). D'après les données de Salgado-Labouriau (1991), le Tardiglaciaire a été de courte durée au Vénézuéla, où il aurait commencé vers 12 700 BP par une phase sèche, pour se poursuivre jusqu'à 9500 BP par une augmentation progressive de l'humidité. Ce type d'évolution correspond aussi à celui des Andes méridionales où le Tardiglaciaire s'est achevé vers 10 000 BP par une phase relativement humide.

## DIATOMÉES

L'étude paléobotanique des diatomées peut fournir de nombreux renseignements concernant le paléoclimat (température en association avec une méthode isotopique, précipitations), la paléosalinité, le niveau trophique, le pH, le paléoenvironnement (profondeur d'eau) (Servant-Vildary, 1978 ; Roux *et al.*, 1987).

### 1. DESCRIPTION DE SIX NIVEAUX DE DIATOMÉES DU SONDAGE S2

Les niveaux 25, 95, 200, 270, 360 et 420 cm du sondage S2 ont été examinés. De nombreuses diatomées en bon état de conservation y ont été trouvées, ce qui implique un milieu

peu acide. Trente et un taxons de diatomées ont déjà été identifiés ; beaucoup sont aérophiles et benthiques ou littoraux, ce qui indique une faible profondeur d'eau pendant toute la période. Cette observation est confirmée par l'absence de diatomées centrées qui, généralement planctoniques, indiquent une profondeur d'eau importante et ont été trouvées notamment en Bolivie, dans des sédiments holocènes (Pierre et Wirrmann, 1986 ; Pierre, 1990).

Les abondances relatives des taxons dominants ont été estimées (fig. 7).

- Le niveau 25 cm (subactuel) est dominé par des espèces d'eau bien minéralisée (*Rhopalodia acuminata*, *Denticula* sp.).
- Le niveau 95 cm (490 BP), est plus pauvre et ne présente pas d'espèces nettement dominantes, mais celles-ci caractérisent des eaux bien minéralisées à légèrement saumâtres.
- Le niveau 200 cm (9700 BP) est largement dominé par un taxon aérophile (*Navicula gallica*) ; il s'appauvrit en espèces halophiles et s'enrichit en espèces oligohalobes.

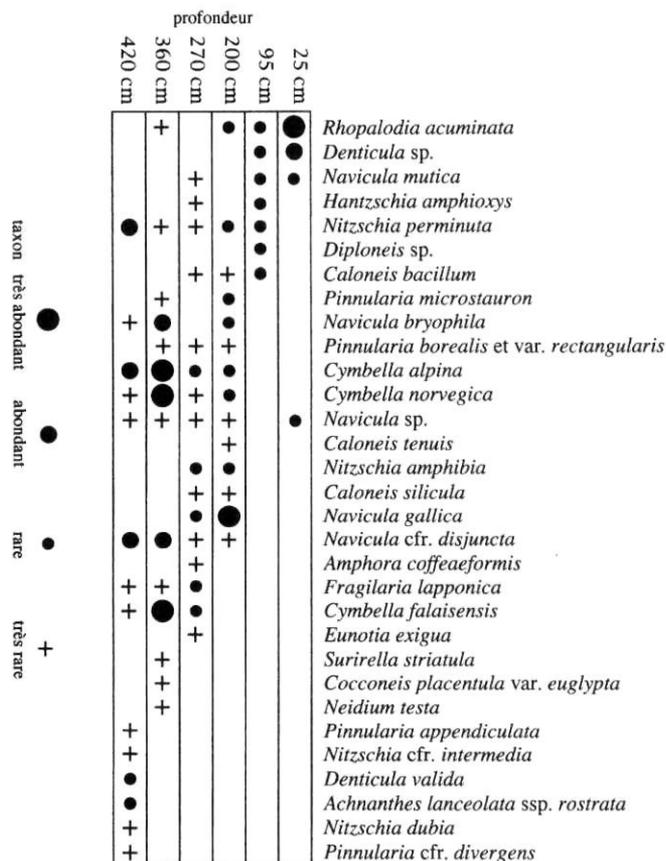


FIGURE 7. Relevé des diatomées en quatre classes d'abondance à six niveaux stratigraphiques de la carotte S2 de la Laguna Salinas. Nomenclature d'après Krammer et Lange-Bertalot (1986-1991).

Semi-quantitative stratigraphical variations of diatom species in the core S2 of the Laguna Salinas. Nomenclature after Krammer and Lange-Bertalot (1986-1991).

– Le niveau 270 cm (transition Tardiglaciaire-Holocène) est caractérisé par *Fragilaria lapponica*, tychoplanctonique qui pourrait indiquer une période plus humide au cours de laquelle les précipitations ont eu pour effet d'entraîner vers le lac des espèces normalement benthiques dont, notamment, des *Fragilaria* (Pierre, 1990).

– Les niveaux 360 et 420 cm (Tardiglaciaire) sont dominés par des espèces benthiques montagnardes ou nordiques alpines, d'eau peu minéralisée et plutôt courante, dont *Cymbella alpina*, *C. falaisensis* et *C. norvegica*.

## 2. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'évolution des associations de diatomées dans le sondage S2 montre : a) que les profondeurs d'eau sont demeurées faibles pendant toute la période considérée ; b) qu'il y a peut-être eu une période plus humide correspondant au niveau 270 cm, soit proche de la transition Tardiglaciaire-Holocène ; c) que la minéralisation augmente progressivement de la base vers le sommet de la séquence étudiée.

Une discussion de ces résultats préliminaires dans le contexte régional, voire andin, est prématurée. D'une part, il n'existe aucun résultat publié relatif aux diatomées tardiglaciaires ou holocènes d'autres sites du Pérou méridional ; il n'est donc pas possible d'effectuer des comparaisons. D'autre part, les données relatives aux diatomées du lac Titicaca (Bolivie) sont limitées à l'Holocène, période pour laquelle il n'existe que deux niveaux décrits dans la Laguna Salinas.

## CONCLUSION

La Laguna Salinas est un salar situé à l'intérieur d'une dépression volcano-tectonique qui, depuis son affaissement, sert de piège sédimentaire régional et enregistre l'évolution de l'environnement. Les résultats obtenus nous ont permis d'obtenir qu'un sondage industriel y soit réalisé.

Sept retombées volcaniques majeures sont enregistrées dans la région de la Laguna Salinas, depuis la phase de fusion des glaciers avant le Tardiglaciaire.

– L'éruption du Huaynaputina en 1600 A.D. a enseveli les villages proches du volcan et a causé à la ville d'Arequipa, des dommages graves, attestés par des documents historiques.

– Une mince retombée de cendre noire émise par le Misti au cours du dernier quart du XV<sup>e</sup> siècle est le dernier témoin connu de l'activité de ce volcan.

– Une série de produits pyroclastiques reconnus sur le flanc méridional du Misti atteste une éruption explosive paroxysmale au début de notre ère (Thouret *et al.*, 1995).

– Une retombée plinienne, présente dans la Laguna Salinas à un niveau proche de la transition Tardiglaciaire-Holocène, pourrait avoir été émise par le Huaynaputina.

– Quatre autres retombées pliniennes ont été identifiées à la bordure occidentale de la lagune ; elles attestent des éruptions explosives paroxysmales du Misti qui ont eu lieu entre le maximum glaciaire (18 000 BP) et environ 15 000 BP.

La succession téphrochronologique décrite ci-dessus constitue un modèle de référence pour les recherches ultérieures en la matière au Pérou méridional.

L'analyse pollinique de la tourbe tardiglaciaire de la Laguna Salinas a permis de distinguer deux phases paléo-environnementales : a) Salinas-I qui représente un « tolar » correspondant à un climat semi-aride et froid ; b) Salinas-II qui représente une végétation d'altiplano correspondant à un climat plus sec et moins froid que le précédent. La transition entre les deux phases est située à 280 cm et pourrait représenter le passage du Tardiglaciaire à l'Holocène. Une analyse préliminaire des diatomées montre que les profondeurs d'eau sont demeurées faibles pendant toute la période considérée et que la minéralisation augmente progressivement de la base vers le sommet de la séquence étudiée.

### REMERCIEMENTS

L'étude a été rendue possible par un contrat de coopération entre l'Institut de Géophysique du Pérou (Lima et Bureau régional d'Arequipa) et l'Université de Clermont-Ferrand (Centre de Recherches volcanologiques). La fondation A. Seghers (Université de Liège) et le Fonds national de la Recherche scientifique (Belgique) ont également apporté leur soutien financier. Les analyses par microsonde ont été réalisées au Centre d'Analyse par Microsonde des Sciences de la Terre à l'Université de Louvain-la-Neuve et au Centre de Recherches volcanologiques de l'Université de Clermont-Ferrand. Enfin la compagnie aérienne IBERIA a généreusement ramené des quantités importantes d'échantillons à traiter dans les laboratoires européens.

### RÉFÉRENCES

- Argollo, J. et Mourguiart, Ph., 1996. Paleoenvironment evolution in the Bolivian Andes during the Upper Pleistocene. *Géodynamique andine, résumés étenus*, 3rd ISAG, Saint Malo, France : 713-716.
- Baied, C., 1991. Late Quaternary environments and human occupation of the South-Central Andes. Dissertation, Department of Anthropology, University of Colorado, Boulder, 131 p.
- Beaulieu, J.-L. de et Reille, M., 1978. Quelques moyens de sondages en usage chez les pollenanalystes : étude comparative de diagrammes. *Annales des Mines de Belgique*, 6° livraison : 137-145.
- Chavez-Chavez, J.A., 1992. La erupcion del Misti, Pasado, Presente, Futuro. *Impresiones Zenith, Arequipa*, 158 p.
- Clapperton, C.M., 1990. Quaternary glaciations in the southern hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 9 : 121-304.
- 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam.
- Dejoux, C. et Illis (édit.), 1992. *Lake Titicaca, a synthesis of limnological knowledge*. Kluwer Academic Publisher.
- Denys, L., 1991. A check-list of the diatoms in the Holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. *Service géologique de Belgique, Professional Paper*, 246 : 1-41.
- Folk R.L. et Ward W.C., 1957. Brazos River bar. A study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentology Petrology*, 27 : 3-26.
- Francis, P.W., 1993. *Volcanoes, a planetary perspective*. Oxford Press.
- Guevara R., 1969. *Geologia del Cuadrangulo de Characato*. Servicio de Geologia y Minería 23, Lima, 53 p. 1 mapa a color 1/100 000.
- Graf, K., 1992. Pollendiagramme aus den Anden. *Physische Geographie, Universität Zürich*, 34 : 1-138.
- 1994. Discussion of palynological methods and paleoclimatical interpretations in northern Chile and the whole Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 67 : 405-415.
- 1996. Algunos apuntes sobre el paleoclima en los Andes venezolanos hace 13.000 anos. *Plantula, ULA Merida*, 1/1 : 95-106.
- Hammer, C.U., Clausen, H.B. et Dansgaard, W., 1981. Past volcanism and climate revealed by Greenland ice cores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 11, 3-10.
- Hoffmann, J., 1975. *Atlas climatico de America del Sur*. UNESCO, Genève.
- Krammer, K. et Lange-Bertalot, H., 1986-1991. *Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae*. 1. Naviculaceae, 876 p. (1986) ; 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, 596 p. (1988) ; 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, 576 p. (1991) ; 4. Achnantheaceae, 437 p. (1991). G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- Lavenu, A., 1984. Dernière glaciation Choqueyapu II. Transition Tardiglaciaire/Holocène vers 13.000 BP au Titicaca. *Cahiers de l'ORSTOM, série géologie*, 14 (1).
- Lavenu, A., Fornari, M. et Sebrier, M., 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cahiers de l'ORSTOM, série géologie*, 14 (1) : 103-114.
- Leake, B., 1978. Nomenclature of amphiboles. *The Canadian Mineralogist*, 16 : 501-520.
- Le Bas, M.J., Le Maître, R.W., Streckheisen, A. et Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27 : 745-750.
- Markgraf, V., 1989. Paleoclimates in Central and South America since 18,000 BP based on pollen and lake-level records. *Quaternary Science Reviews*, 8 : 1-24.
- Messerli, B., Grosjean, M., Bonami, G., Bürgi, A., Geyh, M., Graf, K., Ramseyer, K., Romero, H., Schottener, U., Schreier, H., et Vuille, M., 1993. Climate change and natural resource dynamics of the Atacama altiplano during the last 18,000 years. A preliminary synthesis. *Mountain Research and Development*, 13 (2) : 117-127.
- Morimoto, N., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Bulletin de Minéralogie*, 111 : 535-550.
- Mourguiart, Ph., Wirrmann, D., Fournier, M. et Servant, M., 1992. Reconstitution quantitative du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 315 : série IIa : 875-880.
- Pierre, J.F., 1990. Diatomées et sédiments holocènes du lac Jankho Khota (Bolivie), p. 191-201. *In M. Ricard, édit., Ouvrage dédié à H. Germain*. O. Koeltz, Königstein.
- Pierre, J.F. et Wirrmann, D., 1986. Diatomées et sédiments holocènes du lac Jankho Khota (Bolivie). *Géodynamique*, 1 (2) : 135-145.
- Risacher, F., 1993. Géochimie des lacs salés et croûtes de sel de l'Altiplano bolivien. *Sciences géologiques, Bulletin*, 45 (3-4).
- Roux, M., Servant-Vildary, S. et Mello e Sousa, S., 1987. Diatomées et milieux aquatiques de Bolivie. Application des méthodes statistiques à l'évaluation des paléotempératures et des paléosalinités. *Géodynamique*, 2 (2) : 116-119.
- Salgado-Labouriau, 1991. Vegetation and climatic changes in the Merida Andes during the last 13,000 years. *Boletín IG-USP, Publicacion especial Geosciencias (Université de Sao Polo)*, 8 : 159-170.
- Seltzer, G.O., 1990. Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. *Quaternary Science Reviews*, 9 : 137-150
- Servant, M. et Fontes, J.C., 1984. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers de l'ORSTOM, série géologie*, 14 (1) : 9-24.
- Servant, M., Fournier, M., Argollo, J., Servat-Vildary, S., Sylvestre, F., Wirrmann, D. et Ybert, J.-P., 1995. La dernière transition glaciaire/interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 320 : série IIa : 729-736.

- Servant-Vildary, S., 1978. Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. Cahiers de l'ORSTOM, série géologie, 10 (1) : 25-36.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Anuarios Meteorológicos de Bolivia 1974-1979 La Paz.
- Thouret, J.C., Legros, F., Gourgaud, A., Salas, G., Juvigné, É., Gilot, E., Uribe, M. et Rodríguez, 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. Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 320, série IIa : 923-929.
- Wirrmann, D. et Oliveira Almeida, L.F., 1987. Low Holocene level 7700 to 3650 years ago of Lake Titicaca (Bolivia). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 59 : 315-323.
- Wright, H.E., Seltzer, G.O. et Hansen, B.C.S., 1989. Glacial and climatic history of the Central Peruvian Andes. National Geographic Research, 5(4) : 439-445.
- Ybert, J.-P., 1984. Diagramme sporopollinique de la coupe holocène du Rio Chuquiaguillo sur l'altiplano bolivien. Cahiers de l'ORSTOM, série géologie, 14(1) : 29-34.