

METEOROLOGIE NATIONALE
CENTRE DE METEOROLOGIE
SPATIALE LANNION

Ministère des Relations Extérieures — Coopération et Développement

VEILLE CLIMATIQUE SATELLITAIRE

METEOROLOGIE NATIONALE CMS LANNION - GOES W - VISIBLE 05/04/1986 17H00 TU



PA 4592d
64 JUL. 1986

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote : BX 16984

Ex: *univ*

à BX 16991

n° 12 - Mai 1986



LACS TEMPORAIRES ET PLAINES DE SEL DES HAUTS PLATEAUX DES ANDES (BOLIVIE)

Suivi de phénomènes hydrologiques périodiques

par B. GUILLOT

Les lacs des hauts plateaux (Altiplano) ont attiré depuis longtemps l'attention des spécialistes, car ils ont connu dans le passé des variations de niveau qui offrent de très bons repères pour l'étude des paléoclimats. Ils subissent encore actuellement des évolutions annuelles et interannuelles importantes, les dernières que nous ayons observées (1983-1984) ayant été en outre en phase avec les événements exceptionnels qui se sont produits au même moment dans les pays riverains de l'Atlantique sud-tropical, et que nous avons déjà abondamment décrits (Citeau et al, 1985, Guillot et al, 1986). Nos observations reposent sur une exploitation de l'imagerie « visible » des satellites géostationnaires de la série GOES EST, dont le site (75°W, 0°) est idéalement placé.

1.) Cadre physique et principes de l'observation par satellite.

Au cœur de la chaîne des Andes, les hauts plateaux boliviens forment une vaste région naturelle déprimée, entre deux chaînes de montagnes, les Cordillères Occidentale et Orientale, qui culminent à plus de 6.000 mètres (fig. 1, d'après Servant et Fontes, 1978). Cette cuvette, allongée parallèlement aux plissements montagneux, est drainée par un système hydrologique endoréique qui met en relation, par le rio Desaguadero et ses prolongements méridionaux, les lacs Titicaca et Poopo, et les plaines de sel (Salars de Coipasa, Uyuni) qui en occupent le fond. L'altitude moyenne est très élevée ; le point le plus bas est à 3.530 mètres, sous le niveau du lac Titicaca (3.810 m), une pente générale très faible conduisant vers le sud à 3.686 m (lac Poopo), 3.680 m (salar de Coipasa) et 3.653 m (salar de Uyuni). Des volcans (Nevado Sajama, 6.542 m) et des sierras isolées (Serrania de Corque) parsèment les plateaux.

Le climat actuel est de type tropical, avec des pluies de saison chaude (novembre-avril) dont la durée et l'intensité diminuent du nord au sud, passant de 1.000 mm (lac Titicaca) à 200-300 mm au sud. Ces précipitations font périodiquement remonter le niveau des lacs, et elles humidifient les salars, ou les transforment pour partie en lacs temporaires plus ou moins étendus suivant les années. D'après Servant-Fontes « Des advections d'air polaire, assez fréquentes » provoquent en hiver mais parfois aussi en été « des perturbations frontales qui donnent des chutes de neige ». La saison sèche d'hiver provoque une décrue généralisée.

Ces phénomènes sont faciles à suivre par satellite car les niveaux de réflectance varient très fortement, en fonction de la présence ou de l'absence d'eau : brillance intense des zones couvertes de sel, ou forte absorption des lacs et des zones humidifiées.

Fonds Documentaire ORSTOM



010016988

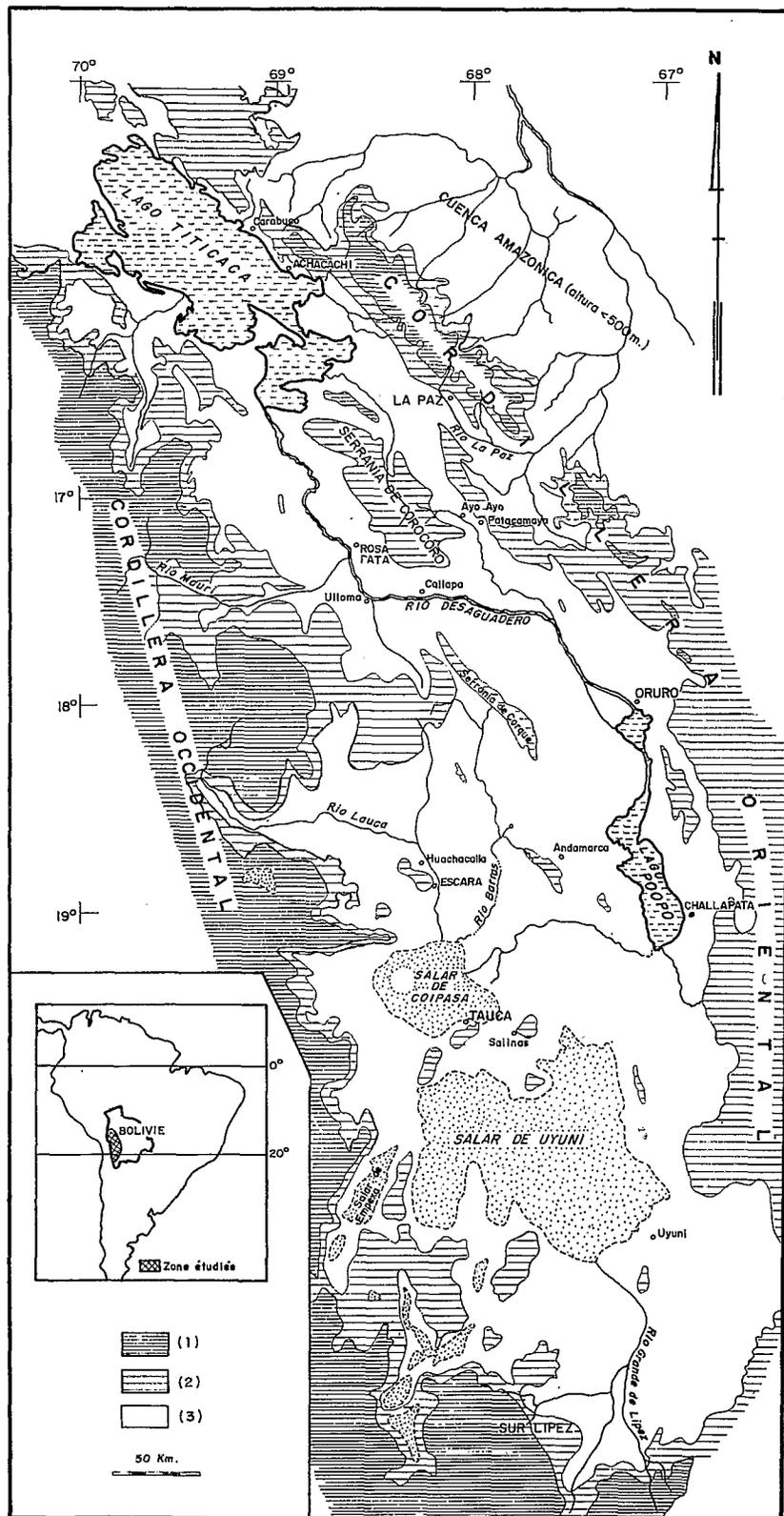


Fig. 1. - CROQUIS DE SITUATION. D'après Servant et Fontes, 1978, p. 11.

(1), altitudes superiores à 4.500 m ; (2), altitudes comprises entre 4.000 et 4.500 m ; (3), altitudes comprises entre 3.600 et 4.000 m.

Une surveillance à échelle fine est possible par les satellites d'observation de la terre, du type landsat ; le montage que nous avons effectué (photo 1) révèle, en sus des détails du relief repérables avec une grande sécurité (cônes volcaniques, chaînes plissées), le contraste très fort entre les surfaces salées très brillantes, et les surfaces en eau très sombres : lac de Coipasa, lac Poopo. Ce document montre aussi les limites de ce type de satellite :

- la zone considérée est très étendue, et trois « scènes » différentes sont nécessaires pour la couvrir entièrement ;
- du fait qu'à l'époque des prises de vues, aucune station ne pouvait recevoir directement les signaux émis par le vaisseau spatial, les images de cette zone devaient être mémorisées à bord, d'où leur rareté, et la difficulté que nous avons eue à composer cette mosaïque.

Les images montrant les salars de Coipasa et Uyuni sont de la fin de l'année (31 octobre 1972 et 17 décembre 1975) donc en période de basses eaux ou de début de la crue. Le lac Poopo vu le 4 mai 1977 est doublement en hautes eaux, du fait de la saison (début de la décrue) et de l'année, qui fut humide. Il y a donc de gros inconvénients à utiliser les données landsat ; leur intérêt est de décrire précisément le relief (ce qui peut par exemple éviter une confusion possible entre un sommet enneigé, une plaque de sel ou un nuage) et de fournir de temps à autre une situation typique, comme celle du lac Poopo au plus fort de son extension spatiale en 1977.

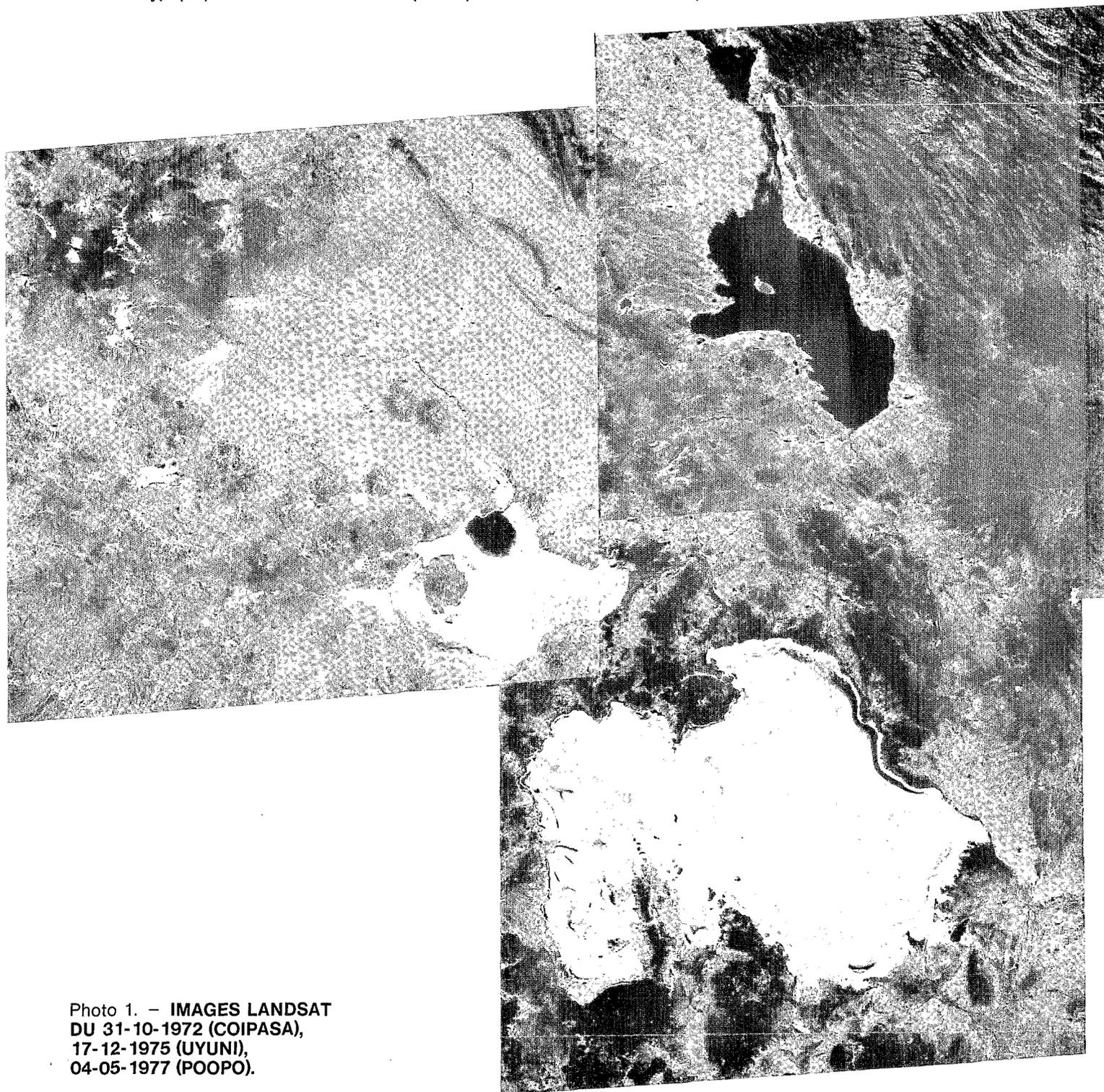


Photo 1. - IMAGES LANDSAT
DU 31-10-1972 (COIPASA),
17-12-1975 (UYUNI),
04-05-1977 (POOPO).

Pour une surveillance rapprochée dans le temps la série de satellites géostationnaires américains GOES EST constitue l'outil privilégié. Cet instrument est l'une des composantes des programmes SMS (programme expérimental : Synchronous Meteorological Satellite) et GOES (programme opérationnel : Geostationary Operational Environmental Satellite), eux-mêmes intégrés dans le programme de veille météorologique mondiale. Plusieurs vaisseaux se sont succédés sur le site, assurant une observation continue sur une longue période, depuis SMS 1, lancé le 17 mai 1974, jusqu'à GOES 5, dont l'imageur a cessé de fonctionner en août 1984 ; depuis cette date les sites à 75° ouest et 135° ouest (GOES WEST) ont été fusionnés, sur une position intermédiaire, à 98° ou 108° W suivant la saison ; les images sont, bien entendu, de moins bonne qualité pour notre zone d'étude, qui est vue sous un angle plus fort qu'auparavant.

Ces satellites prennent toutes les demi-heures des images du globe dans deux fenêtres spectrales :

- un canal infra-rouge thermique (10,5-12,5 μ m), dont la résolution géométrique, au point sous satellite est de 8 x 4 km ;

- un canal visible (0,55-0,75 μ m), dont la résolution radiométrique est satisfaisante (niveaux d'énergie répartis sur 64 valeurs) et la résolution géométrique exceptionnelle : moins de 1 km au sous-point.

Ce canal est idéal pour suivre des phénomènes au niveau régional, car il permet de voir d'emblée de grandes surfaces avec une assez grande finesse de détails (photo 2), la cadence de prise de vue autorisant tous les choix possibles, et la possibilité de sélectionner des périodes de ciel clair au vu des images précédentes.

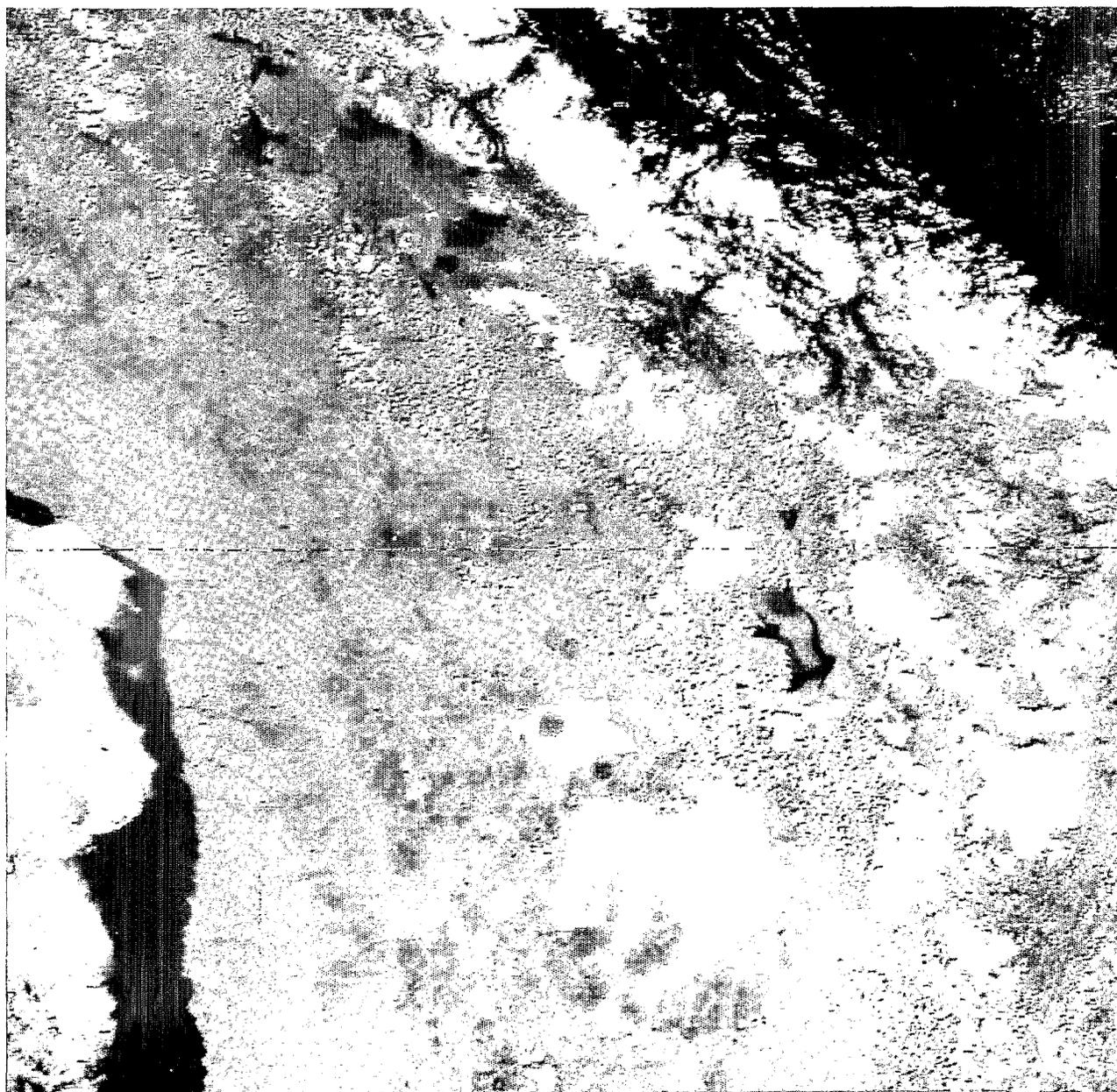


Photo 2. - GOES EST, CANAL VISIBLE, 24-12-1980, 15H30 TU. Le lac de Coipasa est complètement sec. Nuages abondants sur la Cordillère Orientale, liés à l'arrivée de la ZITC.

Les données sont archivées au centre de Lannion, sous la forme de films photographiques. Il faut souligner l'exceptionnelle qualité des documents, le VIZIR restituant, avec ses 64 niveaux de gris, les données dans leur intégralité. De décembre 1980 à août 1984 nous avons en outre acquis directement des données numériques, par une procédure simple de sectorisation. Celle-ci consiste à ouvrir, dans la masse énorme des informations issues du satellite, via la station relais américaine de Wallops (15.000 lignes de 15.000 points, pour une image visible), une fenêtre appropriée au sujet d'étude. Nous avons ainsi obtenu, à intervalles réguliers, des images de 800 lignes et 800 points, auxquelles nous avons fait subir divers types de traitement :

- traitements photographiques, par sélection des comptes utiles pour la mise en évidence de phénomènes terrestres, chaque compte étant affecté d'une teinte de gris, du noir : forte absorption du rayonnement solaire (surfaces couvertes d'eaux libres), au blanc (nuages et autres objets très brillants : sel et neige) ; les traitements ont été faits sur le VIZIR par J. Le Quelleneq ;

- traitement interactif multitrans sur console « Menhir » ; les programmes mis au point par C. Jegou et B. Bellec nous ont permis d'effectuer des comparaisons multitemporelles, avec construction d'histogrammes, et de coupes dans les données, et de restituer les documents sous forme d'images en couleur.

Les changements de satellite au cours du temps ont imposé une calibration approchée des données ; nous avons ainsi constaté une grande différence de sensibilité entre les radiomètres de SMS 2 (arrêté en mai 1981) et des GOES 4 et 5 qui ont pris le relais. Pour cela nous avons sélectionné des zones tests, choisies parmi les surfaces les plus sombres et les plus brillantes des images ; le lac de Chungara (fig. 2), situé au pied du Nevado de Chayapata (cote 6340), très profond et bien alimenté en toutes saisons, nous a fourni un repère sombre d'albedo très constant, et les parties les plus brillantes des plaines de sel, en période sèche et en l'absence d'aérosols, le repère brillant. Après analyse des histogrammes et quelques tâtonnements nous avons choisi entre les images des satellites de GOES 4 et SMS 2 un ajustement linéaire de 1,25 environ. Un problème que nous avons éludé, car nous avons vite constaté que la recherche d'ajustements satisfaisants nous aurait entraîné trop loin, est celui que pose le radiomètre lui-même ; celui-ci est en effet composé de 8 cellules indépendantes juxtaposées, ce qui entraîne un effet de lignage assez prononcé.

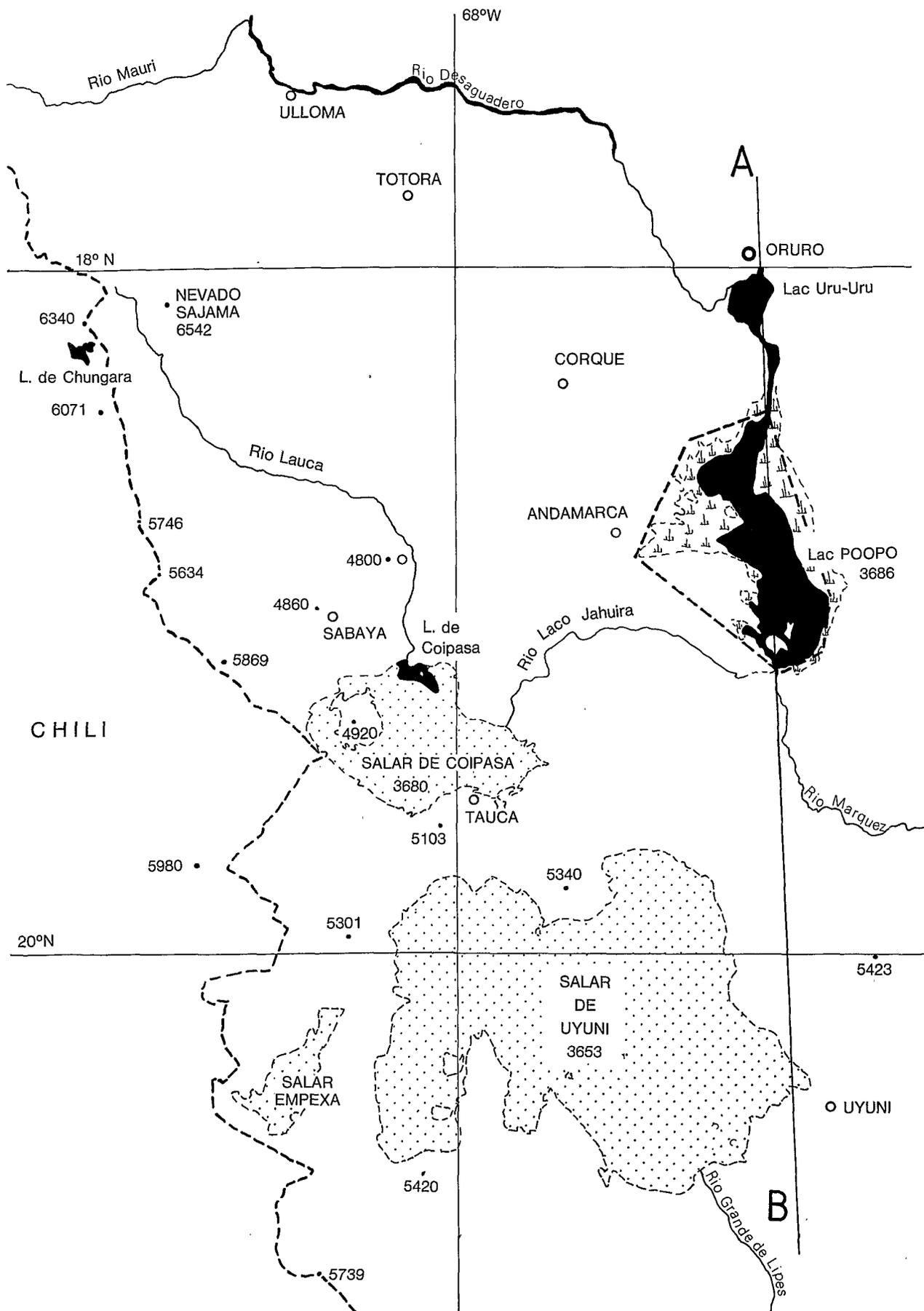


Fig. 2. — **PRINCIPAUX REPERES GEOGRAPHIQUES.** (Extrait de la carte ONC P 26 dite « Opérationnel Navigation Chart », publiée par la Défense Mapping Agency Center, St-Louis, Missouri).
 Limite des salars de Coipasa et Uyuni, et de l'extension actuelle maximale du lac Poopo.
 5.423, altitudes remarquables.

2.) Evolution dans le temps des lacs.

Les recherches des paléoclimatologues ont montré des fluctuations très importantes, dans un passé relativement récent. On en trouve un bon résumé dans Servant et Fontes (1978), qui ont reconnu trois transgressions lacustres quaternaires : épisodes Ballivian, Minchin et Tauca, entre - 50.000 et l'actuel. Le dernier (Tauca), compris entre - 12.360 et - 10.640 ans a atteint la cote 3.720 m, soit une superficie de 43.000 km² et une profondeur maximale supérieure à 60 mètres, constituant un lac subdivisé en « trois nappes d'eau presque indépendantes centrées sur le Poopo et les salars de Uyuni et Coipasa » (id., p. 16). La figure 3, tirée de la même publication (fig. 8, page 18) en fournit une excellente illustration, elle aide à replacer les phénomènes contemporains dans leur contexte hydrologique général.

L'évolution actuelle comporte des variations assez faibles, de type saisonnier, étirées sur un cycle annuel, et des variations plus importantes à une échelle interannuelle.

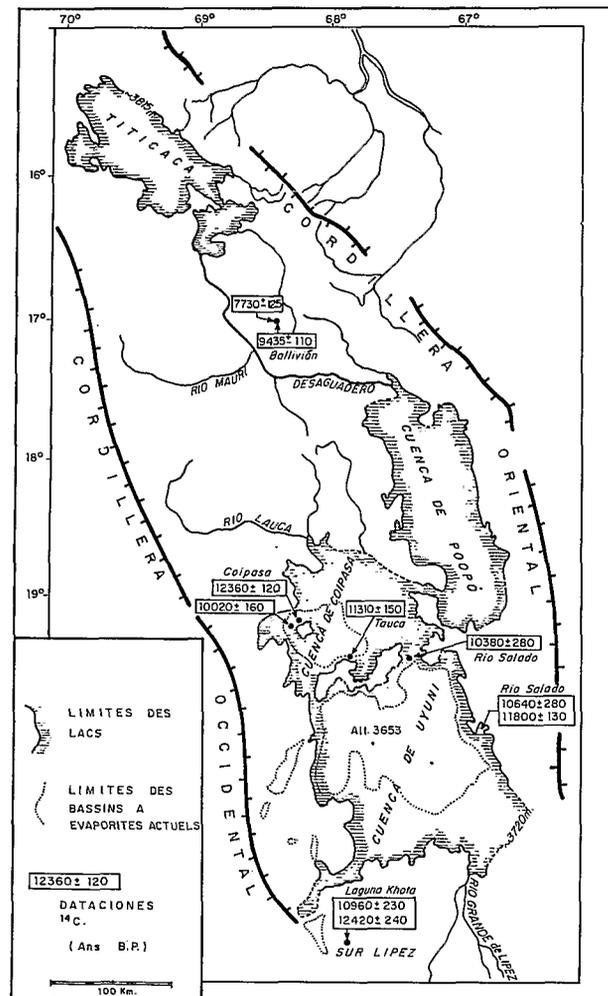


Figure. 3. – PALEOLACS DE LA PERIODE LACUSTRE TAUCA. D'après Servant et Fontes, 1978, p. 18.

2.1 Cycle annuel.

D'après ce que nous avons pu voir, l'année 1981 donne une assez bonne idée d'un cycle annuel à peu près « normal » au sens statistique, en termes de moyenne.

La surveillance des événements et l'appréciation de leur intensité est permise par les importants changements de brillance, au cours du temps, des plaines de sel (salar de Coipasa, de Uyuni). Un examen mois par mois révèle les faits suivants :

- une apparition assez brusque des eaux dans les salars, au début de l'année, en janvier-février, qui succède à une invasion des massifs montagneux par d'abondants systèmes nuageux (cumulonimbus, altocumulus)

liés à la descente vers le sud de la ZITC. Ces derniers sont déjà bien visibles en décembre sur la photographie n° 2 sur la Cordillère Orientale, et tout autour du lac Poopo, alors que les salars sont entièrement blancs et secs, et que de vastes zones claires (eaux peu profondes) sont visibles au sein du lac Poopo ; la crue des rivières n'est visiblement pas commencée, et il semble qu'il y ait un délai assez long, que nous n'avons pas déterminé, entre l'arrivée des pluies et la reprise de l'écoulement des rivières ;

- une phase assez courte, qui correspond au maximum de l'avancée des eaux, en mars-avril (photo 3) ; sur ce document le lac Poopo est beaucoup plus foncé qu'en décembre ; seule émerge l'île Panza, et l'alimentation par le rio Desaguadero semble active. Le lac de Coipasa forme au nord du salar une belle plage foncée, avec des prolongements vers le sud sous la forme de zones inondées plus légèrement ; à sa corne orientale une vaste lagune est aussi apparue ; enfin des arrivées d'eau sont visibles sous la forme de trainées sombres, au nord-est et au sud du salar de Uyuni ;

- une phase de lent et progressif assèchement jusqu'en décembre ou janvier. Le salar de Uyuni a été le premier asséché, dès le mois de mai ; le lac de Coipasa a amorcé sa décrue dès avril, et il avait presque disparu en novembre, époque où il ne subsistait plus qu'une tache sombre très réduite au milieu d'une plage grise un peu plus vaste.

Un examen des archives photographiques révèle rapidement une très grande variabilité dans les manifestations du rythme annuel, de 1974 à 1982. L'état des lacs, notamment celui de Coipasa, permet de distinguer des années sèches, avec dans l'ordre 1980, où fut notée la plus faible crue du rio Lauca, 1978 et 1982, puis 1976 et 1979 qui ont connu une situation voisine de celle de 1981 ; il y a eu deux années que l'on peut qualifier d'humides, en 1975 où le salar était encore complètement sombre le 2 mai, et en 1977 où il était aux trois-quarts plein fin mars, le salar de Uyuni étant très assombri dans sa partie centrale et au sud-est.

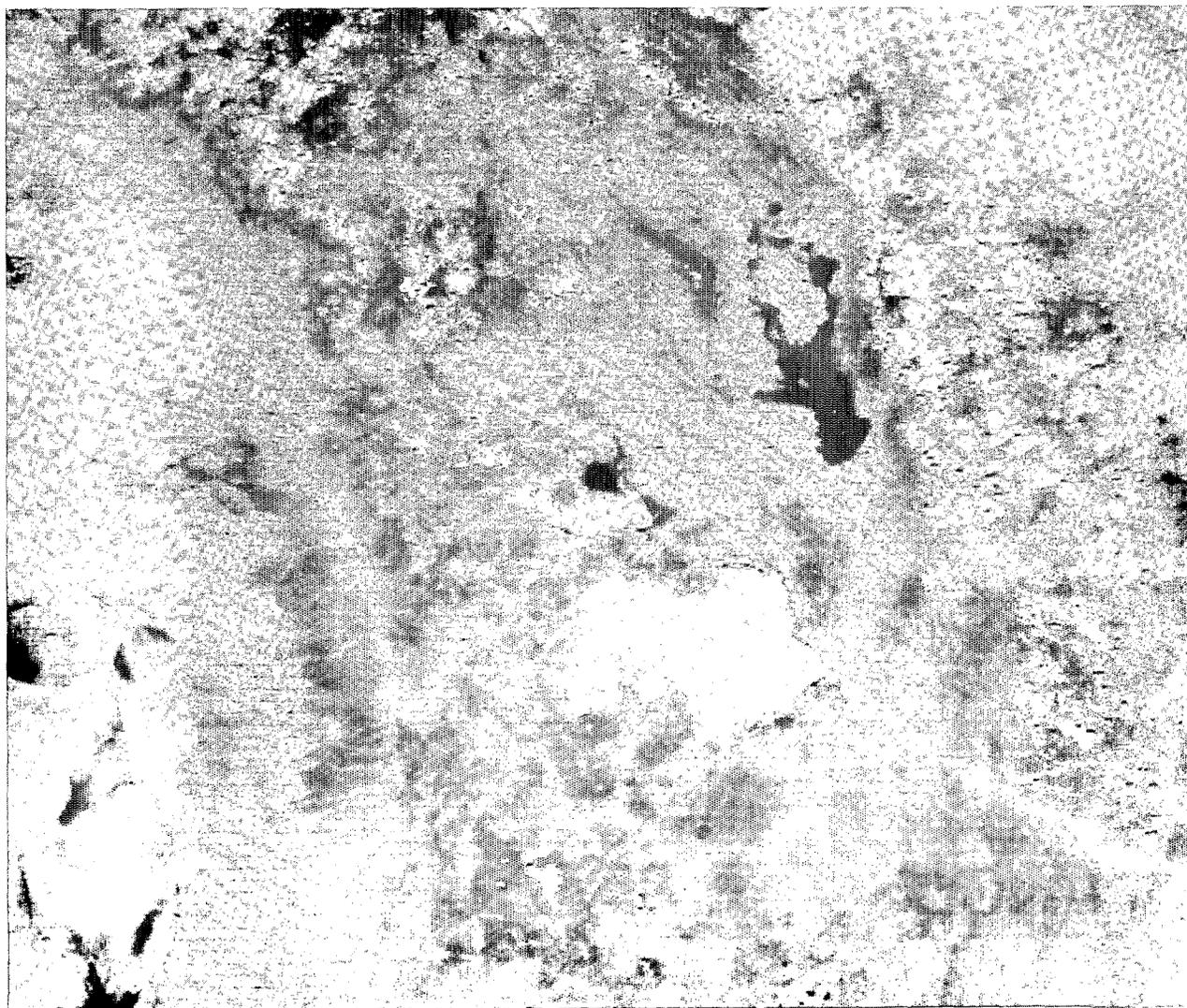


Photo 3. - **GOES EST, CANAL VISIBLE, 16-03-1981, 17H00 TU.** Image prise au maximum de la crue de 1981. Noter la montée des eaux dans la cuvette de Coipasa, et l'alimentation du lac Poopo par le rio Desaguadero, émissaire du lac Titicaca, dont on voit l'extrémité sud, en haut du document.

2.2 Cycle interannuel.

On ne peut pas à proprement parler qualifier les évolutions mentionnées ci-dessus d'interannuelles ; les années sèches et humides se sont succédé sans interférer de façon apparente l'une sur l'autre, et chaque année il y a eu des apports d'eau dans les salars, puis dessèchement progressif.

Cette mécanique s'est trouvée totalement enrayée dans les années 1983-1984, l'une ayant vu une sécheresse sans précédent historique connu, et l'autre, immédiatement après, une pluviosité exceptionnelle et des niveaux de crues lacustres très élevés. La planche I (p. 30-31) résume cette évolution, en marquant les phases principales. Il s'agit d'une série d'images traitées de telle sorte que le contraste soit maximal entre les surfaces en eaux libres (en bleu) et les plaines de sel, sèches et brillantes, en vert, rouge et jaune. Nous avons considéré comme point de départ de la sécheresse la date du 16 mars 1982, qui correspond au maximum de la crue saisonnière. On distingue nettement les lacs Uru-Uru et Poopo, ce dernier couvrant cependant une surface assez réduite, avec des zones claires étendues au nord de l'île Panza ; le lac de Coipasa a le niveau caractéristique d'une année sèche, il est deux fois moins étendu qu'en 1981.

Par la suite les lacs n'ont reçu aucun écoulement jusqu'au début de l'année 1984, et ont subi durant tout ce temps une phase de dessèchement continu. Le 3 mars 1983, à la fin de la période normalement humide, aucun écoulement n'est parvenu au lac de Coipasa, qui est sec depuis décembre 1982, et qui a été remplacé par une plaine de sel très brillante ; le lac Uru-Uru est en voie de disparition, (sa partie Est est devenue un salar) ce qui indique un tarissement du rio Desaguadero, et la partie sud du lac Poopo semble être déjà sèche ; un petit salar très brillant est visible à l'emplacement de sa corne ouest, vers Andamarca. Le 15 novembre 1983 marque le sommet de la phase de sécheresse. Il n'a pas plu sur les hauts plateaux depuis 18 mois, et ils ont pris globalement une teinte brillante ; un peu partout sont apparues des plaines de sel (teintes rouge et jaune), au sud-est de Uyuni, au nord et au nord-ouest de Coipasa ; surtout le lac Poopo est devenu une nouvelle grande plaine de sel, seule une flaque d'eau très peu épaisse subsistant au nord.

C'est à partir de cette date qu'il a recommencé à pleuvoir ; une situation de décembre 1983 (le 19) montre le retour de la neige sur les montagnes, et une baisse considérable des brillances sur les hauts plateaux ; cependant, du fait du décalage entre les pluies et les crues des rivières, le lac Poopo semble avoir dans l'intervalle complètement disparu.

Le contraste est particulièrement saisissant entre le 15 novembre 1983 et le 5 avril 1984. Les teintes jaune et rouge des fortes brillances ont été entièrement remplacées par le bleu des lacs, ou par des valeurs proches traduites en blanc. Les lacs Uru-Uru et Poopo sont pleins, celui de Coipasa a envahi tout le salar, et le salar de Uyuni est assombri sur toute sa surface, seule la corne sud-ouest conservant en son centre des zones probablement exondées. L'examen des situations suivantes montre un très lent retour à la « normale » ; le 24 mai la cuvette de Coipasa est encore entièrement recouverte d'eau et le lac Poopo a encore son extension maximale ; seul le salar de Uyuni est revenu à des valeurs d'albedo plus élevées : comptes numériques 34 à 41 à peu près partout, le nord et le sud-est restant encore très sombres.

A la mi-juillet des observations de terrain (1) confirment que le salar de Coipasa est encore entièrement recouvert d'eau (80 cm à 1 m), et il est effectivement très sombre ; il y avait également encore de l'eau à cette époque (20 à 40 cm) dans le salar de Uyuni et ceci pose un problème d'interprétation car il était redevenu brillant sur presque toute sa surface.

L'évolution du lac Poopo pendant ces deux années exceptionnelles est illustrée par les variations d'albedo (figure 4). Ce graphique a été construit en établissant, à des dates qui nous ont paru significatives, les histogrammes des niveaux d'énergie reçus par le satellite, et enregistrés sous la forme de comptes numériques, de 0 à 63 ; les valeurs basses correspondent à de faibles énergies (forte absorption du rayonnement solaire), les valeurs hautes à de fortes réflectances.

Les histogrammes ont été calculés sur l'ensemble de la cuvette, et ils incorporent une partie des surfaces exondées environnantes ; un système d'amers nous a permis de les composer dans les mêmes zones, comme indiqué sur la figure 2, avec un taux d'erreur de positionnement, en plus ou en moins, estimé à moins de 1 %. La comparaison multitemporelle ainsi permise révèle un décalage continu des valeurs vers la droite du graphique, de mars 1982 à novembre 1983, et un retour non moins spectaculaire vers les valeurs les plus basses jamais enregistrées, au début d'avril 1984.

(1) D. Wirmann, communication personnelle.

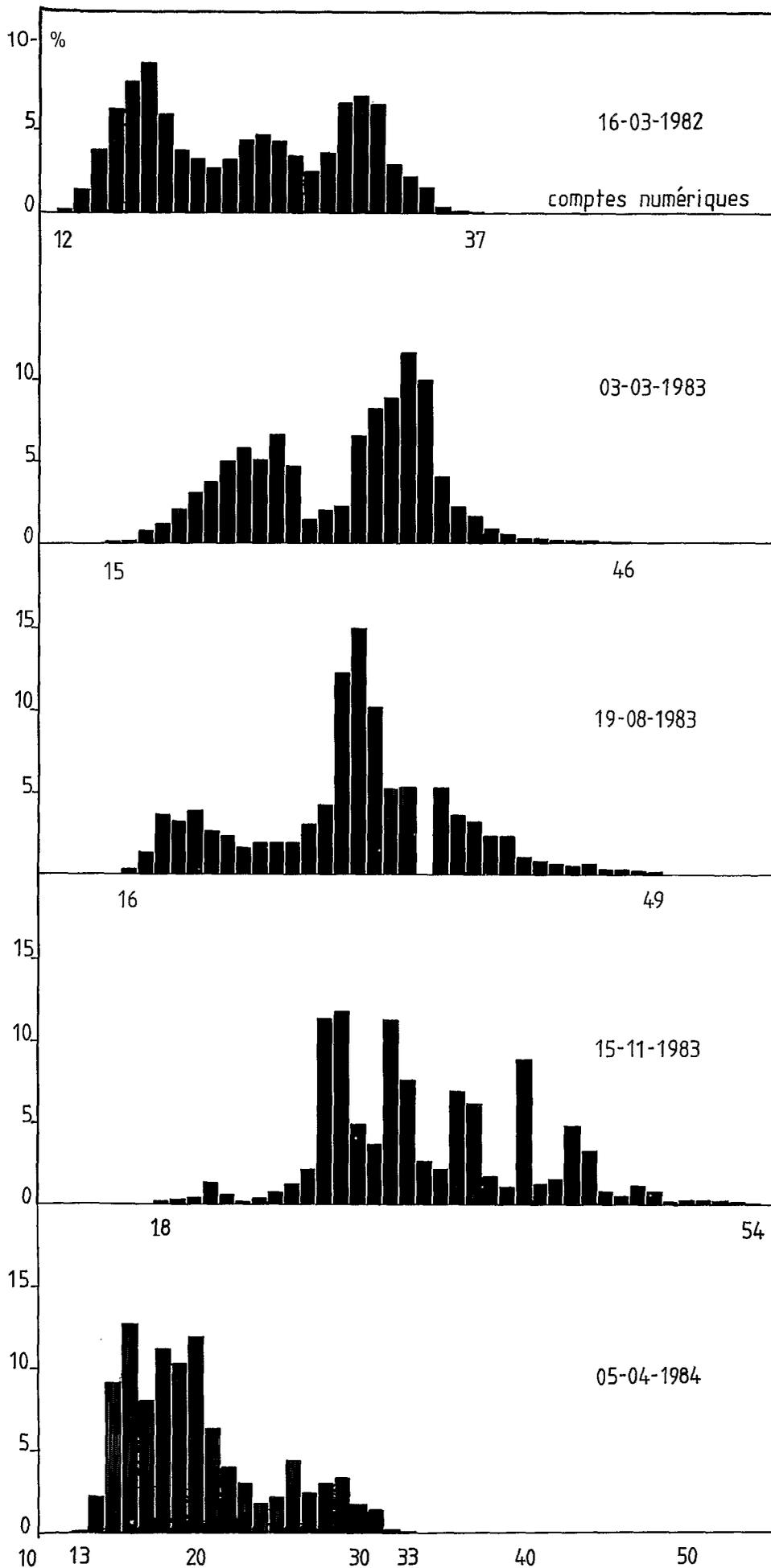


Figure 4. - ASSECHÈMENT PUIS REAPPARITION DU LAC POOPO, DE MARS 1982 A AVRIL 1984. (Variation des niveaux de réflectance « visible » GOES Est, à 17 h 00 TU).

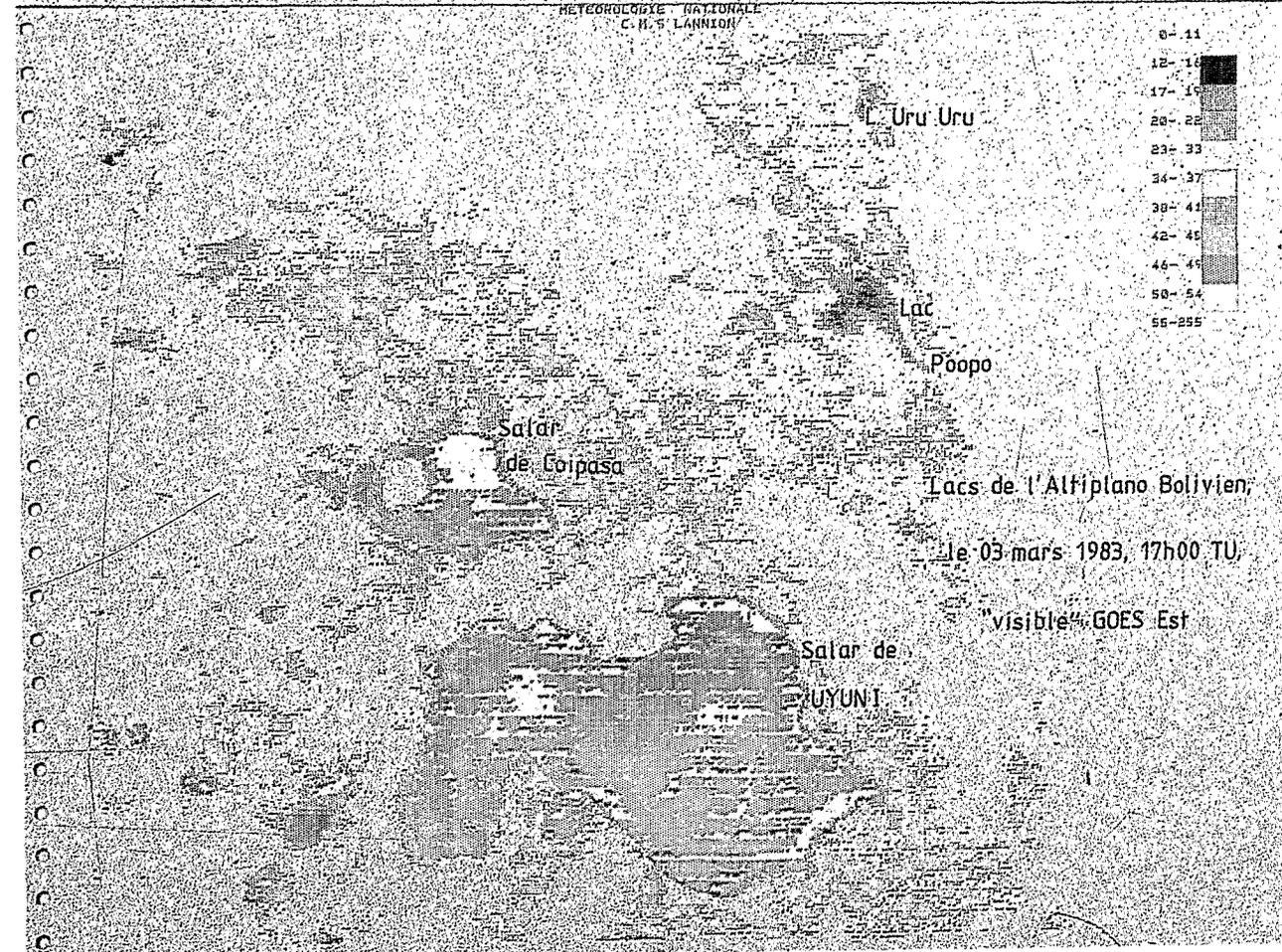
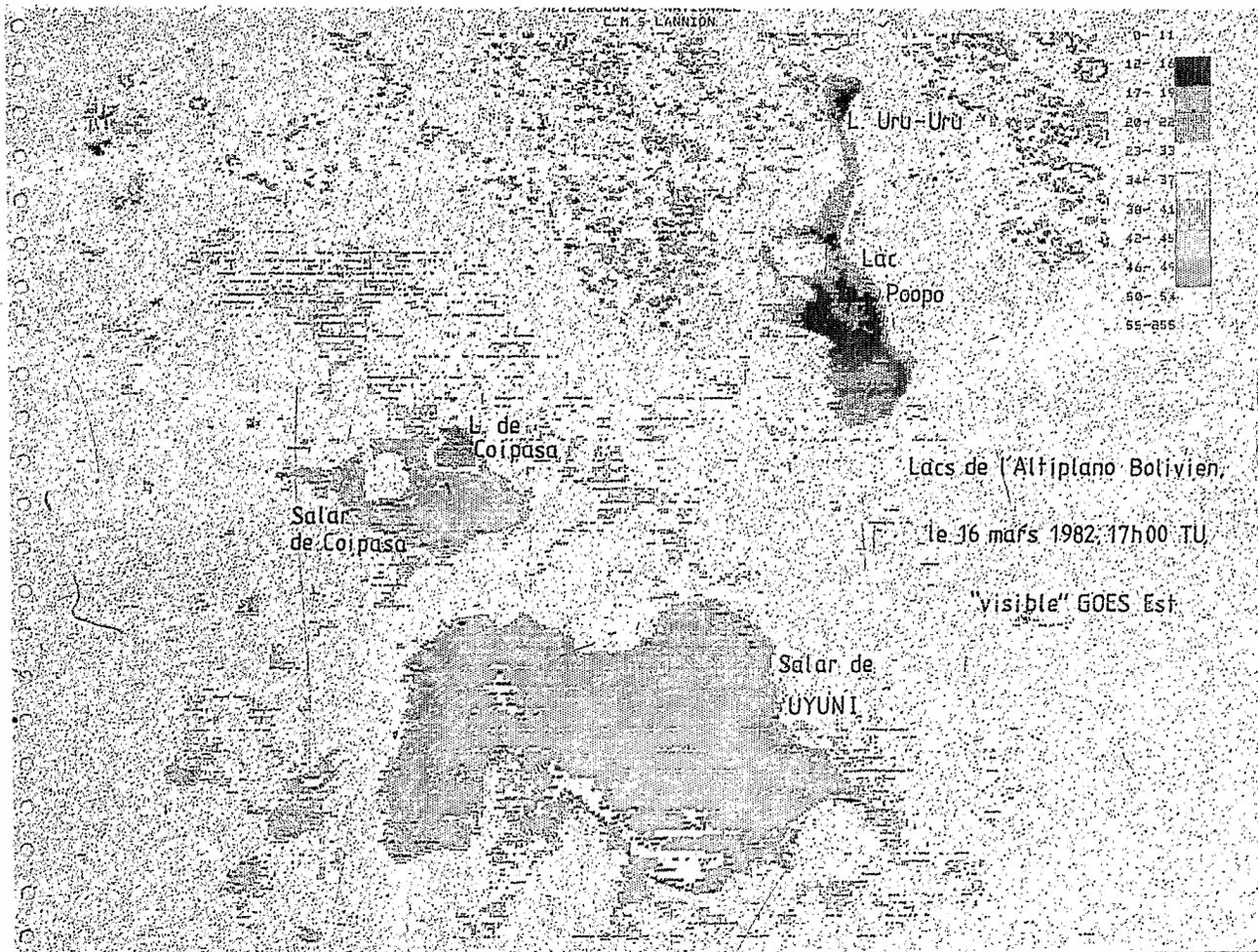


Planche I. - EVOLUTION DES LACS ET DES P

METÉOROLOGIE NATIONALE
C. H. S. LANNION

0-11

12-16

17-19

20-22

23-25

26-27

28-31

32-35

36-41

42-45

46-49

50-54

55-255

Lac Poopo
Lacs de l'Altiplano Bolivien
le 15 novembre 1983, 17h00 TU,

"visible" GOES Est

METÉOROLOGIE NATIONALE
C. H. S. LANNION

0-11

12-16

17-19

20-22

23-25

26-27

28-31

32-35

36-41

42-45

46-49

50-54

55-255

Lac Poopo
Lacs de l'Altiplano Bolivien
le 5 avril 1984, 17h00 TU,

"visible" GOES EST

En mars 1982 le niveau du lac est traduit par la représentation des comptes numériques inférieurs ou égaux à 22 (48,7 %) ; cette proportion tombe à 16,7 % en mars 1983, à 10,3 % en mai, et à 2 % en novembre ; inversement le pourcentage des comptes considérés comme brillants et caractéristiques d'une présence importante de sel passe dans le même temps de 2,2 à 43,1 %. Le retour à des conditions humides inverse complètement les proportions, les valeurs « eau » passant à 70,5 %, et « sel » à 0 % (fig. 4). On obtiendrait des résultats du même genre en faisant la différence entre le compte le plus bas et le plus élevé de chaque distribution, l'écart passant de 25 à 36 comptes de mars 1982 à novembre 1983, pour redescendre à 20 comptes en avril 1984.

Des coupes nord-sud (dont l'emplacement est figuré par la droite AB de la figure 2) dans les données, sur un segment, du lac Uru-Uru au salar de Uyuni (fig. 5) montrent bien le retournement des valeurs lié à l'assèchement, les lacs atteignant en novembre 1983 des niveaux identiques à ceux du salar de Uyuni, les creux dans les coupes étant remplacés par des bosses.

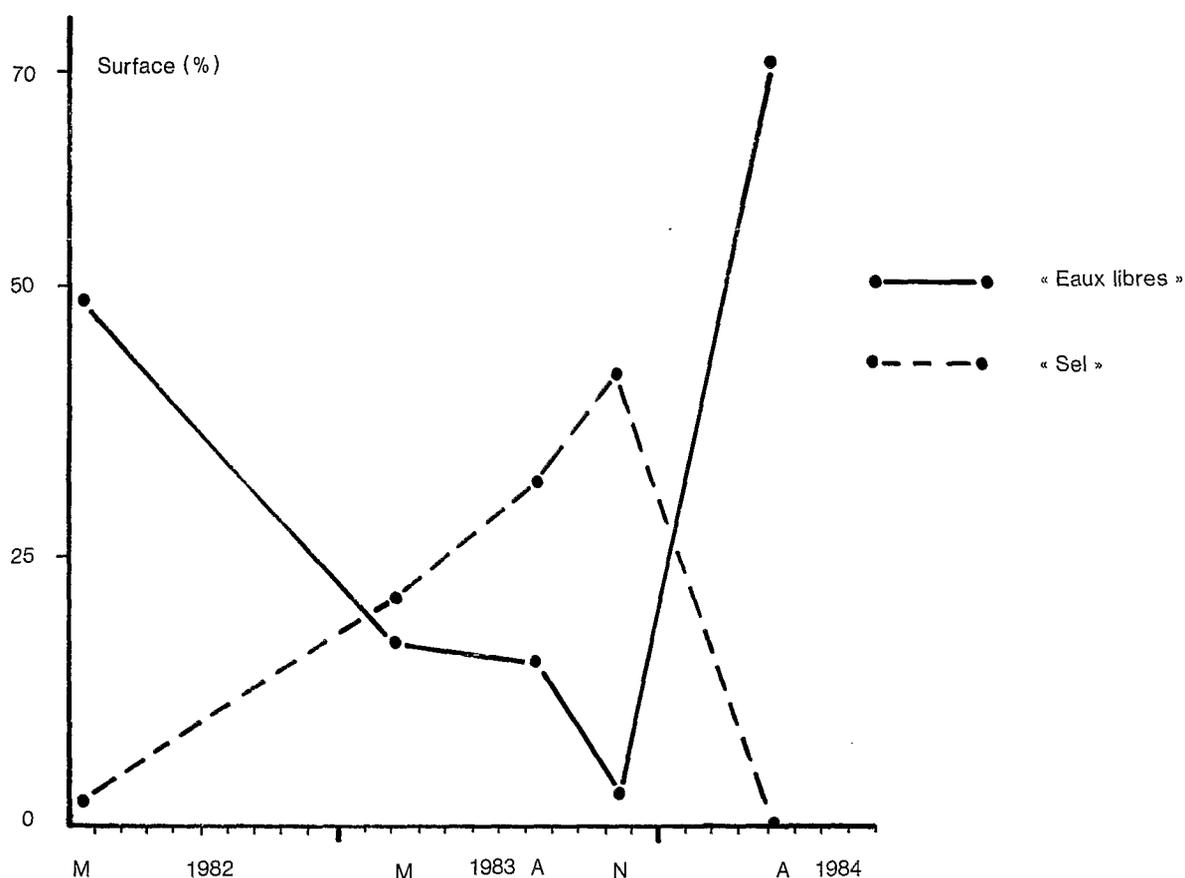


Figure 5. – LAC POOPO. EVOLUTION DES SURFACES « EAUX LIBRES » ET « SEL », DE MARS 1982 A AVRIL 1984.

La figure 6 retrace les étapes de la formation du « salar Poopo ». Les premiers points brillants (valeurs égales ou supérieures à 37) apparaissent en juillet 1982, sur la rive nord-est, dans l'île Panza, et à l'est de cette île, dans une zone normalement exondée. Le 3 mars 1983 (planche I) on retrouve à peu près les mêmes taches, la corne occidentale, vers Andamarca, formant déjà un salar homogène d'une assez grande étendue ; le 19 mai le bord sud du lac est devenu à son tour très brillant, et on distingue comme une esquisse de ceinture de sel autour de la cuvette, ceinture qui est presque continue le 19 août, les surfaces ayant été multipliées entre-temps par 3 ou 4 ; le 15 novembre il ne subsiste plus qu'une tache sombre au sein d'une plaine d'une brillance de plus en plus accentuée.

La situation de décembre montre un retrait très important ; les pluies sont déjà bien amorcées, et ont sans doute suffi à assombrir une grande partie du salar, avant l'arrivée des eaux, qui va se produire dès le mois de janvier ; le remplissage de la cuvette nominale était terminé fin mars-début avril 1984, et le lac stabilisé à un haut niveau le 24 mai.

L'année 1985 est elle aussi de type humide, mais nettement moins que 1984 ; le 19 mars le lac de Coipasa recouvre le nord et l'est du salar, qui est sombre ailleurs ; le 23 septembre 1985 le lac subsiste encore au nord, avec des dimensions voisines de celles de mars 1981 ; en décembre il est encore présent, et l'ouest du salar de Uyuni s'est assombri.

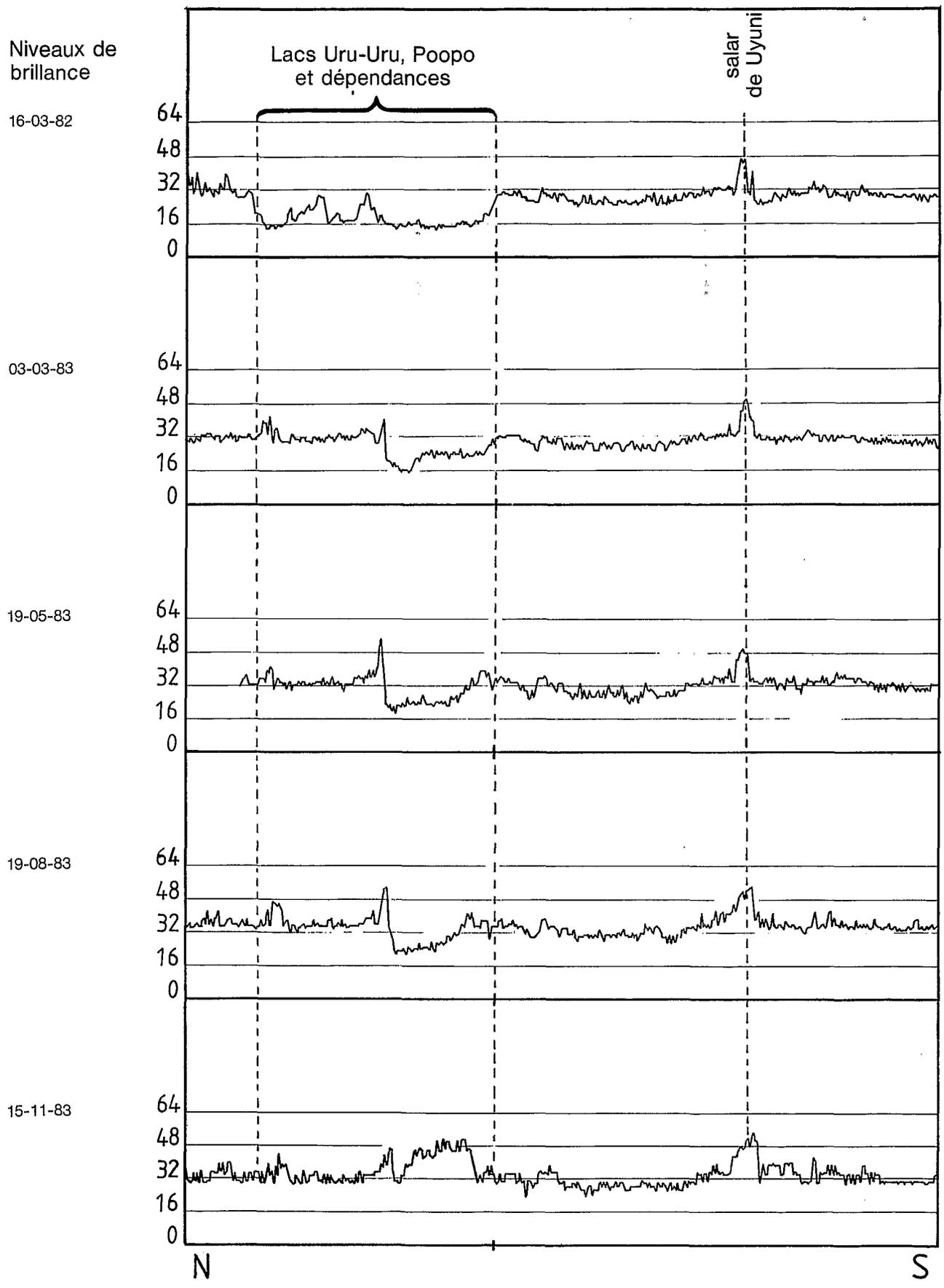


Figure 6. - L'ASSECHEMENT DU LAC POOPO, COUPES NORD-SUD « VISIBLE » GOES Est, A 17 h 00 TU.

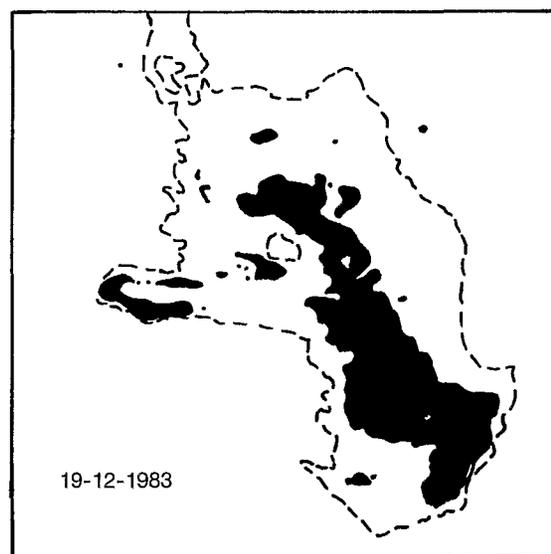
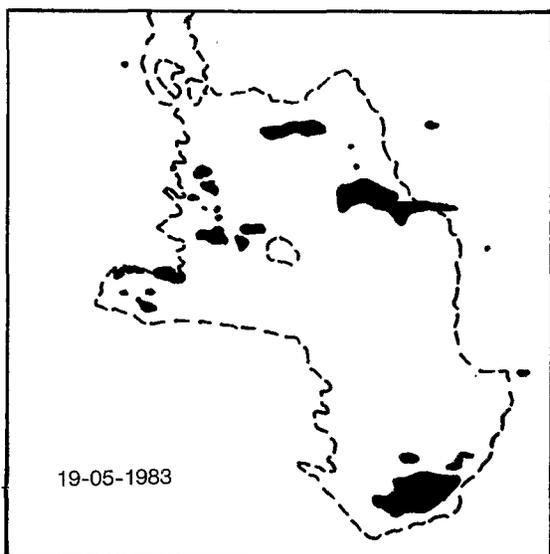
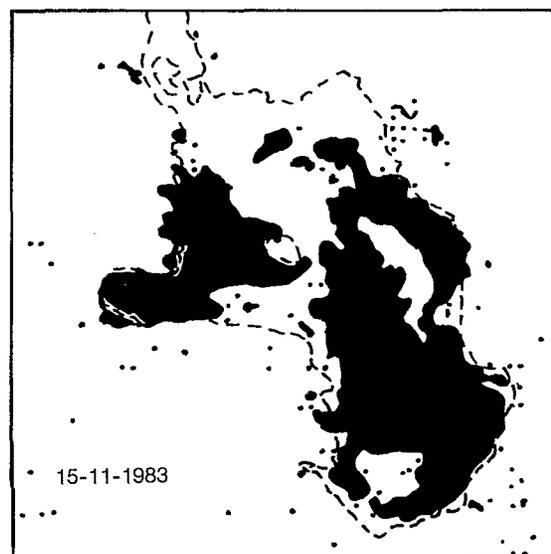
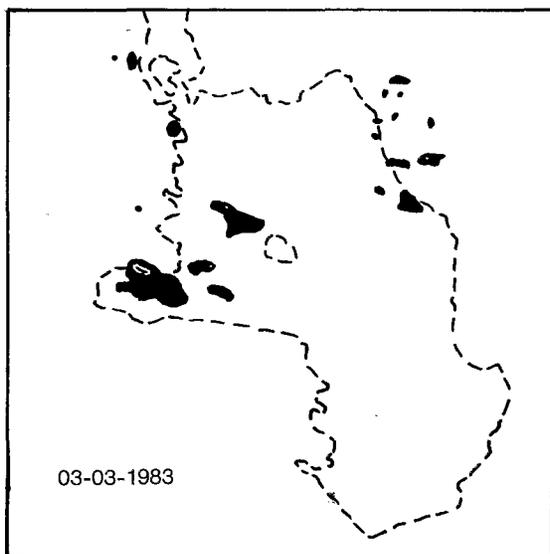
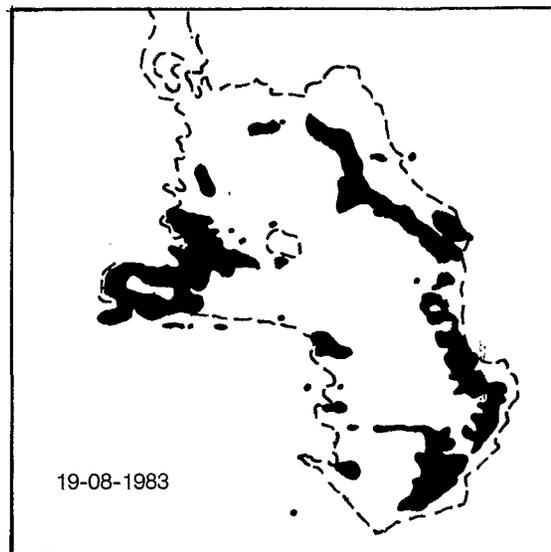
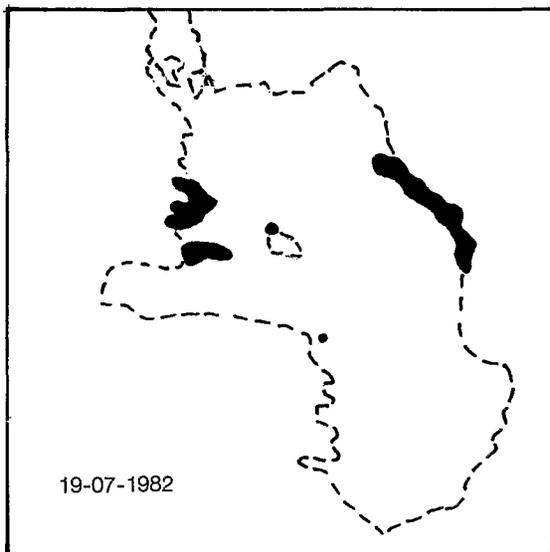


Figure 7. – ETAPES DE LA FORMATION DU SALAR POOPO, DE 1982 A 1984. Les zones en noir représentent les surfaces brillantes (comptes numériques ≥ 37) et les pointillés les limites du lac, le 24 mai 1984.

Nous n'avons pas beaucoup de données pour 1986, la direction du CMS ayant décidé pour des raisons financières de cesser de produire et d'archiver des films VIZIR GOES depuis le 7 janvier. Il s'agit incontestablement d'une année humide, si l'on en juge par les échos qui sont parus dans la presse, à propos du relèvement considérable du niveau du lac Titicaca, qui inonde ses rives ; des acquisitions sectorisées faites les 3, 4 et 5 avril 1986 montrent que le lac de Coipasa a envahi la moitié du salar (parties nord et est) et que le lac Poopo a atteint ses dimensions maximales ; par contre le salar de Uyuni est resté brillant. Les nuages sont très abondants, et à cette date assez tardive la ZITC est encore manifestement présente jusqu'à 20° sud. Une étude des photographies montre que le lac Titicaca a très largement débordé de ses rives, avec apparition d'extensions lacustres secondaires au sud, dans la zone de départ de son émissaire, le Rio Desaguadero.

L'opposition années sèches/années humides se trouve ainsi depuis quelque temps remplacée par une évolution interannuelle ou, à deux années sèches : 1982-1983, ont succédé trois années humides, de 1984 à 1986. Ceci devrait se retrouver dans les observations conventionnelles, notamment les séries d'observation sur le niveau du lac Titicaca, la pluviométrie, et d'autres termes du bilan hydrologique, comme l'évaporation (analyse en cours).

Plus généralement les événements importants qui se sont produits lors des cinq dernières années (1982-1986) semblent évoluer en phase avec ceux que nous avons observés au nord-est du Brésil et dans les pays riverains de l'Atlantique sud, avec des périodes de retour similaires. Une analyse serrée des composantes de la circulation atmosphérique et de l'état de l'océan Atlantique intertropical serait nécessaire pour affirmer qu'il y a entre ces régions éloignées des téléconnexions. Il ne nous semble pas interdit en attendant d'émettre l'hypothèse que le régime des pluies qui commande les crues des lacs de l'Altiplano bolivien est en relation assez étroite avec les déplacements en latitude de la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC) à 28° ouest.

Le tableau 1 met en parallèle l'évolution en latitude de la ZITC à 28°W, et le remplissage du salar de Coipasa, au maximum de la crue, de 1981 à 1986.

Tableau I

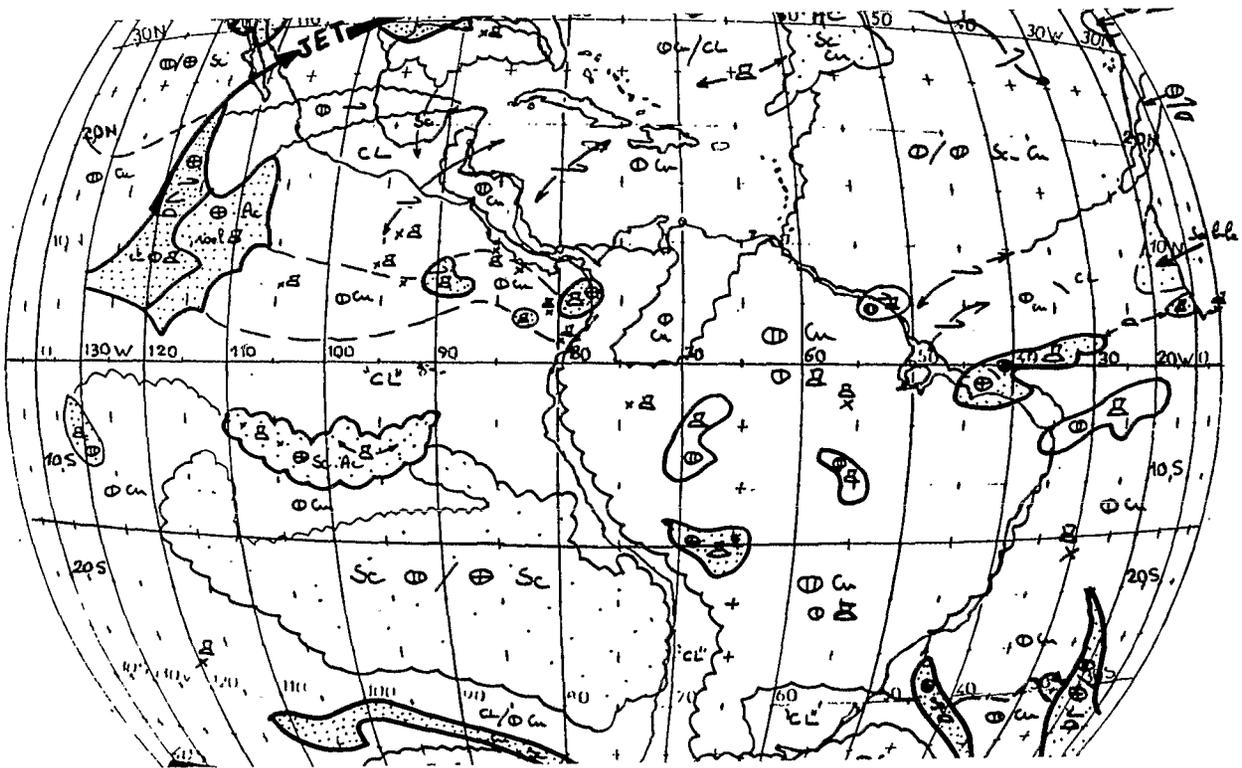
Années	Indice de migration de la ZITC au sud de 5° nord (janvier-avril)	Surfaces du salar de Coipasa couvertes d'eau (%)
1981	1,43	11
1982	1,46	7
1983	1,89	0
1984	0,95	100
1985	0,03	40 *
1986	0,65	49

* Nous mettons ce résultat « en pointillés » car il ne résulte pas d'une analyse numérique, mais d'une appréciation sur document photographique.

La relation n'est pas absolument concordante, mais on peut cependant noter une similitude de comportement, et une opposition entre les années 1983 et 1984. Il n'est au demeurant pas surprenant que les variations interannuelles de la position en latitude de la ZITC aient une influence importante, dans la mesure où les lacs de l'altiplano sont aux marges méridionales de ses déplacements, c'est-à-dire à priori dans une zone où les irrégularités climatiques sont les plus grandes.

Nous présentons pour finir une analyse de la nébulosité tirée de l'observation simultanée que permettaient en 1984 les satellites Météosat et GOES Est (fig. 8). Ces néphanalyses illustrent la façon dont une ZITC située très au sud, et de surcroît dédoublée, dans l'Atlantique intertropical, se poursuit par un amas convectif important sur la cordillère des Andes, entre 69 et 70° ouest et par 15° sud, immédiatement au nord du lac Titicaca, à une date encore tardive (26 mars) ; il est à remarquer que la ZITC est également dédoublée, à la même époque, sur le Pacifique oriental, avec une branche sud bien développée à partir de 90° ouest. La photographie de couverture de ce bulletin montre une branche sud de la ZITC encore plus importante, et continue sur le Pacifique (de 83 à 135° ouest) en 1986, et des nuages abondants sur les cordillères de part et d'autre du lac Titicaca. Au même moment dans le golfe de Guinée la ZITC est dédoublée, avec une branche nord voisine de l'équateur à 28° ouest, et d'importants amas convectifs entre 0 et 10° sud.

GOES EST (A. NOYALET)



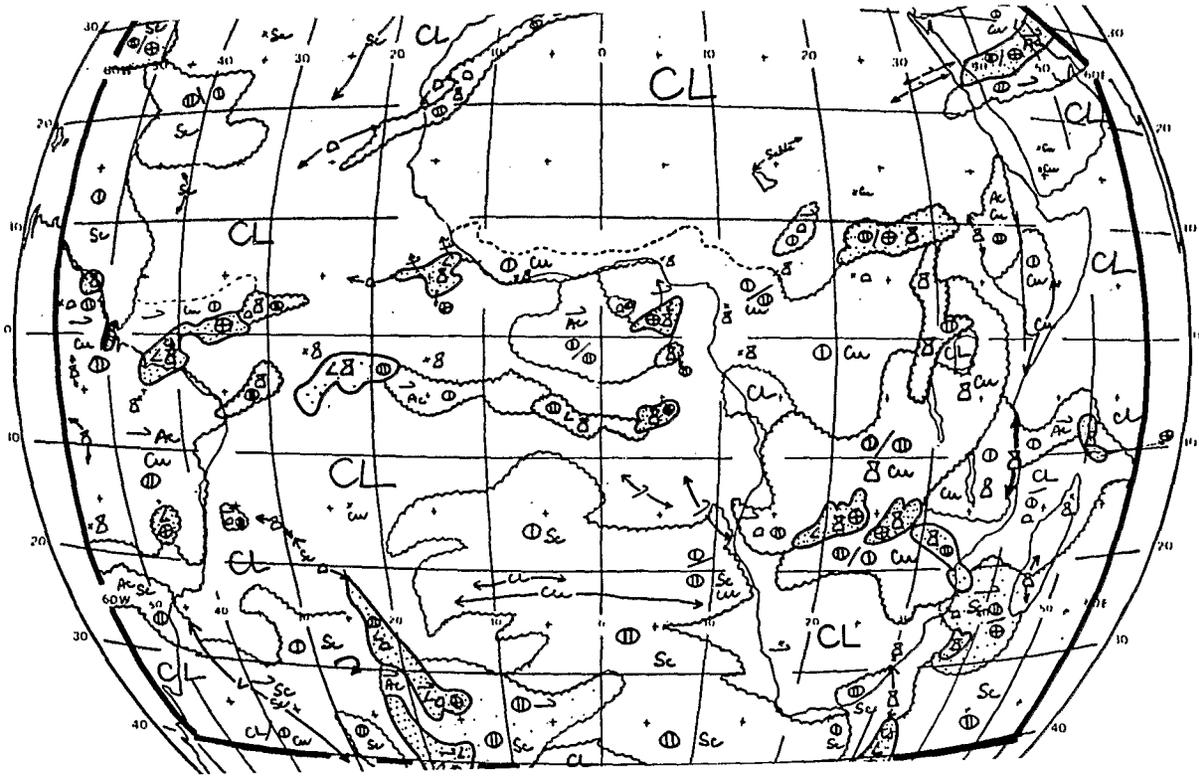
METEOROLOGIE NATIONALE	
FRANCE	
	CEMS
	LANNION
NEPHANALYSE N°	
Satellite GOES E	
Le 26.03.84 à 1530 TU	

IR + Vis

- Cu Cumulus
- Ac Altocumulus
- ⊕ Cumulonimbus
- ⌋ Nuages cirriformes
- Sc Stratocumulus
- △ Nuages cumuliformes
- ∨ Nuages stratiformes
- × Nuage isolé
- → Alignement nuageux
- CL • Ciel clair
- ⊙ Faible nébulosité
- ⊕ Nébulosité moyenne
- ⊕ Couvert
- ⊕ Nébulosité totale
- S Vortex
- Limite diffuse

Fig. 8. - NEPHANALYSES GOEST

METEOSAT (M. TRIGAUX)



MÉTÉOROLOGIE NATIONALE	
FRANCE	
Satellite METEOSAT II Le 16-03-84 à 1330 TU	

Vis : 1330 T.U.
 IR : 1500 T.U.

- METEOSAT, DU 26 MARS 1984.

RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES

- BOULANGE (B.), RODRIGO (L.A.), VARGAS (C), 1978. – Morphologie, formation et aspects sédimentologiques du lac Poopo (Bolivie). Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, n° 1, p. 69-78.
- CARMOUZE (J.P.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), 1978. – Circulation de la matière (eau-sels dissous) à travers le système fluvio-lacustre de l'Altiplano : la régulation hydrique et hydro-chimique des lacs Titicaca et Poopo. Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, n° 1, p. 49-68.
- CHABREUIL (A. et M.), 1979. – Exploration de la terre par les satellites. Paris, Hachette, 156 p. Page 110 belle image en fausses couleurs landsat du salar de Coipasa.
- CITEAU (J.), CAMMAS (J.P.), GOURIOU (Y.), GUILLOT (B.), 1985. – Remarques sur la migration de la Zone Intertropicale de Convergence en Atlantique, les températures de surface du golfe de Guinée, et la pluviométrie en Afrique de l'ouest sahélienne et au nord-est du Brésil. CCCO Meeting, 9-13 sept. 1985, Rio de Janeiro, 19 p.
- GUILLOT (B.), 1981. – Lacs temporaires et plaines de sel des hauts plateaux des Andes (Bolivie). Suivi de phénomènes hydrologiques périodiques à l'aide du satellite géostationnaire GOES EST. La Météorologie, VI^e Série, n° 27, P. 5-9.
- GUILLOT (B.), BELLEC (B.), CITEAU (J.), LAHUEC (J.P.), 1986. – Les climats de l'Afrique de l'ouest et du nord-est du Brésil. Recherche de téléconnexions. Veille Climatique Satellites, n° 11, p. 18-37.
- MARTINEZ (C.), 1980. – Géologie des Andes boliviennes. Trav. et doc. ORSTOM, n° 119, 352 p.
- SERVANT (M.), FONTES (J.C.), 1978. – Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. Cah. ORSTOM, sér. Géologie, vol. X, n° 1, p. 9-22.