

**GÉOLOGIE.** — *Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire.* Note (\*) de Michel Servant et Ricardo Villaruel, présentée par Georges Millot.

Les situations météorologiques actuelles montrent que le déplacement méridien des masses d'air a pu jouer un rôle déterminant dans les changements climatiques quaternaires des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens. Ce type de circulation, amplifié au Quaternaire, a pu entraîner aussi bien une modification de la répartition annuelle des précipitations que des variations dans les valeurs maximales et minimales des températures.

*Andean and amazonian meteorology of Bolivia is characterized by episodic meridian atmospheric circulations which cause large temperature variations and winter precipitations. These atmospheric circulations could be more important during low temperature periods of the Quaternary.*

**I. INTRODUCTION.** — Les paléoenvironnements des régions continentales ont connu, aux latitudes tropicales, des changements importants pendant le Quaternaire, notamment depuis 100 000 ans. Par exemple, en Amérique du Sud, il est démontré que la forêt dense avait en grande partie disparu, en Amazonie, au cours de la dernière époque glaciaire [1]. Les lacs des hauts plateaux boliviens étaient cinq à dix fois plus étendus que de nos jours vers 11 000 ans et un peu avant 28 000 ans B.P. [2]. Les glaciers des Andes sont descendus de plus de 1 000 m par rapport à leurs positions actuelles, particulièrement au Pérou et en Bolivie, entre 28 000 et 14 000 ans B.P. ([3], [4], [5]). De tels changements sont difficiles à interpréter : bien souvent, on ne voit pas, avec précision, quels sont, parmi les nombreux facteurs climatiques en jeu (températures, précipitations, nébulosité, etc.), ceux qui ont joué un rôle déterminant. Mais ces changements n'auraient pas été possibles sans modifications des circulations atmosphériques. Ce sont, en effet, les phénomènes météorologiques qui contrôlent les types de temps, leur fréquence et, par conséquent, l'essentiel des climats. Pour cette raison, il semble utile de rechercher des schémas paléométéorologiques susceptibles d'aider à mieux comprendre l'évolution des paléoenvironnements. C'est ce que nous tenterons de faire ici sur un exemple régional : celui des Andes entre 12 et 22° de latitude Sud.

**II. CLIMATS ET CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUES ACTUELS.** — 1. *Les grands flux zonaux et les anticyclones subtropicaux.* — Les Andes boliviennes présentent un climat tropical caractérisé par l'alternance d'une saison des pluies d'été, de courte durée, et par une longue saison sèche centrée sur les mois d'hiver. Cette alternance est en relation avec le déplacement, en latitude, des grands flux zonaux : en saison sèche, les Andes sont parcourues en altitude, au-dessus de 4 000 m, par le flux d'ouest de l'hémisphère austral [6]; celui-ci se retire vers le Sud en été et cède la place au flux d'Est intertropical, dont les perturbations donnent l'essentiel des précipitations qui ont lieu en Bolivie.

Les vents d'Ouest (ou *westerlies*) abordent les Andes à partir du Pacifique et ils sont déviés sur leur droite au-dessus de la chaîne montagneuse. Cette déviation se traduit au niveau du sol par l'individualisation d'une zone méridienne de basses pressions, qui est probablement renforcée par des effets thermiques. Une discontinuité existe de ce fait, en Amérique du Sud, dans la ceinture australe des anticyclones subtropicaux. Deux cellules de hautes pressions peuvent être distinguées de part et d'autre des Andes : à l'Ouest, l'anticyclone pacifique, à l'Est l'anticyclone atlantique, qui pénètre plus ou moins profondément dans la partie brésilienne du continent (*fig. 1 a*).

21 JUN 1979

J. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 9673 (ex)

2. *Les circulations méridiennes.* — L'air tropical qui circule sur le flanc ouest et sud-ouest des hautes pressions atlantiques rencontre l'air polaire en Argentine. La zone de contact est marquée par des fronts froids qui se déplacent du Sud-Ouest au Nord-Est [7]. Mais ces derniers peuvent s'enfoncer vers le Nord, atteindre les basses latitudes et parfois l'équateur (*fig. 1 b*). Le phénomène, assez fréquent en automne, en hiver et au printemps, est lié à un affaiblissement des hautes pressions sur le Brésil et à l'individualisation en arrière des fronts, sur l'Argentine, d'un puissant anticyclone qui se relie vers l'Ouest à l'anticyclone pacifique. Le passage d'un front froid sur les plaines amazoniennes de Bolivie est marqué par un abaissement brutal des températures, de l'ordre de 10 à 15°C (*fig. 2*), par une brusque augmentation de l'humidité et par de légères précipitations. Simultanément, il y a souvent détérioration du temps sur la partie haute des Andes, principalement dans la région de La Paz, ce qui se traduit par des précipitations orageuses.

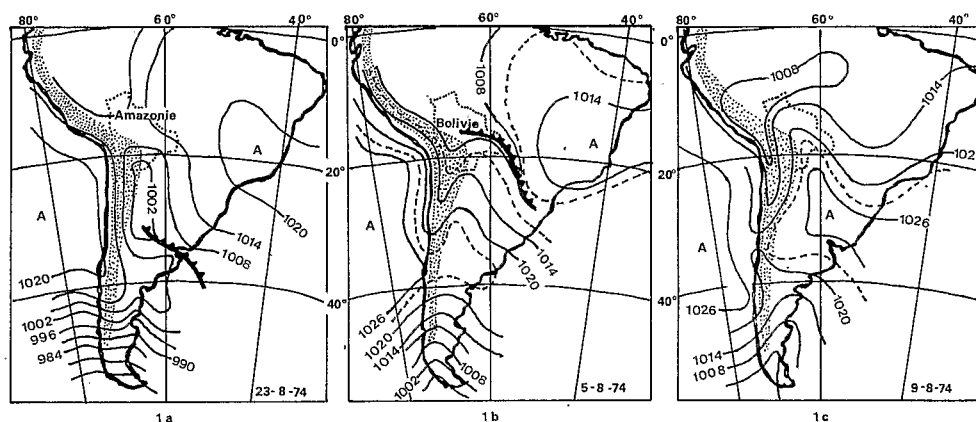


Fig. 1. — *a*, situation météorologique fréquente en Amérique latine au sud de l'Équateur; *b*, situation caractérisée par la présence d'un front froid en Amazonie bolivienne; *c*, situation très exceptionnelle des mois d'hiver, caractérisée par la présence d'un puissant anticyclone à l'est des Andes.

Une autre situation d'hiver, beaucoup plus exceptionnelle, mérite l'attention. Elle est caractérisée par un renforcement de l'anticyclone atlantique, et par un étalement de celui-ci jusqu'au pied des Andes (*fig. 1 c*). La zone méridienne de basses pressions qui sépare les deux cellules anticycloniques subtropicales devient très étroite, et elle reste localisée sur la chaîne montagneuse. Cette zone de basses pressions est le siège d'une forte convergence des masses d'air, ce qui réalise des conditions favorables à des précipitations neigeuses abondantes (44 mm par exemple entre le 9 et le 11 août 1974). Le phénomène s'accompagne par une humidité accrue de l'atmosphère jusqu'à 10 000 m d'altitude et par une forte nébulosité, qui s'oppose à l'élévation diurne des températures.

III. DISCUSSION SUR LES PALÉOCLIMATS QUATÉNAIRES. — Le déplacement saisonnier du flux d'Ouest en latitude est lié aux variations des températures de l'hémisphère austral. Cette relation doit pouvoir être transposée à d'autres échelles de temps. Les *westerlies* pouvaient se retirer plus longuement en été vers le Sud — ce qui favorisait une influence plus grande du flux d'Est sur les Andes — pendant les périodes mondialement plus chaudes qu'actuellement. Par contre, pendant les époques où les températures mondiales étaient plus basses que de nos jours, les *westerlies* devaient stationner sur les Andes pendant une grande partie de l'année, si ce n'est toute l'année, — ce qui s'opposait au déplacement vers le Sud du flux d'Est.

1. *Les périodes de réchauffement.* — Si le raisonnement précédent est exact, nous devons trouver, en Bolivie, les témoignages d'une augmentation des précipitations tropicales, liées au flux d'Est, pendant les interglaciaires. Nous connaissons, en effet, sur les hauts plateaux andins des paléosols rouges, indicateurs de climats un peu plus humides que de nos jours [3]. Mais les données géologiques montrent que les interglaciaires de la partie haute des Andes ont connu aussi de longues époques de sécheresse, caractérisées par le

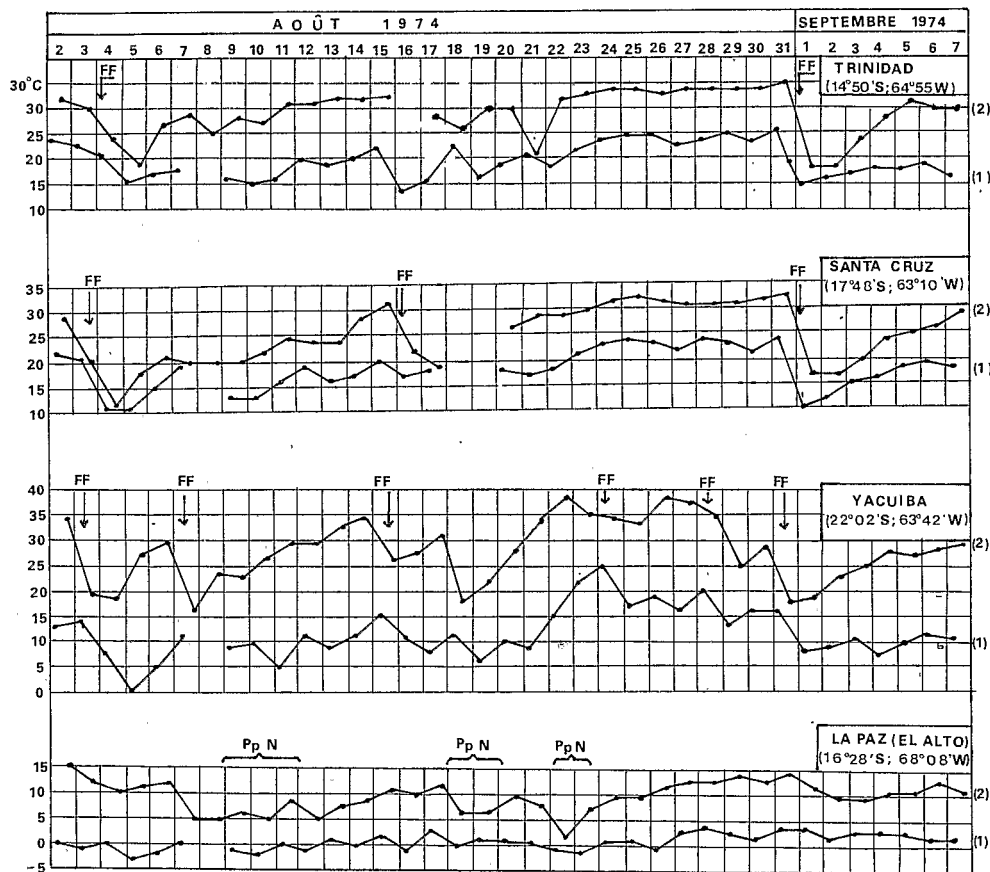


Fig. 2. — Évolution des températures du 2 août au 7 septembre 1974 (hiver austral) en plaine (Trinidad, Santa-Cruz, Yacuiba) et en altitude vers 4 000 m (El Alto). *Courbe 1* : températures à 6 h locales; *courbe 2* : températures à 12 h locales. Les chutes brutales de températures observées en plaine correspondent aux passages des fronts froids (FF). Ces derniers sont plus fréquents au Sud (Yacuiba) qu'au Nord (Trinidad). Les baisses des températures diurnes (*courbe 2*) observées en altitude (El Alto) sont dues à la forte nébulosité qui se manifeste sur les Andes quand se développent des situations météorologiques comparables à celle de la figure 1 c (8-12 août). Pp. N : précipitations neigeuses.

façonnement de grands glacis et par une réduction des nappes d'eaux libres ([2], [3]). Les climats et les circulations atmosphériques ne devaient pas être très différents de ce qu'ils sont actuellement (les précipitations sont de 600 à 100 mm/an, suivant la latitude, sur les hauts plateaux).

2. *Les périodes de refroidissement.* — Nous nous situons, ici, dans le cas où les vents d'Ouest devaient stationner sur les Andes boliviennes, les incursions du flux d'Est étant de courte durée, en été. C'est donc sous un régime de vents d'Ouest dominants en altitude,

que se sont effectuées les variations climatiques des périodes définies par des températures plus basses qu'actuellement. Les situations météorologiques, évoquées plus haut, permettent d'entrevoir les mécanismes de ces variations. Nous pouvons, par exemple, supposer que les fronts froids ont atteint de manière fréquente les plaines amazoniennes de Bolivie, ce qui a dû se traduire par un abaissement spectaculaire des températures minimales, avec tout ce que cela implique sur la végétation tropicale. Nous pouvons aussi envisager, comme le suggère la situation météorologique de la figure 1 c, des circulations atmosphériques favorables aux précipitations neigeuses en altitude et, par conséquent, à une meilleure alimentation des glaciers. Simultanément, l'étalement de hautes pressions sur le continent, à l'est des Andes, a dû entraîner une diminution des précipitations sur une partie au moins de l'Amazonie. Les phases sèches reconnues dans cette région ne sont pas, *a priori*, incompatibles avec les avancées glaciaires des Andes boliviennes.

IV. — CONCLUSIONS. — 1. Le déplacement en latitude des grands flux atmosphériques zonaux contrôle largement les climats actuels de la Bolivie : à une longue saison sèche, centrée sur l'hiver et liée au flux d'Ouest, s'oppose une saison des pluies estivale, liée au flux d'Est. Mais cela ne doit pas faire négliger l'existence, sous le régime des vents d'Ouest d'altitude, de circulations méridiennes, bien visibles sur les cartes synoptiques établies d'après les données au sol. Les intrusions d'air polaire abaissent les températures en Amazonie. Un appel d'air tropical, vers le Sud, sur la chaîne des Andes, favorise des précipitations exceptionnelles, en hiver.

2. Ces données météorologiques montrent que de grands changements climatiques sont concevables, sous le régime des vents d'Ouest d'altitude, en majorant les circulations méridiennes. On peut, par exemple, envisager des climats saisonnièrement moins contrastés sur la partie haute des Andes (précipitations d'hiver) et, simultanément, des climats plus secs en plaine. On peut, aussi, dans un autre contexte météorologique, admettre un abaissement très marqué des températures minimales en Amazonie.

3. Transposée au Quaternaire, cette hypothèse se révèle cohérente dans le cadre de nos connaissances actuelles sur les paléoenvironnements. Elle explique, en particulier, comment les glaciers ont pu avancer en montagne, alors que les précipitations étaient diminuées en Amazonie. Mais, surtout, cette hypothèse renouvelle l'énoncé du problème paléoclimatique en soulignant le caractère probablement déterminant, en zone tropicale, des changements affectant le régime des précipitations et les valeurs minimales ou maximales des températures.

(\*) Remise le 29 janvier 1979.

- [1] J. TRICART, *Rev. Géom. dynamique*, 23, 1974, p. 145-158.
- [2] M. SERVANT et J. Ch. FONTES, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. géol., V, n° 1, 1978, p. 9-23.
- [3] M. SERVANT, *Bull. A.F.E.Q.*, I, n° 50, 1977, p. 323-327.
- [4] J. H. MERCER et M. PALACIOS, *Geology*, U.S., V, n° 10, 1977, p. 600-604.
- [5] O. DOLFUSS, *Thèse*, Fac. Lettres, Univ. Paris, 1965, 404 p.
- [6] J. A. AUZA CATALANO, Observatorio San Calixto, La Paz, 1972, 24 p.
- [7] C. A. DE FIGUEREDO MONTEIRO, Univ. Sao Paulo, 1969, 68 p.

M. S. : I.G.L., *Convenio U.M.S.A.-O.R.S.T.O.M.*, C.P. 8714, La Paz, Bolivia;  
 R. V. : A.A.S.A.N.A., *Meteorologia, Aeropuerto El Alto*, C.P. 4382, La Paz, Bolivia.