

Premières données sur l'hydrogéologie et l'hydrogéochimie du Nord de l'Altiplano bolivien

*Preliminary data on the hydrogeology
and hydrogeochemistry of the northern Bolivian Altiplano*

Jean-Louis GUYOT *, Dante GUMIEL **

Mots-clés : Donnée, Conductivité électrique, Analyse chimique, Nappe alluvion, Quaternaire, Étiage, Eau surface, Eau souterraine Bolivie (Altiplano)

Résumé

A partir d'une campagne d'inventaire des points d'eau et de mesures piézométriques, réalisée en période de basses eaux (de juin à août 1988), les principales formations aquifères exploitées, du Nord de l'Altiplano bolivien ont été identifiées. Il s'agit de séries sédimentaires du Quaternaire, drainées principalement par les rios Kheto et Desaguadero. Des mesures de conductivité électrique des eaux souterraines et superficielles, ainsi que les résultats d'une centaine d'analyses physico-chimiques, ont permis de définir différents domaines hydrogéochimiques. Les eaux provenant du lac Titicaca (rio Desaguadero) et de la zone des diapirs (affluents de rive gauche) sont de type chloruré sodique et présentent des concentrations élevées. En période de hautes eaux, ces cours d'eau vont transporter leur salinité dans les plaines d'inondations de la région d'Oruro où ces sels vont se concentrer par évaporation. Ainsi, les eaux souterraines des zones d'inondation présentent de fortes minéralisations, contrairement aux eaux souterraines de l'amont des systèmes hydrologiques. Les eaux de faciès bicarbonaté et carbonaté sont surtout présentes au pied des reliefs du Paléozoïque et concernent de faibles minéralisations. Les eaux sulfatées sont surtout observées dans les séries cénozoïques où affleurent des dépôts de gypse, ou sont associées à du thermalisme.

Abstract

Starting from an inventory campaign to register water points and piezometric measures, undertaken in low water periods (from June to August, 1988), the main aquiferous formations exploited in the Northern Bolivian Altiplano were identified. It consists of sedimentary series of the Quaternary period, drained mainly from the Kheto and Desaguadero Rivers. Measures for electric conductivity of underground and superficial waters, as well as the results of hundreds of physicochemical analyses, allowed the definition of different hydrogeochemical areas. Waters from the Titikaka Lake (Desaguadero River) and from diapirs area (affluents of the left bank) are of Sodium-Chloride type and show high concentrations. In the high waters season, these rivers transport its salinity to flood plains in the Oruro area, where salt is concentrated by evaporation. Likewise, underground waters in flood areas present strong mineral contents, in opposition to underground waters in high spots of the hydrologic systems. Facies Bicarbonated and Carbonated waters are currently at the bottom of the Paleozoic relieves and are relative to weak mineralizations. Sulphated waters were observed in the Cenozoic series where gypsum deposits outcrop, or are related to thermalism.

Introduction

L'Altiplano est traditionnellement la région la plus peuplée de Bolivie [Montes de Oca, 1983]. Avec une hauteur de précipitations moyenne de 420 mm.an⁻¹ [Mariaca, 1985], cette zone est soumise à un climat semi-aride. Mis à part le rio Desaguadero, exutoire du lac Titicaca, les cours d'eau de l'Altiplano sont temporaires ou présentent des débits d'étiage extrêmement faibles. Aussi, les ressources en eau souterraine y sont-elles de plus en plus sollicitées pour l'usage domestique ou agricole,

ce qui n'est pas sans poser de problèmes en raison de zones à forte salinité.

De juin à août 1988, un inventaire de 350 points d'eau d'une partie de l'Altiplano bolivien a été réalisé dans le cadre d'un accord entre la Communauté économique européenne (CEE) et la corporation de développement du département de La Paz (CORDEPAZ). Cette étude a permis la réalisation d'une campagne de mesures de terrain (piézométrie, température, conductivité électrique) concernant 195 puits, 66 sources et 89 cours d'eau. Des analyses physico-chimiques, portant sur 115 de ces points d'eau, ont été réalisées au laboratoire de l'Institut de santé du travail (INSO) de La Paz [Gumiel, 1988].

* ORSTOM, CP 9214, La Paz, Bolivie

** Hydrogéologue consultant, CP 8130, La Paz, Bolivie

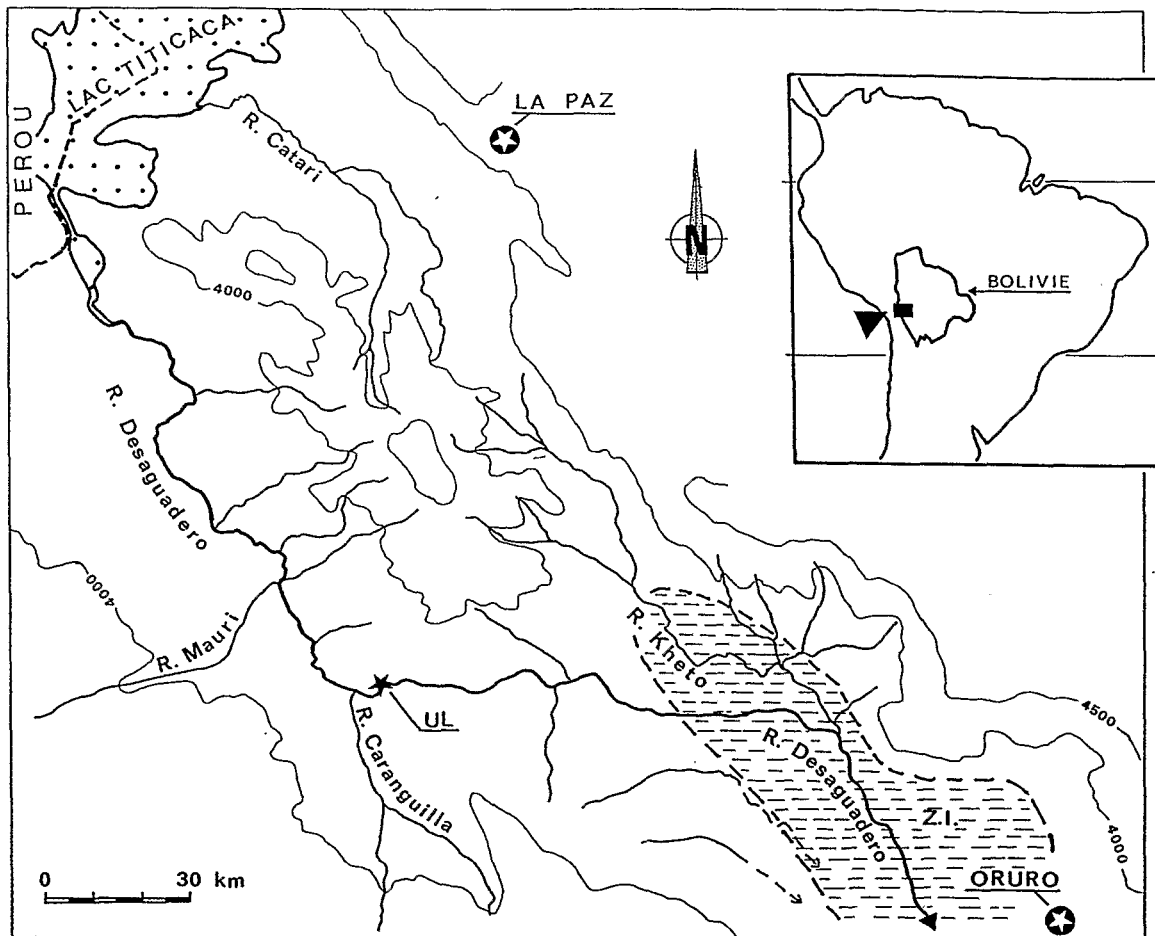


Fig. 1. - Carte de situation du nord de l'Altiplano bolivien. UL : station hydrométrique de Ulloma, rio Desaguadero (Location map of the Bolivian Altiplano)

La zone étudiée

Le bassin endoréique de l'Altiplano couvre une superficie de 191 000 km² et s'étend sur trois pays : la Bolivie (69 %), le Pérou (27 %) et le Chili (4 %). Il s'agit d'une vaste dépression allongée, d'une largeur moyenne de 200 km pour une longueur totale d'environ 1 000 km, encaissée entre les reliefs des cordillères orientales et occidentales des Andes.

La zone étudiée (fig. 1), située entre La Paz (16,5° lat. sud) et Oruro (18° lat. sud), s'étend sur environ 15 000 km² correspondant aux provinces méridionales du département de La Paz : Aroma, Ingavi, Pacajes et Villarroel. Cette région est drainée par le rio Desaguadero, exutoire du lac Titicaca (3 810 m) et tributaire du lac Poopo (3 686 m) situé au sud d'Oruro. La partie sud-est du bassin est soumise à inondations durant la saison des pluies, en raison de la faible pente (0,02 %) de ce système fluvio-lacustre.

Cette région est soumise à un climat semi-aride froid, avec une hauteur de pluie passant du nord au sud, de 500 à 300 mm.an⁻¹ [Roche et al., 1985].

Le régime des précipitations est le même sur l'ensemble du bassin, avec une saison des pluies bien marquée de décembre à mars, pouvant totaliser 80 % des précipitations annuelles [Mariaca, 1985]. Ainsi, les cours d'eau de l'Altiplano, issus des Andes, présentent des crues importantes de janvier à mars, puis une longue période d'étiage prononcé. Seul, le rio Desaguadero présente un débit soutenu et peu variable au cours du cycle hydrologique, avec toutefois un maximum en mars-avril qui correspond aux plus hautes eaux du lac Titicaca [Guyot et al., 1990]. A Ulloma, après son confluent avec le rio Mauri, le rio Desaguadero présente un régime mixte (fig. 2) avec les pointes de crue du rio Mauri de janvier à mars, puis une lente diminution du débit, due aux apports du lac Titicaca.

La géologie de cette région est caractérisée par les séries sédimentaires continentales du Tertiaire et du Quaternaire dans lesquelles est située la grande majorité des puits inventoriés (fig. 3). Au nord-est, les reliefs de la cordillère occidentale, formant la limite de l'Altiplano, sont constitués de séries détritiques du Primaire. Des diapirs de sel affleurent au nord du rio Desaguadero, dans la région de Corocoro.

Hydrogéologie

D'après l'inventaire des puits (fig. 3), il apparaît que les aquifères les plus sollicités sont ceux de la couverture quaternaire. A partir des mesures réalisées de juin à août 1988 (période de basses eaux), une piézométrie sommaire dans le Quaternaire a pu être tracée (fig. 3). Les axes de drainage correspondent aux cours d'eau superficiels (rios Desaguadero, Kheto et Catari).

De nombreux puits sont également creusés dans l'épaisse série sédimentaire tertiaire. La topographie accidentée ainsi que la présence de faciès différents ne permet pas de mettre en évidence un aquifère continu de grande extension, mis à part en bordure du rio Desaguadero.

Hydrogéochimie

La minéralisation des eaux souterraines a pu être estimée à partir des mesures de conductivité électrique sur 195 puits et 66 sources (fig. 4). Les eaux les

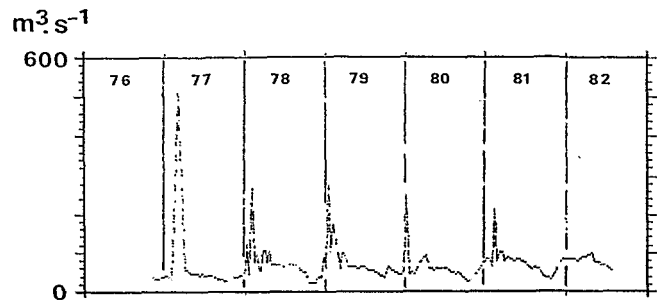


Fig. 2. - Régime hydrologique du rio Desaguadero à Ulloma, de 1976 à 1982, d'après les données du Senamhi de Bolivie (Hydrogeology of the Rio Desaguadero at Ulloma between 1976 and 1982)

moins minéralisées sont observées à l'amont des systèmes hydrologiques, et plus particulièrement en bordure du Paléozoïque. Les eaux les plus minéralisées sont celles situées dans les zones d'inondations, au sud-est du bassin. Les eaux souterraines de la zone des diapirs présentent des concentrations moyennes.

Les mesures de conductivité électrique sur 89 cours d'eau (fig. 5) montrent clairement que les eaux superficielles les plus minéralisées sont celles issues de la zone des diapirs. Les formateurs des rios

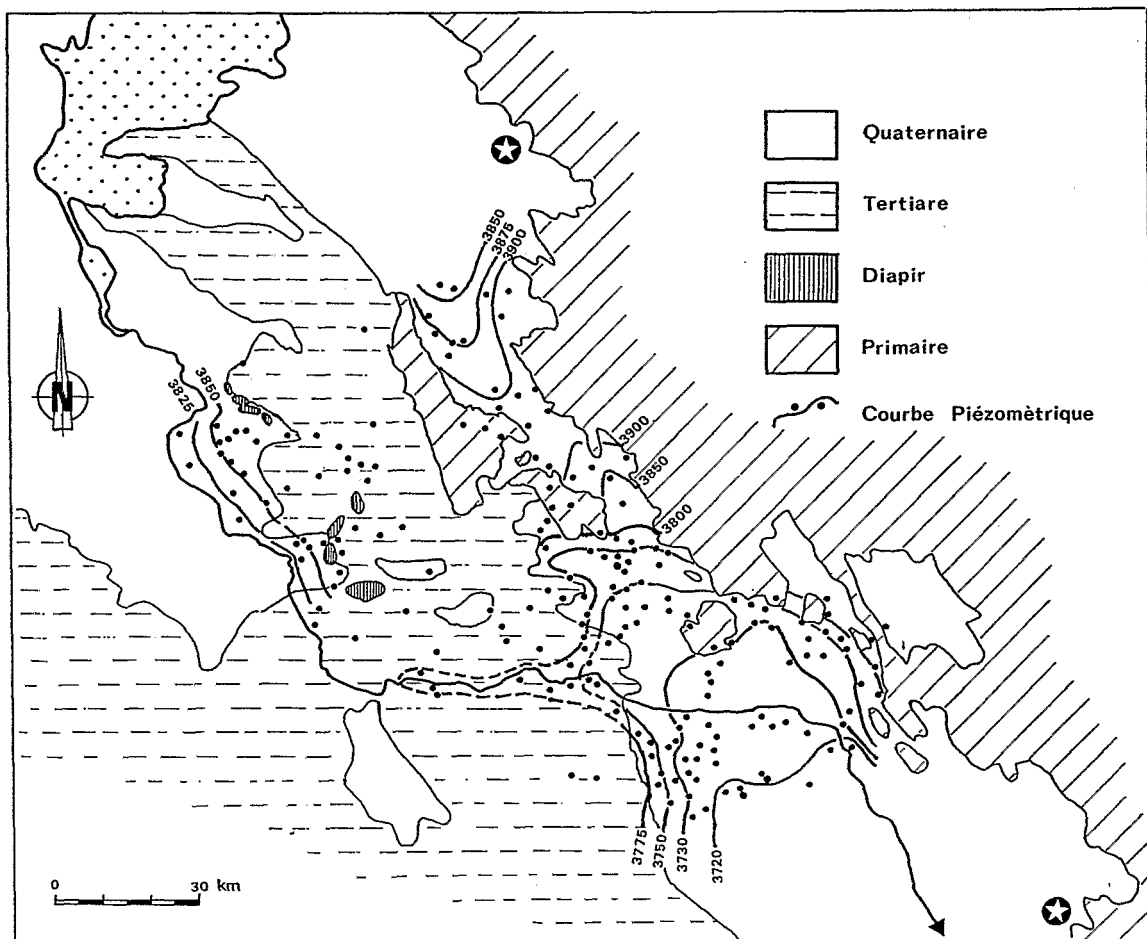


Fig. 3. - Carte géologique simplifiée, d'après la carte géologique de Bolivie à 1/1 000 000, YPFB-GEOBOL. Localisation des puits étudiés (n = 195), piézométrie sommaire, d'après les données de D. Gumiel (juin-août 1988) (Simplified geological map adapted from the 1/1 000 000 scale geological map of Bolivia)

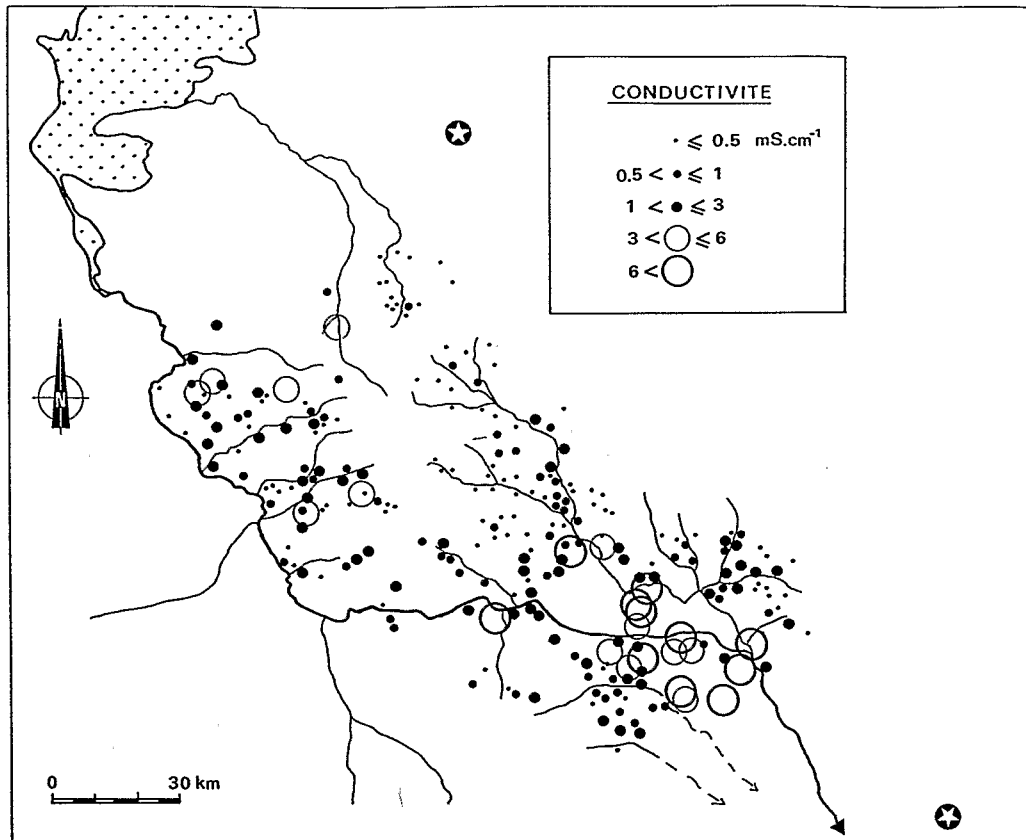


Fig. 4. - Carte de conductivité des eaux souterraines, 195 puits et 66 sources, d'après les données de D. Gumiel (juin-août 1988)
(Ground-water conductivity map, 195 wells and 66 springs)

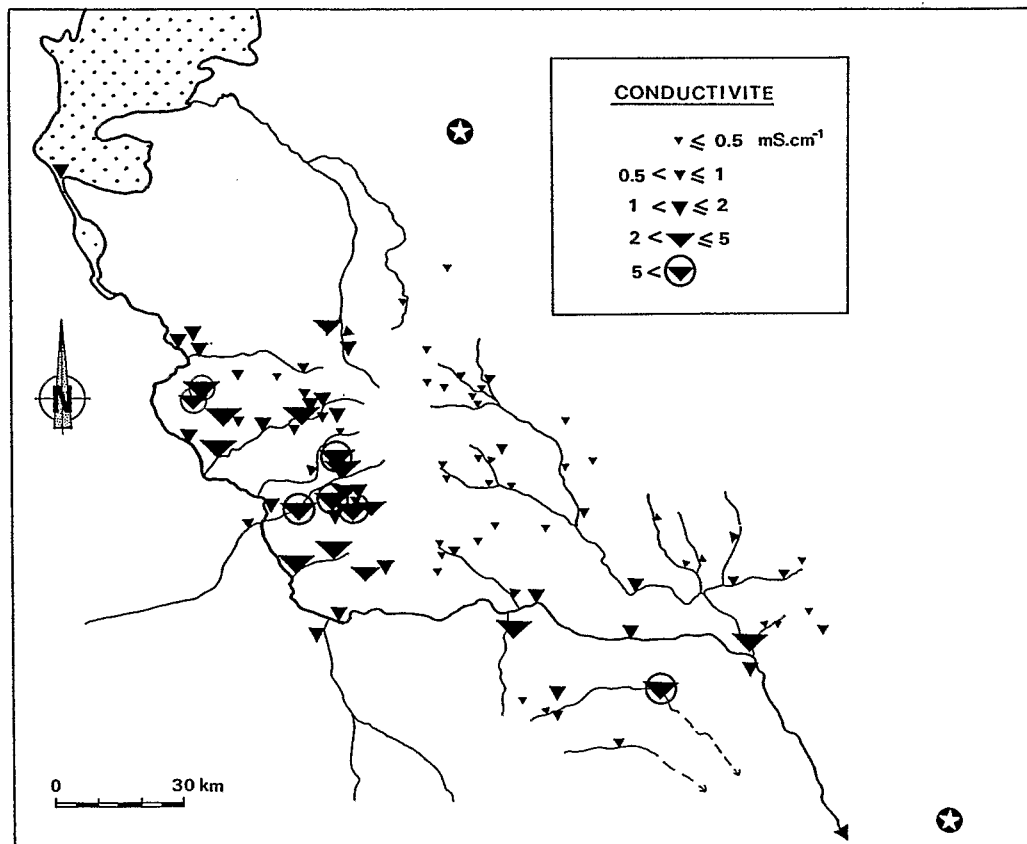


Fig. 5. - Carte de conductivité des eaux superficielles, 89 cours d'eau, d'après les données de D. Gumiel (juin-août 1988)
(Surface-water conductivity map - 89 streams)

Catari et Kheto présentent des minéralisations plutôt faibles. Généralement, l'évolution des minéralisations de l'amont vers l'aval se traduit par une augmentation des teneurs. Cette augmentation est très sensible dans la zone des inondations (rio Kheto). Aucune variation de la conductivité n'est enregistrée le long du rio Desaguadero en raison des faibles apports correspondant à cette période d'étiage. En période de hautes eaux, les apports des affluents du rio Desaguadero entraînent une nette augmentation de la minéralisation de ce cours d'eau, depuis le lac Titicaca, jusqu'aux plaines d'inondations de la région d'Oruro [Guyot et al., 1989].

Les analyses chimiques réalisées sur 115 points d'eau, montrent que les eaux bicarbonatées et carbonatées (16 % des observations) correspondent aux eaux les moins minéralisées (fig. 6). Les eaux chlorurées (35 % des observations) sont, par contre, responsables des plus fortes concentrations. Les eaux sulfatées s'observent en plus grand nombre (49 %) et concernent les eaux à teneur moyenne. La répartition spatiale de ces types d'eau (fig. 7) indique que les eaux bicarbonatées et carbonatées s'observent surtout en bordure du Paléozoïque. Les eaux de type chloruré, généralement sodique, sont observées sur presque tous les cours d'eau superficiels, ainsi que dans les puits de la zone des diapirs et de la plaine d'inondation. Les eaux sulfatées sont présentes sur l'ensemble du bassin, mais plus parti-

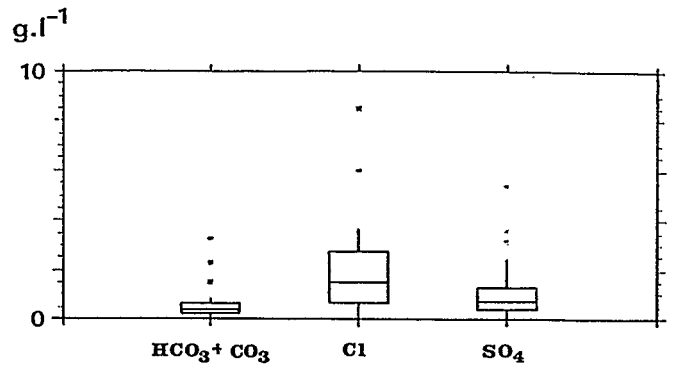


Fig. 6. - Distribution des salinités (médiane, quartiles) de 115 points d'eau, en fonction des anions dominants, d'après les données de D. Gumiel (juin-août 1988)
(Salinity distribution (median, quartiles) of 115 water points - dominant anions)

culièrement dans les séries du Cénozoïque et ses bordures, probablement en relation avec les dépôts de gypse. Des eaux sulfatées magnésiennes issues de sources thermales sont également observées en bordure du Paléozoïque. Le rio Desaguadero présente toujours un faciès chloruré sodique, identique à celui du lac Titicaca.

En période de hautes eaux, le rio Desaguadero et ses tributaires de rive gauche apportent aux plaines d'inondation de la région d'Oruro des eaux de type chloruré-sodique, de moyennement à fortement minéralisées (zone des diapirs). Ces eaux vont se

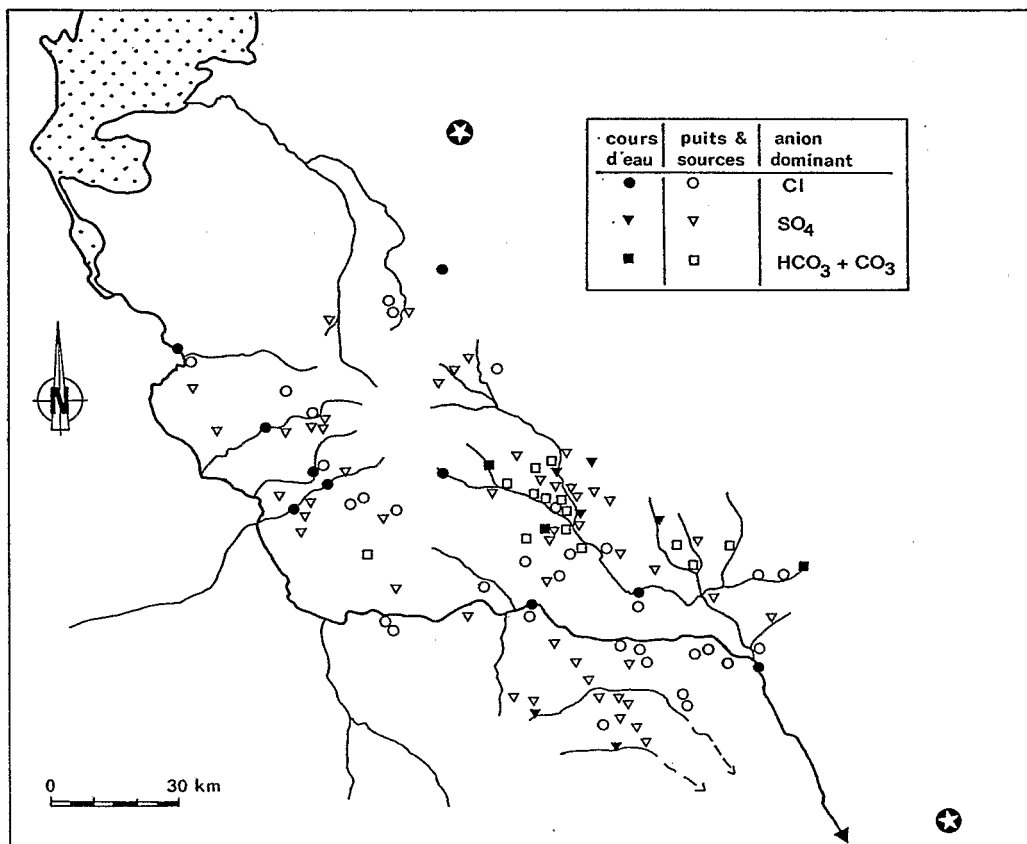


Fig. 7. - Carte des faciès hydrochimiques de 115 points d'eau, en fonction des anions dominants, d'après les données de D. Gumiel (juin-août 1988)
(Hydrochemical facies map of 115 water points - dominant anions)

concentrer en raison de la forte évaporation observée sur l'Altiplano [Carmouze et al., 1978]. Ainsi, contrairement aux eaux de surface, les eaux souterraines les plus minéralisées seront celles des plaines d'inondation. Cependant, il semble possible de rencontrer des eaux de moindre salinité en profondeur.

Conclusion

Une rapide reconnaissance hydrogéologique du nord de l'Altiplano bolivien a permis de mettre en évidence des zones dont les ressources en eau souterraine sont largement exploitées, notamment dans les séries sédimentaires quaternaires.

La présence de séries salifères en tête de bassin, associée à des zones d'inondation à l'aval, entraîne une forte augmentation de la salinité des eaux souterraines dans la partie sud-est du bassin.

Des ressources en eau souterraine de bonne qualité semblent toutefois exister dans les séries du Quaternaire, à l'amont des zones d'inondations, notamment dans la région de Patacamaya (rio Kheto).

Ces résultats, bien que succincts, sont les premières données sur les ressources en eau souterraine de cette partie de l'Altiplano bolivien, et vont

permettre d'orienter les futures recherches hydrogéologiques dans cette région.

Références bibliographiques

- AHLFELD F., BRANISA L. (1960). - Geologia de Bolivia. - La Paz, Don Bosco, 245 p.
- CARMOUZE J.P., ARZE C., QUINTANILLA J. (1978). - Circulación de materia (agua-sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre del Altiplano : la regulación hidrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. - *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., vol. X, n° 1, 1978, p. 49-68
- GUMIEL D. (1988). - Prospección hidrogeológica del area altiplanica del PMPR II. - La Paz, CEE-CORDEPAZ, 92 p.
- GUYOT J.L., ROCHE M.A., NORIEGA L., CALLE H. et al. (1989). - Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano boliviano. - La Paz, PHICAB, 20 p.
- GUYOT J.L., ROCHE M.A., NORIEGA L., CALLE H., QUINTANILLA J. (1990). - Salinities and sediment transport in the Bolivian highlands. - *J. Hydrol.*, 113, p. 147-162
- MARIACA J. (1985). - Balance hidrico superficial de la cuenca del Lago Poopo y los salares Uyuni y Coipasa, Bolivia. - La Paz, Tesis de grado, UMSA-PHICAB, 203 p.
- MARTINEZ C. (1980). - Structure et évolution de la Chaîne hercynienne et de la Chaîne andine dans le nord de la cordillère des Andes de Bolivie. - *Trav. et Doc. ORSTOM*, n° 119, 352 p.
- MONTES de OCA I. (1983). - Geografía y recursos naturales de Bolivia. - La Paz, 628 p.
- PAREJA J., VARGAS C., SUAREZ R., BALLON R. et al. (1978). - Mapa geologico de Bolivia. - Memoria explicativa. - La Paz, YPFB-GEOBOL, 1 carte 1/1 000 000, 27 p.
- ROCHE M.A., ROCHA N. (1985). - Mapa pluviometrico de Bolivia y regiones vecinas. - La Paz, PHICAB, 1 carte 1/4 000 000