

Nappe aquifère de Quito (Equateur): caractéristiques générales, réponse à l'exploitation et perspectives

Pierre POURRUT (1), Jean-François ARANYOSSY (2)

RÉSUMÉ

Les ressources souterraines fournissent près de 25 % des besoins en eau de Quito, ville dont la demande croît à un rythme accéléré.

A partir d'études hydroclimatologiques et hydrogéologiques, on a pu mettre en évidence un important déséquilibre du bilan hydrique des nappes aquifères et démontrer que la baisse spectaculaire des niveaux piézométriques n'est pas provoquée par une augmentation des débits exploités mais qu'elle est consécutive à une diminution progressive de la recharge naturelle dont la cause est une urbanisation excessive.

Des études isotopiques complémentaires ont permis d'établir les mécanismes qui régissent la recharge et de localiser des zones d'infiltration préférentielles où il faudrait limiter la concentration de la population si l'on veut maintenir le niveau actuel de production des eaux souterraines.

MOTS-CLÉS: Quito — Aquifère — Bilan hydrique — Recharge naturelle — Etudes isotopiques — Circulation souterraine — Urbanisation excessive.

RESUMEN

CAPA ACUIFERA DE QUITO (ECUADOR): CARACTERISTICAS GENERALES, RESPUESTA A LA EXPLOTACION Y PERSPECTIVAS

Los recursos subterráneos suministran cerca del 25 % de las necesidades de agua de Quito, ciudad en la cual la demanda crece a un ritmo acelerado.

Fundamentándose en estudios hidroclimáticos e hidrogeológicos, ha sido posible evidenciar un importante desequilibrio en el balance hídrico de las capas acuíferas y demostrar que la espectacular baja de los niveles piezométricos no ha sido provocada por un aumento de los caudales explotados sino que es la consecuencia de una disminución progresiva de la recarga natural cuya causa radica en una urbanización excesiva.

Estudios isotópicos complementarios han permitido establecer los mecanismos que rigen la recarga y localizar las zonas con mayor infiltración en las cuales sería necesario limitar la concentración de la población para conservar el nivel actual de producción de las aguas subterráneas.

PALABRAS CLAVES: Quito — Acuífero — Balance hídrico — Recarga natural — Estudios isotópicos — Circulación subterránea — Urbanización excesiva.

ABSTRACT

AQUIFER OF QUITO (ECUADOR): GENERAL CHARACTERISTICS AND RESPONSE TO EXPLOITATION

Groundwater resources provide about 25 % of Quito water requirements, which are constantly increasing.

Hydrological and hydrogeological studies have shown significant discrepancies in the water balance of the aquifer and proved that the rapid fall in piezometric levels is not due to higher abstraction but is a consequence of a constant decrease of natural recharge due to urbanization.

(1) Hydrologue ORSTOM, Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, Ap. 6596 CCI, Quito, Equateur.

(2) Agence Internationale de l'Energie Atomique IAEA, Boîte Postale 100, A 1400 Vienne, Autriche.

Complementary isotopic studies have established the mechanisms which control the recharge and have delimited major infiltration zones where the population density should be controlled in order to maintain the existing groundwater resource.

KEY-WORDS: Quito — Aquifer — Water balance — Natural recharge — Isotopic studies — Underground circulation — Urbanization.

1. INTRODUCTION

Il est tout à fait remarquable de constater que dès 1535, peu de temps après la fondation de la ville de San Francisco de Quito, le «Cabildo» (structure coloniale similaire à un conseil municipal) établissait déjà les premières normes visant à utiliser rationnellement et à préserver de la pollution les eaux des torrents descendant du volcan Pichincha ou celles des lacs qui, à l'époque, subsistaient dans la cuvette urbaine (BAQUERO, 1986).

Jusqu'à la moitié du XIX^e siècle, on peut considérer que la demande en eau potable était globalement satisfaisante et il faut attendre 1882 pour qu'il soit fait front à un déficit déjà notable depuis quelques années et pour que soit construit un canal collecteur conduisant environ 150 l/s à la première station de traitement de El Placer (BAQUERO, 1986). Postérieurement, de nombreux ouvrages ponctuels de distribution et de captage furent construits mais c'est seulement à partir de 1942 que la nappe aquifère de Quito commença à être progressivement exploitée.

Etant donné l'accroissement constant de l'aire urbanisée de Quito, les disponibilités locales ne purent bientôt plus répondre aux besoins et, depuis 1979, un système captant les eaux drainées par le volcan Cotopaxi fournit 1 600 l/s soit plus de 55 % de la demande, alors que les eaux souterraines (700 l/s) y contribuent pour un peu moins de 25 % et que les 20 % restants proviennent des captages superficiels anciens.

Cependant, dès 1988, ces ressources ne pourront plus satisfaire les besoins croissants d'une population urbaine augmentant à un rythme annuel proche de 5 % et, en attendant la mise en service d'un système appelé Mica-Tambo dont la première étape doit fournir environ 3 700 l/s provenant du versant oriental des Andes, il existe un hiatus dont la durée probable est d'une dizaine d'années.

En 1981, pour essayer de combler le déficit prévisible, l'Entreprise Municipale d'Eau Potable de Quito (EMAP-Quito), l'Institut National de Ressources Hydrauliques (INERHI) et le Programme National de Régionalisation du Ministère de l'Agriculture (PRONAREG) demandaient à l'ORSTOM, allié au Bureau de Géologie Appliquée (BURGEAP), à l'Ecole des Mines de Paris et au Laboratoire d'Hydrologie isotopique de la Faculté d'Orsay, d'étudier les caractéristiques de l'aquifère de Quito et d'en modéliser les résultats en vue d'assurer une gestion correcte des ressources et afin de simuler une possible recharge artificielle de la nappe à partir des eaux de ruissellement du Pichincha. Bien qu'aucun essai réel de recharge artificielle n'ait pu être effectué, d'importants résultats ont été obtenus (ALULEMA *et al.*, 1985). De plus, des travaux postérieurs menés par la Commission Equatorienne à l'Energie Atomique en liaison avec l'Agence Internationale de l'Energie Atomique et l'ORSTOM ont débouché sur des informations permettant d'améliorer sensiblement la connaissance du système aquifère de Quito et d'en prévoir le comportement.

2. PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE D'ÉTUDE

Au pied du volcan Pichincha, entre les côtes 2 750 et 2 900 m, la ville de Quito, près d'un million d'habitants, s'étend le long d'un axe nord-sud sur plus de 20 km pour une largeur ne dépassant pas 4 km.

La zone des études hydroclimatologiques et isotopiques est celle des bassins hydrographiques d'alimentation de la ville, rio Machangara au sud et rio Monjas au nord, la superficie totale atteignant 262,2 km² (fig. 1).

2.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

L'aire d'intérêt est un gradin d'effondrement latéral du secteur occidental du couloir interandin. Ce couloir correspond à un graben formé pendant l'orogénèse andine et entrecoupé par des failles qui délimitent des blocs effondrés ou soulevés (fig. 2), la détermination exacte des accidents tectoniques étant parfois rendue difficile à cause de l'épaisse couverture volcanique plioquaternaire et des grands épandages de sédiments transportés. La limite ouest est constituée par le volcan Pichincha, dont l'appareil actif est le Guagua Pichincha, et par d'autres centres éteints tels que le Rucu Pichincha et la Condorhuachana.

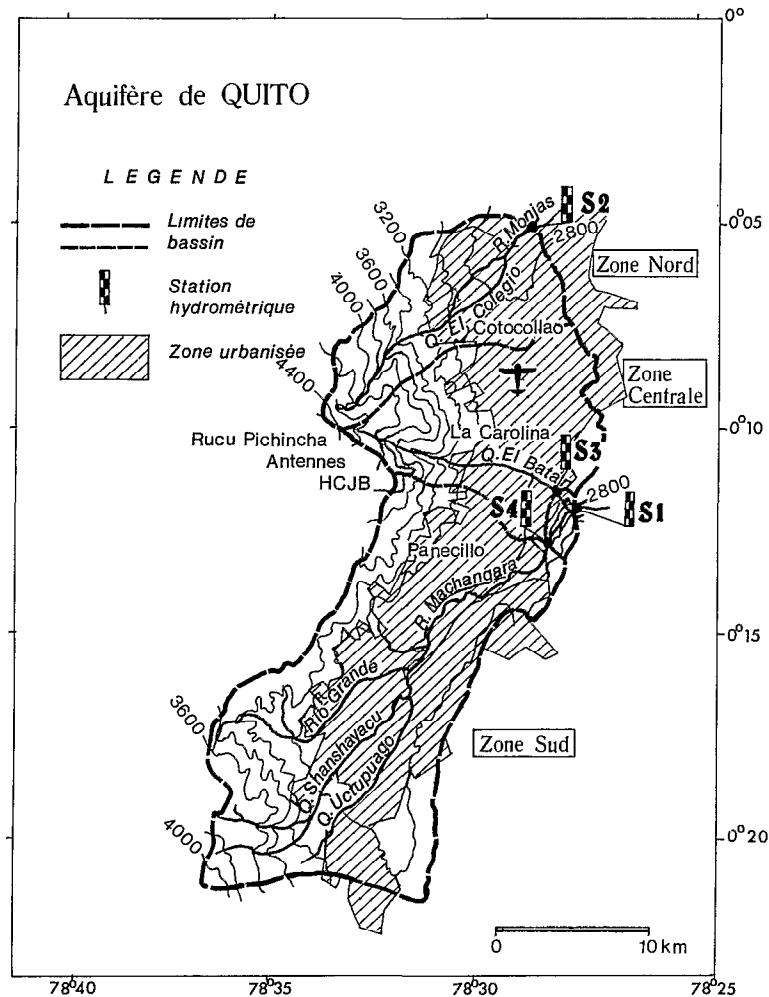


FIG. 1. — Aire d'influence des études

Dans leur ensemble, les formations qui constituent la zone sont d'origine volcanique: constitution au cours du Crétacé d'un substratum de laves basiques (Fm. Macuchi), dû à un volcanisme de fissures évoluant au Pléistocène (Fm. Atacazo et Fm. Pichincha) vers un volcanisme qui sera essentiellement explosif au Quaternaire (Fm. Cangahua). De plus, trois importantes glaciations, de même que la poursuite de la subsidence de la zone andine, sont responsables de diverses périodes d'érosion intense, matérialisées par des dépôts glaciaires, des dépôts colluviaux et des sédiments fluvio-lacustres (Fm. Cangahua lacustre), en grande partie perméables, intercalés entre les strates des dépôts éoliens imperméables.

D'un point de vue hydrogéologique, l'emménagement et la circulation des eaux sont subordonnés à la présence et à la répartition des formations quaternaires alors que les formations anciennes n'ont qu'un rôle secondaire.

La formation Macuchi est une roche dure et imperméable, quoiqu'on puisse supposer qu'elle ait été fortement fracturée et que quelques fissures puissent servir de drain. Les formations volcaniques du Pichincha et de l'Atacazo ont des caractéristiques hydrauliques variables mais elles peuvent parfois constituer un aquifère localisé, surtout dans leur phase récente représentée par des matériaux pyroclastiques. Pour une exploitation hydrique, ces diverses formations ne présentent cependant qu'un intérêt très limité.

Parmi les dépôts quaternaires il faut distinguer la «cangahua» qui est caractérisée par un mélange de poussières et de cendres volcaniques déposées en couches parfois très épaisses sur de grandes étendues. Elle est friable en surface mais les couches inférieures sont généralement très compactes; elle présente souvent des intercalations de lapilli, per-

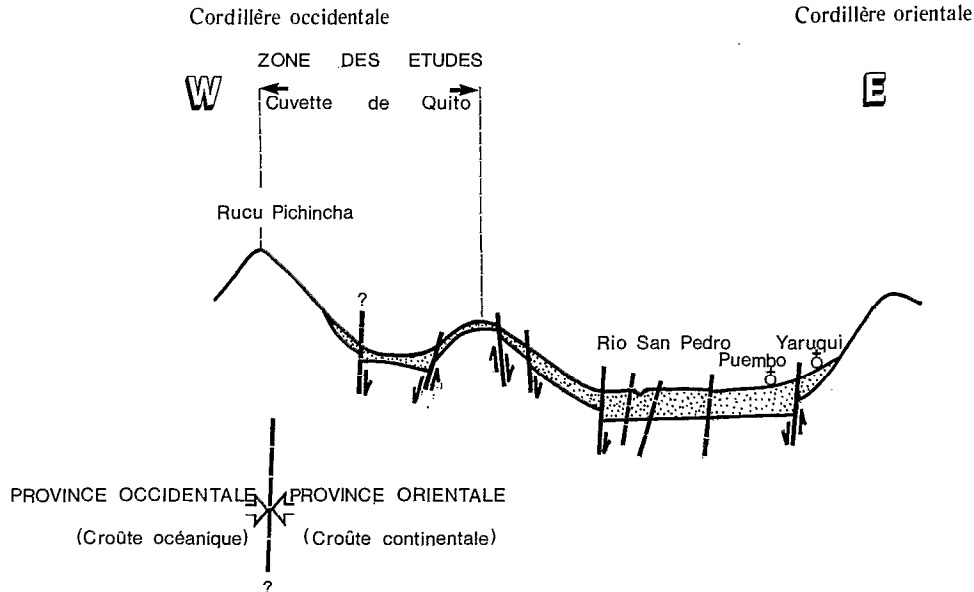


FIG. 2. — Coupe schématique de l'Aquifère de Quito

méables mais généralement de faible puissance. Etant donné ses caractéristiques globales d'imperméabilité, la «cangahua» éolienne constitue le toit des aquifères de la zone mais elle peut avoir des propriétés hydrauliques très différentes lorsqu'elle a été transportée par les rivières et déposée en milieu lacustre, au cours d'une phase récente du remplissage du petit «graben» de la cuvette de Quito; elle repose alors sur de nombreuses couches mal ordonnées de tufs volcaniques peu perméables et de sédiments détritiques, galets roulés, sables et limons, de bonne perméabilité. Par ailleurs, sur la partie basse des versants du Pichincha, il faut signaler d'importants dépôts colluviaux qui sont constitués par un mélange de «cangahua», sables, pierre ponce et galets provenant de glissements de terrain et des cônes de déjection; ce sont des matériaux hétérogènes reposant sur des blocs éboulés de grande taille mais leur perméabilité est généralement bonne et ils jouent un rôle essentiel pour l'alimentation de la nappe aquifère.

En se basant sur la différence de côte topographique entre la cuvette et certaines sources (EQUA 10 à Guapulo, par exemple) qui drainent l'aquifère, et en supposant que cela ait lieu à un niveau voisin du substratum imperméable, il est possible d'estimer que le remplissage de la cuvette est de l'ordre de 200 m. Une campagne géophysique a cependant montré qu'il peut atteindre plus de 500 m dans le secteur de la Carolina (fig. 1).

En résumé, et d'une façon très schématique, on peut définir trois grandes zones:

- à l'ouest, un complexe de laves volcaniques;
- au centre, des formations hétérogènes avec une grande quantité de couches détritiques, essentiellement sableuses;
- à l'est, un ensemble de formations imperméables, constituées principalement par de la «cangahua».

2.2. CLIMAT ET PLUVIOMÉTRIE

Les paramètres climatologiques sont directement liés à l'altitude qui varie entre 2 450 et 4 680 m.

On peut distinguer deux grands types de climats (POURRUT, 1984):

— le «climat équatorial mésothermique semi-humide à humide», qui est le plus fréquent dans la zone andine. La pluviosité annuelle, distribuée en deux saisons des pluies, est comprise entre 500 mm et 2 000 mm, la température moyenne se situe entre 10 et 20 °C et l'humidité relative entre 70 et 85 %;

— le «climat équatorial de haute montagne» concerne les zones au-dessus de 3 200 m. La température moyenne dépend de l'altitude mais fluctue aux alentours de 8 °C, avec des maxima qui dépassent rarement 20 °C et des minima proches de 0 °C. La pluviométrie est comprise entre 1 000 et 2 000 mm, selon l'altitude et l'exposition des versants.

On a choisi quatre stations climatologiques: Izobamba à une altitude de 3 060 m, représentative de l'extrême Sud de la zone urbanisée, Quito Observatoire et Quito Aéroport aux altitudes de 2 820 et 2 810 m, afin de caractériser le Centre et le Nord de la ville, et la station des Antennes radio HCJB à 3 900 m, représentative du versant du Pichincha.

A. *Températures*: les températures moyennes annuelles sont de 13.3 °C à Quito Aéroport, 13.5 °C à Quito Observatoire et 10.9 °C à Izobamba; les valeurs mensuelles varient très peu, les plus élevées étant observées en mai et les plus basses en septembre ou octobre. La moyenne des températures minimales se situe aux alentours de 8 °C dans le centre et nord de la ville et de 5.5 °C dans le sud tandis que la moyenne des températures maximales est de 21 °C à Quito Observatoire, 20.3 °C à Quito Aéroport et 18.1 °C à Izobamba.

B. *Insolation*: on observe en moyenne 2 050 h/an dans le centre et le nord de la ville, avec des maxima en juillet-août et décembre-janvier et des minima entre février et avril, tandis que dans le sud on n'enregistre approximativement que 1 900 h/an.

C. *Humidité relative*: sa valeur annuelle varie de 74 % dans le nord à 80 % dans le sud, avec des maxima de février à mai et d'octobre à novembre et des minima en juillet et août.

D. *Evaporation*: l'évaporation varie avec la période de l'année et l'altitude. Mesurée sur bacs d'évaporation classe A, elle atteint des valeurs de l'ordre de 1 350 mm/an dans le nord et 1 200 mm/an dans le sud, tandis qu'aux antennes HCJB, 1 000 m plus haut, on n'enregistre que 1 150 mm/an. Les valeurs maximales sont observées en juillet/août/septembre, avec une moyenne supérieure à 4 mm/jour.

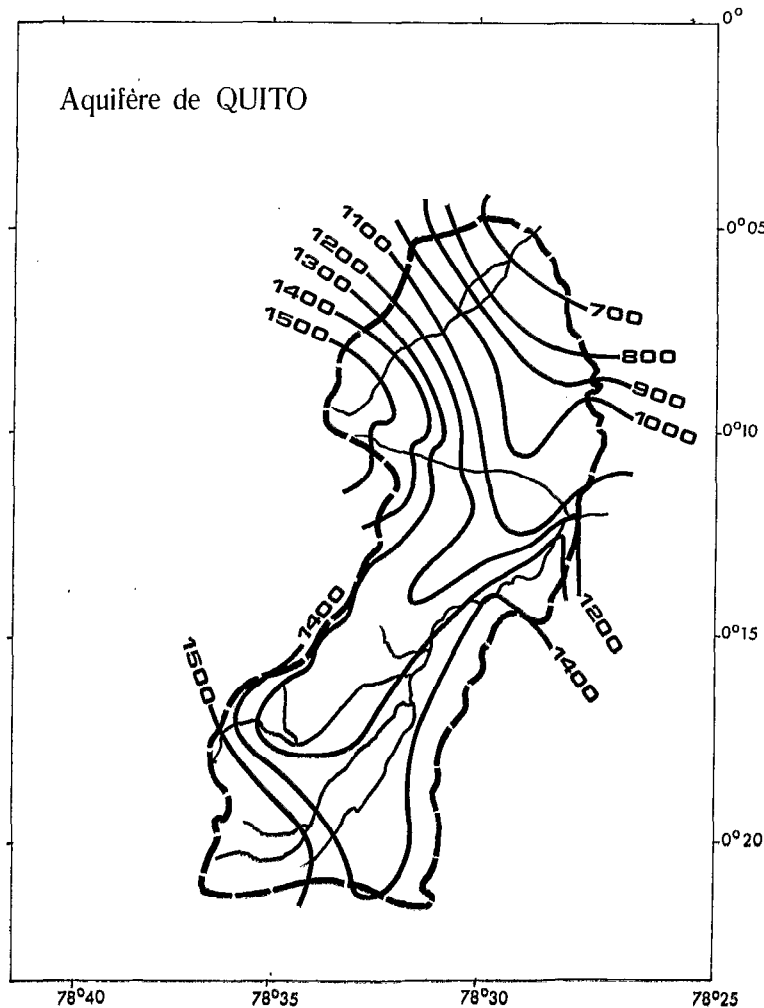


FIG. 3. — Isohyètes interannuelles

E. *Pluviométrie*: la zone de Quito est soumise au régime des pluies observé dans le couloir interandin: les deux saisons humides de février à mai et en octobre-novembre, correspondent à l'influence alternée des masses d'air pacifique et amazonien. Cependant, la position de la ville par rapport au volcan Pichincha joue un rôle important; en effet, ce dernier constitue un écran aux vents du SO, ce qui explique que dans la zone nord on observe une lame d'eau précipitée plus faible. Le gradient pluviométrique nord-sud est exceptionnellement fort puisque les précipitations annuelles passent de 600 mm à 1 400 mm sur une distance approximative de 16 km; sa décroissance moyenne atteint 100 mm pour 2 km (fig. 3).

Par ailleurs, sur les versants du Pichincha, il existe un autre gradient pluviométrique dépendant de l'altitude. Evidemment, les relations entre la pluviométrie annuelle P et l'altitude Z varient selon le lieu et l'exposition des versants mais, à une latitude correspondant au centre de la ville, suivant un axe passant par la Carolina et les Antennes HCJB, on a établi l'équation ci-après (ALULEMA *et al.*, 1985):

$$P(\text{mm}) = - 253 + 0.41 Z(\text{m})$$

2.3. HYDROLOGIE = BILAN HYDRIQUE

La ville de Quito et ses abords immédiats sont drainés par deux systèmes hydrographiques. Limité au sud par une crête topographique peu marquée joignant l'aéroport à Cotocollao, le torrent de El Colegio, affluent du rio Monjas, draine le secteur nord sur environ 50 km². Le centre et le sud de la ville appartiennent au grand système du rio Machangara dont le bassin versant, limité au lieu-dit Dos Puentes près de Guapulo, couvre plus de 210 km² (fig. 1).

Entre 1982 et 1985, sept stations hydrométriques ont été installées, trois d'entre elles situées à la sortie des grands secteurs urbains (fig. 1): station S2 sur le torrent El Colegio, station S3 sur le torrent El Batán et station S4 sur le rio Machangara à Guapulo. De plus, le réseau pluvioclimatologique, qui comprenait 7 postes à l'origine, a été étendu à 47 stations au cours de cette même période.

Les résultats hydroclimatologiques obtenus furent intégrés pour caler et faire fonctionner un modèle mathématique basé sur le modèle MODCOU de GIRARD-LEDOUX (GIRARD *et al.*, 1985). La mise en œuvre du modèle a donné les résultats suivants:

Bilan des écoulements de surface entre 1963 et 1982:		
écoulement aux exutoires.....	2 745	Mm ³
ruissellement.....	1 012	Mm ³
rejet eaux usées.....	610	Mm ³
drainage rivière.....	1 123	Mm ³
Bilan pour la période 1977-1981, déficitaire en précipitations:		
écoulement aux exutoires.....	638,7	Mm ³
ruissellement.....	135,9	Mm ³
rejet eaux usées.....	282,2	Mm ³
drainage rivière.....	220,6	Mm ³

On remarquera que sur l'ensemble de la période étudiée le terme «rejet eaux usées», qui correspond à la restitution à la rivière des eaux distribuées sur l'ensemble de l'aire urbaine (stations de traitement des eaux superficielles et des forages) est voisin de la moitié des termes «ruissellement» et «drainage rivière»; par contre, il devient prépondérant lorsque les précipitations sont déficitaires. On remarquera également que la majeure partie des eaux rejetées transite par le réseau superficiel et que le retour direct à la nappe peut être considéré comme négligeable.

3. CARACTÉRISTIQUES ET COMPORTEMENT DE L'AQUIFÈRE

3.1. DÉTERMINATION DU SYSTÈME AQUIFÈRE

La première étape a consisté à délimiter la géométrie des aquifères et leur extension géographique, à évaluer leur puissance et à estimer les valeurs des principaux paramètres hydrauliques.

A. *Géométrie, extension spatiale et puissance*: Ainsi qu'il a été exposé au chapitre antérieur, les formations qui composent le remplissage de la cuvette sont très hétérogènes et ont été déposées de manière quasi-aléatoire étant donné le grand nombre d'épisodes érosifs intercalés entre des phases d'effusion volcanique. Cependant, grâce à l'analyse des descriptions lithologiques de 79 puits, on a pu établir 13 coupes longitudinales et transversales à la vallée qui permettent d'avoir une bonne appréciation de la forme, de l'importance, du degré de participation et des possibilités d'intercommunication des différents aquifères (ALULEMA, 1985). Trois unités hydrogéologiques ont été individualisées:

— un aquifère nord drainé par la rivière de El Colegio et communiquant avec l'aquifère central suivant une ligne de partage des eaux située au niveau de l'aéroport;

— un aquifère central drainé par la rivière de El Batán vers laquelle converge le réseau des égouts et des collecteurs pluviaux souterrains. Cette unité est totalement indépendante de l'aquifère sud dont elle est séparée par les reliefs transversaux du Panecillo et de la Loma Puengasi; par contre, elle est en liaison avec l'aquifère nord avec lequel elle partage de nombreuses similitudes;

— un aquifère sud correspondant à la partie supérieure du bassin hydrographique du rio Machangara. Celui-ci sort de la cuvette par une vallée étroite et profonde au long de laquelle il n'existe aucune zone de suintement provenant de l'aquifère central, ce qui confirme l'imperméabilité de l'axe Panecillo-Loma Puengasi; il faut noter que les sources observées dans la vallée (Equa 10 à Guapulo, par exemple) naissent de coulées d'andésite très fracturée qui jouent le rôle de drains privilégiés.

Les limites superficielles des aquifères exploitables sont directement liées aux possibilités géométriques et hydrodynamiques de l'emmagasinement, c'est-à-dire aux dimensions de la cuvette et à la situation des zones constituées par les formations perméables. C'est ainsi que dans les aquifères nord et central le niveau piézométrique statique d'accumulation des eaux était situé autour de la cote topographique 2 780 m lors de la première mise en exploitation; à la périphérie, la bordure générale du réservoir atteignait environ 2 830 m, avec certaines variations locales dues à la diversité des matériaux composant la zone de piémont. Par contre, étant donné le nombre restreint des forages existants, en grande majorité utilisés à des fins industrielles en raison de la piètre qualité de l'eau pour la consommation humaine et en particulier de sa forte teneur en fer, le système aquifère sud est moins bien connu; mais la cote piézométrique d'accumulation des eaux est située au-dessus de 2 835 m.

Par ailleurs, une prospection géoélectrique (INERHI, 1983), menée dans les zones centrale et nord, a conduit à distinguer 5 complexes différents au-dessus du socle résistant qui correspond à la formation Macuchi. Le complexe A superficiel est formé par les dépôts fins d'origine éolienne qui constituent un «toit» pratiquement imperméable, sa puissance variant entre 0 et 65 m (signalons que, dans la zone sud, cette formation a une extension et une épaisseur très limitées). Les complexes B, C et D sous-jacents, qui sont ceux actuellement exploités, présentent un grand intérêt hydrogéologique et correspondent respectivement aux dépôts lacustres, à la cangahua redéposée et aux colluvions, l'épaisseur de l'ensemble variant généralement entre 50 et 150 m. Quant au complexe E, il correspond aux formations volcaniques pléistocène-quatérnaires du Pichincha et de l'Atacazo, hétérogènes et profondes, et leur intérêt est par conséquent limité.

B. *Caractéristiques hydrauliques*: Un certain nombre d'essais de pompage a permis de calculer les principaux paramètres hydrauliques des différents aquifères (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, capacité spécifique).

C'est ainsi qu'à partir de l'axe de la plaine, les valeurs de la transmissivité (entre 5 et 790 m²/s. 10⁻⁵) augmentent vers l'ouest et diminuent vers l'est. Évidemment, dans le secteur occidental, le matériel pyroclastique plus épais et les colluvions du piémont du volcan Pichincha sont des éléments favorables à l'infiltration en raison de leur plus grande perméabilité. Quant aux valeurs du coefficient d'emmagasinement S, comprises entre 6.10⁻⁷ et 10.3.10⁻⁴, elles se situent pour la plupart dans des limites indiquant la présence d'un artésianisme ou semi-artésianisme généralisé pour l'ensemble de l'aquifère nord et pour une partie de l'aquifère central.

3.2. BILAN HYDRIQUE DES NAPPES

Grâce au modèle mathématique calé sur la cuvette (GIRARD et al., 1985) on a pu estimer, pour diverses périodes, les valeurs atteintes par les termes du bilan hydrique souterrain et mettre en évidence un important déséquilibre entre l'alimentation naturelle et les prélèvements, dont l'évaluation est donnée ci-après:

— entre 1977 et 1984, dans les aquifères central et nord, dont la superficie de 7 700 ha est urbanisée à 50%, le déficit d'infiltration dû à l'effet de cette urbanisation est estimé à 20%, tandis que l'infiltration globale de l'ensemble des nappes est réduite d'environ 6%;

— pendant la période de faibles précipitations, entre 1977 et 1981, les valeurs des termes du bilan souterrain des aquifères central et nord s'établissent ainsi:

infiltration	:	43,5 Mm ³
drainage rivière	:	28,6 Mm ³
drainage nappe	:	12,4 Mm ³
prélèvements	:	120,3 Mm ³

le destockage atteint donc 117,8 Mm³;

— entre 1963 et 1982, on calcule que le destockage à la fin de 1982 correspond à 3,5 fois l'infiltration annuelle normale pour la totalité de la nappe. En ne considérant que les aquifères nord et central, le destockage atteint 9,8 fois l'infiltration annuelle sur ces aquifères.

Ce déséquilibre est corroboré par l'analyse historique de l'évolution des niveaux piézométriques qui montrent une baisse généralisée pouvant atteindre près de 30 m dans certains secteurs de l'aquifère central. La situation est différente dans l'aquifère sud où le niveau piézométrique s'établit généralement entre - 10 et - 15 m et où il ne semble pas que la nappe soit déprimée.

3.3. DIAGNOSTIC DE LA SITUATION

Bien que les débits prélevés dans la nappe ces dernières années aient été sensiblement inférieurs aux exhaures antérieures, il est manifeste qu'on se trouve face à une situation de surexploitation croissante. Ce paradoxe apparent est la conséquence de la nette diminution des volumes infiltrés, donc des ressources renouvelables disponibles. Afin de limiter au mieux ce phénomène qui risque d'avoir de graves conséquences pour la future alimentation en eau de la ville, il s'avérerait donc très souhaitable de comprendre les mécanismes régissant la recharge naturelle des nappes et de localiser les zones d'infiltration préférentielle pour essayer d'y enrayer les processus d'imperméabilisation dus à l'accroissement des surfaces urbanisées.

C'est l'objet de l'étude isotopique présentée au chapitre suivant.

4. ÉTUDE ISOTOPIQUE — LOCALISATION ET DÉFINITION DES PROCESSUS DE RECHARGE NATURELLE

Afin d'effectuer des analyses isotopiques, un premier échantillonnage fut réalisé en 1982 par l'ORSTOM et le Laboratoire d'Hydrologie Isotopique de l'Université d'ORSAY. En s'appuyant sur les résultats obtenus, treize sources et quinze forages furent sélectionnés lors d'une campagne de prélèvement complémentaire effectuée de mars à mai 1984. La sélection fut réalisée selon les critères suivants: répartition géographique, aquifères sollicités, conditions d'exploitation.

Les résultats de cette campagne furent présentés dans un rapport préliminaire (ARANYOSSY, 1985) duquel sont extraites la plupart des informations exposées ci-après.

Le tableau I regroupe la liste des points d'eau échantillonnés, leurs principales caractéristiques et la valeur des paramètres physico-chimiques mesurés in situ.

Le tableau II, donne les résultats des analyses isotopiques effectuées au laboratoire de l'IAEA à Vienne. La précision analytique est de 0,1‰ pour les mesures de l'oxygène-18 (¹⁸O) et de 1‰ pour celles du deutérium (²H). Les résultats en isotopes radioactifs (tritium et carbone-14) sont donnés avec l'erreur de mesure.

4.1. CARACTÉRISTIQUES ISOTOPIQUES DES PRÉCIPITATIONS

On dispose à Izobamba d'une chronique de mesures des teneurs en isotopes stables (¹⁸O et ²H) et en tritium des précipitations IAEA, 1973 à 1983). Ces mesures sont effectuées dans le cadre du programme mondial d'observation des teneurs isotopiques des précipitations entrepris par l'IAEA et l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et portent sur des échantillons mensuels moyens d'eau de pluie. On dispose parallèlement des renseignements concernant la température moyenne mensuelle et les précipitations mensuelles.

On a reporté fig. 4 les valeurs mensuelles moyennes des températures, de la pluviométrie et des teneurs en oxygène-18, calculées sur toute la durée de la période d'observation (1968 à 1978). On remarque que la variation des moyennes mensuelles de température au cours de l'année est très faible, inférieure à 1 °C. Cependant, elle semble correspondre, avec un décalage d'un mois environ, aux variations de pluviométrie. On enregistre en effet un maximum au mois de mars (avril pour la température) et un minimum pluviométrique au mois de juillet (août pour la température).

TABLEAU I
Caractères topographiques des bassins versants

No AIEA	No Inventaire EMAP - ORSTOM	Type	CARACTERISTIQUES DES POINTS D'EAU					ECHANTILLONNAGE				
			Aquifère	Altitude au sol	Prof. totale	Niveaux de crépinage	Débit ou niv. piez	Date	Temp. (° C)	p ^H	Cond. (µ S/cm)	Alcalinité (meq/l)
EQUA 1	1	Puits	Centre	2766	110	38-106	34 m	26/3/84	18	7	330	116
2	112	Source	C	3400				26/3/84	10	8.2	91	
3	112	S	C	3400				26/3/84	10	7.5	186	
4	13	P	Nord	2815	105	74-105		26/3/84	16.7	7.4	374	
5	12A	P	C	2783	98	69-95	32 m	26/3/84	16.5	7.4	460	
6	10	P	C	2781	93	46-91		27/3/84	17.5	7		329
7	133	P	N	2854	130			27/3/84	17.3	7.4	277	
8	182	P	N	2698				27/3/84	17	7.2	273	
9	11	P	C	2783				27/3/84	18.5	6.8	554	
10	116	S	C	2652			30 l/s	27/3/84	14.7	7	253	
33	166	P	Sud	3018	155			13/4/84	15	6.1	625	
34	175	P	S	3000	84	31-84		16/4/84	15	6.4	549	
35	170	P	S	2898	86	42-66		17/4/84	17	6.4	275	
36	178	P	S	2961	82	27-79		18/4/84		6.5		
37	91	S	S	2978				18/4/84	13	6.2	160	
38	92	S	S	2980				18/4/84	13.3	5.9	145	
39	103	S	S	2950?				19/4/84	14	6.6	190	
40	173	S	S	2860			0.5 l/s	19/4/84	19	7.6	482	
41	73	P	S	2858	200			19/4/84	18.5	7.1	770	
42	98	S	S	3300?				19/4/84	16.5	8	125	
43	163	P	S	2818	156			19/4/84	16.5	6.8	405	
44	108	S	S	2931				04/5/84	14	5.3	170	
45	70-71	P	C	2773	110			04/5/85	17	6		
46	30	P	C	2790				04/5/84	17	8.4	350	
47	123	S	N	2565				04/5/84	12	7	354	
48	113	S	C	3500?				07/5/84	12	6	940	
49	119	P	N	3350?				07/5/84	12	6	120	
50	120	S	N	3150?				07/5/84	12	5.8	168	
13	48	S	Los Chilllos	2620				21/3/84	16.2	6.3	252	2
14	51	S	Los Chilllos	2920			50 l/s	21/3/84	12.5	6.8	151	1
17	38	S	Los Chilllos	2450			1 l/s	21/3/84	19	7	410	4
31	69	S	Los Chilllos	2800			1 l/s	21/3/84	14	8.6	160	2

TABLEAU II
Estimations hydrologiques

ECHANTILLON No	0-18	2 _H	3 _H	C-14	C-13	"Ages" C-14 ans	Erreur (2 σ)	Estimation de la zone de recharge (m)
	‰ /SMOW	‰ /SMOW	U.T (± 0,1)	pmc	‰			
EQUA 1	-11.5	-85.4	0.2	92 ± 1.2	-14.14	récent	2200	3000 - 3300
2	-12.04	-88.2	7.4					
3	-12.63	-91.4						
4	-10.99	-83.2	0	68.2 ± .9	-13.55	1400	2200	2800 - 3200
5	-10.76	-81.7	2.8					2800 - 3100
6	-11.14	-85.1	1.1	89.2 ± 1.8	-14.06	récent	2200	2900 - 3300
7	-11.26	-83.7	0					2900 - 3200
8	-11.69	-87.3	0.5	92.5 ± 2.4	-14.3	récent	2200	3000 - 3400
9	-11.13	-84.8	2.6					2900 - 3300
10	-11.51	-85	0	88.7 ± 1.1	-15.8	500	2100	3000 - 3300
33	-12.21	-86.7	0.6	5.2 ± 0.3	- 6.93	17100	3300	3100 - 3500
34	-11.9	-84.4	0	10.9 ± 0.4	- 8.16	12300	3000	3050 - 3350
35	-11.51	-82.5	1.3	55.3 ± 0.1	-11.87	2000	2000	3000 - 3200
36	-11.9	-85.5	0					3050 - 3350
37	-11.46	-82.1	2.3					
38	-11.35	-81.5	3.2					
39	-10.78	-79.6	4.3					2800 - 3100
40	-11.36	-85.9	0.4					2950 - 3300
41	-11.46	-84.6	0.5					3000 - 3250
42	-11.36	-85	6.3					2900 - 3300
43	-11.5	-82.3	0.2					2950 - 3200
44	-10.66	-77.8	9					
45	-11.15	-82.1	0.7					2900 - 3150
46	-11.45	-83.8	0.8	81.4 ± 0.1	-13.93	200	2000	2950 - 3200
47	-11.91	-85.4	1					3100 - 3400
48	-12.16	-86.7	8					3100 - 3500
49	-12.28	-88.1	7.7					3150 - 3550
50	-11.75	-84.5	2.5					3000 - 3300
13	- 9.75	-69.5	5.8					
14	-10.43	-75.6	4.5					
17	- 9.75	-68.8	0.7					
31	-10.77	-74.8	4.1					

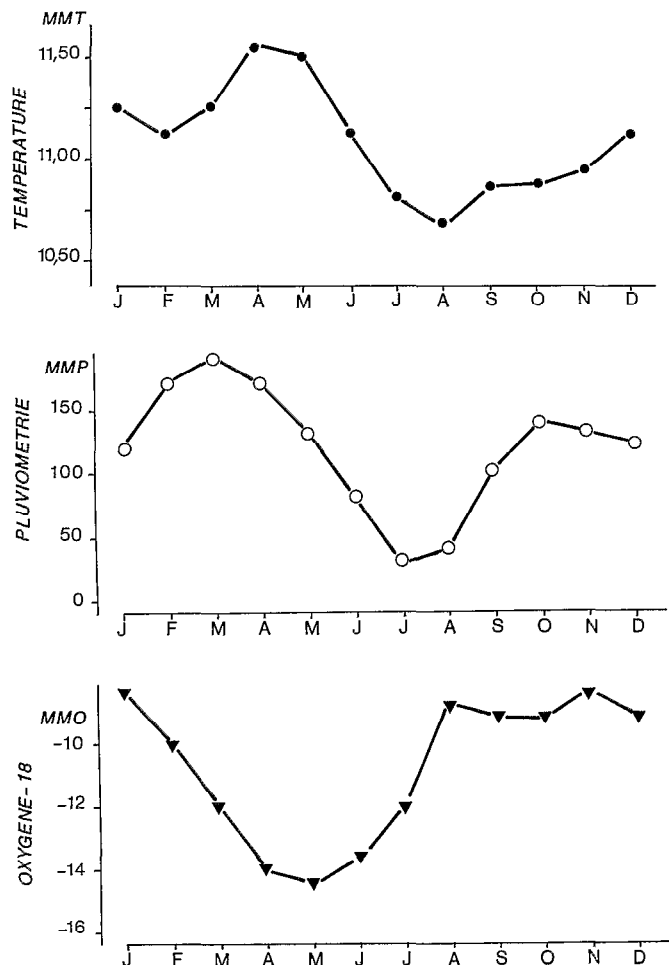


FIG. 4. — Variations saisonnières des moyennes mensuelles des températures, de la pluviométrie et du contenu en oxygène-18 des précipitations à Izobamba

La composition isotopique des précipitations (teneur en oxygène-18 et deutérium montrant la même évolution) subit une variation saisonnière qui ne paraît être en rapport direct ni avec la température, ni avec les hauteurs de précipitations mensuelles. On observe en effet un décalage de 3 mois entre le minimum de température et celui des teneurs en oxygène-18. La cause de ces variations pourrait peut-être être reliée à l'origine géographique de la vapeur atmosphérique générant les pluies (humidité provenant en majeure partie du bassin amazonien ou de la côte pacifique, selon la saison des pluies).

La moyenne, mesurée sur 108 échantillons mensuels, est de $-10,28$ pour l'oxygène-18 ($\sigma = 3,4$), et de $-76,8$ pour le deutérium ($\sigma = 28,2$ pour 97 échantillons). La corrélation deutérium/oxygène-18 s'exprime par une droite dont l'équation :

$$\delta \text{ }^2\text{H} = 8,00 \delta \text{ }^{18}\text{O} + 11,64$$

est extrêmement proche de la droite de CRAIG, dite «droite météorologique mondiale» ($\delta \text{ }^2\text{H} = 8 \delta \text{ }^{18}\text{O} + 10$). En aucune période de l'année les points ne s'écartent de cette droite. L'atmosphère est donc toujours suffisamment saturée en humidité pour permettre l'équilibre entre l'eau et la vapeur atmosphérique. Aucune évaporation n'affecte les gouttes de pluie durant leur traversée de l'atmosphère.

Les teneurs en tritium enregistrées décroissent progressivement depuis 1968 (36,4 UT en octobre 68) (IAEA, 1973), pour atteindre une moyenne annuelle de l'ordre de 10 UT. On ne connaît pas la valeur du pic des années 1963-64.

4.2. TENEUR EN ISOTOPES STABLES DES AQUIFÈRES

Les teneurs en isotopes stables varient dans un intervalle d'environ 2δ pour l'oxygène-18 (de $-12,63$ à $-10,66$) et de 14δ pour le deutérium (de $-91,4$ à $-77,8$), intervalle plus faible que celui qui pourrait être supposé à partir du simple effet d'altitude sur le flanc du Volcan Pichincha.

A. Mode de recharge

D'emblée, une très nette différence dans la composition isotopique apparaît entre l'ensemble des aquifères nord et centre, d'une part, et l'aquifère sud, d'autre part.

Dans l'aquifère nord, la composition isotopique des puits est située entre $-11,5$ et $-10,70\text{‰}$ pour l'oxygène-18. Dans l'aquifère sud, elle se situe entre $-12,25$ et $-11,5\text{‰}$ /SMOW.

En ce qui concerne les échantillons d'eau de source on observe une distribution inverse: dans l'aquifère nord les sources présentent des eaux plus appauvries que celles des puits ($-11,5 > \delta^{18}\text{O} > -12,75$) alors que celles du sud sont systématiquement enrichies par rapport aux aquifères captés par les puits.

Sur le diagramme des teneurs en deutérium et oxygène-18 (fig. 5a), les sources de l'aquifère nord se situent sur la droite météorique. L'infiltration sur le massif du Pichincha semble donc se produire rapidement, sans évaporation. Cependant, cette infiltration ne semble concerner que la frange superficielle du massif (partie fracturée et altérée). Les

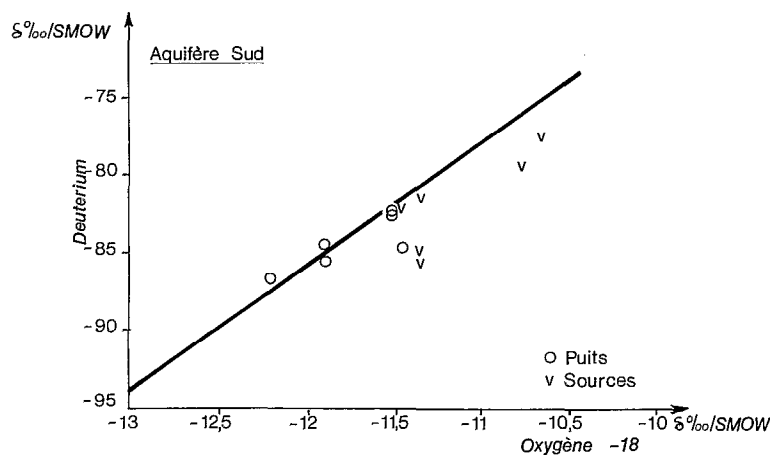
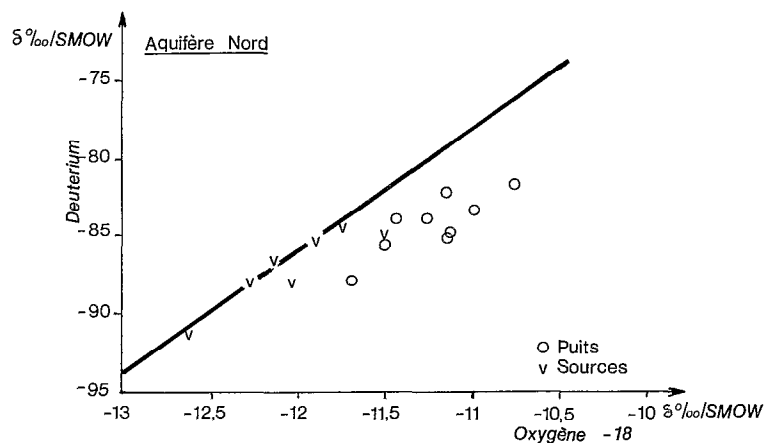


FIG. 5. — Relation Oxygène-18/Deutérium

points correspondant aux puits de l'aquifère de Quito se situent légèrement au-dessous de la droite météorique. Toutes les valeurs sont enrichies en isotopes lourds par rapport à l'eau des sources. Ces phénomènes peuvent être interprétés comme suit :

- l'eau de l'aquifère nord et centre de Quito a pour origine principale l'infiltration directe des précipitations tombant sur la vallée et la lisière du massif;
- cette eau subit, au cours de l'infiltration dans la zone non saturée, une reprise évaporante qui affecte légèrement le contenu isotopique;
- une partie du débit des sources s'écoulant à travers la vallée participe également à la recharge des nappes par réinfiltration;
- aucune circulation profonde n'est mise en évidence.

Dans l'aquifère sud, au contraire (fig. 5b), la composition isotopique des puits suggère une participation d'eau infiltrée à des altitudes bien supérieures à celles de la vallée. Les sources représentent l'exutoire d'une circulation plus restreinte.

Les systèmes de circulation peuvent donc être schématisés tel que l'illustre la figure 6.

La séparation de l'aquifère de Quito en deux sous-unités (sud et nord-centre) est donc entièrement justifiée, non seulement au plan de la piézométrie et de la chimie mais encore au plan de la différence significative dans la composition isotopique qui montre que cette séparation correspond à deux modes de recharge et de circulation différents pour chacune de ces sous-unités.

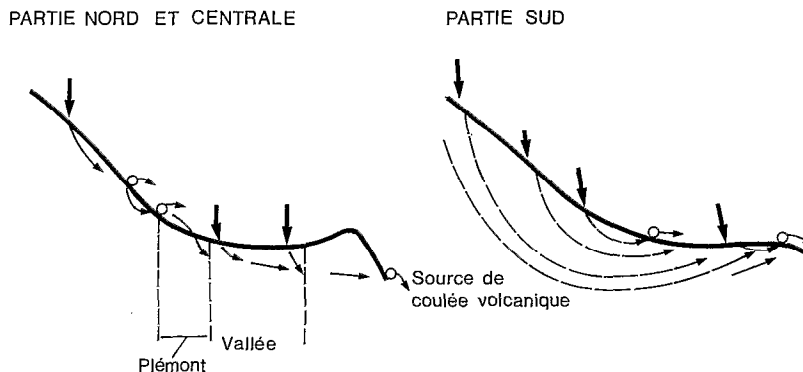


FIG. 6. — Comparaison entre les modes de recharge des aquifères nord et sud

B. Altitude de recharge

On peut procéder à l'estimation de l'altitude de la zone de recharge des aquifères par le calcul du gradient altimétrique local ($\delta^{18}\text{O}/\text{Alt.}$ ou $\delta^2\text{H}/\text{Alt.}$); en supposant respectées les conditions suivantes :

- l'aquifère a été rechargé dans des conditions climatiques similaires à celles qui règnent actuellement sur la région;
- il n'y a pas de mélange de types d'eau d'origines différentes dans la zone de recharge.

Afin de déterminer le gradient local de variation des teneurs en isotopes lourds avec l'altitude, on a sélectionné les sources alimentées de façon certaine par l'infiltration des précipitations sur un bassin versant d'extension réduite, sans participation d'eau ayant une autre origine.

En considérant les sources EQUA 2, 3, 13, 14, 17, 31, 37, 38, 44 (fig. 7), dont certaines sont d'ailleurs situées à l'est de la zone d'étude et à des altitudes inférieures (vallée de Los Chillos) on obtient les gradients altimétriques suivants :

$$\sigma^{18}\text{O}: -0,33\text{‰}/100\text{ m d'élévation}$$

$$\sigma^2\text{H}: -2,54\text{‰}/100\text{ m d'élévation}$$

On peut, à partir de la corrélation inverse (déterminée par la méthode des moindres carrés), estimer l'altitude moyenne de recharge h correspondant à une eau de composition isotopique donnée.

$$h = -301,66 * \delta^{18}\text{O} - 370$$

$$h = -39,38 * \delta^2\text{H} - 163$$

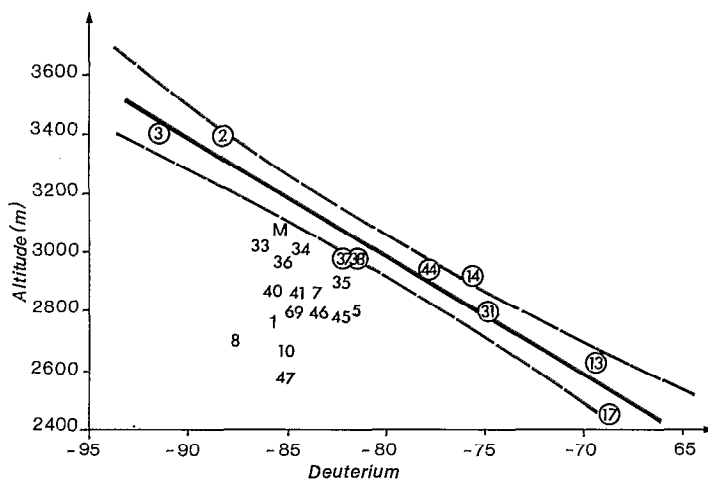


FIG. 7. — Détermination du gradient altimétrique local et de l'altitude moyenne de recharge d'un aquifère. (M = moyenne des précipitations à Izobamba, O = source sélectionnée pour le calcul du gradient)

L'erreur d'estimation σ_h à partir de ce type de formule est donnée par:

$$\sigma_h^2 = (\delta - \bar{\delta})^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_m^2$$

- où δ est la composition isotopique mesurée,
- $\bar{\delta}$: la moyenne en oxygène-18 ou deutérium,
- a: la pente de la droite de régression,
- σ_a : l'écart-type sur la pente,
- σ_m : l'écart-type sur la mesure d'oxygène-18 ou de deutérium.

Pour l'oxygène-18 on a: $\delta = -10,98$
 $a = -310,66$
 $\sigma_a = 40,71$
 $\sigma_m = 0,1$

ce qui donne:

δ^{18O} (‰)	-13	-12,5	-12	-11,5	-11	-10,5	-10	-9,5
σ_h (m)	87	68	51	37	30	36	50	67

Pour le deutérium: $\delta = -78,86$
 $a = -39,38$
 $\sigma_a = 3,71$
 $\sigma_m = 1$

ce qui donne:

δ^{2H} (‰)	-95	-90	-85	-80	-75	-70	-65
σ_h (m)	72	57	45	40	42	51	64

Les estimations faites à partir de la relation $\delta^{18O}/\text{Altitude}$ et celles de la relation $\delta^{2H}/\text{Altitude}$ ont été reportées au tableau II. Les résultats donnés correspondent au groupement des deux estimations et, dans le cas où les deux estimations ne se superposent pas, on a indiqué les valeurs limites extrêmes. L'amplitude ne dépasse généralement pas 400 m de dénivelée, exception faite des valeurs très basses (EQUA 21-22) dont l'altitude de recharge est respectivement estimée entre 3 300-3 800 m et 3 400-3 900 m.

Il est à noter que le point correspondant à la moyenne des précipitations mesurée à Izobamba (3 058 m) se situe légèrement au-dessous de l'enveloppe de la droite de régression. Ceci est peut-être dû à la conjonction de deux facteurs :

1. Les altitudes prises en compte dans les calculs sont celles des sources et non celles des bassins versants. Ceci n'affecte pas le calcul de la pente de la droite mais peut changer l'ordonnée à l'origine. Il serait plus exact de pouvoir établir le point représentatif pour chaque source à partir de l'altitude moyenne du bassin versant capté.

2. La moyenne des précipitations mensuelles ne représente peut-être pas celle de l'infiltration efficace. En effet, l'histogramme des fréquences des pluies classées selon la composition isotopique montre que les précipitations les plus importantes et donc les plus susceptibles de s'infiltrer présentent des teneurs en isotopes stables inférieures à la moyenne pondérée des teneurs en isotopes lourds des précipitations.

4.3. RÉSULTATS DES MESURES DE TENEURS EN ISOTOPES RADIOACTIFS

A. Le tritium

Les teneurs en tritium, situées aux environs de 6 à 9 UT, confirment le caractère très superficiel de l'écoulement sollicité par les sources. Elles correspondent au drainage d'une circulation proche de la surface («subsuperficielle») comme c'est notamment le cas des sources EQUA 2, 48, 49 du flanc du volcan Pichincha dans l'aquifère nord et des sources EQUA 42, 44 dans l'aquifère sud.

Les teneurs en tritium très faibles ou nulles correspondent à des circulations plus profondes pouvant mettre en jeu des eaux anciennes de plusieurs dizaines d'années. Par exemple, la source Guapulo EQUA 10 ne présente plus d'activité en tritium. Le temps de résidence est donc supérieur à 30 ans. Ceci confirme, tout comme la composition en isotopes stables, la longueur du trajet parcouru par l'eau de cette source qui draine l'aquifère central de Quito à travers son revers oriental. Les mêmes conclusions s'appliquent à la source EQUA 47, exutoire de l'aquifère nord.

Dans l'aquifère sud, la source EQUA 40 écoule également de l'eau ancienne (0,4 UT) qui semble provenir de la remontée de l'aquifère par une faille. Il est effectivement remarquable que cette eau présente les mêmes teneurs en isotopes lourds que celle du puits EQUA 41 de 200 m de profondeur situé à proximité de la source.

Quant aux sources qui présentent des teneurs entre 2 et 5 UT elle peuvent contenir un mélange entre une eau circulant près de la surface (environ 7 à 10 UT) et de l'eau plus ancienne. En adoptant ce schéma, la contribution relative d'eau subsuperficielle est plus importante pour la source EQUA 39 que pour la source EQUA 37. Ceci correspond à la disposition des points sur le diagramme deutérium — oxygène-18 qui s'aligneraient dans ce cas sur une droite de mélange.

Les eaux des puits présentent en général une très faible activité en tritium, sauf dans l'aquifère central où l'on entregistre 2,8 UT au puits EQUA 5 et 1,1 UT au puits EQUA 6. La présence d'eau relativement récente suggère un temps de résidence réduit dans l'aquifère. Cependant, les niveaux de crépinage étant généralement assez amples, il serait nécessaire, pour affiner ces conclusions, de procéder à des relevés étagés dans les puits sélectionnés afin d'apprécier les parts respectives des différents niveaux aquifères.

B. Le carbone 14

Le nombre d'analyses de carbone 14 est pour le moment réduit : 6 dans l'aquifère nord et central, 3 seulement dans l'aquifère sud. Malgré tout, ces quelques analyses confirment les modes de recharge suggérés par les données et la discussion sur isotopes stables puisque :

— les trois échantillons de l'aquifère sud présentent des teneurs en carbone-14 nettement inférieures à celles de la partie nord. Ceci correspond à l'hypothèse d'une circulation plus régionale dans la partie sud que dans la partie nord. C'est ainsi que pour l'échantillon EQUA 33 (aquifère sud), l'application du modèle de correction par les teneurs en carbone-13 donne une estimation du temps de résidence de 17 100 ans ($\pm 3 300$);

— dans la partie nord, les eaux sont récentes et d'infiltration locale; seul l'échantillon EQUA 4 présente une activité légèrement inférieure à celle calculée pour l'activité initiale. Les «âges» calculés ont été reportés au tableau II avec leurs erreurs respectives.

4.3. CONCLUSIONS DES ÉTUDES ISOTOPIQUES

Deux schémas différents de circulation sont donc à considérer :

A. *Au nord et au centre*, la recharge de l'aquifère s'effectue à partir de l'infiltration directe des précipitations sur la vallée, préférentiellement dans la zone de piémont du volcan Pichincha, où la présence de cônes d'éboulis détermine

une certaine perméabilité. Cependant, comme celle-ci n'atteint jamais des valeurs très élevées, une reprise par évaporation affecte la recharge avant et pendant l'infiltration à travers la zone non saturée du sol. Il ne semble pas qu'une circulation plus profonde, provenant de l'infiltration de l'eau plus en amont dans le massif, contribue de manière sensible à l'alimentation de la nappe.

B. Au sud, le schéma semble inversé. La composition isotopique de l'eau des forages reflète une origine plus profonde que celle du nord, tandis que les sources témoignent d'une circulation subsuperficielle. L'infiltration dans les parties hautes du massif paraît donc beaucoup plus importante que dans la zone nord et contribue donc fortement à l'alimentation de l'aquifère sud; ceci est en concordance avec la concentration plus élevée en sels dissous observée dans cet aquifère, qui correspond à une circulation plus longue.

La fig. 8 propose un schéma synthétique des grands types de circulation des eaux dans les parties centrale et nord de l'aquifère.

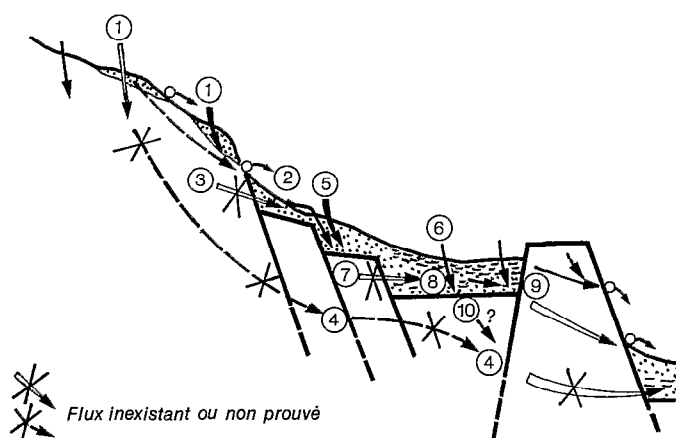


FIG. 8. — Schéma de circulation des eaux aquifères nord et centre. *Circulations mises en évidence*: (1) infiltration sur le massif qui n'affecte que la frange superficielle altérée et qui est drainée par les sources — (2)-(5) et (6) zones de recharge préférentielle en piémont et sur la plaine, infiltration directe des précipitations mais reprise partielle par l'évaporation — (8) échanges horizontaux et verticaux — (9) drainage de l'aquifère vers l'est par des coulées fracturées. *Circulations peu probables* (3) et (7): du massif vers l'aquifère, négligeable — (4) circulation profonde, non mise en évidence (10) percolation profonde, inconnue

5. CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Après avoir démontré le très important déséquilibre du bilan hydrique des nappes souterraines de la cuvette de Quito, la présente étude a permis d'établir les mécanismes qui définissent la mise en réserve et l'écoulement des eaux souterraines, déterminent l'existence de certains types de source et conditionnent l'alimentation des trois principaux aquifères de la zone étudiée.

Le déficit grandissant des ressources utilisables évolue parallèlement à l'accroissement de la demande en eau mais, contrairement à ce que l'on pourrait croire, il n'est pas consécutif à l'augmentation des volumes exploités qui sont en régression depuis quelques années et l'origine du déséquilibre est la diminution progressive de la recharge naturelle des aquifères occupant les parties centrale et septentrionale de Quito où se situe l'extraction la plus importante.

Il ne fait aucun doute que la cause principale de la diminution des volumes infiltrés est l'urbanisation sans cesse croissante de certains secteurs de la ville.

Au sud de Quito, ce phénomène d'urbanisation a une importance relativement secondaire car la nappe y est peu exploitée et parce que la recharge s'effectue de façon extensive sur l'ensemble du bassin y compris sur les parties hautes du volcan Pichincha; seules les sources, dont la composition isotopique démontre l'origine locale de l'alimentation, pourraient dans certains cas tarir à court terme.

Par contre, dans les régions centrale et septentrionale de la ville, la recharge des aquifères s'effectue presque exclusivement au centre de la cuvette et préférentiellement sur le bas piémont occidental, c'est-à-dire dans la zone où les

processus d'urbanisation sont les plus intenses; l'imperméabilisation qui s'ensuit favorise les écoulements superficiels au détriment de l'infiltration, ce qui entraîne une substantielle réduction de l'alimentation des nappes. C'est ainsi qu'on assiste à une baisse spectaculaire des niveaux piézométriques qui indique la ponction non négligeable faite dans les réserves géologiques. Si les autorités compétentes ne prennent pas des mesures draconiennes visant à interdire toute urbanisation excessive des zones de piémont jusqu'à une altitude de 3 200 m, il est certain que l'actuelle production de la nappe ne pourra être maintenue et que, dans un futur proche, elle diminuera graduellement car les conditions d'extraction deviendront de plus en plus difficiles.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 29 décembre 1987

BIBLIOGRAPHIE

- ALULEMA (R.), OJEDA (F.), NUVELOT (J.F.), POURRUT (P.), 1985. — «Proyecto acuífero de Quito — Informe final 1981-1985» Edit. EMAP-Q, PRONAREG, INERHI, ORSTOM. Quito.
- ARANYOSSY (J.F.), 1985. — «Etude hydrogéologique de l'aquifère de Quito et de la vallée de Los Chillos par les isotopes de l'environnement. Premier rapport d'interprétation». Edit., IAEA, Vienne.
- BAQUERO (O.), 1986. — «Problemas de abastecimiento de agua potable para Quito». — multigraphie provisoire pour l'Atlas Informatisé de Quito.
- GIRARD (G.), LAMACHERE (A.), VELEZ (A.), 1985. — «Aquifère de Quito — Modèle mathématique de gestion». Edit. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, ORSTOM. Paris.
- INERHI, 1983. — «Proyecto acuífero de Quito — Prospección de aguas subterráneas, método geofísico de resistividad eléctrica» — Dept. de Geotecnia — Quito.
- International Atomic Energy Agency — Environmental Isotope data: World Survey of Isotope Concentration n° 4: (1968-1969) TR n° 147 IAEA Vienne 1973; n° 5: (1970-1971) TR n° 165 IAEA Vienne 1975; n° 6: (1972-1975) TR n° 192 IAEA Vienne 1979; n° 7: (1976-1979) TR n° 226 IAEA Vienne 1983.
- POURRUT (P.), 1984. — «Los climas del Ecuador — Fundamentos explicativos», in Documentos de Investigación n° 4-1983. Edit. CEDIG, IPGH, ORSTOM. Quito.