

<b>Zeitschrift:</b>	Ingénieurs et architectes suisses
<b>Band:</b>	110 (1984)
<b>Heft:</b>	22
<b>Artikel:</b>	L'étude de l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation dans la région de Milagro, Ecuador: un cas d'hydrogéologie appliquée
<b>Autor:</b>	Schroeter, Pierre
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-75355">https://doi.org/10.5169/seals-75355</a>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# L'étude de l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation dans la région de Milagro, Ecuador

## Un cas d'hydrogéologie appliquée

par Pierre Schroeter, Zurich

### Résumé

Les travaux hydrogéologiques effectués, dans le cadre d'une étude de faisabilité, dans une zone de piémont andine en Ecuador, sont exposés. L'écoulement des eaux souterraines est régional dans sa partie profonde. La diminution de la transmissivité de l'aquifère dans le sens de l'écoulement met en évidence un phénomène classique de seuil hydraulique impliquant une inflexion des équipotentiels de pression en profondeur. La présence d'un aquifère en charge profond est supposée au vu des résultats de la géophysique. Un bilan hydrologique simple montre que les besoins en eau souterraine peuvent être largement couverts par le recours aux réserves régulatrices de la nappe phréatique.

### Zusammenfassung

Die hier erläuterten hydrogeologischen Arbeiten und Resultate wurden im Rahmen einer Machbarkeitsstudie zur Bewirtschaftung des Grundwassers für Bewässerungszwecke in einem küstennahen Gebiet in Ecuador gemacht. Es wird gezeigt, dass die Grundwasserströmung einem generellen regionalen Strömungsbild entspricht, welches aber durch eine der Strömung entlang abnehmende Durchlässigkeit einige Störungen erfährt. Die Möglichkeit der Anwesenheit eines tieferen Grundwasserleiters wird angedeutet. Eine einfache Berechnung des Grundwasserhaushaltes zeigt, dass die Wasserbedürfnisse für die Bewässerung durch eine Grundwasserspiegelabsenkung überreichlich gedeckt werden können.

## 1. Introduction

Dans le cadre d'un contrat liant l'Écuador à l'Agence internationale pour le développement de la Banque mondiale, l'INERHI — Institut équatorien des ressources hydrauliques — a été chargé de mettre en œuvre le développement de l'agriculture irriguée de la région de Milagro dans la province du Guayas. Une partie de ce projet prévoit l'extension de la surface irriguée à la zone de Banco de Arena par l'exploitation des eaux souterraines. L'étude de la faisabilité de cette extension a été confiée par l'INERHI à la FAO — Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

La ville de Milagro, qui compte approximativement 50 000 habitants, se trouve à 40 km à l'est de Guayaquil, le grand port équatorien situé à environ 2° de latitude sud sur la côte de l'océan Pacifique (fig. 1). C'est une région à climat tropical, modéré par l'influence du courant de Humboldt. La saison des pluies, de janvier à mai, est liée au déplacement du front de convergence intertropical; ce sont donc des pluies de mousson. Leur valeur moyenne est d'environ 1200 mm/an à Milagro; cette valeur augmente rapidement en direction de l'est pour atteindre 2000 mm/an au pied de la cordillère andine; elle diminue ensuite progressivement jusqu'à 600 mm/an dans les parties hautes du bassin versant du rio Chimbo, la rivière principale du terrains de l'étude.

Cette étude pluridisciplinaire, qui a duré deux ans, comportait un important volet didactique et une grande partie du per-

sonnel spécialisé nécessaire a été fournie par l'INERHI pour travailler aux côtés des cinq spécialistes fournis par la FAO. L'hydrogéologie, seul sujet traité ici, ne représente bien sûr qu'une partie du travail réalisé qui comprenait en outre des volets économiques, agronomiques et même sociologiques, qui font partie d'une étude de faisabilité. Les études hydrogéologiques devaient permettre de décider s'il était possible, quantitativement et qualitativement, d'utiliser les eaux souterraines pour pratiquer la culture irriguée du soja, du maïs, du riz, du tabac et du coton dans une structure agricole très morcelée.

## 2. Les travaux hydrogéologiques

Quelques études antérieures, orientées elles aussi vers le développement des ressources en eaux souterraines pour les besoins de l'irrigation et des adductions d'eau rurales, avaient, d'une façon très générale, dégrossi les problèmes.

Les travaux spécifiquement hydrogéologiques ont compris :

- un inventaire des points d'eau de la région, d'où est issue la définition d'un réseau de puits témoins où le niveau d'eau a été observé périodiquement;
- un niveling altimétrique de tous les ouvrages forés ainsi que d'un certain nombre des autres points d'eau;
- des prélèvements d'eau à fin d'analyse chimique et isotopique;
- des forages, non carottés, exécutés au rotary à la boue, suivis des diagra-

### Abstract

The hydrogeological work performed for a feasibility study in a piedmont environment in Ecuador is detailed. It has been recognised that the flow of groundwater corresponds to a regional system complicated by variations of the transmissivity along the direction of flow. This leads to a natural upward discharge of the deep groundwater which also means that there is a possibility of constructing free-flowing wells by tapping higher pressure potentials at depth. The existence of a deeper seated aquifer underlying most of the project area is strongly suggested based on geophysical evidence. This aquifer could very likely be artesian. A simplified hydrological balance indicates that the groundwater needs will be amply covered by the use of the storage capacity of the water-table aquifer and its yearly natural recharge.

phies de polarisation spontanée, de résistance en monoélectrode et de rayonnement  $\gamma$  naturel. Des essais de débit à plusieurs paliers et des observations de remontée des niveaux y ont été effectués;

- une campagne de plus de 500 sondages électriques dont plus de 90% en lignes d'émission de 3000 à 4000 m.

## 3. Les résultats

### 3.1 Géologie et morphologie

Le domaine côtier équatorien consiste essentiellement en une croûte de roches ignées, érodées partiellement au Crétacé supérieur, fracturée par des accidents verticaux d'orientation NNE eux-mêmes liés à la tectonique andine dont le paroxysme date du Miocène supérieur. Ces failles ont contrôlé le remplissage sédimentaire, marin ou continental selon les régions. La région qui va de Taura à Babahoyo a été progressivement

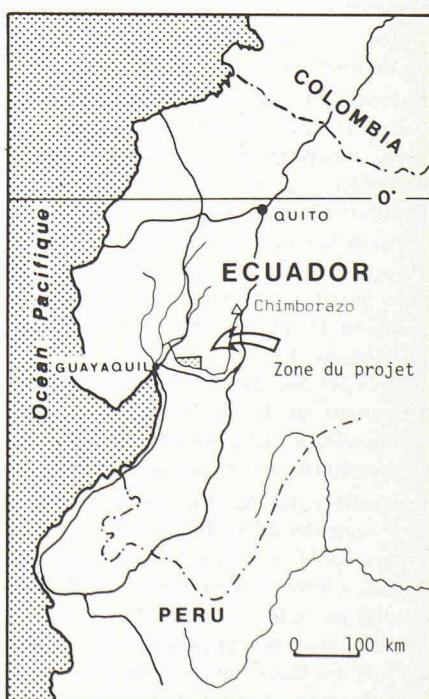


Fig. 1. — Situation géographique du projet Banco de Arena.

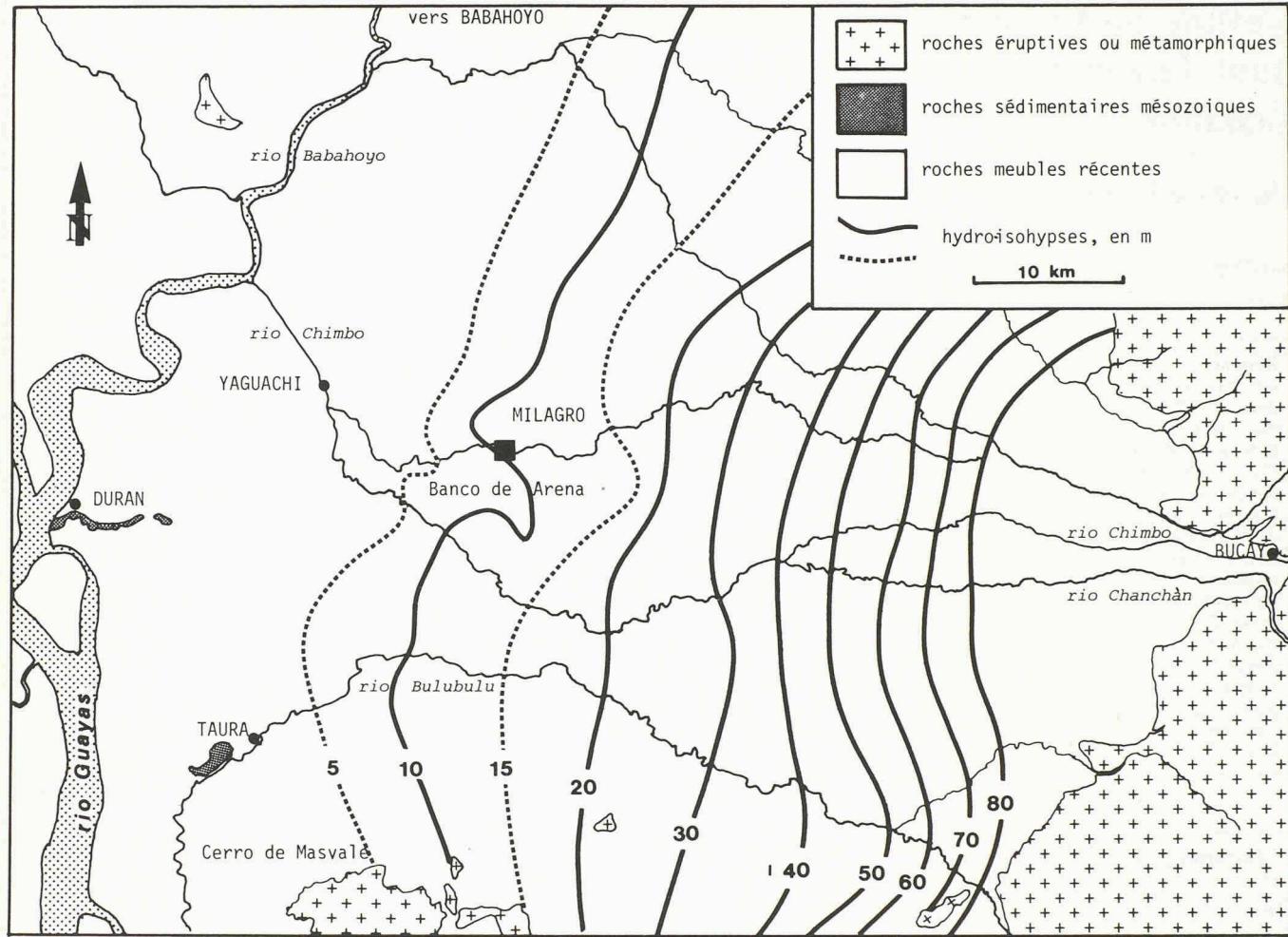


Fig. 2. — Hydro-isohypes de la nappe supérieure au 15 janvier 1977.

comblée, depuis le Miocène, de sédiments à caractère fluvio-deltaïque d'origine andine. Aucune roche d'origine marine n'a été rencontrée dans les forages, le plus profond ayant été poussé jusqu'à 356 m sous la surface soit 346 m sous le niveau moyen actuel de la mer. Le bassin montre à l'ouest quelques affleurements de calcaires et d'argiles, d'âge crétacé et des roches diverses, peu métamorphosées, au sud.

Le réservoir d'eau souterraine est constitué de lentilles de graviers, de bancs de sable, entrecoupés de limons et parfois d'argiles, déposés là, probablement depuis le Pliocène, par le rio Chimbo, son affluent le Chanchán et par le rio Bulubulu sous la forme d'un ample cône de déjection qui se mêle, à environ 70 km du pied de la cordillère, aux sédiments estuariens du fleuve Guayas (fig. 2). Toutes ces roches sont d'origine andine, provenant de la cordillère occidentale constituée principalement de diabases, de porphyrites et de pyroclastites.

Les pentes des bassins versants andins sont considérables ; le Chimborazo culmine à 6272 m, le rio Chimbo sort des Andes, à Bucay à 120 km de là, à l'altitude de 300 m : une moyenne de 0,050. Les pentes passent brusquement à des valeurs dix fois moindres entre Bucay et le Guayas qui peut être considéré comme étant au niveau de la mer. La granulométrie des dépôts est liée à ce changement

de pente, les dépôts grossiers se faisant en piémont, les sables et les limons étant transportés plus loin. En se mêlant aux sédiments du Guayas, le mode de sédimentation devient plus complexe ; il s'apparente à ce que les pétroliers dénomment des shoe-strings.

### 3.2 Les aquifères, leur extension, leur qualité

Les sédiments meubles, accumulés entre Bucay et le Guayas, ont été divisés en deux systèmes aquifères pour expliquer les résultats de la géoélectrique. Le mode de déposition, déjà évoqué, a provoqué des dépôts qui comportent des variations de puissance très marquées. Le système aquifère supérieur, qui contient la nappe phréatique, ne peut être considéré comme homogène ou isotrope, sauf peut-être à une échelle au moins hectométrique. L'existence de l'aquifère inférieur, touché par un seul forage, mais bien marqué sur les sondages électriques, doit être considérée comme très probable.

Le substratum se marque comme un résistant sur les quelques sondages électriques qui l'ont vraisemblablement atteint. Il se révèle en surface par les affleurements de bordure du bassin ; on y retrouve essentiellement des roches volcaniques mais aussi des calcaires, des argiles et des schistes métamorphiques. Ce substratum, considéré comme un imperméable, est lui-même surmonté

d'un épais conducteur géoélectrique qui semble s'amincir vers le nord. Il semble donc bien que l'on puisse admettre un imperméable hydrogéologique, au-delà d'environ 400 m de profondeur, sous les 3500 km<sup>2</sup> de ce bassin.

Le schéma hydrogéologique suivant a donc été adopté :

- aquifère supérieur, d'une puissance pouvant atteindre 100 m;
- couche imperméable, mince près de la cordillère mais pouvant atteindre plus de 200 m d'épaisseur dans le centre du bassin;
- aquifère inférieur d'une épaisseur maximum de 200 m;
- substratum imperméable, en forme de cuvette.

Les différents forages qui, à une seule exception, exploitent tous l'aquifère supérieur, donc la nappe phréatique, montrent que la transmissivité varie de  $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  dans les sédiments grossiers de la zone de piémont à moins de  $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  en allant vers l'ouest. Dans la zone restreinte du projet Banco de Arena, les résultats de 17 forages donnent une transmissivité moyenne de  $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  avec un écart-type de  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 3.3 Les réserves en eau souterraine

La surface de la nappe phréatique montre une pente de l'ordre de 4‰ dans les zones situées au-dessus de l'hydro-

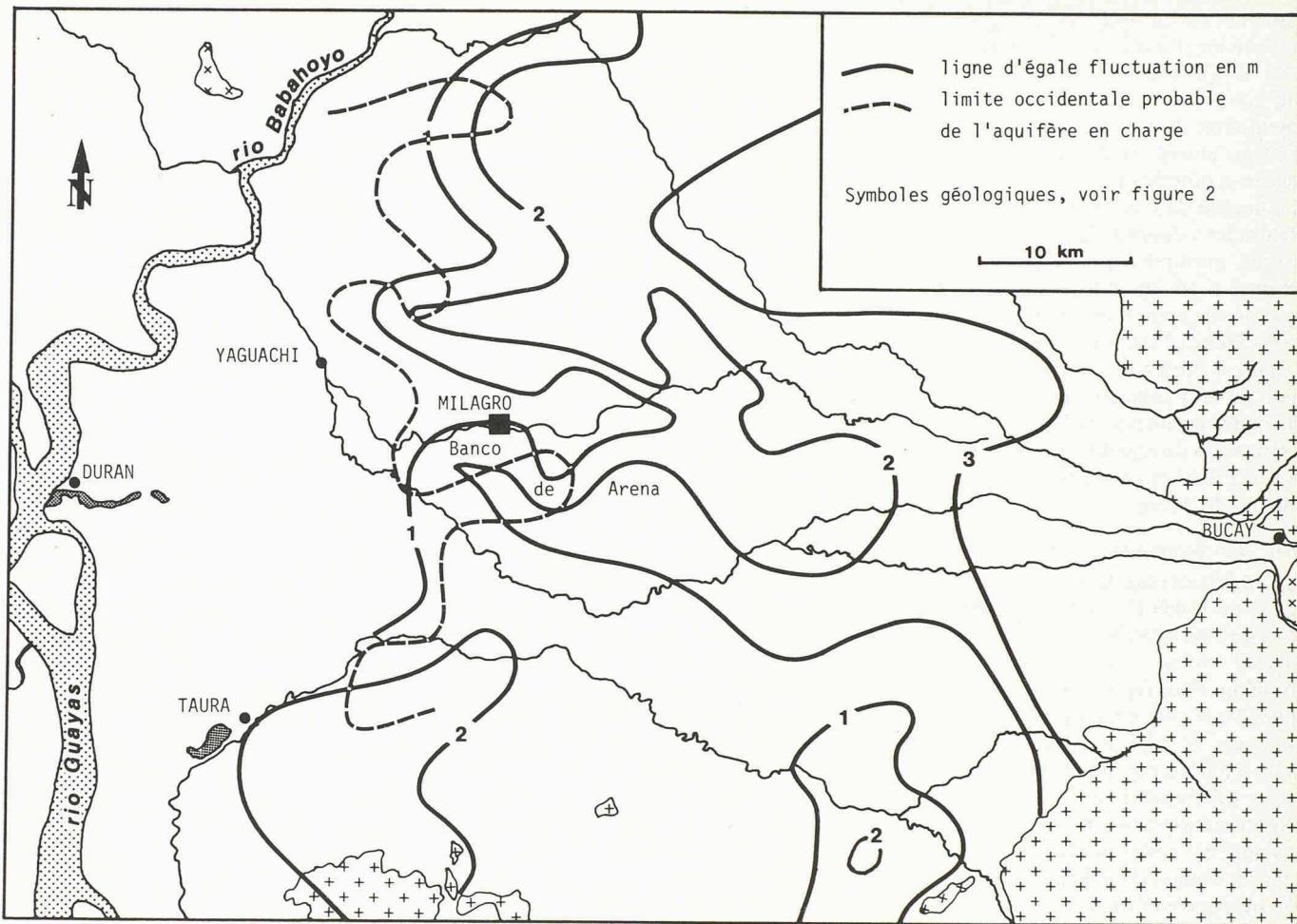


Fig. 3. — Lignes d'égale fluctuation du niveau de la nappe supérieure d'octobre 1976 à mai 1977.

isohypse 20 m (fig. 2). Cette valeur passe ensuite à moins de 1% vers l'ouest et le nord-ouest. Comme les sondages électriques n'ont pas montré une remontée notable des couches imperméables, ce changement brusque des gradients de pente provient vraisemblablement d'une détérioration rapide, dans le sens est-ouest, des valeurs de la transmissivité. L'écoulement régional de la nappe phréatique correspond à un modèle de Tóth (1962) auquel se surimpose une variation de la perméabilité pour donner un schéma d'écoulement du type théorique décrit par Freeze & Witherspoon (1967). Ce schéma se voit d'ailleurs confirmé par les observations de surface combinées à quelques forages d'exploration : dans la zone la plus occidentale du bassin la nappe phréatique arrive pratiquement à l'affleurement, elle est plus ou moins efficacement drainée par quelques petits ruisseaux qui prennent leur origine dans la zone même de Banco de Arena. Quelques forages, situés le long de la route de Yaguachi à Babahoyo, poussés à environ 30 m de profondeur mais crépinés seulement à leur partie inférieure, se sont révélés artésiens démontrant ainsi l'inflexion vers le haut des surfaces équipotentielles.

En admettant une transmissivité de  $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , un gradient moyen de 0,002 et un front d'écoulement de 11 km se situant dans la partie haute de la zone d'irrigation, on voit que l'écoulement

souterrain naturel, en étage, est de l'ordre de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  dans la zone même du projet. Ce calcul qui se voit confirmé par une simple évaluation faite à partir des valeurs des écoulements de surface en période d'étage — la zone du projet dispose de 11 stations limnimétriques et les quantités d'eau de surface soustraites pour les besoins de l'irrigation sont connues — permet de conclure que les eaux souterraines ne participent actuellement que d'une façon insignifiante à l'hydrologie naturelle de la région. En admettant un coefficient d'emmagasinement moyen de 0,15 chaque hectare de la zone du projet contient  $1500 \text{ m}^3$  d'eau par mètre de puissance de l'aquifère. L'aquifère sous-jacent aux 13 000 ha de cultures irriguées peut donc fournir  $19,5 \text{ hm}^3/\text{m}$ , ceci en négligeant complètement les apports latéraux. Les  $42 \text{ hm}^3$  d'eau nécessaire pendant la saison d'irrigation, soit les quatre mois entre juillet et octobre, peuvent être obtenus par un rabattement général de 2,2 m du niveau d'eau de la nappe phréatique.

Bien qu'un rabattement général de la nappe puisse, en principe, être considéré comme favorable aux cultures dans cette région — un système de drainage a dû être prévu pour éviter les effets néfastes des inondations qui se produisent durant la saison des pluies — il est important de s'assurer du fait que la vitesse de remontée de la nappe conséquente aux pluies soit suffisante pour rétablir l'état initial.

Ceci a été fait en observant la remontée du niveau général de la nappe durant une saison des pluies légèrement supérieure à la normale (1442 mm) après une période d'étage en régime qui a été considéré comme non influencé (fig. 3) ; en effet, les prélèvements d'eau souterraine actuels dans la zone du projet sont négligeables. Cette vitesse de remontée est de l'ordre de 0,022 m par jour dans la région de Milagro et de 0,018 m par jour aux environs de Taura. Ainsi une centaine de jours seraient nécessaires pour un retour aux conditions initiales. L'étude des observations climatologiques de longue durée montre que :

- 95% des précipitations annuelles ont lieu entre les mois de janvier et de mai soit cinq mois ;
- il y a seulement une probabilité légèrement supérieure à 5% pour que les précipitations soit inférieures à celles de l'année d'observation durant une période de 3 mois consécutifs.

Il est évident que dans ce régime climatologique tout excès des prélèvements durant une année quelconque serait largement compensé dans les années suivantes.

Le deuxième facteur qu'il était nécessaire d'examiner était la relation qui existe entre l'alimentation de la nappe provenant des rivières et en particulier du rio Chimbo et celle provenant de l'infiltration directe des pluies. Une étude de la

distribution des isotopes du milieu a été menée à bien à cette fin (Payne & Schroefer, 1978). Elle a permis de montrer qu'une proportion d'environ 70% de l'alimentation de la nappe phréatique était due aux pluies, le reste venant de la circulation profonde et des rivières.

La qualité de l'eau a été examinée mais seules les valeurs de la conductivité électrique, mesurée au moment des prélèvements, a pu être utilisée. Ces valeurs, comprises pour la plupart entre 250 et 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25 °C, laissent supposer que l'eau est propre aux besoins de l'irrigation ; il faut constater à ce sujet que les eaux souterraines sont déjà utilisées pour l'irrigation de grandes surfaces de canne à sucre dans la zone située à l'amont de Banco de Arena.

### 3.4 Les techniques d'extraction

Le projet envisage la mise en culture irriguée de 13 000 ha en les répartissant en lots de 3 ha à 250 ha. Le facteur de choix décisif n'était pas technique mais humain. Pour répondre à cette demande possible il a été nécessaire de prévoir des captages de capacité très différente, de 5 l/s à 100 l/s, équipés de pompes électriques submersibles ou de pompes à succion fonctionnant en surface. En tenant compte des pertes de charge il s'est avéré que les forages d'un diamètre supérieur à 6" ne poseraient pas de problème mais que les petits ouvrages, d'un diamètre de 3" ou 4", devaient comporter une crête de 15 m au moins et être implantés par auto-injection afin de rester économiquement faisables. La lithologie de l'aquifère supérieur de la zone Banco de Arena se prête très bien à l'installation de ce type de puits, ce qui se révèle heureux, car le plan d'irrigation proposé prévoit l'installation possible de plus de 2000 de ces puits.

## 4. Conclusion

L'étude hydrogéologique exposée, qui ne représente qu'un des éléments d'une étude de faisabilité, s'est révélée être particulièrement bien adaptée aux questions qui lui étaient posées, compte tenu des moyens mis à disposition.

Dans un cadre économique contrariant, du fait des impératifs agricoles et sociaux, il fallait s'assurer que :

- l'eau souterraine disponible dans la zone du projet peut satisfaire aux besoins de l'irrigation afin de permettre une deuxième récolte ;
- les types d'ouvrages d'extraction prévus sont adaptés aux besoins et aux possibilités locales.

Les différentes techniques hydrogéologiques utilisées, qui allaient du simple inventaire de points d'eau jusqu'à l'analyse des isotopes du milieu, ont permis non seulement de répondre à ces questions mais elles en ont aussi soulevé quelques autres qui permettront, dans l'avenir, d'orienter les travaux hydrogéologiques vers l'étude et l'exploitation d'un aquifère profond et d'une façon générale de mieux exploiter les ressources en eau souterraine du bassin du Guayas.

La prospection géoélectrique s'est révélée particulièrement utile pour l'exploration à grande échelle d'un terrain encore à peine effleuré par quelques forages d'exploitation. Elle s'est trouvée ici dans son domaine de prédilection avec des séries sédimentaires assez épaisse, présentant des variations lithologiques verticales relativement bien marquées à l'échelle choisie et dans un environnement peu perturbé par les hétérogénéités dues à l'activité humaine.

## Bibliographie

- FREEZE R.A. AND WITHERSPOON P.A. (1967), *Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow*. Water Res., Vol. 3, N° 2.
- PAYNE B. AND SCHROETER P. (1978), *The importance of infiltration from the Chimbo river in Ecuador to groundwater using environmental isotope variations*. Isotope Hydrology, IAEA, Vienna.
- TÓTH J. (1962), *A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada*. J. Geophys. Res., Vol. 67, pp. 4375-4387.

Le modèle de Tóth d'écoulement souterrain régional sous-jacent à plusieurs écoulements locaux correspond bien aux faits observés ; il est cependant rendu encore plus complexe par la diminution de la perméabilité des sédiments dans le sens général de l'écoulement des eaux. L'étude a montré qu'une mobilisation des réserves régulatrices de la nappe phréatique suffira largement à couvrir les besoins de la période d'irrigation. Elle représente un type d'étude très fréquent où ni le temps ni les moyens ne permettent un travail plus exhaustif qui n'est d'ailleurs par requis.

### Adresse de l'auteur :

Pierre Schroefer  
Laboratoire d'hydrogéologie  
EPFZ Hönggerberg  
8093 Zurich

*Exposé présenté à la «Journée de printemps» du Groupe suisse des hydrogéologues (GSH) à La Neuveville, le 22 avril 1983.*

Henrik Nylander «en reconnaissance de ses contributions exceptionnelles dans le domaine de la recherche et de l'enseignement des constructions de génie civil». Henrik Nylander, né en 1914, a obtenu son diplôme d'ingénieur civil en 1939 et son titre de docteur en sciences en 1942. Professeur assistant dès 1939 puis professeur de statique et résistance des matériaux à l'Institut royal de technologie, Stockholm, de 1947 à 1979, le professeur Nylander a également exercé l'activité d'ingénieur-conseil dès 1943.

Il a participé de façon très active à l'élaboration des diverses normes suédoises pour la construction en béton ainsi qu'en acier. Il a contribué de façon décisive à la préparation du code-modèle CEB et des critères de dimensionnement de la CECM pour les constructions métalliques.

Le professeur Nylander, membre de l'AIPC dès 1948 et membre de nombreuses associations internationales et suédoises, est l'auteur de plus de 100 contributions techniques et scientifiques.

## Actualité

### Attribution du Mérite international des ponts et charpentes au professeur Henrik Nylander

C'est lors de la cérémonie d'ouverture du 12<sup>e</sup> Congrès de l'AIPC à Vancouver, BC, le 3 septembre 1984, que le président de l'AIPC a remis le Mérite international des ponts et charpentes 1984 au professeur

sous le patronage de l'Institut de recherche en matière de bâtiment de l'EPF Zurich et avec l'appui de la Conférence suisse de la construction, Zurich.

Une équipe, sous la direction du professeur Heinrich Kunz, a publié à ce jour 12 cahiers, dont nous donnons les titres ci-après :

1. Problématique et importance des défauts dans la construction.
2. Désordres dans les façades.

3. Sollicitations aux intempéries et diffusion de la vapeur d'eau.

4. Dégradation de revêtements hydrocarbonés.

5. Fluage, retrait, gonflement dans le bâtiment.

6. Infiltration d'eau dans le bâtiment.

7. Dommages causés par le gel-dégel en présence de sel.

8. Erreurs de planification dans le bâtiment.

9. Problèmes de raccord dans le bâtiment.

10. Etanchement des décharges.

11. Barrières pour handicapés moteurs dans la construction.

12. Problèmes liés à l'isolation thermique extérieure enduite.

On peut se procurer ces cahiers dans les librairies ou auprès de l'éditeur, Baufachverlag AG Zürich, 8953 Dietikon. F.N.

## Bibliographie

### Défauts dans la construction — Remèdes et prévention

Nous signalons à tous nos confrères — particulièrement à ceux qui s'occupent d'expertises — la série de fascicules portant ce titre ; il s'agit d'une collection de documents d'information publiée par le Forum «Défauts et qualité dans la construction»,