

Etudes en cours de la nappe souterraine de l'Arve

Autor(en): **Amberger, Gad / Siegenthaler, Ulrich / Verstraete, Pierre**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **74 (1981)**

Heft 1

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-165101>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Eclogae geol. Helv.	Vol. 74/1	Pages 225-232	4 figures dans le texte	Bâle, mars 1981
---------------------	-----------	---------------	-------------------------	-----------------

Etudes en cours de la nappe souterraine de l'Arve¹⁾

Par GAD AMBERGER²⁾, ULRICH SIEGENTHALER³⁾ et PIERRE VERSTRAETE⁴⁾

RÉSUMÉ

Dans le cadre du programme national «Problèmes fondamentaux du cycle de l'eau en Suisse», du Fonds national de la recherche scientifique, la nappe de l'Arve à Genève a été choisie comme région-test. Dans le cas d'un aquifère complexe et profond où, pour des raisons économiques de frais d'acquisition des données de terrain, celles-ci sont de densité modeste, la simulation par modèle mathématique est étudiée et critiquée. Les hypothèses introduites dans le calage du modèle de calcul sont contrôlées par des méthodes faisant appel à la thermique, la chimie et le dosage isotopique des eaux. La recherche étant encore en cours, les résultats nouveaux présentés ici le sont à titre préliminaire et feront l'objet de synthèses et publications ultérieures détaillées.

La nappe de l'Arve ayant été surexploitée depuis une quinzaine d'années, le canton de Genève a fait construire une station de réalimentation artificielle, mise en service en 1980. La seconde partie de la réunion a été consacrée à la visite de cette installation.

Cadre hydrogéologique

La nappe a pour siège des graviers sableux ou limoneux, déposés en bordure d'un sillon d'érosion préquaternaire entaillé dans la molasse oligocène de l'étage chattien. Ces graviers font partie du complexe glaciaire dit würmien. Ils reposent sur la molasse ou des limons argileux, témoins d'un remplissage glaciaire plus ancien des sillons préquaternaires. Cette première phase glaciaire est attribuée en général au Riss. Pour notre part, nous ne pensons pas que la stratigraphie usuelle des dépôts glaciaires périalpins puisse être appliquée à des corrélations générales (AMBERGER 1978).

Les graviers, dont l'épaisseur varie de 30 à 90 m, sont à leur tour recouverts de limon argileux à cailloux puis de dépôts de retrait glaciaire de nature complexe. Ils n'apparaissent à l'affleurement que dans de rares entailles d'érosion, tardi-glaciaires et récentes, vallon de Trainant, vallée de l'Arve, vallée de l'Arande près de Saint-Julien (Haute-Savoie) et vallée de la Laire. Au centre de cette masse graveleuse, l'épaisseur de la zone aquifère est de 30 à 50 m (niveau moyen de la nappe). Dans les bordures, elle s'amenuise et passe à 0 m par remontée de l'imperméable de base au sud-est et par pincement sous une épaisse couche d'argiles glacio-lacustres au nord-ouest. La superficie de l'aquifère est de 30 km² environ. Il s'étend du quartier des Eaux-Vives à l'est de la ville de Genève jusqu'au sud de Chancy sur une

¹⁾ Compte rendu de la réunion scientifique du Groupe des Hydrogéologues Suisses à Genève, le 14 mai 1980.

²⁾ Service cantonal de géologie, Case postale 36, CH-1211 Genève 8.

³⁾ Physikalisches Institut der Universität Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern.

⁴⁾ P. a. Bonnard et Gardel S.A., 61, avenue de Cour, CH-1001 Lausanne.

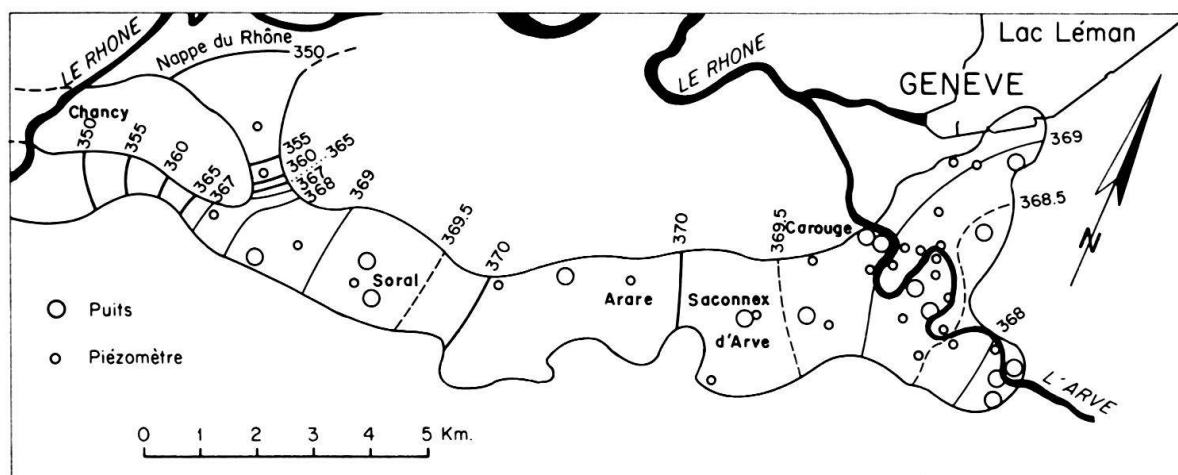


Fig. 1. Piézométrie au 1 février 1980 (Valeurs en m/mer).

longueur de 19 km. Sa largeur varie entre 4 km dans la région où il passe sous l'Arve et 300 m à 1 km dans les zones exutoires.

Ces exutoires sont souterrains vers des nappes situées à des niveaux moins élevés. Ils ne donnent pas lieu à des sources pouvant être jaugées. Vers le nord, l'écoulement naturel se fait vers la nappe superficielle du lac, située dans des graviers de terrasse et des remblais. A l'autre extrémité, un second écoulement se produit vers la nappe du Rhône par un sillon dirigé au nord-ouest entre Sorral et Avully. La troisième voie d'écoulement connue se trouve sous la vallée de la Laire et se dirige également vers la nappe du Rhône.

Une contribution importante à l'alimentation est due à des infiltrations à travers le lit de l'Arve. Le niveau de la rivière est toujours supérieur à celui de la nappe, même en période de hautes eaux de cette dernière. Des apports latéraux par déversement de petits aquifères existent également, mais les données géologiques à disposition ne permettent pas de leur attribuer une participation prépondérante dans le bilan hydrologique. Par suite de la couverture imperméable presque continue, les apports directs verticaux par infiltration d'eau pluviale sont pratiquement négligeables. Les analyses isotopiques discutées plus loin mènent cependant à des conclusions qui diffèrent des idées hydrogéologiques. Il est pompé chaque année 10-12 millions de m³ d'eau potable dans cette nappe, distribuée à une population d'environ 80000 personnes à Genève et dans le département français de la Haute-Savoie. Cette quantité est supérieure aux apports moyens naturels et le niveau de la nappe a baissé de 10 m entre 1930 et 1976. La piézométrie que nous mesurons actuellement (fig. 1) n'est donc que le reflet d'un niveau profondément déformé par l'action des nombreux puits de captage et dont il est difficile de déduire les lois hydrauliques naturelles d'alimentation et d'écoulement de la nappe.

Etude critique des données nécessaires à la simulation numérique d'une nappe souterraine

Conjointement au développement de l'informatique et des outils de calcul très puissants, les simulations mathématiques de phénomènes très divers sont de plus en

plus utilisées à des fins aussi bien théoriques que pratiques. Le domaine de l'hydrogéologie a aussi bénéficié de cette évolution et divers modèles, directs ou inverses ont été développés. La principale difficulté consiste à définir les paramètres physiques et conditions aux limites à introduire dans le calcul, car les phénomènes simulés ne sont pas directement observables et pour certains d'entre eux (perméabilité) les techniques de mesures n'apportent pas encore des résultats d'une précision suffisante. Il est donc nécessaire d'introduire certaines hypothèses et la simulation précise par le calcul d'un état piézométrique observé ne peut être considérée comme une confirmation univoque de l'hypothèse avancée. Il nous a donc paru plus intéressant d'axer nos recherches sur la critique des données nécessaires à la simulation que de développer un modèle très sophistiqué, tridimensionnel ou d'écoulement transitoire dont les résultats auraient été entachés des erreurs dues au plus grand nombre d'hypothèses à introduire.

La nappe souterraine de l'Arve nous a paru être un bon exemple pour ce test. Dans la plupart des cas, son niveau se trouve à des profondeurs variant entre 40 et 100 m sous le terrain naturel. La mise en place d'instruments aussi simples que des piézomètres devient ainsi difficile et onéreuse et les essais de pompage avec puits et piézomètres ne sont envisageables que sur des puits de captage existants. Le réseau piézométrique actuel ne compte qu'une vingtaine de points de mesure, soit une densité inférieure à 1 p/km² et les perméabilités ont été estimées sur la base de mesures granulométriques dans 18 forages carottés, de 6 essais de pompage avec puits et piézomètres et de 8 essais de pompage en puits sans piézomètres.

Les volumes exploités dans les puits de pompage ne sont connus que sous la forme de totaux annuels, rarement mensuels. Les débits d'alimentation ou d'écoulement aux exutoires sont des estimations basées sur un bilan hydraulique annuel portant sur une période de onze années. La nappe ayant fortement baissé durant cette période, le choix de la valeur du coefficient d'emménagement est de première importance dans ces estimations.

Le modèle de calcul utilisé est celui mis au point par l'Institut d'économie et aménagement énergétique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (MATHEY et al. 1974). Il s'agit d'un modèle par éléments finis d'un écoulement permanent. Bidimensionnel, il tient cependant compte de l'épaisseur de l'aquifère en déterminant la transmissivité sur la base du champ de perméabilité supposé et de l'altimétrie de l'imperméable.

Dans l'histoire des variations piézométriques de la nappe, nous avons recherché des périodes où l'écoulement selon le régime permanent était le plus probable. Nous nous sommes d'abord arrêtés à une moyenne des niveaux et débits de l'année 1969. Sur la base du champ de perméabilité, fixé par l'hydrogéologue, par une interpolation linéaire entre points de mesure, puis par le tracé de courbes d'isoperméabilité, les premiers calculs nous ont fixé des niveaux piézométriques plus bas que ceux mesurés surtout dans les zones exutoires et des débits plus grands que ceux estimés par la méthode des bilans.

Pour le calage, nous avons travaillé sur le champ de perméabilité. Les valeurs ont été diminuées aux exutoires et un môle de faible perméabilité a été introduit entre les deux exutoires sud-ouest, dans la région de Soral. Avec cette hypothèse, la piézométrie calculée s'est avérée très proche de celle mesurée (fig. 2) et les débits

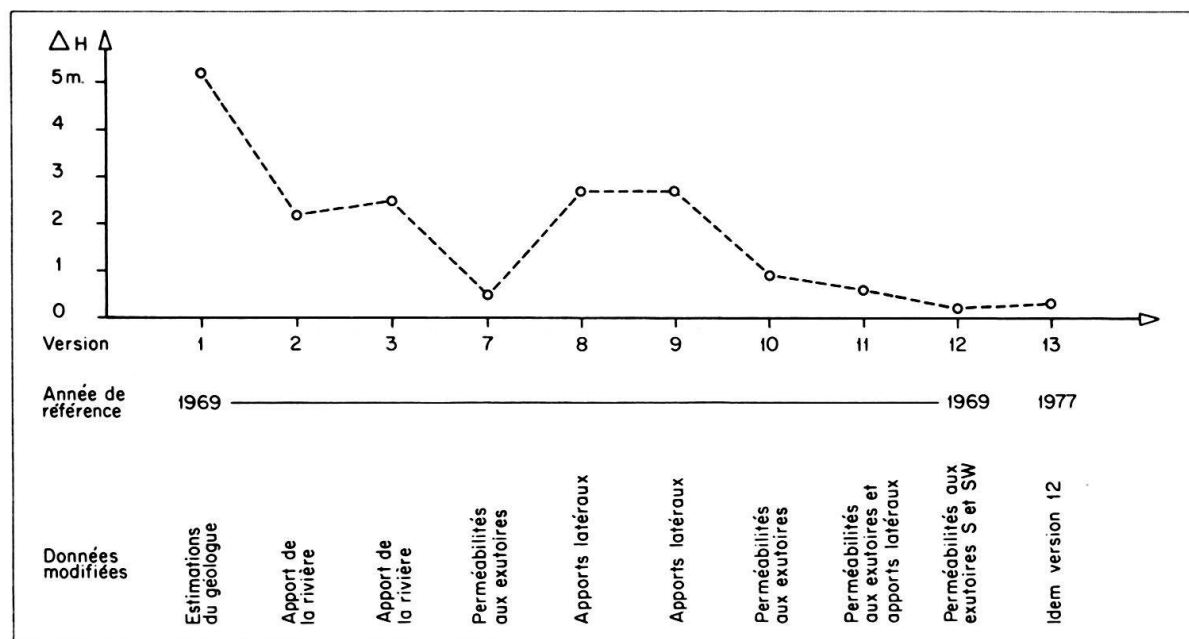


Fig.2. Evolution de l'indicateur de convergence. (Différence moyenne entre la piézométrie calculée et mesurée.)

conformes aux estimations, avec une forte prépondérance de la réalimentation naturelle par infiltration à travers le lit de l'Arve.

Ce calage a été testé en faisant un calcul sur une période différente (septembre 1977) où les niveaux piézométriques mesurés étaient abaissés de l'ordre de 4 m par rapport à 1969. Dans ce cas, la précision de la piézométrie calculée a été également satisfaisante. Nous n'avons cependant pas considéré ce résultat intéressant comme probant et la suite des recherches ont consisté à le comparer aux données d'autres méthodes d'étude.

Des mesures thermiques détaillées ont été exécutées, deux fois par semaine durant deux ans (octobre 1977 à octobre 1979) dans tout le réseau de piézomètres. Ces 1350 mesures de température n'ont pas répondu à notre attente, car les eaux de percolation plus froides de la rivière prennent rapidement la température du milieu souterrain et dans les zones à épaisse couverture au-dessus de la nappe et faible vitesse d'écoulement, le flux géothermique n'est pas négligeable. Dans ces zones, on observe des variations sensibles entre les points de mesure qui sont fonction de la profondeur moyenne de la partie perforée du piézomètre.

Les mesures des concentrations isotopiques nous ont également paru être une méthode de contrôle des hypothèses de calage permettant une critique efficace. Vu l'intérêt des résultats obtenus, nous en parlerons plus loin.

Enfin, pour contrôler nos nouvelles hypothèses sur la perméabilité de l'aquifère, un forage rotatif, entièrement carotté, a été implanté sur le môle supposé peu perméable de Soral. Il a été exécuté, au début de 1980, et poussé jusqu'à la profondeur de 130 m. Dès que la nappe a été atteinte à la profondeur de 76 m, des mesures de perméabilité, par petits essais de pompage à l'avancement, ont été pratiqués tous les 5 m, en collaboration avec le groupe de travail de la nappe souterraine de l'Emmental, qui mène des recherches à ce sujet dans le cadre du programme

national. Les mesures courantes par détermination des granulométries ont été aussi exécutées. Enfin, les contrastes de perméabilité ont été contrôlés par des mesures au micromoulinet avec injection d'eau dans le tube piézométrique mis en place dans le forage (\varnothing 4", $L = 113$ m). Bien que l'interprétation des mesures ne soit pas encore terminée, on peut déjà affirmer que les perméabilités mesurées sont très largement supérieures à celles utilisées localement pour le calage du modèle.

Mesures isotopiques dans la nappe de l'Arve

Malgré les difficultés instrumentales en laboratoire, le dosage de divers isotopes, deutérium, tritium, oxygène 18, et carbone 14 des carbonates, est une méthode de recherche qui prend rapidement de l'importance dans l'étude des eaux tant souterraines que superficielles. Pour résoudre le problème qui nous a été posé de contrôler les hypothèses hydrogéologiques de la nappe de l'Arve et surtout l'origine de son alimentation naturelle, nous avons procédé au dosage du tritium et de l'oxygène 18. Jusque vers 1950, les teneurs en tritium dans les eaux naturelles étaient très faibles (≤ 10 unités tritium). Dans les années 50 et 60, les expérimentations de bombes à hydrogène ont libéré des quantités importantes de cet isotope dans l'atmosphère et les teneurs des eaux pluviales ont été en forte augmentation à l'échelle mondiale. Actuellement cette teneur est en régression, avec des valeurs moyennes d'environ 60 UT dans les précipitations. La concentration dans une eau souterraine nous permet donc d'avoir une idée de l'époque où cette eau s'est infiltrée dans la nappe. La concentration de l'oxygène 18 dans les eaux de pluie varie parallèlement à la température (DANSGAARD 1964) qui varie à son tour en fonction de l'altitude du massif montagneux sur lequel tombent les précipitations. En réalité (SIEGENTHALER & OESCHGER 1980), la relation entre la température et la concentration d'oxygène 18 n'est pas aussi directe et des influences diverses peuvent apporter des modifications. Dans le cas présent, le but n'était pas de déterminer des températures de précipitation de l'eau ou altitudes de bassins récepteurs avec précision, mais un contraste évident devait exister entre les eaux de l'Arve, rivière qui draine le massif alpin du Mont-Blanc et les eaux d'infiltration locales.

Nous avons d'abord contrôlé la valeur des techniques de prélèvement d'échantillons. En effet, vu la profondeur de la nappe et le diamètre des piézomètres existants en de nombreux points, les échantillons devaient être prélevés au moyen d'un tube plongeur de petite contenance (1-2 l), descendu au treuil dans les piézomètres. Les essais effectués ont montré que le prélèvement de faible volume en piézomètre de petit diamètre permettait d'avoir des mesures fiables des teneurs isotopiques des eaux de la nappe. Quatre campagnes de prélèvements ont été exécutées en août et novembre 1978, puis avril et août 1979. Elles ont porté sur 28 points de contrôle comprenant 17 piézomètres, 8 puits d'exploitation et 3 sources alimentées par des nappes peu profondes, utilisées comme référence concernant les eaux d'infiltration actuelles. L'Arve a été contrôlée par des prélèvements hebdomadaires durant toute la période d'étude.

Les résultats sont les suivants:

- Pour l'oxygène 18 (fig. 3), l'Arve montre des valeurs $\delta^{18}\text{O}$ entre $-11,7$ et $-13,7\text{‰}$ par rapport au standard international SMOW, avec une moyenne de $-12,6\text{‰}$, tandis que l'eau de provenance

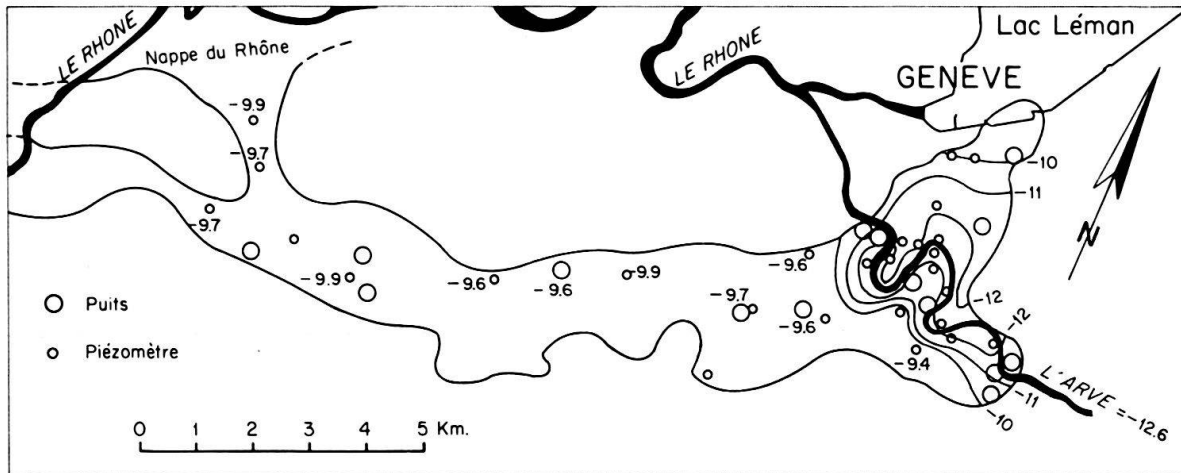


Fig. 3. Répartition de l'oxygène 18 (valeurs exprimées en ‰ de différence par rapport au SMOW).

locale, représentée par une source à Sézegnin, a des valeurs proches de $-9,5\text{‰}$. Seul un étroit secteur longeant l'Arve montre un $\delta^{18}\text{O}$ compris entre -12 et -13‰ .

Il s'agit de la région d'alimentation directe par l'infiltration de l'eau de la rivière. Sur 1,5 km au nord et 400 à 600 m au sud, $\delta^{18}\text{O}$ varie entre -12 et -10‰ , traduisant le mélange de l'eau provenant de la rivière avec des eaux d'infiltration locales. Enfin, dans la plus grande partie de la nappe, $\delta^{18}\text{O}$ est compris entre $-9,4$ et $-10,0\text{‰}$ traduisant des apports uniquement locaux sans influence de l'Arve.

Ces résultats montrent qu'une des hypothèses de calage du modèle de calcul admettant une prépondérance des apports de la rivière sur les infiltrations latérales devra être revue dans les versions ultérieures.

- Les mesures concernant le tritium sont d'interprétation plus difficile (fig. 4). Des teneurs dépassant 120 UT sont mesurées dans le secteur au nord de l'Arve, ce qui correspond à des apports datant d'il y a 5–20 ans. Près de l'Arve, des teneurs de 80 à 90 UT correspondent aux apports récents de la rivière. Vers l'ouest, on note la présence d'eaux anciennes dans les bordures de la nappe à Carouge et Veyrier.

Dans la zone centrale de Saconnex d'Arve à Arare, les teneurs dépassent à nouveau 100 UT. Par contre, dans les exutoires nord-ouest et ouest, l'hydrogéologie a de la peine à expliquer de basses teneurs descendant à des valeurs inférieures à 20 UT, ce qui porterait l'âge des eaux présentes à plus de 30 ans.

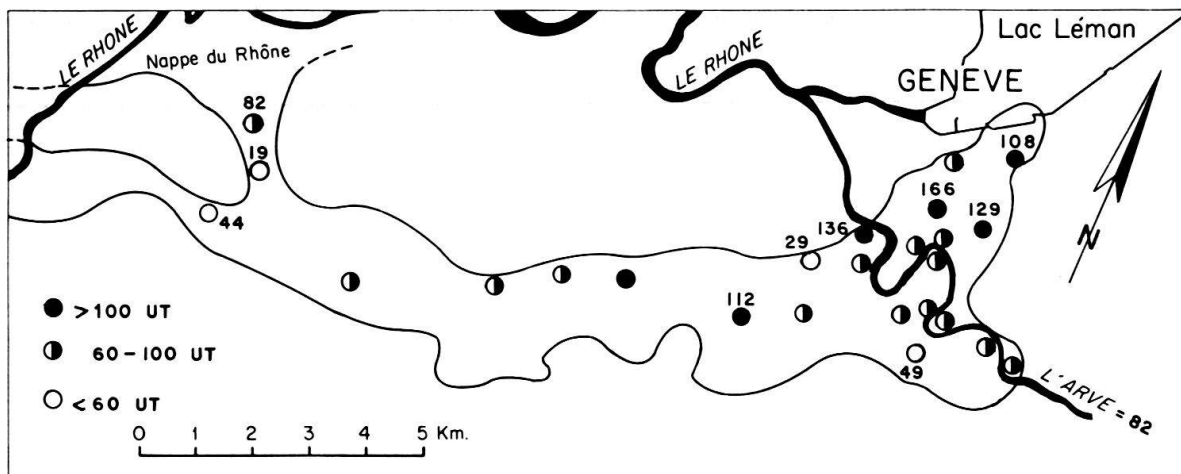


Fig. 4. Répartition du tritium. Eaux récentes (quelques années et apports de la rivière): 60–100 UT. Eaux d'âge intermédiaire (5–20 ans): > 100 UT. Eaux anciennes (plus de 20 ans): < 60 UT.

Afin d'éclaircir ce point, nous avons procédé, dans le forage de contrôle des perméabilités de Soral, à des prélèvements d'eau à l'avancement, pour pouvoir déterminer la répartition non seulement horizontale mais aussi verticale des concentrations isotopiques. Les dosages sont actuellement en cours. Les premiers résultats en tritium indiquent une stratification, avec des âges augmentant avec la profondeur, tandis que la teneur en oxygène 18 est assez constante, proche de -10‰ .

Réalimentation artificielle de la nappe de l'Arve

La seconde partie de la réunion scientifique est consacrée à la visite des installations de réalimentation artificielle mise en service en bordure de l'Arve, à Vessy, au début de 1980. Cette visite est dirigée par M. J.-J. Fuchsloch, ingénieur aux Services Industriels de Genève.

Comme nous l'avons vu plus haut, le niveau de la nappe a accusé un abaissement constant depuis 1960 et se trouve actuellement de 8 à 10 m en dessous du niveau moyen de la décennie 1930-1940. Ce phénomène s'est produit dès que les prélèvements totaux ont dépassé les 10 mio. de m^3 par an. Bien que les eaux souterraines ne fournissent que le 20% du total distribué à la population genevoise, la majeure partie provenant du lac, les autorités ont décidé, après concertation internationale avec la France, de procéder à la réalimentation artificielle de la nappe, ceci afin de conserver une diversification des ressources, indispensable à la sécurité de distribution de l'élément vital qu'est l'eau potable.

Les installations comprennent:

a) Une prise d'eau dans l'Arve, avec crépine autonettoyante édifée dans un barrage existant, suivie d'une colonne d'amenée de 323 m, de 700 mm de diamètre.

b) Une station de traitement de l'eau comportant un dessablage par hydrocyclones, un apport de chlorure ferrique pour floculation puis une filtration rapide (6 m/h) sur 6 filtres multicouches d'une surface de 378 m^2 . La masse filtrante, totalisant 1,8 m d'épaisseur, est constituée, de la base au sommet, de 20 cm de gravier, \varnothing 2-5 mm, 80 cm de sable de quartz, \varnothing 0,6-1,2 mm, 30 cm d'hydroanthracite, \varnothing 1,5-2 mm, et 50 cm de pierre ponce, \varnothing 2-3,5 mm. La filtration avec floculation sur filtre permet de ramener le taux de matières en suspension dans l'eau brute comprise entre 80 et 500 ppm à 0,3-0,8 ppm dans l'eau filtrée. Dans le réservoir de stockage de 1500 m^3 , l'eau filtrée est désinfectée au bioxyde de chlore. Le débit d'eau envoyé vers la nappe est de 630 l/s en pointe et en moyenne, compte tenu de la perte au lavage des filtres, de 500 l/s.

c) Une colonne de transport à l'installation de réalimentation de 700 mm de diamètre et 650 m de longueur.

d) Une installation d'épandage souterrain où l'eau est distribuée dans le terrain à environ 2 m de profondeur par 4800 m de tuyaux perforés qui ont été mis en place dans une zone de $30\,000 \text{ m}^2$ de surface. Cette méthode a été choisie pour éviter des puits d'injection directe de l'eau dans la nappe ou les inconvénients que comportent les bassins d'infiltration superficielle. Le dimensionnement de l'installation de réalimentation a été exécuté sur la base de mesures de perméabilité par granulométrie des graviers, méthode utilisée en première approche pour obtenir des ordres de

grandeur. Cependant, ces résultats ne peuvent être utilisés pour des calculs précis, les lois d'écoulement gravitaire de l'eau dans un milieu partiellement saturé n'ayant pas de définition mathématique simple. Nous avons procédé par méthode expérimentale en posant un tuyau perforé d'essai d'une longueur de 30 m et des piézomètres à des distances de 0,2 à 5 m de son axe. Les hauteurs de saturation locales ont été ensuite mesurées en fonction de divers débits spécifiques.

Cette expérience nous a conduit à adopter un débit spécifique moyen de 0,13 l/s par mètre de tuyau perforé, soit un débit spécifique d'infiltration dans la zone de réalimentation de 0,02 l/s par m². Compte tenu des perméabilités usuellement mesurées dans cet aquifère qui varient entre 2×10^{-2} et 1×10^{-3} m/s, ces chiffres peuvent paraître extrêmement bas. C'est oublier que nos mesures sont soit ponctuelles (petits essais de pompage, granulométrie) soit donnent des moyennes générales (essais avec puits et piézomètres) et ne sont valables que pour les perméabilités horizontales. Un aquifère graveleux ayant pour magasin des formations d'origine glaciaire présente dans le détail de nombreuses hétérogénéités de perméabilité et certainement des perméabilités verticales très différentes des horizontales. Les essais en cours démontrent que le dimensionnement choisi répond à notre attente, mais de justesse. Si des phénomènes de colmatation se manifestent, l'extension du réseau de tuyaux perforés s'avérera nécessaire.

Pour terminer, on peut signaler que les remontées de la nappe mesurées suite à la réalimentation artificielle sont proportionnellement conformes à un calcul prévisionnel effectué avec le modèle mathématique, ceci malgré les critiques que l'on peut, à juste titre, émettre sur ses hypothèses de calage.

BIBLIOGRAPHIE

- AMBERGER, G. (1978): *Contribution à l'étude du Quaternaire de la région lémanique. Résultats de quelques sondages profonds exécutés à Genève.* – *Eclogae geol. Helv.* 71/1, 193–206.
- DANSGAARD, W. (1964): *Stable isotopes in precipitations.* – *Tellus* 16, 436–468.
- MATHEY, B., MENJOZ, A., & SAUGY, B. (1974): *Modification du champ des températures de la nappe souterraine sous une raffinerie de pétrole.* – *Mém. Assoc. int. Hydrogeol.* 10/1, 94–99.
- SIEGENTHALER, U., & OESCHGER, H. (1980): *Correlation of ¹⁸O in precipitation with temperature and altitude.* – *Nature* 285/5763, 1–3.