Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 96 (1970)

Heft: 13

Artikel: Station expérimentale de réalimentation d'une nappe souterraine à Vessy (Genève)

Autor: Baroni, D.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70858

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: 12.07.2025

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

Station expérimentale de réalimentation d'une nappe souterraine à Vessy (Genève) [1]

par D. BARONI, ingénieur-conseil au Service géologique

1. Introduction

Dès la plus haute antiquité, l'homme avait compris que l'eau devait être l'objet de soins particuliers. La revue de l'Organisation mondiale de la Santé cite ce texte sanscrit datant de quatre mille ans : « ... Il faut purifier l'eau souillée en la faisant bouillir ou en la chauffant au soleil, ou en y plongeant un fer rouge... On peut aussi la filtrer à travers du sable et du gravier. » A la même époque, la civilisation crétoise possédait déjà des installations d'évacuation des eaux usées.

De nos jours, l'augmentation rapide de la population, les exigences accrues de l'hygiène, le développement de l'industrie et de certaines de ses techniques font diminuer chaque année le rapport entre les disponibilités naturelles et la demande en eau potable.

Par ailleurs, les réserves d'eau potable diminuent également du fait de l'accroissement constant de la pollution des lacs, des rivières et des puits. Le traitement des eaux de surface, devenu indispensable pour en faire des eaux potables, est de plus en plus complexe et coûteux.

Dans les pays en voie de développement, la demande s'accroît à mesure qu'augmente la pollution et le manque d'eau est souvent le premier obstacle qui freine le développement de l'agriculture et l'amélioration du niveau de vie. Dans les pays développés, ce sont les exigences de l'industrie qui prennent des proportions inquiétantes. Aux Etats-Unis, les fournitures d'eau devraient s'accroître de 45 % au cours des dix prochaines années. La consommation annuelle d'eau y est, actuellement, en moyenne, de 1000 m^3 par habitant, contre 500 m^3 en Europe, et 15 m^3 dans les pays non industrialisés.

Cette différence dans les taux de consommation s'explique aisément lorsque l'on sait qu'il faut 40 litres d'eau pour produire une boîte de conserve de légumes, 50 à 400 m^3 d'eau pour produire une tonne d'acier, 150 à 350 m^3 pour une tonne de papier, 500 m^3 pour une tonne de tissu de laine et jusqu'à 1300 m^3 pour une tonne d'aluminium.

1.2 Premières tentatives pour accroître la quantité et améliorer la qualité de l'eau de consommation

L'idée d'enrichir artificiellement les nappes d'eau souterraines n'est pas nouvelle. Déjà en 1810, dans la région de Glasgow, on creusait des galeries afin de faciliter la pénétration dans le sous-sol des eaux de la Clyde.

A Toulouse, en 1821, des ingénieurs faisaient construire un barrage à travers la Garonne pour élever son niveau, dans le seul but d'augmenter les infiltrations d'eau dans le terrain. En 1854, à Lyon, un dispositif analogue fut aménagé et, actuellement, ce sont des canaux d'infiltration, alimentés par pompage dans le Rhône, qui assurent l'apport d'eau supplémentaire dans la nappe en exploitation.

[1] Exposé présenté à la réunion de printemps 1969 de la *Société suisse de mécanique des sols et de travaux de fondations* (Neuchâtel, 2 mai 1969).

1.3 Quelques exemples d'enrichissement des eaux souterraines à l'étranger et en Suisse

En *Suède*, les premières installations de réalimentation des nappes souterraines sont construites, à Gœteborg.

On en construira, par la suite, à Falum, Luela, Boras, Helsingborg et dans beaucoup d'autres villes ; si bien qu'aujourd'hui, le quart des eaux distribuées dans les régions urbaines de la Suède provient d'un enrichissement artificiel de nappes souterraines.

En *Allemagne*, de nombreuses stations ont été construites depuis le début du siècle. La première, à Francfort, en 1908, permettait d'introduire journellement 4000 m^3 d'eau dans la nappe. En 1955, dans la plaine de la Ruhr, sur un milliard de mètres cubes d'eau distribué, un quart provenait d'eau introduite artificiellement dans le sous-sol.

Nous ne nous étendrons pas sur les multiples exemples que nous pourrions rencontrer aux *Etats-Unis* où, dans le seul Etat de Californie, on dénombrait, en 1954, 87 installations de réalimentation de nappes souterraines.

Nous citerons également, dans les pays de l'Est, les installations de Borsodszirak, près de Miskolc, en *Hongrie*. Des essais commencés en 1952 ont donné d'excellents résultats, tant en ce qui concerne le rendement que l'amélioration de la qualité des eaux souterraines (diminution de la teneur en fer notamment). Plusieurs installations sont maintenant en exploitation dans ce pays.

L'enrichissement artificiel des nappes souterraines n'est pas appliqué uniquement pour l'approvisionnement en eau potable ou sa mise en réserve pour des utilisations de pointe. Il est utilisé aussi pour s'opposer à l'envahissement du sous-sol par des eaux polluées (nappe de Croissy, à l'ouest de Paris) ou saumâtres (Hollande), ainsi que pour maintenir une certaine humidité du sol dans les régions agricoles (Donzère-Mondragon, Basse-Durance).

En *Suisse*, des installations de réalimentation et d'enrichissement de nappes souterraines existent à Neuchâtel (gorges de l'Areuse) ainsi qu'à Bâle (capacité actuelle : 160 000 m^3 par jour. Prix de revient de l'eau pompée dans la nappe enrichie artificiellement, départ usine, y compris chloration et adjonction de fluor : 12 ct. le m^3).

2. Hydrologie du Pays de Genève

Le sous-sol genevois est constitué, en majeure partie, de moraine würmienne de composition très variable (argiles, limons, sables ou graviers). La base de cette moraine est généralement moins argileuse ; quelques auteurs la désignent sous le nom d'« alluvions anciennes », et c'est principalement là que se situe l'aquifère exploitable.

Cette moraine würmienne repose sur la moraine rissienne pratiquement étanche ou, par endroits, directement sur la molasse qui affleure en certains points du canton (Peissy, Bernex, Cologny, vallons de la Roulave et du Rhône).

Sauf en certains lieux des bords de l'Arve ou du Rhône, les faciès graveleux de la moraine würmienne sont recouverts par des formations argileuses ou limoneuses imper-

méables, atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Les précipitations météorologiques n'arrivent pratiquement pas à s'infiltrer jusqu'à l'aquifère profond et ne contribuent donc pas directement à son alimentation. De ce fait, ces nappes sont d'autant mieux protégées des risques de pollution inhérents à toute agglomération humaine (hydrocarbures, déchets industriels, eaux usées, épandages de fumier ou autres engrais agricoles). Elles sont aussi protégées contre d'éventuelles retombées radioactives.

Cette particularité méritait d'être signalée, car elle justifie pleinement les dispositions arrêtées en faveur de la protection des eaux, ainsi que toutes recherches en vue d'une utilisation rationnelle de ces immenses réservoirs que constituent les nappes souterraines.

Les études récentes [1] ont permis de délimiter deux nappes principales : l'une, s'étendant en dessous du Rhône, est exploitée en majeure partie à Peney ; l'autre, dans la région sud-est du canton, passe sous l'Arve et alimente de nombreux puits de captage (fig. 1).

L'alimentation de ces nappes provient essentiellement d'infiltrations du Rhône ou de l'Arve, dans les zones où ces cours d'eau coulent sur un sol relativement perméable.

Pour la rivière Arve, qui intéresse la nappe du sud-est, cette zone de réalimentation naturelle se situe entre l'usine de Vessy, à l'aval de Sierne, et la ville de Carouge ; soit sur un parcours d'un peu moins de 4 km. Le lit mineur est pratiquement étanche, et ce n'est qu'en période de crue que la nappe est alimentée, ce qui a été mis en évidence par les piézomètres placés en bordure de l'Arve. Lors de crues exceptionnelles, une pénétration massive d'eau dans le terrain provoque, à plus ou moins brève échéance suivant leur éloignement, une élévation des niveaux dans les puits ou piézomètres de contrôle (fig. 2).

Les crues importantes sont trop rares pour provoquer, dans cette nappe souterraine, un apport égal au volume d'eau prélevé par les multiples stations de pompage. La figure 3 montre l'évolution des niveaux hydrostatiques au puits de pompage de Saconnex-d'Arve, de 1940 à 1969. Malgré de fortes élévations temporaires de niveau, la dernière ayant suivi la crue du 22 septembre 1968, on constate, en moyenne, un abaissement général de plus de trois mètres ces dix dernières années.

Il devenait dès lors nécessaire, soit de limiter les pompages, ce qui obligerait les Services industriels à étendre et renforcer leur réseau de distribution d'eau filtrée du lac, soit de rechercher les possibilités d'augmenter artificiellement les apports d'eau dans le sous-sol.

3. Etudes préliminaires

3.1 *Recherche d'un emplacement favorable*

Comme nous l'avons vu, les régions propices à des infiltrations d'eau susceptibles d'atteindre la nappe profonde sont excessivement limitées, si l'on exclut la possibilité de creuser des puits profonds à travers la moraine glaiseuse imperméable.

Dans ces limites dictées par la géologie, il fallait trouver, en dehors de l'agglomération, un site proche de l'Arve, facilement accessible et pouvant sans frais excessifs être aménagé et équipé.

Une parcelle boisée, dans la boucle de Vessy, au lieu dit *La grande Fin*, a été mise à notre disposition dès l'été 1967 ; les travaux de reconnaissance ont commencé la même année.

[1] Voir *Bulletin technique de la Suisse romande*, n° 26 du 27 décembre 1969 : *Un nouveau puits de captage profond à Troinex près de Genève*, par G. Amberger, Dr ès sc., géologue cantonal.

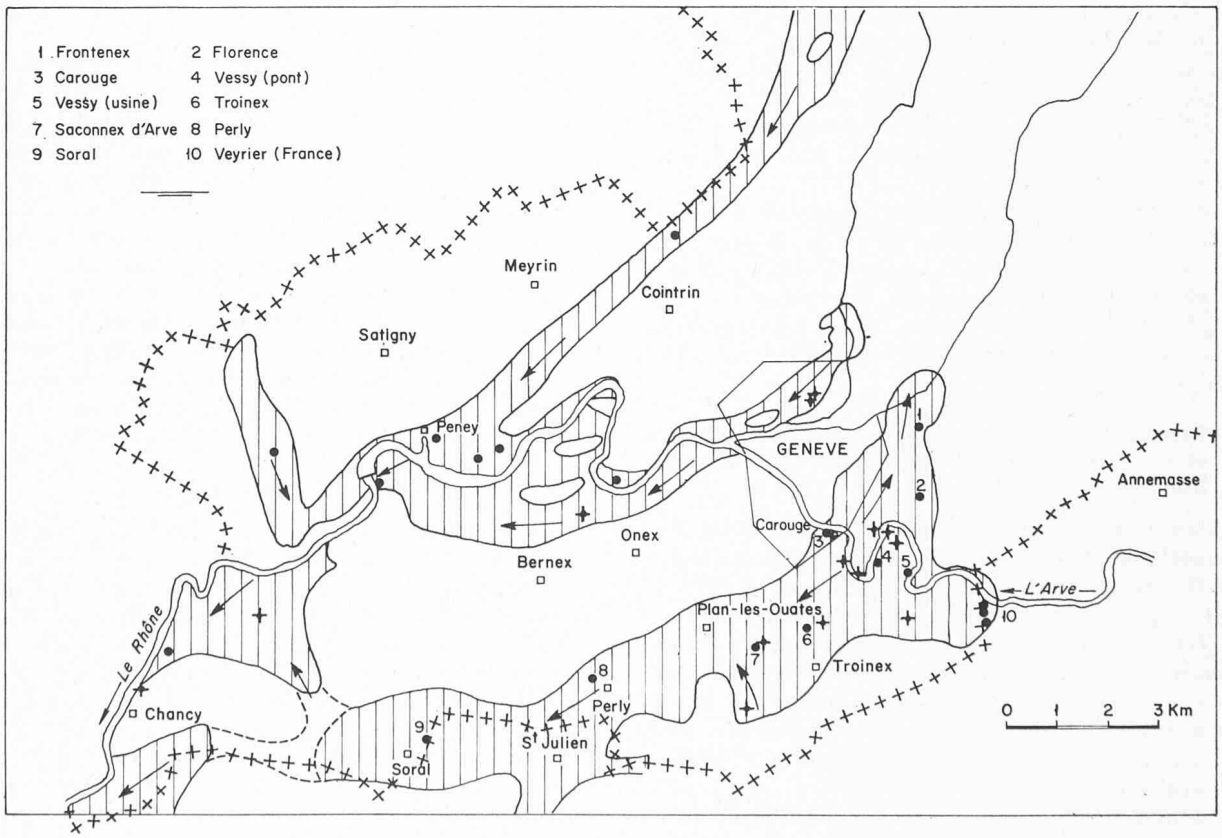

Fig. 1. — Carte schématique des nappes souterraines à Genève.
● = puits de captage. + = principaux piézomètres. —➤ = sens d'écoulement des eaux souterraines.
La station d'essais se situe entre les puits de captage nos 2, 4 et 5.

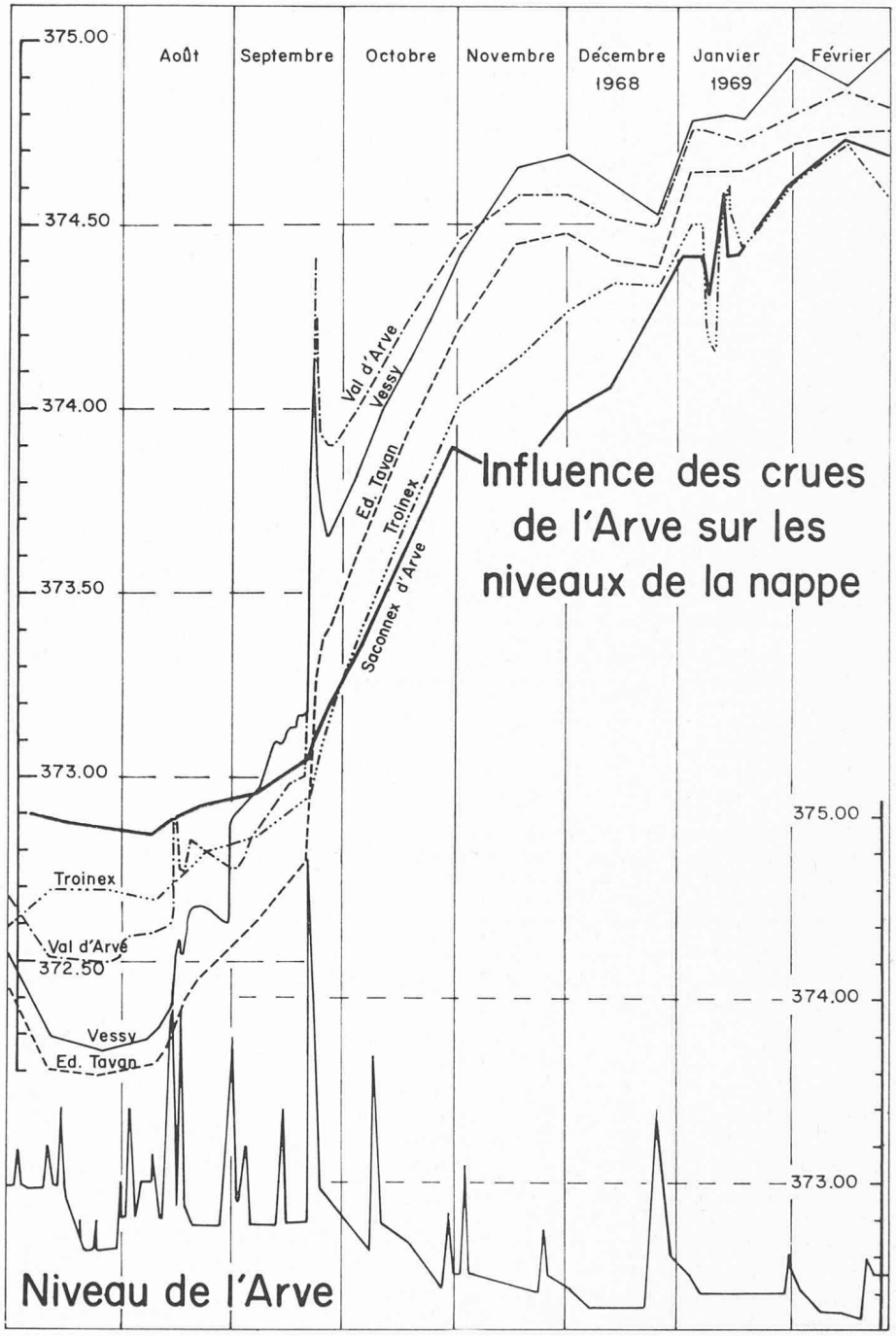

Fig. 2. — Influence des crues de l'Arve sur les niveaux de la nappe en différents lieux.

Par ordre d'éloignement des bords de l'Arve :

Val-d'Arve : piézomètre sur la rive gauche, entre les puits n°s 4 et 5 de la figure 1.
Vessy : piézomètre de la station d'essais, au nord du puits n° 4.
Ed. Tavan : piézomètre sur la rive droite. (N° 1441 à l'extrême gauche de la figure 5.)
Troinex : puits de pompage en construction, portant le numéro 6 sur la figure 1.
Saconnex-d'Arve : puits de pompage n° 7 sur la figure 1.

A remarquer : En août 1968, deux crues successives provoquent une élévation en pointe des deux limnigraphes les plus proches de l'Arve. Les ondulations de la courbe *Vessy* en septembre sont provoquées par une réalimentation artificielle conduite par intermittence. La crue exceptionnelle du 21 septembre produit une élévation de pointe sur les deux limnigraphes *Vessy* et *Val-d'Arve* et une élévation différée qui dure deux à trois mois sur les autres points de mesure (à l'exception de la courbe *Saconnex-d'Arve* qui est influencée par les pompages de cette station).

Fin décembre, une nouvelle crue fait remonter les niveaux qui commençaient déjà à baisser.

Les ondulations, en janvier 1969, des courbes *Troinex* et *Saconnex-d'Arve* furent provoquées par des essais de pompage.

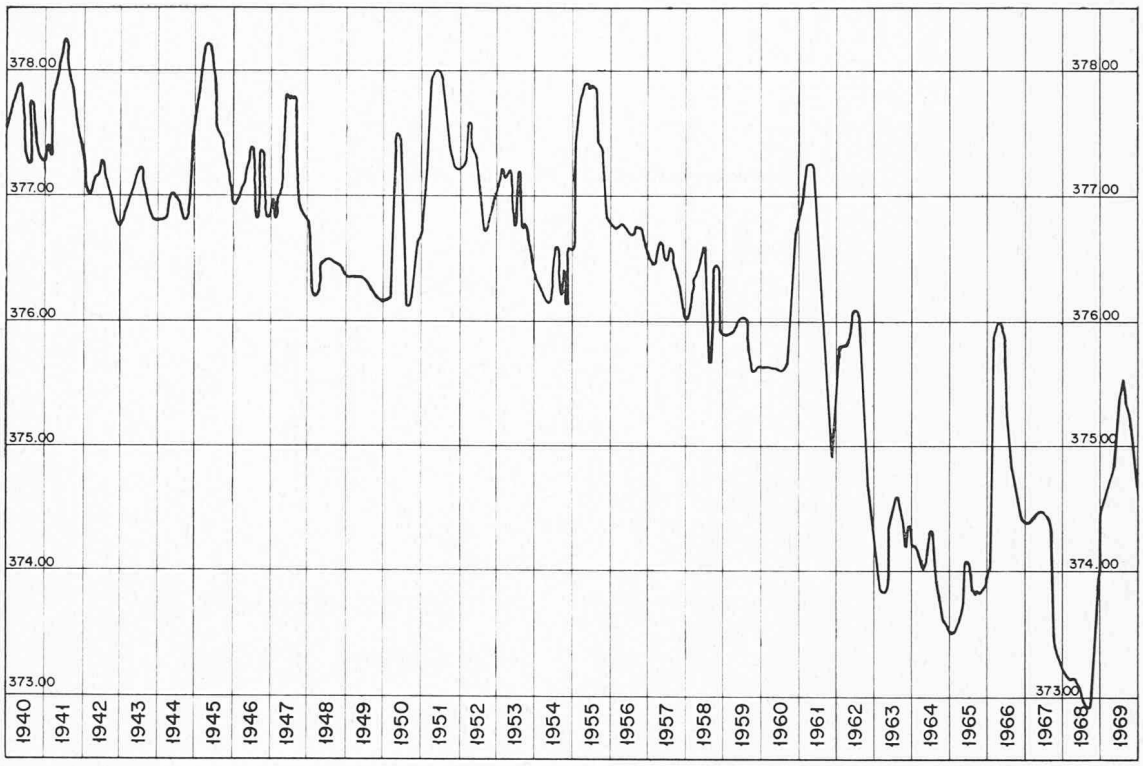

Fig. 3. — Evolution des niveaux hydrostatiques à la Station de pompage de Saconnex-d'Arve, de 1940 à 1969. Les pointes correspondent toujours à des crues plus ou moins fortes de l'Arve.

TABLEAU I

Résultats d'analyses

Eaux souterraines — moyennes d'une année (1966) pour différentes stations mentionnées sur la figure 1.
Eaux de l'Arve — exemple des variations de qualité suivant les époques.
Eaux souterraines à Vessy — en septembre 1969 : pas de réalimentation artificielle.
En octobre 1969, les prélèvements ont été effectués après une série d'essais de réalimentation artificielle. On constate notamment une augmentation de la teneur en oxygène, en chlorures et en sulfates.

		Eaux souterraines : Moyenne de l'année 1966						*Eau de l'Arve*		*Eau souterraine à Vessy*	
		Frontenex	Carouge (Stade)	Carouge (Usine)	Saconnex-d'Arve	Perly	Soral	Février 1959	Août 1959	Septembre 1969	Octobre 1969
Température	°C	11,7	9,8	11,7	12,0	12,0	11,3	2,18	10,4	10,7	11,1
Conductibilité	µS. cm^{-1} à 25°C	443	484	550	717	714	584	489	257	408	473
pH	à 25°C	7,71	7,64	7,60	7,48	7,53	7,55	8,24	8,09	7,64	7,75
Dureté totale	°Fr	22,9	25,7	28,7	38,6	36,6	29,3	27,4	11,5	21,1	24,8
Degré d'alcalinité	°Fr	16,9	20,5	22,2	29,7	26,7	24,7	18,2	8,10	17,3	17,6
Dureté permanente	°Fr	6,01	5,24	6,47	8,90	9,83	4,64	9,21	3,44	3,75	7,21
Résidu sec	mg/l	275	299	343	456	470	351	317	151	251	281
Résidu calciné	mg/l	231	259	276	348	350	279	287	112	212	244
Calcium	mg/l Ca	65,2	78,0	79,7	109	107	91,0	86,6	39,5	72,7	85,4
Magnésium	mg/l Mg	16,2	15,1	21,3	27,4	24,0	16,8	14,0	4,15	7,15	8,5
Fer total	mg/l Fe							0,30	0,05	0,08	0,13
Azote amoniacal	mg/l N	0,003	0,010	0.005	0,007	0,007	0,011	0,132	0,106	0,005	0,004
Azote nitrique	mg/l N	1,50	1,37	2,54	7,28	9,92	4,41	0,74	0,39	0,09	0,48
Chlorures	mg/l Cl	4,3	3,7	6,7	16,9	17,7	8,6	5,7	1,50	1,55	2,6
Sulfates	mg/l SO_4	50,0	44,5	49,2	42,8	43,8	25,1	70,7	31,4	35,2	64,0
Oxygène dissous	mg/l O_2	7,99	1,46	2,39	7,68	8,67	9,54	12,5	11,0	3,30	8,41
Taux de saturation	%	79,1	13,8	23,7	76,4	86,3	93,8	97,2	106	32,0	82,2
D.B.O. 5 jours	mg/l O_2	0,53	0,16	0,17	0,80	0,44	0,74	3,53	2,95	0,30	0,76
Taux de consommation	%	6,7	10,6	6,0	9,9	5,1	7,6	28,4	26,7	9,0	9,5
Oxydabilité	mg/l $KMnO_4$	1,74	1,94	1,71	1,81	2,02	1,91	7,65	2,90	2,05	2,57

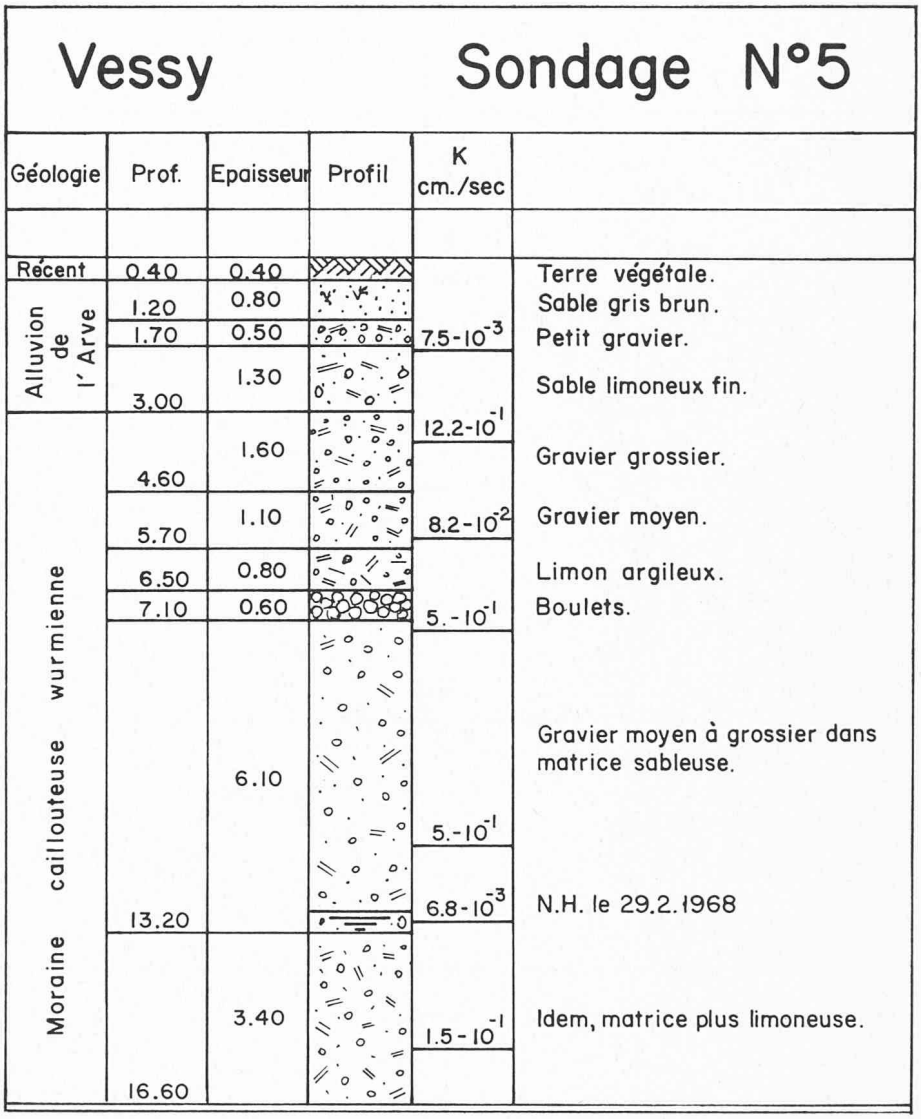

Fig. 4. — Profil géologique d'un sondage, à la Station expérimentale de Vessy.

3.2 *Composition du sol*

Sur le terrain boisé d'environ 2000 m² destiné à la réalimentation par arrosage en surface, le LABORATOIRE DE TECHNIQUES AGRICOLES ET HORTICOLES a prélevé trois échantillons de sol récent (humus et limons alluvionnaires) jusqu'au niveau du sable graveleux rencontré à 1 m - 1,40 m de profondeur.

Moyenne des résultats :

a) *Facteur pH :* 7,2 à 7,7 — sol alcalin à très alcalin pour tous les horizons.
b) *Calcaire total :* élevé (16 à 24 %).
c) *Matières organiques :* faibles (0,2 à 3,6 %) jusqu'à 70 cm de profondeur ; nulle en dessous de 70 cm.
d) *Acide phosphorique :* très pauvre (indice 0 à 3).
e) *Potasse :* 2 à 10 % de 0 à 80 cm de profondeur, 1 à 2 % en dessous.
f) *Magnésie :* très variable (0 à 5,5 %).

Il est à noter que, contrairement aux terrains agricoles voisins, cette parcelle boisée n'a pas reçu d'engrais naturels ou chimiques.

3.3 *Coupe géologique*

Les divers forages exécutés pour la mise en place de piézomètres et puits d'observation ont montré, sous 0,80 à 1,40 m d'humus et de sable limoneux, un sol très hétérogène composé de sables et graviers plus ou moins argileux, avec lentilles presque imperméables alternant avec des couches de boulets (k varie entre 1 et moins de 10^{-4} cm/s) (fig. 4).

L'altitude du terrain est, en moyenne, à la cote de 385 m ; le niveau hydrostatique de la nappe a varié entre les cotes 372,20 m (juillet 1968) à 374,90 m (février 1969) ; le fond imperméable que constitue la moraine rissienne serait à la cote d'environ 330 m.

3.4 *Eaux souterraines*

Une croyance populaire encore très répandue attribue à ces eaux phréatiques la forme d'une « rivière souterraine », voire même de grottes (dans la moraine !) recevant des eaux glaciaires.

En réalité, cette nappe, d'une surface d'environ 27 km.², est emprisonnée dans un bassin formé par la molasse ou la moraine rissienne et circule lentement dans la moraine würmienne, dont le coefficient d'emmagasinement n'est que de 1 à 10 %. Ceci explique : d'une part, les grands abaissements lors de pompages en période de sécheresse, ou au contraire les fortes élévations de niveau après une crue de l'Arve ; d'autre part, les grandes différences que l'on constate dans les résultats des analyses de l'eau [1]. (Voir tableau I.)

[1] Analyses effectuées au laboratoire du Service des eaux des Services industriels de Genève.

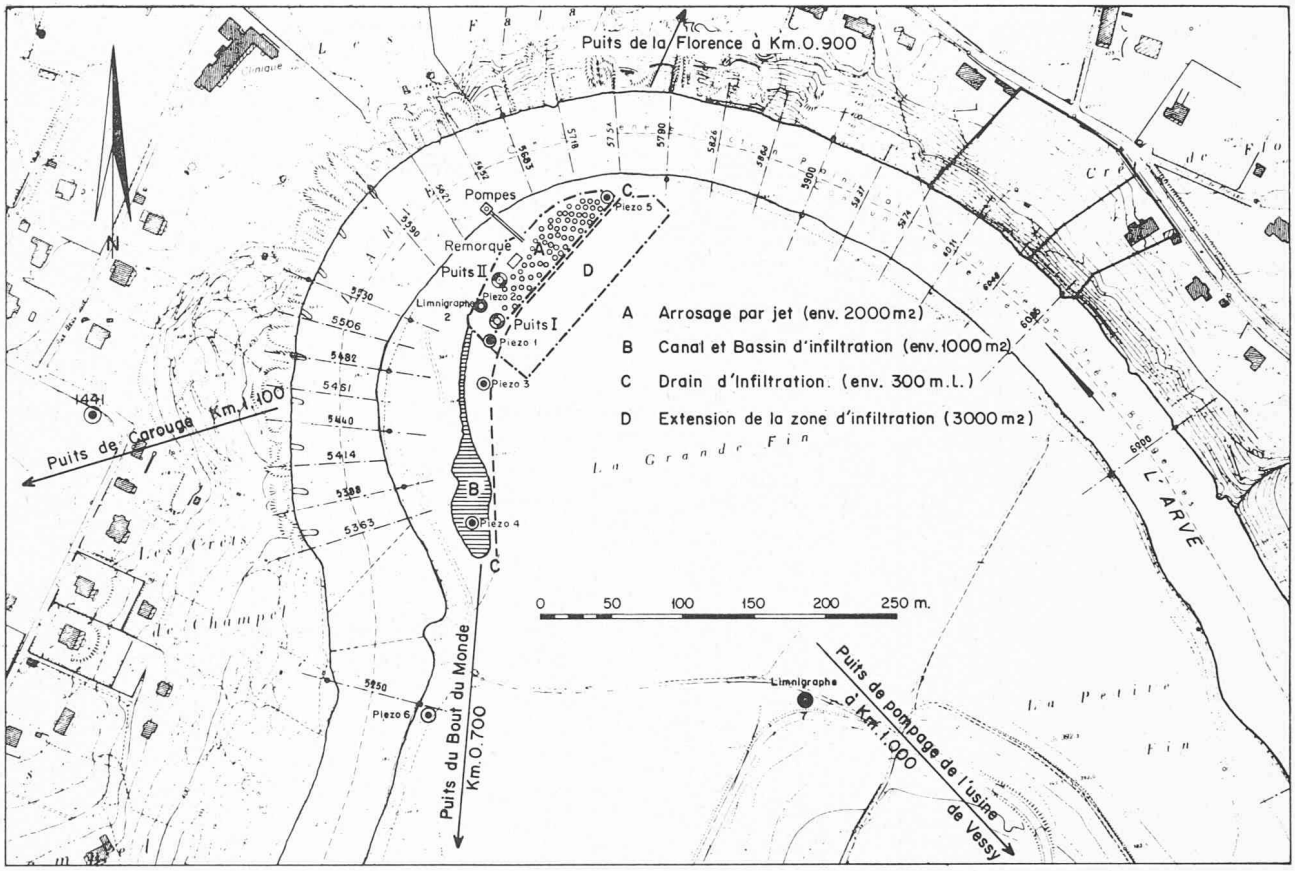

Fig. 5. — Station expérimentale de Vessy : plan général de situation.

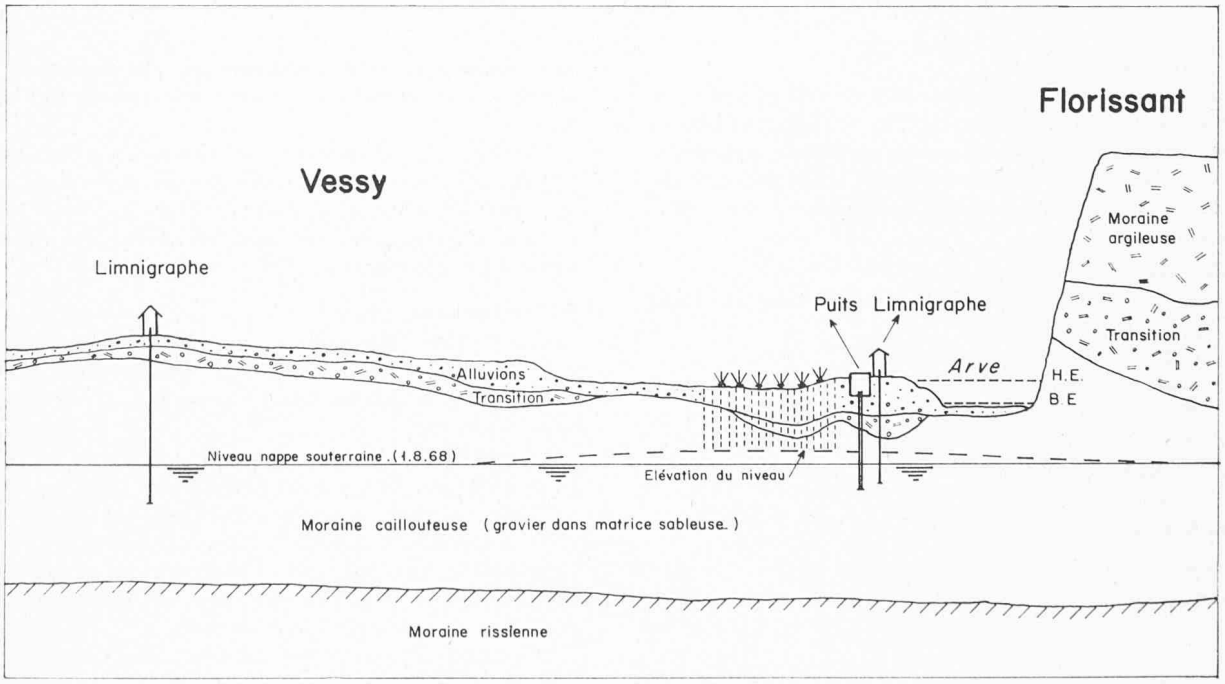

Fig. 6. — Coupe schématique de la zone des essais.

C'est ainsi, par exemple, que la teneur en chlorures, normalement comprise entre 3 et 7 mg par litre aux puits de Carouge et de Frontenex, peut atteindre 18 mg/l à Saconnex-d'Arve et à Perly ; ce qui se traduit naturellement par une élévation de la conductivité.

Un des objectifs de nos essais de réalimentation artificielle étant précisément l'étude des modifications éventuelles de la chimie des eaux souterraines, une période suffisante d'observation avant le début de la réalimentation artificielle était nécessaire. Il était également indispensable de bien connaître les caractéristiques de l'eau de l'Arve, utilisée pour cette réalimentation.

3.5 *Eau de l'Arve*

L'Arve est une rivière torrentielle, dont le bassin versant de 1980 km² a une altitude moyenne de 1400 m et comprend environ 120 km² de glaciers, soit le 6,1 % de sa superficie totale.

Dans la première partie de son cours, l'Arve reçoit différents torrents glaciaires descendant de la chaîne du Mont-Blanc et traversant presque exclusivement des terrains cristallins. Les matériaux dissous ou charriés sont d'origine siliceuse. En aval des Houches, par contre, l'influence des massifs calcaires préalpins se fait sentir et la nature chimique des produits transportés se modifie.

Le débit à Genève, qui est en moyenne de 80 m³/s, peut descendre en dessous de 20 m³/s en hiver et dépasser 600 m³/s pendant les crues. Celles-ci, provoquées par les orages ou la fonte des neiges, peuvent venir très subitement et à n'importe quelle saison. Le 21 septembre 1968, par exemple, le niveau d'eau s'est élevé de 1 m entre midi et 18 heures, pour atteindre 2,2 m le lendemain. La turbidité de l'eau se modifie avec la même rapidité, passant de quelques milligrammes par litre à 3000 ou 4000 mg/l de matières en suspension. Il était donc nécessaire de prévoir un dispositif de contrôle de la turbidité de l'eau utilisée pour la réalimentation de la nappe, et d'arrêt automatique des pompes dès que cette turbidité dépasse les valeurs admissibles.

En général, les matières en suspension dans l'eau de l'Arve sont des particules excessivement fines : 92 % est inférieur à 32 microns ; une simple décantation dans les bassins ne suffirait donc pas pour les éliminer. Une installation définitive de réalimentation devra donc comprendre des dispositifs de floculation et de filtration des eaux brutes. Pour des essais de durée limitée, on se contente d'arroser l'aire d'infiltration pendant les périodes de faible turbidité de l'Arve.

La chimie de l'eau de l'Arve varie beaucoup suivant les saisons. Le tableau I indique la moyenne des résultats d'analyse des mois de février et août 1969.

4. Dispositifs d'essais

Les figures 5 et 6 résument l'ensemble des dispositions prises pour la conduite des essais. Un premier forage (puits I) est équipé pour le contrôle continu de l'eau souterraine. Une petite pompe alimente la remorque-laboratoire.

Un deuxième forage de gros diamètre (puits II) situé à 32 m du puits I, a été aménagé l'été dernier et équipé d'une pompe de 3000 l/m. Ce puits sera utilisé, entre autres, pour l'injection de traceurs et pour des essais de réalimentation directement dans la nappe.

Sept piézomètres ont été installés dans la zone de réalimentation. Les deux derniers (P6 et P7), situés respectivement à 290 m et 345 m du puits I, ont un diamètre intérieur de 100 mm, ce qui permet l'introduction d'une pompe pour le prélèvement d'échantillons d'eau (pompe Speck 123 U de 1 CV).

L'eau brute de l'Arve est prélevée par deux pompes installées sur un radeau amarré à la rive : une petite pompe Flygt G.P. 50 de 1 CV alimente continuellement la remorque-laboratoire, tandis qu'une pompe Bibo 5 de 27 CV est utilisée pour la réalimentation. Celle-ci se fait par arrosage sur les aires d'infiltration.

Les buses d'arrosage ont dû être construites spécialement : elles ont un gros orifice de 10 mm de diamètre, qui ne risque pas de se boucher ; une pression de 1 à 2 kg/cm² suffit pour produire une pluie fine qui assure une oxygénation optima de l'eau avant son infiltration dans le sol. Le débit de chaque buse varie de 20 à 26 l/min pour une pression comprise entre 1,5 et 2,5 atm. 90 de ces buses ont été disposées sur une surface d'environ 2000 m² ce qui, avec la pompe et le réseau de canalisations installés, permet de débiter 140 m³/h (fig. 7).

Fig. 7. — Réalimentation par arrosage avec de l'eau pompée dans l'Arve.

5. Appareils de mesure

Les essais sont conduits, en première phase, avec des volumes d'eau relativement très faibles (140 m^3/h). De plus, certains puits de pompage de la Société des Eaux de l'Arve sont à moins d'un kilomètre de notre station d'essais. Il était donc nécessaire de suivre, avec la plus grande attention, toutes les conséquences que pourrait avoir l'injection artificielle d'eau de rivière dans la nappe souterraine.

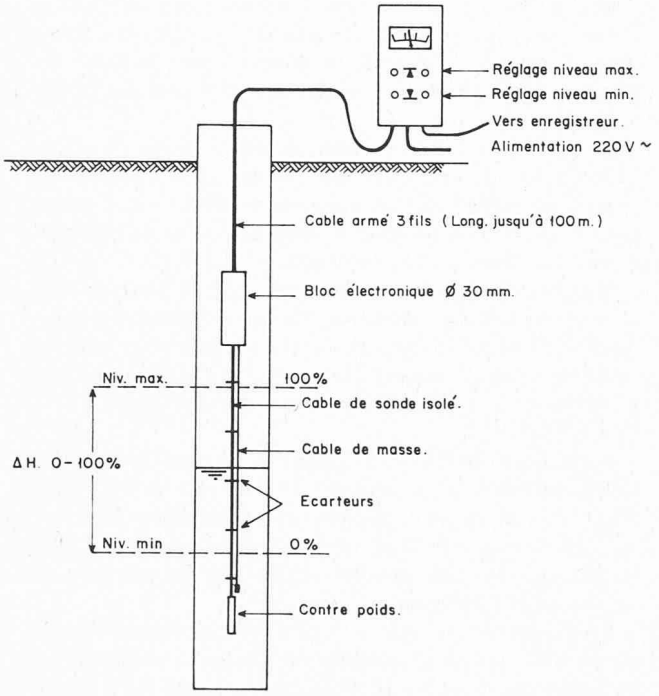

Fig. 8. — Station expérimentale de Vessy : Schéma d'une sonde capacitive pour l'enregistrement des niveaux de la nappe.

Des appareils de précision raccordés à un enregistreur à douze pistes ont été installés dans une remorque de chantier transformée en laboratoire (fig. 10 et 11).

5.1 *Mesure des niveaux*

Les niveaux de la nappe sont observés dans une dizaine de piézomètres et nous avons expérimenté quatre types différents d'appareil :

a) Les limnigraphes ordinaires du type P 10, dont le flotteur a 40 mm de diamètre.

b) Le limnimètre sans tambour enregistreur, mais avec résistance variable pour télétransmission des niveaux. Cet appareil, du type H.W.K. A.P., peut fonctionner avec un flotteur de 23 mm seulement, ce qui permet de l'utiliser dans les piézomètres de petit diamètre, à condition toutefois que le tube soit parfaitement vertical, ce qui n'est pas toujours le cas.

c) Nous avons aussi installé un transmetteur de niveaux Helios. Le flotteur est remplacé par un corps plongeur de la longueur de l'amplitude maximum des niveaux à mesurer. Ce plongeur est suspendu à un ressort qui est plus ou moins tendu suivant la valeur de la poussée d'Archimède et déplace un noyau dans une bobine, faisant varier ainsi le courant induit. Cet appareil doit également fonctionner sans frottement, donc être placé dans un tube parfaitement vertical.

d) Nous avons enfin essayé un appareil, d'une conception toute différente, vendu sous le nom de *Silomètre* par la maison Endress & Cie.
La détection du niveau d'eau se fait au moyen d'une sonde capacitive formée de deux fils qui plongent dans l'eau : les variations de niveau produisent des variations de capacité de l'ensemble et se traduisent par une variation de courant proportionnelle au niveau de remplissage du piézomètre. On peut régler les limites inférieures et supérieures à prendre en considération et le silomètre indique en pour-cent le niveau entre ces deux limites (fig. 8).

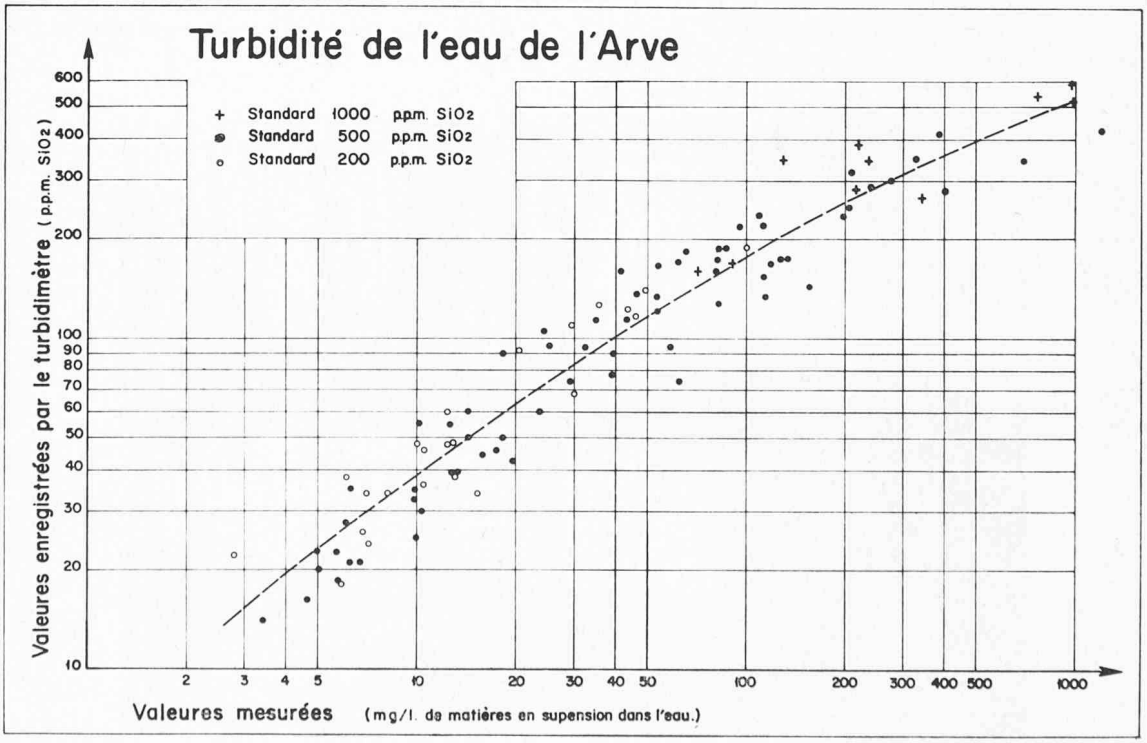

Fig. 9. — Station expérimentale de Vessy : Courbe de l'étalonnage du turbidimètre Sigrist pour l'eau de l'Arve.

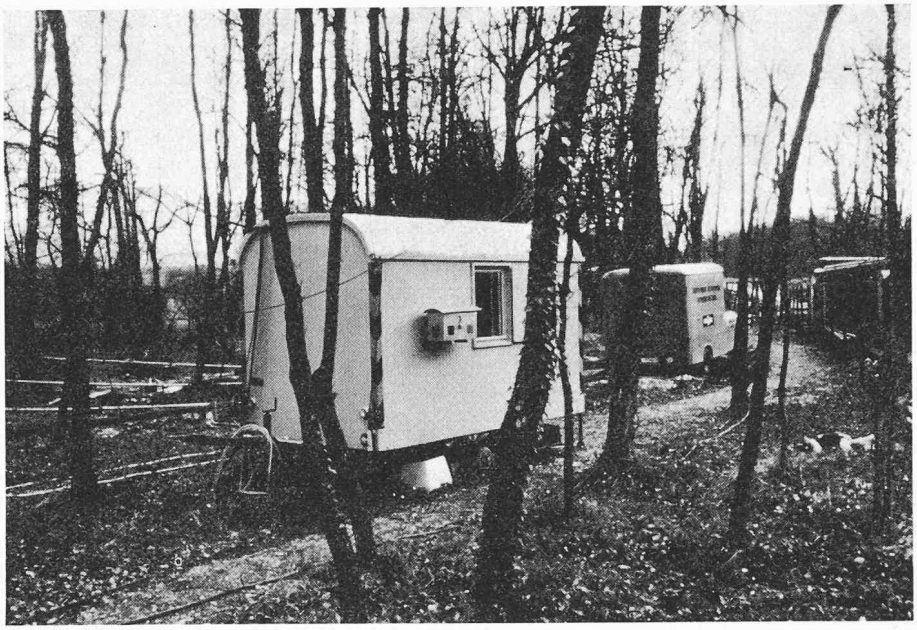

Fig. 10. — Station expérimentale de Vessy : Remorque-laboratoire.

On évite ainsi les aléas tels que frottement du flotteur, blocage par le gel, glissement du câble sur la poulie, etc. Il semble que la précision de mesure soit excellente, tout au moins pour les sondes de faible longueur (dans notre cas : 3 m). De plus, la sonde peut facilement être introduite dans un tube de 2″ qui n'a pas besoin d'être rigoureusement vertical.

Ces études des niveaux de l'eau ont permis de déterminer l'importance de la réalimentation naturelle qui s'opère à chaque crue de l'Arve (excepté en hiver lorsque le terrain est gelé), ainsi que les déformations de la surface de la nappe sous l'influence de la réalimentation artificielle.

5.2 *Mesure des températures*

La température de l'eau de l'Arve varie entre 0 et 12°C, alors que la température de la nappe souterraine se maintient entre 9 et 12°C. Cependant, en bordure de l'Arve et notamment à Vessy, la nappe se refroidit davantage à la fin de l'hiver.

Trois thermomètres à résistance équipent notre station d'observation : l'un plonge dans l'eau de l'Arve, le deuxième dans l'eau de la nappe au puits I et le troisième est utilisé à volonté sur place ou pour des mesures en d'autres lieux, puisqu'il peut se raccorder à un appareil portatif.

Certains appareils de mesure ayant donné des résultats influencés par la température ambiante du local, nous avons été très heureux de pouvoir enregistrer simultanément les températures ambiantes, afin de prouver aux fournisseurs que leurs appareils n'étaient pas tout à fait au point.

5.3 *Mesure de la conductivité*

En plus des analyses d'échantillons d'eau prélevés dans l'Arve et dans la nappe, deux détecteurs sont utilisés pour l'enregistrement de la conductivité, ce qui permettra de situer dans le temps une modification brusque de la chimie de l'eau.

Indépendamment de toute réalimentation artificielle, des

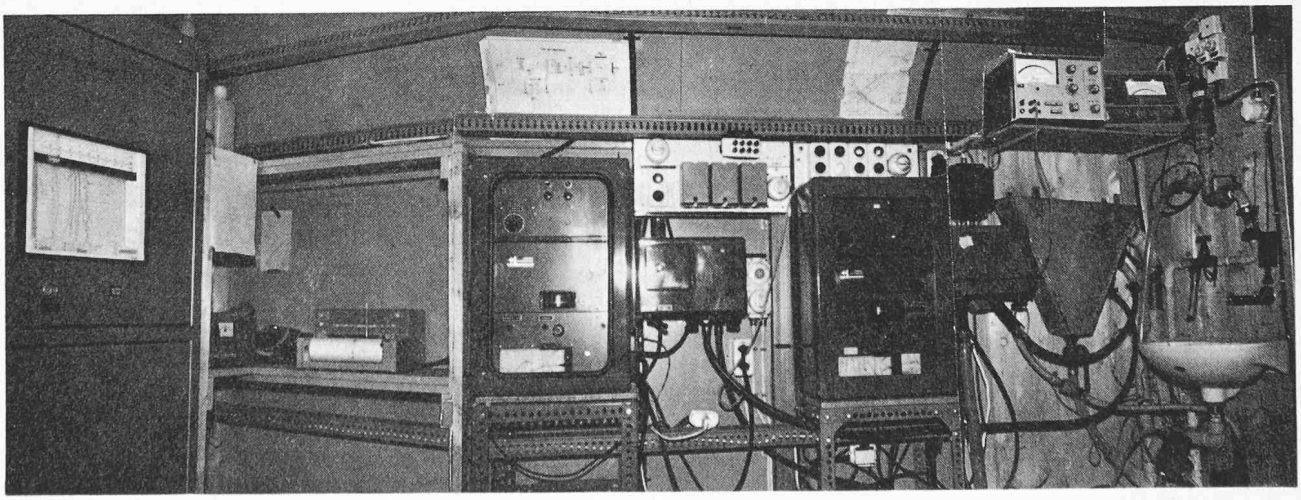

Fig. 11. — Station expérimentale de Vessy : Aménagement intérieur de la remorque-laboratoire.

De gauche à droite : Enregistreur Polycomp à 12 pistes ; enregistreur Labograph ; photomètre à fluorescence pour la détection des hydrocarbures ; turbidimètre.
Sur l'étagère en haut à droite : Conductivimètre et pH-mètre ; en dessous : réservoir alimenté en eau brute de l'Arve.
Au-dessus du lavabo : Ensemble à circulation pour la mesure de pH, alimenté en eau de la nappe souterraine qui est pompée dans le puits I.

fluctuations saisonnières de la conductivité de l'eau de l'Arve et de l'eau souterraine ont été décelées et il faudra naturellement en tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

La difficulté dans ces mesures continues de la conductivité de l'eau réside principalement dans le choix de cellules de mesure appropriées, facilement nettoyables et ne se polarisant pas. Les deux détecteurs mentionnés ci-dessus nous ont été fournis par la maison Camille Bauer, et sont raccordés directement à l'enregistreur. La fréquence de mesure est de 50 Hz et l'influence de la température est compensée automatiquement par un thermomètre à résistance.

Comme appareil de contrôle et pour l'essai de différentes autres cellules de mesure, nous avons dû installer un conductivimètre Philips PW 9501/01. Cet appareil, qui utulise à volonté des fréquences de mesure de 200 ou 2000 Hz, permet un réglage de la constante de la cellule de mesure entre 0,01 et 30 cm^{-3} et un réglage du coefficient de température compris entre 1,3 et 3,1 % par degré centigrade.

5.4 *Contrôle de la turbidité*

Les brusques variations de turbidité de l'eau de l'Arve nous ont imposé l'étude d'un dispositif d'arrêt automatique de la pompe, afin d'éviter un colmatage trop rapide de l'aire de réalimentation.

Après plusieurs mois d'essais, nous avons choisi un turbidimètre Sigrist UP 51 B2 avec corps de mesure 5 TYF3 à cuvette, dans laquelle l'eau circule continuellement. Un rayon lumineux, envoyé obliquement dans cette cuvette, est diffusé par les particules en suspension et est capté ensuite par une cellule photo-électrique.

L'intensité de cette lumière diffusée ne dépend pas seulement de la quantité de particules en suspension dans l'eau, mais aussi de leur composition, forme, grosseur, teinte et indice de réfraction.

Les appareils Sigrist sont étalonnés conformément aux normes allemandes, en mg par litre de poussière de silice (1 mg si O_2 par litre d'eau distillée = 1 ppm ou part par million).

De fréquentes analyses faites par le LABORATOIRE DE L'OFFICE FÉDÉRAL POUR L'ÉCONOMIE HYDRAULIQUE nous ont permis d'établir une corrélation entre les valeurs théoriques enregistrées par l'appareil, en ppm Si O_2, et les résultats des analyses (fig. 9).

Une certaine dispersion des résultats est inévitable, vu les origines très diversifiées des eaux de l'Arve.

5.5 *Photomètre à fluorescence pour la détection d'hydrocarbures dans l'eau*

Des pollutions accidentelles par déversements d'huiles ou d'hydrocarbures sont fréquentes. Nous avons donc aussi installé un dispositif d'arrêt immédiat de la pompe de réalimentation dès l'apparition de telles pollutions.

Le détecteur d'hydrocarbures, construit par la maison Sigrist, est assez semblable aux turbidimètres, mais il utilise des rayons ultraviolets produits par une lampe à vapeur de mercure. La fluorescence, émise par certaines molécules lorsqu'elles réfléchissent les rayons lumineux de la lampe à vapeur de mercure, est mise en évidence par une série de filtres. L'étalonnage dépend essentiellement des sortes d'huiles ou d'hydrocarbures contenus dans l'eau ; il n'est donc pas possible d'exprimer quantitativement le degré de pollution lorsqu'on ne connaît pas la nature de cette pollution. Cet appareil a une très grande sensibilité, qui suffit largement pour le but qui lui est attribué.

5.6 *Enregistreurs*

Afin de faciliter le dépouillement des résultats de mesure, un appareil Polycomp 2 à douze pistes enregistre les principales valeurs mesurées (températures, conductivités, niveaux de l'Arve et de la nappe, turbidité, arrêt et mise en marche de la pompe de réalimentation, etc. (fig. 11).

Pour des recherches spéciales, un Labograph E 478, à zéro décalable, permet d'enregistrer des tensions comprises entre 1 mV et 110 V ou des courants de 0,01 à 100 mA.

Cet appareil doit nous permettre de suivre, dans le temps, de faibles variations du facteur pH ou de la conductivité de l'eau lors d'essais avec des traceurs chimiques par exemple.

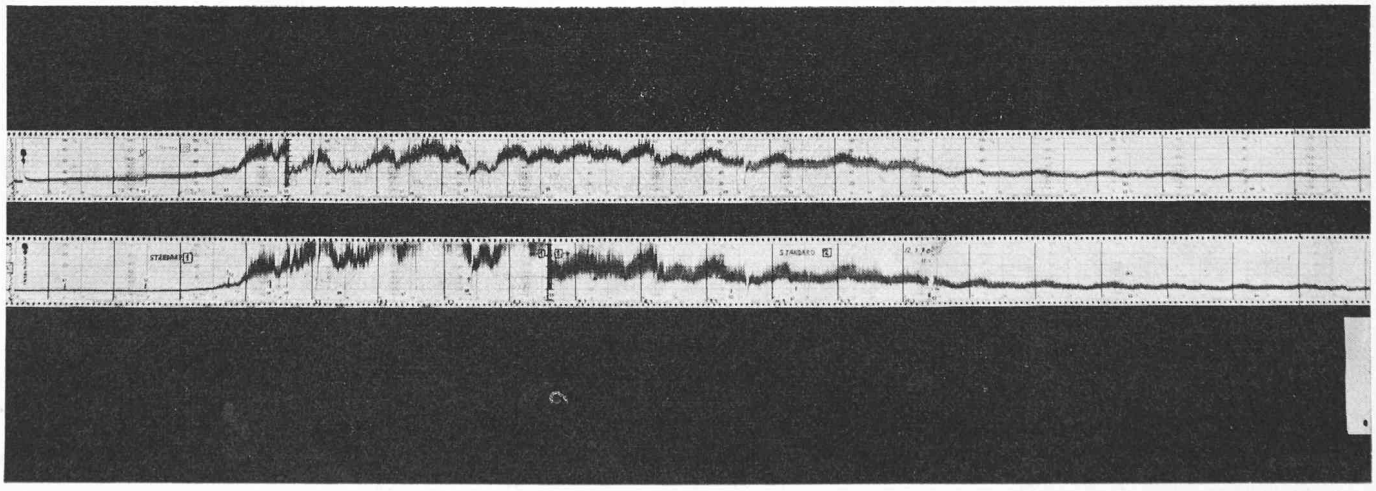

Fig. 12. — Enregistrement pendant 21 jours des traces de fluorescéine détectées par les appareils Sigrist.

a) Turbidimètre ordinaire avec standard 10 ppm, puis, dès le 4e jour, 20 ppm.

b) Photomètre à fluorescence avec standard no 1, puis no 2 dès le 8e jour.

Les traces de fluorescéine apparaissent le 3e jour, à raison de *1,5 ng/ml*. Elles atteignent, le 8e jour, *22,9 ng/ml*.

(Echantillons analysés au laboratoire de l'Ecole de chimie.)

● Injection de 700 g de fluorescéine dans le puits II, situé à 32 mètres du puits I d'observation.

| Périodes de 24 heures.

Modification de l'échelle par échange du standard de l'appareil.

6. Essais effectués

Les travaux, à Vessy, ont commencé en automne 1967. Dès l'achèvement des premiers puits et piézomètres, nous avons procédé à des essais de rabattement de la nappe et d'arrosage du sol.

L'infiltration, en surface, était de l'ordre de 800 mm/jour, et la perméabilité moyenne K de $2 \cdot 10^{-1}$ cm/s.

Ces données servirent à dimensionner les installations, qui furent montées en 1968.

L'inondation provoquée par la crue exceptionnelle de septembre nous obligea d'interrompre les essais d'arrosage jusqu'à ce que le niveau de la nappe, qui était monté de plus d'un mètre en quelques jours, se soit stabilisé. Si cette inondation intempestive a retardé le déroulement de nos essais, elle aura par contre permis de démontrer l'efficacité de la filtration naturelle à travers le terrain. Après cette réalimentation massive par de l'eau polluée au plus haut degré, c'est à peine si, dans quelques puits situés en bordure de l'Arve, on a constaté un accroissement passager du nombre de germes.

Les dépôts, laissés par l'inondation, ont provoqué un colmatage du sol et le taux d'infiltration a diminué de moitié, ce qui nous obligea à limiter les débits journaliers de l'arrosage. Des mesures provisoires ont été prises et l'aire d'infiltration a été accrue par la construction de canaux et la pose de drains.

7. Projets

Au début de 1970, on prévoit quelques essais avec des traceurs chimiques ($Ca\ Cl_2$) et avec de la fluorescéine (fig. 12).

Dès le mois de mars, la réalimentation se fera avec des débits plus importants, sur une parcelle de 3000 m² nouvellement aménagée.

Enfin, différents systèmes de filtres seront étudiés pour éviter un colmatage trop rapide. Un traitement approprié de l'eau brute permettrait de réalimenter la nappe par quelques puits seulement, ce qui réduirait considérablement la surface d'une installation définitive, dont le débit devrait être au moins dix fois celui de notre installation expérimentale.

8. Conclusions

A Genève, suivant les quartiers, les habitants sont alimentés soit par les Services industriels, dont le 90 % de la production d'eau provient du lac et 10 % des nappes souterraines, soit par la Société des Eaux de l'Arve qui, elle, n'utilise que les eaux souterraines.

Les premiers se plaignent parfois d'un excès de chlore et d'un goût désagréable en été. Chez les seconds, on voit plus fréquemment la carafe d'eau fraîche sur la table, mais par contre leurs casseroles et leurs bouilleurs s'entartrent.

Une réalimentation massive de la nappe souterraine provoquerait probablement un abaissement de la dureté de l'eau et permettrait aux Services industriels — pour qui le lac restera toujours la ressource principale et la seule qui permette une extension illimitée — de maintenir, dans une partie de son réseau de distribution, une proportion non négligeable d'eau en provenance de la nappe souterraine.

La technique de la réalimentation artificielle est maintenant pratiquée dans le monde entier. Elle permet de rendre à des eaux polluées de surface les qualités d'une eau souterraine. En outre, le sol forme un immense réservoir naturel et, dans notre cas, il transporterait sans frais des volumes considérables d'eau à des dizaines de kilomètres. Un enrichissement artificiel de la nappe assurerait aussi une exploitation plus rationnelle des stations de pompage existantes, dont l'une a déjà dû être reconstruite et approfondie, du seul fait de l'abaissement de niveau de la nappe.

Plusieurs installations importantes de réalimentation, telles celles de Francfort-sur-le-Main (capacité : 30 000 m³/j) et Croissy près de Paris (capacité : 100 000 m³/j), font subir à l'eau brute de rivière un traitement complet avec floculateur, charbon actif, stérilisant, si bien que l'eau, avant son injection dans le sol a déjà, théoriquement tout au moins, les qualités d'une eau potable. Il n'en reste pas moins que cette eau contient, malgré tous les traitements subis, des traces non négligeables de produits divers résultant de la dégradation bactérienne, de la pollution organique et de l'utilisation constamment accrue de pesticides, détersifs, colorants, hydrocarbures, etc. Ces traces, dont la réalité est constatée par les laboratoires, provoquent un goût et une odeur désagréables et sont considérées comme une nuisance à éviter autant que possible. [1]

En outre, les risques de pollution radio-active des eaux de surface ne peuvent plus être ignorés. Si les eaux souterraines sont de toute façon à l'abri d'une contamination *directe* par des pluies radio-actives, des expériences, en Hollande, ont montré que ces eaux de pluie perdaient la plus grande partie de leur radio-activité en s'infiltrant dans le terrain.

Par nécessité quelquefois, mais le plus souvent pour des raisons de sécurité, d'économie et de commodité, il semble bien qu'en Suisse également l'on s'achemine vers une utilisation accrue des nappes souterraines, enrichies artificiellement au besoin, partout où les conditions hydrogéologiques le permettront.

C'est là une raison de plus d'appliquer avec la dernière rigueur toutes les mesures de protection des eaux souterraines.

[1] Voir : « Lutte contre la pollution des eaux, recherches actuelles de l'A.N.R.T. », sujet 5 : *La lutte contre la micropollution*, par Cyril Gomella. Ed. Eyrolles, Gauthier-Villars 1970.

Fig. 7, 10 et 11 : photos de l'auteur.
Fig. 12 : photo Boissonnas-Borel.

Adresse de l'auteur :
D. Baroni, Service géologique du Cadastre
Case postale 36, 1211 Genève 8.

Bibliographie

Traité de béton armé. — Tome XI : Constructions diverses, par *A. Guerrin*, ingénieur, professeur à l'Ecole des travaux publics. Paris, Dunod, 1969. — Un volume 15 × 24 cm, XI + 411 pages, 450 figures. Prix : broché, 85 F.

Le onzième tome de ce traité présente le béton armé sous un triple aspect théorique, expérimental et pratique. Il étudie successivement les plongeoirs, les cheminées, les réfrigérants, les silos, les ouvrages maritimes et fluviaux, les tunnels.

Comme dans les volumes précédents de la collection, les questions de technologie sont d'abord traitées. De nombreuses méthodes de calculs, aussi bien théoriques que pratiques, en usage tant en France qu'à l'étranger, sont ensuite proposées. Leurs avantages et leurs inconvénients sont également mis en lumière. Enfin, les résultats des essais de laboratoire réalisés récemment sont indiqués.

De nombreux exemples de calculs sont proposés pour illustrer les méthodes étudiées.

Ce traité intéresse les ingénieurs-conseils, les ingénieurs des bureaux d'études des entreprises et ceux des administrations de l'équipement, ainsi que les élèves des écoles d'ingénieurs.