Géologie Alpine, t. 54, 1978, p. 25-66

La nappe de la plaine de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble *

par Jean-Claude FOURNEAUX **

RÉSUMÉ. — L'ombilic de Grenoble, entre Albertville en Savoie et Rovon à l'aval de Tullins, représente une unité hydrogéologique où les modes d'alimentation de la nappe et les conditions de circulation des eaux souterraines montrent partout des caractères assez semblables.

L'alimentation de la nappe se fait pour une part importante par les apports des versants et en particulier des cônes de déjection, mais l'Isère, l'Arc et le Drac interviennent aussi de façon très conséquente dans certaines zones.

Il est possible, à partir des mesures piézométriques et des données des analyses chimiques de délimiter des zones latérales où l'alimentation des versants est prépondérante et une zone axiale où la nappe est en relation étroite avec l'Isère. Cette zone axiale est le siège d'échanges importants entre la nappe et la rivière. La nappe reçoit les eaux de l'Isère lors des crues. Ces eaux viennent se mélanger au sein des alluvions qui constituent l'aquifère. Elles y acquièrent souvent une minéralisation complémentaire en raison de leur agressivité. Lorsque la rivière baisse, elle se met à drainer la nappe.

Malgré la minéralisation assez élevée, il y a dans l'ensemble de l'ombilic de Grenoble, des ressources importantes dont une partie seulement est actuellement exploitée.

HISTORIQUE

La nappe de la plaine de l'Isère a été exploitée bien avant d'être étudiée. L'histoire du Grésivaudan comme de la Combe de Savoie est une longue lutte pour la conquête et la défense de terres cultivables. Des digues étaient construites pour se protéger des crues et des canaux de drainages, les « Chantournes » du Grésivaudan, creusés pour abaisser la nappe et permettre la culture.

Les digues comme les canaux de drainages ont modelé la nappe. Elles sont responsables des conditions d'alimentation et de circulation de la nappe pour une part importante.

Depuis plusieurs siècles, de nombreuses tentatives ont été faites pour régulariser le cours de la rivière, afin de limiter les dégâts causés par les crues et d'augmenter la surface des terres cultivables. Ces travaux, souvent menés par des particuliers ou de petites collectivités avaient pour résultats de repousser la rivière chez le voisin d'en face.

En 1848, un réseau de digues cohérent est achevé entre Albertville et la frontière de la France * aussi bien sur l'Isère que sur la partie aval de l'Arc. L'effet de ces travaux ne tarde pas à se faire sentir.

* La Savoie n'est rattachée à la France que depuis 1860.

* Cet article est tiré du deuxième chapitre de la thèse de Doctorat d'état de J.-C. FOURNEAUX, intitulée : « Etude des échanges nappe-rivière — la nappe de la plaine de l'Isère dans l'Ombilic de Grenoble ».

** U.E.R. des Sciences de la terre, Institut Dolomieu, Hydrogéologie.

La longueur du cours de l'Isère a diminué, la pente a donc augmenté. L'érosion régressive provoque un enfoncement du lit mineur entre les digues et un abaissement corrélatif du niveau moyen de la nappe.

D'importantes surfaces sont ainsi gagnées à l'agriculture. L'Arc ne vient plus rejeter l'Isère aux pieds des Bauges. Le lac temporaire qui se formait à l'aval de Grésy-sur-Isère disparaît de façon définitive.

En Grésivaudan aussi les effets de cet endiguement se font sentir, mais d'une façon nettement moins agréable. Les crues, canalisées en Savoie, viennent s'épancher en Grésivaudan provoquant d'autant plus de dégâts que les digues y sont hétérogènes et disposées de façon anarchique.

Il faudra attendre 1948, soit un siècle, pour voir achever un réseau cohérent de digues dans le département de l'Isère. Cet endiguement se fait sans que l'on apporte de grandes modifications au tracé du lit de la rivière, c'est-à-dire sans changement de la pente de celle-ci. L'influence de ces digues sera minime sur la nappe. Les prélèvements de matériaux, dans le lit même, compensent les apports.

Mais les choses vont s'accélérer. Les prélèvements de graviers et galets augmentent surtout pour la construction de la voie expresse, Grenoble-Chambéry. La coupure de la boucle de Bois-Français est faite en 1968. On voit alors la rivière s'enfoncer entre ses digues comme elle l'avait fait en Savoie il y a 120 ans. L'érosion régressive due à cette coupure et aux prélèvements de matériaux se fait sentir jusqu'à Montmélian... (B. COUTURIER et J.-C. FOURNEAUX, 1977).

Sur le Drac, le schéma est le même. La canalisation avait provoqué dans un premier temps une remontée du lit, puis les prélèvements de matériaux ont fini par dépasser les apports et le lit s'est enfoncé. On suit très bien à Rochefort les différentes étapes de cette histoire, et ses répercussions sur la nappe qui alimente la ville de Grenoble en eau potable.

Il est possible, aujourd'hui, de présenter une analyse complète de l'hydrogéologie de la plaine de l'Isère. De nombreuses études partielles ont été menées tant par les chercheurs de l'équipe d'Hydrogéologie de l'Institut Dolomieu que par les différents services publics concernés par l'aménagement de la vallée. Tous ces résultats, complétés par des mesures nombreuses et par des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe, permettent de présenter, aujourd'hui, une analyse complète des caractéristiques hydrogéologiques de cette zone.

LES FACTEURS HYDROLOGIQUES

L'étude hydrogéologique d'une plaine comme celle de l'Ombilic de Grenoble nécessite la connaissance des facteurs hydrologiques principaux. Même s'il n'est pas question, ici, de dresser un bilan, l'influence de la pluviométrie, de l'évapotranspiration et du ruissellement va se faire sentir sur la nappe. Compte tenu de la superficie de la zone étudiée, de sa morphologie et de sa répartition géographique, les autres facteurs météorologiques (température, vents, pressions atmosphériques et ensoleillement) n'ont pas été abordés dans le cadre de ce travail.

Le Grésivaudan et la Combe de Savoie appartiennent à une zone des Alpes soumise aux influences parfois contradictoires de plusieurs climats de types différents. Bien que la limite naturelle entre les Alpes du Nord et celles du Sud passe au col de la Croix Haute, les influences méditerranéennes qui caractérisent ces Alpes du Sud, viennent se faire sentir bien au-delà de Grenoble.

Cette situation climatique va se traduire par une pluviométrie répartie de façon assez régulière d'une année sur l'autre avec des maximas qui peuvent se trouver en mars, avril, mai, juillet, août, octobre, novembre ou décembre. Mais cela intervient aussi sur les débits tant de l'Isère que de ses deux affluents les plus importants : l'Arc et le Drac.

Pour les débits, un autre élément intervient. Il s'agit des équipements hydro-électriques très nombreux dans l'ensemble du bassin versant de l'Isère. Ils sont de deux sortes en ce qui concerne leur influence sur l'hydrogéologie. Il y a les réservoirs qui amortissent les crues et tendent à une cer-

taine régularisation du débit de l'aval. Il y a, d'autre part, les ouvrages qui font passer de l'eau d'un bassin vers un autre.

Il n'est pas utile, ici, de développer les méthodes de mesure et de calcul des différents paramètres hydrologiques.

Les résultats des études locales amènent à définir une valeur de la pluviométrie moyenne pour l'ensemble de la plaine de 1 100 mm/an et une valeur moyenne pour les versants de 1 300 mm par an. Il n'est pas possible d'obtenir une meilleure précision compte tenu de l'étendue de la zone étudiée et du nombre de situations particulières qui s'y rencontre.

Pour l'évapotranspiration, deux méthodes d'approche semblent donner des résultats assez précis. Si l'on traite la question à l'échelle d'un bassin élémentaire, pour lequel on possède des données météorologiques, il est possible de calculer la valeur de l'évapotranspiration selon la formule de Turc. Les valeurs ainsi obtenues seront proches de celles que l'on obtiendrait par la mesure du phénomène avec une case lysimétrique, ou avec un évaporomètre de Piche. Les travaux récents ont montré que ces trois « techniques » (Turc, Piche et Lysimètre) donnaient des résultats très comparables pour la région.

A l'échelle d'un vaste bassin, il devient beaucoup plus facile de mesurer le déficit d'écoulement, si le contexte géologique est suffisamment bien connu, pour que l'on puisse affirmer que ce déficit d'écoulement correspond uniquement à l'évapotranspiration. Il faut alors disposer d'une station de jaugeage dont les résultats soient précis et fidèles. Ainsi, la station du pont de Veury, permet-elle de calculer une valeur du déficit d'écoulement qui est donnée par la formule :

$$De = 0{,}2\,P + 250$$

(avec De = déficit d'écoulement, P = pluviométrie, exprimés en millimètres).

Dans ce cas-là, la lame d'eau écoulée représente à la fois le ruissellement et l'infiltration, puisqu'à l'échelle du bassin l'eau infiltrée vient par la suite alimenter des sources ou des canaux de drainage. L'infiltration ne peut s'appréhender qu'à l'échelle des bassins élémentaires qui constituent le bassin versant.

ALIMENTATION DE LA NAPPE

INTRODUCTION.

La connaissance des conditions d'alimentation de la nappe, c'est-à-dire des processus par lesquels les eaux arrivent à la nappe, peut se faire par deux types de méthodes. L'étude des conditions dynamiques permet de déterminer les sens de circulation des eaux donc de remonter le cheminement jusqu'à son origine. On peut ensuite, par l'observation des conditions locales, structure et lithologie en particulier, préciser le schéma et arriver ainsi à une image des circulations. L'étude des caractères physico-chimiques des eaux donne une deuxième clef pour la connaissance de ces circulations. Ces caractères permettent souvent de préciser les limites d'influence des différentes circulations ainsi que les variations dans le temps de ces limites.

Les différents types d'alimentation.

Soit une section de la nappe avec l'aquifère constitué par les alluvions (1) le mur imperméable (2) et les cours d'eau superficiels (3) (voir figure 1).

Cette section de la nappe reçoit des eaux de l'amont: soit Qa, le débit ainsi apporté. Depuis les versants, provient un autre débit, Qb ; les cours d'eau superficiels alimentent, eux aussi, la nappe

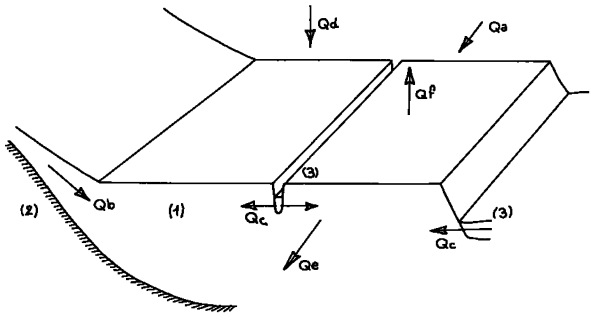

Fig. 1. — Schéma des différents modes d'alimentation de la nappe.

avec un débit Qc ; enfin la pluie qui tombe sur la surface de la section considérée apporte un débit, Qd. La nappe perd un débit Qe par l'aval, ainsi qu'un débit Qf par évapotranspiration. On a, à un instant donné, équilibre entre les apports et les pertes, soit :

$$Qa + Qb + Qc + Qd + Qe = Qf = 0$$

avec Qa toujours positif ou nul, Qd positif, négatif ou nul, Qe toujours négatif, et Qf négatif ou nul.

En fait, l'équilibre n'est pas toujours atteint puisque le niveau piézométrique varie. Mais la quantité d'eau stockée lorsque la nappe monte, est restituée lorsque la nappe baisse. Seuls, Qa, Qb et Qc (lorsqu'il est positif), Qd, sont des alimentations de la nappe.

Il apparaît donc trois mécanismes d'alimentation de la nappe :

— l'alimentation par la pluie, c'est-à-dire par l'eau tombée sur la surface de la plaine et dont une partie importante s'infiltre en raison de la perméabilité et de la porosité des terrains ;

— l'alimentation par les versants, c'est-à-dire l'eau tombée sur les versants et qui va rejoindre la nappe soit directement, soit après un ruissellement temporaire ;

— les échanges avec les cours d'eau superficiels, c'est-à-dire l'eau infiltrée depuis les lits de l'Isère et des autres cours d'eau et qui alimente la nappe.

Chacun de ces mécanismes peut apporter un certain volume d'eau ; toute cette eau n'est pas forcément acceptée par la nappe. Il existe une différence notable, sous les climats analogues à celui des Alpes du Nord, entre l'alimentation réelle, c'est-à-dire le volume d'eau absorbé par la nappe et l'alimentation potentielle, c'est-à-dire le volume d'eau susceptible d'être apporté à la nappe par les différents mécanismes de l'alimentation. Dans le cas présent, le second peut être jusqu'à 100 fois plus grand que le premier.

Nous allons étudier en détail chacun de ces mécanismes d'un point de vue qualitatif et, si possible, d'un point de vue quantitatif.

Alimentation potentielle par la pluie tombée sur la plaine.

Dans la plaine, le ruissellement est nul, si l'on excepte les zones urbaines. Cela représente 75 % de la superficie de la vallée soit près de 300 km² où l'infiltration et l'évapotranspiration se partagent les eaux tombées du ciel. En théorie, il est possible de calculer le volume d'eau infiltrée qui va alimenter la nappe, pour 1 km² et pendant une durée de 1 an :

$$V = (P - E) \cdot 10^6$$

avec V : volume infiltré en m³/km²
P : pluviométrie en m
E : évapotranspiration toujours en m

$$V = (1{,}100 - 0{,}500) \cdot 10^6$$
$$V = 600\,000 \text{ m}^3$$

cela représente un débit spécifique ou module de

$V/t = 10$ l/s/km² avec t : nombre de seconde par an.

Ce module de 10 l/s/km² est à rapprocher de celui trouvé pour le bassin de la Fure (18,7). Ce dernier a une altitude et des caractéristiques hydrologiques analogues à celles de la plaine de l'Isère, dans l'ombilic de Grenoble.

Le bassin versant de la Fure, avec une altitude moyenne comparable, une situation par rapport aux vents très semblable, présente surtout des conditions géologiques identiques. Il s'agit d'un bassin dont le substratum molassique peut être considéré comme imperméable. Mais ce substratum disparaît le plus souvent sous une couverture très épaisse de formations quaternaires très poreuses et souvent très perméables. Il en est de même de la zone considérée où la plus grande partie des précipitations s'infiltre. Cette valeur ainsi obtenue ne représente qu'un ordre de grandeur. On constate, que l'influence d'une averse sur la nappe varie beaucoup d'un point à l'autre pendant les mois chauds. Ces variations sont liées à la perméabilité de la tranche superficielle du terrain.

Si les deux premiers mètres sont très perméables, l'eau de pluie s'infiltre rapidement et une grande partie échappe à l'évapotranspiration, et

inversement. La végétation traduit bien cet état de chose *. Elle n'est pas la même selon que l'on trouve les alluvions grossières sous 30 à 40 cm de terre végétale.

Alimentation potentielle par les versants.

De la même manière que l'on a calculé une alimentation potentielle par la pluie tombée sur la plaine, il est possible de calculer les volumes d'eau susceptibles d'être apportés à la nappe par un versant.

Soit un versant de surface S ; il reçoit pendant une période d'un an, une hauteur d'eau mesurée (ou estimée) P ; l'évapotranspiration absorbe une partie de cette eau, soit E. Une autre partie de cette eau précipitée ruisselle directement jusqu'à un cours d'eau perenne, soit R. Le reste s'infiltre et rejoint la nappe. On peut donc écrire la relation entre ces différents éléments :

$$I = P - (E + R)$$

I représente alors la lame d'eau infiltrée. Si l'on connaît les autres termes, il est possible de calculer I et de connaître le volume d'eau apporté à la nappe pendant la période considérée, soit un an.

Une première remarque s'impose. Cette méthode de calcul ne peut s'appliquer qu'avec une bonne connaissance de la géologie du versant considéré. Seule, cette connaissance permettra de dire si l'eau infiltrée vient bien alimenter la nappe de la plaine et si des apports en provenance d'autres versants ne viennent pas s'ajouter à cette infiltration. Il faut tenir compte, en outre, des modification artificielles qui peuvent exister, c'est-à-dire des prises d'eau qui se font dans un bassin et dont la restitution se fait dans un autre.

Une deuxième remarque a trait à la mesure de la lame d'eau qui ruisselle. Dans certains cas, une partie du ruissellement s'infiltre avant d'atteindre le cours d'eau perenne.

Dans le cas d'un torrent qui rejoint la plaine par un cône de déjections, on constate une diminution du débit de ce torrent entre le sommet et la base du cône. Dans ce cas-là, le volume d'eau infiltré dans le cône vient s'ajouter à la lame d'eau déjà infiltrée.

Une troisième remarque concerne l'étendue des bassins versants considérés. Pour certains bassins, de faible surface, le renouvellement des réserves est total chaque année. Ils accuseront alors, en les amplifiant, les variations inter-annuelles de la pluviométrie. Les valeurs de (I + R) pourront varier de 1 à 4 ou 5. Pour les bassins plus vastes, les réserves vont au contraire amortir les variations de la pluviométrie et la lame d'eau infiltrée sera peu différente d'une année sur l'autre. L'alimentation par les versants offre plusieurs cas d'espèce qu'il convient d'analyser en détail pour essayer de dégager les lois qui régissent ce phénomène.

LES BASSINS AFFLUENTS.

Plusieurs affluents de l'Isère drainent des bassins versants importants par leur superficie et rejoignent la plaine par un cône de déjection très aplati. Il s'agit d'anciens cônes dont le niveau de base a été relevé au fur et à mesure que l'Isère remblayait la vallée et que la gorge de raccordement se creusait. Les phénomènes hydrogéologiques y sont différents par rapport aux cônes de déjections à forte pente dont nous parlerons plus loin.

Le Bréda est un bon exemple de ce type. Il rejoint l'Isère à Pontcharra après avoir coulé dans des gorges entaillées dans les calcaires marneux du Dogger où des alluvions forment une gaine perméable. Une nappe existe dans ces alluvions, nappe qui est, à la fois, alimentée et drainée par le Bréda. En effet, la rivière serpente d'une rive à l'autre et découpe ainsi la nappe en secteurs indépendants (J.-C. FOURNEAUX, 1968).

Au sortir de la gorge, la nappe vient alimenter le cône de déjections où, par ailleurs une partie du débit du Bréda s'infiltre (fig. 2). Le débit de la nappe est à peu près constant. En effet, il est donné par la formule :

$$Q = K.S.i$$

avec Q : débit de la nappe en m^3/s
S : section de la nappe en m^2
K : perméabilité moy. des alluvions en m/s
i : gradient de la nappe (sans unité)

* OZENDA et al. (1970).

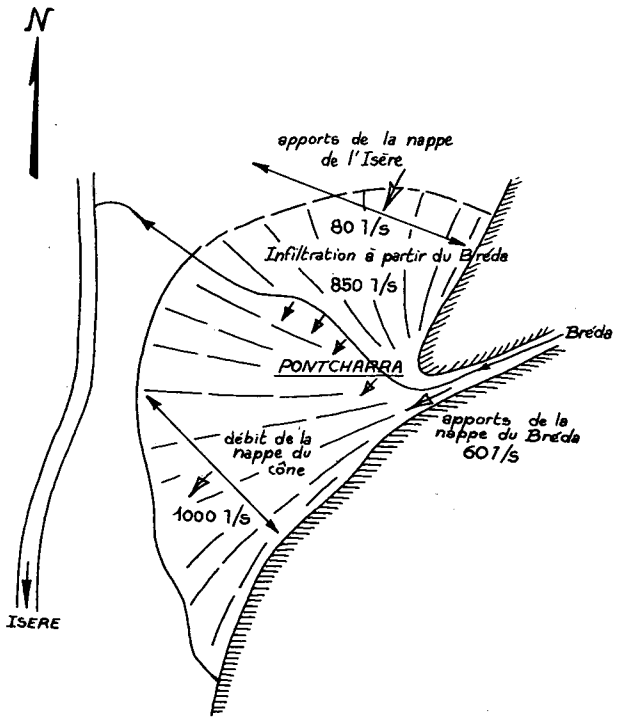

Fig. 2. — Le cône de déjection du Bréda.

K est constant et assez élevé, entre 5.10^{-3} et 10^{-2} m/s ; en prenant une valeur de 7.10^{-3} m/s on obtient une bonne approximation.

S varie peu. En effet, la vallée est large de 120 m à cet endroit ; la profondeur des alluvions reconnues par géophysique est de 10 m en moyenne. La nappe se trouve entre 2 et 3 m de la surface du sol selon les saisons. Donc S varie entre :

$120 \times 8 \times 120 \times 7$ soit entre 960 m² et 840 m²

Le gradient *i* est assez fort ; il est voisin de 1 % en toutes saisons. On a donc :

$$Q = 7.10^{-3} \times 10^{-2} \times 960 \text{ soit } 67 \text{ l/s}$$
$$\text{ou } Q = 7.10^{-3} \times 10^{-2} \times 840 \text{ soit } 59 \text{ l/s}$$

Le même calcul fait pour la nappe du cône de déjections donne un débit beaucoup plus fort, puisque l'on a :

$$S = 1\,200 \times 25 \text{ soit } 30\,000 \text{ m}^2$$

La perméabilité est du même ordre de grandeur ; un essai de pompage dans cette zone a donné la valeur de 5.10^{-3} m/s et le gradient est légèrement inférieur, $0{,}66.10^{-2}$. On arrive donc à :

$$Q = 30\,000 \times 5 \times 10^{-3} \times 0{,}66 \times 10^{-2}$$
$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ce débit provient des apports de la nappe du Bréda pour 60 l/s environ. La nappe de l'Isère vient aussi alimenter la nappe du cône, par le Nord. Son débit, calculé par la formule de Darcy est de l'ordre de 80 l/s. La plus grande part du débit de la nappe du cône provient donc des infiltrations du Bréda. Celles-ci représentent jusqu'à 90 % des apports à la nappe. Cela représente un débit de 800 à 900 l/s, il ne semble pas que ces infiltrations varient beaucoup car la nappe du cône n'accuse pas les mêmes écarts, et de loin, que le Bréda lui-même, qui voit son débit passer de 3 à 4 m³/s à 25 m³/s.

A l'aval, la nappe de l'Isère reçoit donc un débit de l'ordre de 1 000 l/s. Une partie de ce débit est immédiatement reprise par un canal de drainage qui longe la base du cône. L'alimentation réelle de la nappe est donc le débit de la nappe du cône diminué du débit du canal et du débit des ouvrages de pompage situés dans le cône.

Il existe plusieurs bassins analogues à celui du Bréda dont le raccord avec la plaine se fait par l'intermédiaire d'un cône ancien. Mais les conditions hydrogéologiques sont le plus souvent différentes d'un cas à l'autre.

En rive droite de l'Isère, à l'aval de Grenoble, existe un vaste cône complexe édifié par la Vence qui descend du massif de la Chartreuse. Une nappe importante se trouve dans ces formations, alimentée par les infiltrations de la Vence dans ses alluvions mais aussi par des apports en provenance des calcaires urgoniens qui forment le substratum d'une partie du cône, avec des conditions structurales qui favorisent la circulation des eaux vers la plaine.

La Morge, à Moirans, rejoint, elle aussi, la plaine de l'Isère par l'intermédiaire d'un cône très aplati, toujours en rive droite. La perméabilité des alluvions de cet ancien cône est assez faible. La nappe de la plaine semble faire barrage à la nappe de la Morge dont la plus grande partie des eaux vient alimenter les canaux de drainage.

Toujours en rive droite, en continuant à descendre la vallée de l'Isère, la Fure, elle aussi,

possède un cône ancien dans lequel elle perd une partie de ses eaux. Celles-ci semblent drainées par un chenal fossile qui longe le pied du versant en direction du Sud-Ouest, comme l'ont montré de récents travaux de recherche d'eau. Un forage réalisé à plus de 1500 m de la Fure, a retrouvé un ancien chenal à forte perméabilité à plus de 30 m de profondeur et à un niveau inférieur à celui de la Fure actuelle. Un essai de pompage a montré les liens existants entre ce chenal et le cône de la Fure puisqu'un puits situé dans le cône a été asséché lors de cet essai.

Le cas de l'Arly qui rejoint l'Isère à Albertville est très différent, alors qu'à première vue, les conditions géologiques sont assez semblables. L'Arly coule sur un tapis d'alluvions grossières jusqu'à son confluent avec l'Isère. Il n'existe pas, là non plus de vrai cône de déjections du point de vue morphologique. Les études piézométriques montrent une alimentation de la nappe par l'Isère et non par l'Arly, comme si cette rivière coulait dans un lit colmaté. En période des très hautes eaux, la situation s'inverse. A la fin de 1972, après les fortes pluies du mois de novembre, pendant l'été 1973 après les pluies de juillet et à l'automne 1974, la nappe est brusquement montée au Sud d'Albertville pour atteindre des cotes qui excluaient une alimentation par l'Isère. Tout se passe comme si l'Arly se mettait à alimenter la nappe lorsqu'il dépasse un certain niveau, comme si son lit n'était pas colmaté jusqu'en haut.

La courbe (b) de la figure 3 donne les hauteurs de la nappe dans le piézomètre P 97 situé au Sud d'Albertville.

La courbe (a) représente la part des « apports » de l'Isère. La vidange se fait en deux mois environ, pour une période d'alimentation assez brève, qui ne doit pas excéder 10 jours. Ne connaissant pas le temps de transfert entre l'Arly et le piézomètre, il n'est pas possible de savoir à partir de quelle cote la rivière se met à alimenter la nappe sous Albertville.

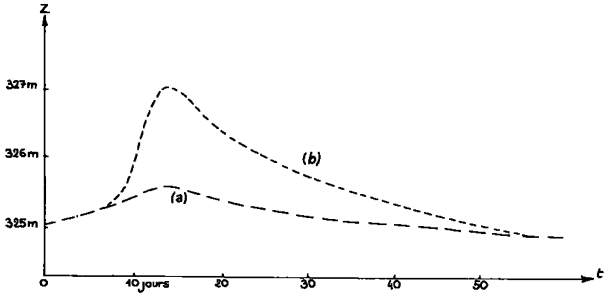

Fig. 3. — Les apports de l'Arly à la nappe de la plaine de l'Isère à l'aval d'Albertville.

LES CÔNES DE DÉJECTION.

Il existe, de part et d'autre de la vallée, de véritables cônes de déjection, avec une morphologie caractéristique et une pente forte. Il en existe au débouché de chaque talweg tant en rive gauche qu'en rive droite, mais tous ces cônes sont actuellement stabilisés. Il faut des averses exceptionnelles comme en juillet 1970 pour voir les torrents sortir de leur lit et causer des dégâts sur leur cône, comme ce fut le cas à Saint-Quentin sur Isère et à Voreppe. Encore faut-il préciser que la plupart des dégâts sont la conséquence du mauvais entretien (ou même de l'absence d'entretien) du lit du torrent.

La pente du lit de torrent est forte et son débit irrégulier. Ces deux facteurs se conjuguent pour empêcher le colmatage du lit ; donc le torrent va perdre une partie de son débit dans son cône.

En rive gauche depuis Albertville jusqu'à Grenoble, les cônes de déjection sont situés au débouché de gorges entaillées dans les calcaires marneux du Dogger par des torrents qui viennent le plus souvent d'un bassin entaillé, lui, dans les formations cristallines du massif de Belledonne. Dans ces cônes, les dépôts seront, en général, bien lités et la circulation des eaux souterraines s'y fait en nappe.

Lorsque les cônes de déjection ont été édifiés par des torrents provenant des chaînes subalpines, comme en rive droite dans la Combe de Savoie et dans le Grésivaudan, ou des deux côtés dans la cluse de l'Isère, il n'en est pas de même. Les éléments durs, qui sont des calcaires, continuent à subir une altération. Ils sont, en outre, emballés dans des argiles dérivant de l'altération des marnes. La circulation des eaux souterraines aura tendance à se faire dans des chenaux.

Dans tous les cas, une diminution du débit du torrent peut être mise en évidence entre l'amont

et l'aval du cône de déjection. Mais pour pouvoir mesurer cette diminution de débit qui traduit l'infiltration, il faut qu'elle soit du même ordre de grandeur que le débit lui-même. Si l'infiltration ne représente que 1 à 5 % du débit du torrent, elle est du même ordre de grandeur que l'erreur que l'on commet dans la mesure du débit et ne peut plus être mesurée.

L'eau s'infiltre dans le cône de déjection, va ensuite rejoindre la nappe de la plaine. Pour connaître la valeur de cette alimentation potentielle, il convient de mesurer ou d'estimer la valeur de cette infiltration.

Cas général.

Si l'on porte en abscisse le débit mesuré en amont du cône et en ordonnée le débit mesuré en aval du cône, on obtient la courbe de la figure 4.

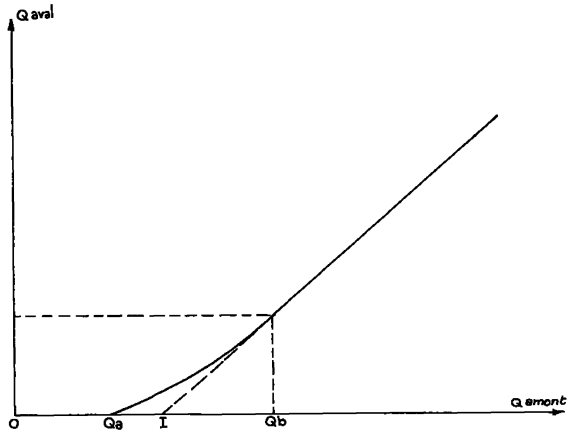

Fig. 4. — L'infiltration dans un cône de déjection : schéma théorique.

Cette courbe peut se diviser en trois parties. Tant que le débit amont n'atteint pas une certaine valeur (QA), le débit aval est nul. Dans la deuxième partie de la courbe, entre QA et QB, il n'existe pas de relation linéaire entre le débit aval et le débit amont. Enfin, dans la troisième partie de la courbe, lorsque le débit amont dépasse la valeur QB, la différence entre le débit amont et le débit aval est constante. Cette différence représente, dans les trois cas, l'infiltration.

La figure précédente laisse apparaître deux cas différents. Dans le premier, le débit du torrent considéré est toujours au-dessus de la valeur QB et l'infiltration est alors constante. Dans le second, le débit du torrent descend en dessous de la valeur QB de façon temporaire ou quasiment constante. L'infiltration varie alors de façon assez notable.

Dans la réalité, il n'est pas toujours possible de mesurer la valeur de cette infiltration par différence entre le débit à l'amont du cône et le débit à l'aval. Mais il est possible d'évaluer la quantité d'eau apportée à la nappe, dans certaines conditions.

Calcul de l'infiltration dans un cône.

Si l'on dispose de renseignements sur la section par laquelle la nappe du cône passe dans la nappe de la plaine, sur les caractéristiques de l'aquifère dans le cône (perméabilité moyenne et puissance des formations) et sur la piézométrie, il est possible d'appliquer la loi de Darcy.

Le cône du Domeynon à Domène, en rive gauche du Grésivaudan, se prête à ce calcul. Les mesures piézométriques permettent de déterminer la zone du cône qui alimente la nappe de la plaine, soit une section de 1 500 m de long sur 20 m de puissance avec une perméabilité moyenne de 2×10^{-3} m/s et un gradient moyen de 5×10^{-3}, ce qui donne un débit moyen de :

$$Q = 2.10^{-3} \times 5.10^{-3} \times 1\,500 \times 20$$
$$Q = 0{,}3 \text{ m}^3/\text{s}$$
soit 300 l/s

Pour d'autres cônes où les renseignements manquent, il est possible d'utiliser les données fournies par les ouvrages de pompage. Dans le cône du ruisseau de Laval, à Brignoud, les débits pompés atteignent 300 l/s.

La qualité des eaux pompées montre que seule la nappe du cône est sollicitée. Une moitié, à peine, du cône est concernée par ces pompages. Le débit de la nappe du cône est donc voisin de 500 l/s. Ce débit ne provient pas uniquement des infiltrations à partir du ruisseau, mais il intègre les eaux de pluies tombées sur la surface du cône et dont une grande partie s'infiltre.

Mesure de l'infiltration dans un cône.

Pour certains torrents des mesures systématiques ont pu être faites et l'on a pu dresser la courbe donnant la relation entre les débits amont et aval du cône, relation à partir de laquelle il est possible de connaître le débit infiltré.

La courbe de la figure 5 a été obtenue à partir de mesures faites sur le torrent de Crolles. L'infiltration tend vers une valeur maximale voisine de 65 l/s mais elle n'est obtenue que pour un débit qui dépasse 120 l/s. Ces deux chiffres représentent respectivement QA et QB de la figure 4. Le débit apporté à la nappe qui est le débit moyen annuel de l'infiltration n'est que de 35 l/s (SOGREAH, 1961).

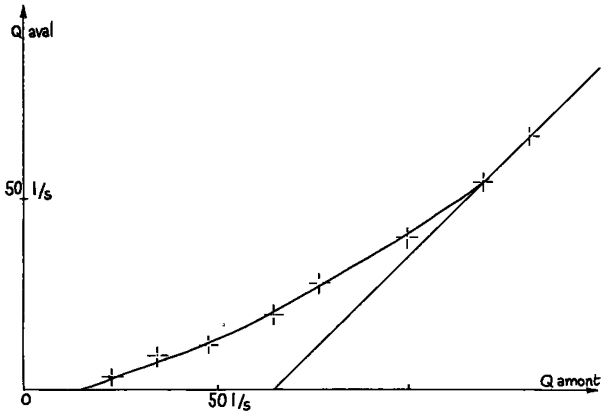

Fig. 5. — L'infiltration dans le cône du torrent de Crolles.

Les valeurs de l'infiltration peuvent atteindre 100 l/s pour le ruisseau du Craponoz, qui parcourt plus de 3 km sur son cône de déjection avec une pente assez faible, ce qui explique l'importance des débits infiltrés.

Mise en évidence de l'infiltration dans un cône.

Il n'est pas toujours possible de mesurer les apports des cônes de déjection à la nappe de la plaine, mais certaines situations permettent la mise en évidence du trop plein de ces apports c'est-à-dire de la différence entre les apports du cône et ce qui en est accepté par la nappe de la plaine.

Le Cernon à Chapareillan, en rive droite de l'Isère, à la limite de la Savoie, possède un très vaste cône de déjection entaillé par l'Isère. Il se raccorde avec la plaine par une terrasse de 10 à 15 m de haut. Il s'agit d'un cône complexe, construit en plusieurs épisodes.

La partie aval est très plate. Elle contient une nappe qui s'écoule en direction de la vallée de l'Isère. Cette nappe est alimentée, en grande partie, par les infiltrations du Cernon qui court sur ses alluvions pendant plus de 2,5 km.

Au pied de la terrasse existe une source qui s'écoule dans un canal, lequel longe le pied de la terrasse avant de se jeter dans l'Isère. Le débit de ce canal est enregistré depuis 1972. Il en est de même du niveau de la nappe du cône, le niveau de la nappe de l'Isère étant suivi grâce à deux piézomètres.

Une grande similitude apparaît entre les limnigrammes enregistrés sur le canal et ceux enregistrés sur la nappe du cône, elle-même très influencée par les variations de la nappe de l'Isère alors qu'elle reste pratiquement insensible aux variations des niveaux enregistrés sur le Cernon.

La nappe du cône est assez profonde puisqu'elle se trouve pratiquement partout à plus de 10 m de profondeur. Le cône reçoit les eaux d'un petit bassin affluent de 4 km² qui ne possède aucun émissaire superficiel. Les réactions de la nappe aux épisodes pluvieux sont très lentes et considérablement amorties. L'aquifère, constitué par les alluvions du Cernon, se comporte comme un volant qui absorbe les infiltrations, à peu près constantes du torrent et la part de la pluie infiltrée à la surface du cône et de son bassin affluent soit 10 km².

Au pied de la terrasse, la nappe de l'Isère est par moment en charge sous les limons superficiels dont l'épaisseur dépasse deux mètres. Lorsque la nappe de l'Isère est haute, celle du Cernon ne peut s'y vidanger. Le canal voit alors son débit monter et atteindre des valeurs de 300 l/s. Lorsque la nappe de l'Isère baisse, celle du cône s'y vidange et le débit du canal diminue parfois même jusqu'au tarissement (fig. 6).

Cela a d'ailleurs été confirmé par des événements récents. La source qui alimente le canal était perenne. Son débit ne descendait jamais endessous de 50 l/s. A la suite de la coupure de la

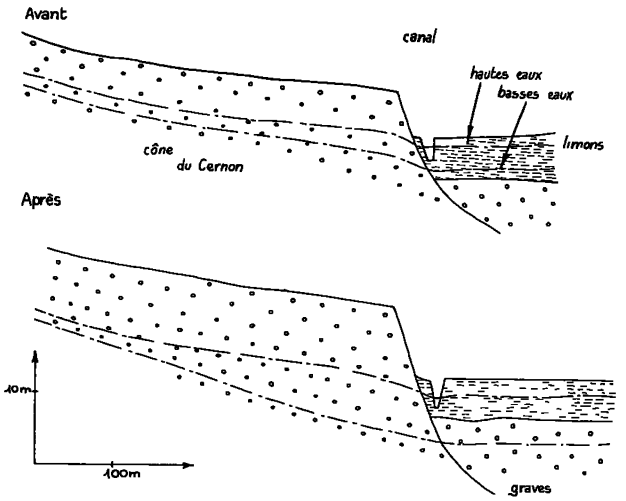

Fig. 6. — La vidange de la nappe du cône du Cernon dans la nappe de la plaine.

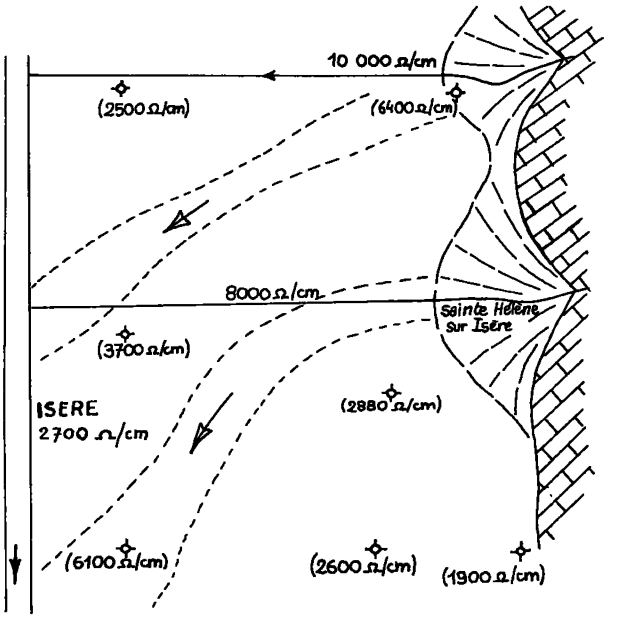

Fig. 7. — Circulation d'eaux faiblement minéralisées dans des cheneaux à forte perméabilité au sein d'alluvions récentes.

boucle de Bois-Français et des prélèvements massifs de matériau dans le lit de l'Isère, la nappe de la plaine a partout baissé.

A la suite de cette baisse de la nape la source a tari et le canal a été asséché pendant plusieurs mois consécutifs. Cela se renouvelle maintenant chaque année, alors que les débits du Cernon n'ont montré aucune variation.

La nappe du cône du Cernon se vidange dans celle de la plaine, car les alluvions du Cernon viennent buter contre les alluvions de la plaine puisque l'Isère a entaillé le pied du cône de déjection et a ensuite déposé ses alluvions contre cette entaille. Dans ce cas-là, les eaux venant du versant se mélangent avec les eaux de la plaine, comme le prouvent les mesures de résistivité faites sur les différents puits et piézomètres de ce secteur. La résistivité des eaux diminue de façon régulière depuis le pied du versant jusqu'à l'Isère. Les courbes d'égales résistivités se calquent sur les courbes isopièzes (fig. 8).

Lorsqu'au contraire le cône vient s'imbriquer dans les alluvions de la plaine, la nappe peut s'écouler dans cette dernière par l'intermédiaire de chenaux à forte perméabilité (anciens lits du torrent par exemple). Dans ce cas-là, le mélange ne se fait plus aussi rapidement et il est possible de suivre le « cheminement» des apports du cône au sein de la nappe de la plaine grâce encore aux mesures de résistivité (fig. 7).

Le cône de Saint-Pierre d'Albigny apporte des débits importants en raison surtout de la forte rétention dans le bassin versant qui permet une régularisation des apports. Il y a plusieurs émissaires superficiels qui s'infiltrent tous, pratiquement en permanence, dans le cône. Au niveau de la voie ferrée qui longe la base du cône, il n'existe aucune circulation superficielle permanente, alors qu'il existe au moins trois ruisseaux perennes dans la partie amont. Un fossé draine le front du cône au niveau de St-Jean de la Porte (fig. 9).

Des recherches d'eau potable menées au pied du cône ont abouti au forage d'un puits de 800 mm de diamètre et de 55 m de profondeur. Cet ouvrage a fourni, lors d'un essai de pompage prolongé pendant 72 heures, un débit de 850 m^3/h. La forme du cône de rabattement a été bien suivie grâce à 16 piézomètres répartis selon quatre directions. Les eaux pompées venaient à plus de 90 % du cône de déjection ce qui représente des apports de plus de 200 l/s.

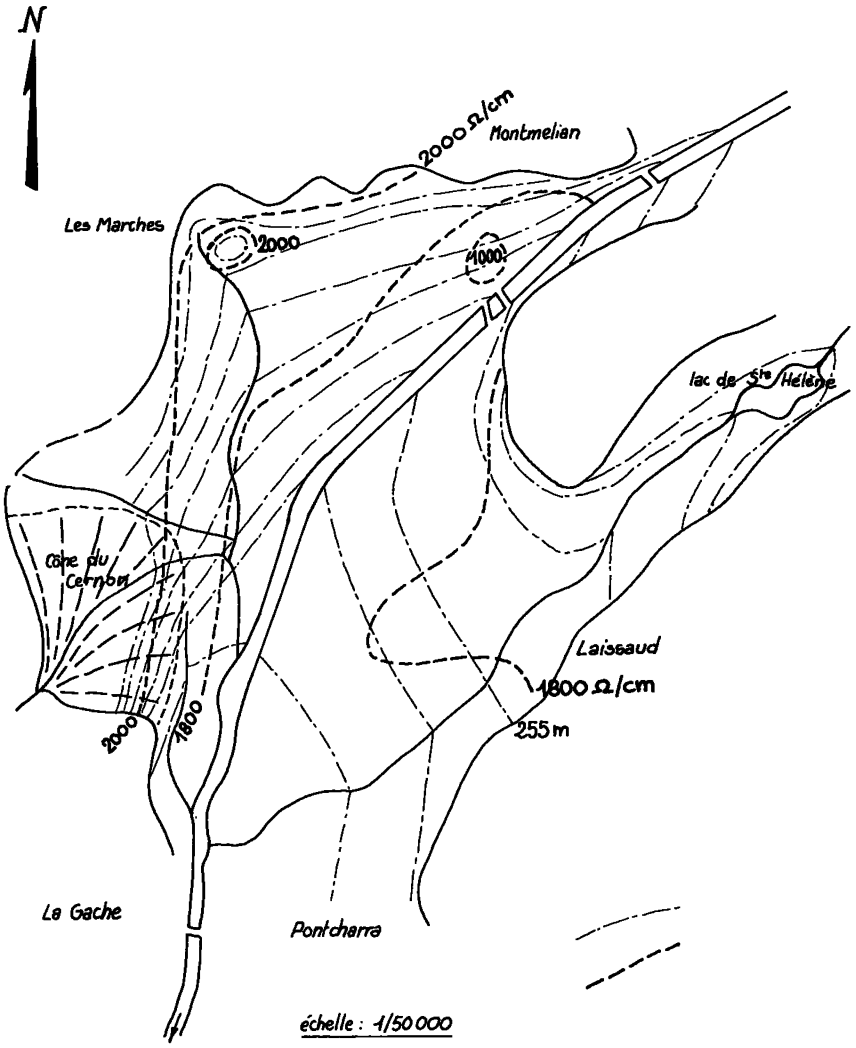

Fig. 8. — La plaine de Montmélian : comparaison des courbes isopièzes avec les courbes d'équi-résistivité.

Le trop plein de ces apports s'écoule dans le fossé de St-Jean de la Porte. Son débit varie, comme dans le cas du Cernon, avec le niveau de la nappe de l'Isère. Le débit moyen mensuel écoulé par ce fossé au pont de la route départementale 201, est de 150 l/s. Les crues correspondent aux hautes eaux de l'Isère et peuvent se produire en l'absence d'épisode pluvieux sur le bassin de Saint-Pierre et alors que celui-ci est totalement dépourvu de neige depuis deux ou trois mois (crues de mai et juin). Ces crues liées aux hautes eaux de l'Isère (donc de sa nappe, comme nous le verrons plus loin) se différencient très bien des crues liées à un épisode pluvieux sur le bassin de Saint-Pierre (fig. 10).

Les crues dues aux pluies sur le bassin de Saint-Pierre sont d'autant plus marquées que, lorsqu'elles se produisent, le fossé reçoit le ruissellement apporté par les cours d'eau temporaires.

Conclusions.

Cette analyse montre l'importance des cônes de déjection dans l'alimentation de la nappe de la

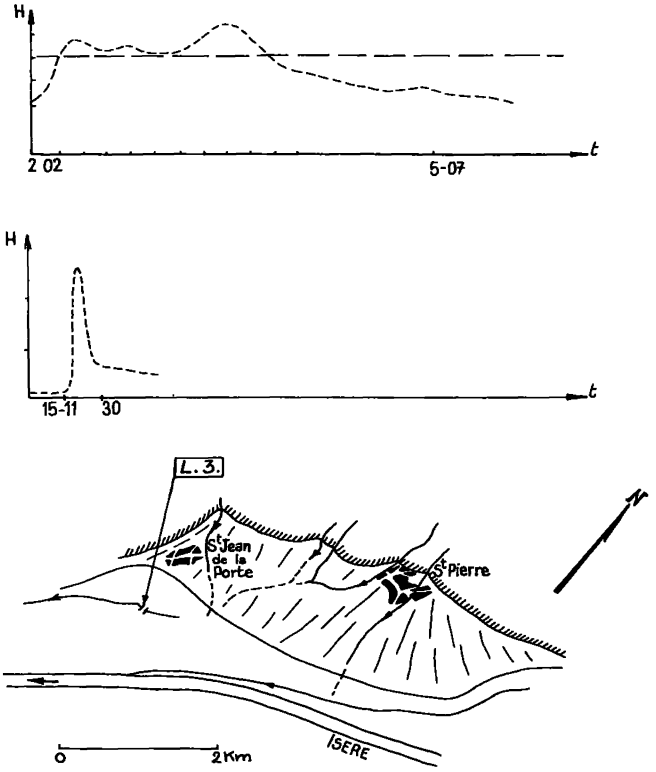

Fig. 9. — Comparaison d'une crue liée à un épisode pluvieux avec une crue liée aux hautes eaux de l'Isère à Saint-Jean-de-la-Porte.

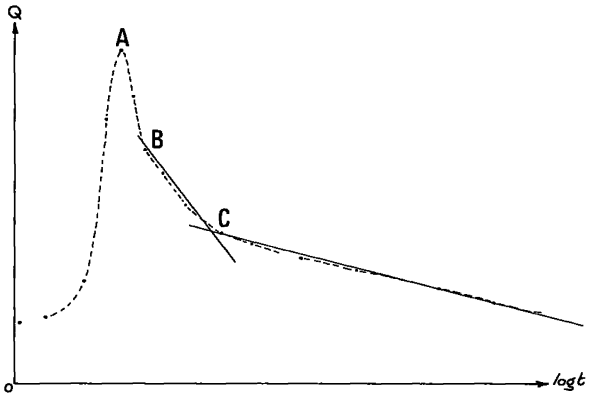

Fig. 10. — Décrue de la nappe à Saint-Jean-de-la-Porte.

plaine. Il n'est pas possible de calculer le volume global d'eau disponible pour cette alimentation, faute de données précises pour certains cônes. Mais une estimation faite à partir des débits pompés actuellement dans ce type de formation, permet d'avancer un chiffre voisin de 10 m³/s. Ce débit est considérable si, comme nous le verrons par la suite, le débit de la nappe de la plaine ne dépasse jamais 500 l/s. Par ailleurs l'eau apportée par les cônes de déjection est très souvent moins minéralisée que celle de la nappe de la plaine ce qui ajoute encore à l'intérêt qu'offre ce type d'alimentation.

Le tableau suivant donne, à titre d'exemple, les débits apportés par les cônes de la seule rive gauche du Grésivaudan (J.C. FOURNEAUX, 1968).

Cours d'eau	Localisation	Débits
Bréda	Pontcharra	1 000 l/s
R. de Mailles	Le Cheylas	200 l/s
R. de Goncelin	Goncelin	400 l/s
	Villard-Boson	300 l/s
Merdaret	Tencin	300 l/s
R. des Adrets	Froges	400 l/s
Muret (ou R. de Laval)	Brignoud	500 l/s
	Villard-Bonnot	100 l/s
	Lancey	300 l/s
	Le Versoud	300 l/s
Domeynon	Domène	800 l/s
	Murianette	200 l/s
Sonnant	Gières	200 l/s
Total		5 000 l/s

Cas particuliers.

Il existe des cours d'eau qui rejoignent la vallée de l'Isère sans passer par un cône de déjection, bien que drainant un bassin versant extérieur à la vallée.

Le Gélon.

Le plus important d'entre eux est le Gélon. Il prend sa source au Nord de la chaîne des Hurtières, coule vers le Sud-Ouest dans la vallée de l'Huile pendant une douzaine de kilomètres et atteint la Rochette où il bifurque vers le Nord-Est en empruntant une large vallée d'origine glaciaire indiscutable. L'étude de la morphologie, dans la région de la Rochette montre que le Gélon était auparavant un affluent du Bréda qu'il rejoignait au niveau de Détrier. Il y a eu capture du Gélon par un cours d'eau qui empruntait un vallon situé à l'emplacement de la basse vallée du Gélon actuel. L'érosion glaciaire est responsable de cette

capture par l'approfondissement de ce talweg et sa prolongation vers le Sud-Ouest. Mais de plus, en se retirant, le glacier a laissé des masses importantes de moraines qui sont responsables entre autre de la présence actuelle du lac Saint-Clair mais surtout de l'exhaussement du seuil de Détrier interdisant ainsi au Gélon de rejoindre le Bréda.

Cette histoire du Gélon explique l'absence de cône de déjection. Ce cours d'eau est très récent et les alluvions qu'il a pu charrier ont servi à combler la vallée entre La Rochette et Chamoux. Il est, en effet, très probable que le Gélon se jette dans un lac qui occupait la zone du confluent Arc-Isère et qui remontait vers La Rochette, et ce, juste après le départ du glacier responsable de la capture (J.C. FOURNEAUX, 1976).

Maintenant le Gélon est canalisé et vient franchir par un tunnel l'extrémité Nord de la banquette de Planaise. Dans la partie aval de sa vallée, c'est-à-dire dans la zone qui intéresse cette étude, le Gélon coule plus bas que la nappe et la draine. Il n'y a donc pas d'apport du Gélon à la nappe de la vallée de l'Isère ou de l'Arc.

Le Bondelogue.

Le ruisseau du Bondelogue rejoint l'Isère à l'aval de Montmélian, en rive droite. Il draine un bassin versant qui couvre la partie Sud de la Cluse de Chambéry et les pentes couvertes de dépôts quaternaires variés.

Il s'agit aussi d'un cours d'eau qui n'existe que depuis le retrait du dernier glacier. Le bassin versant est formé pratiquement exclusivement de Quaternaire sur des épaisseurs qui peuvent dépasser 20 m sur de grandes surfaces. La rétention est donc très forte et le ruissellement pratiquement nul sur l'ensemble du bassin versant. Le Bondelogue est un drain. Il ne transporte donc jamais de charge solide importante et il s'agit toujours d'argiles. Ceci explique l'absence de cône de déjection.

Le Bondelogue rejoint la plaine de l'Isère après avoir entaillé la banquette de Francin. Il coule, dans cette entaille, sur les argiles « d'Eybens ». Aucun écoulement souterrain n'accompagne donc ce ruisseau. Il coule ensuite dans la plaine pendant 1,5 km avant de rejoindre l'Isère. Là, il y a échange avec la nappe. Tantôt le ruisseau alimente la nappe, tantôt il la draine.

Le Coisetan.

Il s'agit de l'émissaire du lac de Sainte-Hélène. En amont du lac, le même ruiseau qui s'appelle là le Coisin draine un bassin versant en grande partie constitué par les formations quaternaires de la banquette de Planaise, c'est-à-dire par des assises où la rétention est très forte et le ruissellement nul. De plus, le lac de Sainte-Hélène joue le rôle de retenue en amortissant les crues venant de l'amont du bassin versant.

En aval du lac, le Coisetan draine la nappe en permanence jusqu'au niveau de la route nationale 523. Au-delà, on peut assister à une alimentation de la nappe par le ruisseau notamment après les crues qui se produisent souvent avec beaucoup de retard en raison d'une part du rôle de tampon joué par le lac, d'autre part de la création de barrages par la végétation. Ceux-ci peuvent se créer rapidement et subsister longtemps, rendant inexploitables les limnigrammes enregistrés à la sortie du lac. Mais des jaugeages simultanés à l'exutoire du lac et au pont de Laissaud, soit 4 km plus à l'aval, ont permis la mise en évidence de variations du débit liées uniquement aux échanges nappe-ruisseau.

Les panneaux non drainés.

Le contact entre la plaine et le versant ne se fait pas seulement par l'intermédiaire des cônes de déjection. Comme nous l'avons vu (J.C. FOURNEAUX, 1976), des formations quaternaires anciennes s'allongent aux pieds des versants. Il existe aussi des pentes couvertes d'éboulis et de moraines remaniées descendant jusqu'au niveau de la plaine. On trouve enfin, surtout en rive gauche, des endroits où les alluvions modernes viennent reposer sur le substratum. D'une manière générale, on observe l'existence de surfaces importantes pratiquement dépourvues de ruissellement hiérarchisés et de tout écoulement superficiel permanent. De telles surfaces représentent ce que j'ai appelé des panneaux non drainés (J.C. FOURNEAUX, 1968). Les eaux tombées sur ces panneaux rejoignent la nappe de la plaine sans passer par l'intermédiaire d'une circulation superficielle. Les interfluves sont très étendus entre les talwegs même en rive gauche où le substratum marno-calcaire est pourtant pratiquement imperméable.

Le mécanisme de cette alimentation est relativement simple dans le cas des épaisses formations quaternaires des banquettes où l'infiltration est immédiate et où la saturation n'est pratiquement jamais atteinte. La restitution se fait soit directement à la nappe soit par des sources de trop plein de nappe. Les exemples sont nombreux sur les deux rives et il n'est pas utile d'examiner ici plus en détail ce phénomène.

Sur les calcaires marneux du Dogger, l'épaisseur de la couche poreuse est beaucoup plus faible ; seule la terre végétale et la tranche d'altération peuvent absorber de l'eau. Cette eau s'écoule surtout en raison de la forte pente. Elle se rassemble parfois dans de petits talwegs fossiles ou dans les « gouttières », ces sillons creusés par l'érosion glaciaire. Lorsque l'un de ces sillons ou un talweg fossile est recoupé par une des entailles des torrents venant de Belledonne, on trouve une source.

Ici, la saturation peut être atteinte et il se produit alors un arrachement ou une coulée boueuse. Une seule fois, depuis 1966, la saturation a été atteinte, lors des fortes pluies de Noël 1968. Pendant quatre jours, il est tombé 300 mm d'eau sur la vallée du Grésivaudan, sur un sol déjà humide ; les coulées de boue et les glissements de terrain ont été très nombreux sur l'ensemble des collines bordières.

A La Rochette, un talweg fossile se vidangea littéralement de tout ce qui le remplissait et la coulée a emporté une maison.

Il est possible, connaissant la surface d'un panneau non drainé, de calculer ses apports à la nappe. Pour une période d'un an, le panneau reçoit une hauteur d'eau P, dont il disparaît une hauteur E par évapo-transpiration. Le volume d'eau apporté à la nappe est donc :

$$V = S \times (P - E)$$

avec S représentant la surface du panneau.

Les débits ainsi apportés sont assez voisins du module pour les bassins de basses altitudes, c'est-à-dire un chiffre voisin de 25 l/s/km². Toutefois l'évapotranspiration est plus forte sur les panneaux où la couche poreuse représente deux mètres d'épaisseur que sur les zones où l'on a plus de 20 m de formations meubles comme dans les banquettes, mais l'absence de mesure de cette grandeur ne permet pas d'aller plus loin dans la recherche de la précision.

Les apports occultes.

Alors que les panneaux non drainés apportent de l'eau de façon relativement uniforme tout au long de la limite avec la plaine, il arrive que l'on mette en évidence des venues d'eau très localisées. Cette eau peut venir du bassin versant lui-même ou d'un bassin extérieur. Il s'agit soit de sources situées sur des failles soit de circulations karstiques. Si ces sources émergent au-dessus du niveau de la plaine, il n'y a là qu'une alimentation potentielle, mais il arrive que ces sources se produisent sous les alluvions.

Dans la combe de Savoie, en rive droite, au pied des Bauges, entre Montailleur et le Bourget, plusieurs sources émergent dans les éboulis et présentent des débits incompatibles avec la superficie de leur bassin versant. Elles sont localisées sur de petits accidents qui affectent le Mont de la Lanche, la pointe des Arces et le Mont d'Armène, c'est-à-dire le flanc Est du synclinal de la Dent d'Arcluse. Le débit d'étiage de l'ensemble de ces quelque 20 sources atteint près de 100 l/s. Une grande partie de l'eau provient du haut bassin du Chéran et s'écoule depuis les karsts urgoniens jusqu'aux fissures du Jurassique supérieur.

La situation des sources d'Arbin, au Nord de Montmélian, est identique. Les émergences sont situées au sein des éboulis. Le bassin d'alimentation se trouve au-delà de la barre des calcaires tithoniques, dans la vaste dépression du lac de la Thuile. Il n'est pas exclu qu'une partie des eaux prises dans cette dépression rejoigne directement la nappe et que les sources d'Arbin ne soient que le trop plein de ces circulations souterraines.

Des travaux de recherche d'eau menés près d'Arbin dans le sillon qui sépare le verrou de Montmélian des premières pentes des Bauges, ont montré l'existence d'une nappe en charge à une cote telle qu'elle ne peut être alimentée que par le versant et non par les éboulis qui le tapissent ; leur perméabilité est beaucoup trop forte pour qu'une telle charge (plus de 2 kg) puisse se maintenir (fig. 11).

Dans le Grésivaudan, les apports occultes sont très faibles. En rive gauche la lithologie autant que la structure ne favorise pas les apports profonds. Ch. Lory (1874) signalait l'existence d'une source chaude et minéralisée à l'aval de Domène, au pied

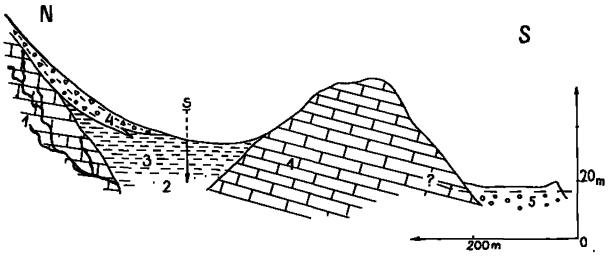

Fig. 11. — La nappe en charge dans le sillon au Nord du rocher de Montmélian ne peut être alimentée que par des infiltrations à partir des calcaires tithoniques (1, calcaires; 2, alluvions fines; 3, argiles; 4, éboulis; 5, alluvions récentes; S, sondage).

du versant. Cette source a disparu lorsque le terrain a été remblayé pour la construction d'immeubles. Elle s'écoule probablement directement dans la nappe mais son faible débit (30 l/mn) et l'absence de point de mesure ne permettent plus de la mettre en évidence.

En rive droite, la source du Cernon qui draine le synclinal Dent de Crolles - Granier, entre le col de l'Alp et le col de l'Alpette, apporte vers la vallée de l'Isère des eaux tombées dans le bassin du Guiers. Mais cette source, située à 1 160 m d'altitude est beaucoup trop haute pour avoir des rapports directs avec la nappe. Seul le cône de déjection du torrent alimente la nappe comme cela a été vu plus haut.

Dans la Cluse de l'Isère, la situation est tout à fait différente. La structure se conjugue à la lithologie pour favoriser les apports vers la nappe. On se trouve en effet en présence de séries calcaires qui plongent sous les alluvions aussi bien sur une rive que sur l'autre.

Deux cas se présentent. Dans le premier, il existe une émergence au-dessus du niveau de la plaine avec un (ou plusieurs) réseau noyé plus bas que cette émergence. Dans le second, il n'y a pas d'émergence visible au-dessus de la plaine.

L'exemple le plus connu est celui des Cuves de Sassenage. Il y a là une résurgence des eaux du Furon infiltrées dans les calcaires urgoniens, une résurgence pour les eaux de pluies tombées sur la partie Nord du plateau de Saint-Nizier et infiltrées dans les calcaires sénoniens et enfin une cheminée d'équilibre pour le réseau karstique du Gouffre Berger qui se développe dans les calcaires urgoniens du plateau de Sornin. Les Cuves de Sassenage ont un débit qui varie beaucoup entre des valeurs de l'ordre de 100 l/s à plusieurs m³/s. Les averses tombées sur la région d'Engins se répercutent dans les Cuves avec 7 h de retard. Il est très probable qu'une partie du débit de ces réseaux s'écoule vers la nappe par les chenaux noyés. Il ne faut pas oublier qu'à l'époque des glaciers rissiens le fond de la vallée se trouvait 300 ou 400 m plus bas et que la partie noyée du réseau peut descendre jusqu'à ces profondeurs. Reste à savoir si la partie du débit qui s'infiltre dans les alluvions est importante ou non. Une grande partie des réseaux profonds a dû être colmatée, notamment pendant la période du dépôt des argiles d'Eybens, créant dans ces chenaux une perte de charge telle qu'elle justifierait la différence d'altitude existant entre les niveaux dans le réseau des Cuves et le niveau de la nappe. Mais il se peut aussi que l'on soit en présence de chenaux situés au niveau des alluvions grossières et que, les pertes de charges étant faibles, le débit soit important (fig. 12).

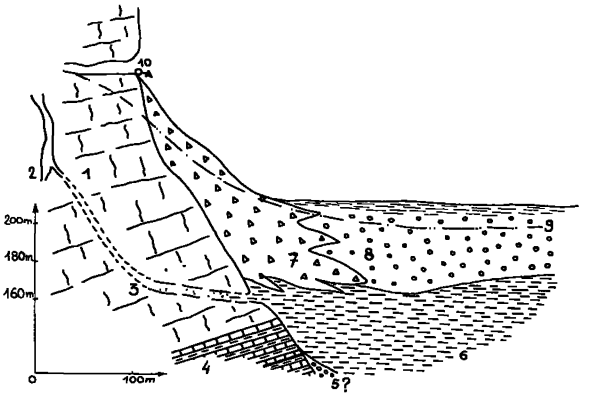

Fig. 12. — Les Cuves de Sassenage (1, calcaires karstiques; 2 et 3, cheneaux noyés et fossiles; 4, marnes; 5, éboulis; 6, argiles; 7 et 8, formations grossières; 9, niveau piézométrique; 10, résurgence).

Les données très précises manquent pour évaluer la part du débit qui ne s'écoule pas par les Cuves. Cette alimentation n'a pas été mise ici en évidence dans la nappe, comme cela a pu être fait ailleurs, par exemple, plus à l'amont aux confins de Fontaine et Sassenage : la dalle des calcaires Sénoniens s'enfonce là sous les alluvions de la plaine et, des mesures physico-chimiques et isoto-

piques ont montré la présence d'eau venant du versant à côté des eaux venant du Drac au sein de la nappe (J.Y. et F. CORDEAU, 1973).

La figure 13 montre les différentes formations calcaires qui peuvent apporter de l'eau à la nappe par l'intermédiaire de réseaux karstiques noyés ainsi que les différentes émergences qui existent au-dessus du niveau de la plaine, pour la Cluse de l'Isère.

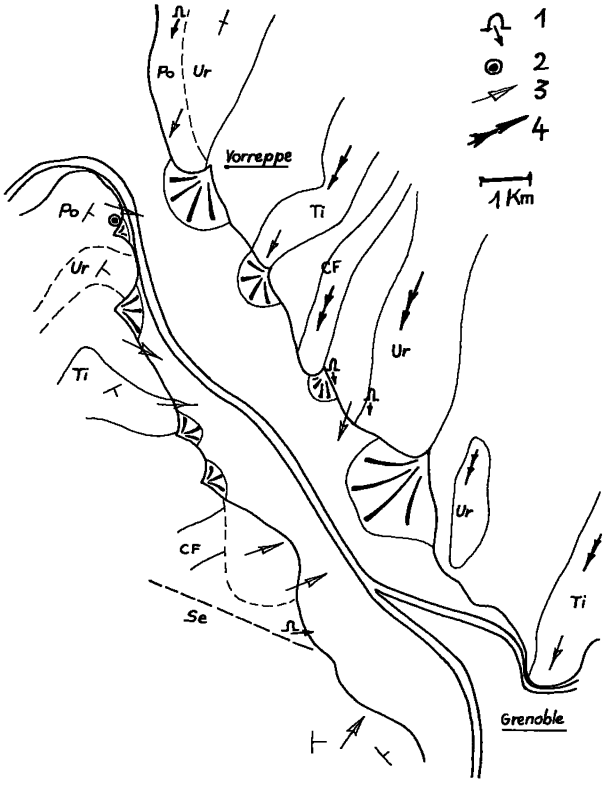

Fig. 13. — Les différentes structures capables d'apporter de l'eau à la nappe dans la Cluse de l'Isère (1, source karstique; 2, source minérale perdue; 3, apports possibles; 4, plongement axial des structures).

Dans la plaine de Moirans, les apports occultes sont plus réduits. En rive gauche, la structure de cette partie du Vercors ne favorise pas les circulations vers la plaine. Seuls, des panneaux assez réduits, à l'aval de la Rivière, apportent très probablement leurs eaux à la nappe. On retrouve d'ailleurs aux pieds de ces panneaux des canaux de drainage aux débits importants.

En rive droite, la vallée est entaillée dans la « Molasse ». Celle-ci est moins perméable que les alluvions et même souvent complètement imperméable ; les apports sont négligeables. Toutefois, entre La Buisse et Saint-Jean de Moirans, on devrait retrouver les eaux arrivant de l'avant-pays de Chartreuse et qui auraient franchi le chaînon du Ratz, dans les réseaux karstiques, sous les gorges de Crossey, selon l'hypothèse de M. MICHEL (1972). Mais dans cette zone, les alluvions sont très fines sur plusieurs mètre d'épaisseur, et si alimentation il y a celle-ci ne peut se faire qu'en profondeur.

L'alimentation occulte n'apporte qu'un débit relativement faible à la nappe sauf dans la Cluse de l'Isère où tous les facteurs concourrent à favoriser ce type d'alimentation. Ils sont toujours très difficiles à estimer et même parfois à mettre en évidence.

Conclusions.

Chacun des types d'alimentation latérale ne fournit pas la même part de l'alimentation potentielle. Les cônes de déjection et les bassins affluents représentent la fraction la plus importante des apports. Ceci est d'autant plus intéressant que l'eau qu'ils sont susceptibles de fournir est de meilleure qualité que celle que l'on peut pomper dans la nappe de la plaine comme nous l'avons déjà signalé (J.C. FOURNEAUX, 1968). C'est bien pourquoi d'ailleurs, les plus gros débits pompés actuellement, le sont dans des cônes de déjection, aussi bien dans le Grésivaudan que dans la Cluse de l'Isère.

Plus le bassin qui fournit l'alimentation latérale est important, plus les possibilités de rétention y sont grandes, plus le débit qu'il est susceptible d'apporter sera régulier ou tout du moins régularisé. A l'opposé, les panneaux non drainés qui servent simplement de relais entre les précipitations et la nappe, vont avoir une influence beaucoup plus variable, voire même nulle pendant certaines périodes de sécheresse.

Il est difficile de préciser l'influence des apports occultes en raison du manque de données sur ce problème. Elle se manifeste surtout dans la Combe de Savoie et dans la Cluse de l'Isère. Des éléments nouveaux ne seront apportés que par des études détaillées menées sur les versants.

L'alimentation latérale, sous ses formes différentes, est susceptible d'apporter un débit considérable à la nappe de la plaine, dont une faible partie seulement reste au sein de l'aquifère. Si, en effet, celui-ci absorbe la plus grande partie de l'alimentation latérale, il en restitue rapidement une bonne part, soit directement à l'Isère, soit aux canaux de drainage. Il y a là une manifestation du phénomène d'échange nappe-rivière : la nappe reçoit un certain volume d'eau du versant et restitue un volume analogue à la rivière, mais l'eau qui rejoint l'Isère, ou un canal, n'est pas celle qui arrive du versant : il y a eu mélange au sein de l'aquifère.

La différence entre l'alimentation apportée par les versants, qui représente, en fait, une alimentation potentielle, et le volume d'eau réellement utilisé par la nappe, constitue les ressources exploitables, c'est-à-dire des volumes d'eau qui peuvent être pompés sans « dommages » pour la nappe.

L'alimentation de la nappe par les cours d'eau de la plaine.

Dans toute la zone étudiée, il existe une étroite dépendance entre les niveaux piézométriques et les lignes d'eau dans l'Isère (ou l'Arc et le Drac). Cette dépendance peut se traduire de trois façons différentes :

— soit la rivière se trouve toujours au-dessus de la nappe ;

— soit la rivière se trouve toujours au-dessous de la nappe ;

— soit enfin la rivière se trouve, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous de la nappe ; dans le premier cas, il y a alimentation permanente de la nappe par la rivière ; dans le deuxième cas, drainage permanent, et dans le dernier cas, tantôt un phénomène, tantôt l'autre.

L'interdépendance des niveaux de la nappe et de la rivière traduit, en fait une possibilité d'échanges entre les deux milieux, donc l'existence d'une solution de continuité qui soit perméable. Les études antérieures dans le Grésivaudan (J.C. Fourneaux, 1968), dans la plaine de Grenoble (B. Lacroix, 1971) comme dans la Combe de Savoie (J.C. Fourneaux, 1972 et 1973 a), confirment l'existence des trois cas évoqués plus haut, le troisième représentant, en fait, le cas général, dont les deux autres ne sont que des cas particuliers.

La présence des digues, si elle permet le passage de crues de l'ordre de 2 000 m³/s *, en amont de Grenoble, assure surtout la propagation rapide des ondes de crues. Cela se traduit par des variations rapides du niveau de l'eau dans la rivière avec des répercussions aussi rapides dans la nappe.

On observe donc une tendance de la nappe à se mettre en équilibre avec la rivière, celui des milieux dont le niveau est le plus haut va céder de l'eau à l'autre ; dans le cas général, cet échange se produit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre mais il existe des cas particuliers.

Mécanisme du phénomène.

L'alimentation de la nappe par la rivière se fait dès que la ligne d'eau se trouve plus haute que le niveau piézométrique, si la perméabilité des digues est suffisante. Les cartes piézométriques montrent un rétablissement rapide de l'équilibre confirmant l'hypothèse de la perméabilité des digues. Celles-ci se présentent comme des massifs de largeur l et de perméabilité K. Dans un plan perpendiculaire à l'axe d'écoulement de la rivière (et à la digue) en prenant une tranche de digue de longueur unité et de section S, on aboutit au schéma de la figure 14.

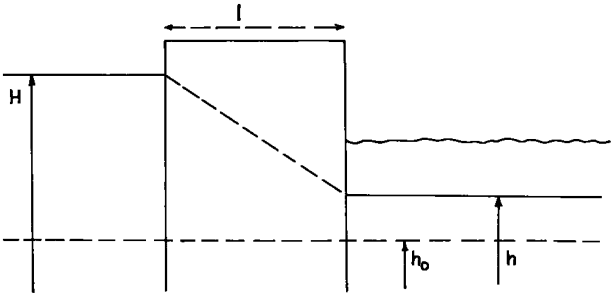

Fig. 14. — Schéma de l'alimentation de la nappe par une crue de l'Isère.

* Le débit des crues pouvant être évacué dans la traversée de Grenoble n'est que de 1 500 m³/s (R. Blanic, 1974).

Où l représente la largeur de la digue,
h_0 le niveau de la nappe et de la rivière avant la crue,
H le niveau de la rivière après la crue,
h le niveau de la nappe à l'instant t.

Il est possible d'appliquer la loi de Darcy pour connaître le débit dq qui transite au travers de la digue par une section de surface S telle que :

$$S = l \times \text{l'unité de longueur}$$

on a alors :

$$dq = K\ S\ i dt$$

et idt le gradient qui est en fonction du temps puisqu'au fur et à mesure que l'eau passe au travers de la digue le niveau de la nappe monte. Le gradient peut se représenter par :

$$i = (H - h)/l$$

et h est fonction du temps ; on arrive donc à :

$$dq = (K\ S)/l \times (H - h)\ dt \qquad (1)$$

Pour connaître le volume d'eau apporté depuis la rivière jusqu'à la nappe avant que l'équilibre ne soit rétabli, c'est-à-dire avant que le gradient et le débit deviennent nuls, il faut pouvoir intégrer l'équation (1).

Deux cas peuvent se présenter. Soit h est fonction de dq et alors le débit sera :

$$Q = f\ (H, h\ (q), t) \qquad (2)$$

soit h est fonction du temps et l'on a alors :

$$Q = f\ (H, h\ (t), t) \qquad (3)$$

Les équations (2) et (3) sont toutes les deux indépendantes du débit de la rivière. La seule variable liée à la rivière est H, c'est-à-dire la hauteur de la ligne d'eau. Ceci est très important car cela prouve que le volume des alimentations apportées à la nappe par la rivière ne dépend pas du débit de la rivière.

On peut dire en résumé :

- le débit instantané au travers de la digue est fonction de (H — h) * ;
- le volume d'eau apporté par la rivière à la nappe dépend de l'évolution avec le temps de (H — h).

* On voit très bien que lorsque (H-h) devient négatif, la rivière draine la nappe au lieu de l'alimenter.

De l'étude des variations de (H — h) va découler la connaissance des apports de la rivière vers la nappe. En l'absence de modifications naturelles ou artificielles de la section du lit mineur, la hauteur d'eau dans la rivière varie avec le débit.

Celui-ci varie non seulement avec les précipitations mais aussi avec la gestion des stocks d'eau retenus dans les réservoirs (Roselend, Tignes, Mont-Cenis, etc...).

Les lachures de Randens, par exemple, sur l'Arc, à 8 km en amont du confluent avec l'Isère, peuvent passer de 20 à 180 m³/s en quelques minutes et cela deux fois par jour. Les ondes de crues relatives à ces lachures mettent deux heures pour aller du Pont-Royal à Sainte-Marie-d'Alloix, ce qui représente une vitesse de propagation de l'ordre de 15 km/h, avec des dénivelés de l'ordre de 50 cm.

Ce type de variation où seules pratiquement les lachures viennent modifier le débit ne se voit qu'en période d'étiage hivernal. L'amortissement de l'onde de crue est très rapide dans la nappe et les limnigraphes placés sur des piézomètres à moins de 200 m de la rivière n'en portent pas les traces.

Cas général.

Dans le cas le plus général, lors d'une crue, on assiste à une montée très rapide du niveau, dans la rivière et à une décrue plus ou moins lente. Du côté de la nappe, la réaction se fait avec un certain retard et la montée du niveau est moins rapide. Lorsque le niveau de la nappe a rattrapé celui de la rivière, la décrue de la nappe commence, mais, elle aussi, est moins rapide que celle de la rivière.

On peut alors, à partir de la comparaison des deux limnigrammes (fig. 15), tracer la courbe de (H - h) en fonction du temps. Il sera alors possible de voir comment varie le débit d'une part et de calculer le volume d'eau apporté d'autre part (fig. 16).

A l'équilibre (H - h) est nul, le gradient aussi ; il n'y a pas de transfert d'eau entre la rivière et la nappe ni dans un sens, ni dans l'autre. A partir de t^1 (H - h) augmente rapidement jusqu'au moment t_2 ou s'amorce la décrue sur la rivière et où

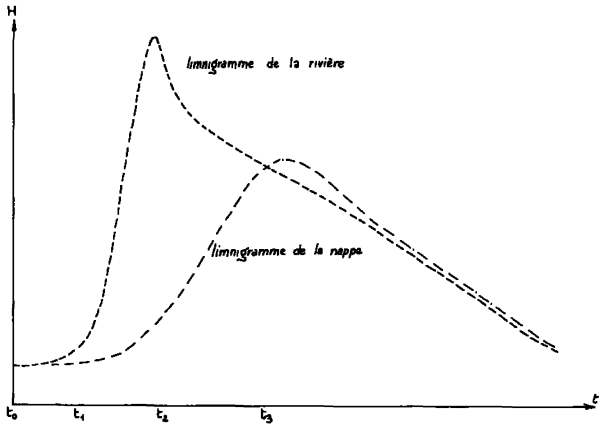

Fig. 15. — Variations comparées de la nappe et de la rivière lors d'une crue (cas théorique).

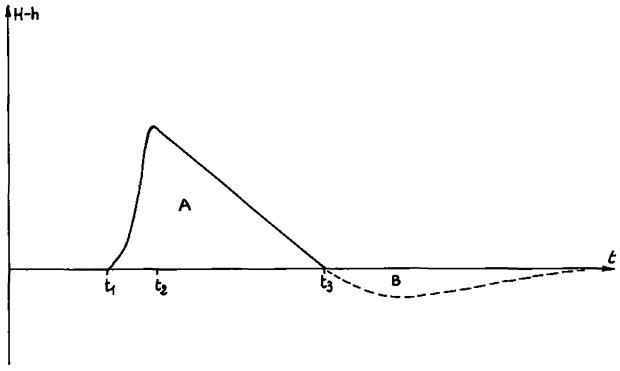

Fig. 16. — Volume d'eau apporté à la nappe pendant une crue.

l'on assiste à une décroissance rapide de (H - *h*) jusqu'en t_3. La décroissance continuant (H - *h*) devient négatif ; il y a drainage de la nappe par la rivière et retour lent à un équilibre.

Cette courbe est une représentation de l'équation (1) ; elle donne le débit instantané transitant, dans un sens ou dans l'autre au point de mesure *. Le calcul de la surface (A) - (B) donne le volume des apports de la rivière vers la nappe, volume qui peut être obtenu par la mesure des niveaux H et *h* et par la connaissance de la porosité du terrain. Cette méthode est analogue à celle utilisée pour chiffrer l'alimentation réelle à partir d'un versant. Il faut, bien évidemment, que la mesure de *h* soit faite dans des conditions telles que seul H intervienne sur les variations de *h*.

Les variations de *h*, c'est-à-dire du niveau piézométrique dans la nappe influencée par la crue de la rivière, dépendent aussi de la perméabilité des terrains qui renferment la nappe dans cette zone et de l'écoulement de la nappe c'est-à-dire de ce que devient l'eau de la nappe.

Considérons un élément de terrain en bordure de la digue. Le débit en provenance de la digue transitant au travers de cet élément de terrain, à un instant donné, est représenté par d*qe* ; le débit sortant de ce même élément de terrain est représenté, lui, par d*qs*. Le débit d*qe* est fonction de (H - *h*), mais d*qs* ne dépend que de conditions extérieures.

Les trois cas évoqués plus haut peuvent se retrouver ici. Si le débit sortant est inférieur au débit entrant (d*qs* < d*qe*), le niveau de la nappe monte, donc (H - *h*) diminue, donc d*qe* diminue et l'on tend vers l'équilibre : c'est le cas général. Mais si d*qs* reste supérieur ou égal à d*qe*, le gradient reste constant ou augmente et l'alimentation permanente de la nappe par la rivière. Si, enfin, la valeur de (H - *h*) reste négative, il est bien évident que d*qe* sera aussi négatif et que l'on se trouve dans le cas d'un drainage de la nappe par la rivière.

Dans la vallée de l'Isère des figures illustrent ces trois cas, comme nous allons le voir maintenant.

Alimentation permanente.

Dans plusieurs secteurs de la vallée de l'Isère, la nappe est alimentée en permanence par la rivière. Le niveau de la ligne d'eau dans l'Isère ou dans l'Arc est toujours au-dessus du niveau piézométrique.

Le bassin de la Bialle.

Le bassin de la Bialle, s'étend en rive droite de l'Isère, entre Grésy-sur-Isère à l'amont et le cône de déjection de Saint-Pierre-d'Albigny, à l'aval. La Bialle est un canal de drainage, uniquement

* Elle est l'image des échanges entre la nappe et la rivière.

alimentée par les eaux de la nappe et par les apports occultes des versants, là où elle vient lécher les premières pentes. Elle emprunte un ancien lit de l'Isère, bien visible en photographie aérienne. Il s'agit d'un lit relativement récent qui contournait le cône de déjection de l'Arc. L'endiguement de l'Isère, au siècle dernier, a provoqué une surélévation du lit de la rivière et celui-ci se trouve aujourd'hui plus haut que l'ancien lit qu'emprunte la Bialle. Le terrain naturel a une pente transversale régulière depuis le pied des digues jusqu'au lit de la Bialle.

Les cartes isopièzes dressées aussi bien pour les hautes eaux que pour les basses eaux montrent une alimentation permanente de la nappe par l'Isère et un drainage permanent de la nappe par la Bialle (fig. 17 et 18). La mise en place de limnigraphes ainsi que de nombreux piézomètres et échelles limnimétriques a permis une analyse correcte de cette situation. Il est possible, aujourd'hui de chiffrer les volumes d'eau apportés par l'Isère à la nappe (J.-C. FOURNEAUX, 1973).

Les cartes isopièzes.

La comparaison des cartes isopièzes de hautes eaux et de basses eaux montre une grande similitude de forme dans toute la zone comprise entre l'Isère et la Bialle ; on constate seulement un décalage d'un mètre sur les courbes isopièzes. Dans chacune des situations, il existe une circulation dont les lignes de courant font un angle de 45° environ avec la direction de l'Isère. La pente moyenne de la nappe, dans toute cette zone, est comprise entre 2 et 3 pour 1 000.

Il n'en est pas de même en rive droite de la Bialle. Une alimentation importante se manifeste depuis le versant. Même lorsqu'il n'existe pratiquement aucun écoulement superficiel au niveau de la voie ferrée qui marque la limite entre la plaine et le versant, les apports souterrains sont considérables et influent sur la forme des courbes isopièzes. Mais lors des longues périodes de sècheresse, en 1972 et 1973, dès le mois d'août, la forme des courbes isopièzes a montré le tarissement des apports du versant. La nappe est là en équilibre avec la Bialle.

De plus, sur toutes les cartes isopièzes, on constate la réalimentation de la nappe en rive gauche de la Bialle, au-delà du pont de la route du Bourget. La pente du canal est, en effet moins forte que celles de la nappe et de l'Isère. Cette situation ne se présente pas en rive droite, sauf après le passage sous la voie ferrée du Fréjus. La nappe est alimentée par la Bialle et drainée par le canal de Saint-Pierre. Cette réalimentation se manifeste toujours à partir du même point, mais les débits infiltrés varient beaucoup avec le débit du canal.

L'équilibre n'est atteint que dans la partie aval du bassin, lorsque l'on assiste a une longue période sans précipitations. Dans cette zone, l'alimentation à partir de l'Isère est difficile à apprécier. Il n'en est pas de même dans la partie située à l'amont du pont du Bourget, où l'on se trouve en présence d'un schéma identique quels que soient les débits de l'Isère et ceux de la Bialle.

Enfin, en basses eaux, la haute Bialle est à sec ; le drainage, visible sur la carte isopièze, est le fait du chenal à forte perméabilité, ancien lit mineur de l'Isère.

Analyse des débits.

L'analyse des débits de la Bialle va permettre d'évaluer le volume des apports de l'Isère et comment ces apports varient dans le temps, en fonction des différents paramètres.

Le bassin « géographique » drainé par la Bialle couvre une superficie de 27 km, en le fermant au pont du Bourget. Le débit moyen annuel calculé sur une période de trois ans (1971-1973) est de 1 300 l/s.

On a donc, pour ce bassin, un module de :

$$1\,300 : 27 = 48{,}15 \text{ l/s/km}^2$$

Ce chiffre est bien supérieur aux 25 l/s/km² déterminé pour l'ensemble des versants de la vallée de l'Isère. La différence entre la valeur calculée et la valeur moyenne donne les apports de l'Isère moins le débit de la nappe qui est voisin de 10 % de celui du canal. Les apports de l'Isère sont donc :

apports de l'Isère = (module calculé — module moyen) × surface — débit de la nappe

$$V = (48{,}15 - 25) \times 27 - 130$$

$$V = 750 \text{ l/seconde.}$$

Ce débit s'infiltre au travers des digues sur une distance légèrement inférieure à 6 km, ce qui re-

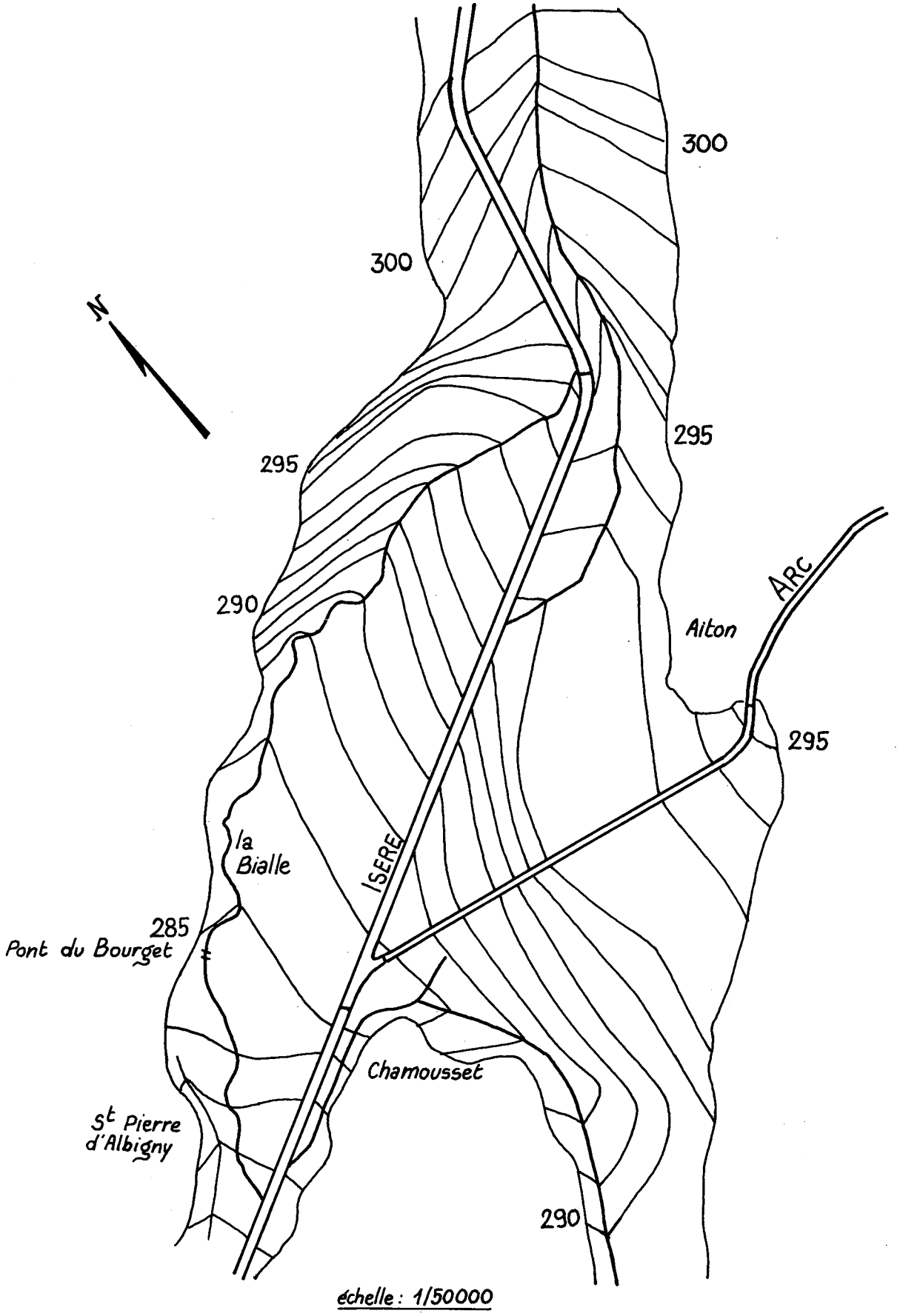

Fig. 17. — Le bassin de la Bialle : carte isopièze du 2 juin 1972 (hautes eaux).

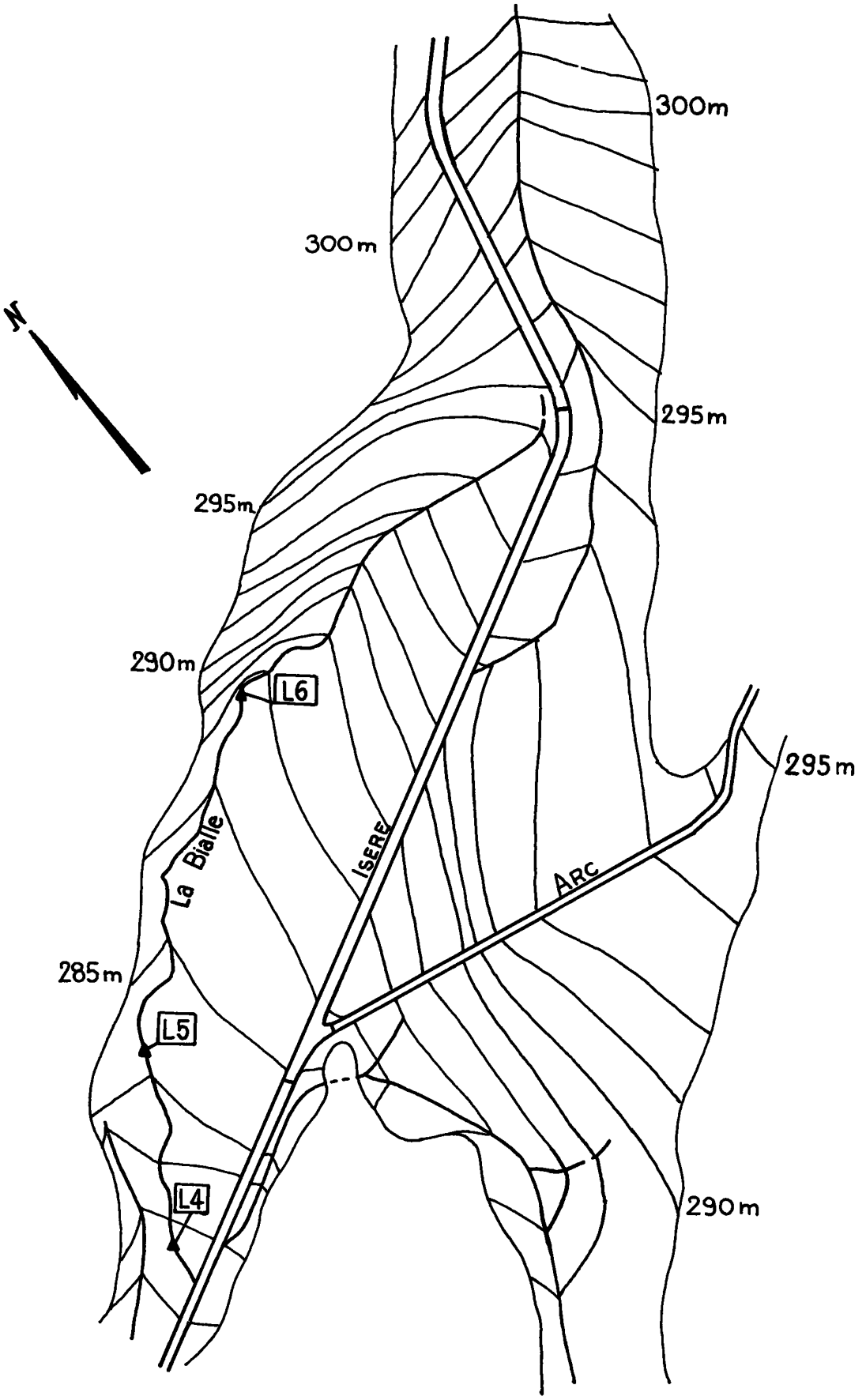

Fig. 18. — Carte isopièze du 5 octobre 1972 (basses eaux).

présente une alimentation de l'ordre de 125 l/s par kilomètre de digue.

Comment varie ce débit ? Le niveau, dans l'Isère, peut s'élever de 1 m à 1,5 m au maximum. Dans le canal, le niveau s'élève de 0,5 m à 0,8 m. Les crues pendant lesquelles le niveau dépasse ces valeurs sont très brèves et correspondent à un fort ruissellement sur le versant. Les torrents, à sec la plupart du temps, se mettent à couler pendant quelques heures et rejoignent directement la Bialle.

Lors d'une crue élevant le niveau de l'Isère de 1 m et celui du canal de 0,5 m, le gradient de la nappe va varier de 0,25 pour 1 000. Les autres facteurs qui influent sur le débit infiltré ne changent pas. A partir de là, la fourchette dans laquelle varie le débit apporté par l'Isère à la nappe, peut être estimé par application de la loi de DARCY

$$Q = K S i$$

Dans le cas présent K et S sont constants. On a donc :

$$Q = a \,.\, f(i)$$

Les variations du gradient i sont de $\pm$ 0,25 pour 1 000, pour un gradient moyen de 2,5 pour 1 000. On a donc :

débit maximal = débit moyen $\times$ 1,1
débit minimal = débit moyen $\times$ 0,9

Le débit apporté par l'Isère varie donc entre 825 l/s et 675 l/s.

Le débit de l'Isère, en amont du confluent de l'Arc, ne descend jamais en-dessous de 25 m³/s ; le débit infiltré reste donc inférieur aux erreurs de mesures et ne peut être estimé par différence, d'autant plus que, comme nous le verrons plus loin, en rive gauche, l'Isère draine la nappe et reçoit un débit à peine inférieur à celui qui s'infiltre en rive droite.

Analyse des courbes de tarissement.

A la suite d'une crue isolée, la courbe de tarissement (fig. 19) permet de déceler trois segments de droite au moins. Le premier correspond au ruissellement superficiel dans les torrents qui se poursuit pendant quelques heures seulement et atteint très rapidement la Bialle. Le deuxième segment correspond à la vidange des premières

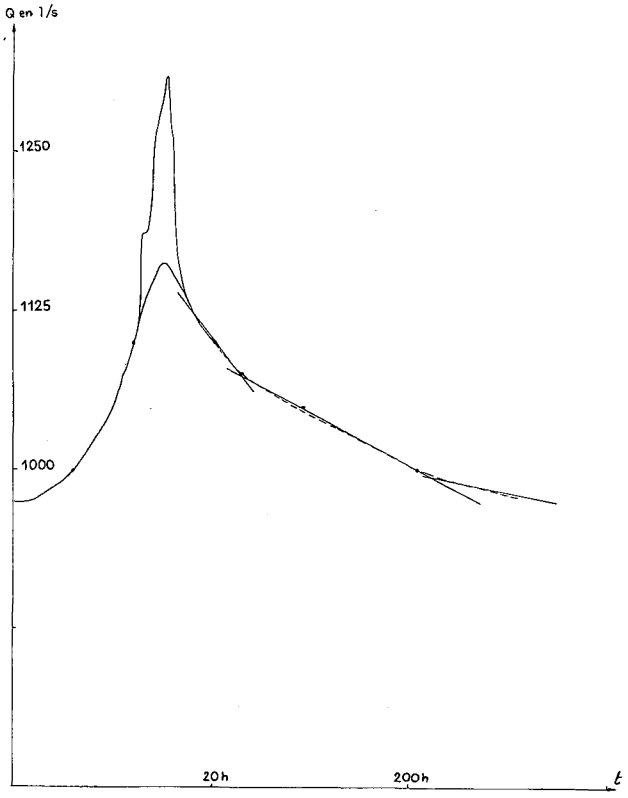

Fig. 19. — Courbe du tarissement de la Bialle (février 1974).

pentes, là où les éboulis et les formations diverses forment une masse importante où la porosité et la perméabilité sont relativement élevées. Cette vidange se fait soit par l'intermédiaire de sources qui jalonnent le pied du versant et dont le débit augmente beaucoup après les averses, soit par drainage direct. L'eau infiltrée dans les éboulis s'écoule vers la nappe de la plaine et celle-ci est drainée par le canal. Le troisième segment correspond à la vidange de la nappe de la plaine elle-même ; cet épisode est beaucoup plus lent car les gradients sont beaucoup plus faibles que sur le versant et la perméabilité des formations superficielles est souvent plus faible, elle aussi.

L'examen des courbes de tarissement lors des longues périodes sèches de 1971 à 1972 montre l'apparition d'un quatrième segment à pente encore plus faible. Il y a, dans ce cas là, disparition presque totale des apports latéraux : la partie de la nappe située entre la Bialle et le versant est

pratiquement vidangée et que seules les infiltrations en provenance de l'Isère alimentent le ruisseau après avoir transité par la nappe. Le débit tend à ce moment là vers la valeur de 750 l/s calculé plus haut. Le quatrième segment sur la courbe de tarissement est en fait une droite horizontale (fig. 20).

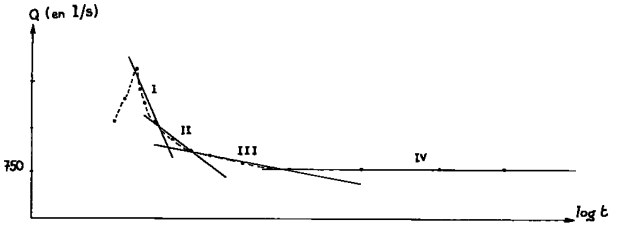

Fig. 20. — Débits de la Bialle en fonction du temps lors des grandes périodes sèches.

La courbe traduit ainsi l'alimentation permanente de la nappe par l'Isère même lorsque le débit de celle-ci reste très faible pendant un temps relativement long. L'infiltration sous le lit de l'Isère s'ajoute aux apports de la rivière sans qu'il soit possible de faire une différence.

Cet exemple est une bonne image agrandie de ce qui se passe dans l'ensemble de l'ombilic. De l'eau s'infiltre à partir de l'Isère, à un endroit particulier ou à un moment particulier, elle rejoint la nappe, se mélange au sein de l'aquifère pour être ensuite, en grande partie drainée par les canaux d'où elle retourne à la rivière. Dans le cas de la Bialle les échanges atteignent 1 m³/s. D'autres situations favorisent aussi ces échanges.

Les divagations de l'Isère dans sa plaine alluviale.

Si, en Savoie et dans la partie amont du Grésivaudan, l'Isère s'écoule selon un tracé presque rectiligne, il n'en est plus de même à l'approche de Grenoble. La rivière décrit des boucles qui lui font emprunter une direction parfois perpendiculaire à l'axe de la vallée. C'est le cas à l'aval immédiat de Lancey, à l'aval de Domène et en amont de Saint-Martin-d'Hères, pour ce qui concerne le Grésivaudan. On va retrouver des sinuosités moins marquées à l'aval du bec de l'Echaillon. Chaque fois que l'Isère s'écoule selon une direction très oblique par rapport à l'axe de la vallée, la nappe située côté aval, est alimentée en permanence par la rivière, alors que la nappe située côté amont est drainée (fig. 21).

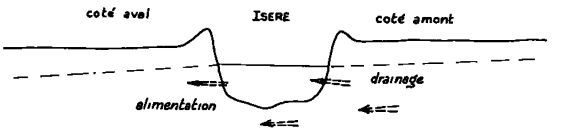

Fig. 21. — La nappe dans une boucle de l'Isère.

Cette situation qui se maintient quel que soit le niveau de l'Isère représente un autre mécanisme d'échange permanent entre la nappe et la rivière.

Les confluences.

L'Arc débouche dans la Combe de Savoie avec une pente plus forte que celle de l'Isère. La nappe du triangle d'Aiton est comprise entre une ligne d'eau haute, l'Arc et une ligne d'eau basse, l'Isère. Il y a circulation d'un flux depuis l'Arc vers l'Isère au travers de la nappe. Ce type d'alimentation est permanent et ne dépend pas, lui non plus, des débits relatifs de l'Arc et de l'Isère. On mesure, en effet, entre les deux lignes d'eau des différences de hauteur beaucoup plus importantes que les variations de hauteurs de chacune des deux lignes d'eau (fig. 17 et 18).

Une situation analogue se retrouve au niveau du confluent du Drac et de l'Isère. Celle-ci se trouve plus basse que le Drac. Là aussi, il y a circulation d'eau depuis le Drac vers l'Isère au travers de la nappe (B. Lacroix, 1971).

Les cartes de nappes mettent en évidence la permanence de ce type d'alimentation. Il apparaît très clairement, sur une ligne de courant, une différence d'altitude entre le niveau de base de la nappe (la ligne d'eau de l'Isère en l'occurrence) et le niveau d'alimentation (la ligne d'eau du Drac). Cette différence est supérieure aux variations de hauteur enregistrées sur les deux cours d'eau.

Les canaux de drainage.

La plaine est parcourue par de nombreux canaux de drainage. Certains de ces canaux sont relativement longs. L'étude des cartes isopièzes montre que s'ils drainent la nappe sur la partie

amont de leur tracé, il n'en est plus de même dans la partie aval. Cela tient à la pente de ces canaux qui doivent rejoindre l'Isère à un moment ou à un autre.

On retrouve le long du cours d'un tel canal (fig. 22) d'abord une zone de drainage, puis une zone d'équilibre entre la nappe et le canal et enfin une zone d'alimentation. Ces trois zones ont des extensions variables au cours de l'année.

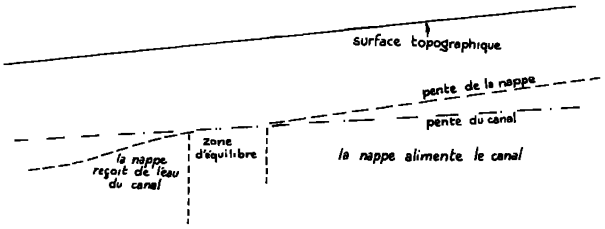

Fig. 22. — Alimentation de la nappe par un canal de drainage.

Cette situation est souvent liée à l'enfoncement plus ou moins récent du lit de l'Isère. Dans sa partie aval, le canal a un tracé parallèle à celui de la rivière et près de celle-ci. Si le niveau de la ligne d'eau baisse dans la rivière en raison d'un abaissement du fond du lit, la nappe, dans ce cas là, se trouve drainée par la rivière et se retrouve plus basse que le canal.

L'eau du canal retourne alors, en partie au moins, vers la nappe. Pour éviter cet inconvénient certains canaux ont été bétonnés, dans la partie aval de leur cours. Dans ce cas là, l'alimentation de la nappe ne peut plus se faire que par les fissures du béton et n'atteint jamais une valeur importante, qui reste sans effets visibles sur les cartes isopièzes. Deux exemples viennent illustrer ce schéma relatif aux canaux de drainage. Le premier correspond à la partie aval du bassin de la Bialle. Le débit de ce canal est enregistré en trois points (voir fig. 18). Il s'agit des limnigraphes L 4, L 5 et L 6. Le débit augmente entre L 6 et L 5, par contre, il diminue à nouveau entre L 5 et L 4. Les courbes isopièzes viennent d'ailleurs confirmer l'importance des infiltrations à partir du canal. Une partie des eaux est d'ailleurs drainée par un autre canal, le canal de Saint-Pierre-d'Albigny, qui prend naissance entre la Bialle aval et le versant. Le tableau ci-dessous donne les valeurs des débits infiltrés entre les deux points de mesure.

Q en L5	2 850	2 050	1 950	1 660	1 270	1 080
Q en L4	2 100	1 500	1 500	1 350	1 100	1 000
I = Q (L5) = Q (L4)	750	550	450	310	170	80

La courbe I = f (Q L 5) est très voisine d'une droite (fig. 23). I = 0,45 (QL 5) + 870.

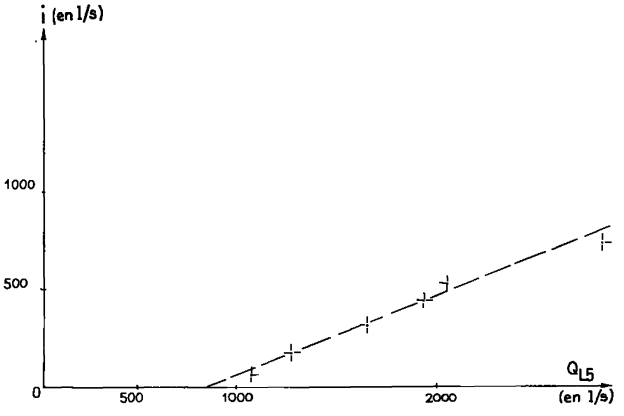

Fig. 23. — Les apports de la Bialle à la nappe en aval du pont du Bourget.

Il ne s'agit pas ici d'une alimentation permanente mais, quel que soit le débit que perd le canal, les courbes isopièzes conservent la même forme avec un écart de 1 mètre entre les hautes eaux et les basses eaux. Le même phénomène est visible sur le Coisetan, l'émissaire superficiel du lac de Sainte-Hélène. Ce lac remplit une dépression au sein de formations très peu perméables, puisqu'il s'agit de tourbes et d'argiles compactes. Le Coisetan draine la nappe depuis la sortie du lac jusqu'au niveau où il franchit la voie ferrée Grenoble-Montmélian, à environ deux kilomètres en amont de Pontcharra.

Ce changement de « régime » coïncide avec un changement de granulométrie des alluvions. Depuis Ste-Hélène jusqu'à la sortie de Laissaud, le Coisetan coulant sur des alluvions où les fines dominent très largement, la nappe est alimentée par les versants ; même si cette alimentation reste toujours peu importante, la faible perméabilité

des alluvions provoque une régulation des apports et permet à la nappe de rester haute toute l'année. C'est ainsi que dans un puits situé au pied du versant, en rive droite du Coisetan, au hameau du Pognient, les écarts entre hautes eaux et basses eaux ne dépassent pas 0,5 m, bien que ce point se trouve à plus de trois mètres au-dessus du niveau du Coisetan, pour une distance horizontale de 450 m.

Au contraire, au point où le canal croise la voie ferrée, il vient couler sur des alluvions grossières ; le canal va perdre une partie importante de son débit sur 300 ou 400 m de son cours.

L'abaissement artificiel de la nappe.

Nous avons montré que chaque fois que la nappe est plus basse que la rivière, cette dernière alimente la nappe. Lorsque l'on pompe de l'eau, de façon intensive assez près de la rivière, le cône de rabattement lié à ce pompage atteint la rivière et il se crée un gradient important qui permet un transfert d'eau depuis la rivière vers le point de pompage. Ceci représente, en fait, le schéma théorique de l'opération mais la réalité est un différente.

Si l'eau transitait ainsi directement de la rivière au puits, on devrait retrouver l'eau de la rivière simplement filtrée dans celui-ci. Il n'en est rien. L'exemple le plus spectaculaire est donné par la batterie de quatre puits implantés par les Papeteries de France, à Lancey (Isère). Ces puits se trouvent à 25 m du bord de la rivière. Ils fournissent un débit total voisin de 300 m³/h après avoir été essayés à près de 1 000 m³/h. L'absence de piézomètres ne permet pas de fixer les limites de la zone de rabattement mais l'étude des caractéristiques physico-chimiques de l'eau pompée montre bien qu'il s'agit d'un mélange et non pas de l'eau de l'Isère elle-même. Il suffit de considérer le titre hydrométrique. Dans les puits, il évolue, comme le montre le tableau ci-dessous, entre 24 et 27 degrés français, dans l'Isère entre 18 et 32. (A.F. CHOUTEAU et J.-C. FOURNEAUX, 1969).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Puits	26	27	26	25	25	24	24	24	25	26	28	27
Isère	26	33	28	29	24	16,5	20	20	27	29	39	39

L'eau pompée représente un mélange des eaux qui passent, à cet endroit, dans l'Isère, pendant une année. Par ailleurs la présence de sulfates dont la teneur dans les eaux pompées est à peine inférieure à la teneur moyenne des eaux de l'Isère montre que la part de l'alimentation latérale, beaucoup plus pauvre en sulfates, est très réduite ; ceci est d'ailleurs confirmé par l'allure et la forme des courbes isopièzes, dans cette zone (J.-C. FOURNEAUX, 1968).

La zone de rabattement doit être beaucoup plus vaste qu'elle le serait si le transfert entre la rivière et la nappe se faisait selon le schéma théorique. Cela tient en grande partie à l'hétérogénéité des alluvions et en particulier à l'existence de lentilles à faible perméabilité au sein des alluvions grossières. La perméabilité verticale est, dans le cas étudié, beaucoup plus faible que la perméabilité horizontale dans les lentilles d'alluvions grossières au sein desquelles sont placées les barbacannes des puits, comme le montre la coupe de la figure 24.

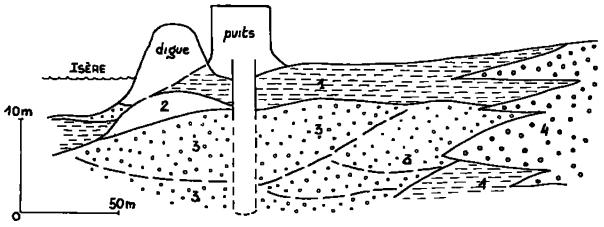

Fig. 24. — Les puits des Papeteries de France à Lancey. (1, argiles; 2, sables; 3, alluvions grossières; 4, éboulis).

Cette situation, bien connue à Lancey, en raison des travaux effectués, se retrouve en plusieurs points de la vallée. Un autre exemple permet de mettre en évidence le rôle de volant que joue la masse des alluvions vis-à-vis des eaux. Il s'agit du lac de la Terrasse. La commune de la Terrasse, sur la rive droite de l'Isère, dans la vallée du Grésivaudan, utilise comme lac pour la baignade et les « sports nautiques » une zone d'emprunt de matériaux creusée lors de la construction de la voie express Grenoble - Le Touvet. Le lac n'est séparé de la rivière que par la digue. Il ne représente qu'un affleurement assez vaste de la nappe. Son niveau varie avec celui de l'Isère, avec un important amortissement. Les ondes de crues de

0,5 à 0,7 m d'amplitude liées aux turbinés de Randens (aménagement Isère-Drac) ne sont pas ressenties sur le lac ; il s'agit là de crues qui se produisent deux fois par jour.

Dans ce lac, la chimie des eaux est tout à fait analogue à celle des eaux pompées à Lancey. Le lac contient un mélange des eaux ayant circulé dans l'Isère pendant un an.

Si le renouvellement est ici beaucoup moins rapide que dans le cas d'un pompage comme à Lancey, dix fois moins rapide, puisque le débit naturel de la nappe transitant au travers du lac est de l'ordre de 30 m^3/h, la perméabilité verticale n'intervient plus, puisqu'il s'agit d'une masse d'eau libre.

On peut assimiler la circulation des eaux souterraines au sein des alluvions à un réseau maillé (fig. 25).

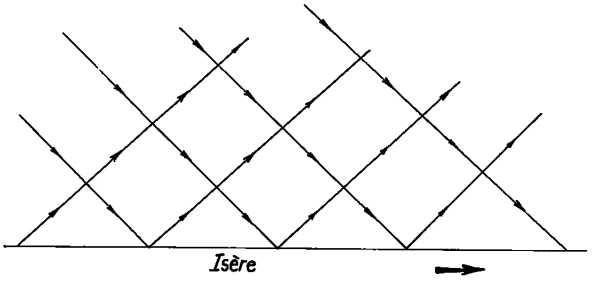

Fig. 25. — Représentation schématique de la circulation des eaux souterraines dans un plan.

A chaque nœud du réseau les apports se mélangent parfaitement et se partagent ensuite en deux. En un point quelconque du réseau, les caractéristiques physico-chimiques des eaux sont la somme d'un grand nombre de mélanges et d'un grand nombre de « partages ». Dans chaque segment, le débit est fonction de la transmissivité de la lentille considérée et du gradient.

Il y a là, une manifestation du phénomène d'échange nappe-rivière qui se produit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre en fonction des fluctuations du niveau de l'Isère, en ce qui concerne le lac de la Terrasse, alors qu'il se produit toujours dans le même sens, à Lancey, où le gradient est maintenu artificiellement constant, en direction, par le pompage.

Aperçu sur les caractéristiques physico-chimiques des différentes alimentation.

Il n'est pas question, ici, de faire une étude complète des caractéristiques physico-chimiques des eaux tant souterraines que superficielles, mais seulement de rappeler les résultats acquis lors de travaux antérieurs (A.F. CHOUTEAU et J.C. FOURNEAUX, 1968-1968 ; B. LACROIX, 1971).

Les sulfates : les eaux de l'Isère, de l'Arc et des torrents qui descendent du massif de Belledonne sont remarquables par la prédominance des sulfates sur les autres anions, prédominance qui se maintient par-delà les variations de teneurs liées aux variations de débits.

Si l'on fait le rapport SO_4^{--}/N^-, avec N^- représentant la concentration de l'ensemble des anions et SO_4^{--}, la concentration en sulfates, on obtient des valeurs toujours supérieures à 0,5.

Au contraire, dans les eaux du Drac, des affluents de l'Isère provenant des chaînes subalpines et des torrents qui drainent des collines bordières, les bicarbonates (HCO_3^-) sont prépondérants. Les sulfates sont même, parfois, totalement absents dans les eaux provenant des massifs subalpins (Bauges, Chartreuse et Vercors).

Au-delà du confluent du Drac, les eaux de l'Isère ne présentent plus toujours la prédominance des sulfates sur les autres anions en raison du mélange avec les eaux du Drac et des variations pas toujours simultanées des débits.

Les principales caractéristiques des eaux de surface doivent se retrouver dans les eaux souterraines, là où la nappe est alimentée par l'infiltration en provenance de la rivière.

La minéralisation acquise.

La comparaison des caractéristiques physico-chimiques d'une eau souterraine avec celles des eaux de surface ne suffit pas, dans la plupart des cas, pour en déterminer la provenance. Les eaux d'origines différentes ne se contentent pas de se mélanger lorsqu'elles arrivent dans la nappe, elles peuvent aussi y acquérir une minéralisation complémentaire qui viendra s'ajouter à la minéralisation « héritée » et parfois la masquer.

Les eaux de l'Isère, par exemple, sont agressives ; c'est-à-dire qu'elles attaquent le carbonate de calcium. Cela tient à ce que le pH de ces eaux est inférieur au pH de saturation déterminé par la méthode de R. GIRARD (1967). L'indice d'agressivité est alors donné par la différence entre le pH de saturation et le pH mesuré. Si cet indice est positif, l'eau est agressive et dissout le calcaire alors que si l'indice est négatif, l'eau est incrustante et dépose du calcaire. Un changement des conditions physico-chimiques générales peut amener l'eau d'une nappe à devenir incrustante dans une certaine zone : elle déposera donc du calcaire et ainsi s'explique la formation de niveau de conglomérats au sein d'une série d'alluvions.

Pour en revenir aux eaux de l'Isère, lorsqu'elles s'infiltrent et rejoignent la nappe, elles vont se charger en carbonate de calcium par attaque des alluvions qui en contiennent. Leur pH va se rapprocher du pH de saturation et leur agressivité va diminuer pour s'annuler au bout d'un certain parcours souterrain, comme le montrent les mesures du tableau ci-dessous.

	Isère (à Lancey)	Puits 1 (en bordure de l'Isère)	Puits 2 (à 300 m de l'Isère)	Puits 3 (à 600 m)
pH mesuré	7,3	7,3	7,4	7,4
pH de saturation	7,67	7,57	7,47	7,35

Le même phénomène se rencontre avec les eaux du Bréda, qui sont, elles aussi, agressives et se chargent en bicarbonate au fur et à mesure de leurs parcours souterrains.

	Bréda (Pontcharra)	Puits 1 (à 50 m)	Puits 2 (à 500 m)	Puits 3 (à 750 m)
pH mesuré	7,2	7,1	7,4	7,25
pH de saturation	8,3	7,8	7,65	7,27

Au fur et à mesure que l'eau infiltrée se charge en bicarbonate, le rapport $r = SO_4^{--}/HCO_3^-$ va passer de valeurs supérieures à 1 à des valeurs inférieures à 1. La prédominance des sulfates va faire place à celle des bicarbonates. En reportant les valeurs de r en fonction de la distance à l'Isère mesurée selon une ligne de courant, il apparaît une décroissance régulière jusqu'à une certaine distance puis les points se dispersent ; les valeurs de r deviennent aléatoires. Cela correspond à la limite d'influence entre l'alimentation à partir de l'Isère et l'alimentation à partir du versant.

Pour les deux exemples représentés sur la figure 26, la limite entre les zones d'influence est facile à fixer car les apports latéraux sont quasiment dépourvus de sulfates. Cela n'est pas toujours le cas. Il peut y avoir trois alimentations différentes.

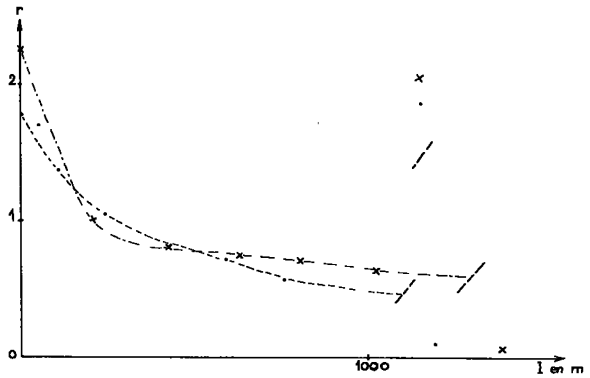

Fig. 26. — Evolution du rapport $r = SO_4^{--}/HCO_3^-$ avec la distance l.

Conclusions sur l'alimentation.

EVALUATION DES DIFFÉRENTES ALIMENTATIONS.

Pour chacun des modes d'alimentation de la nappe, il est possible de calculer le volume d'eau susceptible d'être apporté à la nappe, pendant une période donnée. En faisant la somme de ces volumes élémentaires, on obtient le volume total d'eau apportée à la nappe pendant la période choisie. Pour la facilité des comparaisons, il est intéressant de traduire ces volumes en débit, mais il faut bien garder présent à l'esprit les écarts importants qui peuvent exister entre les débits instantanés et les débits moyens pour certaines de ces alimentations.

L'alimentation par la pluie tombée sur la plaine apporte un débit de 19 l/s/km², avec des écarts de 40 % entre les années sèches et les années humides.

Pour l'alimentation par les versants, les résultats obtenus dans le Grésivaudan donnaient un débit de 150 l/s et par kilomètre de pied de versant pour la rive gauche et 70 l/s/km pour la rive droite (J.C. FOURNEAUX, 1968). La plus grande partie des débits de la rive gauche est apportée par les cônes de déjection sur lesquels coulent des torrents pérennes et de gros débits. Les valeurs ne sont pas aussi importantes en rive gauche dans la Combe de Savoie, en raison des conditions morphologiques et géologiques. Les chiffres obtenus sont de 40 l/s/km entre Montmélian et le Pont Royal et 60 l/s/km entre le Pont Royal et Aiton. En rive droite, au contraire, à cause de l'existence des cônes de déjection, le débit par kilomètre atteint des valeurs voisines de 100 l/s. Dans la Cluse de l'Isère, les bassins versants adjacents sont beaucoup plus vastes, mais une partie des apports se fait de façon occulte. Les valeurs obtenues, pour la rive gauche comme pour la rive droite, sont très voisines de 80 l/s/km. Dans la plaine de Moirans enfin, les apports latéraux sont beaucoup plus faibles en rive droite, où ils ne dépassent pas 30 l/s/km. En rive gauche les valeurs obtenues donnent des chiffres de l'ordre de 75 l/s/km. Il n'est pas question de calculer une valeur moyenne qui n'aurait de sens que si l'on envisageait un bilan total de la nappe.

L'alimentation par les cours d'eau superficiels, l'Isère en particulier, peut difficilement se traduire en débit. En effet, en raison du régime très largement influencé de l'Isère, le débit des infiltrations qui peut atteindre 100 l/s/km, peut aussi être nul et même négatif, au même endroit, quelques heures plus tard.

Il s'agit surtout d'une alimentation potentielle qui peut effectivement fournir un débit compris entre 100 et 150 l/s/km pour alimenter des ouvrages de pompages par exemple. C'est ce qui se passe pour les puits de Lancey.

Si l'on veut, tout de même, essayer de dresser un bilan, pour un élément de la nappe carré de 1 km de côté, bordé d'un côté par l'Isère, et de l'autre par un pied de versant, on obtient :

Qa = apport par l'amont = $K S i$;
Qb = apport par les versants = entre 30 et 150 l/s selon la situation de l'élément considéré dans la vallée ;
Qc = apport par les précipitations = 19 l/s ;
Qd = apport par l'Isère = 100 l/s.

Le débit sortant par l'aval de cet élément de nappe est :

$$Qe = K_e S_e i_e$$

Dans la plupart des cas, Qa est très peu différent de Qe. Il existe donc non seulement un drainage par l'Isère qui reprend un débit équivalent à Qd, mais, pour obtenir l'équilibre :

$$Qe = Qa + Qb + Qc + Qd,$$

il faut un canal de drainage, c'est-à-dire que Qd est la plupart du temps négatif.

Pour l'élément de la nappe considéré, chaque terme de cette équation peut être calculé à partir de quelques mesures sur le terrain. Il est alors possible de calculer le débit exploitable théorique. La connaissance de la géométrie de l'aquifère, de sa perméabilité et de sa porosité permettront de définir l'ouvrage (ou les ouvrages) nécessaires pour exploiter ce débit.

Evaluation qualitative.

La minéralisation des eaux superficielles varie beaucoup au cours d'une année. Elle subit les effets des fluctuations du débit et d'une manière générale, la minéralisation diminue quand le débit augmente et inversement (A.F. CHOUTEAU, 1968) (fig. 27).

La nappe amortit considérablement ces variations de minéralisation. A titre d'exemple, la figure 28 donne les variations de la résistivité des eaux de l'Isère au Pont Albertin, en aval du confluent de l'Arly et celles de la nappe en un point distant de 200 m de l'Isère et où l'alimentation se fait à partir de l'Isère. Pour la nappe, la résistivité est restée comprise entre 2 190 Ω/cm et 2 540 Ω/cm du mois de juillet 1972 au mois d'août 1973 ; pendant la même période, elle a varié entre 2 520 Ω/cm et 5 175 Ω/cm dans l'Isère.

Il ne s'agit pas là d'un point particulier. Les mêmes variations se retrouvent dans l'Arc, dans le Drac, etc. Dans la nappe, au contraire, les variations importantes de résistivité sont très rares et s'expliquent par des alimentations temporaires à partir de cône de déjection.

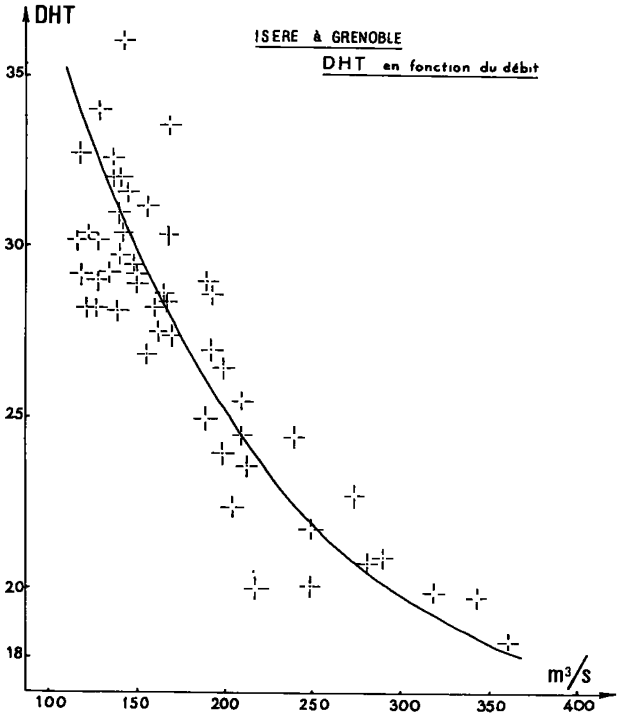

Fig. 27. — Degré hydrotimétrique des eaux de l'Isère en fonction du débit.

Cette stabilité relative des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe se conserve même lorsque l'on pompe des débits importants assez près de la rivière, comme nous l'avons vu pour les pompages de Lancey.

Les ondes de « minéralisation » induites dans la nappe par l'Isère s'amortissent très vite. Tout se passe comme si l'eau pompée était un mélange des eaux qui s'infiltrent au cours de l'année.

Les cas particuliers évoqués plus haut se rencontrent surtout dans la partie amont de la Combe de Savoie, en rive gauche. Là, des torrents temporaires rejoignent la plaine par l'intermédiaire de petits cônes de déjection. Les alluvions qui constituent ces cônes sont essentiellement siliceuses. Elles ne représentent qu'un aquifère très réduit. En période de fonte des neiges, une eau très peu minéralisée s'infiltre dans ces alluvions où, malgré sa forte agressivité, elle n'augmente que très peu sa minéralisation. Si cette eau se propage dans la nappe au sein de lentilles à forte perméabilité, elle gardera ses caractères propres sur une certaine distance (voir figure 7). Ici, il n'y a plus mélange dans le cône, car celui-ci se vidange entièrement entre deux épisodes humides. On peut trouver, dans la plaine, des points qui reçoivent, tantôt une alimentation par ce type de cônes, tantôt une alimentation par l'Isère. La résistivité de l'eau, mesurée en un tel point, va présenter des variations importantes.

De même que les lentilles d'alluvions à forte perméabilité peuvent permettre la propagation d'eau faiblement minéralisée et freiner le mélange de ces eaux avec les eaux du reste de la nappe, le phénomène inverse se rencontre. Un chenal à forte perméabilité correspondant à une ancienne boucle de l'Isère facilite la propagation d'eaux très minéralisées. C'est le cas de l'ancienne boucle des Eparres dans la partie aval du Grésivaudan. Un dépôt d'ordures ménagères avait été implanté dans le coude de l'ancienne boucle. Les eaux fortement minéralisées par le lessivage des ordures se propagent le long des deux bras de la boucle (fig. 29).

Les débits de la nappe.

Pour évaluer le débit transitant au travers d'une section donnée de la nappe, il faut connaître la surface de cette section, la perméabilité moyenne des alluvions dans cette section, ainsi que le gradient de la nappe en cet endroit. La section est connue grâce aux sondages et aux prospections géophysiques. La perméabilité est connue grâce aux mêmes éléments, complétés par d'éventuels essais de pompage ou des essais sur les sondages. Le gradient se mesure sur une carte isopièze. Il est alors possible d'appliquer la formule de Darcy :

$$Q = K S i$$

La figure 30 donne les valeurs du débit de la nappe calculées pour des sections bien connues. Il apparaît tout de suite que le débit n'augmente pas de l'amont vers l'aval. Il n'y a pas un débit de la nappe mais un débit relatif à chaque section de la nappe. Ceci découle évidemment de l'équilibre nappe-rivière. La rivière vient compenser les déficits et « perçoit » les trop pleins.

Le débit de la nappe est nul au pont de Saint-Gervais, là où se termine l'Ombilic de Grenoble.

La structure géologique de cette zone, argiles compactes reposant sur la molasse, ne permet pas d'envisager des circulations souterraines.

Les débits, au travers des différentes sections, sont compris entre 80 l/s et 1 000 l/s. Le débit de l'Isère au pont de la Gache, à Pontcharra, descend très rarement en dessous de 80 m³/s. Des jaugeages, mêmes très précis, ne permettent pas de

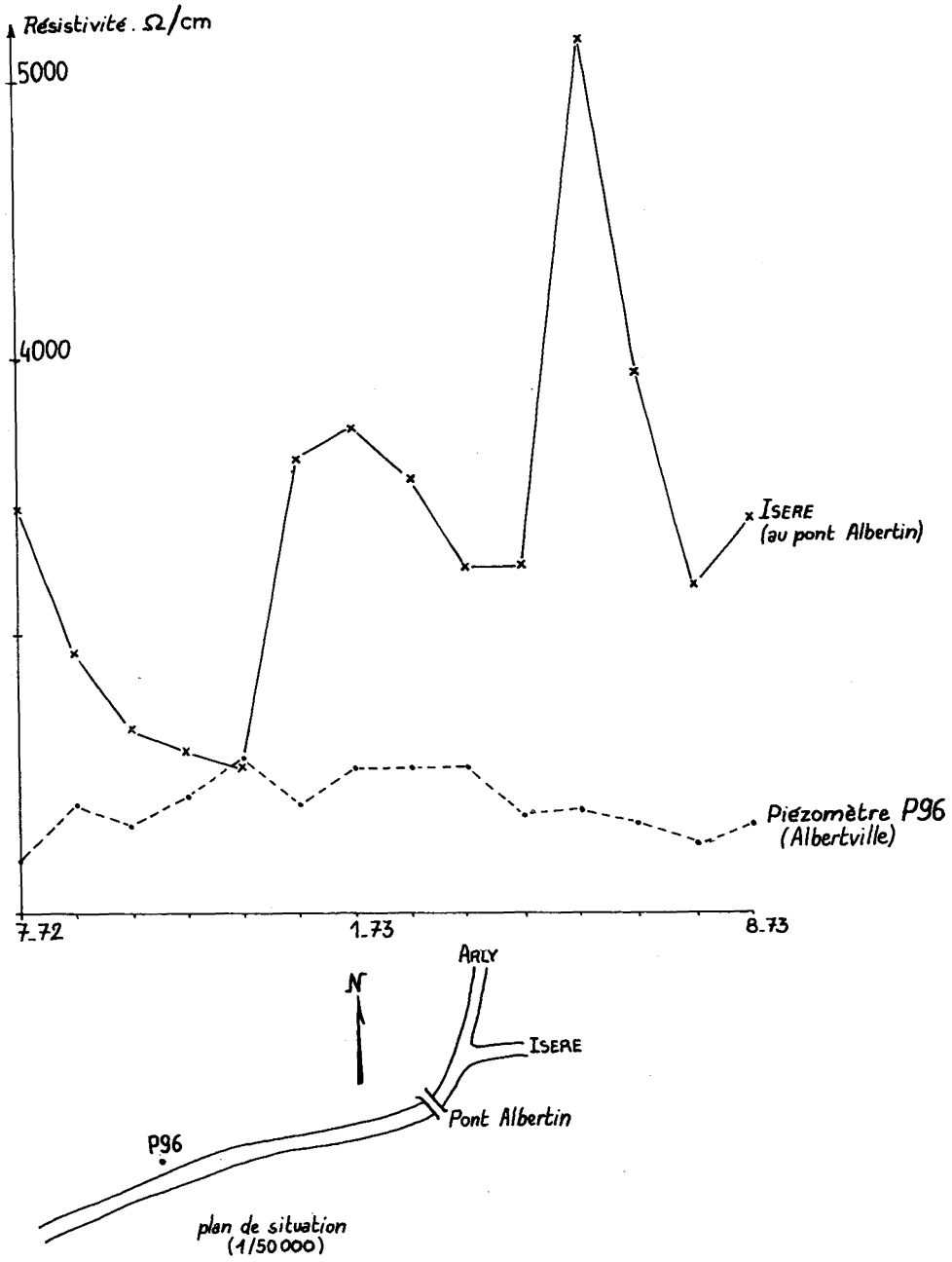

Fig. 28. — Comparaison de la resistivité dans l'Isère et dans la nappe. La nappe amortit les variations très fortes mesurées dans l'Isère.

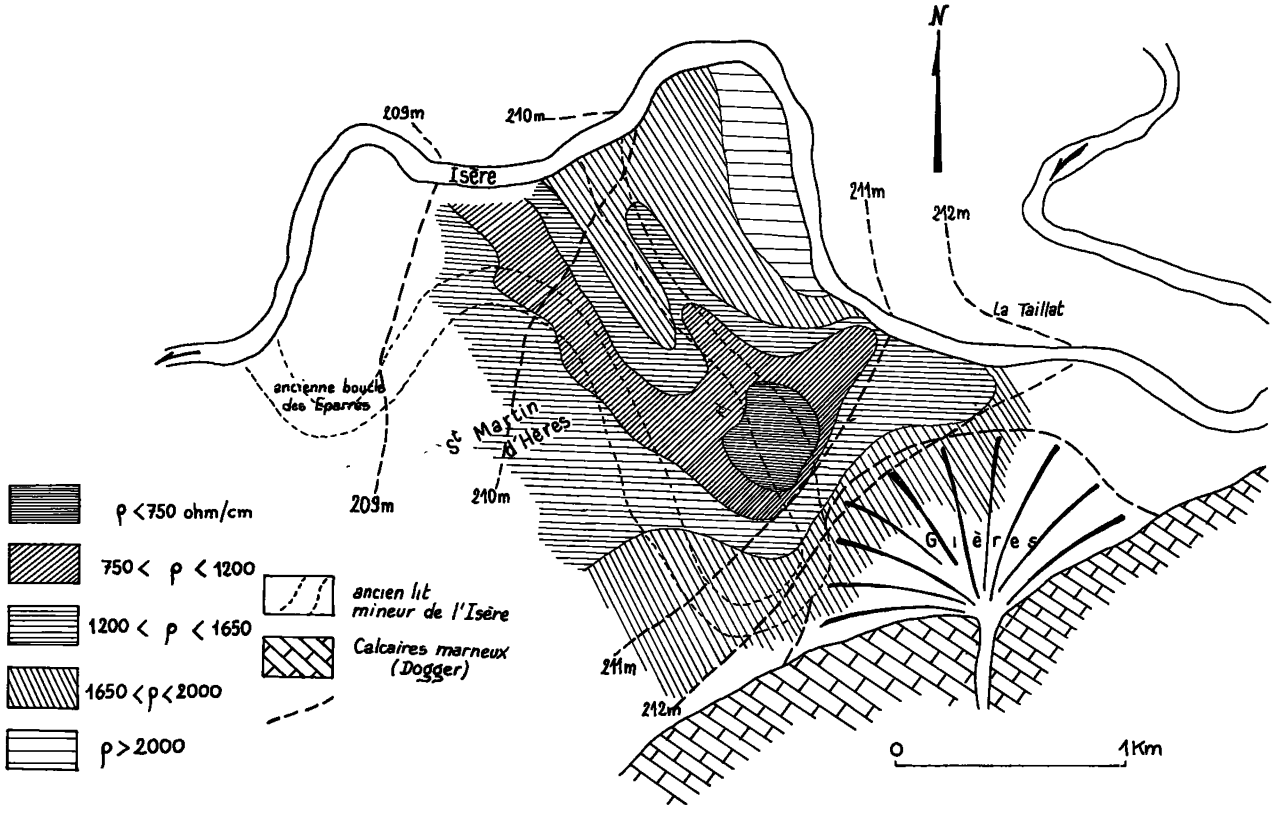

Fig. 29. — Carte d'équi-résistivité aux confins Gières - Saint-Martin-d'Hères.

« voir » les apports de la nappe ou les infiltrations vers la nappe, comme cela peut se faire sur les canaux de drainage ou certains torrents.

CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES ÉCOULEMENT DE LA NAPPE

Les différents modes de circulation.

Le dessin des courbes isopièzes permet de retrouver l'influence des diverses alimentations. Les lignes de courant, normales aux courbes isopièzes vont porter l'empreinte des alimentations diverses. Parce qu'il existe plusieurs types d'alimentation, il y a plusieurs modes de circulation des eaux souterraines au sein des alluvions. Les lignes de courant vont rester identiques à elles-mêmes, tout au long de l'année, là où existe une alimentation permanente, alors qu'elles vont osciller autour d'une direction moyenne là où deux modes d'alimentation s'affrontent.

Dans la partie axiale de la vallée, la circulation des eaux de la nappe se fait selon une direction très peu différente de celle de l'axe. Les lignes de courant oscillent autour de cette direction. De part et d'autre, la circulation des eaux souterraines se fait depuis le versant vers le centre de la vallée. La direction générale de la circulation est perpendiculaire à l'axe de la vallée. Des circulations obliques par rapport à l'axe de la vallée existent dans certaines zones et cela de façon permanente. Il s'agit des cas où la rivière alimente la nappe constamment en raison de conditions particulières.

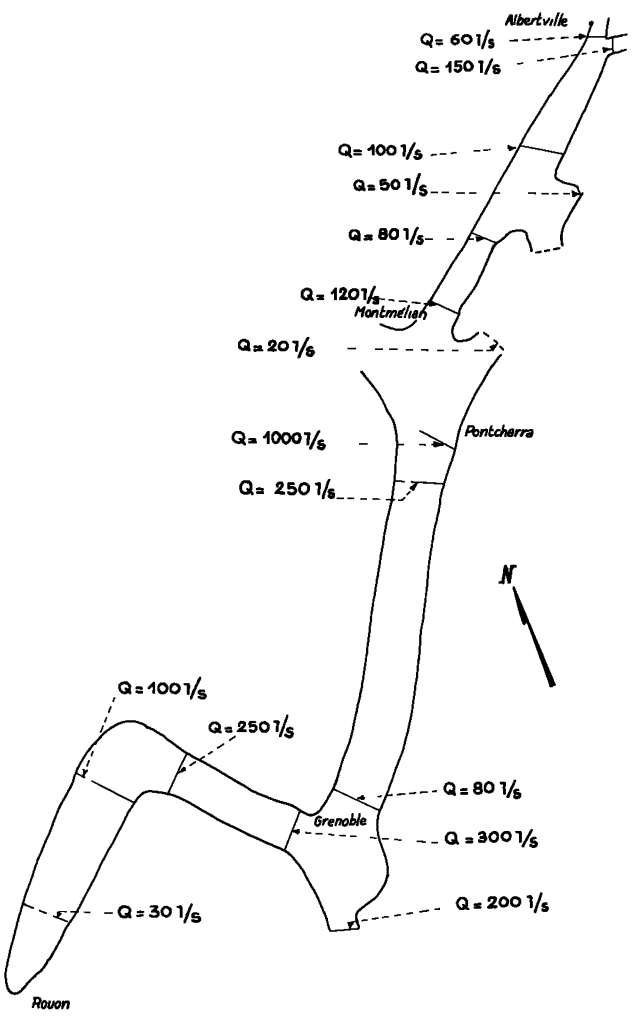

Fig. 30. — Les débits de la nappe.

Le dessin des lignes de courant donne une photographie de la circulation des eaux souterraines prise avec un certain recul, recul imposé par la densité du réseau de piézomètres ayant servi de points de mesures. L'influence des variations latérales de perméabilité, qui impliquent des distorsions dans la circulation, n'apparaît que rarement. Le rôle des chenaux à forte perméabilité que sont les anciens lits de l'Isère ne se manifeste pas toujours comme à Saint-Martin-d'Hères dans la zone du Domaine Universitaire, où existait un réseau assez dense de points d'observation de la nappe.

Les circulations « latérales ».

Aspect dynamique.

L'analyse des cartes isopièzes permet de déterminer les limites, de façon très précise, entre la zone où la circulation se fait en direction du centre de la vallée, de celle où la circulation se fait vers l'aval. L'extension des zones latérales est très variable dans l'espace et dans le temps. En certains points, à Gilly-sur-Isère, par exemple, la zone latérale atteint l'Isère en rive droite, alors qu'en rive gauche elle n'a que 100 et 150 m de large. A cet endroit, l'Isère coule au centre de la plaine. Il existe des endroits, où, au contraire, cette zone latérale n'existe pas, en rive gauche en amont de Pontcharra, ou en amont de Gières.

Très souvent, la limite entre la zone latérale et la zone centrale est constituée par un canal de drainage. Cette limite est alors artificielle, puisqu'elle est créée par l'existence d'un niveau de base permanent pour la partie de la nappe appuyée sur le pied du versant. C'est le cas dans le Grésivaudan, en rive droite, entre Lumbin et Bernin et à Meylan.

Lorsque la nappe est ainsi séparée en deux par un canal de drainage, la limite entre la zone latérale et la zone centrale ne varie pas, au cours de l'année. Elle reste toujours confondue avec le canal, en hautes eaux comme en basses eaux comme le montre le schéma de la figure 31.

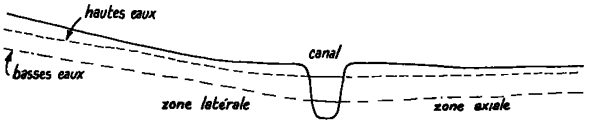

Fig. 31. — Limite entre la zone axiale et la zone latérale de la vallée.

Bien que ceci soit la règle générale, il existe des exceptions. La Bialle, sur une longue partie de son cours limite la zone latérale pratiquement en toutes circonstances ; mais lors des très basses eaux de septembre et octobre 1973, la nappe du versant s'est considérablement affaissée et la limite de la zone latérale a reculé en direction du pied du versant. On observe le même phénomène à Saint-Jean-de-la-Porte (fig. 32).

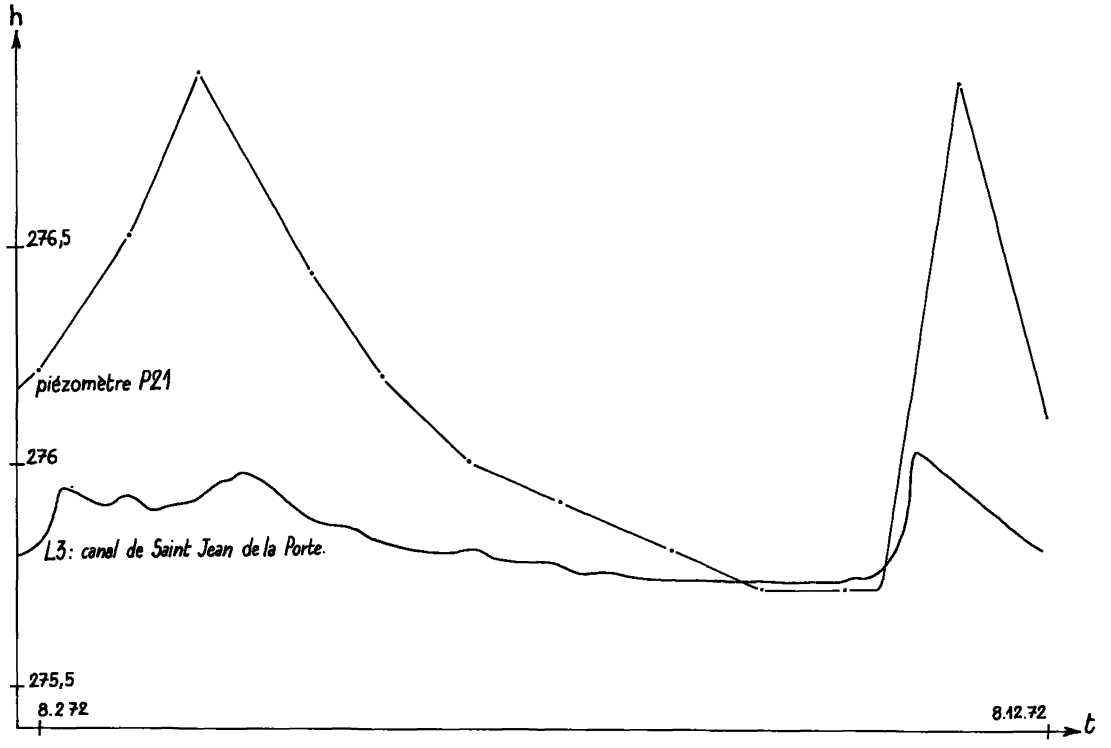

Fig. 32. — Relation entre la nappe et un canal de drainage : évolution comparée des niveaux dans la nappe (zone latérale) et dans le canal de Saint-Jean-de-la-Porte.

Dans le cas où il n'existe pas de limite artificielle, les variations dans l'extension de la zone latérale ne se font pas toujours dans le même sens en basses eaux et en hautes eaux. Tout dépend des hauteurs de battement de la nappe de part et d'autre de la limite. Dans le cas le plus fréquent la nappe monte plus du côté du versant que du côté de la plaine. Il y a, alors extension de la zone latérale, selon le schéma de la figure 33.

L'extension de la zone latérale peut atteindre de 100 à 500 m selon les secteurs. A Chamoux-sur-Gélon, l'extension atteint près d'un kilomètre et toute une partie de la plaine voit la nappe se mettre en charge pendant plusieurs mois de l'année, car une alimentation importante se manifeste par plusieurs petits cônes de déjection de façon temporaire en raison de la faible extension des bassins versants entaillés dans des terrains très peu perméables.

L'avancée vers le centre de la vallée de la zone latérale peut être contenue par un canal de drainage et l'on retombe alors temporairement dans le cas précédent.

Lorsque la nappe du versant n'a que de faibles battements, la zone axiale gagne sur la zone latérale lorsque la nappe monte (fig. 34).

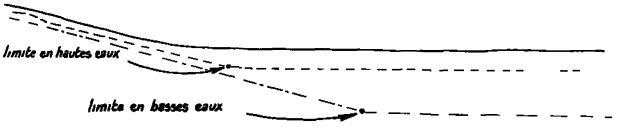

Fig. 33. — Variation de la position de la limite entre les deux zones, lorsque la nappe de la zone latérale n'a que de faibles battements.

Fig. 34. — Variation de la position de la limite entre les deux zones lorsque la nappe de versant a des battements importants.

Cela se produit lorsque la nappe reçoit du versant une alimentation constante. L'influence de la zone latérale va augmenter lorsque la nappe baisse dans la partie centrale de la vallée. Ceci intervient aussi dans les zones à faible perméabilité où la nappe reste haute malgré une alimentation latérale peu volumineuse. Cette situation s'observe, en rive droite de l'Isère, dans la plaine de Montmélian. La nappe s'écoule toujours vers l'Isère, avec des variations faibles entre les hautes eaux et les basses eaux. Mais lorsque le niveau monte dans la rivière, celle-ci alimente la nappe et cette influence se fait sentir sur 300 à 500 m de large depuis la sortie du Verrou de Montmélian jusqu'à l'entrée du Verrou de la Gache. Dans cette zone, la nappe s'écoule parallèlement à la rivière.

Une situation analogue se retrouve, toujours en rive droite, dans la plaine de Moiran, au débouché de la Cluse de l'Isère. Là aussi, les sédiments présente une faible perméabilité. L'alimentation provient des collines de la Buisse et les circulations, au sein des formations quaternaires qui les constituent, maintiennent la nappe haute en toutes saisons.

Aspect physico-chimique.

Nous avons vu plus haut l'intérêt de l'étude du rapport $r = SO_4^{--}/HCO_3^-$ et son évolution dans l'espace, en fonction de la distance à l'Isère. Le point de brisure de la courbe $r = f(l)$ donne la position de la limite entre l'alimentation latérale et alimentation influencée par l'Isère. Cette limite doit correspondre, à peu de chose près, à la limite entre la zone latérale et la zone axiale (fig. 35).

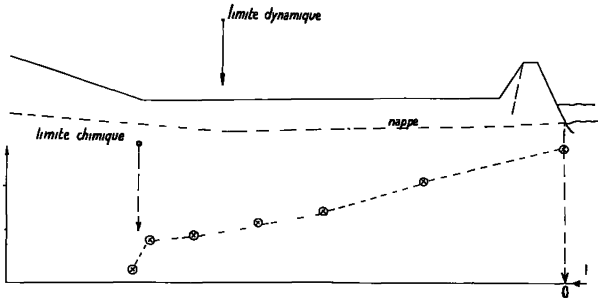

Fig. 35. — Comparaison de la position de la limite dynamique et de la limite chimique.

Les deux points marquant sur le profil la trace de la limite ne sont pas confondus et la distance horizontale qui les sépare peut atteindre 500 m par endroits. La limite dynamique et la limite chimique ne coïncident pas. L'influence des eaux apportées du versant se propage beaucoup plus loin que ces eaux elles-mêmes. Tout du moins, c'est ce que l'on voit sur cet « instantané » de la nappe. L'influence dynamique se propage beaucoup plus vite que l'eau elle-même.

Dans l'exemple de l'ancienne boucle des Eparres, à l'aval du Grésivaudan, les doigts de gants de la minéralisation sont bien visibles, par contre sur les cartes isopièzes ils sont absents. L'influence du chenal à plus forte perméabilité est faible, du point de vue dynamique (fig. 29).

Tout cela tient à la vitesse de propagation des deux types « d'ondes ». L'onde de crue se propage pratiquement aussi vite dans les formations à faible perméabilité que dans les chenaux à forte perméabilité. Par contre, l'influence « chimique » d'une eau dépend de la quantité d'eau déplacée, donc de la perméabilité. Lorsqu'une crue se propage, la nappe accuse un relèvement homogène, mais les chenaux à forte perméabilité voient passer 1 000 à 10 000 fois plus d'eau par mètre carré de section que les zones à faible perméabilité. Mais, qui plus est, l'onde dynamique se déplace, au sein de la nappe à une vitesse moyenne voisine de 1 kilomètre par jour, alors que l'eau au sein de la nappe se déplace à une vitesse qui varie entre 100 m par jour pour les chenaux à forte perméabilité et moins de 1 m par jour pour certaines zones à faible perméabilité.

L'existence de lentilles à perméabilité différente, si elle permet la transmission des ondes dynamiques, s'oppose souvent au mélange intégral des eaux. A Villard-Bonnot, toujours en rive gauche du Grésivaudan, un puits approfondi a vu changer la qualité des eaux pompées, alors que la piézométrie ne permet pas de mettre en évidence l'existence de deux nappes. La figure 36 montre le mécanisme de l'alimentation de cette partie de la nappe.

Toutes les eaux souterraines faiblement minéralisées voient aussi leur minéralisation totale augmenter au cours de leur trajet souterrain. Ainsi dans la plaine de Montmélian, où la presque totalité de l'alimentation de la nappe se fait par des

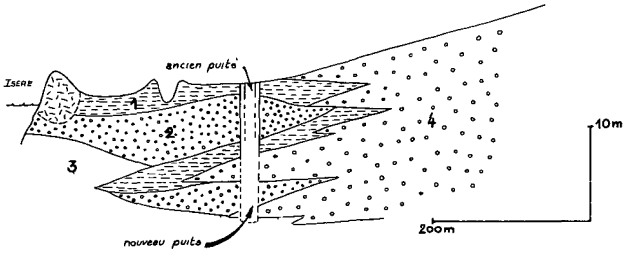

Fig. 36. — Le puits de la commune de Villard-Bonnot (1, limons superficiels; 2, alluvions grossières; 3, sables fins; 4, éboulis).

eaux souterraines. Les eaux en provenance des formations quaternaires anciennes qui ceinturent la plaine, rejoignent la nappe de la plaine, au sein d'alluvions souvent peu perméables. Les courbes d'égale résistivité montrent l'augmentation de la charge minérale, qui devient maximale à la limite entre la zone d'influence des apports des versants et celle des apports de l'Isère (fig. 8).

Ici aussi la zone de forte minéralisation ($\rho <$ 1 000 Ω/cm) correspond à un ancien dépôt d'ordures ménagères.

Les circulations axiales.

Influence des facteurs superficiels.

Dans la partie centrale de la vallée, la circulation de la nappe se fait selon une direction parallèle à l'axe de la vallée, mais cela n'est pas toujours traduit par les courbes isopièzes qui subissent les modifications liées à l'existence de facteurs qui ne jouent que sur la tranche superficielle de la nappe. Les canaux, lorsqu'ils drainent la nappe, modifient la forme de l'écoulement dans cette tranche superficielle de la nappe, sur 1 à 2 mètres d'épaisseur. Les lignes de courant sont alors obliques par rapport à l'axe de la vallée, soit de façon permanente, soit de façon temporaire. Si le niveau minimal de la rivière est plus haut que le niveau du canal, l'écoulement se fait obliquement, en toutes saisons ; si les niveaux sont à peu près identiques dans la rivière et dans le canal, l'écoulement se fait de la rivière vers le canal, en hautes eaux et du canal vers la rivière, en basses eaux (fig. 37).

Le phénomène est identique, bien que beaucoup plus général dans toutes les zones où la nappe reçoit pendant certaines périodes une alimentation de la rivière. Là aussi, dans la tranche superficielle de la nappe, l'écoulement se fait périodiquement de l'Isère vers la nappe et de la nappe vers l'Isère. Dans ce cas-là, le calcul de la direction moyenne donne une valeur très voisine de celle de l'axe de la vallée.

Une grande partie de la vallée montre ainsi un écoulement superficiel influencé par des facteurs superficiels eux aussi. La forme du toit de la nappe traduit le rôle des canaux de drainage, ou le passage d'une onde de crue induite par une montée du niveau dans l'Isère. Si la tranche supérieure de la nappe porte seule les traces de ces facteurs, le phénomène est malgré tout très important, eu égard aux volumes d'eau mis en jeu. Le débit des canaux de drainage est souvent bien supérieur à celui de la nappe.

Une remontée brutale du niveau de l'Isère peut injecter une grande quantité d'eau dans la nappe. C'est par l'intermédiaire de cette zone que vont se produire les échanges et les mélanges. Comme nous l'avons vu plus haut, l'eau ne transite pas directement de la rivière vers un canal (ou un puits), mais il se produit un mélange. Ces mélanges et ces échanges sont liés à l'anisotopie de l'aquifère où la structure en lentilles de perméabilités différentes est la règle.

Les anciens lits mineurs de l'Isère constituent souvent des zones à forte perméabilité et à grande extension longitudinale. Lorsque un ancien lit se trouve parallèle à une ligne de courant, il peut faciliter cet écoulement et cela se traduira sur les cartes isopièzes, par une sorte de doigt de gant.

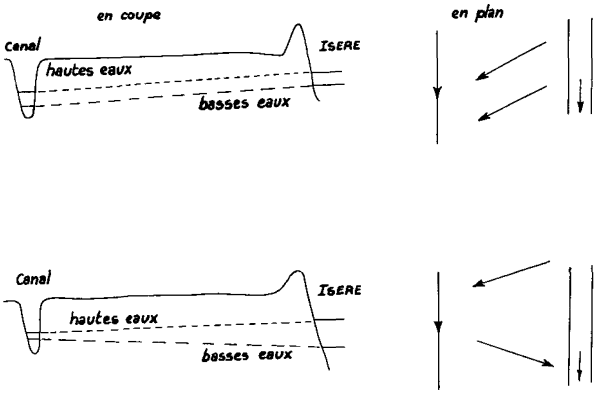

Fig. 37. — Schéma des circulations dans la zone axiale.

Nous avons vu plus haut, l'importance des écoulements liés à d'anciens lits de l'Isère, dans la propagation des eaux très minéralisées. Dans ce cas-là, la convexité du doigt de gant est tournée vers l'aval, car le cône de déjection assure une alimentation permanente (voir fig. 29). Dans d'autres cas, le chenal à forte perméabilité sert de drain et le doigt de gant a sa convexité tournée vers l'amont.

Les circulations profondes.

Par circulations profondes, il faut entendre ici les circulations qui ne sont pas influencées par les facteurs superficiels, c'est-à-dire que l'on rencontre à une profondeur de 2 ou 3 mètres au minimum. Il ne s'agit pas des circulations qui peuvent se produire à la base du remplissage alluvial à 100 m et plus de la surface, et sur lesquelles nous n'avons malheureusement aucun renseignement.

Les cartes isopièzes ne donnent que peu d'informations sur ce type de circulation. Elle peut être considérée comme homogène au sein de la masse des alluvions grossières. Elle se fait selon la direction de l'axe de la vallée et pas selon la direction de la rivière. Lorsque l'Isère décrit des méandres et vient à couler perpendiculairement à l'axe de la vallée, le sens d'écoulement de la nappe n'est pas affecté comme cela a été montré antérieurement (J.C. Fourneaux, 1968).

Cette homogénéité apparente n'est que la somme de nombreuses hétérogénéités. Car toute la masse des alluvions grossières est constituée de lentilles allongées selon une direction voisine mais non confondue avec celle de la vallée et présentant des perméabilités différentes.

Ici aussi, ce n'est que la chimie des eaux qui va mettre ces hétérogénéités en évidence. Des lentilles à faible perméabilité ayant une très vaste extension latérale peuvent isoler deux niveaux de la nappe où les caractéristiques physico-chimiques seront différentes, sans que, jamais, les mesures piézométriques ne montrent l'existence de deux nappes différentes. L'exemple le plus remarquable se trouve à Saint-Martin d'Hères, dans une zone qui s'étend de part et d'autre de la route de Gières (fig. 38). Là, sur une grande superficie, les mélanges ne se produisent plus et chacune des tranches de la nappe va avoir sa propre évolution.

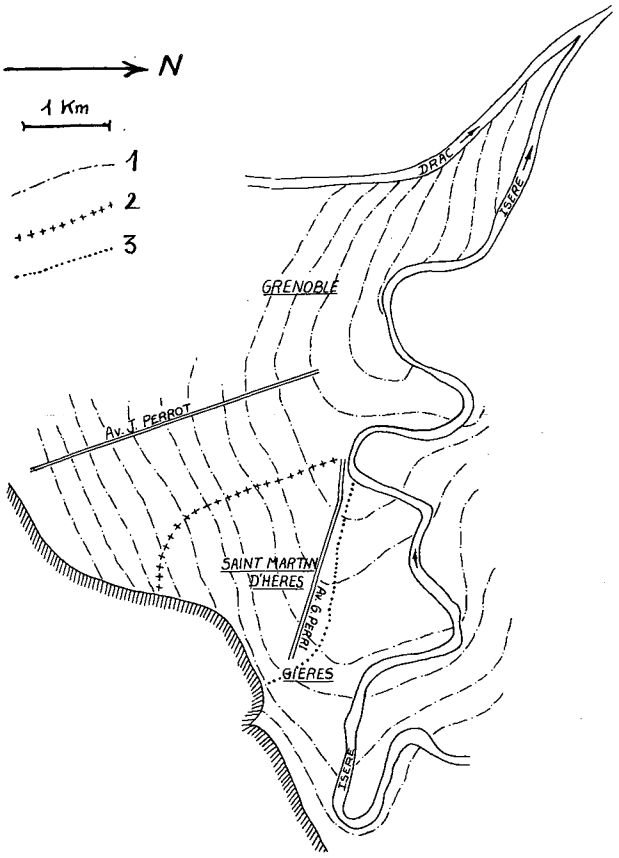

Fig. 38. — La limite entre la nappe de l'Isère et celle du Drac dans la plaine de Grenoble (1, courbes isopièzes du 10.6.72; 2. limite chimique; 3, limite dynamique).

Résultats des analyses faites à deux niveaux différents sur un sondage à Saint-Martin d'Hères.

Profondeur	5 m	11 m
0°	11°8	12°
pH	7,02	7,1
SO_4^{--}	20,8 mg/1	42,72 mg/1
Cl^-	7,1 mg/1	12,5 mg/1

B. Lacroix (1971) a observé des phénomènes analogues sur plusieurs puits situés à Saint-Martin d'Hères.

Les cas particuliers.

La plaine de Grenoble.

La plaine de Grenoble est la zone de confluence de la nappe du Drac avec celle de l'Isère. En fait,

les études (B. LACROIX, 1971) ont montré une très nette prédominance de la nappe du Drac qui vient s'écouler jusqu'à l'Isère depuis le Sablon jusqu'au confluent du Drac. En aval de l'Ile Verte, là où l'Isère coule au pied même des contreforts de la Chartreuse, il n'y a plus de nappe de l'Isère. Les cartes isopièzes mettent bien en évidence ce phénomène. La nappe de la plaine de Grenoble est liée uniquement au Drac. Cette dernière vient barrer la progression de la nappe de l'Isère au niveau de Saint-Martin d'Hères. La ligne de partage entre les deux nappes se déplace en fonction des variations relatives des deux niveaux piézométriques mais elle ne s'éloigne guère d'une ligne qui correspond à peu près à l'avenue Gabriel Péri. L'ancienne branche Sud de la boucle des Epares intervient comme drain.

De part et d'autre de cette zone allongée le long de l'avenue Gabriel Péri, les lignes de courant sont pratiquement perpendiculaires. Dans le Grésivaudan elles sont orientées de l'Est vers l'Ouest, alors que dans la plaine de Grenoble, elles sont orientées du Sud vers le Nord (fig. 38).

Cette limite entre deux écoulements différents n'est qu'une limite dynamique. Une fois de plus, on constate un écart très important entre cette limite et la limite « chimique ». En effet, les eaux de la nappe de l'Isère dans le bas-Grésivaudan ont une minéralisation très forte et relativement différente de celle des eaux de la nappe de la plaine de Grenoble. Grossièrement, on peut dire que si la limite dynamique correspond à peu près à l'avenue Gabrielle-Péri, la limite « chimique » correspond à l'avenue Jean-Perrot.

Cette limite « chimique » est calquée sur une limite sédimentologique. La nappe du Grésivaudan avec sa forte minéralisation se trouve dans les formations fines déposées par l'Isère alors que de l'autre côté de cette limite, l'aquifère est constitué par les dépôts plus grossiers apportés par le Drac.

Le triangle d'Aiton.

Le triangle d'Aiton correspond à une zone de confluence de nappe (fig. 39). Celle de l'Arc vient rejoindre celle de l'Isère en amont du confluent des deux rivières. L'Arc a construit au cours des derniers millénaires un véritable cône de déjection qui repoussait l'Isère vers le pied du massif des

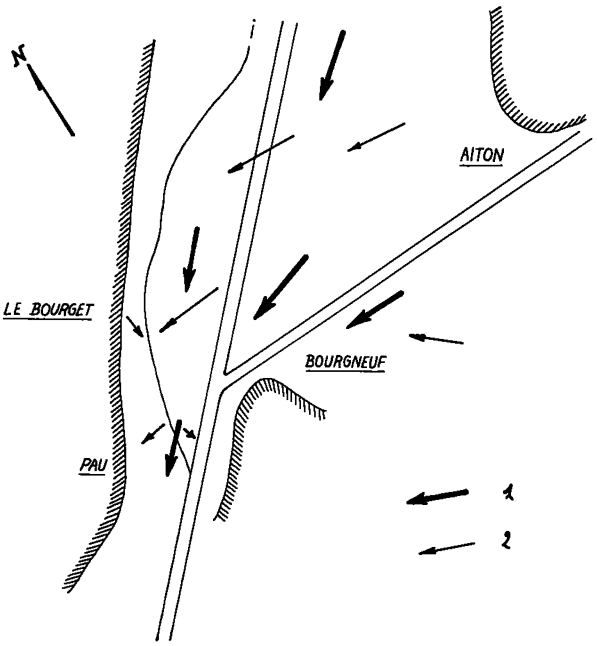

Fig. 39. — Le triangle d'Aiton
(1, circulation profonde; 2, circulation superficielle).

Bauges. L'ancien lit de l'Isère est matérialisé par la Bialle, qui se trouve, aujourd'hui, plus basse que le lit artificiel dans lequel l'Isère est obligée de s'écouler. Les cartes isopièzes montrent qu'une partie de la nappe de l'Arc s'écoule jusqu'à la Bialle, sans être perturbée par le passage de l'Isère. Ceci n'est que le reflet de l'écoulement réel déformé par le drainage de la Bialle. Mais les circulations profondes se font selon des directions voisines des directions mesurables en surface.

Aspect physico-chimique des circulations axiales.

Les eaux de la nappe sont agressives dans la mesure où elles proviennent de l'infiltration d'eaux elles-mêmes agressives, ce qui est souvent le cas dans la zone axiale puisque c'est là que les apports des cours d'eau superficiels sont les plus importants. Dans la nappe, les eaux ont une action chimique sur les alluvions au sein desquelles elles circulent.

Dans la plaine de Grenoble, la minéralisation totale des eaux augmente de façon assez régulière depuis Pont-de-Claix jusqu'à l'Isère, puisque cette dernière draine la nappe dans la traversée de la ville. Cette évolution peut se suivre sur les cartes.

Les courbes d'égal degré hydrotimétrique se calquent dans la partie Sud de la plaine, sur les courbes isopièzes (B. LACROIX, 1971) (fig. 40).

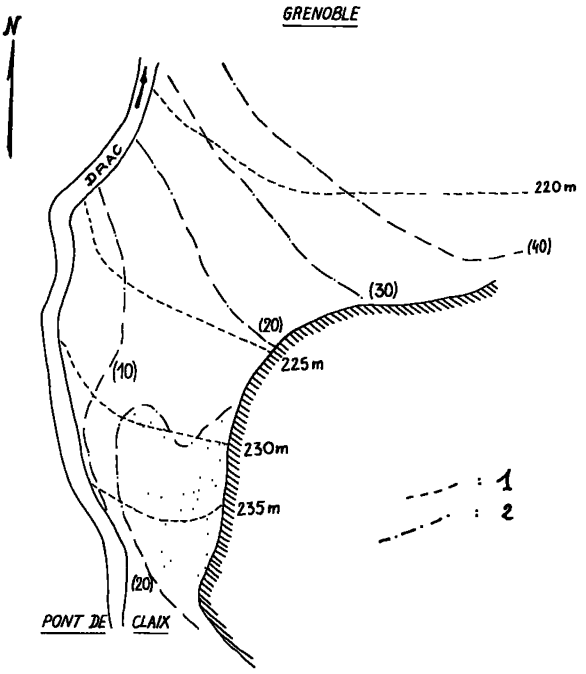

Fig. 40. — Carte isopièze et d'égal degré hydrotimétrique dans la partie Sud de la plaine de Grenoble (1, courbe isopièze; 2, courbe d'égal degré hydrotimétrique; la zone en pointillé est celle qui est influencée par les rejets des usines du Pont-de-Claix).

Cette augmentation de la minéralisation se retrouve dans chacun des bassins élémentaires qui constituent l'ombilic de Grenoble. On voit le degré hydrotimétrique moyen passer de 22 à 30 entre Albertville et Aiton, par exemple. De même dans le Grésivaudan, le Th passe de 25 aux environs de Pontcharra, à des valeurs moyennes supérieures à 40 au niveau de la boucle de la Taillat et du Domaine Universitaire. On retrouve une évolution semblable dans la cluse de l'Isère et dans la plaine de Moirans. Si cette évolution est bien marquée à l'échelle d'un secteur comme le Grésivaudan, elle n'a pas, et de loin, la même régularité que celle que l'on observe dans la plaine de Grenoble. Les variations saisonnières sont souvent très fortes et peuvent dépasser 20 % par rapport à la valeur moyenne.

Les eaux de la nappe, particulièrement dans la zone axiale, contiennent souvent du fer. Il peut se trouver uniquement sous forme d'ions et les eaux sont alors parfaitement incolores, mais il peut aussi exister sous forme d'oxyde de fer insoluble et les eaux sont alors colorées (rouille). Dans le premier cas, les eaux peuvent d'ailleurs se colorer au bout d'un certain temps après le prélèvement de l'échantillon, s'il y a oxydation du fer dissous, car cela entraîne sa précipitation.

Le passage du fer dans les eaux de la nappe peut se faire par altération des minéraux ferrifères ou ferro-magnésiens, ce qui se produit aussi bien sur les versants qu'au sein du remplissage alluvial. Mais il semble que ce phénomène soit peu développé sous nos climats.

La mise en solution du fer dépend de conditions qui peuvent être biologiques ou chimiques. Dans la plupart des cas, le fer se rencontre à l'état ferrique (Fe^{+++}) alors que dans les conditions de pH et de température qui règnent dans les eaux souterraines et superficielles, il ne peut passer en solution que sous forme de fer ferreux (Fe^{++}). Il faut donc un milieu réducteur pour que le fer ferrique puisse passer à l'état de fer ferreux, pour qu'il puisse, ensuite, y avoir mise en solution. Certains micro-organismes (*Sporovibrio desulfuricans, Microspora desulfuricans,* etc...) peuvent favoriser ces phénomènes de réduction, en consommant l'oxygène du milieu. La présence de matière organique peut, elle aussi, pour la même raison, favoriser la réduction du fer.

De telles conditions se retrouvent en de nombreux points de la partie aval du Grésivaudan, en rive gauche de la cluse de l'Isère et entre Moirans et Tullins.

Les eaux qui s'infiltrent dans la nappe sont souvent agressives ; elles peuvent rester agressives dans la nappe pendant un certain temps. Le CO_2 qui détermine cette agressivité permet aussi l'attaque des hydroxydes ferreux et la mise en solution du fer, en l'absence de micro-organismes. Une fois de plus, cette attaque ne peut se faire qu'en l'absence d'oxygène. Cette mise en solution s'accompagne d'une augmentation du pH de l'eau. Le fer peut s'exprimer sous forme de carbonate ferreux. L'analyse de certaines eaux révèle, en effet, un titre alcalimétrique supérieur à celui correspondant à l'ensemble des carbonates et bicarbonates d'alcalino-terreux et d'alcalins.

La présence de fer, dans des eaux très calcaires, peut surprendre, car en présence de carbonate de calcium, qui existe dans les alluvions, le CO_2 libre peut être rapidement équilibré par les ions Ca^{++}. Mais dans ces eaux le pH d'équilibre est d'autant plus faible que les concentrations en ions HCO_3^- et Ca^{++} sont plus grandes et par conséquent que les teneurs en CO_2 sont plus grandes.

Les teneurs en fer vont augmenter avec les teneurs en Ca^{++}, pour des taux de bicarbonates à peu près constants. Ainsi, à Saint-Martin d'Hères sur trois puits du Domaine Universitaire les concentrations suivantes ont-elles été mesurées :

Puits	HCO_3^-	Ca^{++}	Fe (exprimé en fer ferrique)
P1	10,24	8,28	0,33
P2	10,32	8,38	0,43
P3	10,39	9,18	0,8

(les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre).

De même que les eaux se chargent en bicarbonate de l'amont vers l'aval, elles se chargeront en fer lorsque les conditions requises seront réalisées.

Lorsque les eaux chargées en fer arrivent dans la tranche superficielle de la nappe, elles peuvent redissoudre de l'oxygène. Il y a, alors, oxydation du fer et précipitation car le fer ferrique n'est pas soluble dans les conditions de pH et de température qui règnent dans la nappe. Les particules d'hydroxyde de fer se déposent au sein de l'aquifère, dans la zone de battement de la nappe. Il y a là un mécanisme analogue à celui de la formation du chapeau de fer.

Lors d'un pompage intensif, il peut y avoir entraînement des particules d'hydroxyde de fer, précédemment déposées. Si la perméabilité est forte et le pompage suffisamment conséquent, il est possible de lessiver complètement le terrain dans le cône de rabattement et l'on voit la teneur en fer diminuer dans les eaux pompées au bout d'un certain temps. Un tel exemple a pu être observé à Saint-Martin d'Hères (J.C. FOURNEAUX et A. CHOUTEAU, 1969).

Date	17/12/64	28/05/65	28/12/65	15/11/66	26/11/68
Fer	1,1 meg/l	0,88	0,85	traces	0,08
Observations	début de l'exploitation				reprise du pompage après un an d'arrêt

Si la perméabilité est faible, il devient difficile de réaliser un pompage intensif ; la quantité de fer déposée au sein des alluvions est beaucoup plus grande ; il devient impossible de lessiver le terrain.

Dans certaines conditions (pH faible, potentiel redox faible, absence d'oxygène, présence de matières organiques) le carbonate de fer ($FeCO_3$) peut précipiter sous forme de sulfure de fer (pyrite = FeS) par réduction des sulfates.

En milieu oxydant, au contraire, c'est le sulfure de fer, la pyrite en particulier, qui est oxydé et l'on obtient des eaux de fortes teneurs en sulfate et en fer, le produit d'altération de la pyrite, la mélantérite ($FeSO_4$, 7 H_2O) est en effet très soluble (265 g/l à 20°) (C. GALTIER, 1963).

D'une manière générale, à la minéralisation « héritée » des eaux qui alimentent la nappe, vient s'ajouter une minéralisation « acquise » au cours de la propagation des eaux au sein de l'aquifère. La minéralisation totale est à base de carbonates, de sulfates avec un peu de chlorures, alors que les cations sont surtout du calcium, du magnésium et du sodium. Les teneurs en fer peuvent varier beaucoup entre deux points voisins. Les teneurs en silice varient entre 4 mg/l et 18 mg/l, sans qu'il soit possible de définir des zones où les eaux sont plus ou moins siliceuses.

CONCLUSIONS

Les conditions hydrogéologiques sont relativement homogènes dans l'ensemble de l'ombilic de Grenoble. Depuis Albertville, jusqu'au seuil de Rovon, les mêmes modes d'alimentation de la nappe et les mêmes formes de circulations des eaux souterraines apparaissent. L'ombilic de Grenoble, qui constitue une véritable entité géologique, est aussi une entité hydrogéologique.

La structure des formations quaternaires, si elle permet à la nappe de recevoir les eaux qui viennent des versants, limite considérablement, pour ne pas dire complètement les pertes de la nappe au profit des formations du substratum. Les argiles d'Eybens, qui enveloppent l'aquifère, sont, en grande partie responsables de cet état de fait (J.C. FOURNEAUX, 1976).

Les différents modes d'alimentation sont susceptibles d'apporter à la nappe des volumes d'eau considérables, bien supérieurs à ceux que la nappe écoule dans les conditions normales. Lorsque la nappe est sollicitée par des pompages, la différence entre l'alimentation potentielle et l'alimentation réelle fournit le débit demandé. L'influence d'un pompage n'est alors sensible que dans le cône de rabattement, même lorsque le débit pompé est nettement supérieur au débit naturel de la nappe.

Deux zones bien distinctes apparaissent dans la nappe. De part et d'autre d'une zone axiale, où les eaux souterraines s'écoulent parallèlement à l'axe de la vallée, on voit les eaux s'écouler depuis le versant vers l'axe de la vallée. Cette deuxième forme d'écoulement traduit l'influence dynamique des apports latéraux. La limite entre les deux zones diffère selon que l'on considère cet aspect dynamique ou, au contraire, que l'on s'intéresse à l'aspect physico-chimique. Dans certains cas, les eaux apportées par les versants vont plus loin dans la plaine que ne laisserait penser l'étude des cartes isopièzes, alors qu'il est possible, au contraire, de trouver des eaux provenant de la zone axiale, là où les cartes isopièzes laisseraient présager la présence d'eaux venues des versants. Une différence de vitesse très sensible existe entre la propagation des ondes dynamiques et la propagation des ondes « chimiques », c'est-à-dire le transfert de volumes d'eau importants qui s'accompagne d'un mélange.

Les eaux des zones latérales sont généralement moins minéralisées que celles de la zone axiale. Des exceptions peuvent se rencontrer dans les secteurs à forte perméabilité situés en bordure de l'Isère soit dans la Combe de Savoie, soit dans la cluse de l'Isère en aval de Grenoble.

Les échanges entre la nappe et les cours d'eau superficiels provoquent un mélange et les eaux pompées, même en bordure de l'Isère, présentent des caractéristiques analogues aux caractéristiques moyennes, des eaux qui alimentent la nappe. Il en est de même pour les eaux des canaux de drainage. Bien que représentant les eaux de la tranche superficielle de la nappe, elles ont des caractères physico-chimiques beaucoup plus stables que ceux des eaux des cours d'eau superficiels.

Les cartes isopièzes montrent souvent ces échanges entre eaux souterraines et eaux de surface. Mais elles ne traduisent que la forme de l'écoulement de la tranche superficielle de la nappe qui peut être perturbée par des zones à faible perméabilité où les battements de la nappe sont considérablement amortis, ce qui peut arriver à masquer l'inversion temporaire de certains échanges.

Malgré l'homogénéité générale des conditions, il est possible de définir des bassins élémentaires qui sont relativement, sinon totalement, indépendants les uns des autres. D'amont en aval, se succèdent ainsi la Combe de Savoie-amont d'Albertville à Aiton, la Combe de Savoie-aval jusqu'à Montmélian, puis la plaine de Montmélian, le Grésivaudan, la plaine de Grenoble, la cluse de l'Isère et la plaine de Moirans. Ces bassins sont séparés soit par des zones de confluence (confluent Isère-Arc entre les deux bassins de la Combe de Savoie) soit par des verrous (Montmélian), soit enfin par des cônes de déjection qui barrent la vallée (cône du Bréda à Pontcharra, cône de la Roise à Voreppe).

La plaine de Grenoble, par contre, n'est pas séparée de la cluse de l'Isère, où la nappe est le prolongement de la nappe du Drac, alors qu'elle l'est du Grésivaudan, puisque la nappe du Drac s'écoule sous Grenoble et vient jusqu'à l'Isère ainsi rejetée au pied des dernières pentes de la Chartreuse, dans la traversée de la ville.

Les caractères physico-chimiques des eaux évoluent de façon assez sensible dans chacun des bassins élémentaires depuis l'amont vers l'aval. Cette évolution, qui se traduit par une augmentation de la minéralisation totale, est le fait de l'action de l'eau, agressive au moment où elle s'infiltre, sur les alluvions qui constituent l'aquifère.

La connaissance des conditions géologiques, du contexte hydrologique et hydrogéologique, va permettre de se pencher sur les différents facteurs qui interviennent dans les variations de la nappe. Il paraît, en effet, souhaitable, alors que dans la plus grande partie de la vallée, la nappe est étroitement liée à l'Isère comme le montrent les cartes isopièzes, de pouvoir définir les facteurs dont dépend cette liaison et, de là, les relations qui peuvent exister entre les variations de la nappe et les variations de l'Isère.

S'il est possible de mettre en évidence de telles relations, la connaissance des variations futures de certains paramètres permettra de déterminer les variations concommitantes de la nappe et, éventuellement, de les aménager.

BIBLIOGRAPHIE

BLANIC (R.) (1974). — L'aménagement de l'Isère et du Drac, son influence sur l'activité agricole et l'urbanisme dans les vallées autour de Grenoble (*La Houille Blanche,* n° 3, p. 181-197).

CHOUTEAU (A.F. (1968). — Influence de la pollution chimique sur les populations animales de l'Isère (*D.E.S. Sciences,* Grenoble).

CHOUTEAU (A.F.), FOURNEAUX (J.C.) (1968). — Etude de la chimie des eaux souterraines de la plaine du Grésivaudan (*Géologie alpine,* t. 47, 1971).

CHOUTEAU (A.F.), FOURNEAUX (J.C.) (1969). — Contribution à l'étude du problème du fer dans les eaux souterraines de la plaine du Grésivaudan (*Mémoires du B.R.G.M.,* n° 76, p. 533-545).

CHOUTEAU (A.F.), FOURNEAUX (J.C.) (1972). — Exemple de l'influence d'une décharge d'ordures ménagères sur la composition des eaux d'une nappe (*IIe colloque sur la Pollution des Eaux,* Lyon, décembre 1972).

CORDEAU (F.), CORDEAU (J.Y.), FOURNEAUX (J.C.), SARROT-REYNAUD (J.) (1973). — Hydrologie du versant oriental du Vercors entre Saint-Nizier et le col de l'Arc (*IIe colloque d'hydrogéologie karstique,* Grenoble, octobre 1973).

COUTURIER (B.) et FOURNEAUX (J.C.) (1977). — L'évolution de la nappe de la plaine du Grésivaudan (*Revue de Géographie Alpine,* t. 65, fasc. 1, p. 25-40).

DUBUS (J.) et BOMBARD (J.-P.) (1968). — Etude des ressources en eau de la vallée de l'Isère : la cluse de l'Isère (*D.D.A. de l'Isère,* Grenoble).

FOURNEAUX (J.C.) (1968). — Hydrogéologie du Grésivaudan (*Thèse* 3e *cycle, Sciences,* Grenoble).

FOURNEAUX (J.C.) (1972). — La nappe de la plaine de l'Isère à l'aval de Montmélian : influence des facteurs artificiels (*IIe colloque sur la pollution des eaux,* Lyon, décembre 1972).

FOURNEAUX (J.C.) (1973 a). — Les ressources en eau de la Combe de Savoie (*D.D.A. de Savoie,* Chambéry).

FOURNEAUX (J.C.) (1973 b). — Hydrogéologie du plateau de Petites Roches (*IIe colloque hydrokarstique,* Grenoble, octobre 1973).

FOURNEAUX (J.C.) (1973 c). — Schéma hydrogéologique du synclinal Dent-de-Crolles — Granier (*IIe colloque hydrokarstique,* Grenoble, 1973).

FOURNEAUX (J.C.) (1976). — Les formations quaternaires de la vallée de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble (*Géologie Alpine,* Grenoble, t. 52, p. 31-72).

FOURNEAUX (J.C.) et SARROT-REYNAULD (J.) (1977). — Déficit d'écoulement et évapotranspiration dans les Alpes du Nord (102e *Congrès des Sociétés Savantes,* Limoges).

GALTIER (C.) (1963). — Rôle des bactéries dans la corrosion par les eaux (*Corrosion et anticorrosion,* Vol. II, n° 7 et 8, juillet 1963).

GIRARD (R.) (1967). — Méthodes d'étude des eaux naturelles (*L'eau,* n° 54).

LACROIX (B.) (1971). — Hydrogéologie de la plaine de Grenoble (*Thèse* 3e *cycle, Sciences,* Grenoble).

LORY (C.) (1874). — Analyse des eaux de rivières et de sources (P.-V. du Conseil Général de l'Isère).

MICHEL (M.) (1972). — Hydrogéologie du bassin versant de Theys (*Thèse* 3e *cycle, Sciences,* Grenoble).

OZENDA (P.) (1964). — Biogéographie végétale (*Doin, éd.,* Paris).

SOGREAH (1961). — Etude hydrogéologique de la vallée alluviale de l'Isère. Entre Lubin et Crolles (Rapport inédit).