

LA NAPPE DES SABLES VERTS ET L'ALIMENTATION EN EAU DE LA RÉGION PARISIENNE

THE GREEN SAND AQUIFER AND WATER RECHARGE IN THE PARIS AREA

J. ARCHAMBAULT—M. CLOUET D'ORVAL
Bureau d'études BURGEAP, Paris, France

ABSTRACT

The "green sand" aquifer—or Albian Aquifer—reached at a depth of more than 600 meters underground level in Paris has been put into production since 1841.

Formerly, this aquifer was artesian; nowadays pumping off is necessary, following a considerable drawdown of water table. In 1935 a strict regulation of the aquifer exploitation was undertaken resulting in a stabilisation of the water table at about 25 meters underground level for a mean rate of discharge of about 0.8 m³/s.

Recent investigations, using mathematical modelling and simulation, were carried out by BURGEAP for the Paris Suburban Water Corporation: they provided evidence on the balance of the aquifer, and on its boundary or confinement parameters (transmissivity, storage capacity, parameters of leakage with over- or underlying strata).

In order to improve the distribution of drinking water resources in the Paris area, and to reduce the length of water conveying pipes—which are expensive in urban areas—a new method of ground water exploitation could consist in recharging the aquifer by injection of surface water into boreholes, and pumping from other wells. Comprehensive testing of such artificial recharge was conducted in a borehole reaching the "green sand" aquifer. The complete success of the operation proved that this ground water resource, omnipresent in the Paris area, was likely to be used within the imperative conditions of its balance preservation.

A l'intérieur du grand bassin sédimentaire qui correspond à la partie centrale et septentrionale de la France, et au centre duquel se trouve Paris, la nappe de l'Albien (Crétacé inférieur), dite encore « nappe des sables verts », couvre une superficie de l'ordre de 70 000 km². C'est aux environs mêmes de Paris que la profondeur de la nappe (plus de 500 mètres) est maxima; elle y est recouverte en effet par plus de 400 mètres d'un calcaire tendre et plus ou moins marneux dénommé « Craie ».

Il y a beaucoup plus d'un siècle que l'on a commencé à mettre cette nappe en exploitation, et son utilisation s'est poursuivie au cours des temps, à un rythme variable, jusqu'à ce que, en 1935, des dispositions réglementaires y interdisent tout nouveau prélèvement. C'est cette histoire de la nappe de l'Albien que nous voudrions résumer ici, avant de montrer que des techniques particulières paraissent permettre, sous certaines conditions et sans modifier son équilibre général, de l'utiliser à nouveau.

Dès le début du dix neuvième siècle, certains observateurs, sur la base d'études géologiques assez approfondies, soupçonnaient la possibilité de recouper au-dessous de la capitale les niveaux sableux qui avaient été

reconnus à la périphérie du bassin sédimentaire, et escomptaient le jaillissement à la surface du sol de la nappe aquifère correspondante: un jaillissement* dont on augurait beaucoup, à une époque où l'état de la technique ne permettait guère d'exploiter, par rabattement à l'intérieur d'un forage ou d'un puits, des débits importants.

Les crédits, pour l'exécution à Paris même d'un forage destiné à recouper les formations sableuses de l'Albien et prévu pour une profondeur de 400 m, furent votés par le Conseil Municipal de Paris en 1833.

Il s'agissait, en fait, d'un pari, car c'était la première fois en France et sans doute dans le monde qu'un forage de recherche d'eau aussi profond était envisagé; de plus, les connaissances géologiques du Bassin Parisien étaient telles que la présence de sables aquifères artésiens ne constituait qu'une présomption.

La réalisation du forage fut confiée à un ingénieur mécanicien du nom de MULOT, qui commença les travaux le 24 décembre 1833 dans la cour de l'Abattoir de Grenelle. Le matériel dont il disposait était évidemment fort précaire: une chèvre, des palans et des tiges de bois de 8 mètres de long, travaillant au battage, des treuils entraînés par des roues horizontales actionnées d'abord par des hommes, puis par des chevaux . . .

Les incidents de forage furent très nombreux, et ce n'est qu'au bout de sept ans, en 1841, que MULOT atteignait la nappe artésienne de l'Albien à 548 mètres. Ce fut un succès, qui se traduisit par un enthousiasme général: 160 m³ d'eau à l'heure jaillissants, avec un niveau d'équilibre égal à 33 mètres au-dessus du sol. MULOT fut récompensé de ses efforts par l'attribution d'une rente viagère et de la Légion d'Honneur.

Les travaux de MULOT eurent pour résultat d'encourager la réalisation d'assez nombreux forages à la périphérie du Bassin Parisien, où les sables albiens sont beaucoup moins profonds, et notamment à sa bordure occidentale. Ils devaient confirmer la régularité de la formation aquifère sous une grande partie du Bassin de Paris.

La productivité du forage de Grenelle ne devait, cependant, durer que quelques mois: par suite d'une détérioration du tubage, le débit chuta à environ 40 m³/h, ce qui amena à critiquer le bien fondé de l'ouvrage réalisé.

En dépit de ces déboires, la ville de Paris décida quinze ans plus tard, en 1855, l'exécution d'un nouveau forage à Passy, non loin du précédent. Les travaux furent cette fois-ci confiés à un ingénieur allemand du nom de KIND, mieux équipé que MULOT. Les travaux durèrent tout de même plus de cinq ans, et ce n'est qu'en 1861 que la nappe jaillissait, avec le débit très important de 700 m³/h, qu'on utilisa à alimenter les rivières du Bois de Boulogne.

Dès la mise en production de ce nouveau puits, on s'aperçut que le débit baissait dans le puits de Grenelle et c'est approximativement à cette date que des nouvelles idées sur le fonctionnement des nappes artésiennes furent émises par DEGOSSEE et LAURENT. Ces auteurs expliquaient en effet les interactions entre les deux puits par des remarques tendant à modifier notablement la théorie antérieure des « vases communicants »: le débit recueilli dans un trou de sonde dépend non seulement de la différence de niveau entre les affleure-

* Le nom de « nappe artésienne » vient de l'Artois, province du Nord de la France où des puits jaillissants furent réalisés dès le Haut Moyen-Age (en 1120 à Lillers) pour exploiter une nappe de sables tertiaires maintenue captive sous un recouvrement marneux.

ments et le captage, mais aussi des fuites possibles à travers différentes issues possibles et du « frottement » entre les affleurements et le trou de sonde. Nous pensons que ces remarques sont les premières à faire appel à la notion de transmissivité.

Entre 1863 et 1904, d'autres forages furent réalisés à Paris et sa proche banlieue:

- les forages de la place Hébert et de la Butte-aux-Cailles, destinés chacun à alimenter une piscine pour profiter de la température de l'eau, qui est voisine de 30°. Les travaux, d'une extrême lenteur, durèrent respectivement 28 et 31 ans.

- le forage de la Raffinerie SAY, terminé en 1869 sans incident notable.

- le forage du Bois de Vincennes, réalisé en 1900 à titre de démonstration, dans le cadre de l'Exposition Universelle.

C'est seulement en 1904 que la décision fut prise d'utiliser la nappe albienne pour l'alimentation en eau potable de la région parisienne, à partir de deux forages:

- le forage de Carrières-sous-Poissy en 1904,

- le forage de Maisons-Laffitte en 1909.

Par la suite, avec l'apparition du système de forage Rotary, à partir de 1930, les puits à l'Albien se multiplient:

- en 1931, la Société Lyonnaise des Eaux fait exécuter avec succès et rapidité par la Société LAYNE-FRANCE, trois forages à Orsay, Poissy et Viry-Chatillon.

- de 1932 à 1937, on assiste à une véritable prolifération des forages (21 forages en 5 ans), la plupart réalisés au Rotary.

Cette multiplication des forages se traduit alors par une diminution très nette des débits des forages et de leur artésianisme. Le puits de Grenelle avait déjà cessé de jaillir en 1910, celui de Passy en 1930. A partir de 1930, la baisse de l'artésianisme se fit sentir de façon encore beaucoup plus nette. Les puits les plus anciens s'arrêtèrent les premiers, parce qu'équipés de manière artisanale, mais les puits modernes eux-mêmes accusèrent une baisse de leur niveau piézométrique.

En 1934, au moment même où certaines personnalités voudraient lancer une politique de « l'eau blanche » à Paris et proposent 100 nouveaux puits à l'Albien, certains auteurs dont LEMOINE, HUMERY et SOYER lancent un véritable cri d'alarme en démontrant que depuis la réalisation du puits de Grenelle (c'est-à-dire en 92 ans) la nappe a baissé de 74 mètres.

Le Conseil Municipal de Paris est saisi du problème et son rapporteur l'expose en ces termes :

« Il faut surtout incriminer la concentration des forages au voisinage de la capitale, qui en créant un appel d'eau considérable vers le même point, a eu pour conséquence des pertes de charges internes qui ont abaissé la pression de l'eau à son point d'utilisation et fait disparaître le jaillissement. »

On montrait ainsi que ce n'est pas l'insuffisance d'alimentation en eau par les bordures qui était responsable de la baisse piézométrique, ni l'épuisement de la nappe, mais les pertes de charge à l'intérieur du réservoir.

Non seulement le projet des « 100 nouveaux puits » fut définitivement abandonné, mais on rechercha le moyen de stabiliser la situation, par l'interdiction de nouveaux puits à proximité de Paris. Un décret-loi, promulgué le 8 août 1935, précise à cet effet:

Article 1^{er} : « Aucun puits ou sondage de plus de 80 mètres de profondeur ne pourra être entrepris dans les départements de la Seine, Seine-et-Oise et Seine-et-Marne, sans autorisation préalable. »

Il était suivi du décret d'application du 4 mai 1937 dans lequel on relève :

« Les exploitants des puits et sondages pour le captage d'eaux souterraines doivent conserver trace à leur date de toutes les mesures de débit, de température et analyses auxquelles il sera procédé, ainsi que des incidents d'exploitation survenus et des changements constatés dans le régime des eaux. La mesure des débits dans les conditions normales d'exploitation devra être faite une fois par an au minimum. »

Les problèmes posés par la nappe de l'Albien continuent toutefois à susciter diverses recherches et études. Telle celle de A. VIBERT qui indique et montre que la baisse de l'artésianisme n'est pas une affaire de réalimentation :

« Ce n'est pas la nappe qui s'épuise, c'est la conduite servant au transport souterrain des eaux, qui devient insuffisante, eu égard au débit, toujours plus grand qui lui est demandé. »

L'année 1939 voit une étude descriptive très détaillée sur la nappe par LEMOINE, HUMERY et SOYER avec une synthèse sur la structure et la stratigraphie des terrains crétacés, la coupe de tous les forages, le bilan de la nappe, ses qualités chimiques. Cet ouvrage reste aujourd'hui un document fondamental.

En 1953 commence la prospection systématique du pétrole dans le Bassin de Paris, avec les moyens considérables dont disposent plusieurs grandes compagnies. Plusieurs centaines de forages pétroliers traversent les terrains crétacés, et en explorent la structure. Les gisements d'hydrocarbure étant localisés dans le Jurassique, les sondages se sont surtout intéressés à cet horizon. Mais les terrains crétacés et l'Albien font l'objet de diagraphies qui permettent de déceler avec précision l'épaisseur et la superposition des diverses intercalations perméables de l'Albien.

Un organisme officiel, la Direction des Carburants, réalise en 1965 une étude de synthèse et une première ébauche de l'écoulement de la nappe en utilisant un modèle mathématique de simulation.

Un peu plus tard (1967), LAUVERJAT publie une thèse intitulée « Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre du Bassin de Paris » qui réunit l'ensemble des données acquises à cette date.

A partir de 1935, la nappe de l'Albien (qui ne fournit d'ailleurs que quelque 3% de la consommation en eau de la région parisienne) n'a donné lieu qu'à peu de nouveaux forages. Pourtant, sa supériorité sur d'autres ressources en eau est considérable :

— c'est une ressource très régulièrement répartie, pouvant donc être captée en n'importe quel point de la région parisienne,

— les eaux de l'Albien sont de très bonne qualité (leur température, voisine de 30°, ne permet toutefois pas de les distribuer immédiatement après la sortie du forage),

— la nappe est parfaitement protégée des pollutions, et les captages ne nécessitent pas de périmètres de protection,

— étant captive, elle transmet rapidement les pressions,

— elle peut fournir des débits ponctuels substantiels (de l'ordre de 150 à 200 m³/h par forage),

— enfin son exploitation ne nécessite pas de frais d'exhaure élevés, compte tenu de la faible profondeur de son niveau piézométrique.

On a de ce fait, été conduit à se demander si la technique de recharge des nappes souterraines (peu répandue encore en France, qui dispose d'assez larges ressources) ne pourrait pas permettre sous certaines conditions, à débit limité et sans modifier le niveau d'équilibre général, d'utiliser à nouveau la nappe de l'Albien. A cet effet, le Syndicat des Communes de la Banlieue de Paris pour les Eaux confia en 1974 au bureau d'études BURGEAP la mise au point d'un dispositif expérimental d'alimentation artificielle.

Un essai de recharge de longue durée (6 mois) fut réalisé en 1973, dans un forage de la banlieue Est (Noisy-le-Grand). L'expérience a permis d'examiner en détail des problèmes très divers que pose ce genre d'opération: colmatage du forage d'injection, compatibilité des eaux d'injection et des eaux de la nappe, débits injectables etc. Les résultats ont conduit à conclure de façon très positive sur la possibilité de recharger la nappe.

Il était toutefois nécessaire, compte tenu de leur prix de revient, avant de réaliser dans la pratique des opérations cumulées d'injection et de reprise d'eau, de déterminer avec précision, compte tenu de leur prix de revient les dispositifs à mettre en oeuvre et leur influence sur la nappe.

Dans ce but, un modèle mathématique de la nappe dans la région parisienne a été réalisé, après qu'aient été réunies toutes les données disponibles sur la nappe et sur son exploitation antérieure: données que nous résumerons brièvement ci-dessous.

Données prises en compte pour le modèle mathématique

Le réservoir albien est constitué d'horizons argilo-gréseux et sableux (Sables de Frécambault, Sables des Drillons, Sables Verts) plus ou moins isolés les uns des autres par des horizons marno-argileux (Marnes de Brienne, Argile du Gault, Argiles Tégulines, Argiles de l'Armanche). L'ensemble des horizons gréseux et sableux représente une épaisseur cumulée de 30 à 40 m, et peut être considéré comme un aquifère unique, dont la transmissivité est comprise entre 10^{-3} et 10^{-2} m²/s dans la région parisienne. L'horizon aquifère se situe vers 600 mètres de profondeur et son niveau piézométrique est voisin de la surface du sol. La nappe est donc fortement captive, avec un coefficient d'emmagasinement adimensionnel faible, de l'ordre de 10^{-4} .

Les horizons albiens sont relativement bien isolés des niveaux qui les encaissent, mais l'étanchéité n'est pas parfaite et il se produit des échanges par percolation verticale:

- d'une part avec les horizons sablo-argileux sous-jacents du Barrémien et du Néocomien,
- d'autre part avec les horizons crayeux superposés du Cénomaniens, Turonien, Sénonien (seulement dans la partie Ouest du Bassin de Paris).

Les circulations verticales se font, selon le lieu, de l'Albien vers les terrains encaissants, ou inversement, des terrains encaissants vers l'Albien. Lorsque la nappe est soumise à un pompage, elle est notablement déprimée, ce qui entraîne soit une augmentation des percolations des épontes vers l'Albien, soit une diminution des percolations de l'Albien vers les épontes.

La structure de l'horizon albien est assez monotone, en forme de cuvette centrée sur Meaux (Est de Paris), comme l'ensemble des terrains secondaires du

Bassin Parisien. Il faut toutefois signaler (Fig. 1) quelques particularités tectoniques :

- tectonique souple, marquée par l'anticlinal de Beynes, l'anticlinal de Saint-Illiers, l'anticlinal de Vernon Rouen, l'anticlinal du Pays de Bray,
- tectonique cassante, mise en évidence par les failles de Rouen-Vernon, le décrochement qui prolonge vers l'Est la structure du Pays de Bray, la faille qui longe la vallée de la Seine au Nord de Mantes. Certains de ces accidents jouent un rôle hydrodynamique, particulièrement la faille de la Seine, qui semble favoriser les échanges verticaux entre l'Albien et les terrains superposés, (ils sont en ce qui les concerne drainés par la Seine).

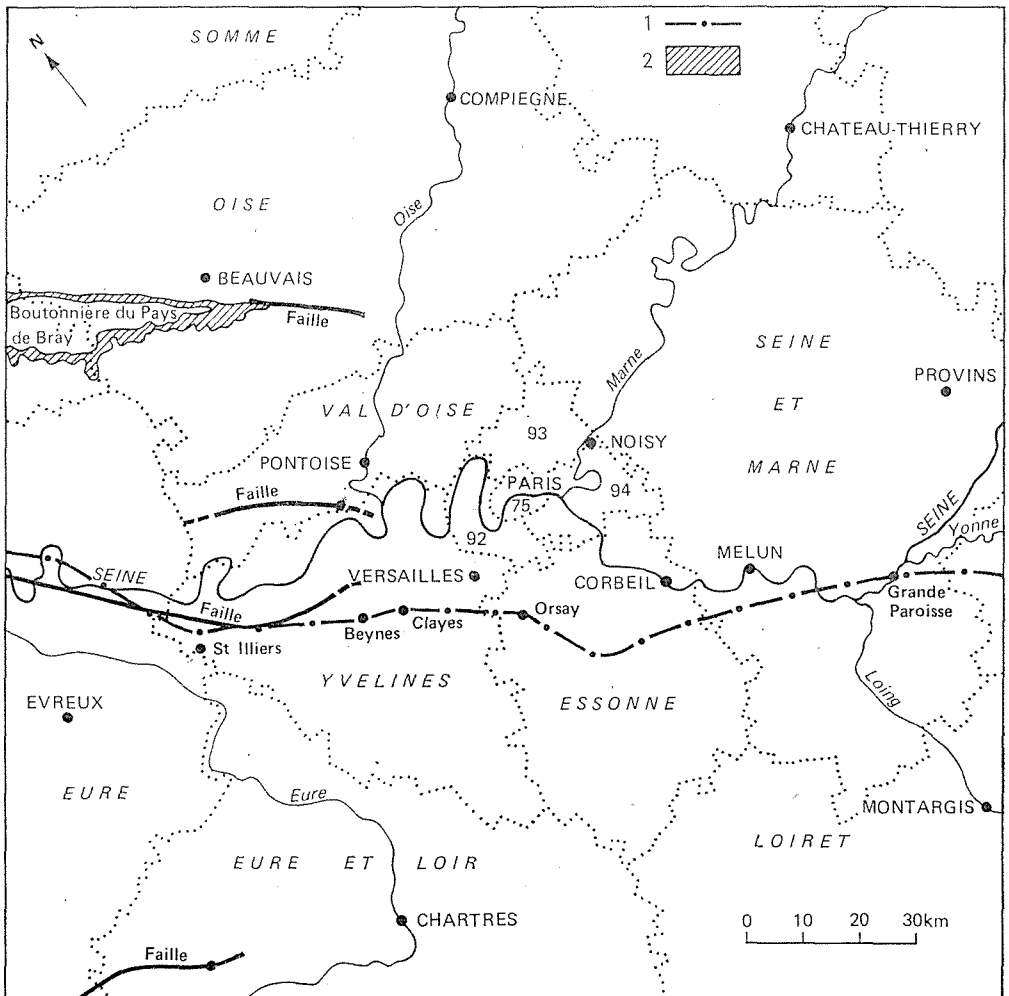


Fig. 1. Carte des affleurements et des principales failles de l'Albien
1. Tracé de la coupe Vernon-Sens, 2. affleurement de l'Albien

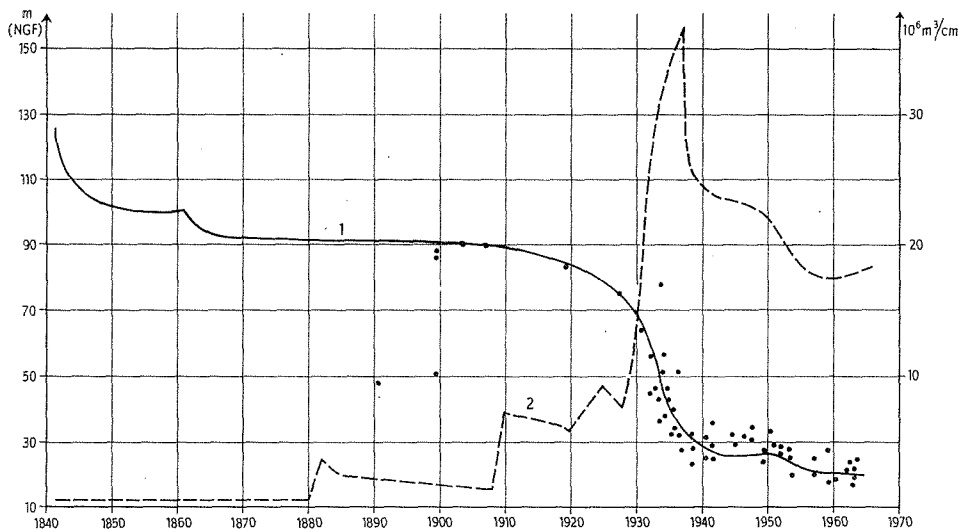


Fig. 2. Historique des niveaux piézométriques et des débits de prélèvement dans la région parisienne. (Document établi d'après la Direction des Carburants)

1. Historique des niveaux piézométriques dans la région parisienne, 2. historique des débits pompés dans la région parisienne

La piézométrie de la nappe a considérablement évolué depuis sa mise en exploitation en 1841. Un graphique de l'évaluation d'ensemble des niveaux piézométriques dans la région parisienne, établi par la Direction des Carburants d'après les mesures faites dans une vingtaine de puits disséminés (Fig. 2) met en évidence une baisse importante du niveau piézométrique. On constate cependant que cette baisse, qui s'effectue par paliers, semble se stabiliser vers les années 1960 après avoir connue une chute importante vers 1935.

Toutefois, cette stabilisation est discutée par les auteurs: pour certains elle est réelle, pour d'autres, dont J. LAUVERJAT, l'évolution n'est pas terminée (certains auteurs parlent même d'une baisse de niveau de 1 mètre par an). Nous estimons, en ce qui nous concerne que des baisses importantes peuvent se produire localement (mise en route ou réfection d'un forage), sans que le niveau général moyen s'en ressente: c'est ce qui paraît ressortir de la courbe de la Fig. 2 qui retrace l'évolution des niveaux dans plusieurs forages.

Avant 1920, il n'existait que peu de forages et cela interdit pratiquement de tracer une carte piézométrique antérieure à cette époque. Sur les figures 3, 4, 5 nous avons fait figurer les cartes piézométriques de 1920 et 1935 établies par la Direction des Carburants, celle de 1963-66 établie par J. LAUVERJAT. Ces trois cartes soulignent combien s'est accrue la dépression de la nappe dans la région parisienne. On peut constater notamment qu'entre 1920 et 1966 le niveau a baissé d'environ 70 mètres au droit de la ville de Paris.

Une des principales difficultés de l'étude a été d'établir un historique, relativement précis des débits pompés depuis 1920. En fait, on a été amené pour prendre ces données en compte sur le modèle, à scinder cet historique en 4 périodes :

1920-1930 débit moyen d'exploitation de 0.25 m³/s,
1930-1950 débit moyen d'exploitation de 0.77 m³/s,

1950—1964 débit moyen d'exploitation de $0.72 \text{ m}^3/\text{s}$,
 1964—1974 débit moyen d'exploitation de $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces coupures ne font pas d'ailleurs apparaître la pointe d'utilisation, qui s'est produite vers 1935 avec un débit de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Réalisation du modèle

Des données qui ont été rassemblées il ressort que, sous l'effet du rabattement provoqué par l'exploitation, l'eau fournie par la nappe est susceptible de provenir de la décompression du réservoir d'une part, de l'apport de systè-

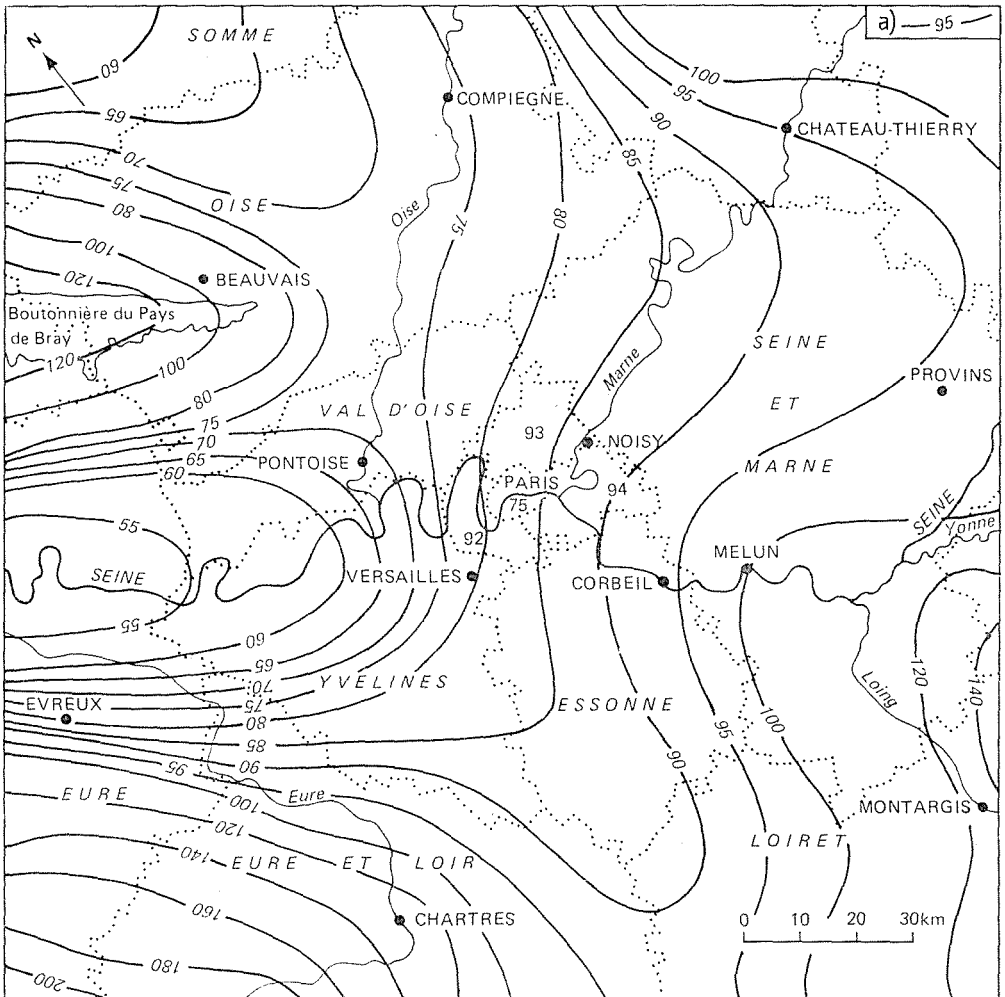


Fig. 3. Carte piézométrique de la nappe albienne en 1920. (D'après la Direction des Carburants)

a) Courbe piézométrique en mètre NGF

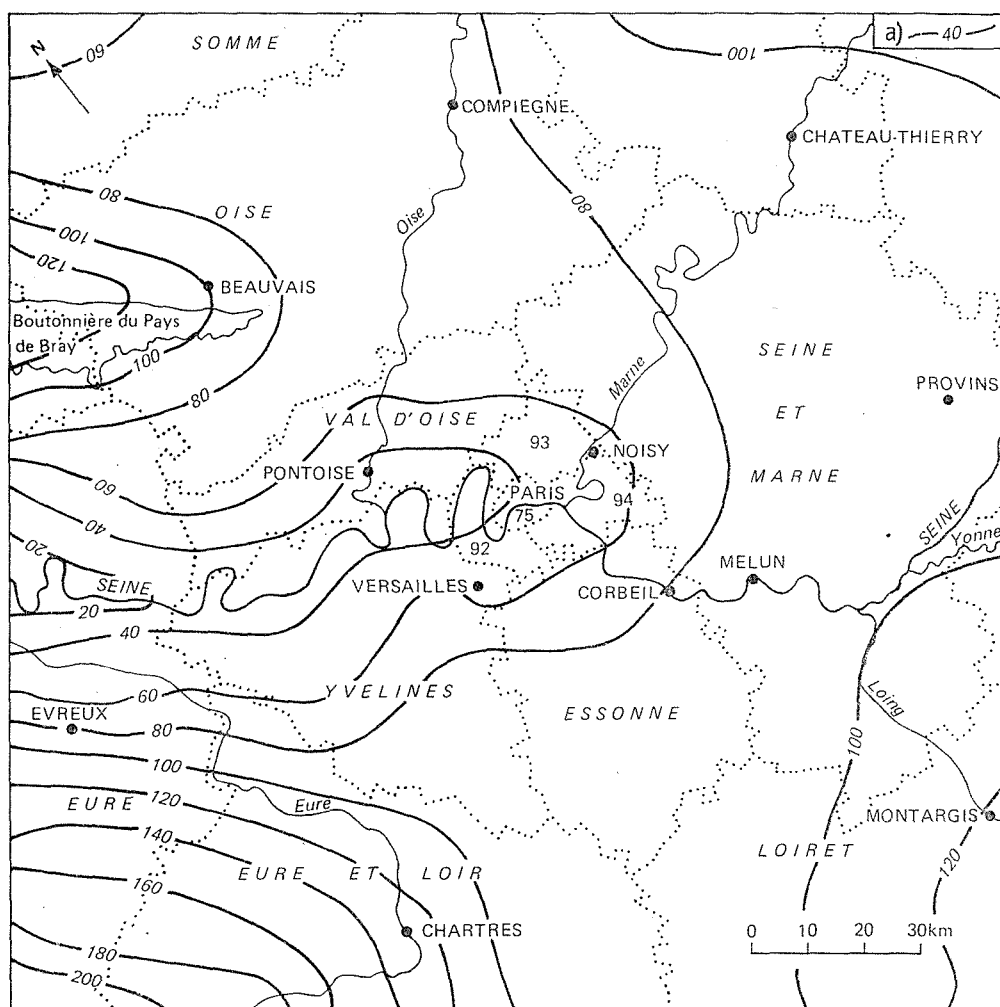


Fig. 4. Carte piézométrique de la nappe albienne en 1935. (D'après la Direction des Carburants)

a) Courbe piézométrique en mètre NGF

mes aquifères adjacents ou environnants, d'autre part. Parmi ces derniers apports :

- la nappe de la Craie,
- la nappe du Barrémien-Néocomien,
- les affleurements de bordure, eux-mêmes alimentés par les pluies.

Dans la série stratigraphique générale, l'aquifère albien se comporte comme une unité de circulation d'eau privilégiée, liée à d'autres unités aquifères dont on ne peut pas ne pas tenir compte du point de vue hydrodynamique. Il est manifesté, toutefois, que l'Albien est assez bien isolé des unités de réalimentation possibles, car dans le cas contraire, la baisse du niveau piézo-

métrique n'aurait pas été aussi importante depuis la mise en exploitation de la nappe.

Ce sont précisément les mécanismes de circulation et de décompression au sein de la nappe albienne et de réalimentation par les éponges qui ont pu être précisés et quantifiés au moyen de la simulation des historiques sur modèle mathématique.

Alors que le modèle qui avait été réalisé en 1965 par la Direction des Carburants couvrait l'ensemble de la nappe albienne dans la Région Parisienne, celui dont il est question ici ne couvre qu'un carré de 180 km de côté, centré sur Paris. En effet, le but du modèle étant d'étudier un schéma d'ex-

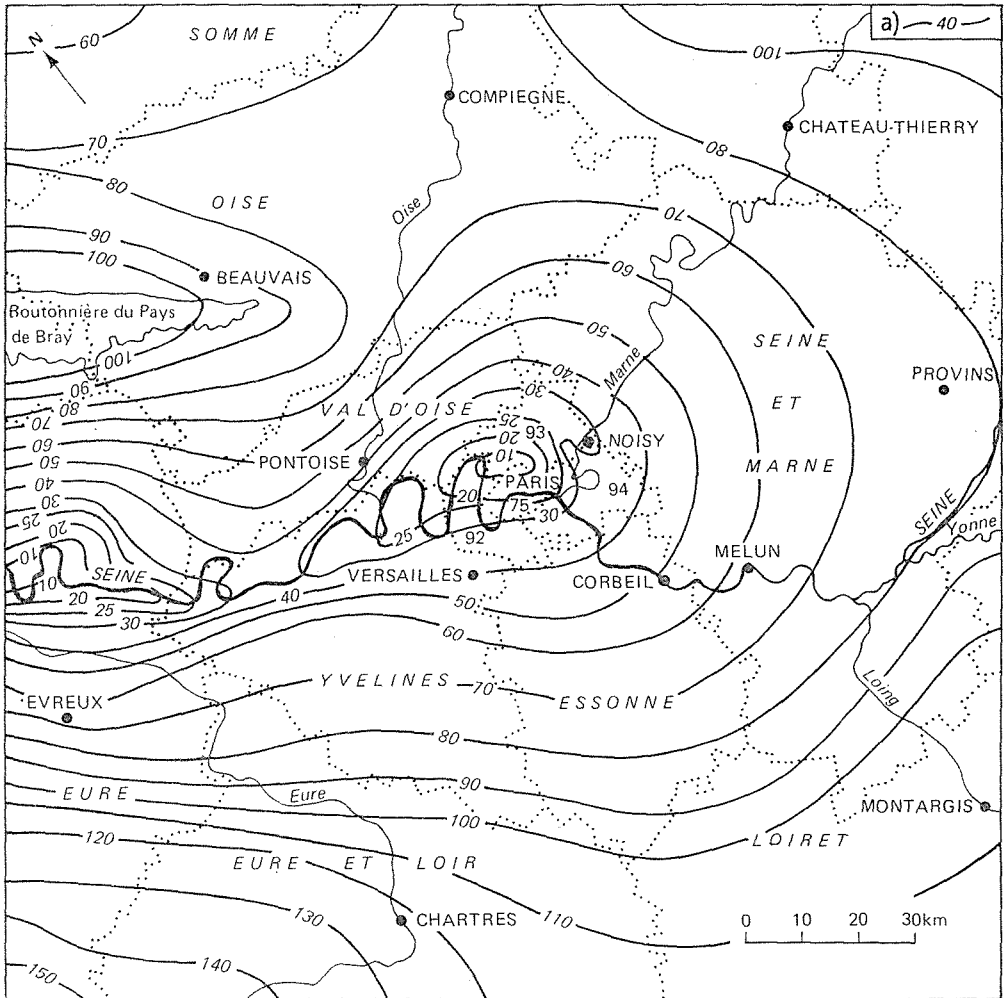


Fig. 5. Carte piézométrique de la nappe albienne en 1963-66. (D'après la thèse de J. LAUVERJAT)

a) Courbe piézométrique en mètre NGF

Tableau 1

Année	1930	1950	1964	1974
Débit aux limites du modèle	331	498	511	510
Débit d'échange avec la Craie	-29	220	158	185
Débit d'échange avec le Barrémien-Néocomien	-52	77	43	65
Débit d'exploitation	-255	-793	-717	-800
Débit dû à la décompression de la nappe	5	2	5	40

ploitation ne modifiant pas le résultat global du débit d'exploitation à long terme, on s'est volontairement limité à la zone représentée sur les planches. On a pu ainsi préciser beaucoup des phénomènes en jeu à l'intérieur de la région parisienne.

Le modèle a d'abord fait l'objet d'un calage de façon à restituer les évolutions piézométriques les plus voisines possibles de la réalité.

A partir de ce calage, on a pu déterminer le bilan de la nappe, comme le montre le tableau 1.

Le calage a mis en évidence et a permis de chiffrer certains phénomènes particuliers :

- la drainance de la Craie est surtout importante dans la Basse Seine, au niveau de la faille de Vernon-Rouen. Au contraire, à l'Est du Bassin Parisien les communications avec la Craie sont pratiquement nulles, ce qui s'explique par le fait que la base de la série crayeuse est constituée dans cette région par des niveaux marneux très épais et très peu perméables.

- la drainance du Néocomien-Barrémien est assez homogène et correspond à des perméabilités verticales de l'ordre de 10^{-9} m/s.

- la perméabilité moyenne de l'Albien est plus forte au centre du Bassin Parisien que sur les bordures.

- le coefficient d'emmagasinement par décompression est de l'ordre de 10^{-4} pour une épaisseur moyenne de la couche d'environ 30 mètres.

A la fin des opérations de calage, le modèle a été utilisé pour déterminer la possibilité d'utiliser la nappe dans le cadre d'un dispositif associant injection et reprise comme on l'a indiqué ci-dessus.

Le résultat de ces dernières simulations a été positif. Il devrait ouvrir des perspectives pour l'utilisation de la nappe de l'Albien en tel ou tel point de la région de Paris, en respectant l'impératif qui consiste à ne pas modifier son niveau général d'équilibre. Il sera bon toutefois de procéder par étapes, de manière à tirer le maximum d'enseignements des dispositifs qui pourraient être successivement réalisés. A plus forte raison, un projet qui viserait à une mise en exploitation avec injections intensives, intéressant un grand nombre de partenaires, nécessiterait-il un examen beaucoup plus poussé, et éventuellement de nouvelles simulations mathématiques.