

50376
1978
129

50376
1978
129

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

MEMOIRES

TOME XV

Mania Jacky
Thèse : Sc. nat : Lille I
1978 : n° 397

Gestion des systèmes aquifères

Application au Nord de la France

par

Jacky MANIA



S. G. N.

B.P. 36 — 59650 VILLENEUVE D'ASCQ

1978

0

BIBLIOTHÈQUE DE L'USTL 56	
Cote	58376- 1978 129
Niv.	
Salle	MAG
Inv.	58376- 1978-129



030 020404 0

97803
8001
021



Gestion des systèmes aquifères

Application au Nord de la France

Ce mémoire a été publié grâce au concours de souscripteurs et des organismes suivants :

AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE (DOUAI),
COMPAGNIE GENERALE DES EAUX (ARRAS),
SOCIETE DES EAUX DU NORD (LILLE),
SOCIETE GENERALE DES EAUX DE CALAIS (CALAIS),
SOCIETE LYONNAISE DES EAUX ET DE L'ECLAIRAGE (DUNKERQUE, ANZIN),
SYNDICAT INTERCOMMUNAL DE DISTRIBUTION D'EAU DU NORD (ROUBAIX).

Avant-propos

par A. BONTE et G. CASTANY

Le présent mémoire est une synthèse actualisée sur les nappes souterraines du Nord de la France et sur leur gestion.

Cette synthèse, présentée par J. Mania, est l'aboutissement de nombreuses études, théoriques et appliquées, dont certaines ont fait l'objet de communications à la Société Géologique du Nord et ont trouvé place dans nos Annales. Belle occasion de retracer les principales étapes de la recherche hydrogéologique dans notre région.

Le précurseur, comme dans la plupart des domaines de la Géologie régionale, est évidemment J. Gosselet qui, dès 1886, livrait au public ses "Leçons sur les nappes aquifères". Par la suite, avec la publication des "Assises Crétaciques et Tertiaires dans les Fosses et sondages du Nord de la France", il jetait les bases de l'Hydrogéologie régionale dans quelques pages où son intuition de génie lui permettait d'établir des règles toujours valables : en 1904, dans le fascicule I (région de Douai), il traitait spécialement de la nappe de la craie ; en 1905, dans le fascicule II (région de Lille), il nous livrait ses réflexions sur la nappe du Calcaire carbonifère.

De ces études initiales, il faut retenir surtout la notion de "Craie congloméroïde", déjà définie en 1901 (A.S.G.N., XXX, p. 93), mais parfaitement explicitée dans son mémoire de 1904. Si le terme peut paraître impropre, car il évoque un caractère génétique, la description qu'en donne son auteur (p. 139) ne laisse subsister aucune ambiguïté : la craie congloméroïde, très perméable et très riche en eau, est une craie altérée par la dissolution souterraine : son gisement coïncide avec le tracé des vallées actuelles. J. Gosselet en concluait qu'il fallait chercher l'eau dans les vallées et non sous les plateaux, ainsi qu'il l'énonçait déjà en 1898 (A.S.G.N., XXVII, p. 293).

Cette notion essentielle, qui n'aurait jamais dû être oubliée, a été complètement négligée dans l'entre-deux-guerres, lorsque les adductions communales d'eau potable ont connu un développement spectaculaire. On assista alors à une floraison de châteaux d'eau, normalement construits sur les hauteurs. Au nom d'une certaine logique, il a semblé, à l'époque, judicieux et économique de placer les puits et forages au voisinage immédiat et même dans l'axe des réservoirs. Hélas ! les débits obtenus étaient souvent dérisoires, malgré le creusement de galeries coûteuses, avec des fluctuations importantes des niveaux piézométriques. Des sommes considérables ont ainsi été gaspillées en pure perte. Cette notion de perméabilité différentielle a été remise en honneur par G. Waterlot : en 1957 ("Le Monde Industriel", t. 83, p. 10) mais surtout en 1960 (A.S.G.N., LXXX, p. 332) dans une note où cet auteur reprenait textuellement les conseils donnés par Gosselet en 1904. Par la suite, nos Annales ont enregistré de nombreuses études faites par G. Waterlot sur les eaux souterraines, en particulier sur l'évolution du chimisme de l'eau, tant dans le Calcaire carbonifère (A.S.G.N., LXX, 1950) que dans la Craie (A.S.G.N., LXXVIII, 1958).

Le problème des ressources en eau de la Région du Nord préoccupe depuis longtemps les responsables de sa distribution. Déjà en 1898, J. Gosselet (A.S.G.N., XXVII, p. 272) parlait de pénurie ; L. Dollé, entre 1925 et 1948, a maintes fois souligné l'importance des

problèmes de l'eau pour la région du Nord et nota, avec un certain optimisme, l'alternance des variations de débit des sources et des puits en relation avec le régime des pluies. Le problème des ressources commença, à partir de 1950, à inquiéter sérieusement les collectivités et en 1954 le B.R.G.M., sensibilisé par des propos pessimistes, attira l'attention sur la gravité des problèmes de l'eau dans notre région. En 1956, le Comité interdépartemental de protection des eaux souterraines, préoccupé par l'accroissement rapide des besoins en eau potable et en eau industrielle, décida de faire exécuter une étude générale sur les ressources et les besoins en eau des deux départements ; étude confiée au B.R.G.M. et qui fut l'amorce des Inventaires des Ressources Hydrauliques (I.R.H.). A la même époque, P. Laffitte et J. Ricour publiaient (Revue de l'Industrie Minérale, janvier 1956) une note dont le titre : "La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine : l'EAU" fit l'effet d'un pavé dans la mare.

C'est J. Ricour qui fut l'initiateur des I.R.H. en France, ébauche des futures Agences de Bassin (loi du 16 Décembre 1964) en particulier de l'I.R.H.N.P.C. pour le Nord - Pas-de-Calais, dont il fut le Directeur de 1956 à 1961. C'est à son dynamisme que la région du Nord doit de n'avoir jamais connu de pénurie grave.

Mises à part les "Leçons sur les nappes aquifères" de J. Gosselet, conférences occasionnelles, l'enseignement régulier de l'Hydrogéologie débuta à Lille en 1930 avec la création d'un Certificat intitulé "Hydrogéologie, Hygiène de l'eau et du sol", à l'initiative de L. Dollé, qui fut le premier à professer cette discipline, et ce durant 15 ans. C'est d'ailleurs lui qui avait été le premier à dresser, pour la région de Cambrai, une carte piézométrique, amorce des futurs Inventaires des Ressources Hydrauliques.

En 1949, fut créé le Certificat de Géologie Appliquée au sein duquel l'enseignement de l'Hydrogéologie était confié à G. Waterlot.

Depuis 1956, les recherches sur les nappes souterraines de la région se poursuivent, au titre de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques, donnant lieu à de nombreux Diplômes d'Etudes Supérieures et à des thèses de 3^e Cycle, parmi lesquelles il faut signaler celle de P. Caulier (1974) introduisant l'analyse systématique des diagraphies pour la détermination et la différenciation des faciès de la craie et celle de J. Mania (1971), prélude à des recherches plus approfondies qui aboutirent à la soutenance d'une thèse de Doctorat ès Sciences, objet du présent mémoire.

Jusqu'en 1960, l'Hydrogéologie est restée science naturelle : l'intuition, basée sur l'expérience, suffisait pour interpréter les faits d'observation. L'abondance des informations, conséquence de l'installation des I.R.H., et la complexité des problèmes de l'Hydraulique souterraine ont nécessité le recours à l'Informatique, seule capable d'intégrer toutes les données disponibles et de tirer parfois des notions nouvelles, comme celle de la drainance. Le travail de J. Mania, premier essai en France d'optimisation dans l'utilisation coordonnée des ressources en eau d'une région, en est l'illustration concrète. Il porte sur la mesure, l'étude et l'emploi des caractéristiques hydrodynamiques des systèmes aquifères pour la gestion des ressources en eau dans le Nord de la France. L'application des techniques récentes de l'informatique hydrologique avec la conception et la mise en œuvre de programmes de calcul automatique et de modèles mathématiques hydrodynamiques des systèmes aquifères et de modèles de gestion, apportent à ce travail une valeur d'exemple dépassant le cadre régional, pour devenir une base méthodologique de la gestion de l'eau.

Ce mémoire est l'aboutissement de plusieurs années de travail en étroite collaboration avec le Service géologique régional Nord - Pas-de-Calais du B.R.G.M. Les résultats obtenus sont consignés dans de nombreux rapports internes dont la référence est donnée en bibliographie et parmi lesquels on peut citer : l'établissement des modèles des systèmes aquifères de la craie (L. Crémille, J. Mania, S. Ramon et Jacques Ricour), l'interprétation de nombreux pompages d'essai (G. Bernard, M. Bonnet, L. Crémille, J. Debuissou, J. Mania et Jacques Ricour), l'étude du renforcement des étiages de la Lys par exploitation intensive saisonnière de la nappe de la craie (P. Caulier, J. Debuissou, M. Dourousseau, A. Philippart et S. Ramon), l'ali-

mentation artificielle des nappes (L. Crémille, J. Mania, G. de Marsily, S. Ramon et Jacques Ricour). Quant aux études sur la piézométrie, elles ont été conduites par P. Caulier, L. Crémille, J. Dubuisson et J. Mania. De nombreux travaux ont par ailleurs été présentés sur l'évaluation des ressources en eau des principaux aquifères. Ces rappels, bien qu'incomplets, soulignent l'effort de synthèse accompli par J. Mania et l'intérêt de la monographie détaillée présentée.

La gestion de l'eau exige, tout d'abord, l'acquisition de données numériques de base, nombreuses et précises. Ensuite, elle suppose une maîtrise de leur traitement statistique et de l'analyse mathématique. Après un rappel théorique concis et clair, J. Mania présente les lois de l'hydrodynamique souterraine et leur application aux simulations analogiques et mathématiques de l'écoulement des eaux souterraines. La schématisation du fonctionnement du système aquifère et les bases théoriques de l'optimisation des ressources en eau sont également exposées.

L'alimentation des nappes d'eau souterraine, base de la gestion, est déterminée avec précision par l'emploi des méthodes les plus modernes de l'hydrologie. La variabilité spatiale et temporelle des données est traitée pour les paramètres hydroclimatologiques et hydrogéologiques. Le problème ardu de l'évapotranspiration réelle est étudié avec un test rigoureux sur les bassins de l'Artois et de l'Escaut.

La surface piézométrique des nappes, dont l'importance est à souligner, est analysée par une étude quantitative. La situation, exposée pour les principaux systèmes aquifères régionaux, précisée sur des cartes, aboutit à une synthèse hydrogéologique couvrant toute la région.

Le rôle primordial de la lithologie et de la géologie structurale des réservoirs aquifères est souligné avec l'établissement de cartes de classification hydrogéologique.

L'analyse des fluctuations de la surface piézométrique des nappes, en particulier de celle de la craie, permet de cerner les principaux facteurs de la recharge des eaux souterraines. Sur les bases solides ainsi acquises, la confrontation des données climatiques et piézométriques, par une application du modèle SIMERO, permet de tenter une simulation des fluctuations de la surface piézométrique et de dégager les processus d'alimentation des eaux souterraines. Ces processus étant la base de la stratégie de la gestion.

L'acquisition, le recueil et l'analyse des données numériques de base étant réalisés avec toute la précision compatible avec celle des techniques de mesure, la connaissance des caractéristiques hydrodynamiques des systèmes aquifères, base de la modélisation, est exposée. Deux points fondamentaux sont traités : les procédures de calcul automatique ou semi-automatique des données sur les paramètres hydrauliques et l'établissement des schémas de fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères régionaux. La mesure, in situ, de ces paramètres est obtenue par des expérimentations sur le terrain : pompages d'essai et tests divers dont le micromoulinet, dernier-né des outils mis à la disposition de l'hydrogéologue. Une solution originale est apportée au calcul automatique des données obtenues par les pompages d'essai avec la création d'un programme informatique THEIS. Il permet d'obtenir des résultats plus précis et plus rapides ainsi qu'un meilleur ajustement des valeurs des paramètres en comparaison des méthodes graphiques traditionnelles. La relation, étroite et significative, entre la direction des écoulements de surface et souterrain avec la tectonique est précisée. Un programme informatique, original et opérationnel, permet, à partir de la distribution géométrique des fissures dans le réservoir, de calculer les tenseurs de perméabilité (programme TENSEUR).

La mise en évidence, jusqu'alors au stade d'hypothèse, des transferts verticaux de l'aquifère de la craie, sous recouvrement tertiaire ou alluvionnaire, a des répercussions sur l'exploitation des eaux souterraines. Les caractéristiques de l'écoulement souterrain sont précisées par la diagraphie au micromoulinet dans les forages d'exploitation de la craie et du Calcaire carbonifère.

Une importante partie du mémoire est consacrée à l'application des modèles mathématiques aux systèmes aquifères du Nord de la France, phase concrète du traitement des

données régionales acquises précédemment. Douze modèles mathématiques (sur une centaine recensés en France) ont été réalisés soit par J. Mania, soit par d'autres hydrauliciens, pour les systèmes aquifères du Calcaire carbonifère (région de Lille) et de la craie. Un modèle analogique électrique intéresse les Sables landéniens des Flandres franco-belges. Ils couvrent un large éventail du modèle en régime permanent au modèle en régime transitoire. Tous font l'objet d'un cas concret avec rappel du contexte géologique et hydrogéologique, suivi d'une description des caractéristiques du modèle et des phases de son élaboration (calage).

L'outil que représente le modèle mathématique étant réalisé et sa représentativité étant testée, J. Mania l'utilise pour l'établissement de scénarios de gestion de l'eau. Les contraintes physiques et économiques de l'exploitation des ressources sont déterminées, de telle sorte que les options avancées, à moyen et long termes, sont logiques et réalistes. Tous les systèmes aquifères sont ainsi couverts.

Il ne fait aucun doute que cet apport concret à la solution des problèmes de l'eau dans le Nord de la France, servira le développement économique régional.

« »

Introduction

Dans l'avant-propos, A. Bonte et G. Castany ont retracé les bases historiques de l'hydrogéologie régionale qui a bénéficié, à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècle, de l'acquis des travaux de sondage des compagnies minières et des entreprises textiles. La connaissance des limites géologiques des réservoirs aquifères, si elle est un préalable à tout travail hydrogéologique, s'avère actuellement insuffisante car de nombreux problèmes inhérents à l'activité humaine apparaissent.

L'accroissement des besoins en eau et de la pollution des réserves souterraines et superficielles entraîne la mise en place de vastes projets palliatifs dont les modalités et les réalisations sont dirigées par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie et le Service Interdépartemental de l'Industrie et des Mines.

La complexité des problèmes d'alimentation et de prélèvement oblige l'hydrogéologue à recourir à des techniques nouvelles, physiques ou informatiques. En effet, l'hydrogéologie représente un domaine qui se trouve à cheval sur des disciplines naturalistes (Géologie) et dites exactes (Hydraulique, Géophysique, Hydrochimie). La liaison entre ces disciplines a été réalisée en France en 1962-63 par Schoeller (95) et par Castany (75).

Les précurseurs et les utilisateurs des techniques de simulation des écoulements souterrains à l'aide de modèles analogiques (papier conducteur, cuve rhéoelectrique, réseaux de résistances et capacités) sont en France : Huart de la Marre (17 et 18), Schneebeil (163), Habib et Sabarly (15), Sourieau (39), Prud'Homme et Souquet (25 et 26), Emsellem (7). Ces modèles ont été développés aux États-Unis en association avec un traitement sur ordinateur, dès 1952 par Korn et Korn (20), Wass (51), Karplus (19), Stallman (40), Walton (48, 49 et 50).

Parallèlement, en raison d'une infrastructure informatique très développée, les modèles mathématiques ont connu un essor considérable aux U.S.A. dès 1960 sous l'impulsion de Walton et Neill (48), Eshett et Longenbaugh (10), Longenbaugh (22), Bittinger, Duke et Longenbaugh (1) et Stettner (41). Ces méthodes de travail ont été reprises en France par l'École des Mines de Paris en 1969, par Emsellem et de Marsily (8, 9 et 21), le Service géologique d'Alsace et Lorraine et le B.R.G.M., qui ont développé grâce à Rousselot (32 à 36), Sauty (38), Ungemach (46), Suzanne et Ungemach (42) divers schémas de travail.

Le développement et l'application des procédés modernes d'analyse mathématique ou physique permettent ainsi d'élaborer des systèmes hydrogéologiques reposant sur des hypothèses de travail simplificatrices du milieu naturel que l'on peut éventuellement modifier au cours des simulations successives.

Dans le domaine des interprétations piézométriques, je signalerai les travaux réalisés en France par Degallier (6, 80) qui, à partir de l'analyse et de l'interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines, a proposé une méthode d'interprétation et un modèle de simulation déterministe. Ce dernier ne peut être mené à terme que si des données hydroclimatiques, hydrodynamiques et géologiques sont disponibles.

Sept chapitres seront successivement traités.

Dans un premier chapitre, nous définirons le système aquifère, puis nous décrirons les différents types de simulateurs utilisés ultérieurement. Nous introduirons les notions essentielles de l'optimisation.

Le deuxième chapitre concerne le traitement et l'utilisation des données hydrologiques et climatologiques afin de mieux cerner les bilans totaux et souterrains et de montrer l'importance des caractères lithologiques des bassins versants. Nous y analyserons les résultats qui permettront par la suite d'élaborer de façon plus juste le cadre hydrogéologique des modèles.

Le troisième chapitre traite de l'analyse et de l'évolution de la piézométrie des nappes. Nous y aborderons les problèmes de simulation.

Le quatrième chapitre permet de montrer l'existence des schémas hydrodynamiques utilisés dans les hypothèses de la modélisation et étayés par des mesures de terrain. Nous y développerons une méthode automatique de traitement des données expérimentales.

Le cinquième chapitre correspondra à la concrétisation des aspects soulevés dans les chapitres précédents et se traduira par l'élaboration et la réalisation des modèles sur quelques systèmes aquifères du Nord de la France.

Le sixième chapitre envisage la gestion des eaux souterraines à partir des modèles réalisés ou à partir de données relatives à une utilisation conjointe des eaux de surface et souterraines.

Le septième chapitre correspond aux conclusions générales apportées par les études précédentes.

————— « » —————

CHAPITRE PREMIER

Systèmes aquifères et modèles adaptés

I. — INTRODUCTION

Un système aquifère, englobant le plus souvent une nappe d'eau souterraine, peut être défini par un certain nombre d'éléments statiques ou dynamiques.

Les éléments statiques (fig. 1) caractérisent le réservoir aquifère sur le plan géologique : limites géométriques du réservoir (épaisseur, continuité latérale, nature du recouvrement et du substratum, position de l'exutoire naturel, morphologie) et nature du milieu (fissuration, porosité).

Les éléments dynamiques (fig. 2) caractérisent par contre la nature des transferts hydrauliques qu'ils soient entrants (+) ou sortants (—). Ces transferts se traduisent par divers débits (d'écoulement souterrain, d'alimentation naturelle ou artificielle, de pompage ou d'émergence naturelle).

L'analyse des éléments statiques est d'ordre phénoménologique et fait rarement appel à des données très nombreuses. Celle des éléments dynamiques est, par contre, de type statistique. Les données sont multiples et interdépendantes. Les procédures de calcul sont celles du calcul numérique sur machine. Dès lors que l'ordinateur devient un outil déterminant de l'étude d'un système aquifère, l'analyse passe par une modélisation soit mathématique, soit hybride (en association avec l'outil physique). C'est à ce prix que l'on peut alors envisager un calcul du bilan des transferts et que l'on peut tenter de proposer une gestion optimale des ressources en eau d'un système aquifère donné.

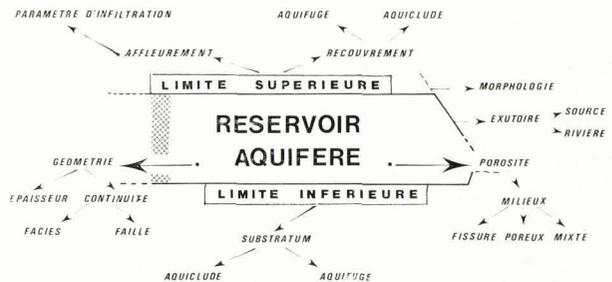


Fig. 1. — Les éléments statiques d'un système aquifère. Notons que chacun des éléments est une caractéristique intrinsèque d'ordre géologique ou d'ordre morphologique du système.



Fig. 2. — Les éléments dynamiques d'un système aquifère. On notera, à la différence des éléments statiques (fig. 1), que chacun des éléments dynamiques est variable dans le temps. La recherche de l'équilibre d'un système aquifère conduit à proposer des caractéristiques dynamiques intrinsèques.

Cette étude porte sur les systèmes aquifères du Nord de la France. Elle concerne une superficie de 12.500 km², pour les deux départements du Nord et du Pas-de-Calais, qui réunit

une grande quantité d'informations nécessaires aux modélisations. Ces informations, d'ordre géologique, géophysique, hydraulique, hydrologique et climatologique, recouvrent par ailleurs de larges périodes (trois quarts de siècle pour la région lilloise, par exemple).

Les nappes d'eau souterraine du Nord de la France sont, en outre, multiples et variées. L'étude portera aussi sur les aquifères du calcaire carbonifère de la région Lille-Roubaix-Tourcoing-Tournai, des calcaires du Jurassique supérieur du Boulonnais, de la craie du Crétacé supérieur ainsi que sur celui des sables de l'Eocène. Ces milieux sont fissurés, poreux ou mixtes. Ces nappes sont intensément exploitées à l'heure actuelle et, à l'évidence, fortement perturbées. Une mise au point sur leur gestion paraissait donc nécessaire.

A côté d'une analyse globale de chacun des systèmes aquifères du Nord de la France, certains aspects ont été abordés localement, avec souvent plus de précision, soit du fait de la concentration particulièrement intéressante des informations, soit du fait de leur absence.

L'analyse statique et dynamique d'un système aquifère proposée ici au niveau des aquifères du Nord de la France pourra être appliquée à tout autre système. La méthode d'approche, d'ordre essentiellement statistique, s'avère généralisable : elle sera donc détaillée dans ce travail.

II. — METHODES D'ANALYSES DES ELEMENTS STATIQUES ET DYNAMIQUES D'UN SYSTEME AQUIFERE

Les éléments statiques des systèmes aquifères considérés seront abordés lors de la mise en œuvre des modèles de simulation des aquifères (chapitres 5 et 6) relatifs aux trois types de milieu : fissuré (nappes des calcaires carbonifères et jurassiques), poreux (nappe des sables landéniens) et mixte (nappes de la craie).

Les éléments dynamiques rendent compte des transferts hydrauliques. Les méthodes d'analyses seront présentées brièvement en retenant essentiellement pour chacune d'elles les données de base bibliographiques ou originales nécessaires ainsi qu'en rappelant les buts à atteindre. Nous préciserons enfin les connexions prévisibles entre les diverses analyses et la manière de les aborder par l'outil informatique.

1) Le problème de l'alimentation.

L'analyse de l'alimentation verticale d'une nappe par la pluie efficace ou *infiltration efficace* (75) repose sur les hypothèses de Turc (97) et de Thornthwaite (96). Les données nécessaires sont représentées par les précipitations brutes, les températures, les humidités relatives de l'atmosphère, les durées d'insolation et les états de remplissage du réservoir considéré.

Les cycles d'alimentation verticale déficitaires ou excédentaires seront mis en évidence et corrélés avec les variations de la surface piézométrique. Les données de cette alimentation seront associées aux périmètres d'infiltration des différents systèmes aquifères.

2) L'analyse des écoulements souterrains et des écoulements totaux.

L'évaluation des débits d'écoulement souterrain et des débits d'écoulement total est faite en utilisant les données de l'alimentation verticale, les données de jaugeage des rivières et celle de l'infiltration (chapitre 2). Cette analyse permet de connaître la distribution géographique discrétisée des écoulements, de vérifier le bien-fondé des hypothèses de calcul de l'évapotranspiration ainsi que de mettre en évidence des anomalies de transfert entre le réseau hydrographique et la nappe ou entre divers bassins versants.

3) L'analyse des variations de la surface piézométrique.

L'analyse des variations de la surface piézométrique est tentée à la fois sur le plan qualitatif et sur le plan quantitatif (chapitre 3).

Aux données de base de l'analyse des écoulements, s'ajoutent les longueurs des lignes de courant hydraulique, la position du niveau de base, le coefficient d'emménagement, la perméabilité, la diffusivité, l'épaisseur du réservoir, les coefficients de transfert vertical et latéral.

Une corrélation entre les variations de la surface piézométrique et celles de l'alimentation par la pluie efficace est recherchée.

L'ajustement d'un cycle piézométrique inter-annuel calculé sur un cycle réel permet de démontrer la validité de la théorie et d'amélio-

rer les valeurs des paramètres hydrauliques du réservoir.

4) L'analyse des transferts hydrodynamiques.

L'analyse des transferts hydrodynamiques du système aquifère avec d'autres systèmes fait appel à l'interprétation des pompages d'essai (chapitre 4).

Le mécanisme des transferts entre deux systèmes aquifères ou de l'un d'entre eux avec le réseau hydrographique peut être démontré. L'évaluation des paramètres hydrauliques définissant l'aquifère va donc de pair avec l'estimation des paramètres caractérisant le type de transfert et le système associé.

5) L'analyse de la distribution géométrique des fissures.

L'analyse de la distribution géométrique des fissures hydrauliquement actives conduit au calcul du tenseur des perméabilités (chapitre 4). Il est nécessaire de connaître l'orientation, la fréquence d'apparition, le débit d'écoulement (lorsque ce dernier existe), la continuité et l'écartement des fissures d'un site donné. La connaissance du gradient hydraulique autorise le calcul des vitesses d'écoulement.

Une telle démarche entraîne une bonne compréhension de l'anisotropie des perméabilités et de ses relations avec l'orientation du réseau hydrographique. Il devient en outre possible de calculer les vitesses d'écoulement souterrain et de comparer les débits théoriques aux débits expérimentaux. Une ébauche de la cartographie régionale des perméabilités peut être, dans ce cadre, réalisée.

6) La diagraphie des vitesses d'écoulement.

L'examen, in situ du réservoir aquifère, par l'application de l'outil diagraphique en forage permet de valoriser des sites hydrogéologiques très différents au niveau de la circulation des eaux souterraines (chapitre 4). L'analyse de la répartition verticale des variations de la vitesse d'écoulement mène à la détection des zones perméables ou étanches et au calcul des perméabilités ainsi individualisées. Cette méthode permet en outre de préciser les épaisseurs des zones aquicludes et aquifuges. Elle conduit donc à préciser une des caractéristiques intrinsèques statiques de l'aquifère.

III. — QUELQUES RAPPELS THEORIQUES DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE DANS UN MATERIAU POREUX

Ces notions sont très classiques. Elles seront néanmoins présentées très brièvement et permettront au moins de préciser l'écriture des équations fondamentales utilisées.

La charge hydraulique ψ d'un fluide, en un point de l'écoulement, correspond à l'énergie de l'unité de poids du fluide. Cette énergie dépend de la position qu'occupe dans l'espace de l'écoulement l'élément de fluide considéré. La charge hydraulique ψ dépendra donc de repères x, y, z et s'écrira comme une fonction $\psi(x, y, z)$ définissant le champ de la charge hydraulique par l'intermédiaire de 3 scalaires exprimés par des dérivées partielles :

$$\frac{\delta\psi}{\delta x}, \frac{\delta\psi}{\delta y}, \frac{\delta\psi}{\delta z}.$$

Ces trois nombres peuvent également représenter les composantes d'un vecteur appelé « gradient de charge » ($\text{grad } \psi$). Il s'agit en fait d'une force agissant sur l'unité de poids d'un fluide perpendiculairement à des surfaces de charge constante (surfaces équipotentielles).

La vitesse de filtration d'un fluide dans un matériau poreux s'exprime de la façon suivante (loi de Darcy) :

$$(1) \quad \vec{V} = -K \text{ grad } \psi$$

avec K , le coefficient de Darcy ou coefficient de perméabilité $= k \gamma / \nu$, k , la perméabilité intrinsèque, γ , le poids spécifique de l'eau, ν , la viscosité cinématique de l'eau.

La connaissance de ψ (donc de ses dérivées) permet de déterminer en chaque point de l'aquifère au facteur k près les composantes de la vitesse de filtration et inversement le calcul d'un écoulement de filtration comportera toujours en premier lieu la recherche du champ de charge hydraulique. En régime permanent, ψ ne dépendra que de x, y et z .

A la loi de Darcy, il faut ajouter l'équation de continuité de Laplace qui traduit le comportement du liquide filtrant. Ainsi un volume élémentaire d'un aquifère poreux traversé par un liquide incompressible implique l'équivalence

entre la somme des débits entrants et celle des débits sortants.

L'équation de Laplace s'exprime par :

$$(2) \quad \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} = 0$$

Mathématiquement, une telle fonction est entièrement déterminée à l'intérieur d'un domaine de manière univoque si l'on se donne sur la frontière de ce domaine, soit les valeurs de ψ (condition de Dirichlet), soit les valeurs de $\delta\psi/\delta n$ ou dérivée normale à la frontière (condition de Neumann).

Un aquifère poreux anisotrope est caractérisé par trois valeurs de perméabilité principale : K_x , K_y et K_z . En associant les équations (1) et (2), il découle que :

$$(3) \quad \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta z^2} = 0$$

avec

$$\alpha = \frac{k}{k_x} x, \quad \beta = \frac{k}{k_y} y, \quad \gamma = \frac{k}{k_z} z,$$

k est un coefficient quelconque ayant les dimensions d'une perméabilité relative (163).

IV. — LES SIMULATIONS

A partir de la définition des éléments statiques et dynamiques du système aquifère, il devient possible, soit de simuler, soit de modéliser l'écoulement des eaux souterraines. La simulation analogique et la modélisation mathématique seront utilisées ici.

1) Les simulateurs analogiques.

Les lois de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux sont analogues aux lois qui régissent la distribution de l'électricité dans un conducteur. Des correspondances analogiques entre le domaine poreux et le domaine électrique permettent donc de résoudre le problème hydraulique (15, 17, 18, 19, 25, 26). Il suffit en effet de construire un modèle électrique de dimensions géométriques semblables à celles du domaine poreux et d'y imposer des conditions aux limites. Les grandeurs électriques mesurées sur le modèle analogique fournissent

une solution expérimentale aux problèmes hydrauliques.

Un système aquifère bidimensionnel peut être simulé par un conducteur, soit liquide (électrolyte dans une cuve dite rhéoélectrique), soit solide (plan de faible épaisseur). Pour des raisons de commodité, c'est ce type de conducteur, le papier télédeltos, qui a été choisi.

Les rapports d'analogie s'expriment par la formule suivante (25, 26) :

$$\frac{I}{Q} = \frac{\Delta v}{r_p \cdot T \cdot \Delta H}$$

avec I , l'intensité appliquée au conducteur, Q , le débit de la nappe, Δv , la différence de potentiel appliquée, ΔH , la différence de charge hydraulique au point d'extraction du débit Q , T , la transmissivité de la nappe et r_p , la résistance du papier.

ΔH et Q étant définis lorsque l'on étudie un cas réel de nappe, il est aisé d'exprimer la valeur de transmissivité T . L'épaisseur du réservoir aquifère étant connue, il est possible d'estimer la perméabilité K . Une telle simulation analogique électrique a été tentée sur la nappe des sables landéniens des Flandres franco-belges.

2) Les modèles mathématiques.

L'équation fondamentale de l'hydrodynamique en milieux poreux s'applique à de très nombreux modèles adaptés aux systèmes aquifères simples ou complexes conduisant à des solutions classiques. Les calculs réalisés grâce aux programmes informatiques peuvent être effectués, soit par la méthode des différences finies (43), soit par la méthode des éléments finis (12, 14). La surface géographique couverte par le modèle mathématique est découpée (ou *discrétisée*) en mailles élémentaires rectangulaires, carrées ou triangulaires.

L'équation du bilan des débits de l'écoulement bidimensionnel en milieu poreux dans le cas d'un régime transitoire et d'un aquifère homogène et isotrope (241) s'écrit :

$$(4) \quad \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\delta \psi}{\delta t}$$

avec S , le coefficient d'emmagasinement, T , la transmissivité, t , le temps et ψ , la charge hydraulique.

L'équation du bilan de l'écoulement modifié par un pompage de débit Q , dite de diffusivité (21) est la suivante :

$$(5) \quad \frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta y^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\delta \psi}{\delta t} + \frac{Q}{dx \cdot dy} \cdot \frac{1}{T}$$

La charge hydraulique ou hauteur piézométrique dépend ici du temps t et de sa position dans l'espace (donc de x et y dans le système bidimensionnel).

a) Application numérique.

Il existe deux types de méthodes numériques d'intégration de l'équation de diffusivité (21). Il s'agit, soit de la recherche de la valeur de H en quelques points limités sur un maillage que l'on se donne et à certaines périodes de temps, soit le développement en série de fonctions où la valeur de H sera calculée par approximations successives (méthode de Galerkin).

La résolution de l'équation fondamentale de l'écoulement peut entraîner des difficultés lorsque l'on s'adresse à des milieux hétérogènes, à surfaces géométriques complexes et possédant des limites de nature variée. La méthode des différences finies permet d'aboutir à une solution satisfaisante moyennant une certaine approximation dans les calculs et cela quel que soit le type d'équation aux dérivées partielles.

Pour un modèle à maillage carré, le bilan du débit de l'écoulement pour une maille donnée O , adjacente par ses côtés à quatre autres mailles (1, 2, 3 et 4), dans un aquifère hétérogène, en régime permanent et en adoptant une loi de composition harmonique des transmissivités, s'exprime par :

$$(6) \quad Q_0 = \sum_{i=1}^4 \frac{2 T_0 T_i}{T_i T_0} (H_i - H_0)$$

Un système linéaire de η équations à η inconnues est ainsi défini par l'ensemble des mailles du domaine discrétisé. La résolution de ce système nécessite le concours de méthodes itératives de calcul dont celles de Frankel-Young et de Gauss-seidel (11).

L'établissement du bilan pour chacune des mailles du modèle aboutit à la forme matricielle suivante :

$$(7) \quad ||T|| \cdot |H| = |Q'|$$

Avec $|Q'|$, le vecteur colonne où figurent les débits imposés et les conditions aux limites, $||T||$, la matrice des transmissivités et $|H|$, le vecteur colonne des charges piézométriques inconnues.

Le calcul du vecteur des charges inconnues consiste donc à inverser la matrice $||T||$ d'où :

$$(8) \quad |H| = ||T||^{-1} \cdot |Q'|$$

La résolution de cette équation montre une difficulté dépendant uniquement de la taille du système et du conditionnement de la matrice. Les valeurs calculées de la charge piézométrique sont ensuite confrontées aux valeurs expérimentales de terrain.

En régime transitoire, le problème est plus complexe car il faut discréditer en plus de l'espace, le temps (10, 12, 43, 48).

b) Application des équations fondamentales.

Il faut rechercher la fonction $H(x, y)$ à l'intérieur d'un domaine, sachant que $H(x, y)$ vérifie l'équation aux dérivées partielles suivantes :

— En régime permanent,

$$(9) \quad Q(x, y) = \frac{\delta(T(x, y) \cdot \delta H(x, y))}{\delta x} + \frac{\delta(T(x, y) \cdot \delta H(x, y))}{\delta y}$$

Si l'on désire travailler avec les perméabilités seules, il sera nécessaire de donner la cote du substratum (Z_s).

et $T(x, y) = K(x, y) \cdot [H(x, y) - Z_s(x, y)]$ pour une nappe libre.

— En régime transitoire,

$$(10) \quad S(x, y) \cdot \frac{\delta H(x, y, t)}{\delta t} + Q(x, y, t) = \frac{\delta(T(x, y) \cdot \delta H(x, y, t))}{\delta x} + \frac{\delta(T(x, y) \cdot \delta H(x, y, t))}{\delta y}$$

L'application des équations fondamentales précédentes par utilisation de la méthode des « différences finies » dans un milieu poreux monocouche à écoulement bidimensionnel répondant à des conditions de régime permanent ou de régime transitoire, a conduit Rousselot (32, 33, 34, 35, 36) à réaliser toute une série de programmes traitant successivement des écoulements dans les nappes hétérogènes suivantes :

— captives ou libres mais peu influencées par les pompages (programmes PC₁ et TC₁),

— libres pures sans possibilité de mise en charge ou de débordement (programmes PL₁ et TL₁),

— mixtes (libres et captives) sans possibilité de débordement (programmes PT₁ et TT₁),

— mixtes (libres et captives) avec possibilité de débordement (programmes PD₁ et TD₁).

Quelques-uns de ces programmes ont été utilisés, en particulier PC₁ et TD₁. Le détail de la programmation et la procédure de mise en œuvre sont consignés dans des notes techniques déposées au B.R.G.M. (*).

La simulation d'un écoulement parallèle, à limite amont à flux nul, pour un aquifère homogène a par ailleurs conduit au programme SIMERO (6) qui sera également utilisé (chapitre 3, § IV).

3) Limites du modèle de simulation d'une nappe d'eau souterraine.

Aux éléments statiques qui décrivent le réservoir aquifère que l'on se propose de modéliser s'ajoutent les éléments dynamiques. L'ensemble du système aquifère ainsi défini doit posséder une enveloppe — limite spatiale que l'on divise en un certain nombre de mailles.

L'enveloppe du système est constituée de plusieurs types de limites (fig. 3) régissant le flux des transferts hydrauliques ; il s'agit de :

— la limite à débit(**) sortant (—) qui regroupe les échanges entre bassins hydrogéologiques ainsi que les émergences des sources et des rivières,

(*) Bureau des Recherches Géologiques et Minières, Département Géologie de l'Aménagement, B.P. 6009, 45018 Orléans Cedex.

(**) Ces limites sont très souvent étanches (donc à flux nul).

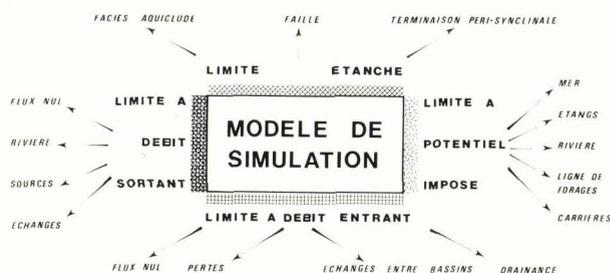


Fig. 3. — Les limites de l'enveloppe du modèle de simulation. Notons que la nature des limites peut être en liaison étroite avec les éléments dynamiques (fig. 2) et certains éléments statiques (fig. 1).

— la limite à débit(**) entrant (+) qui rassemble les échanges entre bassins hydrogéologiques, les pertes des canaux et des rivières ainsi que la drainance d'autres aquifères,

— la limite à potentiel imposé qui est représentée par les niveaux d'eau constants des canaux, des rivières, des étangs, de la mer, d'une ligne de forages et de carrières en dénoyage,

— la limite étanche qui peut être exprimée par l'existence d'une faille à grand rejet, une terminaison périsynclinale ou un changement de faciès latéral (aquifude ou aquiclude).

Le terme de *calage d'un modèle* désigne la succession des modifications apportées au niveau des paramètres hydrauliques du modèle lors de la vérification des hypothèses relatives aux transferts. Le modèle est dit *calé* lorsque la carte piézométrique réalisée à partir des valeurs de charge piézométrique, calculées par le programme ou restituées par le modèle analogique, est proche de la carte piézométrique élaborée à partir des données du terrain.

Le calage peut être effectué, soit dans le cas d'un régime permanent de la nappe (hautes eaux, étiage), soit dans le cas d'un régime transitoire pour lequel il est nécessaire de posséder les données historiques des débits et des fluctuations du niveau piézométrique.

V. — OPTIMISATION DES RESSOURCES EN EAU

A l'image de la recherche opérationnelle menée dans la plupart des secteurs économiques actuels, on se doit d'utiliser en hydrau-

lique souterraine une méthode de gestion optimale susceptible de pallier à l'insuffisance du bon sens face à la masse d'informations intervenant dans le cycle de l'eau d'une région donnée.

Les programmes linéaires classiques s'appliquent à une telle recherche opérationnelle en hydraulique souterraine (54, 70).

L'optimisation sera l'ensemble de la recherche des différentes valeurs des variables X_1, X_2, X_j, X_n , paramètres du système aquifère considéré, valeurs devant :

— d'une part, satisfaire simultanément à un certain nombre de *contraintes*,

— d'autre part rendre *optimale* (c'est-à-dire soit maximale, soit minimale) une *fonction-objectif*.

L'ensemble des éléments statiques et dynamiques d'un système aquifère a été introduit dans un modèle, représentation que l'on veut la plus fidèle possible du domaine réel. En faisant appel à l'historique de ces éléments, il devient possible, si l'on se définit par exemple un besoin à venir en eau, de réaliser une recherche optimale. En terme de gestion de l'eau, on trouve bien évidemment l'aspect économique tel que le coût des forages et de la distribution, le prix de vente de l'eau elle-même, etc... (52 à 60, 65 à 70).

L'*objectif* pouvant intervenir dans une recherche opérationnelle peut être donc très varié : débit, rabattement, coût, etc... Il s'agit d'une fonction. Les *variables* auxquelles on assigne certaines valeurs permettent d'atteindre l'*objectif* alors que les *contraintes* sont les valeurs-limites de ces variables. Elles seront toutes, dans le cas présent, égales ou supérieures à zéro.

L'optimisation d'une fonction-objectif intéressant un système aquifère peut, par exemple, revêtir deux aspects :

1° *La maximisation* du débit global d'exploitation d'un aquifère. Les *contraintes* peuvent être :

- un maximum des rabattements admissibles,
- un maximum des débits unitaires des ouvrages de captage,

— une limite maximale des dépenses d'investissement,

— une limite maximale aux crédits de fonctionnement ;

2° *La minimisation* des crédits d'investissement. Les *contraintes* possibles peuvent être :

— des rabattements imposés en divers points de la nappe,

— des débits limités sur les ouvrages de captage.

Pour résoudre un problème d'optimisation, on peut mettre en œuvre plusieurs types de méthodes. On retiendra ici une méthode algébrique dite *algorithme du simplexe* (62) ou *méthode simpliciale*. La méthode simplexe est algébrique : elle propose d'abord des valeurs initiales aux variables. Elle permet ensuite la recherche, *pas à pas*, de valeurs améliorées pour les amener aux valeurs les plus adaptées à l'optimisation souhaitée de la fonction-objectif.

L'optimisation des ressources en eau du Nord de la France (chapitre 6) a été opérée en utilisant la programmation linéaire sous forme de programmes opérationnels pouvant être branchés sur un modèle préalablement calé.

Les programmes PROLI et OPPER utilisés ici ont été écrits et adaptés aux eaux souterraines par Vandenbeusch (72, 73). Le programme PROLI (73) calcule le maximum ou le minimum d'une fonction-objectif dans laquelle chacune des variables peut être modulée par un coefficient constant. La limite des contraintes peut être, soit un maximum, soit un minimum ou encore une valeur définie à atteindre. Il permet la résolution de problèmes comportant au maximum 50 variables et 50 contraintes. Le programme OPPER (74) permet de définir les implantations optimales des captages compte tenu de contraintes sur les rabattements admissibles en divers points (maille contrôle) d'une nappe. Une modélisation préalable en régime permanent (les débits et les rabattements sont liés par des relations linéaires dans ce cas) de la nappe est nécessaire.

L'influence de chaque captage est représentée par une relation :

$$\Delta_j = S_{i,j} \cdot Q_i$$

où Δ_j est le rabattement réel à l'emplacement j ; $S_{i,j}$, le rabattement unitaire à l'emplacement j provoqué par pompage à débit unité sur l'emplacement i ; Q_i , le débit prélevé à l'emplacement i .

Ce programme OPPER effectue donc :

— le calcul des différents rabattements « contraintes » aux puits de contrôle en suppo-

sant un débit unitaire sur chaque emplacement de captage envisagé,

— la résolution du problème d'optimisation des captages par détermination du débit prélevable compte tenu des contraintes de rabattement,

— la simulation de l'exploitation optimale déterminée.

————— « » —————

CHAPITRE DEUXIEME

Traitement et utilisation des données climatologiques et hydrologiques

L'évaluation des débits d'écoulement souterrain dépend de celle de l'alimentation verticale dont les données relèvent de la climatologie, de l'infiltration et de l'hydrométrie. Le phénomène de l'évapotranspiration, qui allie la transpiration des plantes et l'évaporation physique (75, 95, 93, 296), constitue un élément perturbateur minorant la quantité d'eau issue des précipitations. L'oblitération ainsi réalisée sur la tranche d'eau pouvant s'infiltrer dans le sous-sol est assujettie aux fluctuations de facteurs thermiques tels que la température et la durée d'insolation et tient compte de l'humidité relative de l'air. *L'évapotranspiration* fait intervenir de tels facteurs correctifs en totalité ou en partie dans les diverses hypothèses utilisées (96, 97).

L'analyse des mesures hydrométriques réalisées sur les rivières et les canaux rend compte, elle, du stade de vidange du réservoir aquifère et de l'ampleur du ruissellement qui se surimpose au débit des nappes. Le ruissellement représente un élément perturbateur non négligeable qu'il faudra estimer à partir des hydrogrammes. L'extension géographique prédominante des affleurements crayeux dans la majorité des bassins du Nord de la France nous mène à nous intéresser à l'aquifère crayeux.

Après une présentation statistique sommaire des données de base, une synthèse des valeurs climatologiques et hydrologiques est proposée dans le cadre des bassins de l'Artois et de l'Escaut afin d'aboutir à une cartographie des écoulements souterrains.

I. — LES PRECIPITATIONS

Le terme de « précipitations » englobe les eaux météoriques qui atteignent la surface du sol, soit à l'état solide (neige, grêle), soit à l'état liquide (pluie). Les précipitations sont évaluées par des pluviomètres répartis régionalement au niveau de stations de mesure manuelle ou automatique.

1) Le réseau de mesures et la collecte des données.

Dans la région du Nord de la France, le Service Hydrologique Centralisateur (S.H.C.), en liaison avec d'autres organismes (Météorologie Nationale, Service Géologique Régional du B.R.G.M., Protection des Végétaux et Union des Industries Agricoles), procède à la collecte des données pluviométriques. En 1974, on dénombre pour les trois départements du Nord, Pas-de-Calais et de la Somme, deux cent huit stations pluviométriques équipées soit d'un pluviomètre à lecture visuelle, soit d'un pluviographe (enregistreur), ou soit des deux à la fois (fig. 4).

2) Distribution spatiale des précipitations (fig. 5).

L'examen des cartes en courbes isohyètes établies régulièrement par le S.H.C. depuis 1962 conduit à distinguer trois régions à pluviosité forte :

— l'interfluve Liane-Hem-Lys et Canche sur l'axe Desvres-Fruges où la moyenne des précipitations interannuelles dépasse 950 mm ;

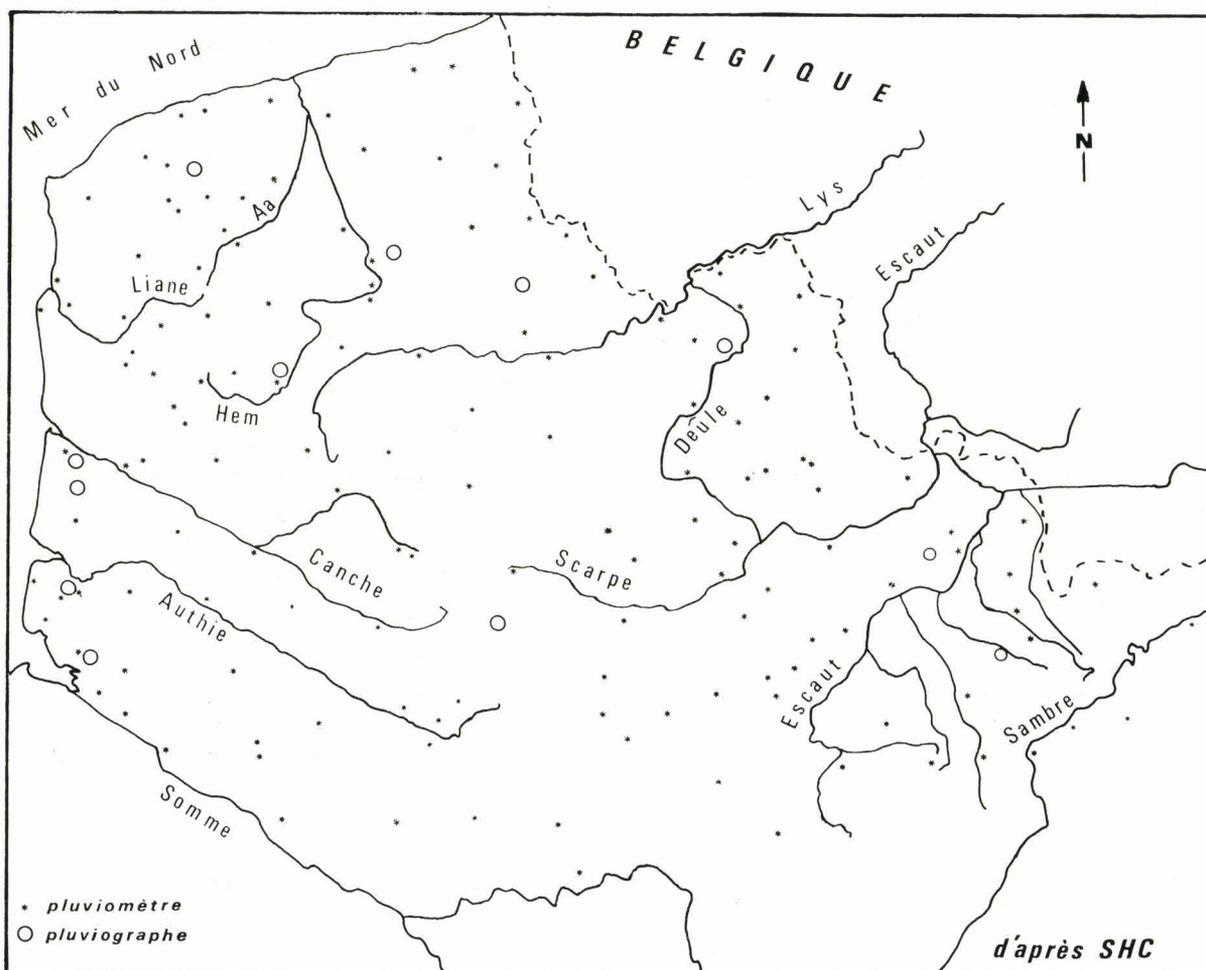


Fig. 4. — Distribution géographique des stations climatiques dans la région du Nord (d'après un document du Service Hydrologique Centralisateur).

— une région englobant la précédente et s'étendant sur les bassins de l'Authie, de la Canche, de la Haute Lys, de la Haute Aa, de la Haute Hem et de la Liane avec une moyenne interannuelle supérieure à 800 mm ;

— le bassin de la Sambre et de ses affluents avec plus de 800 mm.

Les bassins de la Sambre et de l'Artois enregistrent ainsi les plus fortes précipitations. En bordure de la côte, les pluviosités sont très faibles et s'accroissent très rapidement dès que l'on pénètre à l'intérieur des terres. Cet accroissement coïncide avec la dénivelée topographique brutale existant entre la frange bordière

d'altitude + 5 à + 20 NGF et le plateau crayeux de l'Artois (altitude moyenne de + 125 m NGF).

Il faut signaler en outre l'influence des vents à dominante SW-NE qui, provoquant un déplacement des pluies au-dessus de l'Artois, sont la cause dans la zone de passage de l'Artois aux Flandres, d'une forte pluviosité dans les régions d'altitude pourtant basse.

Quelques secteurs d'extension très limitée montrent des valeurs de pluviosité forte : les Monts des Flandres, Mons-en-Pévèle.

L'examen statistique des données indique qu'il n'existe aucune corrélation significative

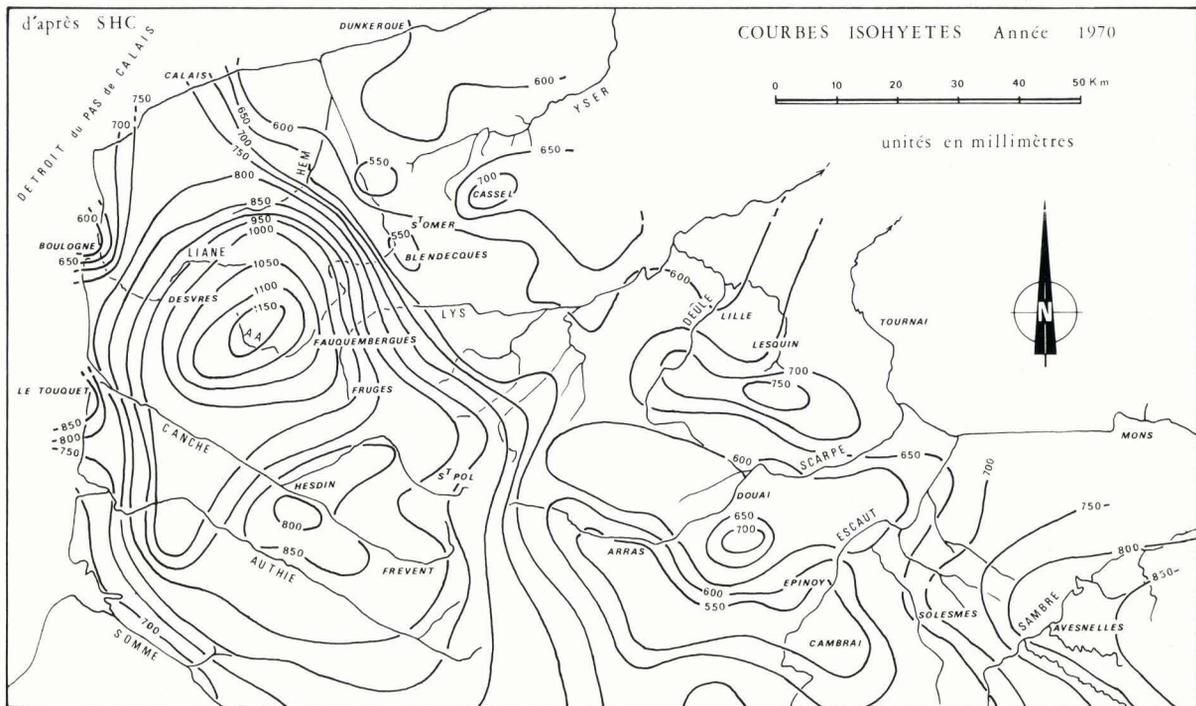


Fig. 5. — Courbes isohyètes établies pour l'année 1970 dans la région du Nord (d'après un document du Service Hydrologique Centralisateur).

entre les données altimétriques et pluviométriques lorsque l'on considère la totalité des stations pluviométriques. Par exemple, en 1974, les 145 stations du Nord et du Pas-de-Calais permettent d'établir un coefficient de corrélation de 0,36. En répétant ces calculs et en ne gardant que les bassins de l'Escaut et de la Sambre, l'amélioration reste très faible ($r = 0,46$ à $0,52$). En restreignant l'examen à une dizaine de stations prises approximativement sur une ligne à altitude croissante, on aboutit à un coefficient « r » proche de 0,80. Ce dernier type d'analyse orientée n'est malheureusement pas du tout significatif statistiquement.

Les résultats a priori anormaux du coefficient de corrélation sont dus à l'effet de relief. En effet, une station pluviométrique située à basse altitude peut, en raison de son implantation au cœur d'un plateau très arrosé, enregistrer une forte précipitation annuelle. De ce fait, nous abandonnons le calcul du coefficient de corrélation pour procéder à un découpage par grandes zones géographiques à relief bien

tranché. Les petites vallées et les dépressions trop localisées sont ainsi négligées.

Ainsi, en établissant trois zones :

- une zone A d'altitude supérieure à 120 m NGF,
- une zone B d'altitude comprise entre 60 et 120 m NGF,
- une zone C d'altitude inférieure à 60 m NGF,

nous évaluons alors des moyennes arithmétiques de précipitation apparaissant significatives vis-à-vis de l'altitude.

Dans le tableau I, nous n'avons reporté que les éléments relatifs à quatre années à pluviosité variable vérifiant cette hypothèse. Les moyennes des précipitations pour chacune des trois zones définies sont bien distinctes, en particulier lors des années très pluvieuses où les écarts moyens atteignent plus de 120 mm entre chaque zone. Il faut noter que l'écart est bien plus net entre la zone A et la zone B qu'entre cette dernière et la zone C.

ANNEE	ZONES GEO							
	A		B		C		ECARTS MOYENS	
	Altitude > 120 m NGF		120 < Altitude < 60 m NGF		0 < Altitude < 60 m NGF		(A-C)/2	B-C
MOY	662 mm	562 mm	523 mm	70 mm	39 mm			
1963 : MIN	506	463	432	37	31			
MAX	790	671	653	68	18			
n	30	38	29					
MOY	794	618	557	118	61			
1966 : MIN	675	515	405	135	110			
MAX	957	749	786	85	37			
n	14	24	25					
MOY	1 107	878	796	155	84			
1968 : MIN	870	661	650	110	11			
MAX	1 557	1 235	912	322	323			
n	22	33	26					
MOY	957	771	711	123	60			
1971 : MIN	764	612	566	101	46			
MAX	1 152	948	807	172	141			
n	20	33	21					

Tableau I. — Variation de la pluviométrie en fonction de l'altitude pour quelques années choisies au hasard. MOY = Moyenne ; MIN = Minimum ; MAX = Maximum ; n = nombre de stations.

II. — INSOLATION, TEMPERATURE DE L'AIR ET HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR

La durée d'insolation, la température et l'humidité relative de l'air interviennent dans l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (97) qui sera soustraite aux précipitations brutes. Ces données physiques sont essentielles pour le calcul du taux d'infiltration de l'eau vers la nappe.

Dans la région du Nord de la France, cinq stations de Météorologie Nationale [Dunkerque, Boulogne-sur-Mer, Abbeville, Lille (Lesquin) et Saint-Quentin] fournissent journallement les évolutions de la durée d'insolation et de la température de l'air sous abri. Une vingtaine d'autres stations réparties sur les deux départements du Nord et du Pas-de-Calais complètent le réseau de surveillance thermométrique régional.

1) L'insolation.

Le temps d'exposition au rayonnement solaire ou insolation rend compte de la radiation globale solaire mesurée au sol et intervient dans

le calcul de l'évapotranspiration potentielle. La durée d'insolation, exprimée en heures, reste de manière générale relativement courte de novembre à février et forte de mai à août. Ainsi, à la station de Lille-Lesquin où cette moyenne a été calculée sur l'intervalle 1962-1974, on enregistre 41 heures d'insolation pour le mois de décembre et 209 heures pour le mois de juin. A la station du Touquet en bordure de la côte, la durée d'insolation est supérieure à celle de Lille, la moyenne interannuelle atteignant respectivement 46 et 232 heures.

2) La température de l'air.

La température de l'air sous abri intervient aussi dans l'estimation de l'évapotranspiration. Dans la région du Nord, les écarts de température restent très faibles, cependant la zone littorale bénéficie d'une température légèrement supérieure. Ainsi, à la station de Boulogne-sur-Mer, on enregistre une moyenne interannuelle 1964-1974 de 10°C alors qu'à l'intérieur des terres, à Lesquin, elle n'atteint que 9,4°C. On notera des températures plus fortes en été et plus basses en hiver à l'intérieur des terres par rapport à la région côtière qui bénéficie de l'influence des masses océaniques à température plus élevée en hiver et plus basse en été.

3) L'humidité relative de l'air.

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de valeur saturante à la même température. Ce paramètre intervient comme coefficient de correction de l'évapotranspiration lorsqu'il est inférieur à 50 %.

Les valeurs moyennes de l'humidité relative dépassent toujours 80 % en bordure de côte. Elles restent supérieures à 75 % à l'intérieur des terres.

En bordure de mer, l'effet régulateur des masses océaniques provoque une homogénéisation durant l'année des valeurs alors que, dans la région lilloise, les hivers sont très humides (85 à 90 %) et les étés beaucoup plus secs (75 %).

III. — EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration, encore appelée « déficit d'écoulement », correspond à la somme de la quantité d'eau évaporée par suite d'un déficit hygrométrique de l'air et de la quantité d'eau transpirée par la végétation. L'évapotranspiration a pu être mise en évidence par comparaison du débit d'écoulement des rivières et du volume des précipitations recueillies par un bassin versant (97) mais aussi par étude de l'infiltration dans des cases lysimétriques (96, 97). De nombreuses formules de l'évaluation de l'évapotranspiration ont été proposées (63, 240). Elles reposent sur des hypothèses de calcul nécessitant la connaissance, en partie ou en totalité, des valeurs de la température, des précipitations (96), d'humidité relative de l'air et de l'insolation (97).

Les données disponibles dans la région du Nord conduisent à utiliser les hypothèses de Thornthwaite et de Turc qui ont fait l'objet de programmes opérationnels sur ordinateur [programmes BILHY (76) et TURBI (87)].

La comparaison de l'évapotranspiration potentielle ETP avec les précipitations P, compte tenu d'une réserve d'eau facilement utilisable RFU dans le sol superficiel fixé à 100 mm au maximum, entraîne le déroulement du mécanisme suivant (96, 97) :

— Si $ETP = P$, il y a existence d'une évapotranspiration réelle ETR, la réserve RFU

ne se modifie pas et aucune infiltration ne se produit en direction de la nappe.

— Si $ETP > P$, un déficit apparaît, une partie de la réserve RFU sera sollicitée jusqu'à la compensation de ETP. L'évaporation agit donc sur le sol. Aucune infiltration ne se produit en direction de la nappe.

— Si $ETP < P$, l'évapotranspiration réelle est bien égale à ETP et un excédent apparaît, entraînant une infiltration vers la nappe à la seule condition que la réserve RFU soit au préalable entièrement reconstituée à son taux maximal de 100 mm. Nous obtenons ainsi une suite discontinue et irrégulière de valeurs d'excédent correspondant à des taux de *pluie efficace* qui alimente effectivement la nappe d'eau souterraine sur un intervalle de temps donné.

A l'aide de la moyenne intermensuelle de l'excédent \bar{E} , il est possible de calculer l'écart à la moyenne cumulée B_i du bilan mensuel pour une période interannuelle comprenant un nombre déterminé de mois :

$$B_i = E_i - \bar{E}$$

i : correspond au mois considéré dans le calcul

E_i : excédent mensuel.

Nous obtenons ainsi un graphique de l'évolution pondérée de l'infiltration théorique dans la nappe comparable, à un coefficient d'échelle près, aux cycles de l'évolution piézométrique. Par ailleurs, les estimations de l'excédent sont nécessaires à l'évaluation de l'alimentation des aquifères et seront notamment prises en compte dans la modélisation. Seront successivement examinés l'évolution des excédents mensuels et les écarts à la moyenne cumulée du bilan mensuel selon la formule de Thornthwaite qui a pu être appliquée à une cinquantaine de stations, alors que celle de Turc ne l'a été que pour cinq stations.

1) Evolution des excédents mensuels.

Seize stations pluviométriques et sept stations thermométriques réparties uniformément sur l'ensemble de la région du Nord ont été sélectionnées (tabl. I). Les chroniques climatologiques ne sont pas toujours complètes. Parmi les plus longues, il faut citer celles des stations de Frévent (depuis 1931) et de Lesquin (depuis 1945).

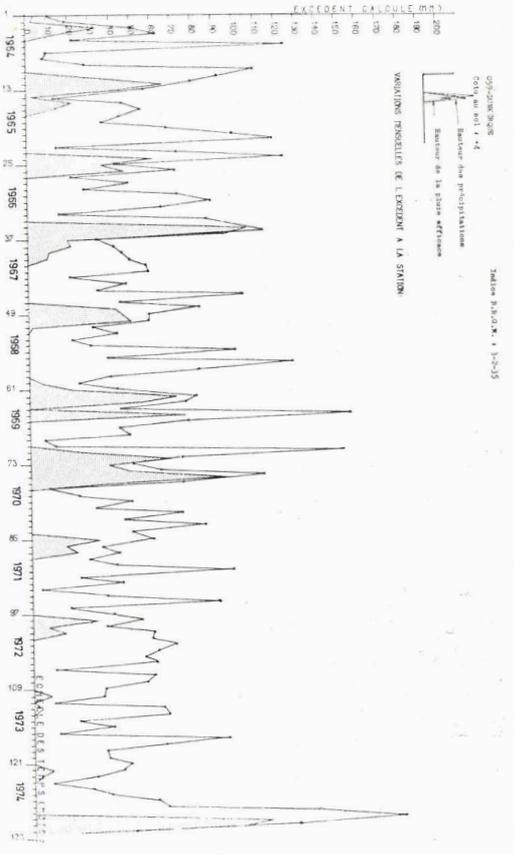


Fig. 6

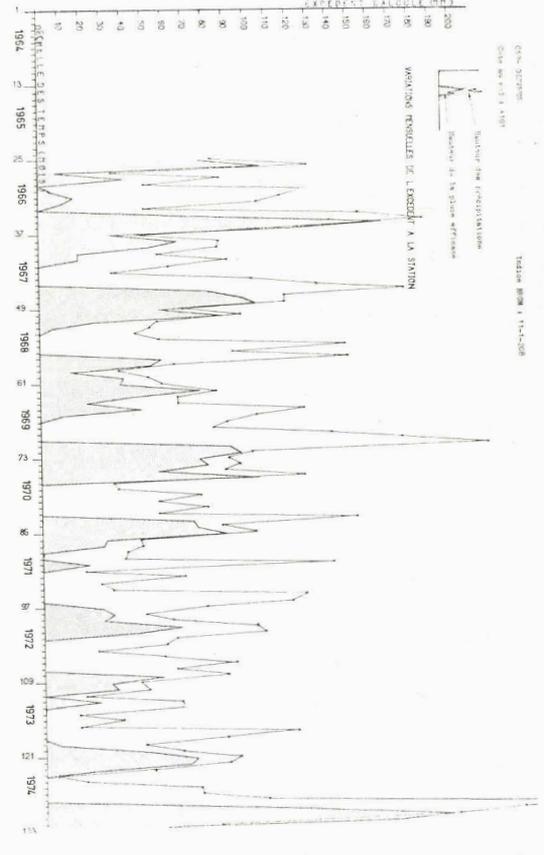


Fig. 7

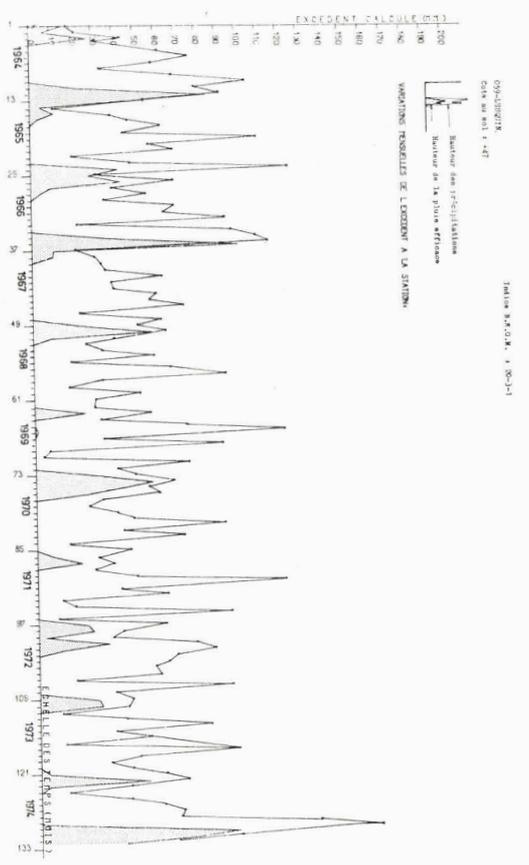


Fig. 8

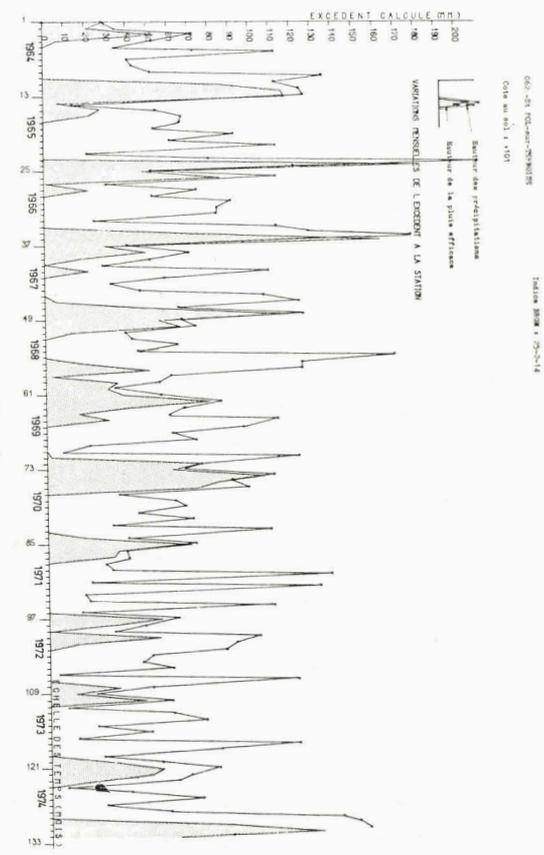


Fig. 9

Fig. 6 à 11. — Evolution mensuelle de la pluie efficace aux stations de Dunkerque, Desvres, Lesquin, Saint-Pol-sur-Ternoise, Epinoy et Avesnelles. (Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M. 76 SGN 123 NPA).

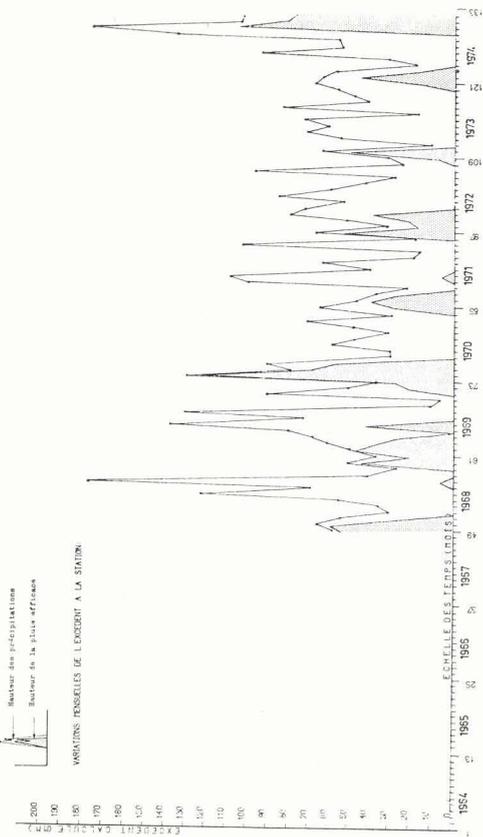


Fig. 11

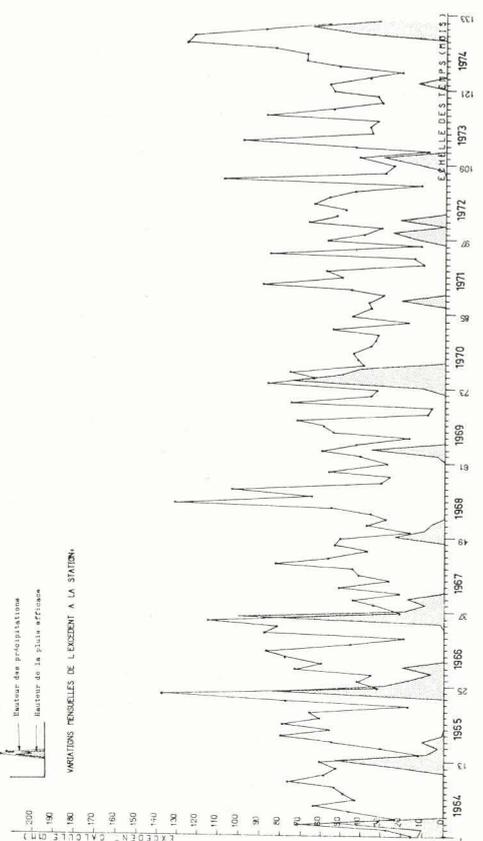


Fig. 10

La comparaison des variations des hauteurs de précipitation et des fluctuations des excédents pour six stations représentatives sur le plan régional (fig. 6 à 11) conduit à remarquer le grand décalage existant entre les deux séries. Cela signifie que pendant des périodes de plusieurs mois, voire une année entière, il n'existe aucune infiltration susceptible d'alimenter les nappes d'eau souterraines. Signalons les périodes particulièrement sévères où l'alimentation fut nulle, ainsi à Frévent, de juin 1972 à novembre 1973 ; Lesquin, de juillet 1948 à décembre 1949 et de mars 1953 à janvier 1955 ; et Douai, de mars 1973 à octobre 1974.

A ces constatations, il faut ajouter celles relatives aux recharges qui peuvent être particulièrement importantes (tabl. II), comme c'est le cas pour les trois derniers mois de l'année 1974, où les précipitations furent particulièrement abondantes (100 mm/mois en moyenne). D'autres périodes, à forte recharge, sont mises en évidence à Frévent de novembre 1936 à mai 1937 avec 518 mm (74 mm/mois), à Fruges de novembre 1969 à avril 1970 avec 624 mm (102 mm/mois) et à Desvres de juin 1966 à mai 1967 avec 587 mm (53 mm/mois).

Le mode de calcul de l'excédent mensuel introduit une liaison automatique de ce dernier avec le taux des précipitations. Les secteurs à alimentation verticale forte seront ainsi localisés aux régions d'altitude élevée. Nous pouvons pour l'ensemble des stations choisies, remarquer des variations interannuelles de cette alimentation.

Ainsi, pour la période s'étendant de 1964 à 1974 (fig. 6 à 11), quatre épisodes d'alimentation peuvent être mis en évidence et regroupés en deux ensembles :

- l'année 1964 et les années 1971 à 1974 sont marquées par de faibles précipitations d'automne et d'hiver et sont déficitaires pour l'alimentation des nappes ;

- les années 1965 à 1970 et la fin de l'année 1974 furent, par contre, très pluvieuses et sont caractérisées par une forte alimentation des nappes.

2) Evolution de l'écart à la moyenne cumulée du bilan.

Treize graphiques interannuels de l'écart à la moyenne cumulée du bilan ont été réalisés afin de suivre l'évolution relative des infiltrations.

STATIONS DE SURVEILLANCE		PERIODE INTERANNUELLE ENVISAGEE	VALEUR DE L'EXCEDENT MENSUEL				
Pluviométrique	Thermométrique		Moyen sur la période interannuelle totale en mm	Minimum cumulé	sur la période	Maximum cumulé	sur la période
DUNKERQUE	DUNKERQUE	1964 - 1974	12,94	12	2/74- 3/74	314	11/69- 5/70
BOULOGNE	BOULOGNE	1964 - 1974	11,72	20	2/74- 3/74	295	9/74
LE TOUQUET	LE TOUQUET	1964 - 1974	20,09	82	1/73- 5/73	384	11/69- 4/70
DESVRES	BOULOGNE	1966 - 1974	33,86	153	12/72- 4/73	587	6/66- 5/67
HESDIN	ST-POL	1965 - 1974	25,80	135	12/73- 2/74	455	11/69- 4/70
FREVENT	ST-POL	1931 - 1974	22,60	0	6/72-11/73	518	11/36- 5/37
ST-POL	ST-POL	1964 - 1974	23,18	93	12/72- 2/73	399	11/69- 4/70
FRUGES	ST-POL	1962 - 1974	33,22	207	11/62- 6/63	614	11/69- 4/70
FAUQUEMBERGUES	ST-POL	1966 - 1974	29,20	135	12/72- 5/73	491	11/66- 5/67
BLENDÉCQUES	ST-POL	1965 - 1974	12,41	11	4/73	307	11/69- 4/70
BETHUNE	ST-POL	1963 - 1974	11,52	10	2/74- 3/74	283	12/69- 4/70
LESQUIN	LESQUIN	1945 - 1974	7,46	0	7/48-12/49 3/53- 1/55	227	12/51- 3/52
DOUAI	EPINOY	1970 - 1974	4,89	0	3/73-10/74	181	1/70- 4/70
EPINOY	EPINOY	1964 - 1974	7,63	13	2/74	177	1/70- 4/70
SOLESMES	EPINOY	1962 - 1974	11,47	0	5/72- 1/74	281	11/65- 4/66
AVESNELLES	MAROILLES	1968 - 1974	15,37	58	1/73- 2/73	298	12/69- 4/70

Tableau II. — Liste des stations thermométriques et pluviométriques qui ont fourni les éléments nécessaires au calcul des excédents.

Le mode de calcul introduit des séries de données, à indice négatif, qui correspondent à des périodes « déficitaires » vis-à-vis de séries de données à indice positif « excédentaire ». Malgré une certaine hétérogénéité de la longueur des cycles, nous tenterons une analyse.

Pour le secteur de Frévent (fig. 12), on remarque :

— des périodes à alimentation « déficitaire » de 1933 à 1936, de 1943 à 1951, de 1955 à 1965 et enfin de 1973 à 1974 ;

— des périodes à alimentation « excédentaire » de 1931 à 1932, de 1937 à 1943, de 1952 à 1953 et de 1966 à 1972 ;

— un cycle de fluctuation décennale.

Pour le secteur de Lesquin (fig. 13), seule la période s'étendant de 1952 à 1956 est excédentaire. On note des cycles comparables à ceux de Frévent avec beaucoup moins d'amplitude.

Pour les secteurs de St-Pol, Hesdin, Fruges et Fauquembergues (fig. 15), les courbes de variation apparaissent homothétiques et toutes comparables pour la période concernée à celle établie à Frévent. On remarquera la chute constante des alimentations à partir de 1971.

Pour les secteurs situés dans la zone littorale Dunkerque, Boulogne, Le Touquet et Desvres (fig. 14), c'est la station de Boulogne qui présente la plus longue période déficitaire de 1964 à 1969. Aucune alimentation n'apparaît entre 1973 et 1974 pour les stations de Dunkerque et de Boulogne.

Les secteurs d'Epinoxy et de Solesmes (fig. 16) se caractérisent par une longue période excédentaire de 1966 à 1972, puis par une décroissance régulière à partir de 1970.

Les années 1963 et 1964 possèdent des alimentations faibles et même déficitaires (cas de Solesmes).

L'ensemble des treize graphiques d'évolution de l'écart cumulé montre systématiquement l'accroissement brutal des alimentations en automne 1974 consécutives aux précipitations exceptionnelles qui ont affecté la région du Nord. Nous examinerons dans le troisième chapitre les fluctuations piézométriques et leur relation avec les variations de l'excédent.

IV. — HYDROLOGIE DE SURFACE

Le Service Hydrologie Centralisateur de Lille publie chaque année les renseignements hydro-métriques issus du jaugeage des rivières des

STATION DE FREVENT

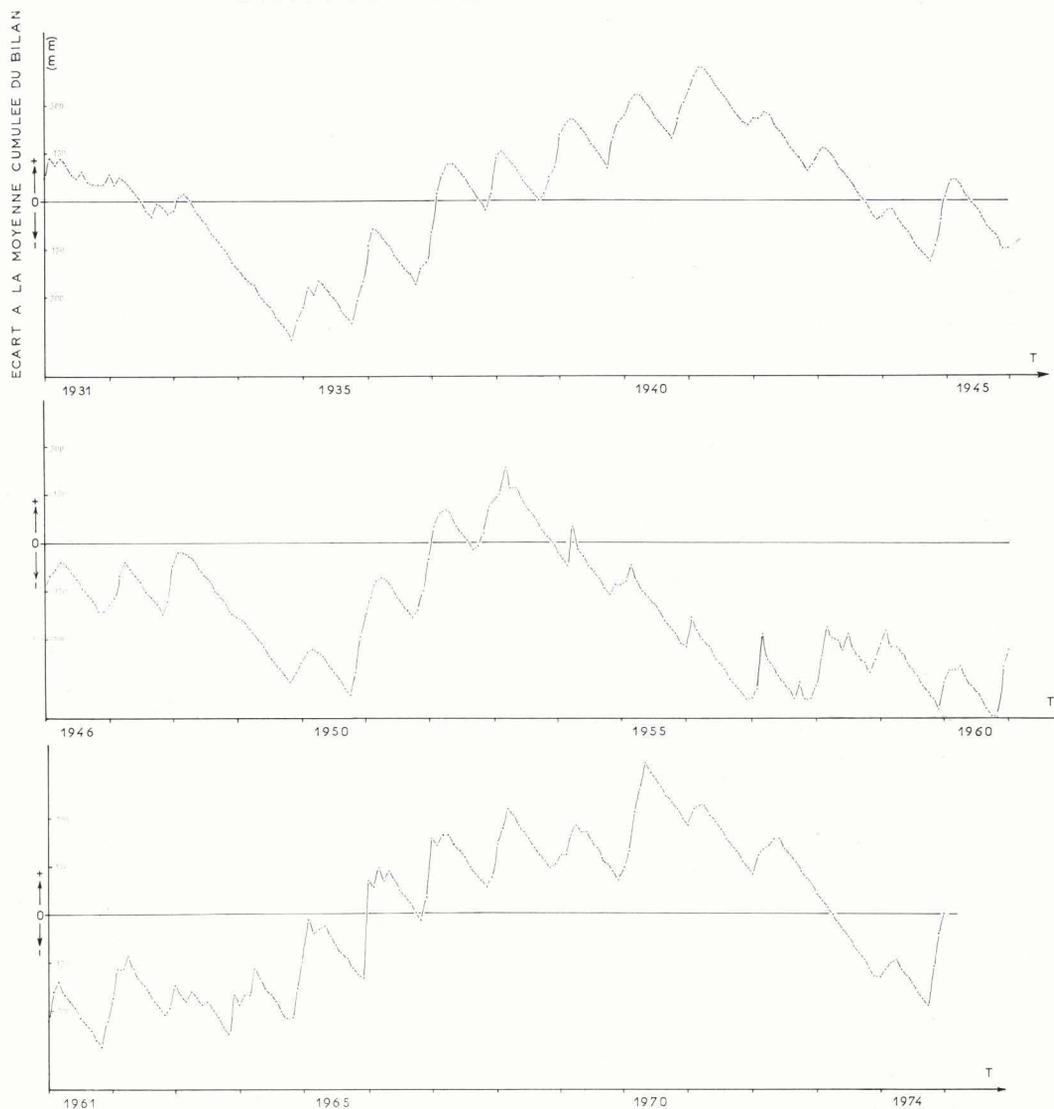


Fig. 12. — Graphique de l'évolution interannuelle (1931-1974) des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan à la station de Frévent (P.-de-C.).

cing départements de la Somme, de l'Aisne, du Pas-de-Calais et du Nord. Ces mesures sont effectuées par plusieurs organismes : le SGR-B.R.G.M., la Première Circonscription Electrique et le S.H.C. Les buts de cette surveillance sont très divers : aménagement des voies navigables, transferts d'eau entre vallées, étude des crues, recherche de sites de barrage, interférence entre les nappes et les eaux de rivière et pollutions.

Dans les bassins crayeux non perturbés par l'activité humaine, les rivières sont en général l'expression de la vidange de la nappe de la craie à laquelle se juxtaposent les débits de ruissellement (sur les terrains argilo-sableux du Tertiaire et marneux du Turonien et du Céno-manien). Quelques relevés de jaugeage ont été effectués au niveau de stations situées à l'exutoire des bassins versants crayeux de l'Artois, du Haut et Bas-Escaut et permettent de tracer des courbes de débit (75, 93, 98).

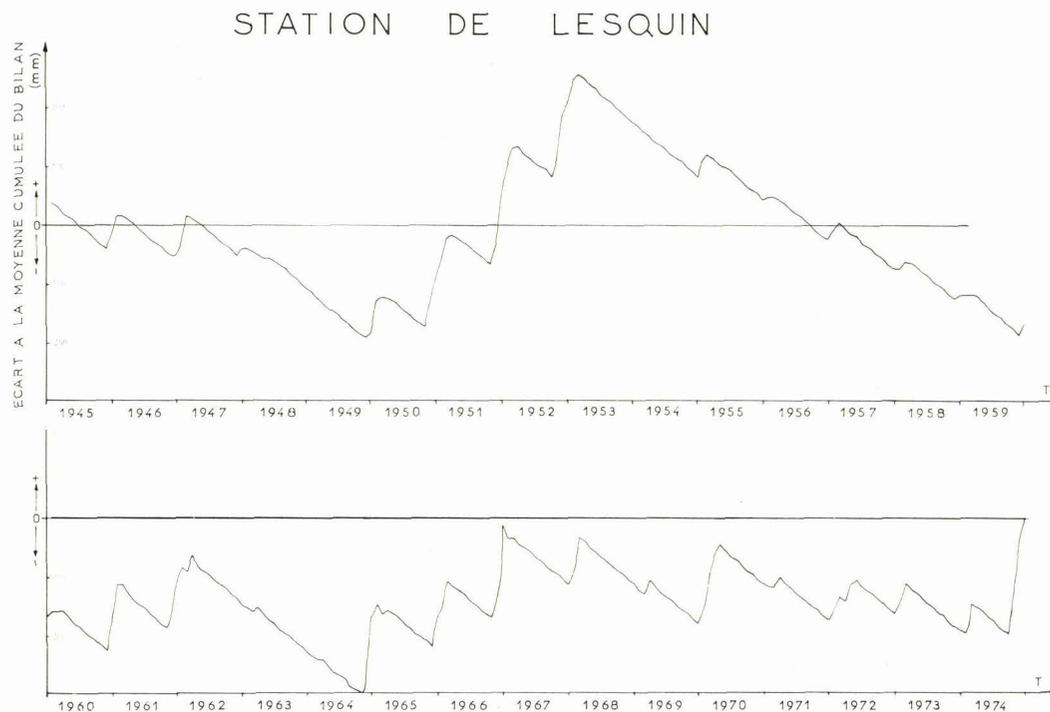


Fig. 13. — Graphique de l'évolution interannuelle (1945-1974) des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan à la station de Lesquin (Nord).

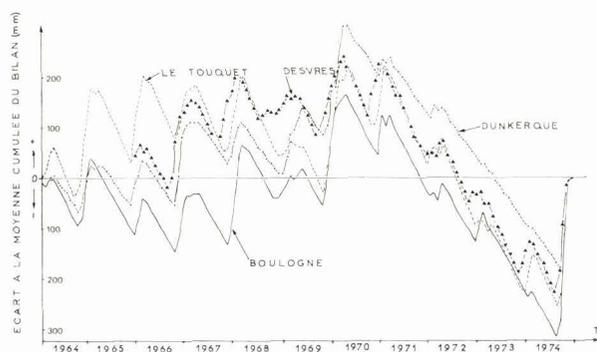


Fig. 14. — Graphique de l'évolution interannuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations de Boulogne (1964-1974), du Touquet (1964-1974), de Dunkerque (1964-1974) et de Desvres (1966-1974).

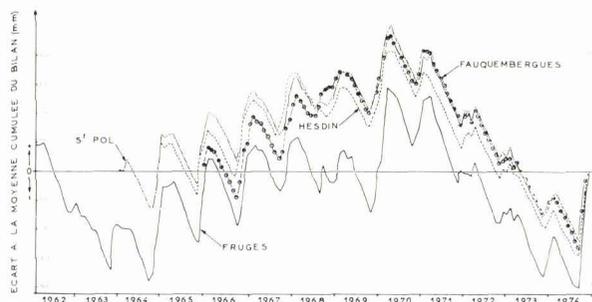


Fig. 15. — Graphique de l'évolution interannuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations de Fruges (1962-1974), d'Hesdin (1965-1974), de Fauquembergues (1966-1974) et de Saint Pol (1964-1974).

1) Les rivières de l'Artois.

Du Sud vers le Nord, nous distinguons les bassins de l'Authie, de la Canche, de la Lawe, de la Clarence, de la Lys, de l'Aa et de la Hem. La Liane, qui draine à la fois les terrains crayeux et jurassiques, ne sera pas prise en compte ici ; cependant, les hydrogrammes de cette rivière

seront utilisés dans le chapitre 6 (optimisation conjointe des eaux souterraines et de surface).

Le débit de base et le débit de ruissellement s'additionnent pour constituer le débit total au débit effectif de la rivière (75, 95, 93, 296). Le débit de base représente l'apport des eaux de la nappe drainée à la rivière. Cet apport varie

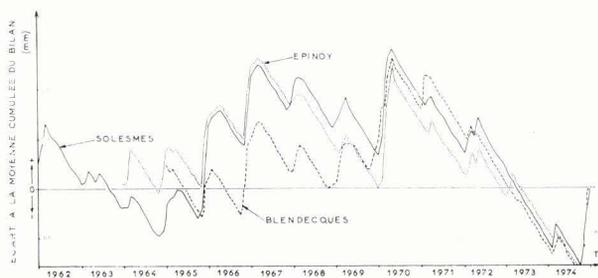


Fig. 16. — Graphique de l'évolution interannuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations d'Épinoxy (1964-1974), de Solesmes (1962-1974), de Blendecques (1965-1974).

saisonnièrement en raison des cycles piézométriques des eaux souterraines, il sera ainsi important au printemps et faible en automne.

Le débit de ruissellement, lui, en s'ajoutant au débit de base, provoque l'apparition de « pics » sur les hydrogrammes. Il est lié aux eaux de précipitation qui ne sont ni infiltrées, ni utilisées par la végétation. Ces eaux se concentrent très rapidement dans le réseau hydrographique.

Il est très malaisé de distinguer à partir d'un hydrogramme unitaire le débit de base et le débit de ruissellement et de multiples résolutions graphiques ont été proposées (92). Il apparaît que seule la méthode du lissage est adéquate pour déterminer le débit de base dans notre région en raison de l'étalement des pluies qui perturbent constamment le tarissement. Cette méthode, mise en œuvre en Picardie (94), a été utilisée pour la totalité des hydrogrammes des rivières de pays crayeux du Nord de la France.

Pour les rivières les plus importantes de l'Artois, les remarques suivantes s'imposent :

- la période d'étiage se manifeste entre le mois d'août et celui d'octobre,
- la période de hautes eaux s'étend de la mi-janvier à mai,
- des apports brutaux de débit (pics) témoignent de l'arrivée d'eaux de ruissellement.

Le tableau III donne les valeurs en pourcentage du débit de base des rivières de l'Artois par rapport au débit total. Pour la période 1962-1972, on remarque des valeurs fortes du débit de base moyen interannuel pour la Canche et l'Authie, car dépassant 80 %, avec des maximums de l'ordre de 90 % entre 1970 et 1972. La Lys est caractérisée par un débit de base

Années	CANCHE		AUTHIE		LYS		AA		HEM		CLARENCE	
	à Brimeux	à Dompierre	à Delettes	à Wizernes	à Cuemy	à Robecq						
1962	83	-	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1963	74	69	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1964	79	84	67	82	-	-	-	-	-	-	-	-
1965	83	83	61	68	-	-	-	-	-	-	-	*
1966	84	80	57	63	-	-	-	-	-	-	-	*
1967	86	83	53	75	-	-	-	-	*	-	-	*
1968	86	75	68	74	-	-	-	-	*	-	-	*
1969	88	86	71	78	-	-	-	-	*	-	-	*
1970	90	92	77	85	-	-	-	-	*	-	-	*
1971	91	89	73	84	-	-	-	-	74	-	-	*
1972	92	86	63	82	-	-	-	-	73	-	-	78
Moyenne interannuelle:	85,3 %	82,4 %	64,5 %	76,8 %	(76 %)	(76 %)						

Tableau III. — Rapport du débit de base et du débit total d'écoulement des rivières de l'Artois.

moyen de 64,5 % entre 1962 et 1972, avec des valeurs supérieures à 70 % de 1970 à 1971. L'Aa possède un débit de base moyen de 75 % passant à plus de 80 % entre 1970 et 1972. La Hem et la Clarence présentent un débit de base de 76 % entre 1970 et 1972.

2) Les rivières du bassin de l'Escaut.

Les affluents de l'Escaut drainent l'aquifère crayeux dans la majeure partie du bassin, tout au moins à l'amont de Valenciennes. Au Nord, le recouvrement tertiaire prédomine. Un dépôt d'alluvions récentes recouvre les formations du Crétacé et de l'Eocène au niveau des vallées. Dans la vallée de l'Hogneau, affleurent des calcaires dévoniens.

Le bassin de l'Escaut est, contrairement à celui de l'Artois, fortement modifié par la réalisation d'un réseau de voies navigables, ainsi le canal de l'Escaut reçoit environ 0,5 m³/s. de la rivière Sensée et 0,1 m³/s. du canal de Mons.

Les terrains tertiaires argilo-sableux sont la cause d'un ruissellement notable se traduisant sur les hydrogrammes par une multitude de pics masquant la période d'étiage.

Les valeurs moyennes annuelles (1962-1972) du rapport du débit de base au débit total issues de l'analyse des hydrogrammes journaliers conduisent aux remarques suivantes (tabl. IV) :

- une diminution nette des valeurs d'ensemble du rapport en comparaison de ce qui a été établi pour les bassins de l'Artois (75 à 85 %) ;

Années	Débit de base %			
	L'ESCAUT	L'ECAILLON	LA SELLE	LA RHONELLE
1962	62,5	72,3	-	-
1963	56,2	74,5	78,7	58,7
1964	85,1	76,9	70	68,1
1965	73,4	70,4	74,8	65,9
1966	68,2	61,9	74	43,5
1967	73,2	87,9	87,3	80,8
1968	82,2	68,1	77,4	66,1
1969	81,5	77,1	86,1	68,7
1970	72,7	74,1	85,3	65,1
1971	69	59	71	61
1972	68	66	75	60
Moyenne	72	71,65	77,9	70,88

Tableau IV. — Valeurs (%) du débit de base annuel des rivières du bassin de l'Escaut par rapport au débit total.

— le bassin de la Selle, avec un débit de base de l'ordre de 78 % (77,9 %), indique un réservoir crayeux à réserves en eau souterraine importantes ;

— les bassins de l'Ecaillon et de la Rhonelle se caractérisent par un débit de base d'environ 70 % ;

— la totalité du Bassin de l'Escaut qui intègre les sous-bassins précités possède un débit de base de 72 %.

3) Conclusions.

Le Nord de la France possède des rivières dont le débit reste assez régulier pour l'ensemble de la période considérée (1962-1972) en particulier dans la région de l'Artois qui voit un développement important des terrains marno-crayeux du Crétacé. L'existence de zones marneuses et argilo-sableuses entraîne l'accroissement du ruissellement au détriment d'une réserve souterraine régulatrice des débits, en particulier dans les bassins de l'Escaut. Ces problèmes posés permettent d'élaborer une meilleure stratégie d'utilisation des ressources en eau souterraine.

V. — APPLICATION DES RESULTATS HYDROLOGIQUES ET CLIMATOLOGIQUES AUX BASSINS DE L'ARTOIS ET DE L'ESCAUT

« L'estimation du bilan d'eau global d'un bassin versant nécessite la connaissance préalable des structures hydrogéologiques et l'existence de données d'hydrologie de surface nombreuses » (Mania, 1973).

L'évaluation des écoulements total et souterrain par bassin versant a été appliquée à six

bassins de l'Artois : l'Aa, la Lys, la Clarence, la Lawe, la Canche et l'Authie, et au bassin de l'Escaut français englobant les sous-bassins de la Selle, de l'Ecaillon, de la Rhonelle et de l'Hogneau. Le programme FLØC (87) utilisé a été réalisé par Delarozière-Bouillin et coll. (1971).

La méthode n'est applicable qu'à des bassins versants de grandes dimensions superposables à leurs bassins hydrogéologiques et elle suppose l'existence de données hydroclimatologiques de longue durée (ici de 1962 à 1969) afin de permettre de négliger l'influence des variations de réserve.

1) Application à la région de l'Artois.

a) Ecoulement total.

La surface des bassins versants a été établie par rapport à la position des différents postes de jaugeage (tabl. V).

Le débit moyen interannuel QT, relatif à la période 1962-1969 est évalué : l'erreur commise sur ces mesures peut être estimée à 20 % environ ; les modules d'écoulement (l/s/km²) de la Clarence et de la Lawe sont nettement inférieurs à ceux des autres bassins (tabl. VI).

BASSIN	STATION DE JAUGEAGE	SUPERFICIE EN Km ²
Aa	Wizernes	392
Lys	Delettes	158
Clarence	Robecq	215
Lawe	Béthune	181
Canche	Brimeux	894
Authie	Dompierre	726
	TOTAL	2 566

Tableau V. — Caractéristiques des bassins versants de l'Artois (Mania, S.G.N., 1973, p. 86).

BASSIN	QT en 10 ⁶ m ³ /an	QT en mm	QT en l/s.km ²
Aa	151,05	385	12,2
Lys	60,23	391	12,4
Clarence	43,20	201	6,3
Lawe	56,13	310	9,8
Canche	392,93	439	13,6
Authie	247,24	340	10,8
TOTAL	950,78		

Tableau VI. — Débit total moyen interannuel des rivières de l'Artois sur la période 1962-1969 (Mania, S.G.N., 1973 p. 86).

Comparaison de la différence des précipitations moyennes interannuelles (PT) et du débit moyen interannuel mesuré (QT) avec le déficit d'écoulement moyen interannuel calculé (ETT) conduisant au calcul d'un coefficient de correction :

$$C = \frac{PT - QT}{ETT}$$

avec $C > 1$ ou $C < 1$.

Application du coefficient de correction C à l'ETR de chaque maille pour aboutir au calcul de la hauteur d'évapotranspiration réelle corrigée ETR_c .

Calcul de l'écoulement total unitaire maille par maille ET_u

$$ET_u = p - ETR_c$$

b) *Écoulement souterrain.*

L'estimation de ES, rapport de l'écoulement souterrain à l'écoulement total, a été faite d'après la lithologie. Une carte géologique schématique a été constituée et a permis une répartition par maille du rapport $ES = QS/ET$. Le calage de ES est obtenu par l'analyse des hydrogrammes qui permet de connaître le rapport du débit de base au débit total des rivières au niveau des stations de jaugeage. On se base sur ces valeurs réelles pour obtenir par tâtonnements successifs une bonne estimation des valeurs de ES et de leur répartition géographique.

Les étapes de calcul sont alors les suivantes :

— Application du coefficient ES à la valeur de l'écoulement total de la maille (ET_u) pour obtenir la valeur de l'écoulement souterrain QS.

— Calcul de l'écoulement souterrain total :

$$QST = \sum_1^n QS$$

— Comparaison de l'écoulement souterrain total QST à l'écoulement total ET tiré des hydrogrammes (tabl. VII) par calcul d'un coefficient de correction $C' = ET/QST$, avec $C' > 1$ ou $C' < 1$.

— Application du coefficient C' aux débits souterrains QS de chaque maille afin d'aboutir à un QS corrigé.

BASSINS	QT mm	ES = QS/QT	ETR corrigé mm
Aa	385	0,75	96,25
Lys	391	0,60	156,4
Clarence	201	0,70	60,3
Lape	310	0,70	93,0
Canche	310	0,80	62,0
Authie	340	0,80	68,0

Tableau VII. — Rapports (ES) de l'écoulement souterrain/écoulement total tirés de l'analyse des hydrogrammes et valeur globale par bassin du ruissellement. Données moyennes interannuelles (Mania, S.G.N., 1973, p. 90).

La carte des isohyètes des précipitations moyennes interannuelles P a été établie à partir de 52 stations pluviométriques réparties uniformément sur l'ensemble des bassins. On observe une forte pluviosité à l'Est du Boulonnais (87). Les lignes isothermes moyennes interannuelles ont été définies à partir de onze stations thermométriques distribuées à la périphérie de l'ensemble des bassins. L'écart entre les valeurs extrêmes de température oscille entre 0.5 et 1° C (87).

La carte de zonalité de l'évapotranspiration réelle moyenne interannuelle ETR a été dressée à partir de l'hypothèse de Turc sur des périodes interannuelles. Les valeurs fortes se situent dans les secteurs de pluviosité intense. L'ensemble des bassins a été décomposé en 108 mailles d'égale surface (fig. 17). A chaque maille ont été affectées une valeur de précipitation moyenne interannuelle et une valeur d'évapotranspiration moyenne interannuelle réelle.

Les étapes du calcul sont les suivantes :

— Calcul de la lame d'eau précipitée moyenne interannuelle PT en mm :

$$PT = \frac{\sum_1^n P}{n}$$

avec : n = nombre total de mailles,

P = lame d'eau précipitée par maille.

— Calcul du déficit d'écoulement moyen interannuel ETT en mm :

$$ETT = \frac{\sum_1^n D}{n}$$

avec : D = déficit d'écoulement par maille.

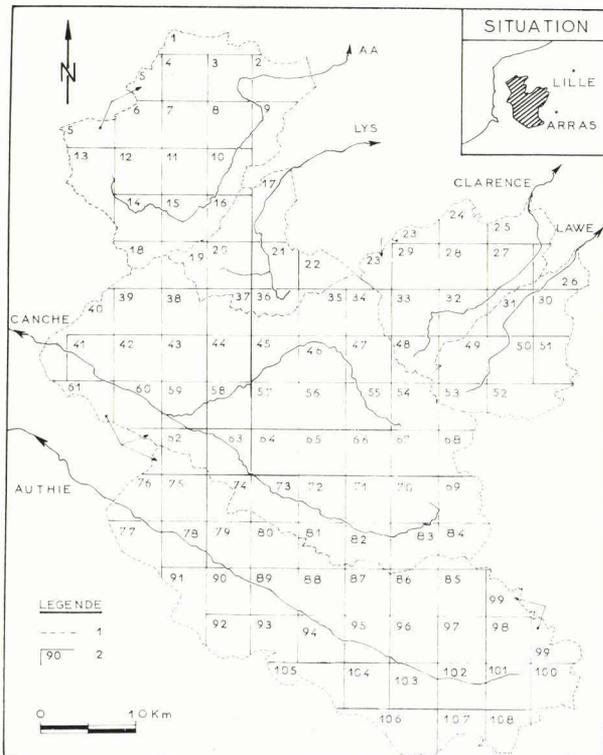


Fig. 17. — Distribution du maillage des bassins versants de l'Aa, la Lys, la Clarence, la Lawe, la Canche et l'Authie (Mania, S.G.N., 1973, p. 88).

Légende : 1, limite des bassins versants. — 2, désignation des mailles.

c) Résultats et problèmes.

Les difficultés qui apparaissent, en dehors de l'élaboration du programme, sont de deux ordres :

— d'ordre métrologique :

des erreurs peuvent se glisser :

- dans les mesures de débit aux stations de jaugeage plus ou moins bien conçues et placées,
- au niveau des mesures pluviométriques où interviennent l'altitude, le choix et l'exposition du site, la sensibilité du pluviographe ;

— d'ordre interprétatif :

la séparation, sur les hydrogrammes, du débit de base et du débit de ruissellement, a été effectuée en tenant compte de la courbe de tarissement et de l'allure générale des cycles piézométriques de la nappe de la

craie. Des mesures de jaugeage journalières et continues au niveau des sous-bassins élémentaires auraient conduit à l'établissement d'une méthode plus rigoureuse pour l'estimation du ruissellement. De telles données sont actuellement inexistantes.

Le débit de base des rivières de l'Artois a été assimilé à l'écoulement souterrain de la nappe. L'homogénéité des bassins et les conditions hydrogéologiques (94, 187, 221) permettent un tel rapprochement.

Le choix de la valeur de ES ne s'appuie pas sur des essais in situ mais sur des hydrogrammes ne traduisant pas les apports en eau des diverses régions géologiques et sur une relation lithologie-perméabilité grossière. Il serait intéressant d'intégrer des valeurs de densité de fissuration, d'ouverture de diaclases et de variation de faciès (chapitre 4).

1° Problème de l'évapotranspiration.

L'emploi de la formule de Turc annuelle pour le calcul de l'évapotranspiration réelle a été choisi au lieu de la formule mensuelle en raison du manque total de données précises sur le taux d'évaporation et l'horaire d'ensoleillement aux divers points de mesure.

Le calcul automatique permet, après correction linéaire, d'obtenir une valeur plus adéquate de ETR. La nouvelle carte d'évapotranspiration réelle corrigée (fig. 19) se distingue de la carte de départ par une augmentation des valeurs fortes. Des anomalies positives importantes affectent les bassins de l'Aa, de la Clarence et de la Lawe.

Les nouvelles courbes de relation P - ETR (fig. 20) sont très décalées par rapport à la courbe calculée. Quatre causes principales peuvent être à l'origine d'un décalage éventuel :

BASSINS VERSANTS	ETR en mm	ΔT en °C		4P en mm	
		Correspondant à l'équilibre	Admissible - 2 %	Correspondant à l'équilibre	Admissible - 10 %
Clarence et La _w e	+ 109,5	+ 5	0,2	+ 1000	90
Aa	+ 72,3	+ 3	0,2	+ 700	85
Lys	+ 19,3	+ 1	0,2	+ 140	90
Authie	+ 6,6	+ 0,25	0,2	+ 20	80
Canche	- 24,5	- 1	0,2	- 140	85

Tableau VIII. — Justification des variations d'évapotranspiration par des modifications éventuelles des températures moyennes interannuelles (T) ou des précipitations (P) dans les bassins de l'Artois (Mania, S.G.N., 1973, p. 91).

a) une erreur de mesure sur P qui peut atteindre 10 %, soit dans notre cas une variation allant de 70 à 100 mm. Or (tabl. VIII), des écarts de 700 et même 1.000 mm doubleraient les

valeurs des précipitations interannuelles : cela est peu crédible ;

b) une mauvaise appréciation de la température interannuelle et une trop forte dispersion

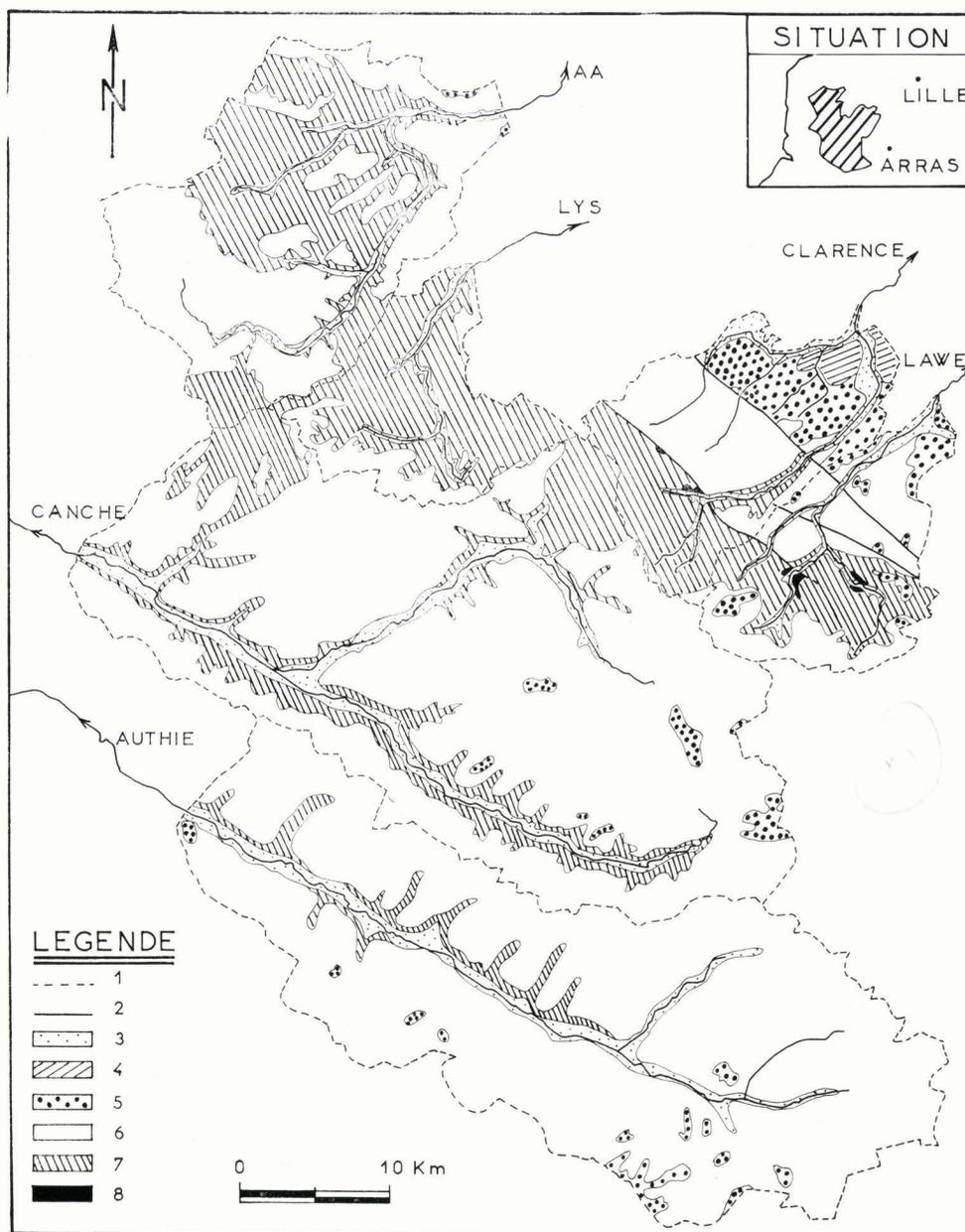


Fig. 18. — Carte de classification hydrogéologique (Mania, S.G.N., 1973, p. 89).

Légende : 1, limite du bassin versant. — 2, faille. — 3, alluvions ES = 80-90 %. — 4, argiles des Flandres ES = 0. — 5, sables landéniens ES = 20 %. — 6, craie perméable du Sénonien et du Turonien supérieur ES = 80-90 %. — 7, craie marneuse et marnes du Turonien moyen et inférieur ES = 50 %. — 8, schistes et grès du Primaire ES = 0 %.

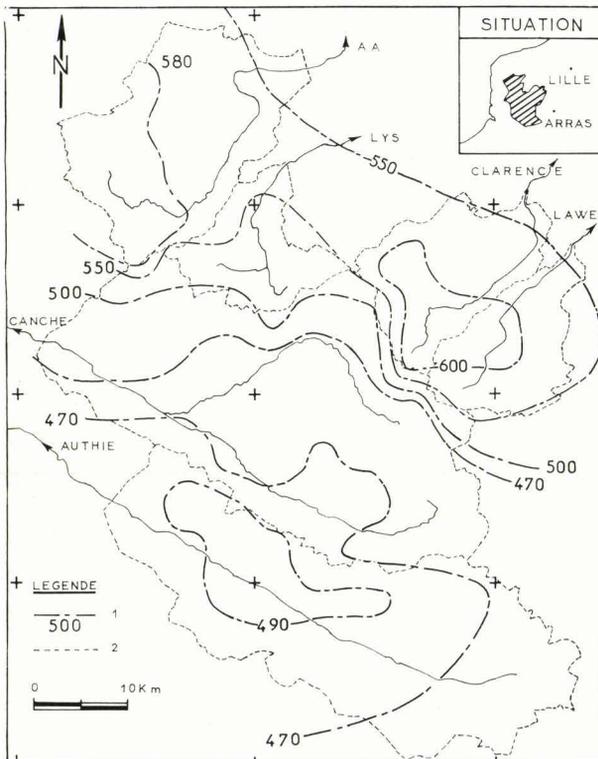


Fig. 19. — Distribution de l'évapotranspiration moyenne interannuelle réelle (1962-1969) après réajustement (Mania, S.G.N., 1973, p. 91).

Légende : 1, courbe d'égale valeur d'évapotranspiration corrigée en mm. — 2, limites des bassins versants.

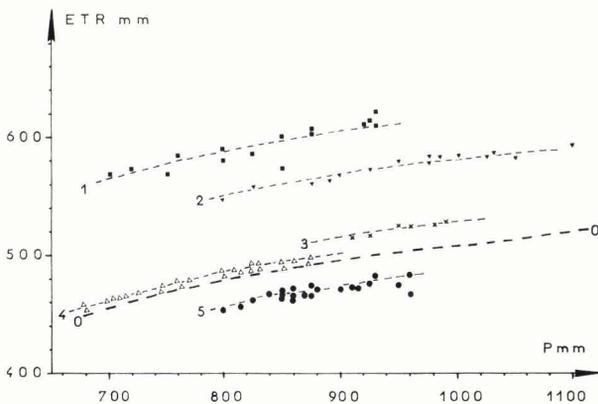


Fig. 20. — Relation pluie-évapotranspiration réelle après correction (Mania, S.G.N., 1973, p. 91).

Légende : 0, courbe théorique. — 1, Clarence et Lawe. — 2, Aa. — 3, Lys. — 4, Authie. — 5, Canche.

des postes thermométriques. Une erreur de 2% est généralement admise. Elle représente un écart d'environ 0,25° C nettement inférieur aux variations constatées (tabl. VIII) qui vont de 3 à 5° C ;

c) une erreur sur l'évaluation des débits qui dépend :

- de la qualité de la station de jaugeage,
- des fuites éventuelles à la suite de prélèvements d'eau avec un rejet à l'aval de la station ou d'intercommunications entre les bassins.

L'examen piézométrique montre que la partie sud du bassin de l'Aa (maille 13) participe à l'alimentation d'un sous-bassin de la Canche (sous-bassin de la Course) ;

d) une mauvaise estimation de la superficie des bassins versants schématisés par des mailles.

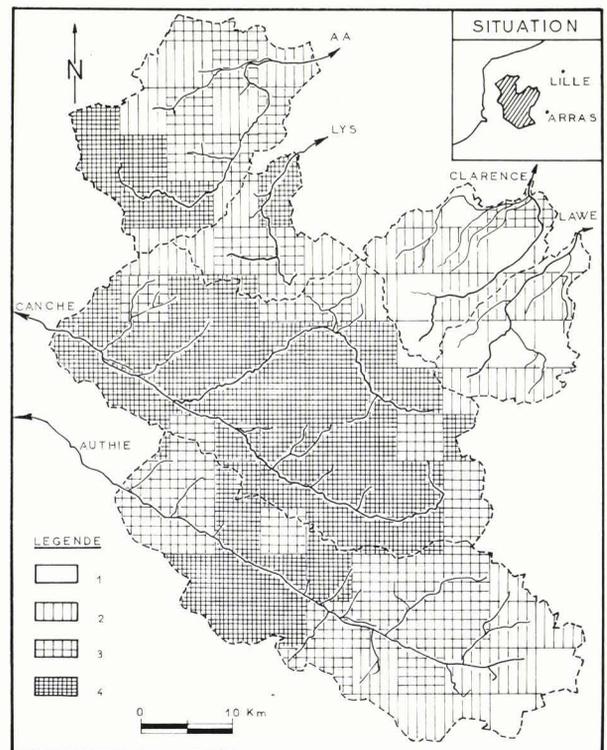


Fig. 21. — Carte des écoulements souterrains (Mania, S.G.N., 1973, p. 92).

Légende : Valeur des modules d'écoulement souterrain. 1, 0 à 5 l/s/km². — 2, 5 à 7,5 l/s/km². — 3, 7,5 à 10 l/s/km². 4, 10 à 15 l/s/km².

L'hypothèse de Turc s'applique bien au bassin de l'Authie. Il est par contre important de la corriger pour les autres bassins par un paramètre rendant compte de la vitesse d'infiltration liée à la lithologie qui influence le taux d'évapotranspiration.

Les bassins qui possèdent le plus de surfaces imperméables (fig. 18) comme l'Aa, la Lys, la Clarence et la Lawe sont ceux où l'ETR est sous-estimé. Le cas inverse est observé dans le bassin de la Canche qui est constitué par des terrains crayeux perméables à fissuration importante.

2° Problème des écoulements souterrains.

L'aboutissement du programme permet de réaliser une carte des écoulements souterrains (fig. 21). On observe des secteurs à fort écoulement souterrain dans l'ensemble du bassin de la Canche, la basse Authie et la haute Aa. Les bassins de la Clarence et de la Lawe, eux, sont marqués par des écoulements souterrains réduits, en raison de l'affleurement de terrains aquicludes dont les marnes du Crétacé et les schistes gréseux du Dévonien (mailles 33, 48,

49, 50, 51). Dans la partie nord des deux bassins, affleurent les argiles et les sables de l'Eocène. Ces derniers sont le siège d'écoulements souterrains très faibles (229, 230) et déterminent de grandes étendues de marécages soumises à un taux d'évaporation élevé.

d) Conclusions.

L'application du programme FLØC est, dans ce premier stade de travail, un outil de dégrossissage qui a permis de répartir géographiquement les écoulements, de souligner le problème de validité des mesures, en particulier celles de l'évapotranspiration, qui nous ont conduit à l'établissement d'une carte d'évapotranspiration réelle réajustée.

2) Application au bassin de l'Escaut.

a) Ecoulement total.

Les données utilisées s'échelonnent de 1962 à 1970 et comprennent :

— les mesures pluviométriques interannuelles relatives à trente et une stations réparties entre la vallée de la Scarpe au NW et le bassin de la Sambre au SE. La carte pluviométrique (fig. 22) montre un gradient pluviométrique crois-

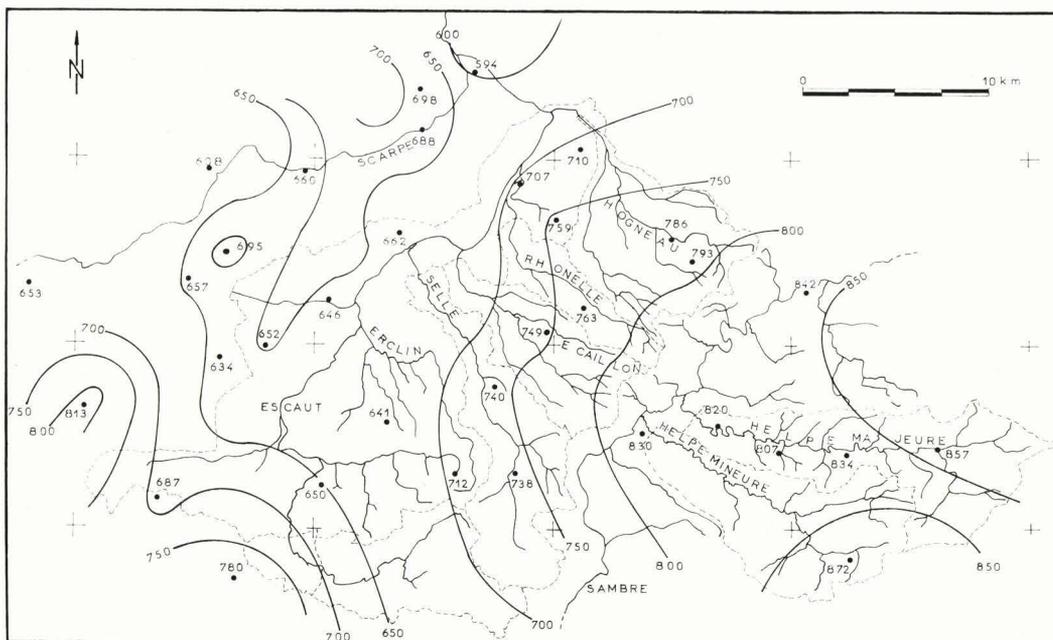


Fig. 22. — Distribution de la pluviométrie dans les bassins de la Scarpe, de l'Escaut et de la Sambre. Données moyennes interannuelles (1962-1970).

sant de la Scarpe (650 mm) à la Sambre (800 mm) ;

— les valeurs de température proviennent de sept stations et aboutissent à une moyenne interannuelle proche de 9°5 C ;

— les estimations de l'évapotranspiration à partir des valeurs de précipitation et de température ;

— les débits moyens interannuels total et de base issus de l'examen des hydrogrammes commentés dans le paragraphe II, 4 (tabl. IX). Une correction du débit de l'Escaut a été réalisée à partir des débits entrants de la Sensée (0,5 m³/s), du canal de Mons (0,1 m³/s) et de la Haine. L'ensemble du bassin de l'Escaut (les bassins de la Scarpe, de la Haine, du Canal de St-Quentin et de l'Escaut rivière étant exclus) a été subdivisé en 110 mailles de 16 km² chacune (fig. 23).

Bassin et sous-bassins versants	Station de jaugeage	Débit total moyen interannuel		Débit de base interannuel	
		en m ³ /s	en 10 ⁶ m ³ /an	en m ³ /s	en 10 ⁶ m ³ /an
L'Escaut	Condé	16,22	512	11,8	374
La Haine	St Aybert	3,63	-	-	-
La Selle	Noyelles	2,20	69,6	1,77	55,7
L'Ecaillon	Thiant	1,68	53,1	1,25	39,3
La Rhonelle	Aulnoy	0,68	21,5	0,44	14

Tableau IX. — Débits moyens interannuels 1962-1970 des bassins de l'Escaut. Débits d'écoulement total et de base.

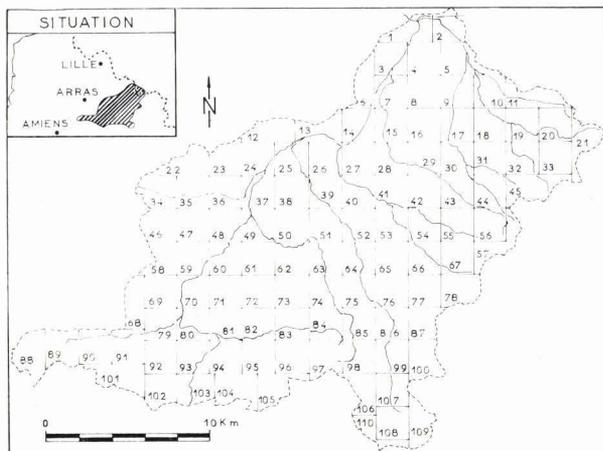


Fig. 23. — Distribution du maillage du bassin versant de l'Escaut. Superficie d'une maille = 16 km².

b) Ecoulement souterrain.

L'estimation, pour chaque maille, du rapport de l'écoulement souterrain par rapport à l'écoulement total est déduite de l'examen de la carte géologique (fig. 24) ainsi que l'analyse des hydrogrammes des principales rivières. Nous avons adopté successivement les valeurs suivantes de ce rapport ES : 0,8 à 0,9 pour les alluvions perméables de l'Escaut [grossières à la base (fig. 66)], 0,2 pour les sables argileux imperméables à semi-perméables du Tertiaire ; 0,5 pour les marnes semi-perméables crétacées ; 0,8 à 0,9 pour la craie perméable ; 0,9 à 1 pour les calcaires paléozoïques perméables ; 0 pour les schistes paléozoïques imperméables.

Le bassin de l'Hogneau apparaît le plus composite en raison de l'existence de toutes les formations précitées.

c) Résultats et problèmes.

Les ajustements successifs ont porté sur la discrétisation des valeurs de l'écoulement total en jouant sur la valeur de l'évapotranspiration. La modulation de la valeur de ES aboutit finalement à obtenir une valeur adéquate de l'écoulement souterrain calculé.

Quatre essais principaux montrant la progression de l'ajustement (tabl. X) ont été réalisés.

Bassin	Débits réels		Débits calculés en 10 ⁶ m ³ /an							
	base	total	1er essai		2ème essai		3ème essai		4ème essai	
	en 10 ⁶ m ³ /an	en 10 ⁶ m ³ /an	base	total	base	total	base	total	base	total
SELLE	55,7	69,6	37	72,8	68,1	74,7	59,9	74,7	55,6	70
ECAILLON	39,3	53,1	43,8	56,3	38,5	56,4	36,3	54,8	39,4	52,4
RHONELLE	14	21,5	19,6	29,9	15,4	29,9	7,4	24,7	13,9	22,3

Tableau X. — Etapes du calcul de simulation des débits de base et des débits d'écoulement total des bassins de la Selle, de l'Ecaillon et de la Rhonelle.

Le premier essai représente la simulation avec les données initiales. Les débits d'écoulement total sont supérieurs aux valeurs réelles obtenues par jaugeage et indiquent déjà l'inexactitude des valeurs d'évapotranspiration calculées à partir de l'hypothèse annuelle de Turc. Les débits de base calculés sont trop forts dans les bassins de l'Ecaillon et de la Rhonelle et trop faibles pour le bassin de la Selle.

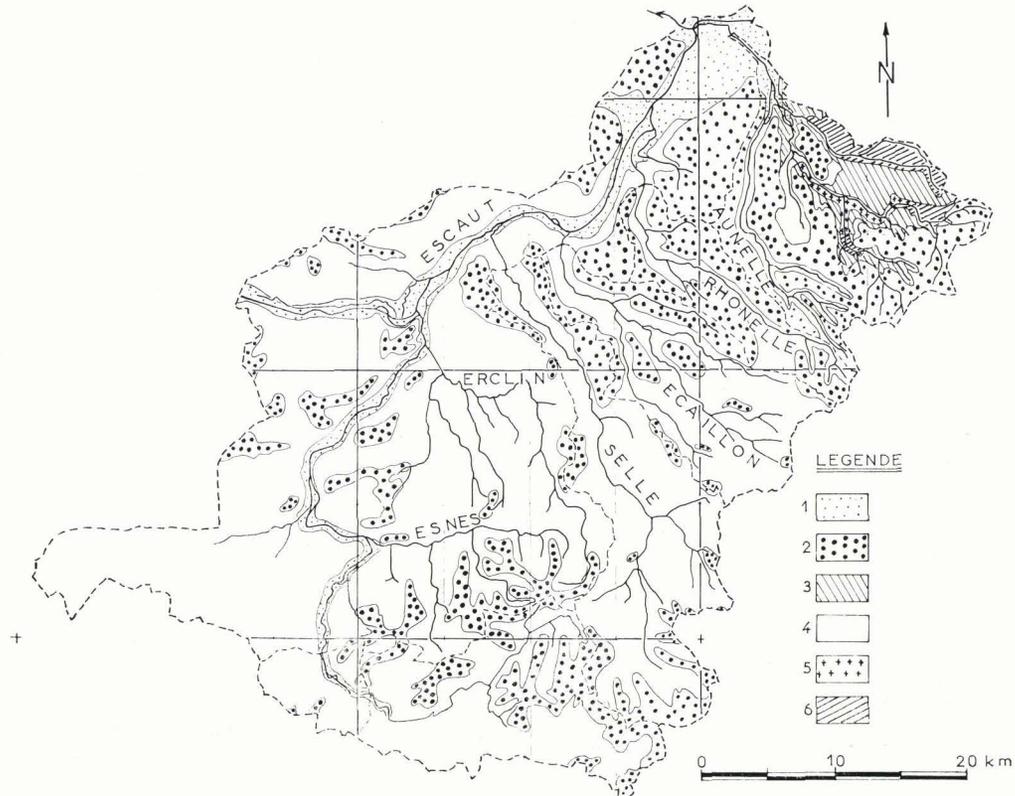


Fig. 24. — Carte de la classification hydrogéologique du bassin de l'Escaut.
 Légende : 1, alluvions ES = 80-90 %. — 2, sables landéniens ES = 20 %. — 3, marnes ES = 50 %. — 4, craie perméable ES = 80-90 %. — 5, calcaire paléozoïque ES = 80-100 %. — 6, schistes paléozoïques ES = 0 %.

Les deuxième et troisième essais ont permis d'apporter une rectification majorante aux valeurs initiales de l'évapotranspiration dans les bassins de la Selle et de l'Ecaillon (+ 20 mm) et de la Rhonelle (+ 90 mm) de manière à faire décroître la valeur des débits d'écoulement total.

Le quatrième essai va dans le même sens que le précédent, avec un accroissement supplémentaire de la valeur d'évapotranspiration : + 30 mm pour le bassin de la Selle et de l'Ecaillon et + 50 mm pour le bassin de la Rhonelle. Une modulation des coefficients ES aboutit à une meilleure valeur des débits de base.

Nous constatons la sous-estimation des taux d'évapotranspiration dans le bassin de la Rhonelle. Pour chacun des sous-bassins de l'Escaut, des relations nouvelles entre la pluie et l'évapotranspiration (fig. 25) ont été établies.

Trois groupes de bassins apparaissent :

— le premier, constitué par les bassins de la Selle et de l'Ecaillon, montre des courbes d'évolution proches de la courbe théorique de Turc (0) avec toutefois un léger décalage ;

— le deuxième groupe représente les évolutions P - ETR dans les bassins de l'Hogneau, de l'Aunelle et de l'Escaut. Les débits totaux calculés sont plus faibles que ceux mesurés dans la réalité car l'évapotranspiration a été *surestimée*. Le décalage important engendré indique l'influence des alluvions de l'Escaut qui renferment une quantité non négligeable d'eaux souterraines dans un secteur où l'aquifère crayeux disparaît. Un transfert de la nappe alluviale vers le canal permet d'accroître le débit d'écoulement total. A cela s'ajoute l'existence d'un haut bassin crayeux à faible recouvrement tertiaire particulièrement bien drainé (nappe à gradient hydraulique faible). Ce même

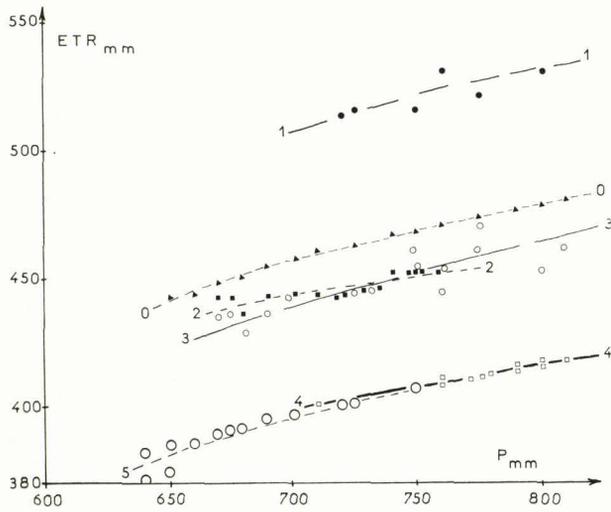


Fig. 25. — Relation pluie-évapotranspiration réelle après correction.

Légende : 0, courbe idéale d'après Turc pour une température de 9,5°C. — 1, bassin de la Rhonelle. — 2, bassin de la Selle. — 3, bassin de l'Ecaillon. — 4, bassins de l'Hogneau et de l'Aunelle. — 5, Haut-Escaut et Bas-Escaut.

phénomène apparaît dans le bassin de l'Aunelle. Les calcaires paléozoïques du bassin de l'Hogneau peuvent également, en raison de leur bonne fissuration et donc d'un bon drainage, améliorer le débit total de la rivière ;

— le troisième groupe, représenté par le bassin de la Rhonelle, montre une sous-estimation initiale de l'évapotranspiration. Le débit d'écoulement total calculé semble trop important par rapport à la réalité. Il faut en rechercher l'origine dans le fait que ce bassin possède une superficie faible vis-à-vis de sa longueur traduisant un drainage en profondeur négligeable. Les débits de ruissellement, importants en raison du recouvrement tertiaire, ne suffisent pas à assurer un débit d'écoulement total notable. Le drainage médiocre de l'aquifère crayeux influence le débit de base donc les réserves régulatrices. L'aquifère crayeux est, d'autre part, mal alimenté verticalement en raison de l'existence de terrains semi-perméables à imperméables en surface où l'évapotranspiration peut s'avérer plus importante car pouvant agir sur des nappes proches du sol.

Les justifications des variations possibles de l'évapotranspiration relatives à des erreurs expérimentales imputables à la température et aux précipitations ont été reportées sur le tableau XI. On constatera que l'écart entre la

		ΔT en ° C		ΔP en mm	
Bassins versants	$ETR_c - ETR$ en mm	Correspondant à l'équilibre	Admissible : + 2%	Correspondant à l'équilibre	Admissible : + 10%
Rhonelle	+ 50	+ 2,5	0,2	+ 270	+ 75
Selle	~ 15	- 1	0,2	- 60	- 72
Ecaillon	~ 15	- 1	0,2	- 60	- 76
Hogneau	~ 60	- 3,5	0,2	- 310	- 77
Haut-Escaut	~ 60	- 3,5	0,2	- 310	- 65

Tableau XI. — Justification des variations d'évapotranspiration par des modifications éventuelles des températures moyennes interannuelles (ΔT) ou des précipitations.

courbe théorique P - ETR de Turc et les courbes relatives aux bassins de la Selle et de l'Ecaillon peut s'expliquer par une erreur sur l'estimation des précipitations.

Par contre, les autres bassins indiquent des anomalies liées à la géologie du bassin, aux réservoirs souterrains et au mode de drainage de l'aquifère principal.

d) Carte des écoulements souterrains et conclusions.

Le bassin et les sous-bassins de l'Escaut montrent des anomalies d'alimentation qui se répercutent au niveau du bilan hydrologique. La méthode utilisée, quoique grossière en raison de la dimension des mailles (16 km²), permet, à partir d'une bonne connaissance des mécanismes hydrodynamiques entre aquifères, d'expliquer les anomalies constatées au niveau de la corrélation pluie-évapotranspiration par rapport à l'hypothèse de Turc que nous avons considérée juste.

Les bassins de la Selle et de l'Ecaillon apparaissent normaux et conformes à la théorie. La Rhonelle se distingue par un bassin peu évolué et mal alimenté. L'hétérogénéité du bassin de l'Hogneau et la somme d'effets inverses (ruissellement sur les marnes et les schistes, vidange régulatrice des calcaires paléozoïques d'étendue restreinte à l'affleurement) ne permet pas de compter sur une exploitation intensive du réservoir souterrain.

La carte des écoulement souterrains (fig. 26) issue du mixage des paramètres hydrologiques indique des débits souterrains élevés (plus de 10 l/s/km²) le long de la vallée du bas-Escaut. Des débits moyens (5 à 10 l/s/km²) dans les bassins du haut-Escaut, de l'Erclin, de la Selle et de l'Ecaillon. Les bassins de l'Hogneau, l'Aunelle et de la Rhonelle ne possèdent que peu de ressources en eau souterraine.

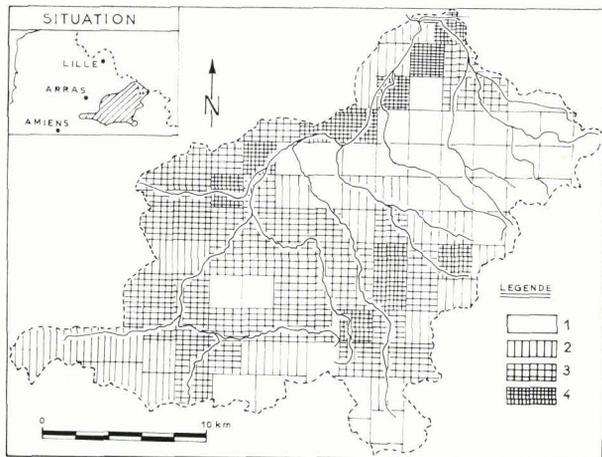


Fig. 26. — Carte des écoulements souterrains du bassin de l'Escaut.

Légende : Valeur des modules d'écoulement souterrain.
 1, 0 à 5 l/s/km². — 2, 5 à 7,5 l/s/km². — 3, 7,5 à 10 l/s/km².
 4, 10 à 15 l/s/km².

VI. — CONCLUSIONS

Le traitement des données hydrologiques et climatologiques pour deux grands ensembles régionaux a permis de constater certaines anomalies par rapport au bilan hydrologique classiquement établi par Turc à l'aide d'autres bassins. Les originalités décelées sont sujettes aux risques inhérents à la mesure hydrométrique ou pluviothermométrique, à la globalisation ou l'homogénéisation interannuelle des données de base et à la modification des réseaux hydrographiques (moulins, chutes, canaux, écluses). Malgré tous ces aléas, nous pensons que l'outil utilisé permet d'ébaucher de manière assez rapide une meilleure gestion à grande échelle des bassins sur la base des écoulements souterrains. Une autre technique de simulation plus fine mais plus laborieuse et plus coûteuse à l'aide du modèle mathématique sera proposée sur d'autres secteurs mieux fournis en données hydrogéologiques.

CHAPITRE TROISIEME

Etat et analyse de l'évolution de la piézométrie des nappes

I. — INTRODUCTION

La variation du niveau de la surface piézométrique du réservoir d'un système aquifère constitue l'expression de la modification de débit des différents éléments dynamiques (fig. 2). La bonne compréhension des fluctuations piézométriques n'est atteinte qu'en faisant appel à des relations concaténaires temporelles impliquant en particulier l'alimentation par la pluie efficace (chapitre 2) et les débits de pompage. D'autres éléments dynamiques peuvent venir compliquer la variabilité du niveau piézométrique (drainances, pertes, émergences, etc...).

La relation entre l'alimentation par la pluie efficace et l'écoulement souterrain de vidange d'un réservoir aquifère constitue un schéma apparemment simple à analyser dans des bassins peu perturbés par les pompages.

Des complications apparaissent lors de l'accroissement des débits sortants d'un système aquifère car une chute momentanée (de quelques mois à quelques années) affecte le niveau de la nappe. Un réajustement des transferts hydrodynamiques sur les limites du système (fig. 3) et sur les éléments dynamiques peut, avec un décalage temporel, aboutir à une stabilisation du niveau de la nappe.

A l'inverse, une diminution des débits sortants (arrêt de pompage) peut, soit inhiber certains processus hydrodynamiques (drainance), soit rétablir des émergences naturelles. Ce dernier schéma n'apparaît qu'en de rares exceptions.

L'examen et l'analyse de la piézométrie permet de répondre aux préoccupations suivantes :

— répercussion à l'échelle interannuelle des prélèvements sur les réserves en eau souterraine et recherche d'états prévisionnels à long terme,

— influence des cycles climatologiques (sécheresse, par exemple) sur l'évolution du niveau des nappes,

— relation des nappes entre elles (réalimentation) ou avec le réseau hydrographique superficiel (drainage ou alimentation),

— modification du sens d'écoulement des nappes à la suite de prélèvements intensifs : une telle modification peut éventuellement accélérer l'évolution de fronts de pollution...

A partir des documents piézométriques et en utilisant les données climatologiques et hydrologiques, il est possible de tenter une reconstitution analytique des fluctuations du niveau des nappes afin de dégager le processus de recharge des aquifères. L'analyse qualitative et l'évolution de la surface piézométrique des principaux aquifères régionaux sera abordée.

Une étude quantitative et un essai de restitution des fluctuations piézométriques seront tentés sur quelques exemples.

II. — RAPPEL SUCCINCT DES PRINCIPAUX AQUIFERES REGIONAUX ET ETAT PIEZOMETRIQUE GENERAL DES NAPPES

Plusieurs grands aquifères régionaux bien individualisés peuvent être distingués dans le Nord de la France (fig. 27) :

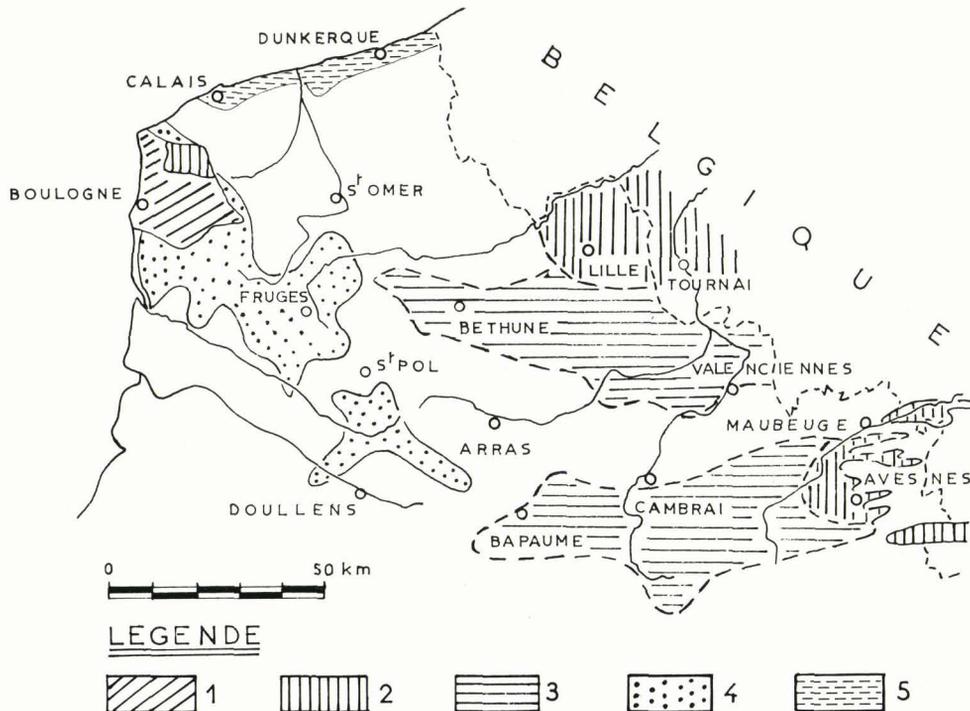


Fig. 27. — Localisation géographique des principaux aquifères du Primaire, du Jurassique, du Cénomaniens et des dépôts récents dans le Nord de la France.
 Légende : 1, aquifères du Jurassique. — 2, aquifères exploités des calcaires paléozoïques (Carbonifère et Dévonien). — 3, aquifères paléozoïques non exploités. — 4, aquifère Cénomaniens individualisé. — 5, sables pissards.
 (d'après documents C.F.P., COPESEP, R.A.P., S.N.P.A., S.G.N., 1965 et thèse P. Caulier).

— les réservoirs synclinaux des calcaires du Carbonifère et du Dévonien moyen de l'Avesnois,

— le vaste réservoir du synclinal de Roubaix constitué par le calcaire du Carbonifère,

— l'aquifère multicouche du Jurassique dans le Boulonnais,

— l'aquifère de la nappe de la craie qui constitue la réserve en eau souterraine la plus importante,

— la nappe des sables landéniens en Flandres et dans le bassin d'Orchies.

1) Nappes des calcaires du Dévonien dans l'Avesnois.

L'hydrogéologie des calcaires de l'Avesnois est marquée par l'existence de nappes indépendantes circulant dans des réservoirs plissés d'orientation WE et faillés de Fourmies à Maubeuge (fig. 28). Les formations grésoschisteuses du Dévonien supérieur affleurant sur de vastes

superficies n'offrent aucun aquifère important si ce n'est au niveau de bancs gréseux faisant office de drains. Par contre, les calcaires couviniens, givétiens et frasniens de la série du Dévonien moyen, fissurés et localement karstifiés, constituent des réservoirs intéressants, très exploités à Trélon, Féron, Fourmies (200) et Jeumont. La nappe y possède un régime libre à l'affleurement et captif sous recouvrement cénomaniens. La piézométrie montre l'existence de dômes piézométriques au niveau des limites de bassins versants et un drainage généralisé par les affluents de la Grande Helpe et de la Petite Helpe. La surface piézométrique est très proche de la surface topographique.

2) Nappes des calcaires du Carbonifère (Avesnois et région de Lille).

a) Avesnois.

Deux unités hydrogéologiques majeures (synclinaux d'une part, de Ferrière-la-Petite, Bachant et, d'autre part, de Doullers, Sars-Poteries et

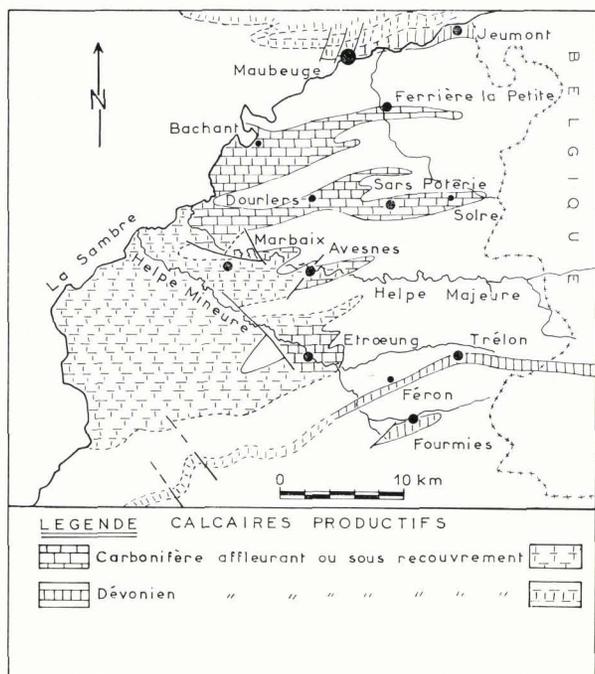


Fig. 28. — Localisation des aquifères calcaires du Dévonien et du Carbonifère de l'Avesnois. (d'après documents C.F.P., COPESEP, R.A.P., S.N.P.A., S.G.N., 1965 et cartes géologiques).

Solre) apparaissent à côté de trois gisements mineurs (synclinaux de Marbaix, d'Avesnes et d'Etrœungt) de Maubeuge à Trélon (fig. 28).

Les calcaires du Viséen et du Tournaisien sont compacts avec des niveaux bréchiques, des bancs dolomitiques et des niveaux de schistes (à la base). Ils sont fissurés et karstifiés au niveau des vallées. Les bassins d'alimentation de telles nappes sont circonscrits aux zones d'affleurement des calcaires. Localement, les nappes peuvent être mises sous pression à la faveur de niveaux imperméables. Des pertes du réseau hydrographique ont pu être décelées, en particulier celle de la Solre à la traversée du synclinal de Ferrière-la-Petite (198). Une alimentation induite de la nappe par la Sambre semble également se manifester au niveau de Bachant pendant la période des basses eaux, à la suite de l'exploitation intensive de l'aquifère du synclinal de Bachant pour l'alimentation en eau de l'agglomération de Maubeuge.

A l'W d'une ligne parallèle au cours de l'Helpe mineure et de la Sambre et sous recouvrement crétacé, le régime captif se généralise.

Les terrains paléozoïques se poursuivent au S de Cambrai (fig. 27) jusqu'à Bapaume (199) et constituent un aquifère vierge dont nous ignorons actuellement les caractéristiques hydrauliques par manque d'investigations profondes purement hydrogéologiques.

b) Région de Lille - Roubaix - Tourcoing.

La nappe du calcaire carbonifère s'étend du Hainaut occidental à l'agglomération de Lille - Roubaix - Tourcoing. En affleurement dans le Tournaisien, les terrains paléozoïques sont recouverts selon le site géologique considéré par des alluvions de l'Escaut, par des formations créta-cées marneuses ou des formations tertiaires dont l'épaisseur croît régulièrement vers le N-NW. Dans la région lilloise, l'établissement de la topographie du paléorelief primaire montre un enfoncement régulier vers le NW allant de pair avec le pendage général des formations secondaires et tertiaires (199, 225).

Le réservoir est constitué essentiellement par des calcaires dolomitiques du Viséen, des calcaires et des calcschistes du Tournaisien. Une fissuration importante affecte le calcaire carbonifère; deux ensembles de familles de diaclases (202) apparaissent :

- un premier ensemble représenté par des familles de joints bien marqués, de direction N 50°-70° et N 100°-120°,

- un deuxième ensemble constitué par des familles de joints peu marqués de direction N 10°-20° et N 160°-170°.

En tête des formations carbonatées carbonifères, on note l'existence de poches de dissolution (225) comblées de dolomie pulvérulente, argiles de décalcification et de sédiments continentaux wealdiens. Une karstification modeste se développe en outre le long des principales fissures. Le calcaire carbonifère est en outre affecté de failles et de nombreux plis (199) tel le vaste synclinal de Roubaix qui s'ennoie à l'Ouest.

La nappe du calcaire carbonifère est captive sous les terrains crétacés de l'agglomération Lille-Roubaix-Tourcoing où des prélèvements très importants en eau souterraine sont effectués (de l'ordre de 1 m³/s). L'alimentation de la nappe s'effectue par (24) :

- infiltration des eaux de précipitation sur les affleurements de la région de Tournai à Leuze,

— alimentation de l'aquifère à partir du réseau hydrographique (canaux de l'Escaut, de la Deûle et rivière de la Marque),

— apport par drainance verticale descendante de la nappe des alluvions et de la craie ou ascendante d'eaux profondes issues du Dévonien.

Il n'existe pas d'exutoire naturel des eaux souterraines, l'aquifère étant bloqué par des formations schisto-gréseuses du Dévonien supérieur. La carte piézométrique établie pendant la période du 27/4 au 2/5/1973 (fig. 29) montre un écoulement dirigé du SE vers le NW. Une vaste dépression "plate" s'étend de Lille à Tourcoing de la cote — 50 à — 60 m NGF et correspond au champ captant majeur de la région. Deux cônes de dépression prononcés apparaissent dans les secteurs d'Armentières (à l'W) et d'Halluin (au N) traduisant la médiocrité de l'aquifère et non des pompages à débit élevé.

c) Boulonnais (Région de Marquise).

L'activité intense des extractions de matériaux (en particulier des calcaires viséens) impliquant l'assèchement permanent des car-

rières, réduit le potentiel des ressources en eau souterraine. L'abaissement généralisé de la surface piézométrique provoque le dénoyage de la partie supérieure des calcaires. Cette dernière, fortement fissurée et très perméable, constituait la zone la plus intéressante dans l'exploitation des eaux souterraines. Seule l'utilisation des eaux d'exhaure, après traitement, peut être envisagée pour l'alimentation en eau.

3) Nappes du Jurassique.

Les nappes aquifères du Jurassique ne sont bien développées qu'à l'Ouest du département du Pas-de-Calais dans le Boulonnais (fig. 27). Les terrains du Jurassique, d'une épaisseur globale de 345 m, sont constitués par une alternance d'argiles, de marnes, de calcaires et de grès.

Les réservoirs aquifères peu épais (de 5 à 25 m) ne possèdent pas d'affleurements suffisamment vastes pour renfermer des nappes puissantes. De nombreuses sources sont observables dans le Boulonnais en raison de la grande diversité des terrains et de la morpho-

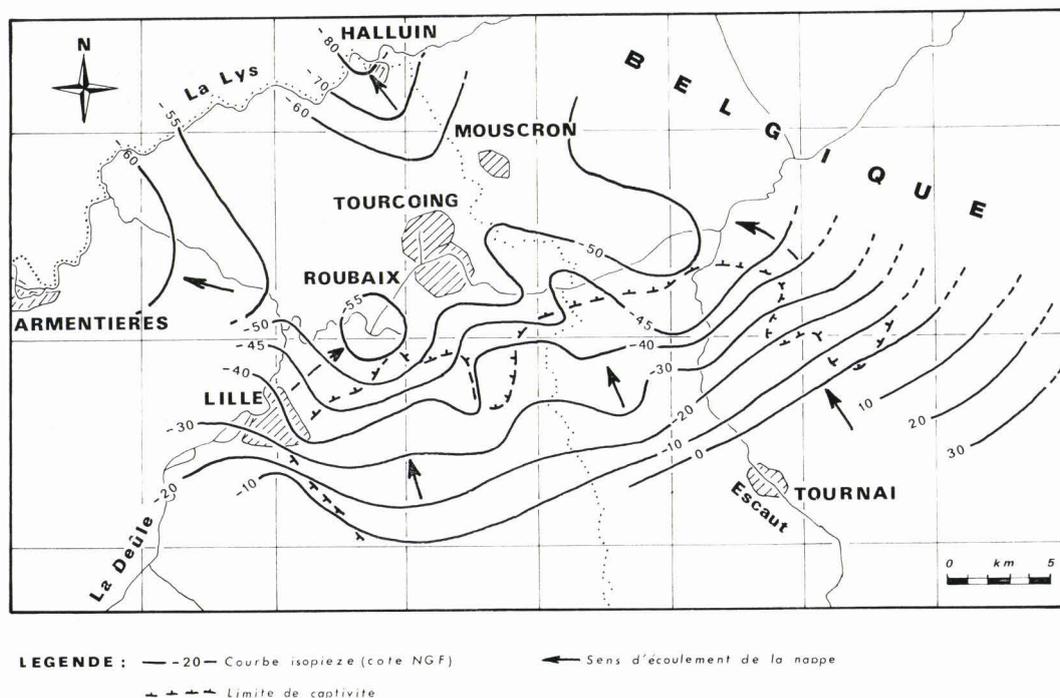


Fig. 29. — Carte piézométrique de la nappe du calcaire carbonifère de la région Lille-Roubaix-Tourcoing-Tournai (Mania, 1975. Rapport B.R.G.M., 74 SGN 062 NPA).

logie. De nombreuses discontinuités dues au jeu des failles et au creusement des vallées amoindrissent le potentiel hydraulique. On peut remarquer cependant le bon rendement de ces aquifères au niveau des vallées lorsqu'ils sont recouverts par des alluvions riches elles-mêmes en eau. C'est le cas des calcaires du Séquanien dans le secteur de St-Léonard, à Hesdigneul le long de la vallée de la Liane, des grès du Kimméridgien et du Portlandien au N de Wimereux ainsi que des calcaires du Dogger au Sud de Marquise en bordure de la vallée de la Slack.

En forage profond en dehors des vallées, les débits soutirés sont faibles : le forage APO à Boulogne-sur-Mer (195), qui a rencontré les calcaires et grès du Bajocien entre 258 et 294 m de profondeur et le forage d'Hardelot (137 m) qui capte les calcaires du Séquanien, donnent des débits de l'ordre de 40 m³/h.

Des puits locaux exécutés aux grès du Portlandien et du Kimméridgien assurent l'alimentation en eau de petites communes (Baincthun, Wacquinghen, etc...). Les cartes piézométriques établies restent très localisées et très approximatives en raison de la faible densité des points d'observation spécifiques aux divers aquifères (215).

4) Nappe de la craie.

a) Généralités.

L'aquifère crayeux représente le réservoir en eau souterraine le plus important (fig. 30) du Nord de la France en raison de la grande extension des assises du Crétacé, de leur épaisseur et de leurs bonnes caractéristiques hydrauliques dans certaines conditions de gisement. Les Flandres et l'Avesnois ne recèlent pas d'aquifère crayeux intéressant en raison, respectivement, de la diminution des valeurs de perméabilité de la craie sous recouvrement tertiaire et de la modification des faciès et de la décroissance des épaisseurs.

L'examen des coupes de forage et des diagraphies électriques associées a permis de dégager, par comparaison avec les datations micropaléontologiques, la bonne corrélation entre la lithographie, les électroséquences et la stratigraphie (116).

On note :

— une réduction d'épaisseur des niveaux du Cénomaniens et Turonien moyen d'W en E allant de pair avec une chute des valeurs de résistivité traduisant un enrichissement en particules argileuses,

— un accroissement des épaisseurs d'W en E des niveaux du Turonien inférieur et du Turonien supérieur,

— que, dans le Calais, l'aquifère crayeux est limité à sa base par les argiles du Gault,

— que, dans la région de Fruges (Haute Lys), une division de l'aquifère s'amorce en raison de l'enrichissement en argiles des marnes du Turonien inférieur et du Turonien moyen. On distingue alors les aquifères du Cénomaniens supérieur, d'une part (fig. 27), et du Turonien supérieur-Sénonien, d'autre part (fig. 30),

— que, dans la partie centrale et orientale des départements du Nord - Pas-de-Calais, les marnes du Cénomaniens deviennent improductives et seul l'aquifère du Turonien supérieur-Sénonien subsiste largement développé jusqu'à la Sambre,

— que, globalement, la craie apparaît très productive dans les vallées à la bordure du recouvrement par les terrains tertiaires (fig. 30) et par contre, stérile dans les Flandres, sous le bassin d'Orchies et dans l'auréole transgressive du socle primaire (Tournaisis et Avesnois).

b) Carte piézométrique de la nappe de la craie.

La première carte de la surface piézométrique de la nappe de la craie sur l'ensemble des

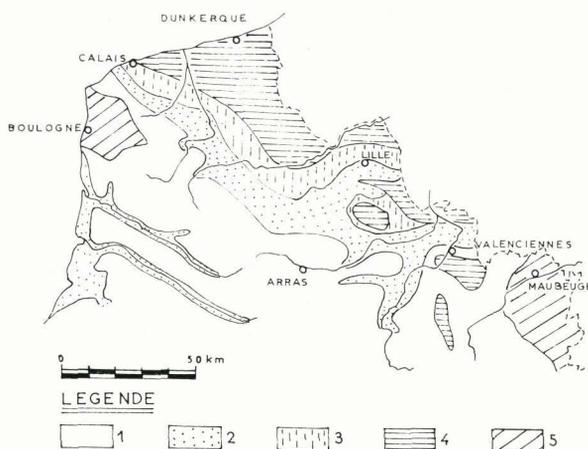


Fig. 30. — Distribution géographique des zones de qualité de production de l'aquifère crayeux.

Légende : 1, zone médiocre sur plateaux. — 2, zone très productive. — 3, zone peu productive. — 4, zone improductive. — 5, absence d'aquifère crayeux.

(d'après Atlas des eaux souterraines de la France, B.R.G.M., 1972).

départements du Nord et du Pas-de-Calais a été établie par le Service Géologique Régional à partir des données de terrain acquises entre 1957 et 1965 (fig. 31). Cette carte est complétée au S par celle réalisée en Picardie (données 1961 à 1967). Plus récemment, ont été établies (78) de nouvelles cartes basées sur la période de basses eaux prolongées 1970-1974. Elles montrent un contraste net des gradients hydrauliques entre la région de l'Artois qui couvre les bassins de l'Authie, de la Canche, de la Haute Lys, la Haute Aa et la Haute Hem et la région couvrant les bassins et sous-bassins de l'Escaut, de la Deûle, de la Scarpe et de la Sensée.

La synthèse cartographique a été réalisée par Crémille qui écrit (78, p. 5 à 7) :

1° La surface piézométrique en Artois.

« Les formations crétacées sont ployées en un vaste anticlinal, d'axe N 120, faillé au droit du Boulonnais et des collines d'Artois (le Boulonnais, qui se présente actuellement sous forme d'une cuvette morphologique, est un anticlinal dont le cœur a été érodé). Sur le flanc nord de l'anticlinal, les formations plongent vers le NE sous le Tertiaire. Au S, les formations du Crétacé affleurent sur une vaste superficie et reçoivent les eaux de précipitation qui alimentent en profondeur les formations sénono-turonienne et cénomaniennes.

L'examen général de la surface piézométrique montre l'existence d'un dôme principal d'axe NW-SE qui coïncide avec les cotes topographiques les plus élevées de l'Artois (fig. 31).

Au NW, on ne voit du dôme que ses deux flancs nord et sud.

Au SE, le dôme passe au N de la Ternoise suivant une ligne Desvres-Arras parallèle aux failles de Pernes et de Marqueffles. Il atteint la cote + 140 m NGF et disparaît

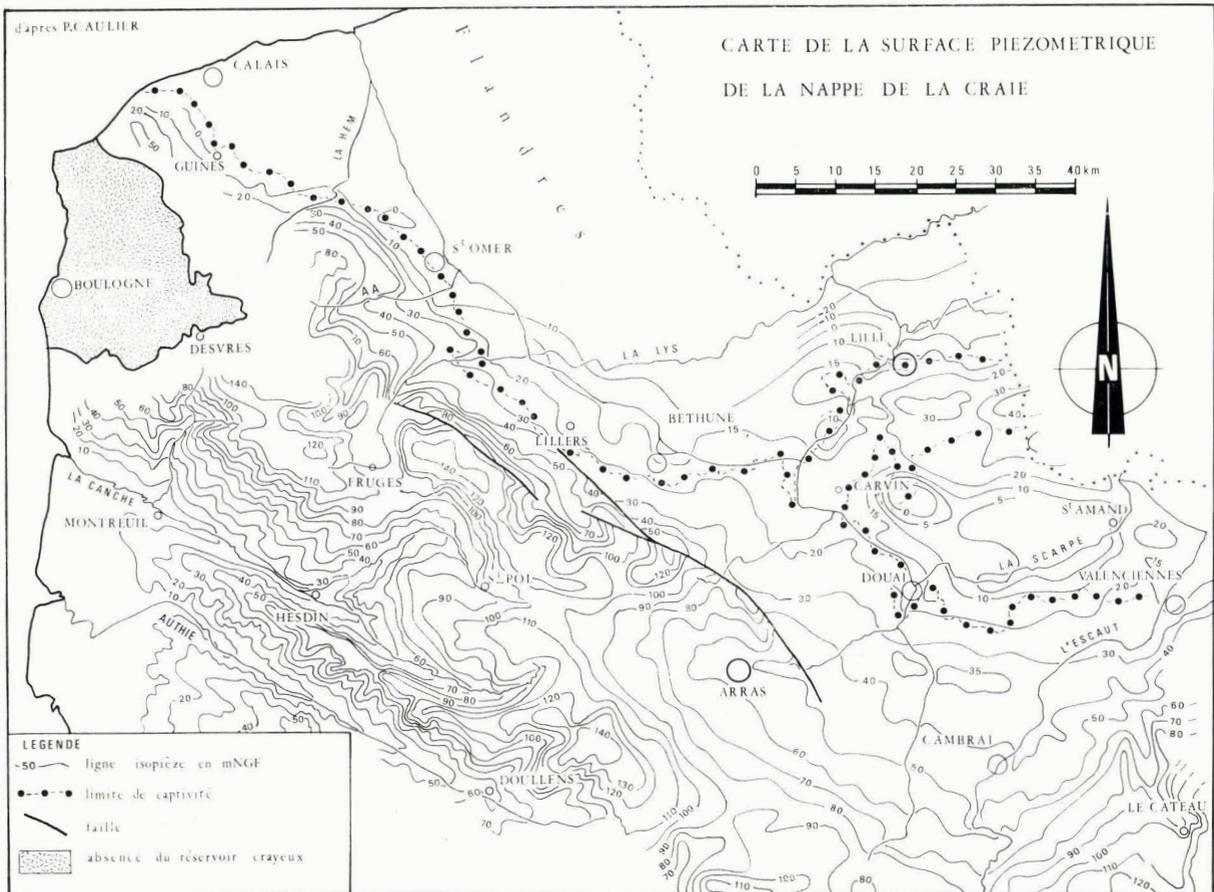


Fig. 31. — Carte piézométrique de la nappe de la craie (d'après Caulier, 1974, Thèse Université, Lille).

localement au niveau de la Haute Lys. Il est remarquable de constater qu'une partie du bassin versant hydrologique de la Lys ne coïncide pas avec le bassin hydrogéologique.

On distingue, au N du dôme piézométrique principal, trois bassins moyens qui sont ceux du Calaisis, du Bassin Versant Audomarois et de l'interfluve Aa-Lys, séparés par les rivières Hem et Aa. Deux régimes d'écoulement de la nappe sont notés : l'un libre, la nappe ne remplissant pas entièrement l'aquifère et l'autre captif. Une ligne, dite *limite de captivité*, représentée sur la carte, sépare les deux régimes d'écoulement, libre au S puis captif au N. Cette limite, sensiblement linéaire de direction NW-SE, passe au droit des champs captants s'étendant au S de Calais à St-Omer. Les périodes de basses eaux entraînent souvent la mise en régime libre de certains champs captants et de grosses difficultés de prélèvement apparaissent alors.

Le bassin du Calaisis s'adosse au Boulonnais et plonge sous les Flandres. Les lignes piézométriques sont régulièrement disposées. L'écoulement s'effectue d'une façon générale du SW vers le NE. Un dôme piézométrique secondaire apparaît sur la limite nord du bassin de la Slack qui est également une ligne de sources. Actuellement, deux cônes de pompage, déjà très prononcés (ligne de cote $-0,5$ m NGF) sont situés sous Fréthun et Guînes (chapitre 5, § II). Ils sont dus au pompage de la Société Générale des Eaux de Calais et de la Société Courtaulds.

Le bassin versant audomarois s'étend de la Hem à l'Aa. Son haut bassin, assez mal connu, est normalement le siège d'un écoulement dans le Cénomaniens dont l'étude systématique est en cours de réalisation. La partie connue du bassin possède un aspect général voisin de celui du Calaisis. Deux cônes piézométriques d'extension non négligeable apparaissent dans les régions d'Houille, Mouille et d'Arques (chapitre 5, § II). Le premier est dû aux pompages de la Société des Eaux de Dunkerque. Le second résulte des nombreux pompages effectués dans la vallée de l'Aa, il est provisoirement en voie de résorption du fait de l'arrêt des importants pompages industriels (cartonneries). Une zone de cressonnières, toujours en activité, sépare encore les deux cônes de pompage.

Au S du dôme piézométrique principal de l'Artois, trois autres bassins s'individualisent : celui de la Ternoise, de la Canche et de l'Authie, dont les caractéristiques hydrogéologiques sont voisines. Indépendamment de la structure géologique, les rivières jouent un rôle déterminant dans le sens des écoulements. Les lignes isopiézométriques sont caractérisées par une allure perturbée en raison du drainage généralisé de la nappe par les rivières. La craie sénono-turonienne n'est jamais sous recouvrement et la nappe s'écoule en régime libre. La craie cénomaniens perméable contient une nappe captive dont on connaît mal le sens d'écoulement mais qui se trouve jaillissante dans les vallées. Seules les vallées peuvent permettre des captages très productifs actuellement réduits en nombre.

2° La surface piézométrique du bassin minier de la Pévèle, de la partie orientale des Flandres et du Cambrésis.

Ces régions sont marquées par une vaste dépression du toit des terrains paléozoïques de Béthune à Valenciennes en passant par Lens et Douai. L'existence d'un relèvement du socle paléozoïque dans le Tournaisis et l'Avesnois guide également le pendage des terrains crétacés.

Du N au S, on observe successivement :

— des pendages dirigés vers le N-NW dans les Flandres orientales (région lilloise),

— le dôme anticlinal faillé du Mélançois, d'axe W-E,

— la vaste cuvette synclinale du bassin d'Orchies, d'axe W-E,

— un relèvement graduel des couches vers le Cambrésis,

— le secteur de Béthune, caractérisé par des formations à pendage NE découpées par des failles longitudinales d'orientation N 120° qui provoquent le relèvement du compartiment méridional. La nappe d'eau s'écoule sensiblement suivant les pendages géologiques. A l'W, dans le bassin minier, la nappe s'écoule du SW vers le NE. A l'E, elle s'écoule d'abord suivant cette même direction SW-NE mais des dômes piézométriques apparaissent au droit de l'anticlinal du Mélançois (+ 30 m NGF) et de Valenciennes à St-Amand au niveau de la limite des bassins de l'Escaut et de la Scarpe (+ 20 m NGF). Les rivières ne jouent qu'un rôle très réduit dans la forme des écoulements. La limite piézométrique au S du Cambrésis correspond aux limites de bassin versant Escaut-Somme et Escaut-Sambre.

On notera l'existence de petits dômes piézométriques dans l'interfluve Sensée-Scarpe.

Au N du Cambrésis, l'activité humaine a fortement perturbé les écoulements naturels. La dispersion des captages et l'importance des prélèvements, la création d'émergences du fait des affaissements miniers ont inversé le sens des écoulements dans de nombreuses régions.

Parmi les cônes de pompage les plus caractéristiques, on peut citer dans l'ordre, de l'W vers l'E et du N au S, ceux de Béthune, au S de Lille dans la Vallée de la Deûle, de l'W de Douai dans la vallée de l'Escrebieux, de l'E de Douai dans la vallée de la Scarpe et du NE de Valenciennes. On notera la vaste dépression piézométrique affectant l'aquifère crayeux sous le bassin d'Orchies, due à la mauvaise conductivité hydraulique de la craie. Des dépressions dues aux pompages, moins visibles car non fermées, existent au SE de Béthune, de La Bassée, de Lens et de Lille. L'apport des canaux a généralement limité l'extension des cônes de pompage dans ces régions mais ce phénomène de réalimentation (chapitre 5) se produit au détriment de la qualité des eaux. Des cônes d'émergence apparaissent actuellement (206) dans des zones où les affaissements miniers ont amené en coïncidence les surfaces de la nappe et du sol et où des pompages de relevage sont nécessaires pour éviter l'envoyage de zones habitées ou de terres cultivées.

La limite de captivité suit la limite des Flandres de Béthune à Lille et entoure le bassin d'Orchies. Elle présente des méandres dans les vallées et dans certaines zones de pompage.

5) Nappe des sables.

En dehors des aquifères locaux sableux marins affleurant de Dunkerque à Calais (sables pissards) et des alluvions fluviales grossières de l'Escaut en amont de Valenciennes, on observe deux ensembles aquifères sableux (fig. 32) : celui des Flandres franco-belges et

celui du bassin d'Orchies, séparés par le dôme du Mélandois.

Des buttes sableuses isolées s'étendant sur l'Artois et le Cambrésis peuvent révéler des nappes de faible importance.

La carte piézométrique des sables landéniens a été établie au cours de l'été 1970 (229, 230) et montre (chapitre 5) successivement :

— dans les Flandres, un écoulement généralisé vers le N et la mise en place rapide d'un régime captif sous les argiles des Flandres,

— dans le bassin d'Orchies, un dôme piézométrique qui se superpose à la cuvette synclinale, la nappe en régime captif devient libre sur le pourtour du bassin et s'y confond avec la nappe des alluvions de la Marque, de la Deûle, de la Scarpe et de l'Escaut.

III. — ANALYSE QUALITATIVE DE L'ÉVOLUTION PIÉZOMÉTRIQUE DES NAPPES DU NORD DE LA FRANCE

L'analyse qualitative de l'évolution piézométrique des nappes nécessite un vaste réseau de points de surveillance géré par le Service Géologique Régional et atteignant, en 1975, 425 sites répartis sur deux départements du Nord et du Pas-de-Calais.

Les valeurs de fluctuation du niveau des nappes sont collectées soit par des observateurs permanents, soit par enregistrement à l'aide de limnigraphes. Le stockage des données sur bandes magnétiques permet ensuite une restitution graphique de l'évolution piézométrique, d'un site choisi, sur une table traçante connectée à un ordinateur. Ces graphiques,

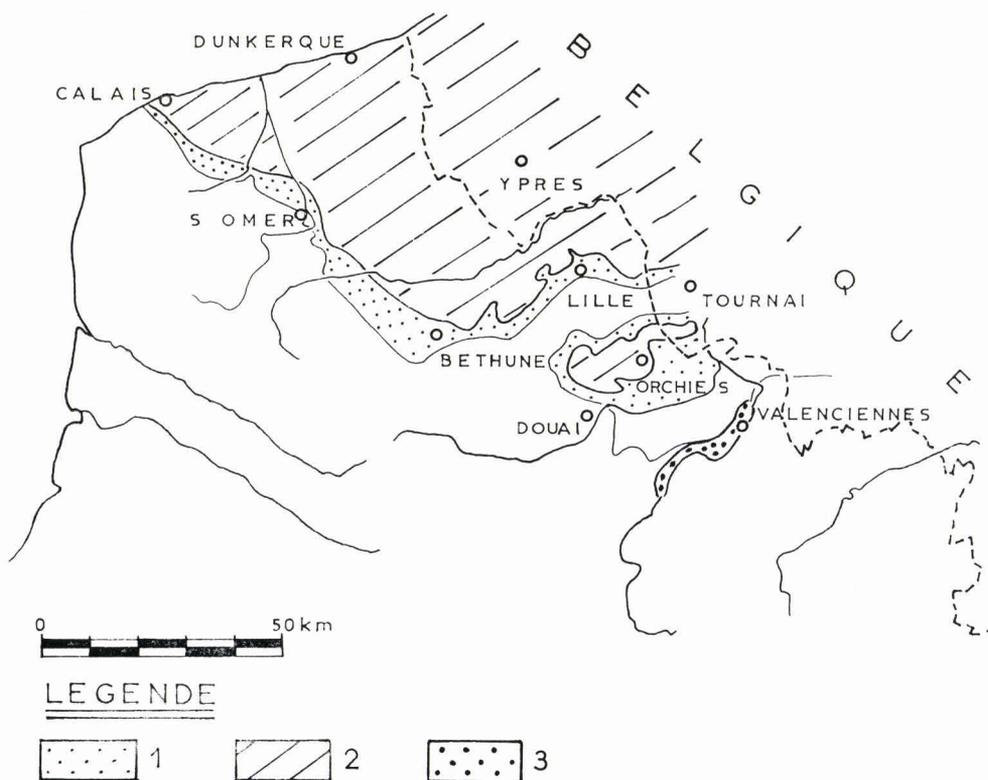


Fig. 32. — Position des aquifères sableux du Landénien et des alluvions de l'Escaut.
Légende : 1, aquifère landénien en régime libre. — 2, aquifère landénien en régime captif.
3, alluvions aquifères de l'Escaut.

(d'après thèse J. Mania, 1971).

issus de la " Banque des données du sous-sol ", ont été regroupés pour constituer un annuaire piézométrique sur la période 1964-1974 qui a fait l'objet du rapport B.R.G.M. publié par Crémille et Mania (79). Cinquante puits ont été sélectionnés dans les diverses nappes et reportés sur la carte de situation (fig. 33).

1) Evolution piézométrique de la nappe de la craie.

Les conclusions de Crémille et Mania sont donc :

« La nappe de la craie, tant par son extension que par les possibilités de captage qu'elle offre, occupe une place importante. Sur les cinquante points retenus, trente cinq ont trait à cette nappe.

L'extension de la nappe oblige de scinder la zone d'étude en trois grands secteurs relativement homogènes. Le premier concerne la région côtière et comprend le Calaisis et le Bassin versant audomarois. Le second a trait au bassin minier dans toute sa partie française et à la région lilloise. Le troisième secteur enfin regroupe toute la partie méridionale des deux départements.

Trois grandes configurations hydrogéologiques vont être rencontrées. La craie peut se trouver en affleurement en vallée ou sous recouvrement. La craie en affleurement de plateau reçoit directement l'eau de la pluie efficace. Le réservoir crayeux, dans la zone saturée siège de l'écoulement, est peu perméable à une profondeur où les fissures deviennent rares (chapitre 4). La nappe y possède un régime libre. La craie sous recouvrement alluvionnaire s'avère très aquifère dans la zone de circulation de l'eau. Elle peut recevoir d'importants débits de drainance en provenance des alluvions sous l'effet d'une dépression provoquée par des pompages. La nappe circule sous un régime semi-captif (ou semi-libre). La craie sous recouvrement argileux landénien devient de moins en moins perméable au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la limite d'affleurement. Elle ne reçoit aucun apport par son toit et se trouve sous un régime captif (sauf cas particulier isolé de dénoyage local sous l'effet d'un pompage). Dans le chapitre 4, les divers schémas hydrodynamiques possibles de l'aquifère crayeux seront examinés plus en détail.

a) Région côtière.

La région se caractérise par le pendage des terrains du Crétacé vers le NE. Au SW, les couches s'appuient sur les contreforts du Boulonnais; elles affleurent et se trouvent à une altitude élevée pour la région. Au NE, les couches s'enfoncent profondément sous les terrains de couverture tertiaire et quaternaire.



Fig. 33. — Carte de situation des puits en surveillance piézométrique (Archives B.R.G.M.).

Les six points de cette région, retenus pour leur évolution piézométrique, sont sensiblement alignés sur 45 km environ suivant une droite NW/SE. Cinq ouvrages sont situés sur plateau, tandis qu'un seul ouvrage est situé dans une vallée, celle de l'Aa. Aucun point ayant une durée d'observation suffisante n'a pu être retenu pour la partie captive de la nappe située au NE de la zone.

1° Evolution de la nappe sous plateau - Régime libre.

La surface de la nappe se tient généralement à plus de 10 m de profondeur en hautes eaux, l'amplitude des variations pouvant atteindre 10 m.

L'évolution au forage de Nort-Leulinghem (fig. 34), qui est la seule complète pour les 11 années retenues, fait apparaître 3 périodes bien définies. La première, relative aux années 1964 et 1965, caractérise un état de basses eaux. La seconde comprend les années 1966 à 1970 et a trait à une période de hautes eaux. La dernière, de 1971 à 1974, correspond à une période de basses eaux très prononcées. On constate que les étiages de périodes humides sont à une altitude supérieure aux crues des périodes sèches.

Les autres graphiques caractérisant les évolutions de niveau sous plateau sont différents suivant que l'on se trouve dans le Calaisis ou dans l'interfluve Aa/Lys de part et d'autre du Bassin Audomarois. Dans le Calaisis, les évolutions sont importantes, même en basses eaux, alors que vers la Lys, les niveaux ne présentent plus aucune évolution en basses eaux.

2° Evolution de la nappe dans la vallée de l'Aa sous recouvrement - Régime captif.

Le point retenu dans la vallée de l'Aa se situe à Blendecques sous recouvrement landénien. A cet endroit, la nappe de la craie n'a plus de relation directe avec le niveau de la rivière, comme cela se manifeste encore à Wizernes. Alors que l'évolution du niveau suit celle de la rivière à Wizernes et ne présente donc que de faibles variations, l'évolution à Blendecques résulte de l'influence de plusieurs facteurs (fig. 34). L'évolution du niveau présentée n'est en effet pas du tout comparable à celles qui ont été constatées sous les plateaux. Tout autant que l'alimentation naturelle de la nappe, ce sont les prélèvements dans la nappe qui conditionnent la variation du niveau. On peut ainsi noter la remontée annuelle du niveau au mois d'août due aux congés, la rupture d'équilibre de 1972 relative à l'absence d'alimentation de la nappe, les remontées de 1973 et 1974 dues à l'arrêt de prélèvements industriels et aux importantes précipitations de l'automne 1974.

b) Régions minière et lilloise.

Dans ces régions, le pendage des couches reste sensiblement le même que dans la région précédente au Sud-Ouest, mais la présence d'anticlinaux ou de failles modifie le schéma côtier plus simple.

Seize graphiques ont été retenus dans cette région, dix d'entre eux caractérisent l'évolution de la nappe sous les plateaux, tandis que les autres ont trait soit aux nappes alluviales, soit à la craie sous recouvrement.

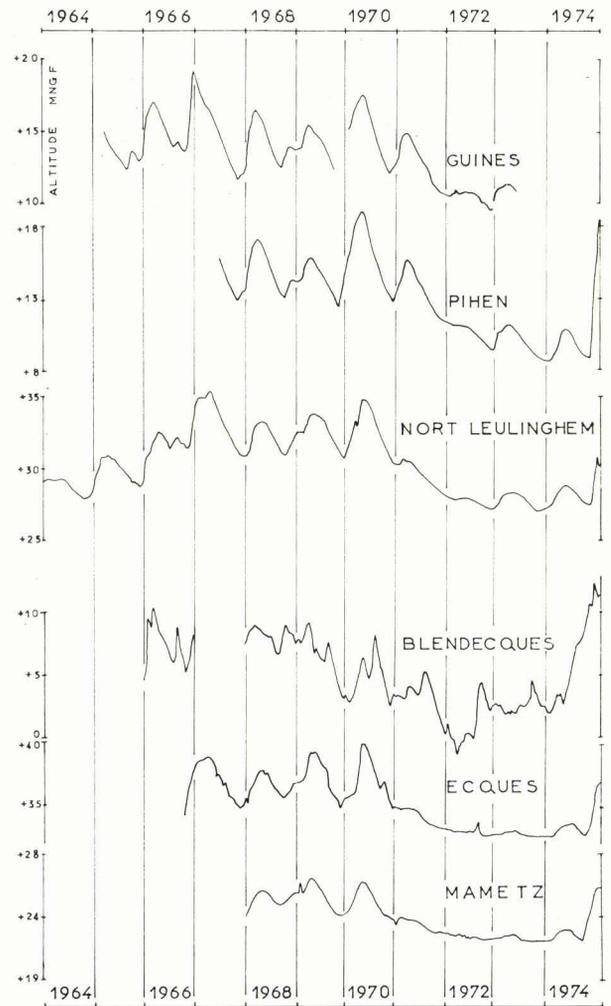


Fig. 34. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans la région côtière entre le Boulonnais et les Flandres (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

1° Evolution de la nappe sous plateau - Régime libre.

On retrouve des évolutions analogues à celles qui ont pu être constatées dans la région d'Aire-sur-la-Lys, l'amplitude des variations pouvant être variable d'un point à un autre. Parmi les points qui présentent des différences par rapport au schéma d'ensemble, on distingue trois ouvrages : le forage de Cysoing (fig. 35) dont le niveau de base est atteint chaque année et qui n'a que très partiellement subi la sécheresse, le forage d'Auberchicourt (fig. 36) marqué par de fortes amplitudes en hautes eaux et de faibles altitudes de crue en 1968 et 1969 et le forage de Lieu-St-Amand, dont les variations sont très faibles malgré la grande profondeur du niveau (fig. 36).

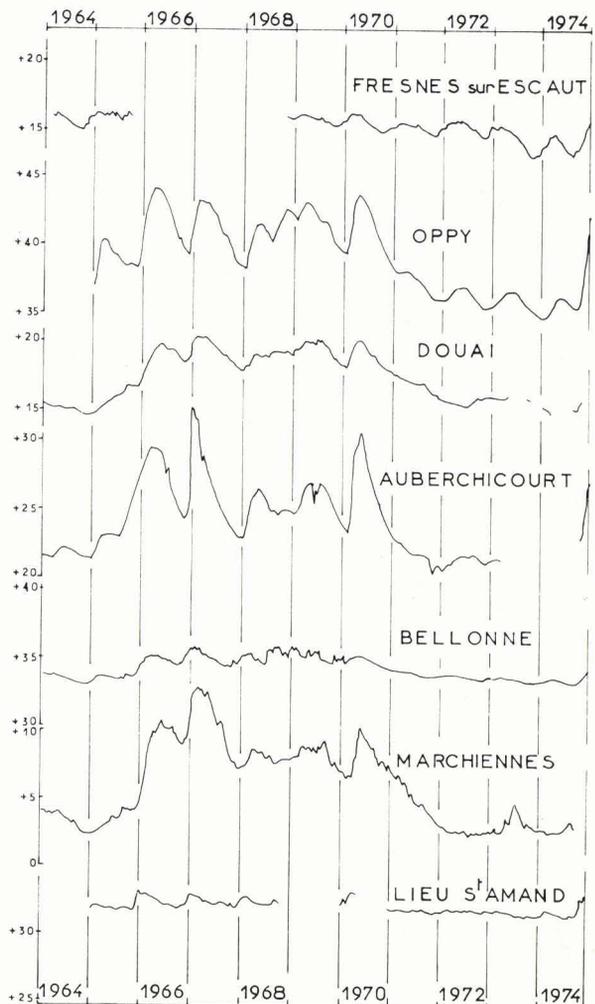
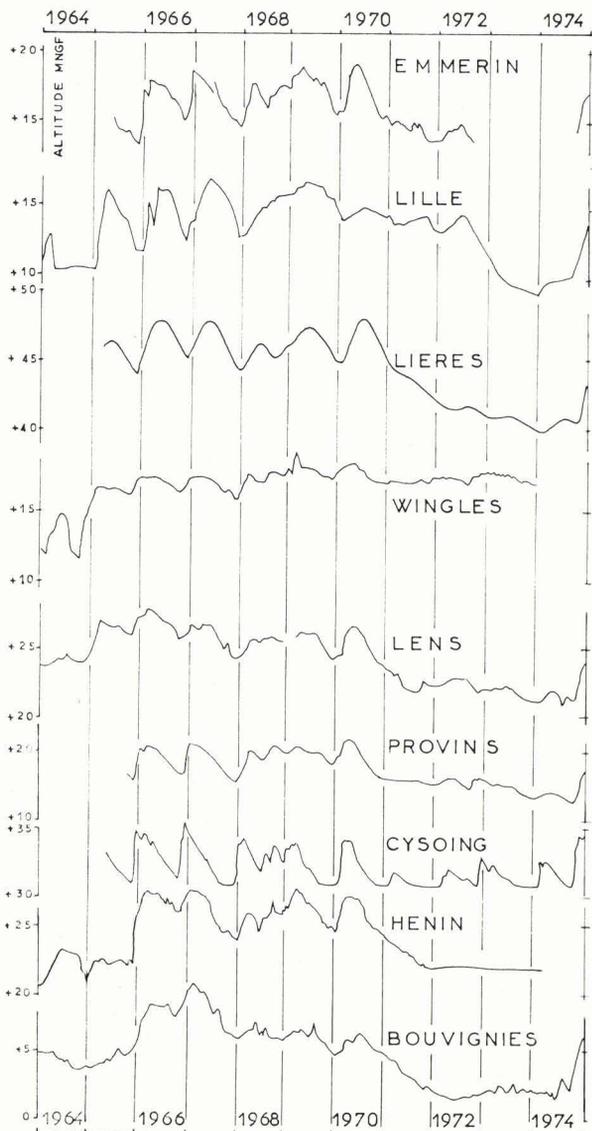


Fig. 35 (à gauche) et 36 (à droite). — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans les régions minière et lilloise (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

2° Evolution de la nappe dans les vallées (Deûle et Escaut) - Régime captif.

A Lille (fig. 35), on note deux périodes de "décrochement" du niveau d'eau : en 1964 et en 1973-1974. Il est particulièrement intéressant de noter, pour la deuxième période, que les niveaux n'ont commencé à réellement baisser qu'en 1972 alors que l'alimentation devint très faible dès le début de l'année 1970 et que les niveaux s'abaissèrent depuis cette époque pour la nappe libre (sous plateau).

A Wingles (fig. 35), c'est en 1964 que l'on note des niveaux d'eau extrêmement bas. Cette situation ne se retrouve pas en 1973-1974. Cette différence est due à la fluctuation des prélèvements. Très élevés jusque vers 1970, les prélèvements ont ensuite été réduits aux 2/3 de leur valeur antérieure.

A Fresnes-sur-Escout (fig. 36), c'est l'implantation récente d'un champ captant qui entraîne l'abaissement des niveaux d'étiage en 1973 et 1974.

3° Evolution de la nappe sous recouvrement tertiaire - Régime captif.

L'ouvrage de Bellonne, au Sud de Douai, subit des variations pluriannuelles de faible amplitude, mais réagit à de nombreuses sollicitations de courte durée (fig. 36).

Les trois graphiques de Bouvignies (fig. 35), Douai et Marchiennes (fig. 36) présentent de nombreuses homothéties. Ils se différencient néanmoins : les évolutions demeurent réduites en hautes eaux par rapport à ce qui se passe en nappe libre. Ils peuvent être scindés en deux groupes : Douai, d'une part, Marchiennes et Bouvignies, d'autre part, par le fait d'une certaine dégradation des niveaux dans la période de hautes eaux de 1966 à 1970 pour ces deux derniers points. Un début de surexploitation pourrait expliquer cette baisse.

c) Région méridionale des départements - Régime libre.

La craie est pratiquement toujours en affleurement sur toute cette région méridionale et la nappe s'écoule en régime libre. Les rivières jouent un rôle important dans le sens d'écoulement de la nappe. Dans la zone occidentale côtière située sur les flancs sud et est du Boulonnais et des collines de l'Artois, certains écoulements drainés par la Canche et la Haute Scarpe se dirigent vers le Sud de la zone. Dans la zone orientale traversée par les affluents de la Sensée et par le Haut-Escaut, les écoulements se dirigent tous vers le Nord.

d) Evolution de la nappe en zone maritime (Bordure du Boulonnais, Haut-Bassin de l'Aa et Bassin de la Canche).

Cette zone côtière présente des évolutions piézométriques inhabituelles. Les nappes circulent dans le Cénomaniens et le Turonien. Les variations de niveau sont généralement très importantes à Guines, Pihen, Nort-Leulinghem (fig. 34), Coulomb, Preures, Coupelle, Fontaine, Valhuon (fig. 37), Haravesnes et Tincques (fig. 38).

La période de basses eaux de 1973 et 1974 y est bien marquée avec, cependant, une remontée saisonnière des niveaux consécutive à la forte pluviosité de cette région. Notons la particularité de l'évolution du niveau à Coulomb (fig. 37). Le niveau maximal est écrié chaque année du fait de l'affleurement de la nappe et de l'apparition d'émergences (ce point se trouve dans une vallée sèche).

e) Evolution de la nappe en zone continentale (affluent de la Sensée et Haut-Bassin de l'Escaut).

Le schéma d'évolution générale des nappes en régime libre est respecté, l'amplitude des variations, étant variable suivant le lieu, est moyenne (2 à 3 m) à Achicourt, Metz-en-Couture, Vertain (fig. 38) ; forte (3 à 4 m) à Barastre, Marez (fig. 38) et très forte (5 m) à Ablain (fig. 38).

2) Evolution piézométrique des autres nappes.

a) Nappe des sables pissards.

Les quatre postes piézométriques des Flandres maritimes (fig. 39), à Calais, Offekerque (deux) et Bourbourg,

intéressent une nappe à régime libre et de très faible profondeur (0 à 2,5 m), d'où une forte sensibilité aux précipitations (profils en dents de scie). La comparaison avec l'évolution mensuelle de l'excédent à Dunkerque est grossière. Cependant, une chute sensible des niveaux s'observe à la station de Calais de 1970 à 1973. Pour les autres stations, le seuil d'étiage ne dépasse pas un certain niveau. Une explication serait à trouver dans un niveau de base proche (wateringues, mer). L'étiage a lieu vers novembre-décembre et la remontée vers mars-avril.

b) Nappe des sables tertiaires.

Deux postes piézométriques permettent de connaître l'évolution de la nappe des sables landéniens (fig. 40), en régime libre dans le bassin d'Orchies (Bouvignies) et captif dans les Flandres (Steenbecque).

A Bouvignies, la nappe toujours proche du sol (0 à 2,5 m) reste soumise aux moindres fluctuations pluviométriques. On observe une identité des profils avec ceux de la nappe côtière.

A Steenbecque, le régime captif et l'éloignement de la zone d'alimentation entraînent des fluctuations plus régulières en raison de l'amortissement des variations de charge. Un décalage d'un à deux mois apparaît pour la remontée de la nappe (en juin-juillet). L'amplitude des oscillations piézométriques atteint environ 1 m.

c) Nappes des grès et calcaires jurassiques (fig. 41).

Aux stations de Wimereux et de Wierre-Effroy, les nappes des grès du Jurassique possèdent un régime libre. Les nappes sont proches du sol (0 à 3,5 m) : des alimentations rapides donnant un profil dentelé. On remarque un abaissement important des niveaux en période estivale (vacances des mois de juillet et août). A la station de Wimereux, une remontée brutale des niveaux apparaît à la fin de 1974, après une chute régulière pendant les années 1971 à 1974.

A la station de St-Léonard, la nappe captive des calcaires du Séquanien se caractérise par de très fortes fluctuations piézométriques entre l'étiage (novembre-décembre) et les hautes eaux (avril-mai) atteignant 5 à 6 m. Une chute régulière des niveaux de 1970 à 1974 en période de sécheresse indique la faible réserve de la nappe par rapport aux prélèvements effectués.

La comparaison du profil piézométrique avec celui des bilans calculés à la station de Desvres montre une analogie frappante avec un décalage d'un mois environ.

d) Nappes des calcaires primaires.

1° Région lilloise - Régime captif (fig. 42).

Dans la région lilloise, la nappe du calcaire carbonifère possède un régime captif, les points d'observation sont à grande distance (25 km) des affleurements situés en Belgique (Tournai).

Sur le graphique de la station d'Hem on remarque une chute progressive des niveaux (1,25 m/an) depuis 1964 avec une accélération depuis 1971 (2 m/an) à mettre en relation avec l'exploitation intensive de la nappe et une mauvaise

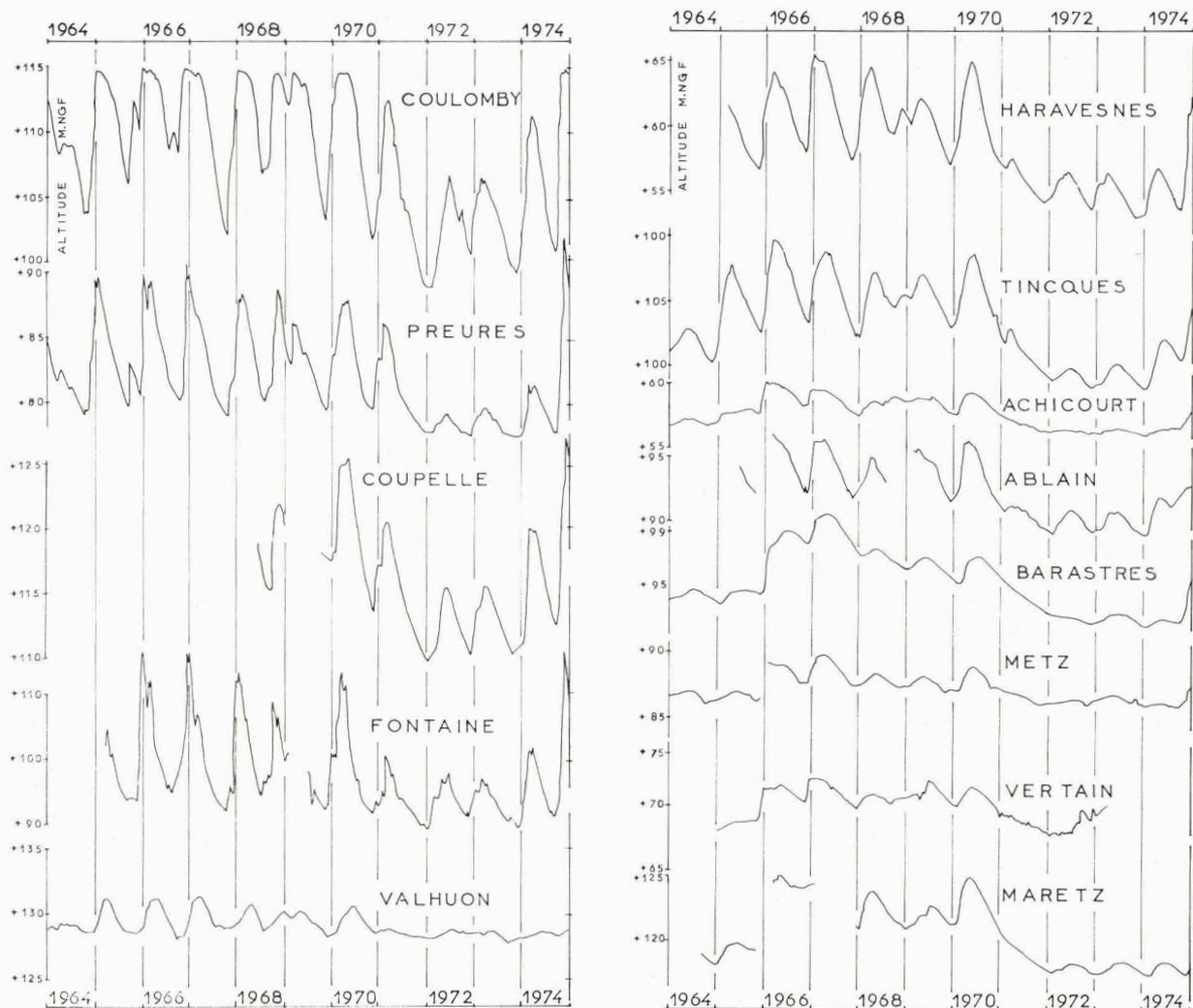


Fig. 37 et 38. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans la région méridionale des deux départements (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

alimentation. On remarquera une remontée saisonnière en juillet-août, consécutive à l'arrêt des activités industrielles.

La station de Bondues, située à l'extrémité NW du synclinal de Roubaix, possède un graphique similaire au précédent. La baisse régulière des niveaux de 1962 à 1970 oscille autour de 1 m/an. A partir de 1971, la décroissance atteint 2 m/an.

2° Avesnois - Régime libre (fig. 42).

Aux stations piézométriques de Marbaix et de Baives, les battements de la nappe, proche du sol (0 à 5 m), apparaissent importants. Un niveau de base constant se manifeste sur le graphique de Baives. Le niveau de trop-plein qui limite la remontée de la nappe est constitué par la rivière proche.

Une chute progressive des niveaux en liaison avec la variation des bilans de la station d'Avesnelles est décelable de 1968 à 1972. La remontée de la nappe débute dès la fin de l'automne avec un maximum en février.

Pour la station de Bachant, on constate une sensibilité de la nappe vis-à-vis des variations pluviométriques (station d'Avesnelles en 1968). La remontée de la nappe s'effectue en automne de façon brutale avec un maximum en janvier. Une longue période (de 1969 à 1973) s'écoule sans variation en raison d'un pompage.

3) Conclusions.

De multiples types de variations morphologiques de la surface piézométrique des nappes du Nord de la France

sont mis en évidence. Les causes de la différenciation des évolutions sont nombreuses et l'on peut citer l'affleurement ou le recouvrement, les caractéristiques de l'aquifère, le régime d'alimentation à partir des pluies, le régime libre ou captif de la nappe dans son aquifère, la profondeur du toit de l'aquifère et la position du piézomètre vis-à-vis de l'exutoire de la nappe.

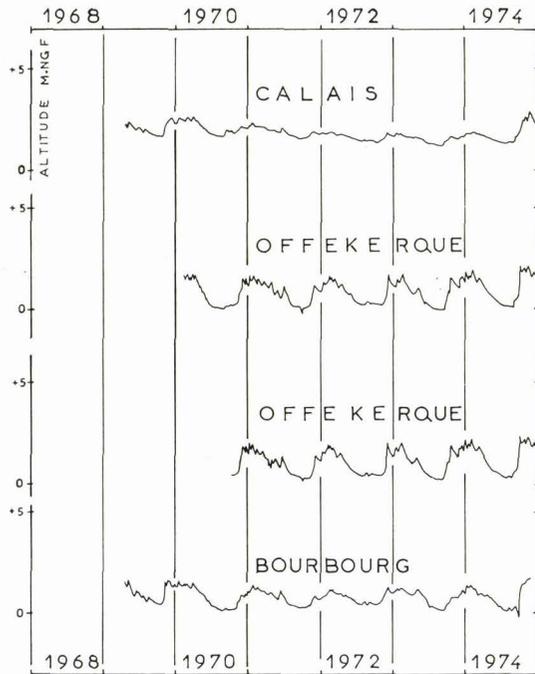


Fig. 39. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe des sables pissards en Flandres maritimes (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA)

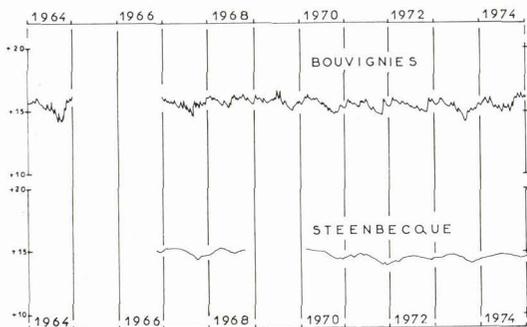


Fig. 40. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe des sables landéniens en Flandres et dans le Bassin d'Orchies (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

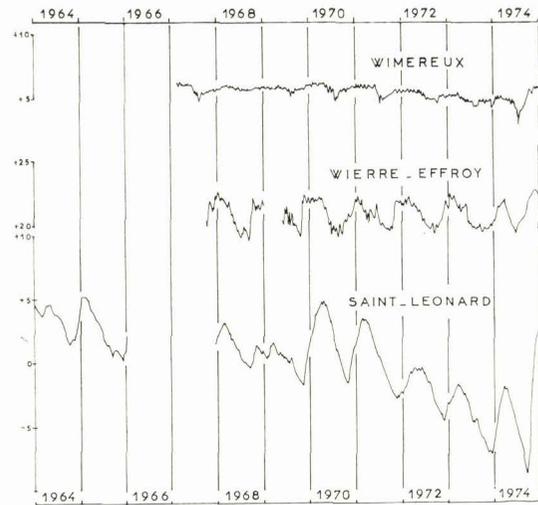


Fig. 41. — Graphiques de l'évolution piézométrique des nappes des grès et calcaires du Jurassique dans le Boulonnais (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

Une nappe libre proche du sol, comme celle des sables peu perméables du Landénien, réagit différemment d'une nappe captive très profonde comme celle très perméable du calcaire carbonifère sous Roubaix-Tourcoing. Alors que la première possède un niveau interannuel moyen constant et semble même peu affectée par la baisse périodique de la valeur de l'alimentation annuelle, la seconde se caractérise par un niveau d'eau en baisse permanente.

La surface piézométrique de la nappe de la craie réagit fort différemment, vis-à-vis des variations des débits d'alimentation, de pompage et d'émergence, selon qu'elle se trouve en régime libre, semi-captif ou captif.

En régime libre, nous constatons la liaison étroite des fluctuations piézométriques et des variations de l'alimentation par la pluie efficace. L'apparition d'émergences de la nappe de la craie dans les vallées provoque une auto-régulation du niveau piézométrique.

En régime captif, les variations de la surface piézométrique de la nappe sont fortes en raison de la faible valeur du coefficient d'emménagement et de l'absence d'une alimentation directe. Une baisse importante du niveau de la nappe, liée à des débits de pompage élevés, n'est pas automatiquement le signe d'une surexploitation des réserves en eau en raison de l'inertie de mise en place de nouveaux rapports hydrodynamiques (drainance, perte, disparition d'émergences) qui agiront latéralement.

En régime semi-captif, la nappe bénéficie du phénomène de la drainance, à partir des terrains de couverture semi-perméables, drainance qui lui permet de pallier les périodes de faible alimentation ou les excès de prélèvements (chapitre 4). Nous verrons par la suite (chapitre 5) le grand rôle joué par la drainance dans l'équilibre du bilan hydrologique des systèmes aquifères ».

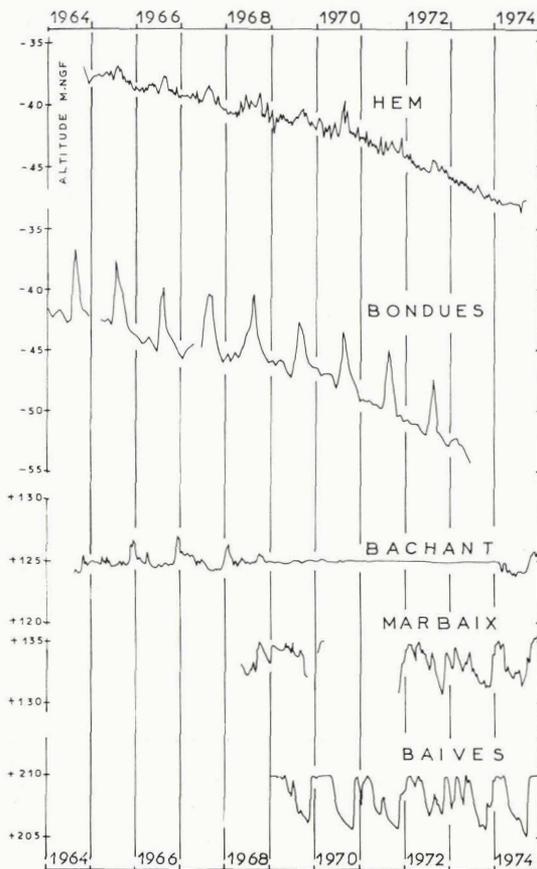


Fig. 42. — Graphiques de l'évolution piézométrique des nappes des calcaires paléozoïques dans la région de Lille et dans l'Avesnois (d'après Crémille et Mania, 1976, Rapport B.R.G.M., 76 SGN 123 NPA).

IV. — ANALYSE QUANTITATIVE ET ESSAIS DE RESTITUTION DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

L'étude quantitative des fluctuations piézométriques rend compte des tendances générales des variations saisonnières ou interannuelles qui se traduisent de manière très différente selon le contexte hydrogéologique. Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère, la position des limites amont et aval des bassins, la profondeur de la nappe et le temps de tarissement sont des paramètres majeurs intervenant dans le mode et la chronologie des événements piézométriques. Des formulations analytiques ont été proposées pour des écoulements parallèles prove-

nant de recharges brusques ou progressives sur des aquifères d'extension infinie ou limitée (80).

La reconstitution par le calcul des fluctuations piézométriques d'une nappe à partir de telles hypothèses permet d'affiner peu à peu les paramètres mis en jeu, donc de mieux connaître l'aquifère et de prévoir son comportement vis-à-vis de contraintes naturelles ou provoquées. Le mode d'alimentation des aquifères sera particulièrement intéressant à suivre. Après un bref rappel théorique, une reconstitution des fluctuations piézométriques de la nappe de la craie sera effectuée à l'aide d'un modèle hydrologique direct (6).

1) Rappel théorique sur la loi de l'évolution de la surface piézométrique.

Le comportement d'une nappe initialement horizontale, à la suite d'une remontée brutale ou d'un abaissement brusque h_0 de la cote de l'exutoire, peut être exprimé par les relations suivantes équivalentes (6, 80) :

$$(11) \quad h(x, t) = h_0 \left(1 - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{erfc} \frac{2nX + x}{2\sqrt{Tt/S}} + \operatorname{erfc} \frac{2(n+1)X - x}{2\sqrt{Tt/S}} \right] \right)$$

ou

$$(12) \quad h(x, t) = h_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \frac{(2n+1)^2 \pi^2 T t}{\exp \frac{(2n+1)^2 \pi^2 T t}{4X^2 S}} \cdot \sin(2n+1) \frac{\pi x}{2X}$$

avec h , la charge à un instant t et à une distance x de l'exutoire ; h_0 , la charge initiale de la nappe sur l'exutoire ou valeur de l'abaissement instantané de la cote de l'exutoire ; erfc , une fonction complémentaire d'erreur :

$$\operatorname{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^{\infty} e^{-x^2} \cdot dx$$

T, la transmissivité de l'aquifère ; S, le coefficient d'emménagement ; X, la distance entre des limites amont et aval de l'aquifère le long de la ligne de courant considérée ; x, la position du piézomètre de surveillance par rapport à son exutoire.

On suppose un écoulement uni-dimensionnel et un aquifère horizontal dont la diffusivité T/S reste constante avec les conditions suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } x = 0 \rightarrow h_0 \\ x = X \rightarrow \frac{\delta h}{\delta x} = 0 \end{array} \right\} \text{ quel que soit } t$$

$t = 0, h = h_0$ quel que soit x appartenant à l'intervalle $[0, X]$.

Le flux nul amont peut être représenté par une limite de bassin versant souterrain (crête piézométrique) ou par une discontinuité physique de l'aquifère (faille, versant de vallée, etc...).

La valeur de diffusivité (T/S) peut être atteinte en comparant la période de tarissement de la nappe à une évolution théorique à l'aide d'abaques représentatifs de la fonction analytique exposée précédemment et tabulée (80). Il est nécessaire d'analyser soit un profil piézométrique le long d'une ligne de courant à l'aide de plusieurs puits d'observation, soit l'évolution de la surface piézométrique obtenue sur un seul puits.

Cette première étape nécessaire à la définition des paramètres physiques est suivie d'une reconstitution temporelle tenant compte de l'évolution des apports de pluie efficace et des mécanismes de transfert vertical de la surface du sol à la nappe.

2) Modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO.

Le modèle SIMERO (6) a pour tâche de simuler le ruissellement, l'évaporation réelle, la recharge ou la décharge de la nappe, les variations de succion de la teneur en eau du sol, les variations de pression dans la nappe ou le débit de l'exutoire de la nappe. Un rappel succinct des diverses opérations effectuées par le programme sera présenté.

a) Le bilan.

Le bilan hydrique est basé sur l'hypothèse de Mero (80) qui envisage l'existence de deux

réservoirs se surimposant à l'aquifère principal. Chacun des réservoirs admet une réserve maximale de rétention de l'eau au-delà de laquelle l'alimentation verticale s'effectue véritablement. Le mécanisme de ruissellement est également pris en compte (6).

b) Le transfert à travers le milieu non saturé.

Le transfert de l'eau d'infiltration à travers le milieu non saturé se répercute sur les fluctuations piézométriques par l'existence d'un décalage " temps " entre la tombée de la pluie et la remontée de la nappe.

Cette loi d'écoulement a pour expression (80) :

$$(13) \quad h(z, t) = \frac{2F\sqrt{Kt/W}}{K} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left(\text{ierfc} \frac{(2n+1)Z - z}{2\sqrt{Kt/W}} - \text{ierfc} \frac{(2n+1)Z + z}{2\sqrt{Kt/W}} \right)$$

ou

$$(14) \quad h(z, t) = \frac{F.Z}{K} \left(\frac{z}{Z} - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \sin(2n+1) \frac{\pi z}{2Z} \cdot \exp \left(- \frac{(2n+1)^2 \pi^2 Kt}{4Z^2 W} \right) \right)$$

avec ierfc, fonction complémentaire double d'erreur ; $h(z, t)$, la charge en un point à la distance z au-dessus de la nappe et à l'instant t ; F , le flux constant imposé à l'amont du système à la distance $z = Z$; Z , la profondeur de la nappe sous la surface du sol ; K , la perméabilité du milieu ; W , la capacité en eau du milieu.

D'autres calculs, effectués pour une succession de recharges, permettent d'évaluer les flux sortants de la zone non saturée.

c) Le transfert dans la nappe.

Le transfert des pressions (H), des débits (Q) et des volumes (V) à la suite d'une série de recharges sera calculé en effectuant la som-

me des effets de chacune par le processus de la convolution (6) :

$$(15) \quad H(x, t) = \int_0^t \phi(\tau) \cdot h(x, t - \tau) d\tau$$

$$(16) \quad Q(0, t) = \int_0^t \phi(\tau) \cdot q(0, t - \tau) d\tau$$

$$(17) \quad V(0, t) = \int_0^\infty q(0, t) dt$$

avec τ : variation de l'échelon unitaire.

3) Application à la nappe de la craie du bassin de la Canche.

a) Exposé des problèmes.

Le bassin de la Canche (fig. 43) a été choisi dans le cadre de l'application de la restitution calculée des niveaux d'eau en raison d'une répartition relativement homogène des points de

surveillance piézométrique (au total seize). Le bassin de la Canche a fait l'objet d'une étude hydrogéologique approfondie (221) et d'une recherche sur les bilans d'écoulement souterrains et totaux (chapitre 2). Par ailleurs, l'étude du projet de transfert des eaux du bassin de la Canche vers celui de la vallée de la Lys avait fait appel au programme SIMERO pour déterminer les caractéristiques hydrauliques du massif crayeux interfluve (181). La période de calage envisagée relativement courte (janvier à décembre de l'année 1972) a permis une assez bonne restitution des courbes piézométriques calculées, assez proche de la piézométrie mesurée sur le terrain. Les anomalies ont été imputées soit à l'hétérogénéité de l'aquifère crayeux, soit à la réduction d'épaisseur des niveaux crayeux.

La répartition des valeurs de diffusivité (T/S) obtenues varie lorsque l'on se dirige de la crête piézométrique de la nappe (sur le plateau à la limite des bassins versants) vers la vallée. Ces valeurs oscillent respectivement de $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ à $7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

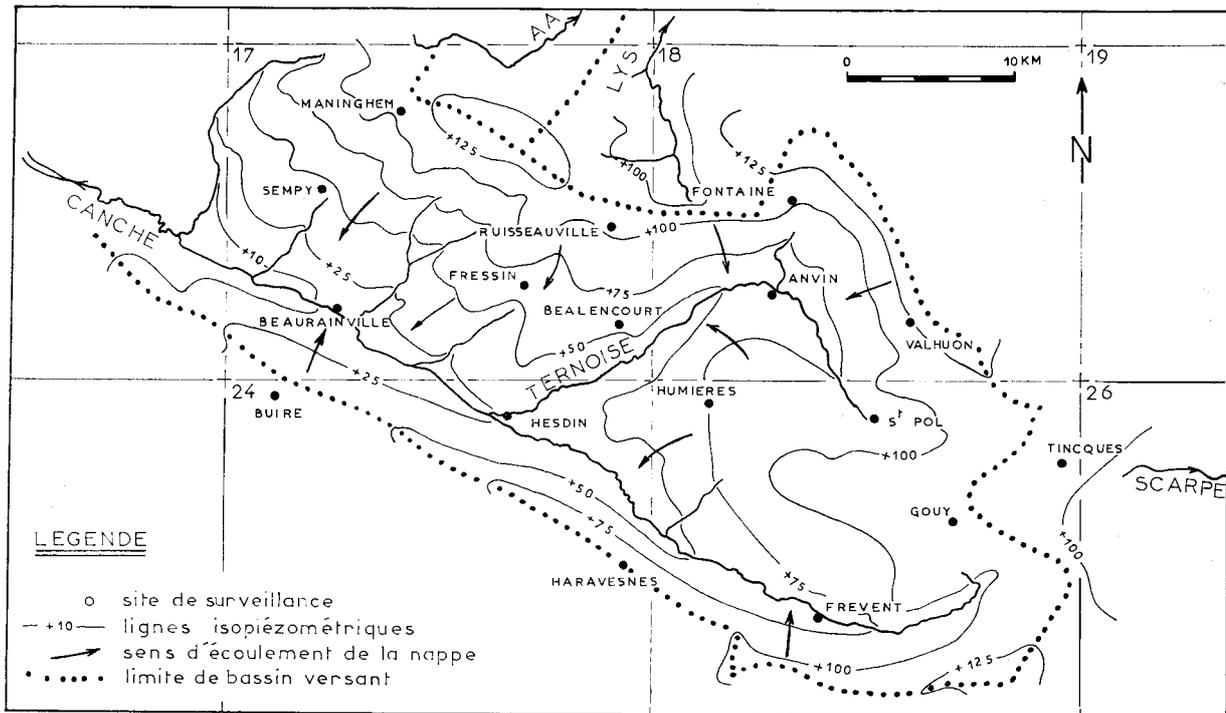


Fig. 43. — Répartition géographique des points de surveillance piézométrique du bassin de la Canche. (Archives B.R.G.M.).

Le dôme piézométrique qui sépare les bassins de la Canche et de la Lys joue ainsi le rôle d'une barrière hydraulique. Le modèle SIMERO a été appliqué à l'ensemble des piézomètres du bassin de la Canche sur une échelle temporelle interannuelle (1966 à 1972) pour répondre aux préoccupations suivantes :

- peut-on réaliser une simulation interannuelle de la piézométrie de la nappe de la craie ?
- l'hétérogénéité de l'aquifère crayeux se manifeste-t-elle au cours des oscillations saisonnières ou interannuelles de la nappe ?

b) *Caractéristiques hydrauliques - Courbes de tarissement de la nappe de la craie.*

La valeur de la diffusivité peut être dégagée par l'examen de périodes de tarissement de la nappe. L'étude de chroniques piézométriques de puits d'observation a conduit à une analyse des diverses périodes de tarissement (été, automne) à partir de l'abaque de la figure 44. Les valeurs expérimentales de terrain (fig. 45) ont été confrontées aux diverses courbes théoriques correspondant à des distances réduites x/X variant de 0 à 1. A l'aide de l'analyse graphique, ont été définies les valeurs des distances réduites puis des diffusivités qui permettent d'assurer la base des calculs futurs. Lors des ajustements, une retouche fut apportée aux valeurs de base.

L'altitude des puits d'observation (tabl. XII) varie de la cote + 26 (fond de la vallée de la Canche) à + 187 m NGF (plateau) et, parallèlement, la profondeur de la nappe oscille entre 2,5 et 61 m. La longueur des lignes de courant passant par chacun des ouvrages peut varier de 210 à 9.000 m. La distance des puits aux exutoires (rivières ou sources) fluctue entre 200 et 4.200 m. L'épaisseur totale de l'aquifère crayeux en chacun des points passe de 10 à 50 m et les amplitudes moyennes interannuelles de la fluctuation piézométrique de 0,6 à 20 m. La grande diversité des sites hydrogéologiques se manifeste par la variabilité de l'épaisseur de l'aquifère et des fluctuations de la nappe.

Les périodes de tarissement, prises en compte dans l'analyse graphique, atteignent en règle générale 200 à 250 jours pour des amplitudes piézométriques très variables. Les valeurs des distances réduites restent souvent comprises entre 0,5 et 1, sauf pour le site de Bealencourt (0,30). Le site de Manninghem montre une

valeur forte de 0,99 qui traduit une vidange lente de l'aquifère. Les sites d'Hesdin, St-Pol et Frévent, quant à eux, laissent supposer des liaisons étroites de la nappe de la craie et des rivières (distances réduites : 0,8 à 0,9).

c) *Données hydrométriques et climatologiques nécessaires à la simulation.*

Pour la période 1966 à 1972, ont été choisies les données journalières relatives aux précipitations (station d'Hesdin), au débit total de la Canche (station de Brimeux) et au débit de ruissellement (chapitre 2). Les valeurs d'évapotranspiration (hypothèse de Thornthwaite) ont été fournies par quinzaine. L'utilisation d'un coefficient correcteur a permis d'ajuster les débits total et de ruissellement à chaque ligne de courant hydraulique individualisée. Les données numériques ont été stockées en mémoire et rappelées à chaque simulation.

Après quelques essais, nous obtenons de bonnes fluctuations piézométriques lorsque les limites maximales de remplissage du premier réservoir (U) et du deuxième réservoir (L) sont respectivement égales à 15 mm et à 150 mm. L'évapotranspiration et le ruissellement sont déduits de la pluie et conduisent au calcul d'une lame d'eau infiltrée dans la nappe. A l'analyse journalière du bilan ($BILAN = PLUIE - EVAPOTRANSPIRATION - RUISSALLEMENT - INFILTRATION$) fait suite l'analyse mensuelle qui permet de traduire les périodes de déficit et d'excédent. Ainsi, pour l'exemple choisi de la station d'Humières (fig. 46), on remarque l'apparition d'un déficit hydrique important (160 à 170 mm) à partir du mois de mai 1970 qui se traduira par une baisse régulière des niveaux de la nappe. Chaque accident de la courbe des fluctuations des bilans mensuels est repérable de manière plus ou moins forte, compte tenu des divers paramètres du site envisagé, sur les courbes de la variation piézométrique calculée. Le graphique de l'excédent mensuel de la station de St-Pol (chapitre 2) est comparable à celui obtenu ici. On soulignera le faible déficit de l'année 1968 qui se traduit par un tarissement très court de la nappe bien visible sur les graphiques piézométriques expérimentaux et calculés. A une échelle interannuelle, le bilan hydrique des seize sites étudiés (tabl. XIII) par ordre d'excédents décroissants voit la suite : 1966, 1968, 1967, 1969, 1970, 1971 et 1972. Quelques permutations peuvent apparaître pour

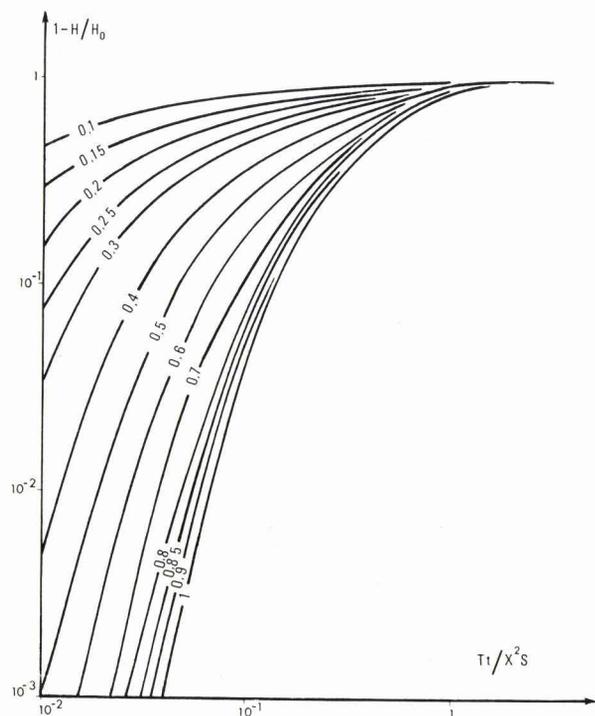


Fig. 44. — Courbes théoriques du tarissement d'une nappe aquifère pour un piézomètre isolé (à partir des valeurs tabulées par Degallier, 1975).

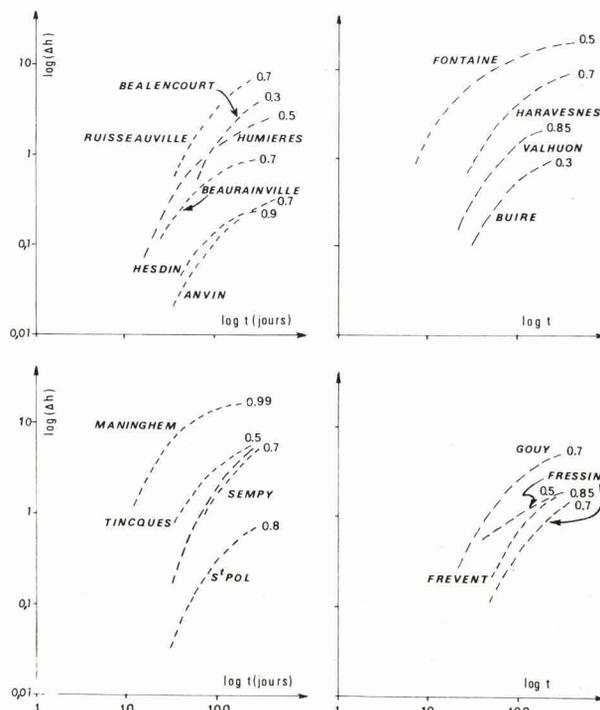


Fig. 45. — Analyse des courbes de tarissement de la nappe de la craie dans le bassin de la Canche. Estimation de la valeur des distances réduites.

PUITS	INDICE BRGM	Zb	Pr	L	Dex	Nb	Ep	Année de tarissement	Temps de tarissement	Dis	Ampl.
SEMPY	17-1-51	69,5	31,0	4000	600	34,0	20,0	1971et1972	204et154	0,70	8
MANNINGHEM	17-2-37	187,0	61,0	4500	3700	70,0	17,0	1971	227	0,99	22
BEAURAINVILLE	17-6-04	29,5	16,8	3200	200	11,0	33,0	1967	237	0,70	1,5
FRESSIN	17-7-19	98,0	15,5	1250	500	30,0	10,0	1965et1967	249et162	0,7/0,5	2
RUISSEAUVILLE	17-8-03	136,0	30,0	5700	4000	70,0	15,0	1967	221	0,70	6
BEALENCOURT	17-8-25	69,0	13,0	5500	2500	35,0	16,0	1967	204	0,30	3
FONTAINE	18-2-06	118,0	20,0	9000	2000	80,0	10,0	1970	236	0,50	20
ANVIN	18-6-13	60,0	3,8	6000	200	55,0	10,0	1966	249	0,70	1
VALHUON	18-7-05	161,0	33,5	6000	4000	80,0	15,0	1970	207	0,85	3
HESDIN	24-3-15	26,0	3,3	210	200	22,0	35,0	1966	245	0,90	0,6
HARAVESNES	24-8-05	99,0	42,0	3500	3100	40,0	30,0	1970	238	0,70	12
HUMIERES	25-1-44	122,0	48,4	6000	4200	25,0	6,0	1967	268	0,50	2
GOUY	25-3-08	141,5	34,0	4300	2300	104,0	15,0	1967	251	0,70	8
SAINT POL	25-3-14	87,0	2,5	4000	300	93,0	50,0	1971	233	0,80	1,8
TINQUES	25-4-03	116,5	15,5	5000	3000	100,0	23,0	1970	229	0,50	8
FREVENT	25-6-13	74,0	13,6	4700	300	68,0	50,0	1967	235	0,85	1,6

Tableau XII. — Caractéristiques de la nappe de la craie et des puits d'observation dans le bassin de la Canche.

Légende : Zb, altitude de l'ouvrage en m NGF. — Pr, profondeur de la nappe en m au début de 1966. — L, longueur de la ligne de courant en m. — Dex, distance du puits à l'exutoire en m. — Nb, altitude du niveau de base en m NGF. — Ep, épaisseur de l'aquifère en m. — Dis, distance réduite graphique (x/X). — Ampl., amplitude annuelle moyenne des variations de la surface piézométrique en m.



les années 1970 et 1971 à Sempy, Manninghem, Ruisseauville, Bealencourt et Humières. L'excédent hydrique annuel peut osciller entre + 0,26 (Anvin - Valhuon) et + 18,98 mm (Humières). Le déficit hydrique annuel fluctue entre - 8,70 mm (St-Pol) et 0,43 mm (Tincques).

d) Paramètres physiques de l'aquifère crayeux après ajustement.

Une dizaine de simulations par site a été nécessaire pour caler la piézométrie calculée sur la piézométrie réelle. Ce calage par tâton-

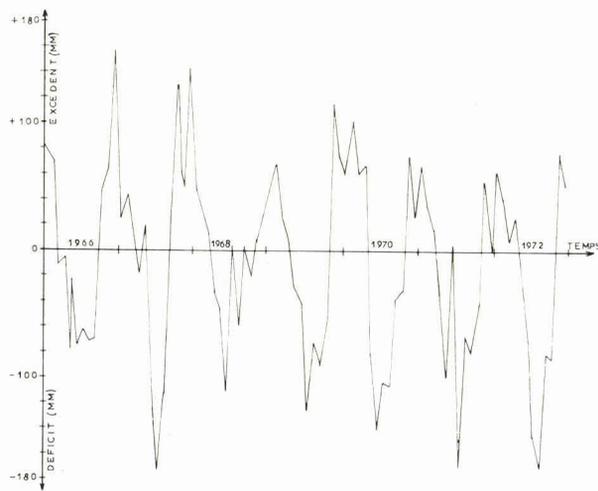


Fig. 46. — Exemple de variation du bilan mensuel selon l'hypothèse Mero. Site d'Humières (25/1/44).

LIEU	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
SEMPY	17,16	11,46	11,80	5,87	1,83	2,05	- 5,72
MANNINGHEM	16,97	11,34	11,67	5,81	1,81	1,99	- 5,77
BEAURAINVILLE	12,79	8,55	9,10	4,08	1,22	0,54	- 6,89
FRESSIN	5,01	3,36	3,16	2,01	0,13	- 2,15	- 8,96
RUISSEAUVILLE	16,97	11,34	12,07	5,41	1,81	1,99	- 5,77
BEALENCOURT	17,96	12,00	9,74	8,66	1,95	2,33	- 5,51
FONTAINE	6,99	4,68	4,57	2,24	0,40	1,46	- 8,43
ANVIN	11,98	8,01	8,52	3,82	1,11	0,26	- 7,10
VALHUON	11,98	8,01	8,12	4,22	1,11	0,26	- 7,10
HESDIN	14,38	9,61	10,23	4,58	1,44	1,09	- 6,46
HARAVESMES	8	5,35	5,69	2,56	0,55	- 1,11	- 8,16
HUMIERES	18,98	13,67	13,09	6,45	2,09	2,68	- 5,24
GOUY	8	5,35	5,29	2,96	0,55	- 1,11	- 8,16
ST POL	6	4,02	3,87	2,30	0,27	- 1,81	- 8,70
TINCQUES	9,98	6,67	7,10	3,19	0,83	- 0,43	- 7,64
FREVENT	8	5,35	5,69	2,56	0,55	- 1,11	- 8,16

Tableau XIII. — Bilans annuels (en mm) de la nappe de la craie aux différents sites hydrogéologiques testés dans le bassin de la Canche (BILAN = PLUIE — EVAPOTRANSPIRATION — RUISSELLEMENT — INFILTRATION).

nements successifs ne peut être réalisé que par la modification des différents paramètres physiques et des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère dont les valeurs finales sont reportées dans le tableau XIV.

1° Le transfert en milieu non saturé.

Le transfert en milieu non saturé introduit un retard dans l'alimentation de la nappe et permet d'expliquer le décalage entre les courbes piézométriques et le diagramme des déficits et des excédents hydriques. En toute logique, ce retard est d'autant plus important que la nappe est profonde. Le temps maximum de transfert de la lame d'eau infiltrée en milieu non saturé varie de 1 à 15 jours.

2° Le transfert en milieu saturé.

Le transfert dans la nappe d'eau issu du milieu non saturé est à l'origine des recharges de la nappe et de ses vidanges en cas d'absence de transfert. Les paramètres essentiels en de hors de celui du temps (incrémenté automatiquement par le programme) sont ceux du coefficient d'emménagement S, de la transmissivité T, de la distance réduite (x/X) et de la longueur de la ligne de courant envisagée X. Il a été procédé à une recharge initiale de la nappe pendant une période de dix années (par répétition au départ de l'année 1966) de manière à se placer dans de bonnes conditions de simulation. Cette longue période initiale (3.650 jours) est justifiée par le fait que les lignes de courants atteignent parfois 9 km de longueur entre la limite amont (côte piézométrique) et l'exutoire de la nappe. Il faut signaler qu'en pays crayeux cet exutoire n'est pas toujours à une place bien fixe et on assiste très souvent à son déplacement lorsqu'il s'agit d'une source. Quatre modifications ont été ainsi apportées en cours de calage aux valeurs de ligne de courant des sites de Ruisseauville, Humières, Gouy et St-Pol. La diffusivité (rapport T/S) en règle générale, est proche des valeurs moyennes $2,0 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ (8 sites) dans les vallées et $7 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (8 sites) sur les plateaux. Une valeur très faible ($3,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) affecte le site d'Anvin. Ces valeurs de diffusivité sont proches de celles obtenues dans l'interfluve Ternoise-Lys.

Au sujet de la différenciation des deux termes de la diffusivité, un point délicat apparaît. En effet, les valeurs du coefficient d'emménagement estimées avant la simulation sont net-

PUITS	INDICE BRGM	L en m	Dis	Tav en m ² /s	Sav	Sap	Tap m ² /j	Tap en m ² /s	Dcal en m ² /s	Tmax. jours	PL	VL
SEMPY	17-1-51	4000	0,75	1 · 10 ⁻³	9,4 · 10 ⁻⁴	4 · 10 ⁻²	250	2,90 · 10 ⁻³	7,2 · 10 ⁻¹	5	+	
MANNINGHEM	17-2-37	4500	0,99	1,1 · 10 ⁻³	4,3 · 10 ⁻⁵	4 · 10 ⁻²	125	1,45 · 10 ⁻³	3,6 · 10 ⁻²	10	+	
BEURAINVILLE	17-6-04	3200	0,75	4 · 10 ⁻²	1,9 · 10 ⁻²	1 · 10 ⁻¹	200	2,31 · 10 ⁻³	1,6 · 10 ⁻¹	5		+
FRESSIN	17-7-19	1250	0,65	1 · 10 ⁻²	6,1 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻¹	300	3,47 · 10 ⁻³	1,7 · 10 ⁻¹	15		+
RUISSEAUVILLE	17-8-03	4500	0,75	4 · 10 ⁻⁴	2,4 · 10 ⁻⁴	3 · 10 ⁻²	400	4,6 · 10 ⁻³	2,2 · 10 ⁻¹	5	+	
BEALENCOURT	17-8-25	5500	0,30	2,8 · 10 ⁻³	1,5 · 10 ⁻²	6 · 10 ⁻²	484	5,6 · 10 ⁻³	7,6 · 10 ⁻¹	15		+
FONTAINE	18-2-06	9000	0,50	1,4 · 10 ⁻³	2,3 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻²	300	3,47 · 10 ⁻³	3,4 · 10 ⁻¹	1		+
ANVIN	18-6-13	6000	0,70	2 · 10 ⁻³	2,4 · 10 ⁻³	1 · 10 ⁻¹	300	3,47 · 10 ⁻³	3,4 · 10 ⁻²	1		+
VALHUON	18-7-05	6000	0,35	5 · 10 ⁻⁴	4,7 · 10 ⁻⁴	7 · 10 ⁻²	300	3,47 · 10 ⁻³	4,9 · 10 ⁻²	10	+	
HESDIN	24-3-15	210	0,99	3,7 · 10 ⁻³	1,4 · 10 ⁻³	3 · 10 ⁻²	150	1,73 · 10 ⁻³	5,7 · 10 ⁻²	4		+
HARAVESNES	24-8-05	3500	0,75	4,3 · 10 ⁻³	8,6 · 10 ⁻³	4 · 10 ⁻²	200	2,31 · 10 ⁻³	5,7 · 10 ⁻²	7	+	
HUMIERES	25-1-44	2500	0,55	1 · 10 ⁻⁴	6,4 · 10 ⁻²	7 · 10 ⁻²	300	3,47 · 10 ⁻³	4,9 · 10 ⁻²	5	+	
GOUY	25-3-08	1500	0,75	2,5 · 10 ⁻³	5 · 10 ⁻³	7 · 10 ⁻²	30	3,47 · 10 ⁻⁴	4,9 · 10 ⁻³	5	+	
SAINTE POL	25-3-14	2000	0,97	1,6 · 10 ⁻²	8 · 10 ⁻²	8 · 10 ⁻²	500	5,78 · 10 ⁻³	7,2 · 10 ⁻²	5		+
TINQUES	25-4-03	500	0,50	1,1 · 10 ⁻²	3,3 · 10 ⁻²	5 · 10 ⁻²	250	2,90 · 10 ⁻³	5,8 · 10 ⁻²	10	+	
FRÉVENT	25-6-13	4700	0,35	2,2 · 10 ⁻²	2,6 · 10 ⁻²	8 · 10 ⁻²	250	2,90 · 10 ⁻³	3,6 · 10 ⁻²	3		+

Tableau XIV. — Paramètres physiques et caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux en milieu non saturé après ajustement des fluctuations piézométriques calculées sur les données réelles du bassin de la Canche.

Légende : L, longueur de la ligne de courant. — Dis, distance réduite (x/X). — Tav, transmissivité avant ajustement. — Sav, coefficient d'emménagement avant ajustement. — Sap, coefficient d'emménagement après ajustement. — Tap, transmissivité après ajustement. — Dcal, diffusivité calculée. — Tmax, temps maximal de transfert en jours. — PL, position hydrologique sur plateau. — VL, position hydrologique en vallée.

tement inférieures à celles obtenues après ajustement. La fourchette des valeurs initiales allant de 10^{-5} à $8 \cdot 10^{-2}$ passe, après calage, à une fourchette comprise entre $1 \cdot 10^{-2}$ et $1,0 \cdot 10^{-1}$. Le réservoir crayeux dans son ensemble possède donc un coefficient d'emménagement supérieur à celui déduit des pompages d'essai régionaux de courte durée (2 à 3 jours). L'échelle interannuelle adoptée dans la simulation (2.557 jours) montre l'influence de l'eau contenue dans la matrice crayeuse. L'existence de connexions hydrauliques entre la nappe de la craie et des nappes alluviales et/ou la modification des conditions aux limites de l'aquifère (relations hydrodynamiques nouvelles) permettent d'expliquer la majoration. Les chiffres élevés du coefficient d'emménagement sont ainsi décelés à proximité des vallées (7 % en moyenne). L'aquifère crayeux des sites de plateau possède un coefficient d'emménagement beaucoup plus bas (5 % en moyenne).

L'observation des amplitudes moyennes des variations piézométriques montre que, lorsque ces dernières sont basses, les coefficients d'emménagement sont souvent élevés. Ainsi, pour

les six sites de Beaurainville, Fressin, Bealencourt, Anvin, Humières, St-Pol et Frévent, les variations de la surface de la nappe sont respectivement de 1,5 m, 2 m, 3 m, 1 m, 2 m, 1,80 m et 1,60 m avec des coefficients d'emménagement respectifs de 10 %, 10 %, 6 %, 10 %, 7 %, 8 % et 8 %. Le battement saisonnier de la nappe est responsable d'une altération accrue d'un niveau crayeux très limité en épaisseur et donc affecté d'un coefficient d'emménagement très élevé. Si ce niveau est localement dénoyé, lors d'un essai de pompage dans la nappe de la craie, les niveaux crayeux sous-jacents étant plus compacts, donc moins perméables, fournissent automatiquement des valeurs d'emménagement très faibles (de l'ordre de 2 à 3 %).

Ce phénomène de strate conductrice privilégiée en milieu fissuré est bien observable lors de la mise en œuvre des diagraphies d'écoulement (chapitre 4, § V).

En résumé, quatre phénomènes peuvent être à l'origine d'un emménagement élevé :

— *le changement d'échelle (temps et espace) qui fait intervenir l'eau matricielle,*

— de nouvelles relations hydrodynamiques et donc la modification des conditions initiales,

— l'existence d'un niveau fissuré très aquifère et peu épais,

— une alimentation par la pluie efficace trop importante.

e) Restitution des variations calculées de la piézométrie et comparaison avec la piézométrie réelle.

La restitution automatique des fluctuations piézométriques a été réalisée à partir des valeurs journalières de l'altitude de la nappe (fig. 47). Les courbes calculées sont tracées

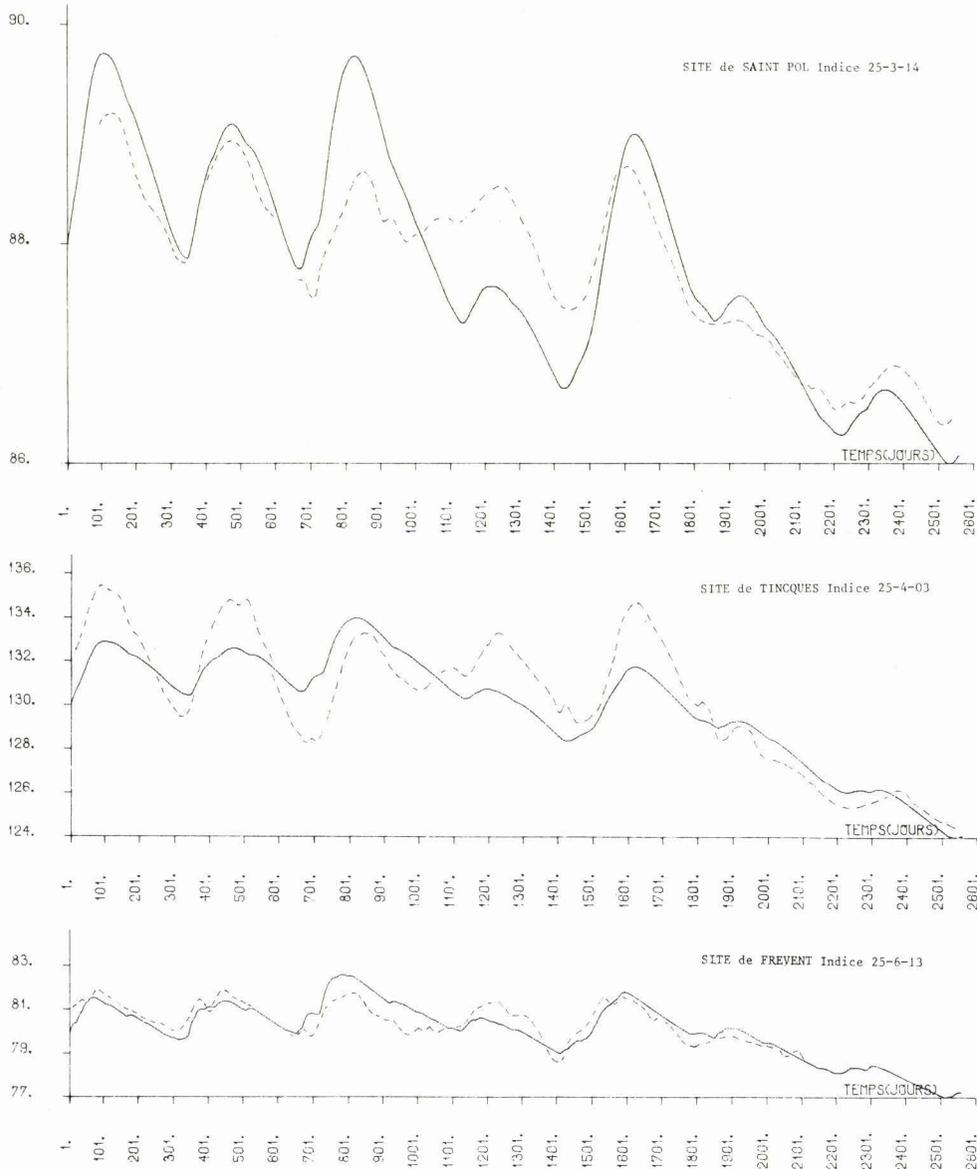


Fig. 47. — Exemples de restitution des variations calculées de la piézométrie. Comparaison avec la piézométrie réelle (1966-1972).
Légende : Courbe réelle en traits continus. — Courbe calculée en traits discontinus.

automatiquement par utilisation de sous-programmes spécifiques (88). Malgré une restitution d'ensemble correcte de la piézométrie, des écarts initiaux subsistent entre les courbes calculée et expérimentale, de l'ordre de :

- 0,25 m pour le site 17/6/04 (Beaurainville).
- 0,50 m pour les sites 17/7/19 (Fressin), 25/1/44 (Humières), 25/3/14 (St-Pol).
- 1,00 m pour les sites 17/8/25 (Bealencourt), 18/6/13 (Anvin), 25/4/03 (Tincques), et 25/6/13 (Frévent).
- 2,00 m pour les sites 17/1/51 (Sempy), 17/8/03 (Ruisseauville), 18/7/05 (Valhuon) et 24/8/05 (Haravesnes).
- 5,00 m pour les sites 17/2/37 (Manninghem), 18/2/10 (Fontaine) et 25/3/8 (Gouy).

Ces écarts ont pour origine, soit des variations locales de la pluviométrie, soit l'hétérogénéité du massif crayeux ou encore l'existence de pompages perturbant la mesure expérimentale. Certains graphiques n'ont pu être utilisés pour cette dernière raison.

La période 1971-1972, mal restituée pour les sites de plateau (sites 25/4/03, 25/3/14, 25/3/08, 24/8/05 et 18/7/05) montre des niveaux piézométriques réels supérieurs aux niveaux théoriques. L'hypothèse de Mero provoque sans doute un déficit hydrique important en période sèche.

Un meilleur calage des courbes piézométriques serait obtenu par découpage de la ligne de courant en mailles possédant chacune des paramètres différents. Une telle opération néces-

site l'alignement de plusieurs piézomètres sur une seule ligne de courant, ce qui n'est pas réalisé dans le cas du bassin de la Canche.

V. — CONCLUSIONS

Dans ce chapitre apparaissent les divers aspects de l'analyse piézométrique qualitative des aquifères régionaux, analyse basée sur un plan strictement descriptif. La recherche des causes des fluctuations piézométriques naturelles a pu être ensuite abordée en faisant appel à des procédures d'analyse numérique. Le nombre important de paramètres physiques mis en jeu dans le processus du battement d'une nappe conduit à une restitution proche mais imparfaite du domaine naturel. L'aquifère crayeux fissuré et hétérogène admet difficilement l'utilisation de fonctions analytiques qui sont à ce jour les plus proches du cadre naturel. La simulation nécessite l'utilisation d'un coefficient d'emmagasinement très élevé dû à l'influence sur une longue période de l'eau matricielle, à la mise en place de nouvelles relations hydrodynamiques (avec les nappes alluviales) et à la présence d'un niveau fissuré localisé à la zone de battement de la surface piézométrique.

La comparaison sur une échelle interannuelle de la variation de la surface piézométrique de la nappe de la craie et des débits de base de la Canche conduisent à l'estimation d'un coefficient d'emmagasinement global du réservoir crayeux allant de 6 à 9%. On notera l'identité de ces valeurs avec celles obtenues lors de l'ajustement.

« »

Transferts hydrodynamiques des systèmes aquifères Procédures de traitement des données

I. — INTRODUCTION

L'analyse des transferts hydrodynamiques d'un système aquifère fait appel à l'interprétation des pompages d'essai. Les théories analytiques établies par les hydrauliciens (241) permettent, à partir du mode de descente du niveau des nappes au cours du temps, d'apporter des indications sur la nature des transferts hydrodynamiques et de fixer certains paramètres hydrauliques. La connaissance générale de ces derniers pour des réservoirs aquifères calcaires et gréseux peut être améliorée par l'analyse de la distribution géométrique des fissures hydrauliquement actives rendant compréhensible l'anisotropie des perméabilités. La distribution des fissures en profondeur des réservoirs crayeux et du calcaire carbonifère est examinée à l'aide des diagraphies des vitesses d'écoulement en forage qui apportent ainsi des indications sur les divers types d'écoulement relatifs aux sites hydrogéologiques régionaux.

Les nombreuses données hydrogéologiques définissant et caractérisant les transferts hydrodynamiques nécessitent un traitement statistique approprié qui a été développé dans ce travail et qui peut être appliqué à tout système aquifère.

A l'aide de méthodes de calcul automatique ou semi-automatique des caractéristiques hydrauliques des aquifères, on exploitera les données d'essais expérimentaux ponctuels : les résultats seront ensuite généralisés. On exami-

nera en outre les divers schémas hydrodynamiques qui régissent les relations entre aquifères profonds et superficiels. On tentera enfin d'améliorer les connaissances des coefficients d'emmagasinement des réservoirs aquifères.

La caractérisation adéquate des paramètres hydrauliques d'un terrain aquifère fait appel aux tests " in situ " dont, parmi les plus courants :

— *le pompage d'essai* : il permet, à partir de l'examen de l'évolution des rabattements du niveau de la nappe en fonction du temps, de rechercher les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement dans un contexte hydrogéologique bien défini ;

— *l'essai Lefranc* : il est réalisé à l'avancement d'un sondage et permet, par pompage ou injection, de déterminer les caractéristiques d'une tranche de terrain forée et maintenue en trou nu. On observera pour des pompages ou des injections à débit permanent les stabilisations successives du niveau piézométrique. La valeur de la perméabilité du niveau de terrain ainsi examiné est ensuite déduite des graphiques obtenus (141, 163) ;

— *l'essai Lugeon* : dérivé du précédent, il nécessite l'utilisation d'une cellule de pression (ou " packer ") qui, descendue vis-à-vis de la partie de formation intéressée, facilitera l'injection, sous une surpression artificielle donnée, d'une quantité d'eau mesurable en surface. Le coefficient de perméabilité est déduit des courbes de relation débit-pression dans deux phases

à paliers de pression croissante puis décroissante (141) ;

— *l'essai à la sonde triple* : beaucoup plus élaboré que le précédent, il nécessite le maintien au cours de l'essai d'injection, de zones à pression hydrostatique (dites de garde), de part et d'autre de la zone de terrain fissuré testée. Les écoulements dans la roche sont ainsi strictement linéaires et radiaux. De multiples piézomètres disposés symétriquement autour du forage d'essai permettent la mesure de pressions hydrauliques différentes dénotant l'anisotropie de perméabilité. La répétition de l'essai perpendiculairement à quelques familles de fractures du massif rocheux aboutit au calcul des diverses perméabilités associées (147, 170) ;

— *l'essai au micromoulinet* : procédant de la technique de diagraphie, il aboutit à une mesure de la vitesse de circulation de l'eau compte tenu d'un débit d'injection ou de pompage maintenu constant et susceptible de réaliser un régime permanent.

En dehors des expérimentations sur le terrain, il reste possible, pour un milieu finement fissuré comme celui du réservoir crayeux, de procéder à un calcul théorique des valeurs de la perméabilité à partir d'un relevé de la géométrie des fractures.

II. — PROCEDURES DE TRAITEMENT DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES

1) Le pompage d'essai.

Les pompages d'essai représentent les tests hydrauliques les plus courants et permettent de déterminer les caractéristiques physiques d'un aquifère. Par ailleurs, l'assèchement éventuel de la nappe ou l'évolution de la baisse du plan d'eau au cours du pompage permettent de définir les limites de rabattement à ne pas dépasser au cours de l'exploitation de l'ouvrage.

La prévision à long terme, d'une part, des évolutions piézométriques d'une nappe soumise à des pompages nombreux et, d'autre part, des influences de plusieurs captages les uns sur les autres, nécessite la connaissance exacte des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère concerné, telles que la transmissivité et le coefficient d'emménagement. L'approche théorique

de l'évolution du rabattement du niveau d'une nappe s'accompagne de la définition stricte de la géométrie du réservoir, de ses paramètres physiques intrinsèques et des relations éventuelles avec d'autres nappes ou d'autres limites à potentiel hydraulique fixé.

Une formation aquifère possède généralement à son toit ou à son mur (ou les deux à la fois) des terrains, soit strictement imperméables, soit semi-perméables. L'eau en circulation dans l'aquifère peut se mouvoir soit en régime libre (en équilibre avec la pression atmosphérique), soit en régime captif (pression supérieure à celle de l'atmosphère).

Il existe dans la nature une grande diversité d'aquifères et de systèmes aquifères. Pour certains d'entre eux, il a été possible de définir la loi de variation du rabattement en fonction du temps (167, 168). Ainsi sont mises au point (107, 134 à 137, 139, 140, 155, 159, 169, 241) et développées des méthodes d'analyse des résultats issus des pompages d'essai par l'application d'équations différentielles, afin de déterminer les valeurs des caractéristiques hydrauliques d'un aquifère idéal pour un débit de pompage constant et dans le cas d'un puits complet (pénétrant en totalité l'aquifère).

De nombreux travaux complémentaires ont permis d'introduire des paramètres rendant compte de l'anisotropie des perméabilités, de la pénétration partielle d'un puits et de l'influence du milieu non saturé.

On rappellera quelques-uns des principaux schémas hydrogéologiques qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

a) *Couche aquifère en régime captif sans possibilité de fuite vers le haut ou vers le bas.*

— 1^{er} Cas : *Aquifère parfait.*

On considère (167) un écoulement des eaux strictement radial au voisinage du puits. L'aquifère est homogène, isotrope, d'extension latérale infinie, bien horizontal et d'épaisseur stable. Le puits traverse entièrement la couche aquifère et le débit imposé reste strictement constant.

L'expression du rabattement (s) à une distance r de l'ouvrage sera la suivante :

$$(18) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u)$$

avec Q , le débit ; T , la transmissivité et $W(u)$ fonction caractéristique symbole de l'expression :

$$(19) \quad W(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} \cdot du \quad (\text{courbe A de la fig. 48})$$

avec u , argument de fonction = $(r^2 S)/(4Tt)$; r , la distance du point d'observation au puits ; t , le temps et S , le coefficient d'emmagasinement.

— 2^{me} Cas : *Aquifère anisotrope.*

On modifie (155) la formulation précédente en faisant intervenir un tenseur de transmissivité. Pour une variation de transmissivité dans deux directions principales seulement, le rabattement s'écrira sous la forme suivante :

$$(20) \quad s = \frac{Q}{4\pi \sqrt{T_{XX} \cdot T_{YY}}} \int_0^{\infty} \frac{e^{-U_{XY}}}{U_{XY}} dU$$

$$\text{avec } U_{XY} = \frac{S T_{XX} Y^2 + T_{YY} X^2}{4t T_{XX} \cdot T_{YY}}$$

où T_{XX} et T_{YY} sont les transmissivités respectivement minimum et maximum.

— 3^{me} Cas : *Le puits à pénétration partielle.*

Le cas d'une pénétration partielle d'un puits dans un aquifère a été envisagé dès 1961 (136). Il faut signaler en outre que de nombreux autres travaux ont été effectués pour proposer des solutions mathématiques de l'écoulement non radial lors de la pénétration partielle d'un puits (131).

b) *Couche aquifère semi-captive en relation hydraulique avec une nappe à niveau d'eau constant à travers un semi-perméable.*

— 1^{er} Cas : *Le semi-perméable possède une quantité d'eau transférable négligeable* (134, 140). L'aquifère principal se trouve dans les conditions suivantes :

- il est surmonté par un semi-perméable d'épaisseur b' et de perméabilité K' et limité à sa base par un niveau imperméable ;
- le réservoir aquifère est homogène, isotrope, d'extension latérale infinie et à épaisseur constante ;
- le puits est complet et les circulations d'eau sont strictement radiales.

Le rabattement à une distance r de l'ouvrage s'écrira :

$$(21) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W\left(u, \frac{r}{B}\right)$$

$W(u, r/B)$ représente une fonction particulière (courbe B de la fig. 48).

$u = r^2 S/4Tt$, B , un facteur de drainance équivalent à la relation $\sqrt{T/(K'b')}$.

La fonction $W(u, r/B)$ renferme des expressions où interviennent les fonctions de Bessel modifiées de deuxième espèce et d'ordre 0 ($K_0(x)$) et de première espèce et d'ordre 0 ($I_0(x)$).

Les variations de la fraction $W(u, r/B)$ en fonction du rapport $1/u$ sont traduites sous forme de graphiques bilogarithmiques (168) qui définissent le "schéma de Walton" qui se distingue du cas suivant.

— 2^{me} Cas : *Le semi-perméable possède une quantité d'eau transférable non négligeable.*

Les conditions précédentes sont maintenues dans ce deuxième cas et seules les caractéristiques hydrauliques du semi-perméable sont différentes (137). Ce schéma, qu'on dénommera "schéma d'Hantush", permet d'aboutir à deux formulations du rabattement :

— si $t \geq 2 \cdot b' \cdot S'/K'$ (Courbe C de la fig. 48)

$$(22) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc} \frac{\psi \sqrt{u}}{\sqrt{y(y-u)}} dy$$

$$\text{avec } u = r^2 S/Tt, \quad \psi = \frac{r \sqrt{S'K'}}{4 T S b'}$$

S' : coefficient d'emmagasinement de l'aquifère semi-perméable et $\operatorname{erfc}(x)$: fonction d'erreur complémentaire ;

— si $t \leq b' S'/10 \cdot K'$

le semi-perméable doit être alors relativement épais et peu perméable.

$$(23) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(y-r^2/4B^2y)}}{y} \cdot dy$$

$$\text{avec } u'' = \frac{4Tt}{r^2 (S + S'/3)}$$

Il est alors possible d'utiliser les abaques établis pour le "schéma de Walton" (Courbe B de la fig. 48).

c) *Couche aquifère en régime libre admettant un égouttement.*

La formulation analytique établie (107) rend compte d'un transfert vertical d'eau par vidange gravitaire de la partie supérieure de l'aquifère en cours de pompage. Le drainage gravitaire ou égouttement s'effectue avec un certain retard. Après une courte période de stabilisation du niveau de la nappe, les rabattements s'accroissent dès que la vitesse de transfert vertical devient inférieure à celle du prélèvement dans l'ouvrage (Courbe D de la fig. 48).

L'expression du rabattement à une distance r de l'ouvrage s'écrit :

$$(24) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{f(S, S', \alpha, r, t)}{B}$$

avec S , le coefficient d'emmagasinement instantané de la couche aquifère,

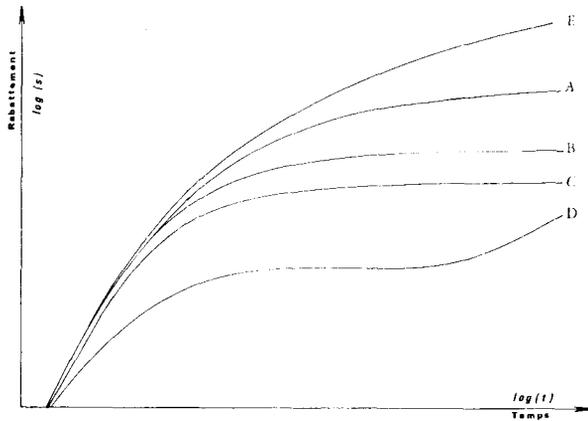


Fig. 48. — Courbes théoriques de descente du niveau d'une nappe en cours de pompage à débit constant mettant en évidence cinq types de réponse possible de l'aquifère sollicité.

Légende :

- Courbe A : hypothèse de Theis,
- Famille des courbes B : hypothèse de la limite à niveau d'eau constant ou d'une drainance (Walton),
- Famille des courbes C : hypothèse de la drainance d'un semi-perméable à emmagasinement non négligeable (Hantush),
- Famille des courbes D : hypothèse de l'égouttement de niveaux aquifères annexes supérieurs (Boulton),
- Famille des courbes E : hypothèse de la limite étanche.

S' , le coefficient d'emmagasinement retardé de la couche aquifère,

α , l'indice de retard, $B = \sqrt{T/\alpha S'}$, facteur d'égouttement, et f : fonction à exponentielle où intervient la fonction de Bessel I_0 de première espèce et d'ordre 0.

Les paramètres de perméabilité verticale et de perméabilité horizontale ainsi que le drainage de la zone capillaire peuvent être pris en compte (108). L'influence de la pénétration partielle du puits dans l'aquifère a été examinée analytiquement puis appliquée (109). Des méthodes d'identification par déconvolution des fonctions d'égouttement du schéma de Boulton semblent infirmer les formules de cet auteur basées sur les exponentielles. Il est possible de faire appel à des dérivées des fonctions eulériennes de seconde espèce (113).

d) *Couche aquifère semi-infinie en régime captif.*

Deux possibilités de limites peuvent intervenir :

- une limite due à l'existence d'une ligne d'alimentation à potentiel constant,
- une barrière étanche consécutive au jeu de failles ou au type de gisement du réservoir aquifère.

L'influence de ces limites a été développée analytiquement en faisant appel à la théorie des images (241).

e) *Application des procédures de traitement automatique.*

Nous avons vu précédemment qu'il était possible à la suite d'un pompage d'essai et à partir de la mesure du rabattement de la nappe en fonction du temps, de déterminer certains paramètres de l'aquifère dont, parmi les plus importants, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement. Jusqu'à maintenant, seule l'analyse graphique des résultats sur diagramme semi-logarithmique ou bi-logarithmique était réalisée (75, 145, 241).

L'outil informatique permet de traiter automatiquement des données de pompage dans le but d'obtenir la restitution des paramètres hydrauliques d'un aquifère (104, 138, 150, 151, 162). En effet, l'analyse graphique des résultats expérimentaux, par comparaison avec des courbes d'abaques laisse toujours une part de sub-

jectivité. Les courbes de descente répondant aux hypothèses de Theis, Boulton et Hantush décrites antérieurement, peuvent faire l'objet d'une analyse statistique automatique.

L'application d'un algorithme de programmation non linéaire dans le cadre d'une optimisation a été mise en œuvre. Il fait appel à des méthodes qui requièrent une estimation initiale la plus juste possible des paramètres. Une procédure de recherche systématique tend ensuite à définir les meilleures valeurs qui rendent les écarts les plus petits possible. Une grosse difficulté apparaît lorsque des fonctions non uniformément convexes possèdent plusieurs " minimums locaux ". La solution, dans ce cas, n'est pas forcément atteinte dès le premier calcul. Il est recommandé alors de procéder à quelques essais avec des lots de valeurs différentes mais toutefois assez proches.

L'expression du rabattement est une fonction $s(t)$ dépendant du temps et d'un ensemble de paramètres. Des observations du niveau de la nappe de valeurs $\sigma(t_i)$ faites à des temps t_i très différents permettent de déterminer les paramètres de l'aquifère de telle sorte que $s(t)$ rende compte, au mieux, du phénomène observé. Pour améliorer l'estimation des paramètres, on fera appel à la méthode des moindres carrés : les meilleurs paramètres seront ceux qui rendent minimum la somme :

$$\sum_{i=1}^n s(t_i) - \sigma(t_i)^2$$

Programmée par Sampson (71), cette méthode fait intervenir les dérivées de s par rapport aux différents paramètres. En partant d'un ensemble de paramètres choisis empiriquement ou déduits d'une première approche graphique, la procédure détermine un nouvel ensemble de paramètres rendant la somme des carrés aussi petite que le désire l'utilisateur. Une procédure itérative par degrés successifs de " Gauss-Newton " (63) est appliquée à l'évaluation des erreurs sur les moindres carrés d'une régression non linéaire (64).

1° Application à l'hypothèse de Theis.

L'hypothèse de Theis permet d'établir la relation liant les rabattements observés dans un piézomètre (situé à une distance connue de l'ouvrage) aux paramètres hydrodynamiques, au débit (supposé constant) et au temps.

On utilisera l'expression (18) du rabattement et la fonction caractéristique (19) s'écrira sous la forme suivante :

$$(25) \quad W(u) = -0,5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{2.2!} + \frac{u^3}{3.3!} - \dots - \frac{(-u)^n}{n.n!}$$

Il est nécessaire, dans la solution adoptée, de formuler les dérivées partielles de la transmissivité (T) puis du coefficient d'emmagasinement (S) par rapport au rabattement théorique (F). On posera au préalable : $W = W(u)/T$. On écrira les dérivées partielles suivantes :

— pour la transmissivité :

$$\frac{\delta F}{\delta T} = \frac{\delta F}{\delta W} \cdot \frac{\delta W}{\delta T} \quad \text{avec} \quad \frac{\delta F}{\delta W} = 0,08 \cdot Q$$

$$\text{et} \quad \frac{\delta W}{\delta T} = V \cdot \frac{\delta W(u)}{\delta T} + W(u) \cdot \frac{\delta V}{\delta T} \quad \text{avec} \quad V = 1/T$$

— pour le coefficient d'emmagasinement :

$$\frac{\delta F}{\delta S} = \frac{\delta W}{\delta S} \cdot \frac{\delta F}{\delta W}$$

$$\text{avec} \quad \frac{\delta W}{\delta S} = \frac{\delta W(u)}{\delta u} \cdot \frac{\delta u}{\delta S} \quad \text{et} \quad \frac{\delta F}{\delta W} = 0,08 \cdot Q$$

La description du programme Theis a été publiée par Mania (150). Après lecture des données, le programme Theis calcule les dérivées partielles, du rabattement calculé, relatives aux paramètres cherchés : transmissivité et coefficient d'emmagasinement. Puis une restitution des informations de départ (rabattement, temps...) et des valeurs calculées suivantes est effectuée : nombre des itérations de calcul nécessaires, erreurs calculées sur les moindres carrés à chaque itération ainsi que pour chacune d'elles les valeurs des paramètres cherchés (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), valeurs de la déviation asymptotique standard des paramètres (écart type) et de la corrélation asymptotique matricielle des paramètres (150).

* L'application de ce procédé a été réalisée sur quelques essais de pompage typiques dont celui effectué sur la nappe de la Crau à Istres et qui a servi d'étalon en

raison des bonnes conditions de réalisation (130). On a utilisé 46 valeurs de rabattement, mesurées sur deux piézomètres (P_{z1} et P_{z2}) situés à 20 et 50 mètres du forage débitant $328 \text{ m}^3/\text{h}$. (tabl. XV).

Dans le tableau XV, les valeurs de transmissivité T et de coefficient d'emmagasinement S obtenues à la fois par la méthode graphique classique et la méthode automatique, sont comparées. On peut constater parfois des écarts importants (45,7 % pour la valeur de S au P_{z1}). Les différences calculées entre les valeurs expérimentales et théoriques de rabattement oscillent entre 1,2 cm et 0,1 mm, ce qui est de l'ordre de l'erreur de mesure. On peut constater que les valeurs de T et de S sont atteintes en une dizaine d'itérations pour un critère de convergence fixé ici à $1/10 \text{ mm}$. Déjà, vers la cinquième itération, on se trouve proche du résultat final » (fig. 49 et 50) (Mania, 1976, p. 116).

Une autre exploitation a été effectuée sur les résultats d'essais de pompage (tabl. XVI) relatifs aux alluvions de l'Escaut à Bruay, par Bernard (103). L'ouvrage débitait $210 \text{ m}^3/\text{h}$. et la descente était suivie dans neuf piézomètres. Les résultats sont relatifs à quatre piézomètres surveillés pendant 5.000 minutes (83 heures). Les couples de rabattement-temps sont au

		Méthode graphique	Méthode automatique	Différence en pourcentage
P_{z1}	T_m^2/s	$8 \cdot 10^{-2}$	$8,01 \cdot 10^{-2}$	0,1
	S	$5 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \cdot 10^{-2}$	59,2
P_{z2}	T_m^2/s	$9,6 \cdot 10^{-2}$	$9,28 \cdot 10^{-2}$	3,4
	S	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$6,82 \cdot 10^{-2}$	4,6

Tableau XV. — Nappe de la Crau (Istres) (Mania, S.G.N., 1976, p. 116).

		Méthode graphique	Méthode automatique	Différence en pourcentage
P_4 (25 m au sud)	T_m^2/s	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$	5,2
	S	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,39 \cdot 10^{-5}$	3,5
P_8 (50 m à l'ouest)	T_m^2/s	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,99 \cdot 10^{-2}$	28
	S	$6 \cdot 10^{-5}$	$2,77 \cdot 10^{-5}$	55
P_6 (100 m au sud)	T_m^2/s	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$6,53 \cdot 10^{-2}$	98
	S	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	282
P_9 (100 m à l'ouest)	T_m^2/s	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$3,28 \cdot 10^{-2}$	5,8
	S	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,31 \cdot 10^{-5}$	34,5

Tableau XVI. — Nappe des alluvions de l'Escaut (Bruay) (Mania, S.G.N., 1976, p. 116).

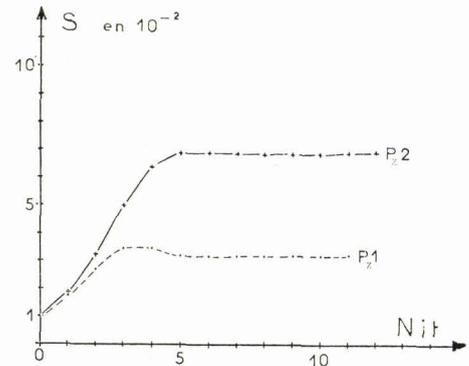


Fig. 49. — Evolution des valeurs calculées du coefficient d'emmagasinement à chaque itération. Programme Theis. Nappe de la Crau. (Mania, S.G.N., 1976, p. 116).

Légende : S , coefficient d'emmagasinement. — Nit, nombre d'itérations. — P_{z1} et P_{z2} , piézomètres de mesure.

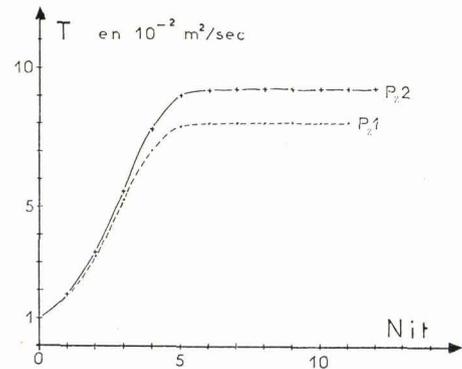


Fig. 50. — Evolution des valeurs calculées de la transmissivité à chaque itération. Programme Theis. Nappe de la Crau. (Mania, S.G.N., 1976, p. 116).

Légende : T , transmissivité. — Nit, nombre d'itérations. — P_{z1} et P_{z2} , piézomètres de mesure.

nombre de 26 par piézomètre. On remarque de fortes divergences entre les méthodes de résolution graphique et automatique sur les valeurs relatives à P_8 et P_6 qui correspondent à l'obtention d'une bonne précision pour la dernière méthode (tabl. XVI).

L'utilisation du programme THEIS permet de confronter les résultats théoriques calculés aux résultats issus de l'examen graphique des courbes de descente des essais de pompage répondant à l'hypothèse de Theis. C'est un outil facile à manier car il utilise des données expérimentales immédiates (rabattement, temps, débit, distance du piézomètre d'observation). Une analyse

statistique des résultats est réalisée en fin de traitement. Il appartient cependant à l'utilisateur de vérifier si les valeurs expérimentales obtenues ne sont pas entachées d'erreur (suite, par exemple, à des variations fortes de débit) et de voir si le schéma hydrodynamique de l'aquifère testé est compatible avec un tel traitement.

2° Application aux hypothèses de Boulton et d'Hantush (151, 152).

L'analyse, déjà tentée avec succès dans le cas de l'hypothèse de Theis (150), est testée pour les hypothèses beaucoup plus complexes de Boulton et d'Hantush.

Deux types de schémas hydrodynamiques répondant à des critères d'horizontalité, de continuité, d'isotropie et d'homogénéité sont envisageables.

— Le premier schéma concerne une nappe libre reposant sur un substratum horizontal imperméable (fig. 51). Au cours du pompage, on assiste à l'apparition d'un drainage de la partie supérieure de l'aquifère, encore appelé "l'égouttement", qui est à l'origine d'un palier de stabilisation des rabattements. Ce palier disparaît dès que les variations de pression atteignent l'ordre de grandeur de la vitesse d'abaissement du niveau piézométrique.

Un tel schéma a été interprété en proposant une relation analytique entre les rabattements mesurés en fonction du temps et de quatre autres paramètres (107) dans l'expression (24).

— Le deuxième schéma d'application est relatif à une nappe semi-captive limitée à son toit et à son mur par des épontes imperméables (fig. 52). Un aquifère annexe (supérieur ou inférieur) se draine vers l'aquifère principal en cours de pompage et provoque, comme dans le premier cas, l'apparition d'un palier de stabilisation. L'éponte semi-imperméable permet le transfert et possède un coefficient d'emmagasinement non négligeable. Il est possible d'utiliser la fonction présentée auparavant où le coefficient B égal à

$$\sqrt{Tb'/K'}$$

s'appelle facteur de drainance avec :

- b' , l'épaisseur de l'éponte semi-perméable ;
- K' , la perméabilité verticale de l'éponte semi-perméable avec comme condition

$$t \leq b' \cdot S' / 10 \cdot K'$$

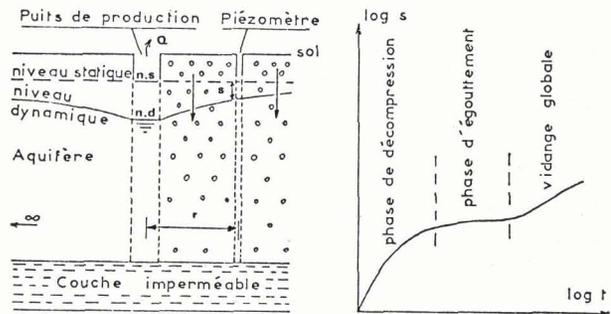


Fig. 51. — Cas 1. Egouttement d'une nappe libre. (Mania et Sucche, Jour. of Hydr., 1978, p. 187).

Légende : Q, débit de pompage à un taux constant. — S, rabattement. — n.s., surface piézométrique au repos (statique). — n.d., surface piézométrique en pompage (dynamique). — r, distance du forage au piézomètre d'observation.

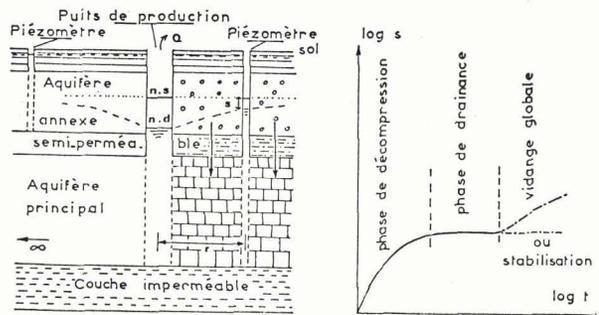


Fig. 52. — Cas 2. Drainance en milieu semi-captif. (Mania et Sucche, Jour. of Hydr., 1978, p. 186).

Légende : voir celle de la fig. 51.

Il faut signaler dans ce cas l'existence d'une autre méthode mise au point pour $t \geq 2 \cdot b' \cdot S' / K'$ (134, 135). La justification mathématique des dérivées partielles a nécessité un développement théorique réalisé par Sucche (*) (Annexe A). L'intégration des différentes fonctions paramétriques fait appel à la majoration de cette dernière pour améliorer les résultats finis. La démonstration de la convergence uniforme des intégrales généralisées a été effectuée et l'évaluation numérique des dérivées partielles a entraîné en outre un changement de variable des expressions analytiques de départ.

(*) U.E.R. des Mathématiques fondamentales et appliquées de l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

3° Conclusions.

Les expressions successives des dérivées partielles des fonctions BOULTON-HANTUSH par rapport à leurs paramètres ont été programmées et adaptées au programme général de SAMPSON. Pour évaluer les paramètres hydrauliques d'un aquifère, le programme ainsi réalisé possède cependant ses propres limites. L'existence éventuelle de minimums locaux pour la somme à minimiser et la complexité des fonctions augmentent considérablement le temps de calcul et obligent l'utilisateur à introduire dans ce programme un ensemble de paramètres assez proches de la réalité. La méthode statistique sert alors à affiner les valeurs de ces paramètres connues jusqu'à présent de façon fort subjective.

La méthode a été testée pour les deux schémas hydrogéologiques présentés précédemment sur des pompages d'essai effectués régionalement (180) et en France (130).

L'exemple choisi (fig. 53) montre l'amélioration de l'ajustement réalisé à l'aide de la méthode automatique d'analyse qui donne une bonne restitution des rabattements du niveau de la nappe, assez proche des valeurs expérimentales.

2) Calcul du tenseur des perméabilités.

a) Introduction.

En 1976, Colbeaux et Mania ont écrit :

« Dès 1879, une relation possible entre la fracturation de la craie et l'orientation des vallées a été envisagée (208). Le développement et l'application de la théorie de

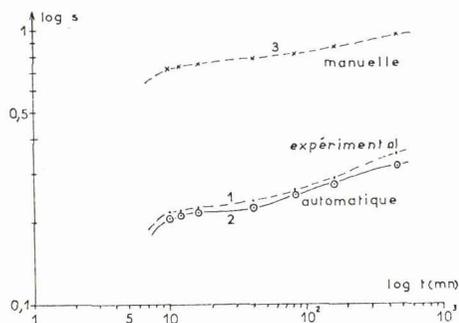


Fig. 53. — Comparaison des diverses méthodes et restitution des rabattements. (Mania et Suche, *Jour. of Hydr.*, 1978, p. 192).

l'écoulement des eaux en milieu fissuré (114, 142, 143, 146, 147, 165, 170) nous a amenés à réaliser dans le Nord de la France une cartographie localisée de la distribution des fractures et des perméabilités associées, en terrain crayeux.

La recherche des liens possibles d'une telle distribution avec le réseau d'écoulement superficiel et souterrain a été effectuée.

Nous tentons également de vérifier si la théorie du calcul du tenseur de perméabilité est applicable sur le terrain avec les quelques mesures expérimentales disponibles.

L'intérêt de cette cartographie est qu'elle présente un double aspect fondamental et appliqué : fondamental, car elle permet de faire la liaison des écoulements avec des faits tectoniques ; appliqué, car elle apportera des données supplémentaires pour les travaux de génie civil (barrages, tunnels, canaux, fouilles, etc...).

Dans ce paragraphe, nous n'aborderons que l'aspect théorique de l'écoulement en milieu fissuré ».

b) Rappel théorique du calcul de la perméabilité.

« La circulation de l'eau dans un matériau est régie par la loi expérimentale de Darcy (chapitre 1).

Pour des terrains fissurés et pour des conditions de régime laminaire et des fissures continues, il a été montré (170) que l'expression du vecteur vitesse de filtration \vec{V} pouvait s'exprimer de la manière suivante :

$$(26) \quad \vec{V} = \frac{g}{12\nu} f d^3 A \text{ grad } \psi$$

avec g , accélération due à la gravité = $9,81 \text{ (ms}^{-2}\text{)}$; ν , viscosité cinématique du fluide = $10^{-6} \text{ (m}^2\text{-s}^{-1}\text{)}$; d , largeur des fissures (m) ; f , fréquence d'apparition des fissures ; A , tenseur de représentation des normales aux plans de fracture.

Une fois le tenseur de perméabilité calculé, il est possible de chercher :

- les valeurs propres du tenseur, c'est-à-dire les modules des perméabilités principales,
- les vecteurs propres du tenseur, c'est-à-dire les composantes du vecteur de représentation des perméabilités principales, et de restituer, après rotation dans une famille de fractures donnée, des valeurs et vecteurs propres, mais aussi, pour certaines valeurs du vecteur de gradient hydraulique (à partir de la carte piézométrique par exemple), la valeur absolue du vecteur de vitesse de filtration d'après la relation :

$$(27) \quad \vec{V} = K_i \text{ grad } \psi$$

ou K_i = tenseur de perméabilité d'une famille de fractures particulière ».

Toutes les étapes du calcul font l'objet d'un programme appelé "TENSEUR" opérationnel sur l'ordinateur de l'Université des Sciences et Techniques de Lille, réalisé par Mania (117).

c) Description du programme TENSEUR.

Le programme TENSEUR, écrit en FORTRAN IV, comprend cinq parties :

- un programme principal qui procède à la lecture des données de base, appelle les sous-programmes de calcul spécifiques et enfin restitue les diverses valeurs calculées,
- un sous-programme MRDIF qui est chargé de réaliser la différence de deux matrices de mêmes dimensions réelles,
- un sous-programme MSPRØ qui permet de rechercher les valeurs et les vecteurs propres d'une matrice symétrique par la méthode de Jacobi,
- un sous-programme MRMUL qui calcule le produit de deux matrices,
- un sous-programme MRTRA qui évalue la transposée d'une matrice.

Les quatre derniers sous-programmes appartiennent à la bibliothèque mathématique de la CII.

Un ordiogramme du programme TENSEUR a été fourni dans un de nos travaux antérieurs (117).

Données nécessaires :

Les données nécessaires au bon déroulement des procédures du programme sont distribuées dans l'ordre suivant (fig. 54) :

1^{re} carte :

- nombre de familles de fractures conductrices (N) et au maximum six,
- nombre de gradients hydrauliques (NGRAD) utilisés dans les calculs (maximum de 20),
- texte précisant le lieu géographique des relevés (SITUATION).

2^{me} carte :

- direction des plans de fracture (THETA) par rapport au Nord,
- pendage des plans de fracture (PHI) par rapport à l'horizontale. On notera sur cette carte autant de directions de pendages qu'il y a de familles (N); plusieurs cartes peuvent être nécessaires.

3^{me} carte :

- valeur des projections de X et Y de la normale au plan de fracture et de l'angle α sur le canevas stéréographique de Wulf (A).

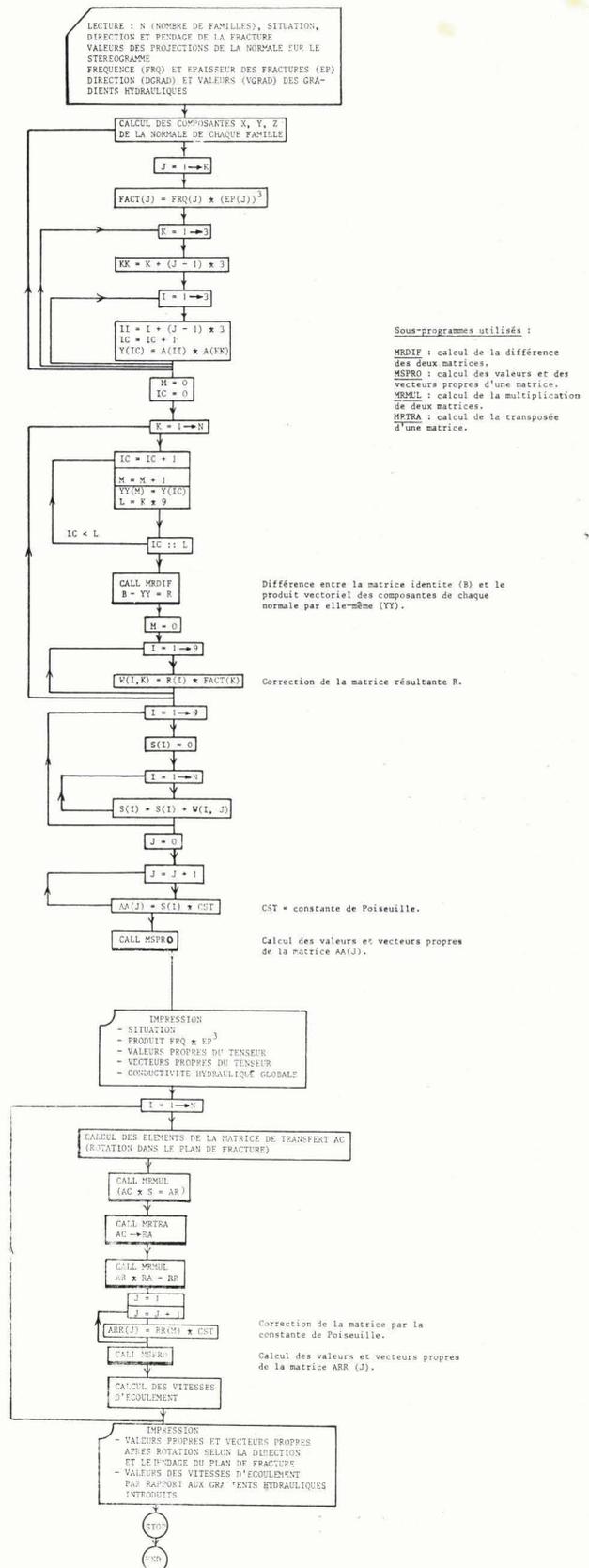


Fig. 54. — Entrée des données dans le programme TENSEUR (Colbeaux et Mania, Ann. Sc. Besançon, 1976, p. 182).

4^{me} carte :

— fréquence d'apparition des fractures (FRQ) et épaisseur des fractures (EP).

5^{me} carte :

— direction de l'écoulement (DGRAD) par rapport au Nord des eaux souterraines et valeur du gradient hydraulique (VGRAD) de la nappe selon la direction DGRAD.

On reportera autant de directions et de gradients hydrauliques qu'il y a de gradients (NGRAD) ; plusieurs cartes peuvent être nécessaires.

Étapes du calcul :

A partir des données de base que l'on va fournir à l'ordinateur, le programme que nous avons établi va exécuter plusieurs types de calculs que nous détaillons ici.

— *Première étape.* - Recherche de la matrice représentative d'une normale à un plan dans un système triangulaire XYZ.

Le plan de fracture à représenter sera matérialisé par sa normale elle-même figurée par son point d'intersection avec une sphère unité de référence et ensuite projeté dans le plan équatorial du diagramme dit "canevas de Wulf" (243) constitué de deux familles de courbes orthogonales entre elles et espacées de deux degrés. A partir des projections X et Y du point représentatif sur les axes du canevas et de l'écart angulaire avec l'axe vertical OZ passant par le centre de la sphère, il est possible de calculer les coordonnées rectangulaires (x, y, z) par des relations trigonométriques classiques.

Le produit vectoriel des composantes de chaque normale (par rapport aux familles de fracture considérées) est ensuite calculé puis déduit de la matrice identité selon le processus :

$$\text{le tenseur } \bar{A} = ||I|| - n_i \otimes n_i$$

avec la matrice identité $||I|| = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 001 \end{bmatrix}$

$$\text{avec } n_i \otimes n_i = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1x_2 & x_1x_3 \\ x_2x_1 & x_2^2 & x_2x_3 \\ x_3x_1 & x_3x_2 & x_3^2 \end{bmatrix}$$

La résolution suivante est alors effectuée :

$$\bar{K} = \text{CST} \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot d_i^3 \cdot \bar{A}_i$$

où CST représente la constante de Poiseuille ($g/v.12$).

— *Deuxième étape.* - Recherche des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de perméabilité. On fait appel à la méthode de Jacobi qui, par transformation successive, amène la matrice sous forme diagonale. Les valeurs propres sont rangées sur la diagonale d'une nouvelle matrice, alors que les vecteurs propres sont rangés en colonne dans une autre matrice (sous-programme MSPRO).

Les valeurs propres représentent les perméabilités principales K_1 , K_2 et K_3 du tenseur de perméabilité du massif rocheux affecté de plusieurs familles de fracture. On a rapporté également ces valeurs à la conductivité hydraulique globale K définie comme égale à

$$\sqrt[3]{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}$$

Les vecteurs propres correspondent aux directions principales de l'écoulement. Au nombre de trois, le calcul fournit pour chacun d'eux les composantes X, Y et Z.

— *Troisième étape.* - Il était important, à partir de la représentation matricielle de la perméabilité, de procéder à la recherche des valeurs de la perméabilité dans le plan de la fracture elle-même. La matrice de transfert ou de changement de base suivante est alors nécessaire pour obtenir cette rotation :

$$AC = \begin{bmatrix} \cos \varphi, \sin \varphi, & 0 \\ -\sin \varphi \cdot \cos \theta, \cos \varphi \cdot \cos \theta, \sin \theta \\ \sin \theta \cdot \sin \varphi, -\sin \theta \cdot \cos \varphi, \cos \theta \end{bmatrix}$$

avec φ = le pendage du plan de fracture sous l'horizontale,

avec θ = la direction du plan de fracture par rapport au Nord.

Les composantes des directions principales de l'écoulement sont en outre restituées par projection dans le plan horizontal. On procède au calcul du produit $AR = AC * S$ (S étant la matrice de perméabilité calculée à la deuxième étape), puis au produit $RR = AR * RA$ (RA étant la matrice transposée de AC). Après correction de la matrice résultante RR par la constante de Poiseuille, il est possible de calculer les nouvelles valeurs propres et les nouveaux vecteurs propres.

— *Quatrième étape.* - Elle est consacrée au calcul des vitesses d'écoulement de l'eau sou-

terrine lorsque l'on se fixe une valeur de gradient hydraulique et un sens d'écoulement. Il est nécessaire de procéder au calcul des matrices du gradient à partir des données fournies au départ.

Si VGRAD est la valeur du gradient hydraulique mesuré sur la carte piézométrique et si DGRAD est la direction d'écoulement souterrain, on écrira que :

pour $DGRAD > 90$ degrés

$$\begin{aligned} XD &= \cos(DGRAD) * VGRAD \\ YD &= -\sin(DGRAD) * VGRAD \end{aligned}$$

pour $DGRAD < 90$ degrés

$$\begin{aligned} XD &= \sin(90 - DGRAD) * VGRAD \\ YD &= -\cos(90 - DGRAD) * VGRAD \end{aligned}$$

On procède au produit de la matrice colonne du gradient avec celle des valeurs propres.

$$AGRAD\ 1 = K_1, K_2 * \begin{matrix} XD \\ YD \end{matrix}$$

$$AGRAD\ 2 = K_3 * \begin{matrix} XD \\ YD \end{matrix}$$

Comme la vitesse d'écoulement est la résultante des écoulements dans deux dimensions, on écrira que :

$$V = \sqrt{(AGRAD\ 1)^2 + (AGRAD\ 2)^2}$$

Sortie des résultats :

L'imprimante de l'ordinateur restitue successivement les données suivantes :

- la situation,
- le produit de la fréquence par le cube de l'épaisseur,
- les valeurs propres du tenseur de perméabilité en m/s,
- la valeur globale de la conductivité hydraulique K,
- les composantes X, Y et Z des trois vecteurs propres du tenseur,
- les valeurs propres du tenseur après rotation dans la famille de fracture choisie avec son numéro d'ordre, la direction du plan de fracturation et son pendage, puis les valeurs des deux perméabilités K_1 et K_2 après projection de l'ellipse de section dans le plan horizontal,
- les vitesses calculées de l'écoulement de l'eau selon certains gradients hydrauliques,

- les vecteurs propres après rotation dans la famille de fracture choisie et les composantes X, Y du premier et du deuxième vecteur propre.

III. — EXEMPLES CHOISIS DE POMPAGES D'ESSAI DANS LA REGION DU NORD (*)

L'allure de la courbe expérimentale de descente du niveau d'une nappe, au cours du temps et lors d'un pompage d'essai, peut être confrontée à cinq familles de courbes théoriques (fig. 48). L'identité statistique des couches expérimentales et théoriques adéquates conduit à la définition d'un schéma hydrodynamique de transfert de débit au sein d'un système aquifère. De tels schémas, ainsi dégagés à partir des résultats de pompages d'essai régionaux, guideront ultérieurement les hypothèses de travail de la modélisation mathématique des aquifères (chapitre 5). En règle générale, il apparaît un mécanisme de recharge verticale des aquifères du Nord de la France au niveau des vallées et de la limite de recouvrement par les terrains du Tertiaire.

1) Région Sud du Calaisis.

Dans cette région, la nappe de la craie est alimentée naturellement par les précipitations tombant sur les affleurements crayeux du bord Nord de l'Artois. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers le nord, la craie est recouverte par des dépôts alluvionnaires puis par les terrains argilo-sableux du Tertiaire en raison d'un

(*) Les pompages d'essai ont été réalisés dans le cadre des activités du B.R.G.M. Nord - Pas-de-Calais.

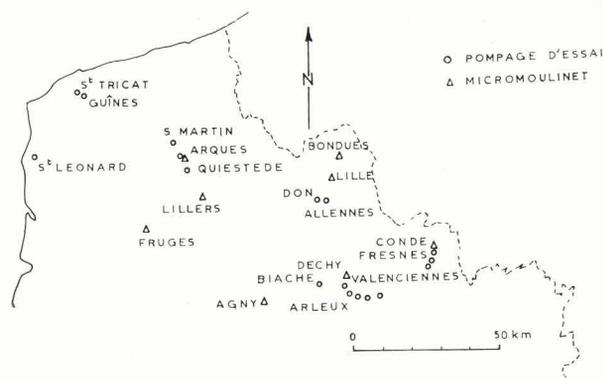


Fig. 55. — Répartition géographique des pompages d'essai et des diagraphies au micromoulinet.

pendage général des couches géologiques vers le NNE.

Le secteur W du territoire de la commune de Guînes montre l'existence d'un recouvrement alluvionnaire de 10 m d'épaisseur argilo-sableux riche en silex et galets de craie reposant sur un réservoir crayeux turono-sénonien. L'altitude basse (+ 2 à 5 m NGF) de la région de Guînes explique la présence d'un réseau superficiel dense de Wateringues et de vastes zones méréceageuses. Les plans d'eau des canaux et des étangs sont au même niveau que ceux de la nappe des alluvions grâce à l'existence de relations physiques naturelles.

L'aquifère crayeux possède sous recouvrement alluvionnaire de bonnes caractéristiques de transmissivité et d'emmagasinement. Les débits soutirés à la nappe sont très importants et les rabattements faibles.

a) Pompage d'essai de "La Waille" à Guînes.

Un pompage d'essai réalisé au lieu-dit "La Waille" (121) au débit de 260 m³/h fournit une courbe de descente (fig. 56) qui, reportée dans un diagramme bilogarithmique Log s — log t (s : rabattements et t : temps), peut être interprétée. Cette courbe appartient à un schéma hydrodynamique admettant l'égouttement d'un aquifère supérieur (celui des alluvions) vers un aquifère principal (celui de la craie) selon le schéma de Boulton (courbe D de la fig. 48).

b) Pompages d'essai du secteur de St-Tricat-Hames-Boucres.

La surveillance de plusieurs pompages dans le secteur d'Hames-Boucres - St-Tricat (233) a permis de constater l'apparition d'un palier de stabilisation des rabattements sur les courbes

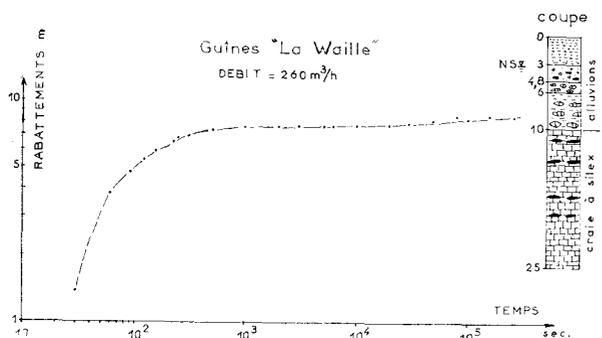


Fig. 56. — Courbe de descente à Guînes.
(d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

de descente (fig. 57). La faible durée de la surveillance n'a pas permis d'interpréter finement ces pompages. Cependant, la forme des courbes de descente fait penser à un schéma de drainage d'une nappe superficielle. Il est possible en effet de faire coïncider les courbes de descente avec des courbes théoriques (courbe C de la fig. 48) et pour une couche semi-perméable à emmagasinement important qui sépare une couche imperméable de l'aquifère principal. Dans notre cas, l'argile sableuse de surface constituerait une couche imperméable et le complexe à silex, sables et graviers à granules de craie représenterait la couche semi-perméable à fort emmagasinement.

Dans le Calaisis, sous recouvrement alluvionnaire, les pompages effectués dans l'aquifère crayeux mettent en jeu des transferts hydrauliques verticaux consécutifs, soit à un égouttement suivant un schéma de Boulton, soit à une drainage de terrains semi-perméables saturés en eau dans le cas d'un schéma d'Hantush.

2) Région de Saint-Omer.

Trois exemples de pompage d'essai seront présentés :

a) Site de St-Martin-au-Laert.

L'ouvrage F3 testé est implanté au NW de St-Omer. Les alluvions sableuses et tourbeuses

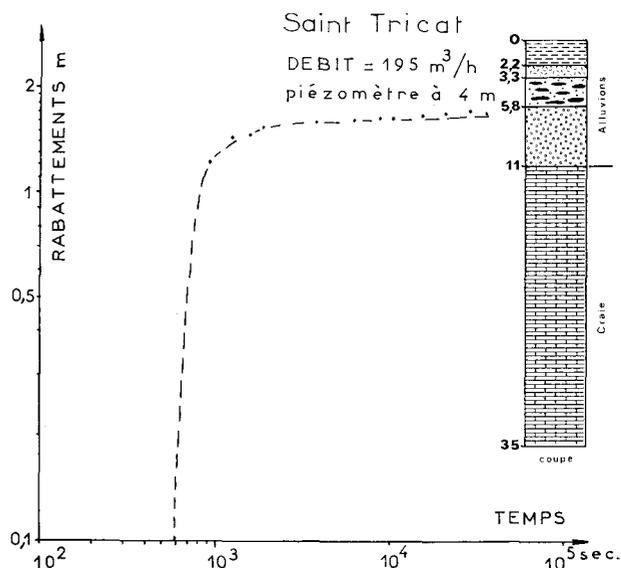


Fig. 57. — Courbe de descente à St Tricat.
(d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

de l'Aa, épaisses de 7 m, recouvrent les argiles (4,20 m) remaniées du Tertiaire, la craie à silex du Sénonien (25,50 m) et la craie grise du Turonien supérieur (3,50 m).

Le pompage d'essai réalisé pendant 48 h. (119) a pu être suivi sur l'ouvrage F3 et un autre forage à l'arrêt situé à 68 m.

Les courbes de descente (fig. 58) montrent l'existence d'un palier qui peut être interprété comme étant le résultat d'une alimentation par drainance de la nappe des alluvions à niveau d'eau constant à travers un semi-perméable à emmagasinement négligeable (courbe B de la fig. 48).

La nappe des alluvions serait dans ce cas alimentée de manière constante par le réseau des nombreux canaux des marais de St-Omer.

b) Site du "Havelt" à Arques.

Les pompages d'essais réalisés (124) ont été suivis sur le forage principal et sur un piézomètre distant de 27,5 m.

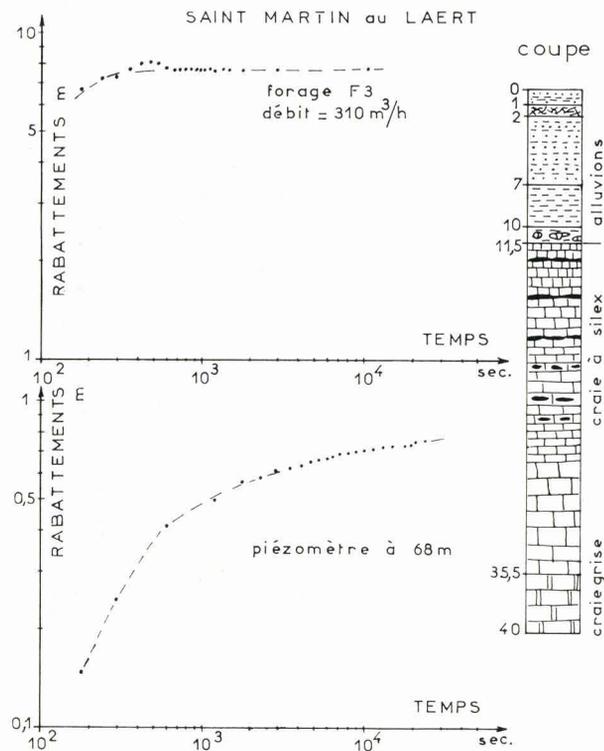


Fig. 58. — Courbe de descente à St Martin-au-Laert. (d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

L'apparition d'un début de palier sur les courbes de descente (fig. 59) indique un phénomène d'alimentation de la nappe de la craie par drainance verticale de la nappe des alluvions et des sables du Landénien. Le niveau de la nappe au repos se situe à 1,45 m du sol, soit, approximativement à une cote proche de celle de la rivière Aa qui doit être en relation avec la nappe des alluvions.

L'existence d'un niveau argileux (argile de Louvil) de faible épaisseur vraisemblablement altéré et doté d'un emmagasinement négligeable permet d'expliquer l'allure de la courbe de descente (courbes B + D de la fig. 48). On suppose ici l'existence d'une communication de la nappe de la craie à travers son éponte semi-perméable (argiles de Louvil) avec la nappe des alluvions et des sables qui possède un niveau d'eau constant (en relation vraisemblable avec la rivière Aa).

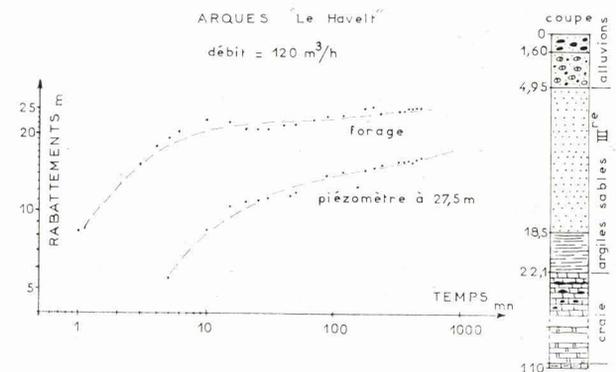


Fig. 59. — Courbe de descente à Arques. (d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

c) Site de Quiestède.

Ce site de la vallée du Lauborne, à mi-distance de St-Omer et Aire-sur-la-Lys, a été retenu pour l'implantation d'un forage.

La nappe de la craie, captive et localement artésienne, permet la culture du cresson. Un essai de pompage, réalisé en 1970 (118) pendant une durée de 147 h. 30 mn au débit constant de 215 m³/h., se traduit par une courbe de descente (fig. 60), à palier continu sur l'ouvrage d'exploitation et le puits de la ferme Beauvois, situé à 350 m.

Le débit des forages artésiens au niveau des cressonnières est influencé par le pompage d'essai et explique l'alimentation artificielle induite de la nappe de la craie. La relation arti-

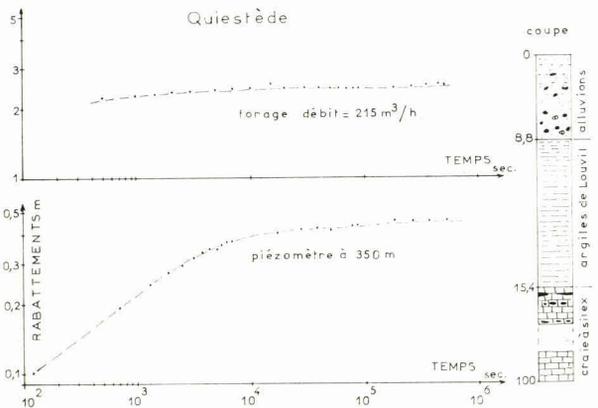


Fig. 60. — Courbe de descente à Quiestède.
(d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

ficielle entre le niveau d'eau constant des cressonnières et la nappe de la craie par l'intermédiaire des forages artésiens recrée des conditions proches de celui du schéma de Walton (courbe B de la fig. 48). L'interprétation des courbes de descente conduit à des valeurs de transmissivité qui ne sont pas représentatives du milieu hydrodynamique naturel. En effet, les argiles de Louvil, relativement épaisses, ne permettent pas la relation verticale entre la nappe de la craie et la nappe des alluvions.

Les pompages d'essai choisis de l'Audomarois montrent l'existence d'un schéma hydrodynamique mettant en relation la nappe de la craie et une nappe à niveau d'eau constant à travers un semi-perméable d'argiles altérées. Ces conditions ne se retrouvent qu'à proximité du recouvrement crétacé par les formations du Tertiaire. L'essai de Quiestède, en raison de son caractère expérimental, répète artificiellement un mécanisme d'alimentation existant par ailleurs.

3) Vallée de la Deûle au Sud de Lille.

Le recouvrement de la craie par les alluvions entraîne des communications verticales entre la nappe de la craie et la nappe des alluvions, qui expliquent la forme des courbes de l'évolution des rabattements en fonction du temps.

Vingt quatre forages ont été réalisés de part et d'autre du canal de la Deûle.

Les forages traversent des alluvions sableuses (sables landéniens remaniés) épaisses de 7,90 à 11,20 m qui reposent sur un aquifère crayeux de 50 m d'épaisseur.

Les résultats tirés des pompages d'essai (101) effectués sur les forages F17, F18 et F20 implantés sur la rive droite du canal et sur le territoire des communes de Don, Allennes et Annœullin, seront examinés. Les essais effectués pendant la période d'étiage de la nappe (septembre 1965) conduisent à l'élaboration de courbes de descente (fig. 61 et 62) qui montrent toutes des paliers de stabilisation des rabattements.

L'interprétation des courbes de descente peut être basée sur l'adoption d'un schéma d'Hantush hybride, en effet :

- il n'existe pas entre les alluvions sableuses et l'aquifère crayeux, de semi-perméable continu,

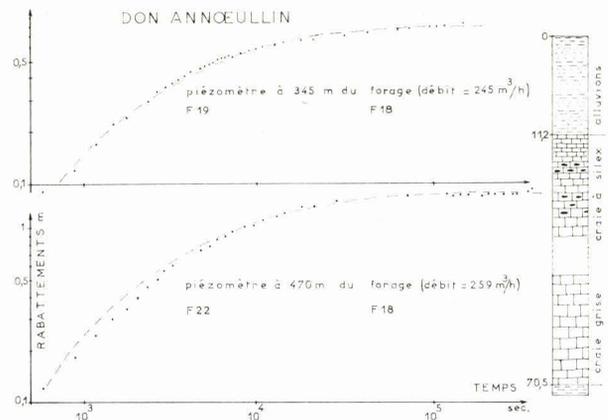


Fig. 61. — Courbe de descente sur la rive droite de la Deûle à Don, Annœullin (F. 18).
(d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

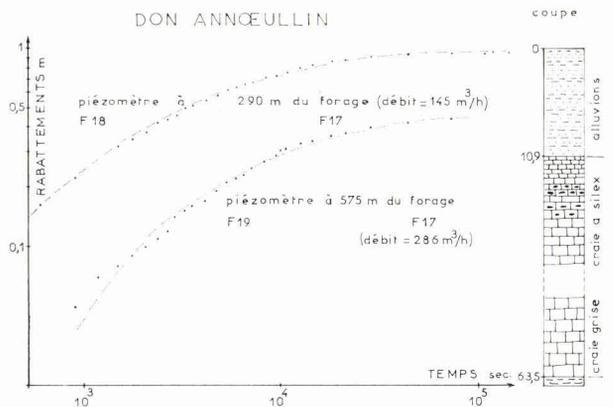


Fig. 62. — Courbe de descente sur la rive droite de la Deûle à Don, Annœullin (F. 17).
(d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

- la nappe alluviale possède un niveau d'eau constant en relation avec le réseau hydrographique superficiel relié au canal de la Deûle,
- les alluvions ne sont pas recouvertes par une unité argileuse imperméable.

Il n'en reste pas moins que le type de courbe obtenue correspond assez bien aux abaques théoriques (courbe B de la fig. 48). Depuis ces essais, il a pu être prouvé (125) que la nappe des alluvions du secteur d'Allennes-les-Marais était tarie en raison de l'exploitation intensive de la nappe de la craie qui a eu pour conséquence un drainage généralisé des terrains sus-jacents. Un phénomène hydrodynamique nouveau peut aussi se développer dans la nappe de la craie et remplacer le phénomène de drainage là où la couverture alluviale est inexistante. Un pompage d'essai effectué à Allennes montre l'existence d'un palier sur les courbes de descente (fig. 63) dans les premières heures de pompage. La faible durée de l'essai n'a point permis d'accéder à la période de troisième phase où un accroissement des rabattements se manifeste à nouveau comme dans le cas théorique de l'égouttement répondant au schéma de Boulton (courbe D de la fig. 48).

L'aquifère crayeux compact n'est recouvert ici que par des niveaux de craie morcelée et ébouleuse.

Au cours du pompage, l'eau contenue dans les terrains crayeux supérieurs s'égoutte et permet d'expliquer la stabilisation temporaire des niveaux de la nappe.

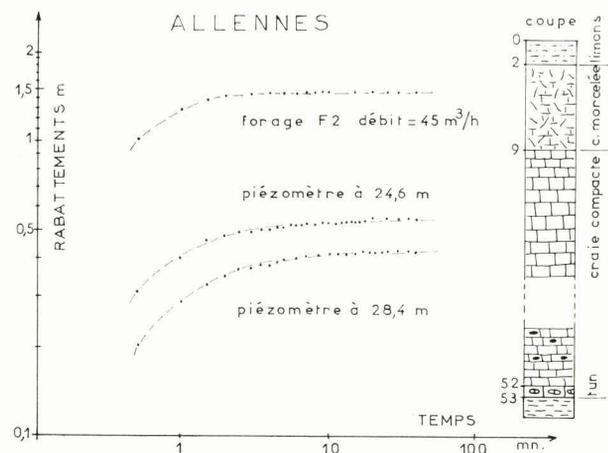


Fig. 63. — Courbe de descente à Allennes. (d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

4) Vallées de la Scarpe et de la Sensée.

Nous examinerons les relations hydrauliques entre la nappe de la craie et la nappe des alluvions à Biache-St-Vaast, puis l'influence des plans d'eau de la vallée de la Sensée sur les niveaux de la nappe de la craie en cours de pompage.

a) Vallée de la Scarpe à Biache-St-Vaast.

A Biache-St-Vaast, l'aquifère crayeux est recouvert par un manteau alluvionnaire sableux de 10 m d'épaisseur. Au point de vue piézométrique, il existe localement entre Vitry-en-Artois et Biache-St-Vaast, un dôme piézométrique relatif à une alimentation induite de la nappe de la craie par le canal de la Scarpe, comme en témoigne la carte piézométrique dressée à l'étiage de 1972 (184) et l'analyse des débits du canal (chapitre 5, modèle du Douaisis). L'essai de pompage considéré a été effectué sur l'ouvrage de la S.A. des Fonderies (154).

La nappe se situe au repos à 3 m du sol et la distance du forage au canal de la Scarpe est d'environ 150 m. Aucun piézomètre n'existe à proximité. La courbe de descente obtenue sur l'ouvrage au débit de 185 m³/h. montre un palier dans l'évolution des rabattements en fonction du temps (fig. 64). L'interprétation d'un tel type de courbe peut être tentée en faisant appel soit à un schéma hybride (courbes B + C de la fig. 48) supposant une drainage de la nappe alluviale, soit à un schéma faisant appel à l'existence d'une limite à charge constante et qui serait dans notre cas représentée par le niveau du canal de la Scarpe (courbe B de la fig. 48).

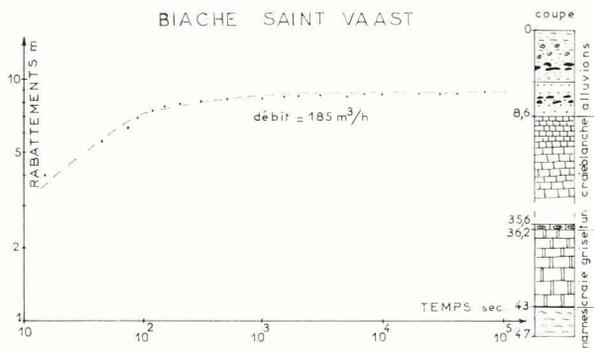


Fig. 64. — Courbe de descente à Biache St Vaast. (d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

b) Vallée de la Sensée.

L'interprétation des essais de débit réalisés en 1960 et 1961 (123) sur huit forages E.D.F. implantés le long de la vallée et du canal de la Sensée entre Bouchain, Arleux et Gœulzin, a permis de mettre en évidence les faits suivants :

— une alimentation de la nappe de la craie en cours de pompage par les marais dans le secteur de Wasnes-au-Bac, Hem-Lenglet et Fressies (courbe B de la fig. 48),

— l'existence d'une zone de craie altérée en tête de l'aquifère qui disparaît rapidement dès que l'on s'éloigne du tracé du canal de la Sensée. L'examen des courbes de descente montre l'existence d'une barrière hydraulique qui traduit la disparition latérale de l'altération (courbe E de la fig. 48).

Les phénomènes d'alimentation de la nappe de la craie par le réseau hydrographique superficiel semblent se manifester au niveau des canaux de la Scarpe et de la Sensée. Une relation étroite entre les plans d'eau des marais de la Sensée et la nappe de la craie explique les faibles rabattements mesurés lors des essais de pompage.

Une drainance verticale de la nappe des alluvions se juxtapose en outre à ces phénomènes.

Toutes ces observations seront utilisées lors de l'élaboration du modèle mathématique du Douaisis.

5) Vallée de l'Escaut à l'aval de Valenciennes.

La vallée de l'Escaut se caractérise par l'existence d'un vaste recouvrement alluvionnaire épais parfois de 22 m (236) qui masque les formations du Crétacé et du Tertiaire.

Les alluvions de la vallée de l'Escaut sont constituées, du haut vers le bas, de plusieurs niveaux :

— des colluvions sablo-argileux de 2 à 5 m d'épaisseur reposant sur des niveaux discontinus de tourbe,

— des sables fins d'épaisseur très variable (2 à 12 m) qui sont vraisemblablement des sables landéniens remaniés,

— des graviers à silex de 2 à 5 m d'épaisseur pouvant reposer soit directement sur les terrains crétacés, soit sur des lambeaux lenticulaires de sables et argiles landéniennes.

Les graviers de base constituent un aquifère productif.

La morphologie des terrains du Crétacé dans la vallée de l'Escaut est guidée par un paléorélief paléozoïque très accusé.

a) Site de Fresnes-sur-Escaut.

Nous nous intéresserons aux relations hydrodynamiques qui lient la nappe de la craie à celle des alluvions et pour cela nous examinerons le site de Fresnes-sur-Escaut au lieu-dit " La Neuville ", situé à 700 m à l'Est de l'écluse de Fresnes sur la rive droite de l'Escaut (106). Nous avons choisi deux pompages d'essai réalisés, l'un aux alluvions, l'autre à la craie. Il n'existe pas de niveau imperméable entre la craie et les alluvions grossières de base.

1° Nappe de la craie.

Un pompage a été réalisé sur l'ouvrage creusé dans la craie au débit de 230 m³/h. Les niveaux relevés sur un piézomètre distant de 10 m ont été reportés en fonction du temps sur la fig. 65. Remarquons l'apparition d'un palier de stabilisation des rabattements qui peut être la conséquence de l'un des deux types de phénomènes suivants :

— une drainance des alluvions sus-jacentes répondant au schéma d'Hantush : une couche semi-perméable (les graviers et les sables) à emmagasinement notable est placée entre l'aquifère testé (craie) et une couche imperméable (colluvions argilo-sableux de surface),

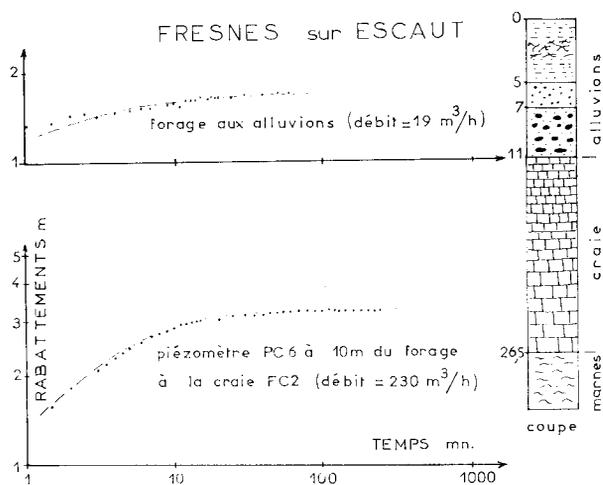


Fig. 65. — Courbe de descente à Fresnes-sur-Escaut. (d'après documents Géopétrole).

— une limite d'alimentation à niveau d'eau constant, constituée par la présence proche d'une dépression à remplissage de graviers qui communique latéralement avec l'aquifère crayeux. Pour ces deux types de schémas, les valeurs de la transmissivité et de l'emmagasinement oscillent respectivement autour de $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. et $0,22 \%$. Dans les deux cas, il existe une relation entre la nappe de la craie et la nappe des alluvions.

La première hypothèse (courbe C de la fig. 48) doit être retenue de préférence à la seconde en raison du fait suivant : au cours du pompage réalisé dans la nappe de la craie, les niveaux de la nappe alluviale ont subi une légère baisse synchrone qui exclut l'hypothèse d'un niveau d'eau strictement constant dans les alluvions.

2° Nappe des alluvions.

A proximité du forage à la craie, un test effectué sur un piézomètre crépiné au niveau des graviers au débit de $19 \text{ m}^3/\text{h}$. conduit à une courbe de relation du rabattement en fonction du temps présentant un palier de stabilisation (fig. 65) dont les causes possibles peuvent être les suivantes :

- une drainance descendante des sables fins supérieurs,
- une communication latérale possible entre le niveau de graviers et le canal,
- une drainance ascendante de la nappe de la craie.

La dernière possibilité l'emporte de préférence aux autres en raison de l'influence, constatée précédemment, du pompage de la nappe de la craie sur les niveaux de la nappe alluviale au repos.

b) Site de Valenciennes (Ecluse Folien).

L'examen de ce site a pour but d'étudier les caractéristiques de la nappe alluviale seule, car ici l'aquifère crayeux est inexistant.

La création d'une nouvelle écluse "Ecluse Folien" à Valenciennes a nécessité une connaissance préalable des caractéristiques hydrauliques de la nappe des alluvions (160). Un forage d'essai aux alluvions grossières a été creusé ainsi que dix piézomètres d'observation. Le débit de pompage a été maintenu constant au chiffre de $306 \text{ m}^3/\text{h}$. pendant 102 heures.

Nous avons choisi de présenter quatre courbes de descente, l'une sur le forage d'essai et les trois autres sur des piézomètres distants de 25 m (P1), de 50 m (P2) et 100 m (P3). Les ouvrages sont alignés subparallèlement au tracé du canal à une distance de 150 à 300 m. Les courbes de descente (fig. 66) montrent l'apparition d'un palier de stabilisation puis ensuite une croissance progressive des rabattements. L'interprétation d'un tel type de courbe amène à considérer un phénomène d'égouttement d'après un schéma de Boulton (courbe D de la fig. 48). Les niveaux de sable fin et des col-luvions alimenteraient ainsi la nappe des alluvions grossières dans un premier stade qui correspond à l'apparition du palier. Puis la vitesse de descente de l'eau d'égouttement devenant constante et inférieure à la baisse du niveau de l'eau dans les graviers, un nouvel accroissement des rabattements se manifeste.

Les valeurs de transmissivité qui sont issues de l'analyse des courbes de descente, obtenues sur les piézomètres, sont homogènes ($1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ à $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$). Le coefficient d'emmagasinement S correspond à la compressibilité de la nappe en charge et oscille entre $7,6 \cdot 10^{-4}$ et $2,10^{-3}$. Le coefficient d'emmagasinement S' correspond à la vidange globale globale des complexes aquifères ; plus important, il fluctue entre $4,5 \cdot 10^{-3}$ et $1,1 \cdot 10^{-1}$.

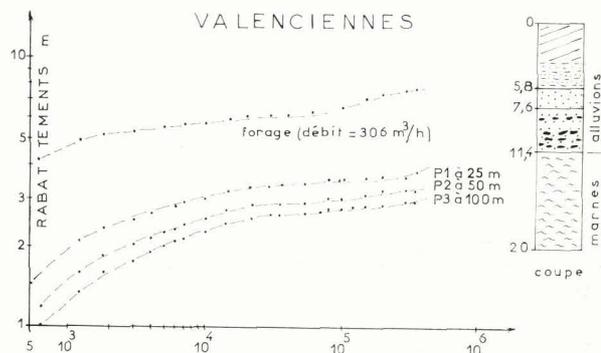


Fig. 66. — Courbe de descente à Valenciennes. (d'après archives et documents B.R.G.M. Nord - P.-de-C.).

c) Site de Bruay-sur-Escaut (Ecluse de la Folie).

Ce dernier site, choisi entre celui de Fresnes-sur-Escaut et Valenciennes, va permettre de compléter les multiples schémas hydrodynamiques.

ques déjà envisagés dans la nappe des alluvions. Nous avons ici la présence d'un épais niveau argileux et sableux (10 m) du Landénien séparant l'aquifère crayeux de l'aquifère alluvionnaire. Le forage est testé au débit de 210 m³/h.

Le pompage d'essai a été suivi par l'intermédiaire de neuf piézomètres répartis suivant trois directions à 25,50 et 100 m de distance de l'ouvrage (103).

Les courbes de relation entre les rabattements et le temps de pompage suivent une loi de Theis (courbe A de la fig. 48). L'absence de stabilisation indique que la nappe n'est pas en relation avec le canal. Nous avons donc ici un aquifère captif entre deux niveaux imperméables. Aucune relation n'existe ici avec la nappe de la craie.

La vallée de l'Escaut en aval de Valenciennes présente une succession variable de schémas hydrodynamiques mettant ou non en relation la nappe de la craie et la nappe des alluvions. L'existence des schémas d'Hantush, de Boulton et de Theis a pu être ainsi décelée.

6) Vallée de la Liane à St-Léonard.

Les relations hydrodynamiques du système aquifère calcaire du Séquanien répondent également aux schémas de Walton, Hantush et Boulton (courbes B, C et D de la figure 48). Ces schémas seront développés dans le cadre de la gestion des ressources de la vallée de la Liane (chapitre 6).

7) Conclusions.

Les relations hydrodynamiques des systèmes aquifères régionaux, mises en évidence par les pompages d'essai, montrent qu'il existe cinq familles de courbes expérimentales comparables à des familles de courbes théoriques résolues analytiquement. Ces relations impliquent en général des transferts de débit issus des rivières ou des marais, de la drainance d'aquifères annexes (alluvions, sables tertiaires) et de l'égouttement de niveaux aquifères superficiels. La validité, ainsi établie, des transferts de débit, sera utile dans le cadre de la réalisation des modèles de gestion des systèmes aquifères régionaux (chapitres 5 et 6).

IV. — APPLICATION DU CALCUL DES PERMEABILITES A L'ARTOIS

La conformité des calculs théoriques avec des données réelles de terrain au Cran d'Escalles conduit à étendre l'hypothèse de travail à l'ensemble de l'Artois (117).

La recherche des liens physiques, entre la distribution des fractures, d'une part, et les réseaux d'écoulement superficiel et souterrain, d'autre part, a amené à réaliser une cartographie régionale en pays crayeux (Artois). Successivement sont présentés :

— les résultats statistiques des données géométriques issues des relevés structuraux de terrain ;

— une synthèse montrant les apports de la distribution des fractures et de la restitution calculée des perméabilités et des vitesses dans les domaines des écoulements superficiel et souterrain. Des comparaisons sont faites avec trois exemples empruntés au génie civil (creusement de galeries), à l'hydrologie quantitative et à l'hydraulique.

1) Rappel de la tectonique régionale.

Encadrés au Nord par le Bassin de Bruxelles, au Sud par le Bassin de Paris, le dôme de l'Artois et sa terminaison occidentale, la boutonnière du Boulonnais, résultent pour leurs grandes lignes d'une tectonique cassante d'âge post-sénonien - anté-éocène moyen.

Deux types de failles affectent les assises crétacées de l'Artois, les unes orientées NW-SE (N 100°-110°), les autres NNE-SSW (N 20°-40°). Les premières sont qualifiées de *longitudinales* et sont parallèles à l'allongement du dôme, les autres de *transverses* et semblent localisées en Boulonnais. Les failles transverses ont une direction typiquement hercynienne : aux contraintes de compression N-S, on associe dans les terrains primaires des couples de ruptures cisailantes d'orientation N 20°-40° et N 150°-170° (202) ; elles correspondraient donc au rajeunissement de failles du socle primaire. Les failles longitudinales seraient associées à un accident de socle cisailant dextre (201) d'âge tardihercynien et qui a rejoué à la fin du Crétacé ou à l'aurore du Tertiaire.

L'étude des fractures en Artois-Boulonnais (202) et dans la région lilloise (203) a permis de mettre en évidence dans les assises secondaires, des couples de joints conjugués cisailants d'orientation N 70°-80° et N 120°-140° liés à des contraintes de compression d'orientation E-W. Dans le détail, c'est la seconde famille de joints (120°-140°) qui est prépondérante.

2) Relevé des fractures.

Les relevés de terrain ont été effectués par Colbeaux (117) sur huit feuilles au 1/50.000 et comptent environ 3.000 mesures sélectionnées pour 42 sites (carrières et falaises). Toutes les caractéristiques de la fracturation ont été notées quand cela s'avérait possible : la direction, le pendage, l'écartement, la continuité, la fréquence, les remplissages, les traces d'oxydes, etc...

Le traitement des données a été réalisé après une synthèse statistique à l'aide de stéréogrammes. Seules les fractures hydrauliquement actives ont été utilisées dans les calculs.

3) Représentation cartographique et résultats.

Comme nous l'avons dit en 1976 (117) :

« Sur la carte régionale ont été reportées (fig. 67) les directions principales des familles de fractures et les perméabilités principales du tenseur rapporté au plan de fracturation plutôt que le tenseur global. Les valeurs des deux perméabilités K_1 et K_2 sont données par rapport à

la conductivité hydraulique globale K (147) comme étant égale à :

$$K = \sqrt[3]{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}$$

Pour mieux apprécier la variation des perméabilités, un report dans le plan horizontal des projections de l'intersection entre l'ellipsoïde de représentation géométrique du tenseur et le plan de fracturation considéré a été effectué.

Après un examen détaillé de tous les secteurs où des mesures ont pu être réalisées, les faits les plus significatifs peuvent être dégagés.

La première analyse a été effectuée au Cran d'Escalles (entre le Blanc-Nez et le Gris-Nez) au pied de la falaise crétacée, là où la nappe de la craie affleure. Le débit des fissures hydrauliquement actives en période de hautes eaux (juin 1975) a pu être mesuré.

Ailleurs, en Artois, les mesures de fracturation effectuées en carrière n'ont jamais pu être accompagnées de la mesure des débits.

Le Cran d'Escalles (Marquise Ouest).

L'existence d'un affleurement de la nappe de la craie (du Cénomaniens supérieur) au niveau de la falaise a permis une mesure sélective des débits de 35 fractures sur un front de 150 m. Ces fractures d'extension continue sur la tranche de terrain hydrauliquement active (3 m environ) possèdent un plan de cassure lisse ou très finement rugueux.

Les caractères structuraux et hydrauliques sont reportés sur le tableau XVII.

On constate qu'un écartement important des lèvres de la fracture n'est pas synonyme d'un fort débit : les fissures horizontales ($e = 43$ mm) qui possèdent un débit plus faible que les fissures N 100°-120° ($e = 10$ mm). Les contributions les plus importantes au débit pour une tranche

CLASSES DE DIRECTION DES PLANS DE FRACTURE OBSERVES									
Direction (degrés)	20 - 40	40 - 60	80 - 100	100 - 120	120 - 140	140 - 160	160 - 180	horizontal	total
Pendage (degrés)	90	NW 80	S 30	S 30 et 90	S 60 et 90	SW 70 et 90	SW 50	0	
Nombre	1	2	2	4	13	7	2	3	35
Débit total en l/s	0,06	0,27	0,12	1,22	2,94	0,93	0,5	0,78	6,78
Débit moyen par fissure en l/s	0,06	0,13	0,05	0,30	0,23	0,13	0,25	0,25	
Ecartement moyen de la fracture en mm	5	7,5	15	10	22	24	15	43	
Fréquence	0,005	0,006	0,006	0,02	0,08	0,04	0,006	0,013	

Tableau XVII. — Caractéristiques structurales et hydrauliques des fractures de la craie au Cran d'Escalles - Blanc-Nez (P.-de-C.) (Colbeaux et Mania, *Ann. Sc. Besançon*, 1976, p. 186).

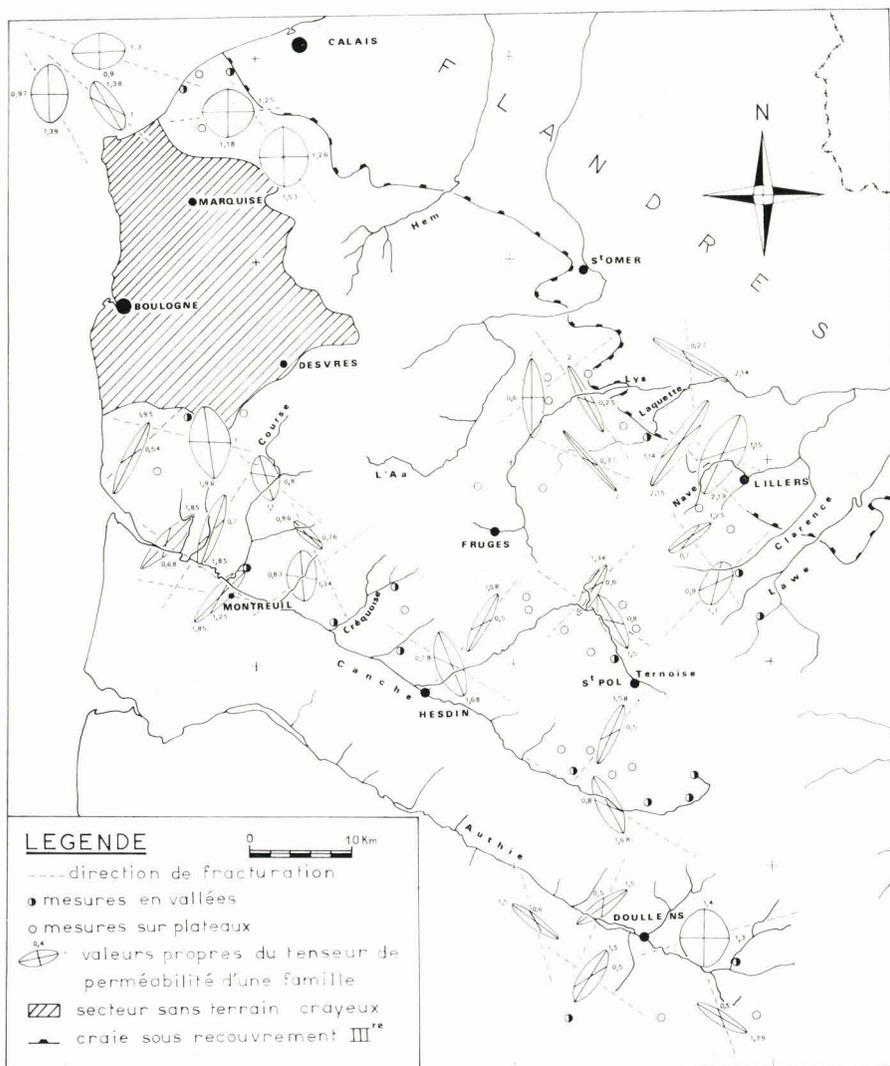


Fig. 67. — Distribution géographique des directions de fractures dans les terrains crayeux et des perméabilités principales associées (Colbeaux et Mania, *Ann. Sc. Besançon*, 1976, p. 185).

donnée d'aquifère et pour une charge hydraulique identique sont les suivantes, dans l'ordre décroissant :

- fractures N 120°-140° = 43,4 %
- fractures N 100°-120° = 17,9 %
- fractures N 140°-160° = 13,7 %

Avec ces trois familles nous obtenons 75 % du débit de la nappe en bordure de la falaise. Les perméabilités calculées restent relativement homogènes (de 0,9 à 1,3 K).

Sur la carte piézométrique générale, le gradient hydraulique local possède une valeur de 0,02 et une direction d'écoulement N 30°, ce qui permet le calcul des vitesses d'écoulement reportées au tableau XVIII.

Les valeurs des débits théoriques et mesurés sont proches. Les différences observées sont imputables soit à une mauvaise continuité géométrique des fissures à l'intérieur du massif, soit à l'apparition d'un régime d'écoulement turbulent.

Il faut souligner qu'il existe en bordure de falaise (comme d'ailleurs en bordure des vallées) des réarrangements structuraux du massif fracturé en raison des décompressions et du déboufrage de certaines fissures.

En profondeur, le massif fracturé montre des fissures à écartement très faible ou nul à écoulement moindre. Au cours de travaux souterrains de creusement (galeries de Sangatte), un élargissement des fissures au cours du temps en fonction des décompressions est remarqué (220). Les

fissures à colmatage argileux se dégagent progressivement sous l'effet des charges hydrauliques dans les formations surincombantes.

La bonne corrélation entre les débits mesurés et calculés au Cran d'Escalles permet d'envisager l'extension du calcul théorique de la perméabilité à l'ensemble de l'Artois ».

4) Synthèse des résultats.

« Examinons maintenant les apports de la distribution géographique des fractures, des valeurs de la perméabilité et des vitesses d'écoulement dans les domaines des circulations superficielles et souterraines.

L'Artois, composé essentiellement de terrains crayeux, possède un réseau hydrographique dont l'alimentation est constituée à 90 % par le drainage de la nappe de la craie (87). On comprend alors aisément l'importance majeure des caractères affectant le réseau hydrographique sur la morphologie de la nappe ».

a) Domaine de l'écoulement superficiel.

1° Apport de la distribution des fractures.

« Le réseau des fractures semble être le trait majeur de l'orientation des vallées sèches ou actives. Ainsi les vallées de l'Authie et de la Canche suivent une famille N 120° alors que celles de la Hem, l'Aa, la Lys, la Clarence et la Lawe sont guidées par une famille N 30° ».

2° Apport de la restitution calculée des perméabilités.

« Deux cas de restitution calculée de la perméabilité peuvent se dégager :

— la perméabilité globale surtout influencée par une famille de fractures prépondérante et les vecteurs de représentation de la perméabilité sont alors parallèles (ex. : Montreuil) ;

— la perméabilité globale est peu liée au réseau des fractures en raison de valeurs de fréquence et d'épaisseur

Famille de fracture	Epaisseur en m	Vitesse d'écoulement en m/s	Débit mesuré in situ en l/s	Débit calculé en 10^{-4} m ³ /s	Débit calculé en l/s
N 120 - 140	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,61 \cdot 10^{-2}$	0,23	2,28	0,22
N 100 - 120	$1 \cdot 10^{-2}$	$2,65 \cdot 10^{-2}$	0,30	1,06	0,10
N 140 - 160	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$2,53 \cdot 10^{-2}$	0,13	2,4	0,24

Tableau XVIII. — Comparaison des débits mesurés et calculés au Cran d'Escalles pour une fissure de 3 mètres d'extension (Colbeaux et Mania, *Ann. Sc. Besançon*, 1976, p. 187).

Secteur géographique	Fracturation		1ère hypothèse		2ème hypothèse	
	Famille de fracture	Fréquence	Epaisseur en m	Vitesse en m/s	Epaisseur en m	Vitesse en 10^{-4} m/s
Montreuil (Est)	N 35°	20	$3 \cdot 10^{-2}$	8,5	$1 \cdot 10^{-3}$	2,19
Basse Canche	N 100°	1	$5 \cdot 10^{-3}$	10,2	$1 \cdot 10^{-3}$	4,03
	N 130°	1	$3 \cdot 10^{-2}$	9,2	$1 \cdot 10^{-3}$	4,27
Fruges (Ouest)	N 55°	14	$2 \cdot 10^{-2}$	3,28	$1 \cdot 10^{-3}$	3,87
Moyenne Canche	N 130°	1	$3 \cdot 10^{-2}$	2,91	$1 \cdot 10^{-3}$	3,89
	N 155°	8,3	$2 \cdot 10^{-2}$	2,58	$1 \cdot 10^{-3}$	3,56
Hesdin (Est)	N 40°	5	$2 \cdot 10^{-2}$	0,63	$1 \cdot 10^{-3}$	1,33
Haute Canche	N 120°	5	$1 \cdot 10^{-2}$	0,71	$1 \cdot 10^{-3}$	1,84

Tableau XIX. — Calcul des vitesses de filtration le long de la vallée de la Canche avec un gradient hydraulique moyen N 30° et de valeur 0,02 (issus de la carte piézométrique) (Colbeaux et Mania, *Ann. Sc. Besançon*, 1976, p. 190).

très proches ; l'ellipse de section tend alors vers un cercle (ex. : Marquise).

L'orientation de certaines petites vallées et les modifications locales du cours des rivières sont dues à des perméabilités fortes suivant ces directions. De telles perméabilités commandent également les circulations profonde et superficielle. Ainsi certains tronçons de la Canche possèdent des orientations N160° qui correspondent à des perméabilités fortes de même direction ; le cours de la Ternoise suit les directions des vecteurs de perméabilité liés aux fractures majeures ».

3° Apport de l'estimation des vitesses d'écoulement dans l'expression du débit des rivières.

« Les vitesses d'écoulement calculées dépendent étroitement du gradient hydraulique et des valeurs de perméabilité. Elles jouent un rôle essentiel dans les apports nappe-rivière. Il devient théoriquement possible de calculer la part relative du débit de la nappe dans le débit total d'un cours d'eau à partir des valeurs des vitesses d'écoulement. Qualitativement, on peut saisir les évolutions éventuelles des vitesses. Ainsi, en reportant dans le tableau XIX les valeurs des vitesses d'écoulement souterrain le long de la vallée de la Canche, une croissance des valeurs apparaît au fur et à mesure que l'on s'approche de l'estuaire. Il y aurait corrélation entre la fréquence et la largeur d'ouverture des fractures, d'une part, l'importance de l'altération et de la décompression, d'autre part ».

b) Domaine de l'écoulement souterrain.

« Il faut souligner que si les valeurs des perméabilités, calculées par rapport à une conductivité hydraulique globale, sont relativement constantes, il n'en demeure pas moins que la valeur absolue de chacune d'elles, pour un site donné, décroît logiquement pour des terrains situés de plus en plus profondément sous la surface du sol. Ce fait est mis en évidence par les essais Lugeon. De même, en s'éloignant progressivement de l'axe principal des vallées, les valeurs de transmissivité décroissent (116) et les fluctuations piézométriques s'amplifient. L'analyse des graphiques piézométriques montre l'existence des battements saisonniers de la nappe : de 5 à 10 m sous les plateaux et de 1 à 3 m dans les vallées ; ce qui confirme indirectement la diminution de la valeur du coefficient d'emmagasinement. Les fissures, dans leur milieu de contrainte initial, semblent donc fermées.

De manière générale, l'examen des valeurs des perméabilités principales du tenseur montre l'influence majeure de la perméabilité verticale qui est liée au fort pendage des plans de fractures (80° à 85°). Il s'avère délicat de mesurer directement l'anisotropie des perméabilités autrement que par l'utilisation de la sonde triple (147) et seuls les sites du Cran d'Escalles et de Sangatte peuvent permettre une justification de la méthode utilisée par l'intermédiaire des débits.

Dans le cadre des travaux préliminaires au creusement du tunnel sous la Manche, la galerie horizontale expérimentale creusée sur 40 m dans la craie du Cénomaniens au « puits des Anciens » à Sangatte a permis d'effectuer des mesures de débit et de calculer une perméabilité moyenne de 5.10^{-6} m/s (220). Les niveaux creusés sont similaires à ceux du Cran d'Escalles et sont relativement proches (2,5 km) pour tenter une comparaison.

D'après les observations effectuées, les fissures sont fermées et s'ouvrent légèrement par décompression au bout de quelques jours en libérant un certain débit qui tend à se stabiliser : 14 l/s en régime permanent. En affectant des ouvertures de 0,1 mm aux fissures, tout en conservant la même fréquence de répartition, on aboutit aux valeurs de perméabilité principale suivantes : $K_1 = 8,8.10^{-6}$ m/s, $K_2 = 8,6.10^{-6}$ m/s et $K_3 = 4,2.10^{-6}$ m/s. On constate un bon encadrement de la valeur de perméabilité globale effective.

Pour une charge hydraulique de 38 m (la galerie étant située à la cote — 38 m NGF et la nappe vers 0 m NGF), on obtient des vitesses d'écoulement allant de $2,7.10^{-6}$ à $4,2.10^{-6}$ m/s. Ces chiffres expliquent le débit faible enregistré pour une galerie de 40 m de long et de 3,50 m de hauteur.

Dans un tout autre domaine, on peut essayer de comparer les débits d'écoulement souterrain issus d'un calage de bilan d'eau global d'un bassin versant et les débits calculés à partir de la fracturation.

Ainsi, pour le bassin de la haute Canche, il avait été montré (117) que le module d'écoulement souterrain était de 15 l/s/km². En prenant les vitesses de circulation pour des fissures de 1 mm de largeur (2° hypothèse du tabl. XIX), pour une tranche aquifère active de 10 m et un gradient hydraulique N30° de valeur 0,03, et pour une bande de terrain de 1 km, on aboutit aux chiffres suivants :

- 6,6 l/s/km pour la famille de fractures N 40°.
- 9,2 l/s/km pour la famille de fractures N 120°.

Si l'on admet des équipotentielles parallèles au côté d'une d'une maille, on obtient un module de 15,8 l/s/km² qui est proche du module obtenu pour le bilan global ».

5) Conclusions.

A la suite des mesures de terrain effectuées au Cran d'Escalles, la mise en œuvre du calcul systématique des perméabilités issues de la fracturation et un essai de cartographie régionale des variations de perméabilité sur l'ensemble de l'Artois ont été établies. L'apport positif de ces nouvelles données sur le plan de l'écoulement superficiel et de l'écoulement souterrain est souligné. L'incertitude qui subsiste encore est relative à la continuité des largeurs et à l'extension longitudinale des fissures à l'intérieur du massif fracturé examiné. Il est cependant nécessaire d'établir de tels calculs afin d'élaborer des modèles de simulation de l'écoulement en faisant intervenir l'anisotropie du réservoir crayeux.

V. — APPORTS RECENTS DE LA DIAGNOSTIC DES VITESSES D'ÉCOULEMENT

L'utilisation très récente du micromoulinet dans les forages d'exploitation d'eau par Dague et Galle-Cavalloni (122) et Pouchan (158), permet d'estimer les vitesses de circulation des

eaux souterraines, de localiser les horizons aquifères et enfin, quand un pompage d'essai a été réalisé au préalable, de calculer les perméabilités de ces niveaux hydrauliquement actifs. Cette méthode est caractérisée par une grande rapidité d'exécution et une bonne précision. L'essai au micromoulinet est réalisé en général en fin de creusement du sondage, soit en trou nu, soit en trou équipé d'un tube crépiné.

1) Principe et description du micromoulinet « Rossignol » (*).

Une hélice est mise en rotation sous l'impulsion d'un flux hydraulique en provenance de l'aquifère à la suite d'un pompage d'essai ou d'une injection à débit constant. Le régime permanent est nécessaire au bon déroulement de l'opération. De petites aiguilles verticales métalliques sont fixées sur les pales de l'hélice et viennent interrompre lors de leur rotation un faisceau lumineux émis par une source à rayonnement infra-rouge. On enregistre le nombre d'impulsions (4 par tour d'hélice) pour un temps donné. Plus les impulsions par constante de temps sont nombreuses, plus la vitesse de circulation est importante (le débit et le diamètre du sondage étant supposés constants). La mise en rotation de l'hélice est assurée à partir d'une vitesse d'écoulement de 8 mm/seconde.

Le micromoulinet est constitué de la façon suivante :

- un corps cylindrique en acier inoxydable est relié à un câble qui joue le rôle de porteur et de conducteur électrique ;

- un centreur constitué de lames métalliques ou de tiges de câble souple maintient le micromoulinet parfaitement dans l'axe du forage ;

- l'hélice comporte quatre pales ;

- un treuil de manœuvre permet de manœuvrer graduellement le micromoulinet ;

- un indicateur des profondeurs et un compteur d'impulsions relié à un chronomètre complètent l'appareillage.

2) Utilisation du micromoulinet (*).

Comme pour les opérations de la diagraphie, il est possible d'utiliser le micromoulinet sur les plans qualitatif et quantitatif. Un "log"

(*) D'après la documentation de F. Rossignol, inventeur et constructeur du micromoulinet de même nom.

vertical de vitesses cumulées d'écoulement est réalisé en déplaçant le micromoulinet mètre par mètre à la descente et tous les 0,25 m à la remontée. On détermine ainsi les tranches de terrain hydrauliquement actives ou à écoulement nul (palier). A partir de la courbe de variation des vitesses d'écoulement, il est possible de calculer les variations du débit cumulé surtout si la variation de la perméabilité des horizons aquifères reste relativement constante.

On obtient une courbe des débits homothétique de celle des vitesses qui permet d'attribuer à chaque tranche de terrain une fraction du débit total Q constant (pompe ou injecté).

La connaissance préalable de la transmissivité globale T de l'aquifère (à l'aide du pompage d'essai) permet d'apprécier la perméabilité k_n d'une tranche de terrain n (cette dernière étant considérée isotrope) d'épaisseur e_n et de débit q_n . On peut alors écrire la relation suivante :

$$k_n = \frac{Tq_n}{e_n Q}$$

3) Applications et résultats (**).

Trente cinq diagraphies au micromoulinet ont été effectuées par Braillon et coll. (111, 191) dans des piézomètres ou des ouvrages traversant l'aquifère crayeux du Nord-Pas-de-Calais (fig. 55). Une seule diagraphie de vitesse d'écoulement a été réalisée dans un forage pénétrant dans le calcaire carbonifère à Bondues.

a) Aquifère crayeux.

On peut distinguer quatre types de site hydrogéologique dont le comportement hydraulique est différent :

- l'aquifère crayeux est surmonté par une couverture tertiaire d'argiles et de sables landéniens : cas du captage d'Arques dans la vallée de l'Aa ;

- des alluvions sablo-argileuses à silex et à graviers recouvrent la craie : cas de la vallée de la Deûle à Lille, de la vallée de la Scarpe à Agny, de la vallée de l'Escaut à Condé et de la vallée de la Nave à Lillers ;

- des limons de faible épaisseur (5 m) masquent la craie, cas de Dechy-Férin dans le Douaisis ;

(**) Les essais au micromoulinet ont été effectués dans le cadre des interventions du B.R.G.M. Nord-Pas-de-Calais.

— un niveau crayeux de forte épaisseur (Cénomanién) est traversé en profondeur sous des marnes imperméables (Turonien) : cas du Cénomanién de Fruges.

1° *Sous recouvrement tertiaire.*

Le site d'Arques (au lieu-dit le Havelt) dans la vallée de l'Aa a fait l'objet d'un essai au micromoulinet (161) qui a permis d'obtenir un diagramme des vitesses d'écoulement et des débits. L'existence de quatre zones à perméabilité différente (Annexe B, fig. a) a pu être mise en évidence. Globalement, on constate une décroissance de l'ensemble des vitesses au fur et à mesure que l'on s'adresse aux couches les plus profondes.

2° *Sous recouvrement alluvionnaire.*

— *Vallée de la Deûle.*

Les vitesses d'écoulement obtenues à partir de douze essais effectués à Lille dans la vallée de la Deûle (217) montrent (Annexe B, fig. b) une absorption régulière décroissante vers le bas des débits d'injection.

Sur certains graphiques sont constatées soit une absence totale de circulation à partir et en-dessous du banc de tun, soit une légère arrivée d'eau juste sous ce dernier mais très limitée (sur 1 m environ).

Ces observations confirment le rôle de barrière hydraulique joué par le banc de tun qui bloque à la fois les circulations verticales ascendantes ou descendantes.

— *Vallée de la Nave.*

Le site de Lillers (sucrierie) dans la vallée de la Nave présente de grandes similitudes avec le site de Lille (191).

Le diagramme des débits cumulés obtenu par pompage (Annexe B, fig. c) indique de fortes venues d'eau au niveau de la craie altérée avec une décroissance caractéristique d'un colmatage. Un pic brutal d'accroissement des arrivées d'eau apparaît en tête de la craie fissurée. Très rapidement (sur 5 m environ), on assiste à la disparition de toute circulation.

— *Vallée de la Scarpe.*

Le diagramme des débits cumulés (Annexe B, fig. d) indique de fortes venues d'eau en tête de la craie altérée avec une décroissance jus-

qu'à la craie saine. Les débits s'annulent vers la partie moyenne de la craie à silex bien avant les niveaux marneux (191).

— *Vallée de l'Escaut (191).*

A Condé-sur-Escaut, la craie blanche est recouverte de sables alluvionnaires qui proviennent des sables landéniens remaniés. La craie n'est productive qu'en tête (Annexe B, fig. e).

3° *Sous recouvrement de limons.*

Le site de Dechy-Férin (110) fournit un diagramme des débits cumulés (Annexe B, fig. f) obtenu par l'injection d'un débit de 13 m³/h. L'existence de cinq zones à absorption variable a pu y être décelée (Z1 à Z5). Il est à noter la présence de niveaux de craie particulièrement absorbants, immédiatement sous les limons. La nappe actuelle se situe dans la craie blanche à rendement médiocre. Cependant, un niveau intéressant semble se manifester juste au-dessus de la craie à silex qui pourrait ainsi constituer un écran hydraulique.

4° *L'aquifère crayeux du Cénomanién.*

Particulièrement favorable dans la région de Fruges (Haute Lys), en raison de son faciès (116) aux circulations des eaux souterraines, il a été mis en valeur par les diagraphies électriques puis sur le plan pratique grâce à l'intervention du micromoulinet (111, 156).

La position des niveaux de craie cénomaniénne sous les marnes imperméables du Turonien moyen et inférieur est bien mise en évidence par les courbes de résistivité et des vitesses cumulées d'écoulement (Annexe B, fig. g). Cinq zones à production hydraulique décroissante vers le bas, en raison de l'enrichissement des niveaux en particules argileuses, sont distinguées (156).

5° *Conclusions.*

L'utilisation récente du micromoulinet « Rosignol » dans le cas d'une injection ou d'un pompage dans un forage a permis de dresser trente cinq diagraphies de vitesse d'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère crayeux du Nord de la France. Les zones testées correspondent à des modes de gisement particuliers du réservoir crayeux :

— recouvrement de la craie sénonienne par des argiles et des sables du Tertiaire à Arques (vallée de l'Aa) ;

— superposition d'alluvions à des terrains crayeux sénoniens et turoniens à Lille (Deûle), Lillers, Agny (Scarpe) et Condé (Escaut) ;

— nappe captive intercalaire de l'aquifère crayeux du Cénomanien supérieur à Fruges (Haute Lys) ;

— craie affleurante sous les limons de faible épaisseur à Dechy (Douaisis).

L'examen des divers cadres hydrogéologiques et des résultats de la diagraphie au micromoulinet permettent de tirer les enseignements suivants :

— sous recouvrement tertiaire et à une distance inférieure à 5 km des limites d'affleurement de la craie, l'aquifère fournit (ou absorbe) 90 % des débits soutirés (ou injectés) dans la moitié supérieure du réservoir crayeux (soit 30 à 40 m) ;

— sous un dépôt alluvionnaire, la craie altérée et la craie très fissurée représentent une tranche de terrain très aquifère d'environ 5 à 10 m d'épaisseur seulement. On a pu y remarquer la prédominance du facteur « altération » sur celui de la lithologie. La présence de bancs compacts phosphatés (tun) explique le blocage des circulations souterraines, soit vers le haut, soit vers le bas. Le rôle d'écran hydraulique joué par le tun facilement repérable en sondage a ainsi été mis en évidence ;

— la craie aquifère du Cénomanien supérieur, épaisse de 15 m, qui se situe entre les marnes semi-perméables du Turonien inférieur et du Cénomanien inférieur, a été mise en évidence dans un premier temps grâce aux diagraphies électriques et de radioactivité naturelle. La diagraphie au micromoulinet apporte une confirmation quantitative des débits disponibles et de leur distribution exacte ;

— la craie en affleurement possède deux niveaux particuliers absorbants (injection) : en tête (sur 5 m) et immédiatement sous les limons puis en profondeur à la base de la craie blanche reposant sur la craie à silex, cette dernière constituant un écran hydraulique.

Les constatations relatives à quatre sites hydrogéologiques différents ont leur explication pour trois d'entre eux (Cénomanien exclu) dans le phénomène de la dissolution des carbonates de chaux particulièrement développé en raison de la forte agressivité des eaux de drainage ou de précipitation traversant des

niveaux sablo-argileux aboutissant ensuite dans les terrains crayeux. A ce phénomène général de « surface » s'additionne un facteur lithologique plus profond qui peut favoriser (craie fissurée du Cénomanien) ou bloquer (tun, craie à silex) les circulations des eaux souterraines.

La décroissance graduelle de la vitesse d'écoulement en fonction de la profondeur dans trois contextes hydrogéologiques différents montre que le phénomène d'altération se superpose à celui de la fermeture logique des fissures de la craie. En effet, sur les plateaux (exemple du site de Dechy-Férin) la zone de très bonne absorption immédiatement sous la couverture limoneuse passe brutalement à une zone de basse perméabilité.

On peut, à titre de confirmation indirecte, faire appel aux conclusions relatives au karst jurassien suisse. On a pu prouver (232) que la présence de matières organiques influençait directement la dissolution et le transfert des carbonates. En profondeur, la dégradation des humates tend à renouveler le stock carbonique agressif.

L'altération, dans ce cas, semble bloquée assez rapidement en raison d'une saturation rapide des eaux en carbonates qui est plus longue à s'établir sous recouvrement tertiaire ou alluvionnaire (agressivité plus forte des eaux d'infiltration). Il est possible, en dehors du site de plateau, d'établir une loi de décroissance des perméabilités qui serait appliquée au tenseur des perméabilités calculées.

b) Aquifère du calcaire carbonifère.

L'évaluation de l'épaisseur de l'aquifère hydrauliquement actif dans le calcaire carbonifère peut être tentée par l'intermédiaire de la diagraphie au micromoulinet. Le site de Bondues relativement proche de la conduite d'alimentation en eau de la rivière Lys avait été équipé d'un poste d'injection artificielle afin de soutenir les niveaux du champ captant de Lille-Roubaix-Tourcoing.

Un tubage perforé d'un diamètre intérieur de 350 mm équipe la partie supérieure du calcaire carbonifère jusqu'à la profondeur de 150,7 m, alors que la partie inférieure reste en trou nu. La transmissivité de l'aquifère est de l'ordre de $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Une injection continue de $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\pm 10 \%$) a été réalisée. Le diagramme des vitesses cumulées de l'écoulement apparaît très

contrasté. L'influence d'absorptions différentielles alternées dues au caractère fissural du réservoir calcaire ainsi que des modifications du diamètre du forage (aspérités et cavités dues au creusement) peuvent expliquer la forme du diagramme. Six zones calcaires à perméabilité horizontale différente peuvent être individualisées. De manière générale, on constate une chute rapide des valeurs de vitesses cumulées de l'écoulement en fonction de la profondeur et sur l'intervalle testé (37,7 m). D'autres diagraphies d'écoulement sur des épaisseurs d'aquifère plus fortes sont prévues et permettront de lever le doute relatif à l'importance de la zone d'aquifère utile.

VI. — CONCLUSIONS

Trois approches diverses des mécanismes hydrodynamiques et des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

— l'aquifère crayeux présente des relations variées avec d'autres aquifères (des alluvions et des sables) ou des rivières. Cela se traduira au niveau de la modélisation par un débit local d'alimentation en général estimé ou obtenu par calcul à la suite de l'imposition des potentiels. Notre ignorance vis-à-vis des perméabilités et de la piézométrie des nappes superficielles impose de telles hypothèses de travail ;

— les essais de pompage entrepris ont été synthétisés dans le but d'une meilleure compréhension de l'hydrogéologie de la nappe de la craie sous recouvrement. Il faut noter les difficultés théoriques non encore résolues pour exploiter des résultats de pompage d'un aquifère stratifié anisotrope. Les phénomènes des apports par drainance ou par égouttement ne sont abordés que très récemment sur le plan théorique et expérimental pour des terrains bicouches à circulation privilégiée (99, 100) ;

— les essais au micromoulinet apparaissent riches en enseignement car ils confirment la

complexité de l'aquifère crayeux stratifié. Le contexte géologique influence la répartition des écoulements souterrains ;

— les calculs théoriques de la perméabilité basés sur la distribution régionale des fractures et vérifiés expérimentalement sur le site du Cran d'Escalles ont permis d'ébaucher une carte de distribution des perméabilités. L'hypothèse de la fermeture des diaclases en profondeur est concrétisée par les essais au micromoulinet dans trois cas (aquifère sous terrains tertiaires ou sous des alluvions et les terrains cénomaniens à Fruges) puisque l'on observe une chute graduelle des vitesses d'écoulement. Un facteur correctif peut ainsi être calculé pour rechercher éventuellement en profondeur la modification du tenseur des perméabilités. Dans le cas du plateau crayeux, le tenseur des perméabilités représente la partie altérée et très fissurée de tête et ne peut être corrigé facilement en raison de l'apparition brutale et très localisée d'une zone très perméable. Le tenseur sera cependant très intéressant à utiliser dans la simulation des alimentations artificielles car il permettra de calculer les vitesses de circulation des eaux injectées.

Il apparaît dès lors nécessaire d'intensifier les efforts futurs dans le domaine de l'acquisition des données hydrogéologiques de terrain afin de permettre un meilleur contrôle des écoulements souterrains et d'envisager une modélisation beaucoup plus juste des phénomènes naturels.

Le seul essai réalisé dans l'aquifère du calcaire carbonifère indique (tout au moins pour la tranche de 37,7 m testée à Bondues) une baisse graduelle des débits cumulés qui serait due vraisemblablement à l'existence de fissures à écartement d'autant plus faible que l'on se trouve en profondeur. Le caractère aléatoire de la karstification pourrait venir éventuellement perturber cette logique. En effet, des diagraphies effectuées dans des secteurs proches des affleurements à Tournai et à Leuze ont montré l'existence de zones karstifiées à grande profondeur.

Application de la théorie des systèmes aquifères et des modèles associés au Nord de la France

I. — INTRODUCTION

Les éléments statiques et dynamiques décrivent un système aquifère dans une enveloppe constituée de limites régissant le flux des transferts hydrauliques.

Les éléments statiques définissent la géométrie du réservoir, les variations lithologiques du recouvrement et les fluctuations de relief du substratum, et la nature de la porosité du système étudié.

Les éléments dynamiques nécessitent pour leur bonne définition la connaissance du mode d'alimentation par les précipitations, une analyse des écoulements souterrains et totaux, un examen des variations de la surface piézométrique, une étude des transferts hydrodynamiques, une représentation analytique de la distribution géométrique des fractures et des perméabilités associées en milieux fissurés ou mixtes, et enfin des indications sur la répartition verticale des zones à perméabilité différentielle.

L'application de la théorie des systèmes aquifères au Nord de la France fait appel, dans un premier stade, à l'acquisition et à la synthèse statistique, des éléments statiques et dynamiques, qui conduit dans un deuxième stade à un modèle de simulation généralisable à tout type de système aquifère.

Dans la région Nord - Pas-de-Calais, les besoins en eau potable et en eau industrielle sont couverts en majeure partie (70 %) par des prélèvements effectués dans les nappes d'eau souterraine : $2,33.10^8$ m³/an (*) dans le Nord et

$2,04.10^8$ m³/an (*) dans le Pas-de-Calais, soit $4,36.10^8$ m³/an (13,82 m³/s) au total. Le volume des eaux prélevées dans le réseau hydrographique atteint seulement $1,85.10^8$ m³/an en raison de la faiblesse des débits d'écoulement (Chap. 2) et de la mauvaise qualité des eaux en milieu urbain et industriel.

L'extension des nappes d'eau souterraine associée aux nombreux problèmes de ressources a nécessité la réalisation de nombreux modèles (douze) couvrant une superficie de 3.500 km² (fig. 68) et relatifs aux nappes du Calcaire carbonifère, de la craie et des sables du Landénien. En dehors de ces études, des bassins entiers peu perturbés, tels que les bassins de l'Artois et les bassins de l'Escaut (Chapitre 2) également ont fait l'objet d'un examen global. Le bassin côtier de la Liane aux aquifères jurassiques et crétacés n'offre pas d'homogénéité géologique suffisante, mais présente l'originalité de disposer de plusieurs sources d'approvisionnement en eau faisant en outre l'objet d'une optimisation (Chapitre 6).

Trois régions ne seront pas abordées dans la simulation :

— l'Avesnois, qui présente plusieurs petits aquifères indépendants qui se prêtent mal à la modélisation ;

— le massif primaire du Boulonnais, où les exploitations de matériaux perturbent la continuité de l'aquifère et la piézométrie ;

(*) D'après les relevés 1973 de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

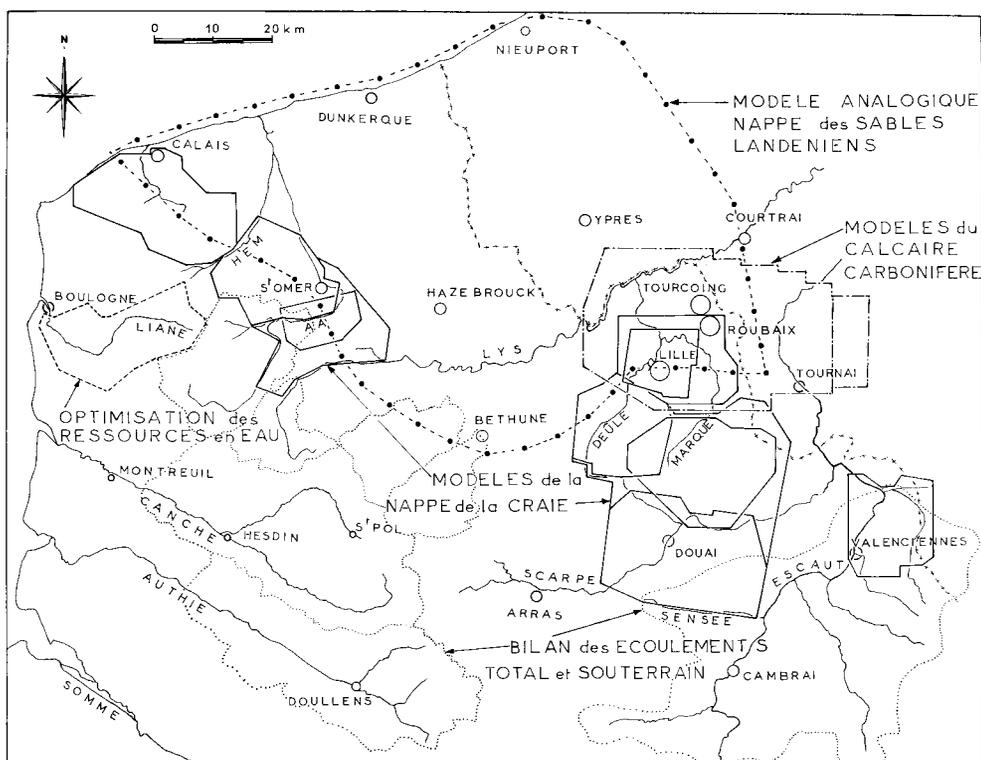


Fig. 68. — Situation géographique des différentes études de modélisation et d'optimisation.

— le bassin minier de Béthune à Hénin-Beaumont, où se greffe le problème crucial de la propagation des polluants (189) nécessitant de nombreuses données expérimentales en cours d'acquisition.

II. — MODELE MATHEMATIQUE DE LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE DE LA REGION DE LILLE

La baisse continue de la nappe du Calcaire carbonifère depuis 1945 au rythme de 1,5 m par an est à l'origine de la recherche fine du bilan de la nappe et d'une gestion urgente des ressources en eau.

L'élaboration préalable d'un modèle permanent a été suivie par la réalisation d'un modèle transitoire (24) qui a permis d'envisager un historique des débits, des apports et des hauteurs piézométriques depuis 1900. Cette possibilité n'existait pas dans le modèle permanent établi en 1974.

Comme il a déjà été signalé en 1976 (24) :

« Le modèle transitoire englobe un territoire d'une superficie de 1.150 kilomètres carrés qui s'étend d'Armentières (à l'Ouest) à Anvaing (au Nord-Est de Tournai) et d'Halluin (au Nord) à Sainghin-en-Mélantois (au Sud) (fig. 69).

Une partie des bassins versants de l'Escaut, de la Lys, de la Deule et de la Marque est comprise dans un secteur couvert par le modèle. Le nombre total de mailles (de superficie unitaire = 2,250 km²) est de 511. Un système de référence permet d'attribuer à chaque maille un indice en abscisse (X) et un indice en ordonnée (Y) ».

1) Contexte hydrogéologique.

« Le réservoir de la nappe est constitué par un complexe calcaire appartenant aux sous-étages viséen et tournaisien de l'étage dinantien (199).

Les calcaires du Carbonifère sont plissés et forment un vaste synclinal (dit de Roubaix) d'axe NNW-SSE dont la fermeture s'effectue dans le secteur de Comines. De petits anticlinaux accompagnés de failles apparaissent sur le flanc sud (C.F.P., COPESEP, R.A.P. et S.N.P.A., *Ann. Soc. Géol. Nord*, 1965).

Une auréole constituée par des terrains grésoschisteux imperméables limite au Nord, à l'Ouest et au Sud l'exten-

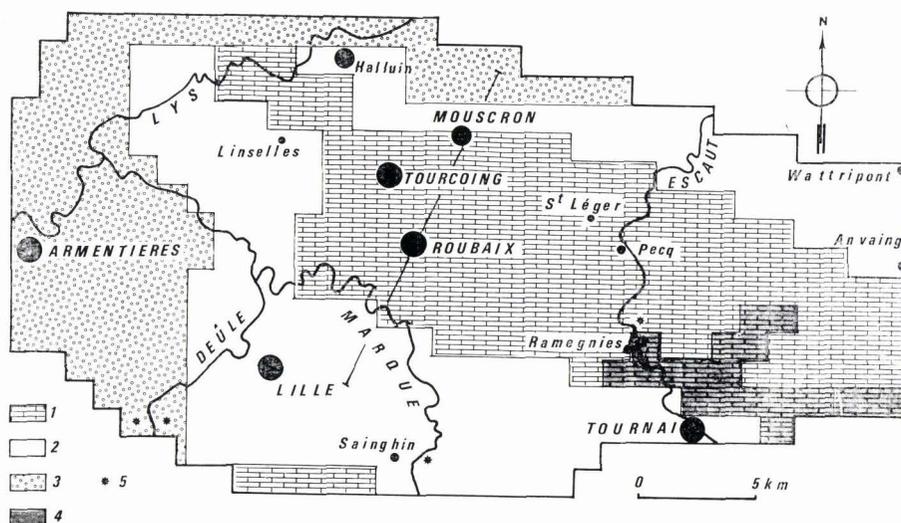


Fig. 69. — Extension géographique du modèle mathématique transitoire. Schéma directeur de l'hydrogéologie des formations paléozoïques sous les terrains crétacés (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 49).

Légende : 1, calcaires du Viséen. — 2, calcschistes et calcaires du Tournaisien. — CARBONIFÈRE. — 3, schistes et grès du Dévonien. — 4, zone d'alimentation naturelle de la nappe. — 5, localisation des pertes de rivières et de canaux.

sion du réservoir (234). L'aquifère calcaire possède un caractère fissural bien développé auquel se juxtapose un système karstique à distribution aléatoire connu à l'affleurement (carrières de Tournai) et rencontré par forages

La zone naturelle d'alimentation se situe en Belgique aux environs de Tournai. Il est apparu que les alimentations de la nappe pouvaient être constituées également par des pertes de rivières. Les pertes des canaux ne peuvent pas être mises en évidence directement en raison des faibles vitesses d'écoulement et de leur régime artificiel.

Seuls les jaugeages de la Marque ont été significatifs et ont pu donner une indication sur l'importance des pertes (fig. 69), les diverses zones hydrogéologiques ont été schématisées pour les adapter aux mailles carrées du modèle ».

2) Elaboration du modèle.

a) Choix du modèle.

« Le modèle mathématique transitoire de Rousselot (36) choisi, simule la nappe du Calcaire carbonifère en tenant compte d'un écoulement en régime transitoire, du dénoyage ou de la mise en charge de la nappe, des variations de la transmissivité en fonction du niveau piézométrique par rapport à un substratum, de la forme quelconque du substratum (les côtes de débordement de la nappe peuvent être incluses dans le modèle), de la reconstitution possible d'un historique de la piézométrie ou des débits (maille par maille), de la simulation prévisionnelle de l'état de la nappe, et de la simulation des alimentations artificielles ».

b) Schéma du modèle.

« — Les limites latérales.

Les limites du modèle transitoire épousent les contraintes hydrogéologiques (extension des calcaires sous le Crétacé, perméabilité et limites piézométriques). Les mailles situées sur le pourtour sont considérées comme imperméables.

— Géométrie du réservoir - toit et mur de l'aquifère.

Les cartes du toit et du mur de l'aquifère sont nécessaires au modèle car elles fixent l'épaisseur de l'aquifère utile. Le pendage général du toit du Primaire sous le recouvrement crétacé est NNW. Les cotes du Primaire vont de + 20 m NGF dans le secteur de Tournai à - 60 m NGF dans la région de Lille-Roubaix pour atteindre - 150 m NGF au niveau de Comines. La définition du mur découle d'observations faites à partir d'un essai au micromoulinet effectué à Bondues qui avait montré que la tranche active la plus perméable du réservoir était située au sommet des formations calcaires traversées (Chapitre 4). Cette tranche active possède vraisemblablement une épaisseur d'environ 30 m sous le recouvrement crétacé. Cette constatation a été généralisée pour définir les cotes du mur. Par ailleurs, un grand nombre de forages ne pénètrent que très partiellement dans les calcaires, ce qui tend à montrer que les besoins en eau ont été satisfaits dans la tranche supérieure.

Dans une seconde hypothèse, une épaisseur finale de 50 m d'aquifère utile a été utilisée afin d'encadrer les incertitudes de l'épaisseur exacte des terrains hydrauliquement actifs.

— *Distribution des perméabilités.*

La distribution issue d'un calage interannuel montre (fig. 70) des valeurs fortes pour la partie centrale du synclinal de Roubaix (de $7,5 \cdot 10^{-4}$ à $2,5 \cdot 10^{-3}$ m/s), des valeurs moyennes pour la bordure du synclinal ($2,5$ à $7,5 \cdot 10^{-4}$ m/s) et des valeurs faibles ($1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-5}$ m/s) pour les zones proches des limites situées à l'est du canal de l'Escaut en territoire belge.

— *Distribution des emmagasements.*

Les coefficients d'emmagasement supposés ont été répartis en fonction du contexte géologique. On distingue cependant les coefficients en régime libre et en régime captif. En effet, en régime captif, seuls interviennent les coefficients de compressibilité du réservoir rocheux et de l'eau. La décompression libre une quantité d'eau relativement faible. Par contre, en régime libre, c'est la roche qui se désature en laissant partir l'eau de gravité. Les coefficients d'emmagasement en régime libre seront ainsi beaucoup plus importants qu'en régime captif.

— *Emmagasement libre.*

On a affecté à la partie centrale du synclinal (fig. 71) des valeurs de 15%. La vallée de l'Escaut, en raison de l'altération des calcaires, a été affectée d'un coefficient de 20%. On a attribué au reste des terrains des valeurs allant de 1% (à l'Est de l'Escaut) à 10% (en bordure du synclinal).

— *Emmagasement captif.*

Les coefficients oscillent (fig. 72) autour de 0,01% pour la zone centrale du synclinal, 0,005 à 0,001% pour la bordure du synclinal, 0,0001% pour les zones limites au nord et à l'ouest.

— *Potentiels.*

La carte piézométrique initiale est celle de 1900, établie d'après les données des archives. La carte finale est celle dressée en mai 1973.

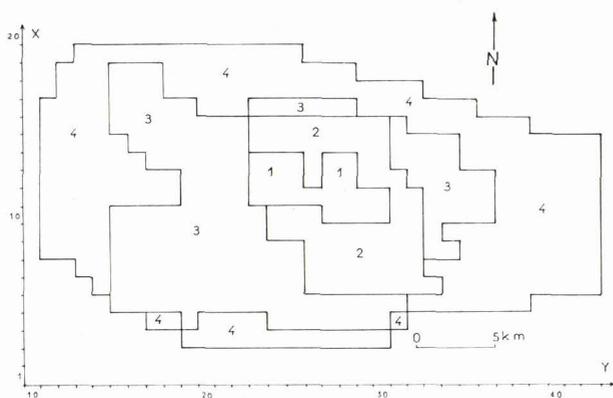


Fig. 70. — Carte de distribution des perméabilités (modèle calcaire carbonifère). Calage interannuel. Epaisseur d'aquifère utile : 50 m. Zonation des valeurs de perméabilité exprimées en m/s. : Zone 1 : 10^{-3} . — Zone 2 : 5 à $7,5 \cdot 10^{-4}$. Zone 3 : $7,5 \cdot 10^{-5}$ à $4 \cdot 10^{-4}$. — Zone 4 : 10^{-6} à $5 \cdot 10^{-5}$.

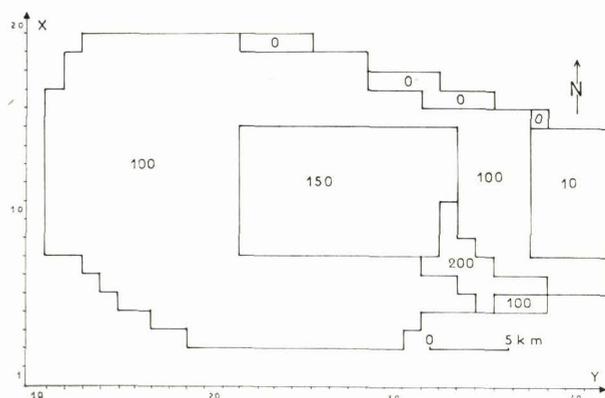


Fig. 71. — Carte de distribution des coefficients d'emmagasement en régime libre (calcaire carbonifère). Valeurs exprimées en 10^{-3} .

— *Apports par précipitation.*

Dans le modèle ont été introduites les pluies efficaces calculées d'après la méthode de Turc annuelle à partir des relevés de la station de Lille. Les valeurs manquantes ont été comblées après corrélation linéaire, avec celles de la station de Pecquencourt, comme c'est le cas de 1914 à 1922 et 1940. Sur la période allant de 1945 à 1973, il a été possible de calculer la pluie efficace à partir de la formule mensuelle de Thornthwaite. Ces valeurs présentées sur la fig. 73 constituent la pluie efficace s'infiltrant sur la zone hydrogéologiquement découverte des calcaires du Carbonifère dans la région de Tournai (24 mailles). Des cotes de débordement ont été fixées à la zone d'alimentation afin de rendre possible le drainage de la nappe par l'Escaut dans les premières dizaines d'années.

— *Débits prélevés par pompages.*

D'après les archives, un historique le plus précis possible des volumes d'eau soutirés à la nappe depuis 1900

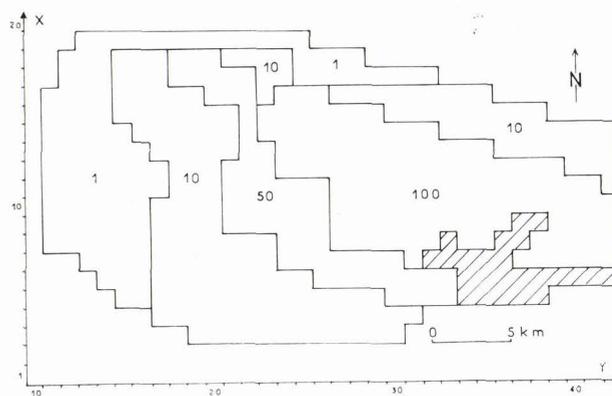


Fig. 72. — Carte de distribution des coefficients d'emmagasement en régime captif (calcaire carbonifère). Valeurs exprimées en 10^{-5} . La zone hachurée correspond à la zone hydrogéologiquement découverte.

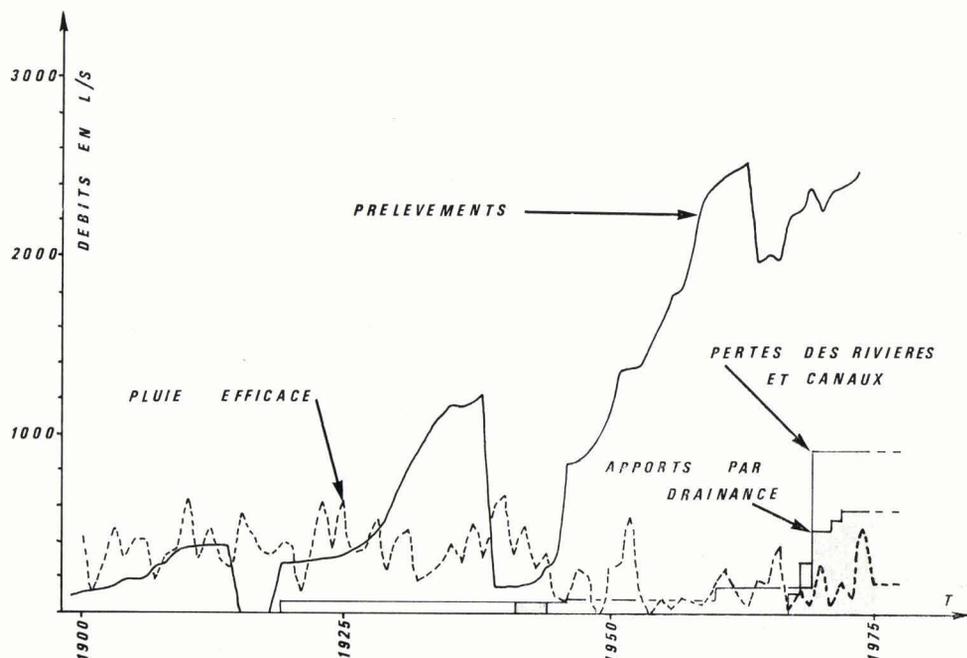


Fig. 73. — Evolution interannuelle des valeurs de pluie efficace, des débits soutirés et des apports par pertes et drainance (calcaire carbonifère). Remarque : les valeurs ont été converties en litres/seconde. (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 52).

en France a été reconstitué. Les renseignements tirés de la zone belge sont issus du S.G.B. (Service Géologique de Belgique) de Bruxelles et de la S.N.D.E. (Société Nationale de Distribution des Eaux de Bruxelles). La fig. 73 présente le détail des débits prélevés à la nappe sous forme d'un graphique.

Les enquêtes de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie ont permis d'obtenir des précisions importantes depuis 1966. Il a été possible d'obtenir les débits mensuels de 1973. Le débit global franco-belge soutiré à la nappe du Calcaire carbonifère oscille autour de 2.100 l/s ($6,5 \cdot 10^7 \text{ m}^3$ par an).

c) Imprécision et incertitude du modèle.

« Pour des raisons de coût, a été choisie une dimension de maille de 1,5 km dans laquelle est comptabilisée la totalité des débits d'exhaure de tous les forages concernés. Il en résulte qu'au moment du calage, les relevés piézométriques réels pris comme référence ne sont pas forcément au milieu des mailles. Une légère dérive apparaît alors entre la courbe réelle et calculée. La connaissance exacte des débits antérieurs à 1965 n'est pas toujours possible et la croissance du prélèvement a dû souvent être appréciée. Les deux guerres mondiales ont eu des répercussions sur l'activité de nombreux ouvrages et l'arrêt total et immédiat des captages a été choisi en raison de l'ignorance de la chronologie exacte de l'arrêt des activités de notre région. En outre, de nombreuses valeurs de perméabilité et de coefficient d'emmagasinement ont été extrapolées ».

3) Calage du modèle avec une épaisseur d'aquifère utile de 30 m.

a) Calage interannuel de 1899 à 1973.

« Il a été réalisé en tenant compte de deux hypothèses de travail faisant chacune l'objet d'un calage :

— le premier calage du modèle a été réalisé sans tenir compte de la drainance de la nappe de la craie vers la nappe du Calcaire carbonifère. Il a fallu faire appel à une alimentation importante de la nappe par perte de l'Escaut ;

— le deuxième calage du modèle envisage la drainance modulée de la nappe de la craie, l'alimentation en provenance de l'Escaut se trouve alors réduite mais fixée à une valeur constante de 700 l/s (*). On peut faire appel à des venues d'eaux profondes qui se substituaient dans le bilan à la drainance de la nappe de la craie.

L'application de ces deux hypothèses conduit à moduler différemment les valeurs de perméabilité des calcaires au niveau de l'Escaut et au niveau du synclinal de Roubaix.

(*) Cette valeur a été fixée en supposant qu'un tel volume pouvait être transféré également au niveau de la nappe de la craie. Cette hypothèse reste encore à vérifier. D'autre part, des caux profondes sous pression peuvent être à l'origine d'un apport par drainance verticale, comme c'est le cas dans la région de Saint-Amand (eaux thermales) et de Saint-Ghislain (Hainaut belge).

Les résultats du calage relatif à la première hypothèse seront présentés sommairement alors que ce sont les résultats de la deuxième hypothèse de travail qui seront exposés en détail car les valeurs des pertes de l'Escaut sont assez proches de celles constatées par ailleurs dans le Nord pour d'autres canaux ($1,5 \cdot 10^{-4}$ l/s/m²).

Le calage du modèle est basé sur les valeurs obtenues à partir du modèle permanent et modifié d'après les évolutions piézométriques interannuelles connues pour huit stations de surveillance. La sortie des évolutions piézométriques, au niveau des mailles contenant une station de surveillance, a permis de faire des comparaisons et de modifier localement les valeurs de perméabilité.

Les sorties par ordinateur de l'état de la nappe à diverses périodes ont été comparées avec les cartes réelles dressées en 1910, 1935, 1955, 1960, 1969 et 1973. Seules les trois dernières cartes dressées sur le terrain sont exactes. Les cartes les plus anciennes ont été établies à l'aide des archives et sont plus ou moins approximatives (244).

— Première hypothèse de travail.

Il apparaît que des anomalies de corrélation affectent les périodes 1914-1918 et 1939-1945. La nappe remonte dans la réalité à ces périodes de manière très forte. Il faut en rechercher l'origine sans doute dans les phénomènes de drainance. La nappe de la craie qui se recharge plus vite que la nappe du Calcaire carbonifère en raison de l'arrêt des pompages entraîne un effet de drainance qui cesse dès la remontée complète de la nappe du Calcaire carbonifère. Une autre explication peut être donnée en faisant intervenir des eaux profondes sous pression, comme c'est le cas dans le bassin de Saint-Amand-les-Eaux ou le bassin de Mons dans le Hainaut belge (communication orale de Monsieur Delmer, du S.G.B.).

D'autre part, la baisse trop importante de la nappe entre 1970 et 1973 par rapport à l'évolution générale entraîne logiquement à admettre dans les calculs une perte de débit dans l'Escaut.

— Deuxième hypothèse de travail.

Les mêmes mailles que précédemment ont été utilisées. Dans cette hypothèse, on introduit une drainance (*), entre 1941 et 1945, de 62 l/s dans le secteur sud-ouest de la zone d'étude et une perte de l'Escaut, de l'ordre de 700 l/s dans les dernières années, à laquelle s'ajoute une perte de la Deûle et de la Marque. Tout le détail des modifications des débits prélevés ou d'alimentation est reporté sur la fig. 73. Une bonne corrélation entre les surfaces piézométriques calculées et réelles est obtenue dans l'ensemble ».

b) Calage mensuel.

« Réalisé pour une période allant de janvier 1973 à décembre 1974, le calage est basé sur un relevé mensuel des débits pompés dans le secteur français effectué en 1973 à la suite d'une enquête de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie. Le passage du calage annuel au calage mensuel s'accompagne d'une modification de certaines valeurs de perméabilité. La cause de ce changement est due à l'application, soit de débits trop élevés dans le calage mensuel, soit de débits trop faibles lors du calage interannuel. Les valeurs de perméabilité sont donc comprises entre les bornes définies dans les calages annuel et mensuel.

(*) La drainance est imposée par l'intermédiaire d'un débit.

— Distribution des débits.

La drainance d'eaux profondes ou/et de la nappe de la craie vers celle du Calcaire carbonifère a été fixée à 600 l/s sans variation mensuelle et a été répartie surtout au niveau des zones où la nappe de la craie possède de bonnes caractéristiques hydrauliques. Les valeurs de drainance sont les plus fortes autour des champs captants de Roubaix-Tourcoing et de Pecq-St-Léger.

L'alimentation moyenne par perte de l'Escaut a été fixée à 700 l/s modulés mensuellement et répartis sur deux mailles, soit $1,55 \cdot 10^{-4}$ l/s/m². L'alimentation par drainance des alluvions de l'Escaut, estimée à 180 l/s, est répartie sur sept mailles autour de Tournai. L'alimentation par perte mesurée de la Marque est ici de 100 l/s. La perte de la Deûle peut être estimée à 170 l/s répartie sur deux mailles. Le débit de drainance de la nappe de la Craie ou/et des eaux profondes a été évalué à 600 l/s. Nous obtenons un débit total de drainance et de perte de 1.750 l/s. Rappelons que les débits initiaux d'exhaure, en décembre 1972, atteignent 2.354 l/s dont 1.074 l/s soutirés en territoire belge.

Il faut cependant préciser que cette estimation des apports qui a permis de caler le modèle reste assez arbitraire, vu la non représentation exacte du phénomène de drainance (pris en compte par le modèle comme un débit d'alimentation classique). Une simulation multicouche : alluvions, sables landéniens, craie, calcaire carbonifère et niveaux grésoschisteux du Dévonien serait mieux appropriée et permettrait de chiffrer le débit des drainances

— Distribution des valeurs de perméabilité.

Les valeurs de perméabilité ont été augmentées au niveau de la vallée de l'Escaut et dans le secteur central du synclinal de Roubaix, ce qui a amélioré les vitesses de transfert des débits mis en jeu par la perte de l'Escaut. Ce transfert hydrodynamique ne débute qu'à partir du moment où la nappe du calcaire carbonifère au niveau de Tournai est suffisamment déprimée par rapport au canal de l'Escaut. Le facteur multiplicateur est de 2 à 7, ainsi dans le synclinal de Roubaix on passe de $2 \cdot 10^{-3}$ m/s à $4 \cdot 10^{-3}$ m/s, au niveau de l'Escaut de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s à $3,5 \cdot 10^{-3}$ m/s.

— Carte piézométrique initiale.

La carte piézométrique de départ est celle de décembre 1972 qui découle du calage du modèle interannuel.

— Résultats des corrélations piézométriques intermensuelles.

Les points de surveillance choisis sont tous situés en France autour du champ captant principal de Roubaix-Tourcoing. Dans la majorité des cas, des homothéties nettes ont pu être obtenues entre courbes réelles et calculées ».

4) Calage avec une épaisseur d'aquifère utile de 50 m.

« Ce calage a été réalisé afin de montrer l'importance de la connaissance de l'épaisseur d'aquifère utile sur les prévisions à long terme (extension du dénoyage). Il a fallu modifier les valeurs de perméabilité ($1 \cdot 10^{-3}$ m/s) dans le centre du synclinal. Ce calage nécessite l'apport par drainance de la nappe de la craie (deuxième hypothèse du paragraphe 3 b).

On constate de bonnes similitudes entre les courbes piézométriques réelles et calculées par le modèle (fig. 74) ».

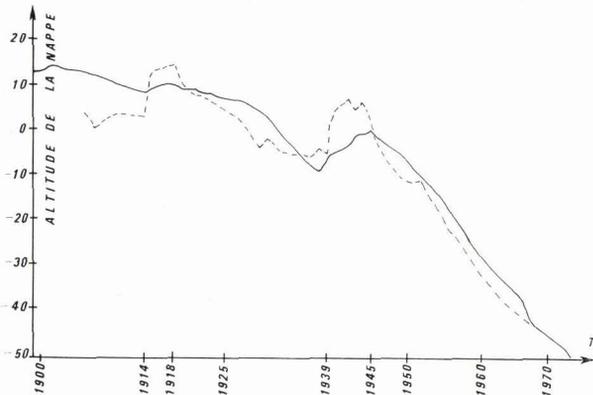


Fig. 74. — Exemple de comparaison interannuelle des évolutions piézométriques calculées (en trait plein) et observées (en traits discontinus) à Roubaix (calcaire carbonifère). Remarque : altitude de la nappe exprimée en m NGF. (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 55).

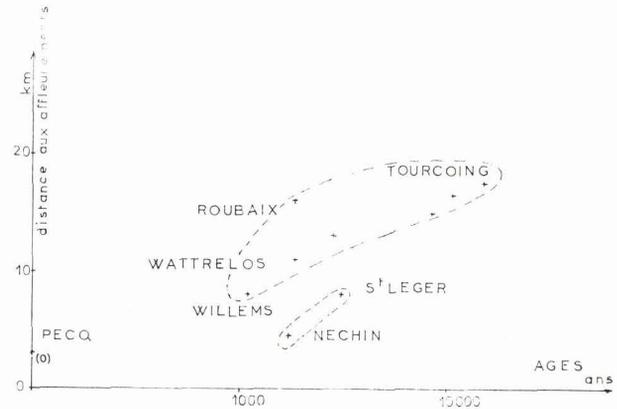


Fig. 75. — Datation des eaux de la nappe du calcaire carbonifère à partir d'un modèle isotopique et géochimique (d'après Garnier, Thèse Université Paris VI).

5) Essai de justification des pertes de l'Escaut et de la drainage.

L'appel à l'hydrochimie et aux mesures isotopiques (C^{13} , C^{14} , O^{18} et H^3) relatives aux eaux des nappes de la craie et du calcaire n'a pas permis de mettre en évidence de façon certaine le phénomène de drainage (81).

Les tests effectués à Pecq (B) ont montré l'âge très récent des eaux pompées, ce qui semblerait indiquer une infiltration très rapide d'eaux récentes (du canal de l'Escaut, de la nappe alluviale associée et des affleurements, par exemple).

A St-Léger (8 km des affleurements), l'âge calculé atteint 3.000 ans. Dans le secteur de Tourcoing (14 à 18 km des affleurements), les âges calculés oscillent entre 8.000 et 15.000 ans.

En reprenant les valeurs calculées sur un diagramme semi-logarithmique (fig. 75), on constate l'existence de trois groupes de points :

- celui de Pecq, où l'eau est jeune à 2 km des affleurements,

- celui proche de l'Escaut, de St-Léger à Néchin, où l'eau est très vieille,

- celui de la frontière franco-belge (Willems) à Tourcoing en passant par Roubaix, dont les eaux sont d'autant plus vieilles que l'on s'éloigne des affleurements.

Il semblerait que la perte de l'Escaut se manifeste sur les analyses isotopiques effectuées sur la zone de Pecq.

6) Justification de la perte de la Marque.

Le cours naturel de la rivière Marque (fig. 69) prenant sa source à Mons-en-Pévèle, a permis d'effectuer une campagne de jaugeages pour tenter de justifier les pertes décelées par le modèle mathématique. Des mesures de jaugeage ont été réalisées le long de la Marque entre Louvil et Chérens au SE de Lille.

Le profil des jaugeages (fig. 76) montre une chute des débits entre les stations DEU 1.200 et DEU 1.300 situées à l'aval de Sainghin-en-Mélantois, le 6 septembre 1973 et le 9 octobre 1973, avec respectivement 60 et 180 l/s (le débit total de la rivière est d'environ 250 l/s).

Cette perte de la Marque est rendue compréhensible par l'existence d'un recouvrement alluvionnaire peu épais (15 m) se superposant aux calcaires du Carbonifère. La mise en évidence de cette perte indique que le site de Sainghin peut faire l'objet d'une alimentation artificielle de la nappe du Calcaire carbonifère en raison du contexte géologique. Sa position, en amont des captages principaux, rend ce site particulièrement intéressant. Sans préjuger de l'avenir, on peut vraisemblablement envisager l'utilisation des eaux de la Marque pour des injections dans la nappe du Calcaire carbonifère. Les jaugeages effectués depuis 1966 (Archives du SHC) montrent qu'en période d'étiage, le débit de la Marque oscille autour de 250 l/s (de 1966 à 1969) à la station de Bouvines (DEU 1.000).



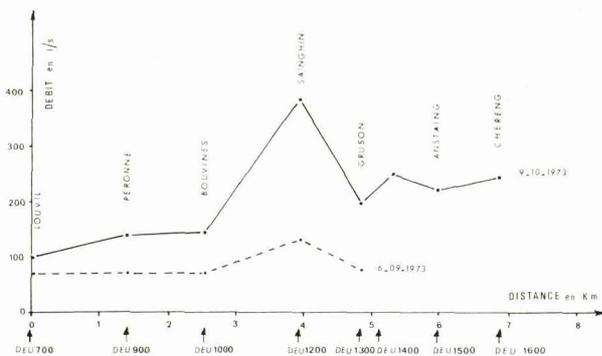


Fig. 76. — Profil de jaugeage de la Marque à l'étiage de 1973 (d'après Mania, 1975, Rapport B.R.G.M. 75 SGN 174 NPA).

En période de crue, le débit varie de 200 à 1.000 l/s. La période de novembre à avril pourrait être choisie pour des réalimentations avec des volumes moyens de 500 l/s, soit 1.800 m³/h.

7) Conclusions.

La mise au point du modèle transitoire de la nappe du Calcaire carbonifère de la région lilloise et tournaisienne a été réalisée à l'aide d'un calage interannuel (1899 à 1973) puis mensuel (janvier 1973 à janvier 1974). Les éléments de travail suivants ont été testés : drainage de la nappe de la craie et/ou d'eaux profondes vers la nappe du Calcaire carbonifère, drainage de la nappe alluviale de l'Escaut, pertes de la Deûle, de la Marque et de l'Escaut, aquifère d'une épaisseur utile de 30 m puis de 50 m.

Certaines hypothèses de travail nécessaires au calage du modèle mathématique restent toutefois à contrôler de manière plus précise sur le plan quantitatif.

Il apparaît difficile de trancher entre ces hypothèses avec les données hydrogéologiques actuelles. Aussi plusieurs calages ont été réalisés et ont abouti à des représentations relativement plausibles.

Les corrélations interannuelles et mensuelles effectuées par exemple, ont permis de préciser les mécanismes de transfert des drainances et des pertes.

Le modèle s'avère, malgré ces restrictions, un outil de réflexion qui permet d'orienter les nouvelles voies de recherche sur de nouveaux schémas hydrodynamiques que l'hydrogéologue doit alors aller vérifier sur le terrain.

III. — MODELES DE LA NAPPE DE LA CRAIE

A) MODELE DU CALAISIS.

L'établissement d'un premier bilan hydrogéologique de la nappe de la craie par Crémille (204) avait montré que d'autres sources d'alimentation, en dehors des précipitations, venaient certainement influencer le bilan. Cette constatation était basée sur le fait que le bilan ne pouvait être équilibré correctement à partir des précipitations seules. Aussi fut-il décidé de réaliser un modèle mathématique permanent (*) qui permettrait l'élaboration d'un bilan le plus complet possible. L'élaboration et le calage du modèle ont fait l'objet d'une étude spécifique publiée par Crémille et Mania en 1974 (3) dont les conclusions essentielles seront seules présentées ; l'optimisation et la gestion des ressources dans cette zone, qui n'avaient pas été réalisées en 1974, verront par contre un développement plus important (Chapitre 6).

1) Cadre et caractéristiques géologiques.

Le Calaisis représente la partie nord occidentale du plateau crayeux de l'Artois. Limités au S par les terrains du Boulonnais, les terrains crayeux s'enfoncent progressivement vers le Nord sous les dépôts quaternaires de la Flandre maritime puis les terrains du Tertiaire (cartes géologiques au 1/50.000^e de Guines et de Marquise).

La quasi-totalité du complexe crayeux de Calais est visible à l'affleurement sur la falaise allant de Sangatte à Wissant (186). A l'intérieur des terres, les sondages pétroliers profonds ont permis de reconnaître les terrains du Crétacé sous le recouvrement tertiaire. Ainsi les sondages de Marck (2-6-4) et de Louches (6-7-107) permettent d'établir les épaisseurs exactes des terrains crayeux entre le Tertiaire au sommet et les argiles noires du Gault (Albien) à la base.

La totalité des niveaux du Sénonien au Cénomien représente environ 220 m, dont 90 m pour

(*) Cette étude a été financée par la Société Générale des Eaux de Calais, la Société d'ingénierie pour les travaux du Tunnel sous la Manche et l'Arrondissement Minéralogique de Douai.

le Sénono-Turonien supérieur constitué par de la craie blanche et de la craie grise à silex. Des terrains marneux du Turonien moyen et inférieur constituent le passage aux craies marneuses du Cénomanién supérieur. Le Cénomanién inférieur, qui s'enrichit fortement en argilites, passe brusquement aux argiles noires compactes de l'Albien.

Dans le Calaisis, le Cénomanién inférieur constitue le mur de l'aquifère crayeux.

L'établissement de la carte structurale du toit des argiles du Gault, effectué par Caulier (116), montre l'existence de trois compartiments successifs qui sont effondrés ou surélevés par suite du jeu de failles de direction N 120°. Le pendage général des terrains est N-NE pour les deux compartiments septentrionaux et E pour le compartiment méridional (fig. 77). La craie qui affleure de la côte à la rivière Hem sur une surface de 166 km² est recouverte par des alluvions marines sur une bande de 0,5 à 2 km de Guines à Sangatte en passant par Fréthun, et des argiles et des sables du Tertiaire qui peuvent, soit affleurer, de Guines à Nordausques, soit se trouver recouverts par les alluvions, de Calais à Ardres. Le toit de l'aquifère crayeux sous ces deux types de recouvrement (fig. 77) a été défini.

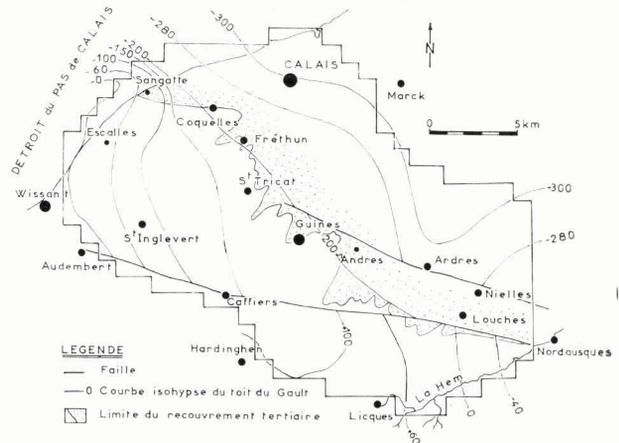


Fig. 77. — Extension géographique du modèle du Calaisis.

2) Caractéristiques hydrauliques de la craie.

Perméabilités et coefficients d'emmagasinement sont obtenus soit à l'aide des essais d'injection (essai Lugeon), soit à partir des données de pompage d'essai.

a) Essais d'injection (Essai Lugeon).

Ils ont été réalisés dans le cadre de l'étude du tracé du tunnel sous la Manche. Pour l'ensemble des terrains du Crétacé, à terre et sous la mer, 151 essais ont été effectués (tabl. XX).

CLASSEMENT DES PERMEABILITES ESTIMEES POUR LES DIFFERENTES COUCHES GEOLOGIQUES									
	Nombre total d'essais pour la couche intéressée	$K < 10^{-5}$ cm/s		$10^{-5} < K < 10^{-4}$ cm/s		$10^{-4} < K < 10^{-3}$ cm/s		$10^{-3} < K < 10^{-2}$ cm/s	
		Nombre d'essais	%	Nombre d'essais	%	Nombre d'essais	%	Nombre d'essais	%
Base du Sénonien et Turonien supérieur	4	0		0		1		3	
Turonien inférieur et moyen	7	1		0		3		3	
Cénomanién supérieur Craie grise au-dessus de C ^x et craie blanche	38	3	8	9	23	21	56	5	13
Cénomanién moyen Craie grise en dessous de C	38	4	11	9	23	23	61	2	5
Cénomanién inférieur Craie bleue	64	12	19	37	58	15	23	0	0
TOTAL	151	20		55		63		13	

C^x : Point de passage à 80 % de CaCO₃.

Tableau XX. — Perméabilités des terrains crayeux issues des essais Lugeon. (Extraites des renseignements préliminaires pour les travaux de Phase 3 du Groupement d'étude du tunnel sous la Manche).

En 1973, Gélinet (220) a constaté l'existence de perméabilités différentielles :

— bonnes dans les niveaux du Sénonien et du Turonien supérieur : $10^{-3} < K < 10^{-2}$ cm/s ;

— bonnes ou moyennes dans le Turonien inférieur et moyen : $10^{-4} < K < 10^{-2}$ cm/s ;

— basses dans la totalité de la craie grise du Cénomaniens : $10^{-4} < K < 10^{-3}$ cm/s ;

— basses ou très basses dans la craie bleue du Cénomaniens inférieur : $10^{-5} < K < 10^{-3}$ cm/s.

On constate ainsi une diminution des valeurs de perméabilité à mesure que l'on se rapproche de la base du Crétacé. Les circulations des eaux, essentiellement de type fissural, sont régies par l'ouverture des fractures qui diminuent apparemment selon la profondeur.

b) Pompages d'essai.

Les valeurs de transmissivité de l'aquifère crayeux ont été rassemblées (116) et utilisées pour l'élaboration du modèle du Calaisis. Ces données, reportées sur la fig. 78, montrent qu'il existe trois zones à transmissivité différente :

— une zone à très forte transmissivité, de l'ordre de 2.10^{-2} m²/s, sous les alluvions (secteur de St-Tricat - Guînes),

— une zone à bonne valeur de transmissivité ($1,4.10^{-2}$ à 5.10^{-3} m²/s) lorsque le recouvrement tertiaire sur la craie est peu épais (secteur de Nielles-les-Ardres et à l'E de Guînes),

— une zone à mauvaise transmissivité (1 à 9.10^{-4} m²/s) sur le plateau crayeux ou sous recouvrement tertiaire très épais (50 m et plus).

3) Piézométrie générale de la nappe de la craie.

L'examen de la carte piézométrique établie (78) en période de basses eaux (octobre 1973, fig. 79) montre : un écoulement général de la nappe vers le NE, l'existence d'un dôme piézométrique sur la limite sud du Calaisis qui correspond pour la partie occidentale à la bordure crétacée nord du Boulonnais, une coupure physique au NW sur les falaises de la craie avec un rabattement brusque de la nappe, un gradient hydraulique élevé (1/60) sur le plateau méridional, et enfin un gradient moyen à faible (1/250) en bordure du recouvrement tertiaire.

4) Elaboration du modèle mathématique.

Ce modèle a été réalisé par Crémille et Mania (3, p. 22) :

« La région étudiée couvre environ 380 km² de la mer à la Hem et du Boulonnais à la Flandre maritime. Les limites ont été choisies de manière à les faire coïncider,

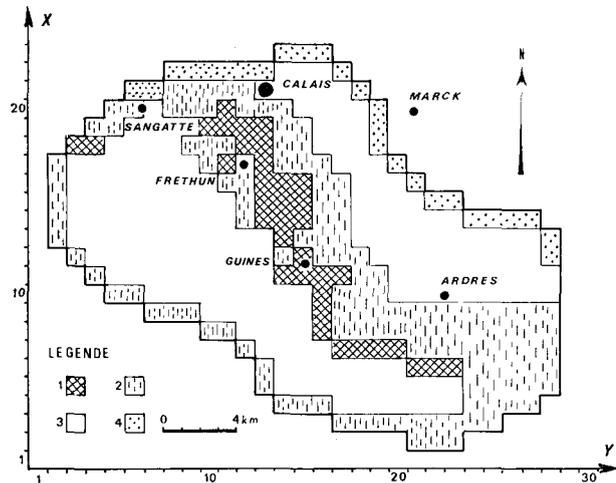


Fig. 78. — Elaboration du modèle Calaisis. Répartition géographique des valeurs de la transmissivité (T) au premier passage (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA).

Légende : 1, $T \geq 10^{-2}$ m²/s. — 2, T allant de 10^{-3} à 10^{-2} m²/s. — 3, T allant de 10^{-4} à 10^{-3} m²/s. — 4, T allant de 10^{-5} à 10^{-4} m²/s.

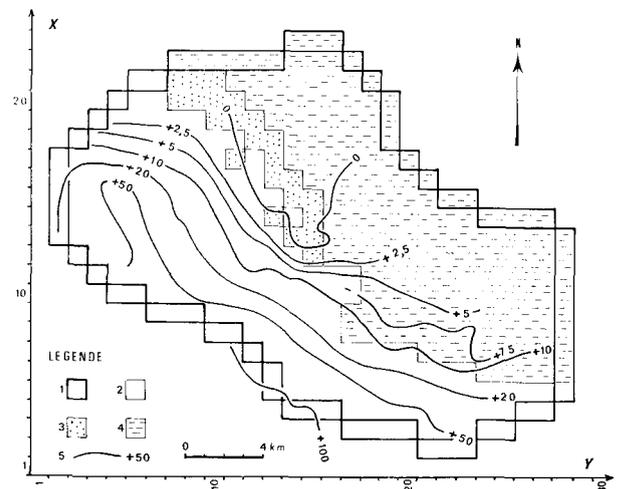


Fig. 79. — Carte piézométrique et répartition des zones d'affleurement dans le modèle Calaisis (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA).

Légende : 1, Maille limite du modèle. — 2, affleurement crayeux. — 3, affleurement alluvionnaire. — 4, terrains tertiaires. — 5, courbe isopièze (cote en m NGF).

dans la mesure du possible, avec les limites naturelles du milieu hydrogéologique (ligne de sources, mer, rivières...).

Elles sont définies de la façon suivante (fig. 77) :

— au Nord et à l'Ouest, par une portion de côte allant de Wissant au Nord de Calais en passant par Sangatte, caractérisée par une ligne de source à l'amont et un contact terre-mer à l'aval,

— au Sud-Ouest et au Sud, par l'affleurement du substratum de la nappe (Cénomanien inférieur) d'Audembert à Hardingham, puis de Licques à Tournehem en descendant la vallée de la Hem,

— à l'Est par une ligne de courant estimée, de Tournehem à Audruicq,

— au Nord-Est par la courbe isobathe — 100 m NGF du toit de la craie.

Il faut remarquer que les deux dernières limites sont imprécises du fait du manque de données ».

Le modèle a été divisé en 400 mailles carrées d'une superficie unitaire de 1 km².

Le contexte géologique a permis de définir pour notre schéma de travail trois zones (fig. 79) : zones d'affleurement de la craie, zone où les alluvions sont en contact avec la craie et zone de recouvrement tertiaire.

Compte tenu des données de transmissivité acquises lors de pompages d'exploitation et d'essai, une première distribution des transmissivités a été proposée (fig. 78). Elle se caractérise par l'existence d'une mince bande centrale de très forte transmissivité ($T > 10^{-2}$ m²/s) de part et d'autre de laquelle s'étendent des zones à valeurs décroissantes jusqu'à $5 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

Sur les limites latérales sont généralement imposées, soit des valeurs de potentiel relevées sur la carte piézométrique, soit des valeurs à flux nul. Des valeurs d'alimentation par les pluies et de débit prélevé par pompage ont été en outre affichées dans le premier passage, à l'exclusion des valeurs d'entrée en provenance des alluvions ou de sortie par les émergences.

5) Calage du modèle mathématique.

Crémille et Mania ont montré (3, p. 24) :

« Il est très difficile de proposer une interprétation cohérente des phénomènes d'écoulement sur l'ensemble d'un bassin au simple examen des données brutes. Le cheminement vers cette interprétation est discontinu et s'effectue souvent avec des arrêts du processus de calage issu d'une série d'hypothèses de travail.

Dans le cas présent et compte tenu des imprécisions existant encore sur la forme de la surface piézométrique, aux limites occidentale et orientale notamment, six hypothèses différentes ont pu être énoncées : modification des transmissivités (n° 1), apport d'eau venant de la mer (n° 2), modulation des précipitations (n° 3), apport d'eau en provenance des alluvions (n° 4), modulation des émergences avec accroissement des valeurs de précipitation tout en conservant la drainance des alluvions et l'artésianisme (n° 5), et enfin alimentation de la nappe par la rivière Hem (n° 6).

La prise en considération des hypothèses 1, 2 et 3 n'a abouti qu'à des cartes piézométriques calculées assez différentes de la réalité. Ainsi le premier passage effectué sur ordinateur a fourni une carte calculée très éloignée de la carte interprétée. Le passage à l'hypothèse 4 amé-

liore de manière importante la piézométrie du secteur de Guînes et permet d'obtenir un modèle assez semblable à la réalité. Cependant, il n'était pas justifié de maintenir des valeurs de précipitation très faibles dans le secteur oriental de la région étudiée. Aussi est-on passé à la cinquième hypothèse qui s'avère satisfaisante puisque tous les paramètres connus ont pu être respectés. L'accroissement des valeurs de pluie efficace et la diminution des débits d'émergence aboutissent à des isopièzes calculées proches de celles fournies par la carte piézométrique. Cependant, une seule indétermination réside encore sur le volume des débits entrant dans l'aquifère à partir de la rivière Hem qui se trouve en position d'alimentation. C'est la sixième hypothèse de travail qui est ainsi posée et qui est à vérifier sur le terrain.

a) Modèle à la cinquième hypothèse (passage n° 63).

1° Distribution des transmissivités.

On peut résumer les principales caractéristiques de cette distribution telle qu'elle apparaît après simplification synthétique. On distingue quatre zones essentielles :

— une zone à forte transmissivité ($T > 10^{-2}$ m²/s) s'étend sur l'ensemble du réservoir crayeux recouvert par les terrains alluvionnaires ou tertiaires remaniés et affecte les principales vallées (sèches ou actives),

— une zone à transmissivité moyenne ($10^{-3} < T < 10^{-2}$ m²/s) qui comprend des secteurs situés de part et d'autre de la zone précédente et s'étend principalement au Nord sous le recouvrement tertiaire.

— une zone à faible transmissivité ($10^{-4} < T < 10^{-3}$ m²/s) englobe l'ensemble du plateau crayeux de la côte à la rivière Hem sur une largeur de 2 à 3 km et une partie des limites nord du modèle,

— une zone à très faible transmissivité ($T < 10^{-4}$ m²/s). On la rencontre sur les limites sud et est.

2° Répartition des volumes d'eau échangés.

— Distribution des précipitations.

Les valeurs de pluie efficace affichées, par maille, fluctuent entre 3 et 6 l/s, ce qui est relativement conforme aux valeurs moyennes calculées pour chaque station. Les modifications apportées affectent essentiellement l'ensemble du plateau sud boisé où il est apparu nécessaire d'augmenter les valeurs, ce qui correspond à la logique d'une liaison altitude-précipitations déjà vérifiées (Chapitre 2).

— Débits d'émergence et d'artésianisme.

Des modulations ont été apportées sur des débits sortant par émergence aux sources et par artésianisme aux puits. Le débit artésien total des forages du marais de Guînes a été fixé à 50 l/s. Cette valeur moyenne s'applique à une période où les soutirages effectués par la S.G.E.C. (Société Générale des Eaux de Calais) influencent l'artésianisme. Les débits d'émergence de la nappe de la craie ont été diminués dans la proportion de 30 % (ruisseaux de Nielles, d'Hames Boucres et de la Minoterie, Sources de Guînes) et parfois de 50 % (ruisseaux du Moulin, de Balinghen, de Brèmes, d'Ardres). On peut accrédi-ter l'hypothèse d'une diminution des débits d'émergence car les ruisseaux collectent à la fois les eaux d'émergence de la nappe de la craie, les eaux de la nappe des sables tertiaires ainsi que les eaux de ruissellement sur les affleurements argileux.

— Bilan hydrologique.

Le bilan hydrologique, calculé par ordinateur, est présenté dans le tableau XXI. Dans cette hypothèse, les échanges latéraux sont très faibles. Le rôle de la mer et de la Hem serait donc insignifiant. Par contre, la drainance à partir des alluvions serait prépondérante puisqu'elle représenterait 50 % de la valeur de l'alimentation à partir des pluies pour la seule partie du bassin située à l'Ouest de Guines. Enfin, les prélèvements constituent la sortie principale de la nappe.

3° Carte piézométrique calculée.

La comparaison des cartes piézométriques réelle et calculée amène plusieurs remarques. La dimension des mailles (1 km de côté) est supérieure au seuil de la précision que l'on veut obtenir. Pour cette raison, dans les secteurs où les courbes piézométriques sont très resserrées, il est difficile d'obtenir une représentation parfaite de la piézométrie calculée. Certains écarts proviennent également de l'incertitude de certaines cotes piézométriques réelles. Ainsi, les valeurs piézométriques le long de la côte au niveau de Calais et sur la limite Est ont dû être extrapolées.

b) Modèle à la sixième hypothèse.

1° Distribution des transmissivités.

La vérification de la validité de la sixième hypothèse nécessite une augmentation des valeurs de transmissivité dans la vallée de la Hem (fig. 80). En effet, dans les modèles précédents, des transmissivités très faibles dans ce secteur empêchaient un apport important.

Par ailleurs, d'autres modifications légères ont permis d'améliorer de façon sensible la piézométrie calculée au Sud-Est de Calais et le long du plateau.

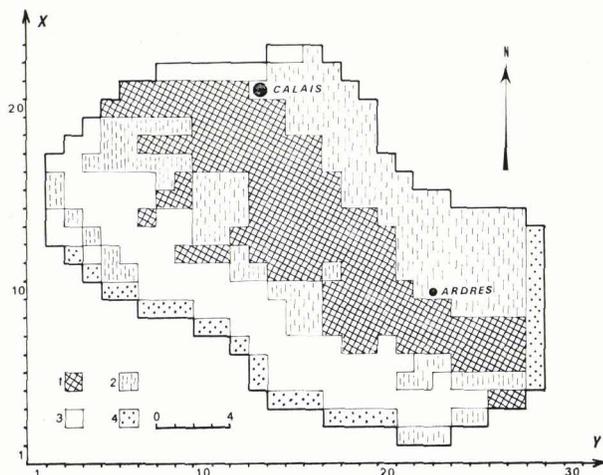


Fig. 80. — Répartition géographique des valeurs de la transmissivité (T) dans le modèle du Calais lors de la sixième hypothèse (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA).

Légende : 1, $T \geq 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. — 2, T allant de 10^{-3} à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. — 3, T allant de 10^{-4} à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. — 4, T allant de 10^{-5} à $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

2° Répartition des volumes d'eau échangés.

Les valeurs des précipitations n'ont pas été modifiées. Les débits d'émergence ont été augmentés jusqu'à la valeur moyenne de 1973, permettant de faire entrer un certain débit à partir de la vallée de la Hem. De légères rectifications ont été opérées sur les valeurs des débits de drainance. Les bilans hydrologiques calculés aux cinquième et sixième hypothèses sont détaillés dans le tableau XXI.

On remarque, dans la sixième hypothèse, un accroissement des débits latéraux entrant et latéraux sortant. Cela provient successivement d'une alimentation de la nappe par la rivière la Hem (50 l/s), du réajustement d'une partie des émergences à un débit plus fort et de la diminution du débit de drainance des alluvions.

3° Carte piézométrique calculée.

La carte piézométrique obtenue dans cette nouvelle hypothèse diffère très peu de la carte précédente (fig. 81). Ce fait souligne donc la nécessité impérieuse d'acquiescer des renseignements sur la forme de la surface piézométrique dans les zones déjà citées pour faire la décision entre les diverses hypothèses.

6) Poursuite du calage et vérification.

Une poursuite du calage ne peut être fructueuse que si des travaux complémentaires de terrain déjà définis ci-dessus, sont réalisés. Puis seront alors entrepris le montage et le calage d'un modèle plus représentatif tenant compte d'un apport modulé en provenance des alluvions dont la piézométrie est à réaliser. Un modèle permanent bicouche pourrait être ainsi effectué.

On tentera de vérifier de manière globale l'importance du débit d'alimentation naturelle du modèle par la Hem.

Dans le cadre de l'étude sur le bilan des bassins versants de l'Artois (Chapitre 2), les

		passage 71	passage 63
débits supérieurs	sortant		
	Pompages	576 l/s	576 l/s
	Emergences	262 l/s	185 l/s
	Artésianisme	50 l/s	50 l/s
débits entrant	Pluie efficace	636 l/s	636 l/s
	Débit de drainance des alluvions	150 l/s	200 l/s
	sortant		
débits latéraux	vers la limite nord-sud	31 l/s	20 l/s
	vers la mer	11 l/s	43 l/s
	alimentation par la Hem	54 l/s	6 l/s
	entrant la limite sud	4 l/s	7 l/s
	la limite nord	2 l/s	2 l/s

Tableau XXI. — Bilan hydrologique de la nappe de la craie dans le Calais (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA).

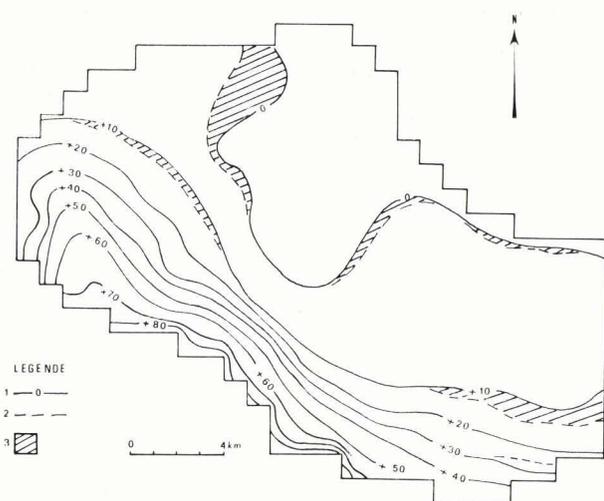


Fig. 81. — Restitution calculée des lignes isopièzes pour les cinquième et sixième hypothèses de calage du modèle Calaisis (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA).

Légende: 1, courbe isopièze calculée à partir de la sixième hypothèse. — 2, courbe isopièze calculée à partir de la cinquième hypothèse. — 3, écart piézométrique calculé.

caractéristiques suivantes du bassin de la Hem jusqu'à la station de Guémy pour la période interannuelle 1962 à 1969 sont évaluées à :

- superficie totale : $105,5 \text{ km}^2$
- débit d'écoulement : $45,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ($13,6 \text{ l/s/km}^2$)
- précipitations : $105,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ($31,8 \text{ l/s/km}^2$)
- déficit d'écoulement : $60,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ ($18,3 \text{ l/s/km}^2$)

Le débit d'écoulement total moyen interannuel de la Hem s'élève à $1,435 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la station de Guémy. Une perte de 50 l/s vers la nappe de la craie est envisageable compte tenu du volume écoulé. Il faut souligner d'autre part que cette alimentation naturelle s'effectue sur 7 mailles. Un profil de jaugeage effectué sur le cours de la Hem devait mettre en évidence cette perte quelques années plus tard. En août 1976, un profil de jaugeage réalisé sur la Hem montre l'existence d'anomalies de l'amont vers l'aval (tabl. XXII).

Une perte de 92 l/s semble ainsi se manifester entre Guémy et Zouafques et confirme ainsi nos hypothèses de travail.

STATIONS :	DEBITS MESURES :	OBSERVATIONS
	en l/s	
Surques :	0	Hem à sec
Bainghen :	3	Ruisseau de la Planque
Licques :	91,3	Hem
Audenfort :	90	+ 20,3 l/s du Loquin
Clerques :	167	Hem
Guémy :	194	Hem
Zouafques :	102	Perte probable

Tableau XXII. — Jaugeage de la rivière Hem.

7) Conclusions.

Le modèle mathématique du Calaisis conduit à proposer plusieurs schémas possibles d'alimentation de la nappe de la craie. Bien qu'il faille mettre en œuvre de gros moyens (exécution de piézomètres supplémentaires dans la nappe des alluvions ainsi que de la rivière Hem jusqu'au plateau) pour vérifier certaines des conditions émises, le modèle permet d'anticiper de manière très souple sur l'importance des transferts mis en jeu.

B) MODELES DES INTERFLUVES HEM - AA - LYS.

Un premier modèle mathématique financé par l'Arrondissement Minéralogique de Douai a été réalisé par Ramon (29) à partir des données recueillies en 1970-72 et a permis de définir un bilan global sur une partie du bassin de l'Aa entre Esquerdes et Arques. La simulation d'une alimentation artificielle de la nappe a été également effectuée à Wizernes.

Une seconde étude, projetée cette fois sur le bassin versant Audomarois, réalisée par Crémille et Jacques Ricour (5) et financée par le District Urbain de la région Audomaroise, définissait le bilan des ressources en eaux souterraines. Cependant, le calage du modèle s'avérait difficile. Aussi un troisième modèle englobant les deux premiers et s'étendant sur une partie du bassin de la Hem, la totalité du bassin de l'Aa et la moitié Nord du bassin de la Lys a été exécuté par Jacques Ricour (31). Seul, ce dernier modèle fera l'objet d'une optimisation. Les conclusions principales issues des calages du premier et deuxième modèle seront néanmoins présentées.

1) Contexte géologique.

L'examen des cartes géologiques au $1/50.000^e$ de Guînes, Cassel, Desvres et St Omer montre

l'existence d'affleurements crayeux majeurs sur les bassins versants de la Hem, de l'Aa et de la Lys. Le pendage général des formations géologiques vers le N-NE provoque la disparition des affleurements des terrains crétacés sous un recouvrement argilo-sableux d'âge tertiaire. On remarque la présence de failles majeures de direction N 120 qui découpent les terrains en parallélépipèdes dont les plus septentrionaux sont en règle générale décalés vers le bas (fig. 82).

2) Contexte hydrogéologique.

La nappe de la craie possède un régime libre sur les plateaux et un régime captif sous les affleurements tertiaires. La nappe est drainée naturellement par les trois rivières Hem, Aa et Lys qui sont liées génétiquement à l'aquifère crayeux. Les exploitations intensives de la dernière décennie sont à l'origine d'une chute spectaculaire (entre 5 et 10 m) des niveaux dans la vallée de l'Aa. D'autre part, les prélèvements effectués dans la nappe au NW de St-Omer (Mouille, Tilques) sont à peine équilibrés par l'alimentation naturelle de la nappe.

3) Modèle de la vallée de l'Aa.

Ce premier modèle mathématique en régime permanent a été élaboré d'après les données hydrologiques de 1972 (29). Il couvre une superficie de 84 km², soit une partie seulement du bassin versant de l'Aa, d'Esquerdes à Arques. Il faut signaler que l'Aa draine la nappe de la craie à l'amont du bassin et alimente ce dernier à l'aval. Des pertes de rivière de l'ordre de 240 l/s sont ainsi constatées entre Wizernes et Blendecques. D'autre part, des pompages d'essai (Chapitre 4) montrent qu'il existe une drainage des nappes des sables et des alluvions vers la nappe de la craie au niveau d'Arques.

Diverses simulations réalisées sur le modèle calé apportent les enseignements suivants :

— une alimentation du débit d'infiltration naturel de l'Aa à 210 l/s engendre un effondrement des niveaux avec un recul net des limites du bassin vers le Nord (bassin de la Hem) et vers le Sud (bassin de la Lys),

— la simulation d'une alimentation artificielle à Blendecques, de l'ordre de 110 l/s (10.000 m³/j), entraîne une réduction considérable du débit d'alimentation naturelle de l'Aa qui passe de 240 l/s à 138 l/s.

Si le gain en potentiel est sensible, il apparaît au niveau des débits mis en jeu une diminution du rendement de l'opération.

4) Modèle du bassin versant audomarois.

Une étude hydrogéologique préliminaire réalisée en 1974 (205) sur l'ensemble de l'interfluve Aa-Hem, définissait les principaux éléments de l'équation du bilan. Il fallait s'assurer de l'existence d'un débit d'alimentation naturelle suffisant au vu des prélèvements importants réalisés et à venir. Les seuls ouvrages de la Société des Eaux de Dunkerque, situés sur une ligne parallèle à la limite de recouvrement tertiaires, soutiraient 16,5.10⁶ m³ d'eau pour la seule année 1970 (9,2.10⁶ m³ en 1960).

L'appel à une simulation mathématique de la nappe doit répondre à plusieurs objectifs :

— contrôle des diverses interprétations proposées pour l'aquifère et la nappe,

— accroissement possible des ressources en eau du bassin par simulation d'une alimentation artificielle de la nappe en utilisant les eaux de l'Aa et de la Hem, soit en utilisant les carrières situées à l'amont sur le plateau, soit en réalisant des puits d'injection à proximité du champ captant.

Le modèle mathématique en régime permanent (5) couvre une superficie de 261 km² de la rivière de la Hem au Nord à la rivière Aa au Sud. La limite NE suit une ligne équipotentielle sous le recouvrement tertiaire parallèlement à l'Aa canalisée et la limite SW est moulée sur la ligne de courant du dôme piézométrique de Quercamps.

a) Traits hydrogéologiques principaux.

La carte piézométrique de référence a été établie entre mars 1972 et février 1973, période de basses eaux pendant laquelle la pluie efficace calculée représente une lame d'eau de 156 mm, soit 5 l/s/km² ou encore 4 l/s et par maille (le côté d'une maille du modèle possédant une longueur de 900 m).

Les données hydrauliques recueillies (116) d'après les pompages d'essai et les débits spécifiques montrent de bonnes valeurs de transmissivité en limite de recouvrement tertiaire qui s'étend d'Eperlecques-Houlle à la vallée de l'Aa en une bande de largeur croissante.

La surface piézométrique de la nappe (fig. 83) révèle une topographie profondément marquée

par les cônes dépressifs de Houlle-Moulle et d'Arques-Blendecques qui ont modifié l'état originel de la nappe dont les écoulements s'orientaient vers les rivières de la Hem et de l'Aa. Actuellement, seule la région de Tilques reste artésienne entre deux champs captants dont les débits vont en croissant.

b) Résultats obtenus après calage du modèle.

La restitution des courbes isopiézométriques calculées est dans l'ensemble comparable à la carte dressée sur le terrain. L'extension du cône de pompage d'Houlle-Moulle est cependant plus restreinte dans la simulation. Quelques

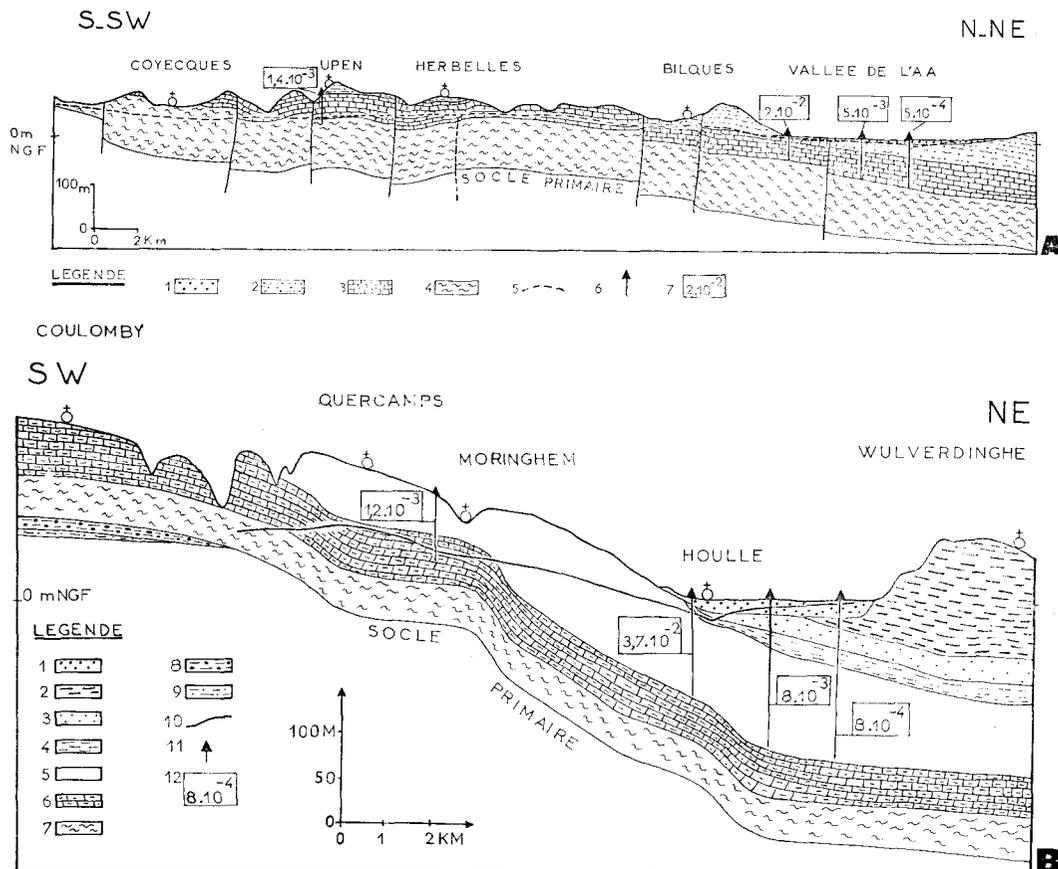


Figure 82

A : Coupe géologique et hydrogéologique effectuée de Coyecques (SW) à Arques (NE), dans les bassins versants de la Lys et de l'Aa. Coupe AB de la fig. 84. (D'après la coupe géologique interprétative établie sur la carte géologique au 1/50.000^e de Saint-Omer, par Desoignies et Thibaut, 1968).

Légende : 1, alluvions. — 2, argiles et sables du Tertiaire indifférenciés. — 3, craie du Sénonien et du Turonien supérieur. — 4, marnes du Turonien moyen et inférieur, et du Cénomaniens. — 5, surface piézométrique de la nappe de la craie à l'étiage 1974. — 6, forages projetés. — 7, valeur de la transmissivité au forage. Unités en m²/s.

B : Coupe géologique et hydrogéologique effectuée de Coulomby (SW) à Wulverdinghe (NE) à travers le bassin versant audomarois. Coupe CD de la fig. 84. (Extraits de la coupe établie dans le rapport B.R.G.M. A1608 de 1959, par Caron et coll., 1962).

Légende : 1, alluvions. — 2, argiles des Flandres (Yprésien). — 3, sables d'Ostricourt (Landénien). — 4, argile de Louvil (Landénien). — 5, craie du Sénonien et Turonien supérieur. — 6, craie et marnes du Turonien moyen et inférieur. — 7, marnes crayeuses du Cénomaniens. — 8, argiles noires de l'Albien. — 9, argiles et sables du Wealdien. — 10, surface piézométrique de la nappe de la craie à l'étiage 1973. — 11, forages projetés. — 12, valeur de la transmissivité au forage. Unités en m²/s.

divergences apparaissent également sur la rive gauche de la vallée de l'Aa.

L'ajustement des valeurs de transmissivité entraîne les observations suivantes :

— la zone des terrains aquifères s'étendant d'Eperlecques à St-Omer, ainsi que celle allant de Wizernes à Arques, sont affectées d'une bonne transmissivité : $3.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;

— un gradient décroissant de la transmissivité (de 10^{-3} à $5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) apparaît sous recouvrement tertiaire à mesure que l'on s'éloigne des affleurements ;

— la rive gauche de l'Aa, entre Wisques et Longuenesse ainsi que la rive droite de la Hem, entre Audrehem et Tournehem, sont affectées de valeurs de transmissivité médiocres (1 à $5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

5) Modèle des bassins interfluviaux Hem - Aa - Lys.

Un modèle mathématique en régime permanent englobant les parties de bassin interfluviales de la Hem à la Lys (fig. 84) a été réalisé

par Jacques Ricour en 1975 (31, p. 8 et 9) à la suite de l'acquisition en 1974 de données nouvelles sur la région comprise entre l'Aa et la Lys. Les structures géologiques et les caractères hydrologiques globaux des bassins de la Hem et de l'Aa, se prolongent logiquement dans le bassin de la Lys. Cet auteur écrit en effet :

« Le sous-sol de la région est formé par la craie sénonienne qui s'enfoncé progressivement au NE sous un recouvrement tertiaire argileux et sableux. Le long des vallées principales, des placages d'alluvions modernes reposent, soit directement sur la craie, soit sur des formations d'âge landénien. La craie sénonienne disparaît au SW, où elle est remplacée à l'affleurement par la craie turonienne, puis par les marnes du Turonien moyen et inférieur : ces dernières constituent généralement le substratum de l'aquifère formé par la craie blanche (sénonienne) et la craie grise à silex (turonienne). La craie sénonienne a été décapée dans la vallée de l'Aa jusqu'aux environs d'Hallines, ainsi que dans la vallée de la Haute Lys.

Les marnes turoniennes affleurent dans le fond des vallées. De nature plus ou moins crayeuse, elles assurent la continuité de l'aquifère au niveau du thalweg. La nature et la position des terrains renfermant la nappe de la craie est ainsi très variable entre la Lys et l'Aa. On peut rencontrer :

— des marnes crayeuses du Turonien moyen et inférieur,

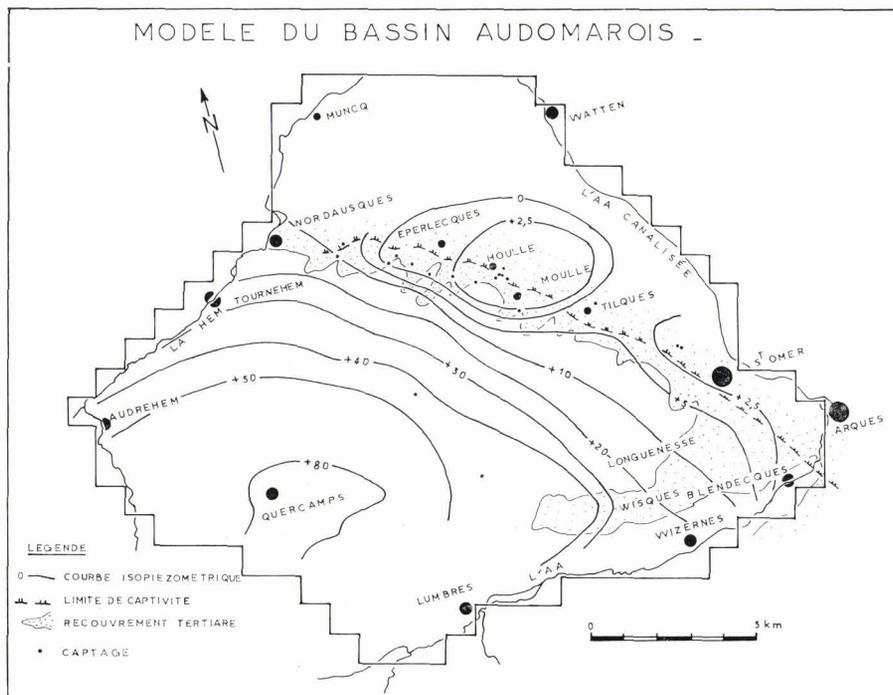


Fig. 83. — Extension géographique du modèle mathématique du bassin audomarois. (D'après Crémille et Jacques Ricour, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 434 NPA).

- la craie grise à silex du Turonien supérieur,
- ou enfin, la craie blanche du Sénonien ».

a) Caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux.

« Des zones de bonne transmissivité apparaissent localement :

- dans la vallée de l'Aa, entre Wizernes et Blendecques, où la transmissivité est comprise entre 10^{-1} et $3.10^{-2} m^2/s$. Cette bonne transmissivité est cependant localisée à une bande très étroite le long de la vallée de l'Aa ;
- localement, vers Quiestède, la transmissivité de la craie est plus élevée ($3.10^{-2} m^2/s$) ;
- à Théroüanne, dans la vallée de la Lys, la transmissivité s'accroît jusqu'à $3,2.10^{-2} m^2/s$.

Les zones de bonne transmissivité semblent, en première approximation, limitées aux vallées où la dissolution de la craie par les eaux d'infiltration a augmenté la conductivité de celles-ci, et aux zones faillées, à la limite du recouvrement tertiaire sur la craie (région de Théroüanne, de Quiestède, Blendecques et St-Omer en particulier)).

Sous recouvrement tertiaire, la transmissivité de la craie décroît rapidement pour atteindre des valeurs médio-

crés ou mauvaises ($10^{-4} m^2/s$). Le même phénomène apparaît sur les plateaux, lorsque la craie affleure en particulier entre Delettes, Fauquembergues et Ouve-Wirquin ».

b) Piézométrie de la nappe de la craie.

On utilisera les levés piézométriques des périodes de basses eaux même si elles ne sont pas totalement synchrones, ainsi toute la région située au Sud de l'Aa possèdera une piézométrie établie en 1974 alors qu'au Nord de l'Aa on adoptera les valeurs obtenues en 1972 et 1973. Ces choix ne sont possibles que par l'existence de sécheresses longues qui ont affecté les années 1971 à 1974 et qui se sont traduites par des étiages prolongés de la nappe. D'autre part, l'utilisation d'un modèle en régime permanent est compatible avec de telles mesures.

L'examen de la carte piézométrique montre un drainage de la nappe par les trois principa-

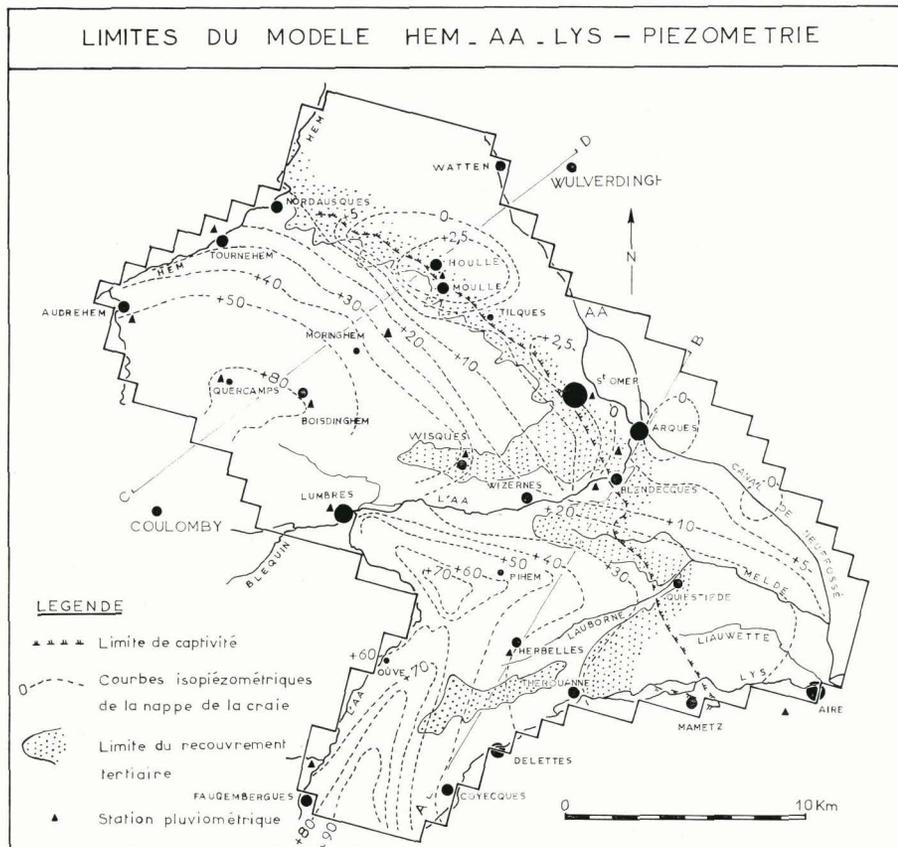


Fig. 84. — Limites du modèle mathématique Hem, Aa Lys (d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

les rivières : la Hem, l'Aa et la Lys. Il faut rappeler que, dans le secteur de Wizernes à Blendecques, il existe une alimentation induite de la nappe par la rivière Aa. Un très vaste cône de pompage s'étend dans le secteur de Houille et Mouille et se rapproche de la zone dépressionnaire de Saint-Omer - Arques. Des dômes piézométriques se manifestent sur les plateaux entre l'Aa et la Hem (de Lumbres à Audrehem) et entre l'Aa et la Lys (de Lumbres à Coyecques). Ils correspondent à des caractéristiques hydrauliques médiocres.

c) Echanges de la nappe avec l'extérieur.

Jacques Ricour a montré (31, p. 14) que :

« Les échanges de la nappe avec l'extérieur sont de deux types :

— les entrées : l'alimentation de la nappe est constituée par la pluie efficace qui s'infiltré à travers le recouvrement sus-jacent à la craie,

— les sorties : elles sont constituées par les émergences naturelles de la nappe, les puits artésiens (cressonniers), et enfin les débits prélevés aux forages et puits ».

1° Les entrées : Alimentation naturelle de la nappe.

L'apport moyen par les précipitations de la nappe a été estimé d'après les méthodes de Turc et de Thornthwaite. Les valeurs pluviométriques de treize stations ont été utilisées.

Ainsi que le signale Jacques Ricour dans le même rapport (31, p. 16 et 17) :

« Le module d'alimentation moyen pris en compte dans le modèle mathématique est de 5,1 l/s/km² pour la zone géographique dépendant de Fauquembergues et 3,7 l/s/km² pour celle dépendant du poste pluviométrique d'Herbelles.

En ce qui concerne le bassin Audomarois, l'alimentation moyenne calculée, entre mars 1972 et février 1973, est de 156 mm/an, soit 5 l/s/km². Il faut signaler cependant que ces valeurs sont faibles par rapport aux périodes de précipitations normales. Ainsi, sur la chronique 1961-1972, on obtient des valeurs égales à 9,1 l/s/km² ».

2° Les sorties.

« Les émergences naturelles de la nappe qui alimentent les cours d'eaux sont essentiellement réparties le long du cours amont de l'Aa entre Fauquembergues et Lumbres et entre Théroüanne et Mametz dans la vallée de la Lys.

Les émergences de la vallée de la Lys sont celles de la nappe de la craie turono-sénonienne. Par contre, les émergences de la vallée de l'Aa seraient issues en partie de l'aquifère crayeux du Cénomanien supérieur se drainant à travers les marnes altérées du Turonien inférieur et moyen.

Une zone d'émergence « semi-naturelle » de la nappe s'étend sur 1,5 km au SW de Quiestède, le long de la vallée du Lauborne ; les débits d'émergence sont dus en partie aux sources de débordement, en limite du recou-

vrement tertiaire et alluvionnaire sur la craie, en partie aux puits artésiens des cressonniers.

Les puits artésiens constituent le deuxième type de prélèvement dans la nappe de la craie. Ils sont situés dans les zones où l'altitude de la nappe est supérieure à la cote du sol. Dans ce cas, les forages sont jaillissants. Les cressonniers les plus importantes sont réparties dans la vallée du Lauborne et la vallée de la Lys ; quelques-unes s'étendent dans la vallée de l'Aa, en amont de Wirquin. Une zone d'artésianisme subsiste également entre les champs captants d'Houille-Mouille et St-Omer au niveau de Tilques. Des jaugeages effectués en 1972-73 ont permis de mesurer un débit de l'ordre de 102 l/s ».

3° Les prélèvements par captage.

— Interfluve Aa-Lys.

« Les captages les plus importants sont répartis le long de la vallée de l'Aa entre Wizernes et Arques ; ce sont, soit des captages industriels (verrière, cartonnerie), soit des captages pour l'alimentation en eau potable de la population. L'ensemble de ces prélèvements représente environ 597 l/s, soit 18.835.000 m³/an en 1972 contre 19.500.000 m³/an en 1970, soit une diminution de 3,4 %.

Le deuxième captage important de la région est représenté par le forage Bonduelle à Quiestède qui exploitait 29 l/s environ en 1972. Son influence sur les forages artésiens situés à l'amont nappe a été démontrée (118, 120). Sur 121 forages artésiens fonctionnant en 1969, 41 ont été fermés en 1970, 31 en juin 1972 et 7 en juillet 1972. En août 1974, 6 forages artésiens restaient en exploitation, qui représentent un débit maximal d'environ 15 l/s, si on admet par ouvrage un débit moyen annuel de 2,5 l/s ».

— Interfluve Hem-Aa.

Les principaux exploitants de la nappe de la craie sont représentés par les Sociétés des Eaux de Dunkerque et des Eaux de Saint-Omer.

— La Société des Eaux de Dunkerque dispose de quinze forages répartis sur une ligne parallèle à la limite du recouvrement tertiaire entre Nordausques et Mouille. Les prélèvements atteignent 12.10⁶ m³ en 1972. La Société des Eaux de Saint-Omer possède trois ouvrages au NW de Saint-Omer qui ont procuré en 1972 2,7.10⁶ m³ d'eau.

d) Elaboration et calage du modèle Hem - Aa - Lys.

Le modèle de dégrossissage du Bassin Versant Audomarois a été réalisé par Crémille et Jacques Ricour (5, p. 18 à 20), qui écrivent alors :

« Le modèle a permis de déterminer, dans un premier temps, la répartition des transmissivités correspondant à la surface piézométrique levée entre les mois de décembre 1972 et janvier 1974 de l'Aa à la Hem afin de rendre plus facile la mise au point du modèle à caler entre la Hem au nord-ouest et la Lys au sud-est.

Le modèle prend en compte une surface d'environ 506 km² (fig. 84) qui inclue :

- une grande partie du bassin situé en rive droite de la Hem,
- la totalité du Bassin Versant Audomarois,
- une partie du Bassin Versant de l'Aa et de son affluent le Bléquin,
- la partie aval du bassin situé en rive gauche de la Lys ».

1° Limites latérales.

« Les limites du modèle sont les suivantes :

- au nord-ouest et au nord, la Hem en position de drainage par rapport à la nappe,
- à l'ouest, une ligne recoupant le dôme piézométrique qui sépare les vallées de la Hem et du Bléquin,
- au sud-ouest, le Bléquin et l'Aa en position de drainage par rapport à la nappe,
- au sud, une ligne de courant WNW-ESE à travers le dôme piézométrique situé à l'est de Fauquembergues,

— au sud-est, la Lys en position de drainage par rapport à la nappe,

— au nord-est, sous recouvrement tertiaire, une limite arbitraire qui a été repoussée aussi loin que possible vers le nord-est, compte tenu de la précision des courbes piézométriques et des renseignements disponibles.

Une limite « intérieure » au modèle a été nécessaire pour tenir compte des relations nappe-Aa entre Lumbres et Blendecques. Aussi les niveaux piézométriques ont-ils été imposés sur les mailles correspondant à l'Aa de Lumbres à Blendecques, de manière à simuler le drainage et l'alimentation de la nappe par cette rivière ».

2° Limites supérieure et inférieure.

« Les limites supérieure (surface du sol et mur de l'Argile de Louvil qui constitue le toit de la craie) et inférieure (toit des marnes bleues du Turonien moyen = substratum de l'aquifère) ne sont pas nécessaires à l'établissement du type de modèle utilisé.

La *discrétisation du domaine* à étudier a été obtenue à partir d'un réseau de mailles carrées de 900 m de côté ; 625 mailles de 0,81 km² ont été utilisées au total ».

3° Données climatologiques.

« La répartition de l'alimentation naturelle a été "modulée" en fonction de la topographie et du recouvrement sus-jacent à la craie ; on a ainsi distingué trois grandes zones (fig. 85) :

— les hauts plateaux crayeux vers Quercamps et Fauquembergues, où l'alimentation naturelle de la nappe en basses eaux est de 4 l/s/maille, soit environ 5 l/s/km² ;

— une zone "intermédiaire" où l'altitude du sol est moins élevée et où l'alimentation de la nappe de craie est de 3 l/s/maille, soit 3,7 l/s/km² environ ;

— une zone où la nappe de la craie, captive sous l'Argile de Louvil, n'est alimentée que très localement par drainage induite à partir des sables tertiaires à raison de 5 l/s/maille, soit 6,2 l/s/km² (région d'Arques) ».

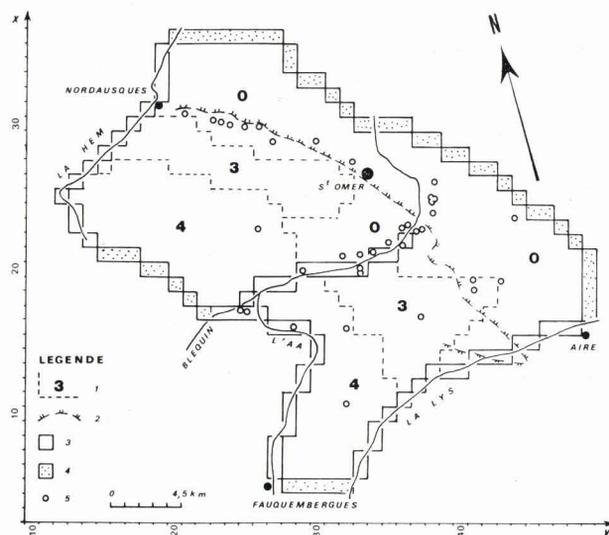


Fig. 85. — Implantation des captages, distribution des zones d'infiltration et définition des limites du modèle calé Hem, Aa, Lys (d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

Légende : 1, débit d'alimentation par la pluie efficace (en l/s.). — 2, limite de captivité de la nappe. — 3, limite à potentiel imposé. — 4, limite étanche ou à débit d'échange faible. — 5, forage d'exploitation.

4° Prélèvements à la nappe et alimentation artificielle.

« Les lieux des prélèvements à la nappe sont reportés sur la fig. 85. L'évolution de l'alimentation artificielle de la nappe de la craie à Moule a pu être reconstituée à partir des données mensuelles fournies par la Société des Eaux de Dunkerque. Le débit moyen injecté au cours de l'année 1973 a été de 261 l/s contre 217 l/s en 1972.

L'alimentation artificielle de la nappe est maximale en septembre-octobre (395 l/s en octobre 1973) ; les minima se situent en mai et en décembre de la même année (142 et 153 l/s), ces variations étant liées à l'alimentation naturelle de la nappe et à ses fluctuations ».

5° Caractéristiques hydrauliques de la craie.

« La répartition des transmissivités utilisées a été établie à partir de deux séries de données :

- mesures *in situ* réalisées dans l'interfluve Aa-Lys,
- champ des transmissivités issues du modèle réalisé sur le Bassin Versant Audomarois entre la Hem et l'Aa (deuxième phase) ».

6° Hypothèses émises lors du calage du modèle.

Si le calage d'un modèle mathématique du type utilisé consiste à modifier surtout les valeurs des paramètres hydrauliques (compte tenu des acquis hydrogéologiques de terrain)

afin d'obtenir une représentation la plus conforme possible des potentiels hydrauliques calculés avec ceux mesurés, il n'en demeure pas moins que des hypothèses de travail peuvent être émises sur les modalités des transferts de débit.

Les cinq grandes hypothèses testées ont permis :

— de vérifier l'existence et l'importance des débits de drainance de la nappe des sables tertiaires et des alluvions vers la nappe de la craie dans le secteur d'Arques-Blendecques (60 l/s) ;

— de constater les effets de l'alimentation artificielle dans le secteur de Houlle sur l'extension du cône de pompage de Houlle-Mouille ;

— de moduler le débit estimé initial des cressonnières de Tilques (65 l/s) et de Quiestède (15 l/s) ;

— de faire varier localement les hauteurs imposées sur l'Aa afin de réduire la perte naturelle de la rivière vers la nappe (200 l/s) ;

— de modifier la répartition des valeurs de pluie efficace dans l'interfluve Hem-Aa afin de développer la dépression du cône de pompage de Houlle-Mouille. Cette dernière hypothèse montre que les valeurs de la pluie efficace d'après la méthode de Turc doivent être écartées au profit de celles issues de la méthode de Thornthwaite.

7° Résultats obtenus par le calage du modèle.

Les résultats sont satisfaisants dans l'ensemble du domaine d'étude, sauf pour l'extension de la dépression de Houlle et Mouille qui est très sensible aux variations du débit d'alimentation artificielle affichée dans le modèle.

Les résultats de la vingt-quatrième simulation correspondent à une alimentation naturelle de la nappe qui est la plus basse de toutes celles enregistrées depuis douze ans.

8° Répartition des transmissivités du modèle calé.

Celle-ci fait l'objet de la fig. 86. On peut, d'après Jacques Ricour (1975, p. 25 à 29), distinguer successivement des zones de transmissivité médiocre ou mauvaise :

« — une zone de transmissivité médiocre (10^{-3} et 5.10^{-4} m²/s) sous recouvrement tertiaire au N et à l'E du modèle. Cette zone forme une bande continue au NE de la limite de captivité et parallèle à celle-ci,

— la transmissivité de la craie reste faible au Sud, de Fauquembergues à Pihem (10^{-4} et 5.10^{-4} m²/s) ainsi que sous le plateau s'étendant autour de Quercamps, entre la Hem et le Bléquin,

— sous les buttes tertiaires de Wisques et Longuenesse, la transmissivité de la craie est aussi peu élevée (1 à 5.10^{-4} m²/s).

Les zones de transmissivité moyenne (5.10^{-3} m²/s) sont au nombre de quatre :

— le long de la vallée de la Hem, ainsi qu'entre la Hem et Eperlecques,

— le long du cours amont de l'Aa, de Fauquembergues à Ouve-Wirquin,

— entre Quercamps et Wittes, c'est-à-dire entre les hauts-plateaux crayeux à l'ouest et Wisques à l'est,

— suivant l'axe Delettes-Herbelle, en amont-nappe de la zone de très bonne transmissivité de Quiestède.

Les trois zones de bonne transmissivité (1 à 3.10^{-2} m²/s) se répartissent :

— parallèlement à la limite de captivité de la nappe, de Nordausques à Arques,

— suivant l'axe de la vallée de l'Aa, de Wizernes à Blendecques,

— en rive gauche de la Lys, d'Herbelle à Roquetoire, sur une zone parallèle à la vallée et d'une largeur de 4 à 5 km ».

9° Carte piézométrique restituée.

« Le tracé des équipotentielles est satisfaisant dans son ensemble et assez fidèlement reproduit (fig. 87).

Le tracé de l'équipotentielle + 40,00, au niveau de la butte tertiaire de Wisques, reste assez mal défini, étant donné le peu de points de référence ayant servi à établir le tracé de l'isopièze réelle.

La dépression de la surface piézométrique au niveau d'Houille et Mouille n'a pu être correctement reproduite malgré de nombreuses tentatives et des simulations faisant appel à des débits d'alimentation artificielle très différents.

La carte piézométrique évoluant très rapidement en nappe captive, en fonction du débit de prélèvement imposé aux captages et du débit d'alimentation artificielle, il est malaisé d'estimer correctement le débit d'infiltration artificielle moyen correspondant à la période d'établissement de la carte piézométrique. Le but des simulations d'exploitation est de préciser l'évolution des cônes de pompage qui s'étendent d'Eperlecques à Arques, en fonction de l'alimentation naturelle et de l'alimentation artificielle réalisée à Houille ».

10° Etablissement du bilan.

« La connaissance du bilan des transferts d'eau est un des principaux acquis du calage du modèle mathématique.

Le bilan dressé à partir des résultats fournis par la vingt-quatrième simulation a été reporté dans le tabl. XXIII.

— Les débits d'entrée.

Les termes principaux de ces rapports sont respectivement :

L'alimentation naturelle par infiltration.

Elle représente 66 % des apports à la nappe, soit environ les deux tiers des entrées. L'essentiel de cette ali-

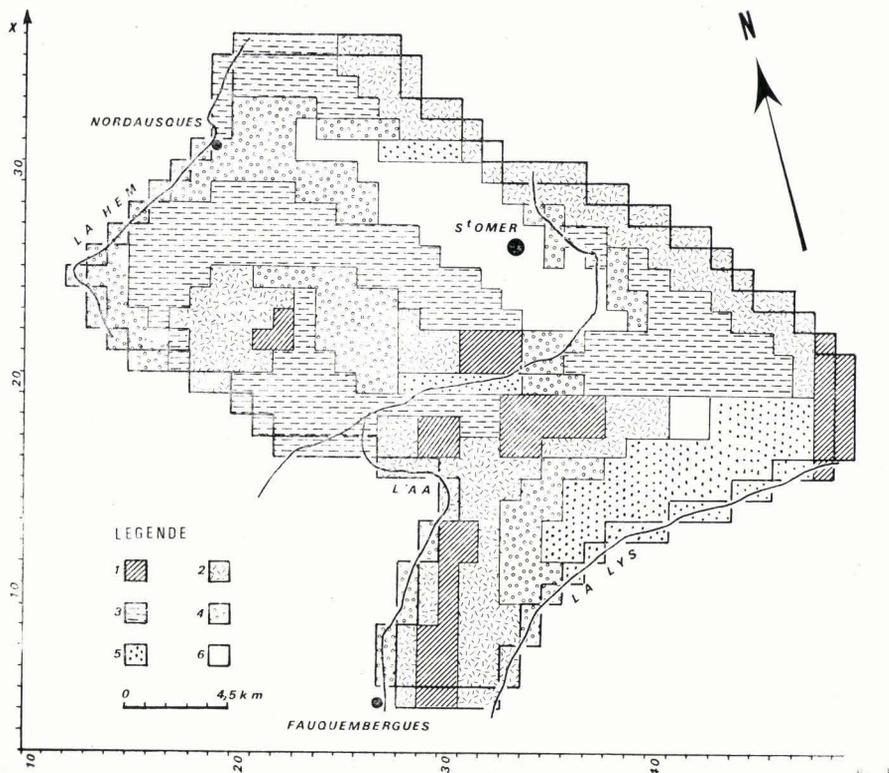


Fig. 86. — Distribution géographique des valeurs de la transmissivité (T) dans le modèle calé Hem, Aa, Lys (d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

Légende : 1, $T = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. — 2, $T = 5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. — 3, $T = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. — 4, $T = 3.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. — 5, $T = 3.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. — 6, $T = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

mentation verticale est réparti sur le Bassin Versant Audo-marois (325 l/s, soit 28.100 m³/jour en période d'étiage très sévère) et sur la rive gauche de la Lys entre Fauquembergues et Quiestède (251 l/s, soit 21.700 m³/jour).

L'alimentation artificielle.

Elle constitue le deuxième apport par ordre d'importance. Le volume transféré à la nappe de la craie représente 216 l/s (valeur moyenne réelle de mai 1972), soit 18.700 m³/jour environ dans le contexte étudié.

Cette alimentation artificielle est indispensable en période d'étiage pour maintenir l'état piézométrique de la nappe dans son état actuel, et l'artésianisme dans la région de Tilques.

L'apport par les rivières.

Il est limité au cours de l'Aa de Wizernes à Blendecques, et représente environ 8,5 % des apports (118 l/s). A ce terme, il convient d'ajouter, pour la période considérée la surexploitation de la nappe qui peut être évaluée dans le contexte choisi, à 5,5 % du total de l'alimentation de la nappe de la craie (soit 82 l/s environ).

— La drainance verticale à partir des sables tertiaires dans la région d'Arques et l'alimentation par les limites latérales autres que les rivières, ne représente que 5 %

des apports à la nappe. Ceci témoigne de l'individualité du domaine étudié, l'alimentation sous recouvrement tertiaire au NE et à l'E, ainsi qu'au niveau des dômes piézométriques restant négligeable en regard de la totalité des entrées prises en compte.

— Les débits de sortie.

Les prélèvements par captage représentent 55 % des sorties (810 l/s), exception faite de 314 l/s dans la vallée de l'Aa qui n'ont pu être affichés dans le modèle compte tenu de la dimension des mailles. Sur ces 55 %, 46,5 %, soit 376 l/s, correspondent aux captages de la Société des Eaux de Dunkerque entre Eperlecques et Tilques.

Le deuxième champ captant par ordre d'importance est celui de la vallée de l'Aa qui représente 424 l/s au total, dont 110 l/s sont affichés de façon effective dans le modèle.

Les émergences artificielles de la nappe, constituées par les cressonnières, ne représenteraient que 6 % des débits de sortie de la nappe, ce qui reste relativement peu élevé (90 l/s).

Le drainage par les cours d'eau, au contraire, constitue 35 % des sorties, soit 518 l/s, ce qui représente un volume important. Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'une partie de ce débit est transférée par certains cours d'eau,

d'une région de la nappe à une autre ; c'est le cas, en particulier, de l'Aa qui draine la nappe puis l'alimente, de la Hem qui draine la nappe en rive droite et l'alimente très probablement en rive gauche en direction des bassins versants du Calaisis. La totalité des débits n'est donc pas perdue, mais uniquement transférée par l'intermédiaire des cours d'eau qui jouent localement le rôle de conduits.

Les sorties au niveau des dômes piézométriques de Quercamps et de Fauquembergues et sous recouvrement tertiaire restent très faibles (3,9 %) en regard des échanges globaux de la nappe.

— Comparaison des entrées et des sorties.

Les captages implantés de Nordausques à Saint-Omer seraient alimentés par l'infiltration naturelle du Bassin Versant Audomarois et par l'alimentation artificielle réalisée à Houlle. Il en irait de même pour les cressonnières de Tilques. L'alimentation naturelle représenterait 541 l/s pour un débit des prélèvements de 526 l/s. L'équilibre reste précaire et n'est fonction que du débit d'alimentation artificielle, infiltré par bassins à Houlle.

Les prélèvements, dans la vallée de l'Aa, de Lumbres à Blendecques, représentent 414 l/s contre une alimentation globale de 411 l/s répartie comme suit : 226 l/s pour l'infiltration directe au niveau du bassin versant, 82 l/s correspondant à la surexploitation de la nappe et 118 l/s à l'alimentation de la nappe par la rivière.

Le champ d'Arques (206 l/s) est alimenté par drainance induite à partir de la nappe des sables tertiaires et des alluvions (60 l/s), par l'alimentation directe qui se produit sur le bassin versant situé en rive gauche de la Lys et, en dernier lieu, par surexploitation éventuelle de la nappe. Une partie de l'alimentation naturelle du Bassin Versant Audomarois semblerait, en outre, être détournée vers ce champ captant.

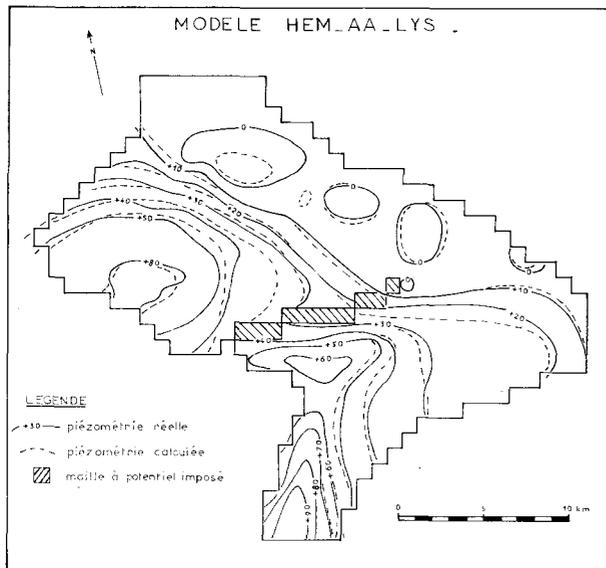


Fig. 87. — Restitution de la piézométrie calculée dans le modèle calé. Comparaison avec la piézométrie réelle (Hem, Aa, Lys) (d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

Dans ce contexte, le débit récupérable en rive gauche de la Lys, pour un étiage marqué de la nappe de la craie, serait d'environ 50 l/s, et de 65 l/s si l'on admet la disparition des cressonnières de Quiestède.

— Précision des résultats.

L'ensemble des résultats exposés permet de quantifier les données relatives à un ensemble de champs captants et de construire un schéma logique et cohérent les reliant. La répartition des transmissivités et des débits de prélèvement est connue avec une relative bonne précision. Par contre, l'incertitude la plus importante porte sur l'alimentation naturelle de la nappe de la craie qui est mesurée à 10 % près.

e) Conclusions.

Le modèle mathématique des bassins versants s'étendant de la Hem à la Lys, réalisé en régime permanent, a permis après vérification de cinq hypothèses de travail, d'établir un bilan hydrologique cohérent relatif à une période prolongée de basses eaux de la nappe de la craie.

La simulation au cours du calage a montré que l'alimentation artificielle de la nappe à Houlle à partir d'eaux superficielles (depuis janvier 1972) est nécessaire au maintien de la zone artésienne de Tilques et à la limitation dans l'espace du cône de dépression du champ captant de Houlle-Mouille.

Il n'existe pas d'interférences importantes entre ce dernier et celui du secteur Saint-Omer-Arques en raison de l'existence de la zone artésienne de Tilques qui joue le rôle d'une barrière hydraulique.

L'effet de la drainance verticale, en direction de la nappe de la craie, des nappes des sables du Tertiaire et des alluvions dans la région de Blendecques-Arques a pu être vérifié et le débit de transfert a ainsi été estimé à 60 l/s.

Des ressources en eaux souterraines restent mobilisables dans les vallées de la Lys et du Lauborne.

Parmi les valeurs de pluie efficace introduites sur les mailles d'alimentation du modèle et obtenues par les méthodes de Turc et de Thornthwaite, seules celles calculées par cette dernière conviennent à l'établissement d'un bilan correct.

C) MODELE DE LA REGION DE LILLE.

1) Introduction.

La réalisation (*) de modèles mathématiques de la nappe de la craie dans la région lilloise

(*) Les études ont été financées par la Communauté Urbaine de Lille.

ENTREES					SORTIES				
DEFINITION	QUANTITE EN L/S		POURCENTAGE		DEFINITION	QUANTITE EN L/S		POURCENTAGE	
	PARTIELLES	TOTAL	PARTIEL	TOTAL		PARTIELLES	TOTAL	PARTIEL	TOTAL
1 ALIMENTATION VERTICALE (PLUIE EFFICACE)					1 PRELEVEMENTS AUTRES QUE LES CRESSONNIERES				
1- BASSIN VERSANT AUDOMAROIS	325		22,5 %		- CAPTAGES DE LA SLEE F 4 à F 15 (HOULLE/MOULLE) :	461		31,2 %	
2- HEM RIVE DROITE JOURN A TOURNEHEM	111		7,5 %		- CAPTAGES D'ARQUES	106		14 %	
3- BASSIN AA-BLEQUIN (RIVE GAUCHE)	133		9,0 %		- CAPTAGES DE LA VALLEE DE L'AA DE LUMBRES A BLENDEQUES	100 + (34)			
4- BASSIN AA (RIVE DROITE) DE LUMBRES A BLENDEQUES	93		6,5 %		- INTERFLUVE AA-LYS A L'EXCEPTION DES CAPTAGES DE LA VALLEE DE L'AA	43	810 (+ 314)	3 %	55 %
5- BASSIN DE LA LYS RIVE GAUCHE	251		17 %						
6- BASSIN AA (RIVE DROITE) DE FAUQUEMBERGUES A LUMBRES	50	963	3,3 %	66 %	2 CRESSONNIERES				
2 DRAINANCE VERTICALE REGION D'ARQUES	60	60	4 %	4 %	- CRESSONNIERES DE TILQUES	65		4,4 %	
3 ALIMENTATION ARTIFICIELLE HOULLE (SLEE)	216	216	15 %	15 %	- CRESSONNIERES DE QUIESTEDE	15	89	1,6 %	6 %
4 ECHANGES AUX LIMITES LATERALES ET SUREXPLOITATION DE LA NAPPE					3 ECHANGES AUX LIMITES LATERALES				
4 a - LES RIVIERES (ALIMENTATION) :					- 3a - LES RIVIERES (DRAINAGE)				
- AA ET SUREXPLOITATION DE LA NAPPE	200	200	14 %	14 %	- AA	249		16,9 %	
4 b - ALIMENTATION PAR LES LIMITES AUTRES QUE LES RIVIERES					- HEM	115		7,8 %	
- LIMITES NE ET E SOUS RECOU- VREMENT TERTIAIRE	17				- BLEQUIN	13		0,9 %	
- DOME PIEZOMETRIQUE DE FAUQUEMBERGUES	-				- LYS	141	518	9,4 %	
- DOME PIEZOMETRIQUE DE QUERCAMPS	7	24		1 %	- 3b - DRAINAGE AUX LIMITES LATE- RALES AUTRES QUE LES RIVIE- RES				
					- LIMITES NE ET E SOUS RE- COUVREMENT TERTIAIRE	52		3,5 %	
					- DOME PIEZOMETRIQUE DE FAUQUEMBERGUES	5		0,4 %	
					- DOME PIEZOMETRIQUE DE QUERCAMPS	-	57		3,9 %
TOTAL ENTREES	1463	1463	100 %	100 %	TOTAL SORTIES	1474	1474	100 %	100 %

Tableau XXIII. — Bilan hydrologique de la nappe de la craie issue du modèle mathématique calé (Hem, Aa, Lys)
(d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

a pour but essentiel de permettre la prévision des rabattements des niveaux d'eau souterraine lors du creusement de grandes fouilles ou de galeries. La conception de tels modèles est identique à celle adoptée habituellement pour la gestion d'une nappe.

Nous présenterons les divers aspects de la modélisation et de ses résultats afin de mieux comprendre les relations hydrodynamiques de la nappe de la craie avec l'extérieur.

Il résulte des travaux de Caulier et Ramon en 1971 (115), de Ramon en 1972 (28) et de Ramon et Crémille en 1974 (30), que :

— dans une première étape, le travail consiste à synthétiser les renseignements sur la géométrie du réservoir crayeux et sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère (115) ;

— dans une seconde étape, une simulation par modèle monocouche (28) permet de dégager une première synthèse hydrogéologique qui conduit à démontrer l'importance des apports par drainance de la nappe alluviale et des pertes des réseaux d'eau ;

— la troisième étape (30) entraîne la mise en œuvre d'un modèle "bicouche" où la nappe des alluvions de la Deûle a été également simulée.

2) Géologie et hydrologie de la région lilloise.

a) Cadre géologique.

La région lilloise se situe à cheval sur les régions du Mélois "craieux" et des Flandres "argileuses". Les terrains crayeux qui affleurent au Sud, entre Haubourdin et Lezennes, s'enfoncent régulièrement vers le Nord sous des argiles et sables du Tertiaire. La réalisation de deux coupes géologiques (fig. 88) montre :

— l'existence d'un paléorelief paléozoïque présentant un dôme topographique d'Hallennes-lez-Haubourdin à Lesquin,

— la présence d'une vaste structure synclinale paléozoïque à flanc méridional faillé,

— une diminution des épaisseurs des assises du Crétacé (marnes et craie du Turonien et du Sénonien),

— une forte épaisseur des alluvions de la Deûle dont la vallée entaille fortement les niveaux crayeux et les sables landéniens.

b) *Cadre hydrogéologique.*

Sur le plan hydrogéologique, la région lilloise se caractérise par une grande diversité de nappes qui se superposent totalement ou en partie avec la nappe du "calcaire carbonifère", la nappe de la craie, la nappe des sables landéniens et la nappe des alluvions de la Deûle.

Seules les deux premières nappes sont exploitées intensivement pour l'alimentation en eau potable et industrielle en raison des débits qu'elles fournissent.

Sur les coupes géologiques de la fig. 88, ont été reportés les profils piézométriques des deux nappes qui indiquent :

— la permanence du régime captif de la nappe du Calcaire carbonifère sur l'axe de la Deûle,

— la semi-captivité de la nappe de la craie sous les alluvions de la Deûle et l'apparition rapide du régime captif dès le recouvrement tertiaire,

— une forte diminution de l'épaisseur de l'aquifère crayeux dans la région de Lesquin.

Dans la suite de notre propos, nous ne nous intéresserons qu'à la nappe de la craie.

c) *Définition de l'aquifère crayeux.*

Nous définirons l'aquifère crayeux comme étant un horizon lithologique compris entre deux entités imperméables : les argiles de Louvil du Landénien au sommet et les marnes "bleues" du Turonien moyen à la base.

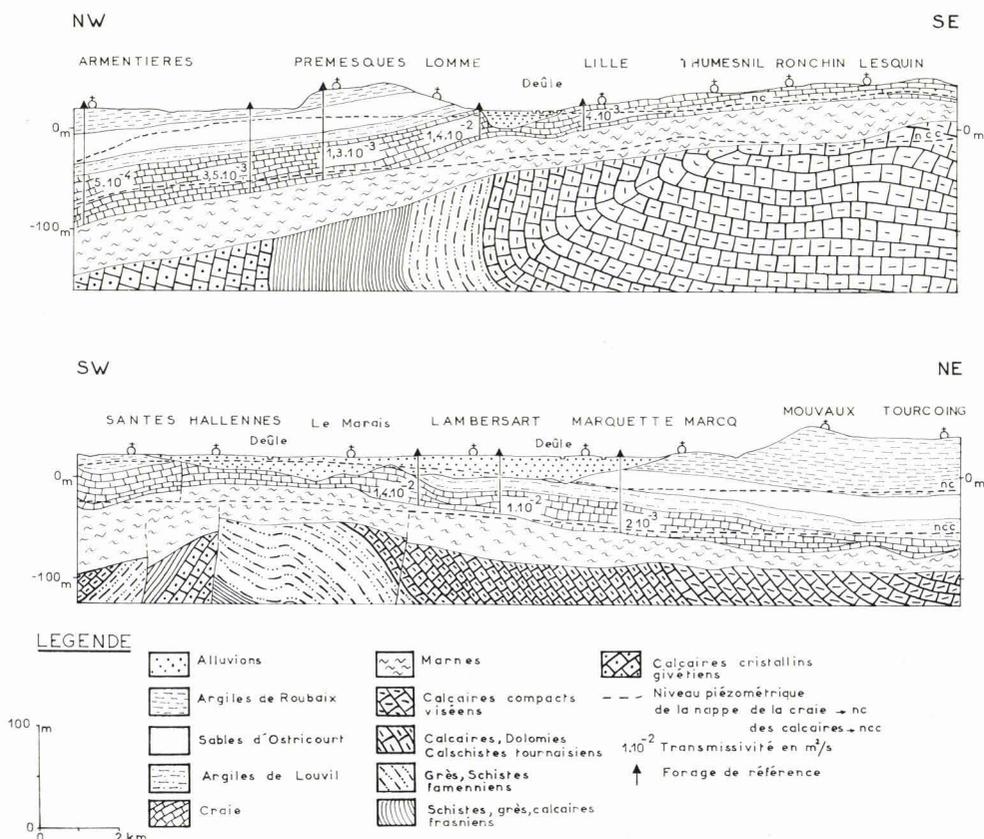


Fig. 88. — Coupes géologiques et hydrogéologiques synthétiques dans la région lilloise (coupes reportées sur la fig. 91).

L'horizon aquifère est constitué du haut vers le bas par la craie blanche ou grise du Sénonien, un ou plusieurs niveaux de "tun" à la limite Sénonien-Turonien, une craie grise glauconieuse et phosphatée à silex du Turonien supérieur.

Les essais au micromoulinet effectués dans l'aquifère crayeux de la région lilloise (Chapitre 4) permettent de dégager les conclusions suivantes :

- les variations des perméabilités de la craie sont brutales,

- les tranches d'aquifère crayeux, bien délimitées hydrauliquement, ne possèdent pas d'épaisseur constante et ne suivent pas les stratifications de la craie,

- la craie n'est productive qu'au-dessus du premier banc de "Tun",

- la perméabilité de la craie ne dépasse pas 2.10^{-2} m/s.

1° Caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux.

La première étape de synthèse des caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie a permis d'établir (115) une carte de distribution géographique des valeurs de transmissivité obtenues classiquement par pompage. Les zones de transmissivité nettement mises en évidence sont guidées essentiellement par la direction des limites du recouvrement tertiaire.

La vallée de la Deûle, qui se surimpose au schéma précédent, provoque un accroissement très important des valeurs de transmissivité sur une zone en forme de croissant qui couvre les territoires d'Hallennes-lez-Haubourdin, de Lambersart et du Nord de Lille (de 1.10^{-2} à 3.10^{-2} m²/s). Au fur et à mesure que l'aquifère crayeux plonge sous le recouvrement tertiaire, sa transmissivité décroît régulièrement jusqu'à atteindre 5.10^{-4} m²/s à Armentières à 10 km environ des affleurements crayeux.

Sur les affleurements crayeux du Sud, l'épaisseur de l'aquifère "mouillé" est très faible (environ 5 m) ce qui explique sa très mauvaise transmissivité (de l'ordre de 10^{-4} m²/s).

2° Piézométrie de la nappe de la craie.

L'examen de la carte piézométrique de la nappe de la craie (fig. 89) conduit aux remarques suivantes :

- la nappe s'écoule de manière générale en direction du Nord,

- un vaste dôme piézométrique s'étend dans le secteur de Lesquin,

- les gradients hydrauliques de la nappe s'accroissent brusquement, au Nord d'une ligne allant de Verlinghem à Wasquehal, et y traduisent de mauvaises circulations des eaux souterraines,

- des dépressions locales de la nappe, consécutives à des prélèvements, sont visibles le long de la vallée de la Deûle, d'Haubourdin à Saint-André, ainsi qu'à Hem (captage de la S.E.N.).

3° Echange de la nappe avec l'extérieur.

L'alimentation de la nappe de la craie est réalisée à partir :

- des précipitations qui affectent les zones d'affleurement de la craie, là où l'urbanisation n'est pas continue et systématique,

- du déversement de la nappe des sables landéniens à la limite du recouvrement de la craie par les argiles de Louvil,

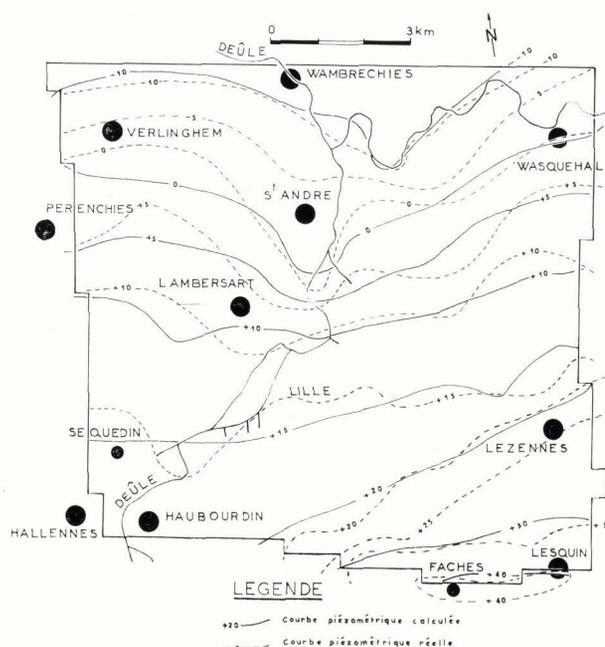


Fig. 89. — Comparaison entre la piézométrie calculée et la piézométrie réelle (Lille) (d'après Crémille et Ramon, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 137 NPA).

— des pertes des réseaux d'eau (5 l/s/km^2) (*),

— de la drainance de la nappe alluviale qui possède une pression hydraulique supérieure à celle de la nappe de la craie (3 à 6 m) et est alimentée elle-même par la Deûle et ses canaux satellites.

Lors des pompages d'essai réalisés dans l'aquifère crayeux sous recouvrement alluvionnaire, la nappe des alluvions a subi une évolution piézométrique identique à celle de la nappe de la craie. Une surveillance piézométrique continue des deux nappes confirme cette observation (fig. 90).

La recherche des valeurs de perméabilité verticale des niveaux alluvionnaires conduit à une estimation de l'ordre de 10^{-7} m/s et le débit calculé d'alimentation verticale de la craie par la nappe alluviale approche 50 l/s/km^2 (28). La mauvaise qualité physico-chimique des eaux de la nappe de la craie indique l'existence de communications hydrauliques entre la nappe alluviale polluée et la nappe de la craie. C'est ce qu'ont montré en 1971 Journet et Ramon (228).

3) Etablissement du modèle bicouche.

Crémille et Ramon écrivent en 1974 (30) :

a) Avant-propos.

« Dans le modèle bicouche, par rapport au modèle monocouche, les nouvelles grandeurs suivantes sont introduites :

— la hauteur de la craie mouillée, donc l'altitude du toit du substratum, du mur du recouvrement et de la surface piézométrique,

— la valeur de perméabilité horizontale de l'aquifère crayeux,

— un niveau d'eau, imposé, dans les alluvions et la transmissivité verticale(**) de ces alluvions pour représenter la drainance entre la nappe de la craie et celle des alluvions.

L'algorithme mathématique consiste, en un premier temps, à calculer les débits d'écoulement latéral et vertical (drainance) à partir du niveau de la nappe alluviale en tenant compte de son épaisseur et de la perméabilité de l'aquifère alluvionnaire et, en un deuxième temps, à calculer le niveau de la nappe de la craie en tenant compte des débits mis en jeu (écoulement latéral, pompage ou alimentation naturelle, drainance).

Ces deux calculs sont effectués alternativement pour chaque maille. A chaque itération, les résultats calculés précédemment sont utilisés comme données de base.

(*) Chiffres fournis par la C.U.D.L. et la S.E.N.

(**) Appelée également transmissivité de passage [$= A^2/(K'e)$].

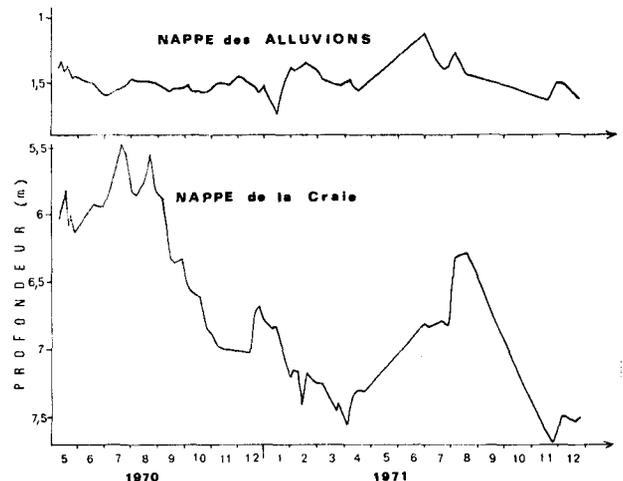


Fig. 90. — Variation comparative du niveau des nappes de la craie et des alluvions à Lille (Grand'Place) (profondeurs exprimées en m) (d'après Crémille et Ramon, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 137 NPA).

b) Définition du modèle.

1° Maillage du modèle.

La région couverte par le modèle couvre une superficie de 126 km^2 dont les limites géographiques externes sont les suivantes (fig. 91) :

- à l'Est, de Roubaix à Lesquin,
- au Sud, de Faches à Haubourdin,
- à l'Ouest, de Sequedin à Verlinghem,
- au Nord, de Wambrechies à Wasquehal.

Le maillage comporte au total 40 mailles dans le sens S-N (échelle Y) et 45 dans le sens W-E (échelle X), soit 1.800 au total. Chaque maille, repérée par ses coordonnées X, Y, est carrée, de 300 m de côté (soit $0,09 \text{ km}^2$ de surface).

Toutes les mailles ne sont évidemment pas utilisées pour des raisons de limites hydrauliques et 1.400 mailles font réellement partie du modèle.

2° Limites du modèle.

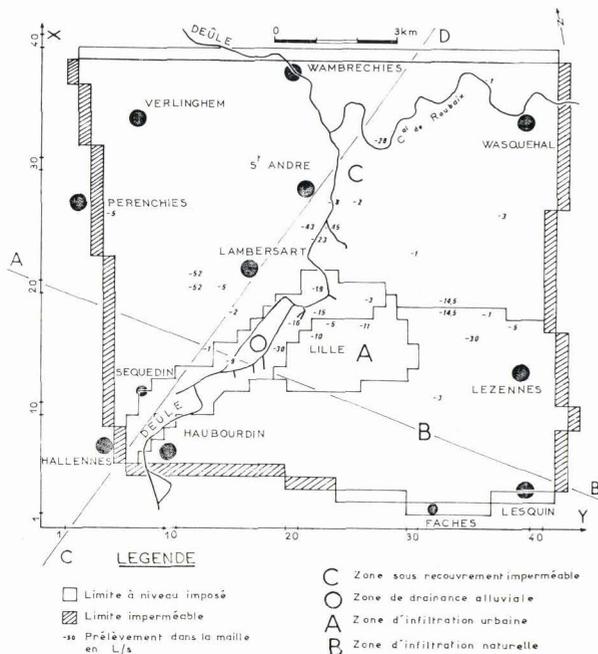
— Limites latérales.

Ont été choisies les limites suivantes (fig. 91) :

— une limite nord (aval de la nappe) à niveaux imposés, sur et au-delà de laquelle nous estimons que toutes les transformations hydrauliques effectuées à l'amont seront pratiquement sans influence,

— deux limites étanches, à l'Est et à l'Ouest, représentant des filets liquides suffisamment éloignés du centre de Lille pour ne pas être influencés par des pompages éventuels,

— une limite sud (amont-nappe) en principe étanche mais où nous avons dû imposer des niveaux dans les zones où la nappe est extrêmement mince (proche du substratum) pour éviter de grandes instabilités de calcul.



4) Calage du modèle et résultats.

Plus de 40 passages ordinateur ont été nécessaires pour obtenir une carte piézométrique calculée proche de la réalité (fig. 92). En effet, il a fallu moduler à la fois les valeurs de perméabilité horizontale de l'aquifère crayeux et de transmissivité verticale des alluvions.

a) Distribution finale des caractéristiques de l'aquifère crayeux et des alluvions.

La distribution finale des caractéristiques de l'aquifère crayeux (fig. 92) conduit à formuler les remarques suivantes:

- il existe une zone de bonne perméabilité (10⁻³ m/s) au S de Lille et le long de la vallée de la Deûle,
- les valeurs de perméabilité décroissent régulièrement en direction du N et parallèlement à la limite du recouvrement tertiaire,
- la distribution des transmissivités verticales des alluvions est stable. Les valeurs oscillent entre 6 et 8.10⁻⁴ m²/s.

b) Bilan de la nappe.

Compte tenu des débits imposés (alimentation par les pluies et les réseaux, prélèvement par les forages) et des débits calculés par le modèle (entrées et sorties latérales - apport des alluvions), le bilan équilibré des volumes échangés est reporté dans le tableau XXIV.

A 3% près, le bilan est équilibré. Son examen permet de constater les deux faits suivants:

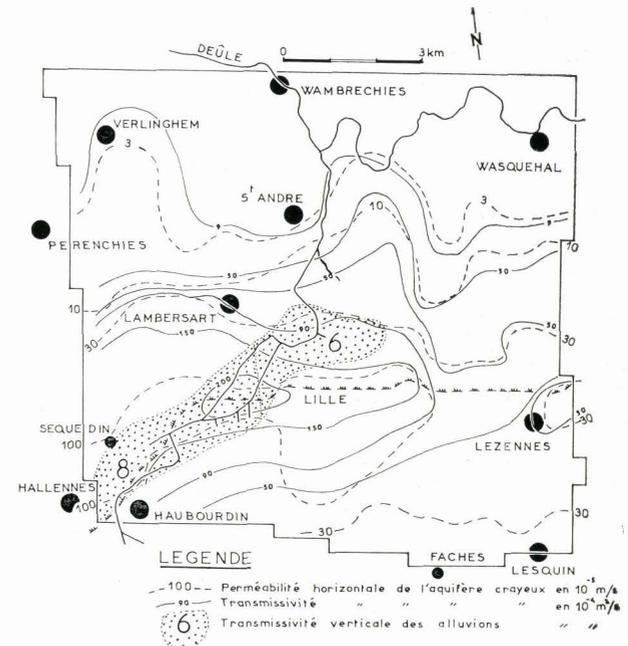


Fig. 92. — Carte de la perméabilité et de la transmissivité horizontale de l'aquifère crayeux. Distribution des perméabilités verticales des alluvions (Lille) (d'après Crémille et Ramon, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 137 NPA).

— les prélèvements sont entièrement couverts par des apports verticaux,

— le débit de drainance des alluvions par la craie s'élève à 230 l/s.

Cet apport, relativement important pour des eaux souterraines, est indispensable au maintien de la nappe de la craie. Il est supérieur au débit d'alimentation par les pluies. Sans lui, la nappe serait surexploitée et peut-être déjà asséchée.

— Le débit de fuite vers le Nord (écoulement de la nappe de la craie vers la Belgique) est très faible : 25 l/s.

L'apport par les alluvions représente cependant un danger important de pollution des eaux souterraines par des substances dissoutes. Les teneurs en sulfates en particulier atteignent 200 mg/l. (189).

L'eau des alluvions provient de la Deûle canalisée, bien que cette perte, trop faible par rapport au débit de la Deûle (supérieur à 2.000 l/s) n'ait pu être mise en évidence lors des études entreprises par les services spécialisés des Voies Navigables ».

5) Conclusions.

La modélisation des nappes de la craie et des alluvions a permis de montrer le rôle essentiel que jouent les apports par drainance des formations alluvionnaires. Le débit ainsi mis en jeu représente un peu moins de 50 % des alimentations de la nappe.

L'impact de cette étude sur l'hydrogéologie régionale est très important car des mesures

		Entrées en l/s	Sorties en l/s
Débits imposés	Alimentation par les pluies	202	—
	Alimentation par les réseaux	58	—
	Prélèvements par le forage	—	516
Débits calculés	Alimentation par les alluvions	230	—
	Alimentation par l'amont	—	16
	Fuite vers la Belgique	25	—
TOTAL		515	532

Tableau XXIV. — Bilan de la nappe de la craie dans la région lilloise (d'après Crémille et Ramon, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 137 NPA).

de terrain montrent l'existence d'une relation entre les niveaux de la nappe alluviale et de la nappe de la craie. On a là une confirmation des hypothèses avancées par l'hydrogéologue dans la modélisation monocouche.

Il est important de noter que la distribution des transmissivités obtenues à partir de deux types de modèle, reste comparable.

D) MODELE DU DOUAISIS.

La région douaisienne est limitée au S par la vallée de la Sensée, au N par la vallée de la Scarpe et vers l'W par le plateau de Beaumont. Il n'existe aucune barrière morphologique vers l'Est.

1) Acquisition des données.

a) Cadre géologique.

Le Douaisis forme la limite Sud du Bassin tertiaire d'Orchies. Le sous-sol est constitué par la craie sénonienne et turonienne dont les couches s'enfoncent irrégulièrement sous les formations du Tertiaire, soit vers le Nord (E de Lewarde), soit vers le Sud-Est (E de Vitry), de part et d'autre de deux dépressions structurales représentées par un synclinal de direction N-S centré sur la ville de Douai et un synclinal de direction W-E, de Douai à Auberchicourt (fig. 93 et 94).

Les affleurements de craie sont imbriqués dans une mosaïque d'affleurements tertiaires. Seuls, le plateau de Beaumont et une zone au SE de Douai forment des ensembles géographiques crayeux homogènes. Ces derniers, datés du Sénonien et du Turonien supérieur, possèdent un faciès très favorable aux circulations d'eau. Des couches plus marneuses (Turonien moyen) passent à des terrains plus argileux du Turonien inférieur et Cénomaniens qui peuvent constituer le substratum étanche de la nappe de la craie (Carte hydrogéologique au 1/50.000^e de Douai).

Les terrains imperméables constitués par les argiles et le tuffeau de Louvil, limitent l'aquifère crayeux au sommet.

En règle générale, les forages d'eau de la région s'arrêtent au sommet des marnes du Turonien inférieur.

Le long des vallées de la Scarpe, de la Sensée et de l'Escrebieux se sont déposées

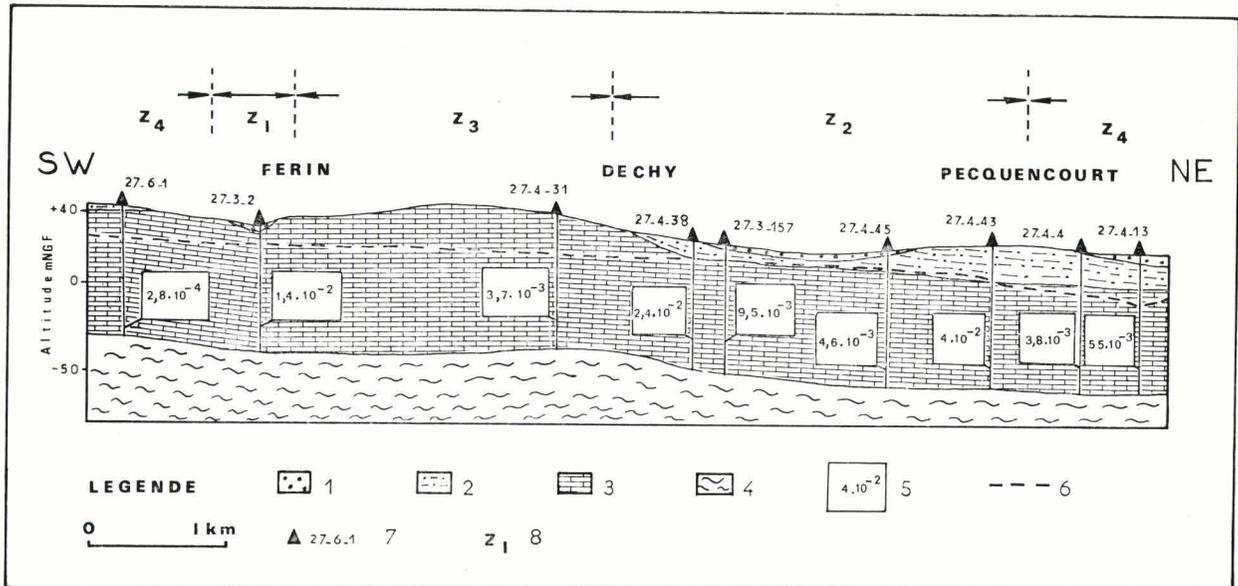


Fig. 93. — Schéma de l'évolution spatiale des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux dans le Douaisis. *Légende*: 1, alluvions. — 2, argiles et sables du Tertiaire (Landénien). — 3, craie du Turonien supérieur et du Sénonien: aquifère. — 4, marnes du Turonien moyen et supérieur: substratum imperméable de l'aquifère. — 5, valeur de la transmissivité au droit de l'ouvrage (en $m^2/sec.$). — 6, niveau piézométrique de la nappe de la craie. — 7, captage accompagné de son indice B.R.G.M. — 8, principales zones de transmissivité: Z_1 : transmissivité très bonne; Z_2 : transmissivité bonne; Z_3 : transmissivité faible; Z_4 : transmissivité très faible.

des alluvions modernes reposant, soit directement sur la craie, soit sur des formations tertiaires (sables et argiles du Landénien).

b) Cadre hydrogéologique.

L'aquifère crayeux peut être limité théoriquement à son substratum constitué par les marnes turoniennes. Aussi rencontre-t-on les plus grosses épaisseurs de craie dans les deux synclinaux précédemment nommés.

1° Caractéristiques hydrauliques de la craie.

— Données d'ensemble.

On peut, à partir des essais de pompage effectués, retrouver les valeurs de transmissivité et du coefficient d'emménagement. Les constatations issues de l'examen des données montrent :

— en zone captive éloignée de la limite de recouvrement tertiaire, dans le secteur allant de Marchiennes-Pecquencourt à Roost-Warendin, la craie possède une transmissivité médiocre de 1 à $7.10^{-3} m^2/s$;

— sous la zone de recouvrement en régime libre ou en régime captif mais près des affleu-

rements, les caractéristiques s'améliorent comme sur la ligne Auberchicourt, Lewarde, Guesnain, Dechy, Sin-le-Noble où l'on note des transmissivités allant de $1,2$ à $2.10^{-2} m^2/s$;

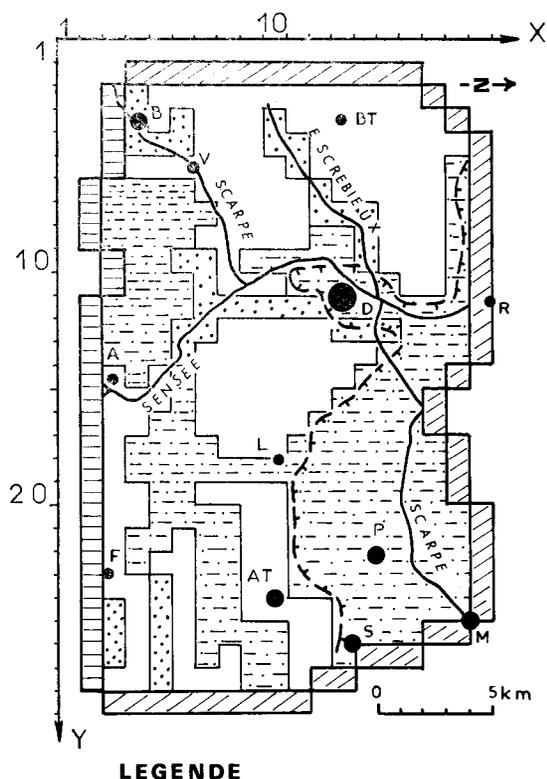
— sur les zones des "plateaux" de Férin-Corbehem-Cantin, la transmissivité oscille de $2.10^{-3} m^2/s$ à $1,5.10^{-2} m^2/s$ avec des valeurs ponctuelles parfois très faibles ($2,8.10^{-4}$ à Gouy-sous-Bellonne) ;

— dans les vallées, la transmissivité est en général très bonne.

Ainsi, dans la vallée de la Sensée, la transmissivité de la craie oscille de 1 à $7.10^{-2} m^2/s$ entre Cantin, Arleux et Aubigny-Fressies. Dans la vallée de l'Escrebieux, la transmissivité va de 3 à $7.10^{-2} m^2/s$.

— Analyse au micromoulinet.

Un essai en injection au micromoulinet effectué en décembre 1974 (Chapitre 4) sur le forage de Férin-Dechy (SE de Douai) a permis de mieux saisir la distribution verticale des perméabilités. On a pu constater que la craie n'était absorbante qu'en tête (66,3% du débit total d'injection) sur 4,50 m d'épaisseur juste sous



LEGENDE

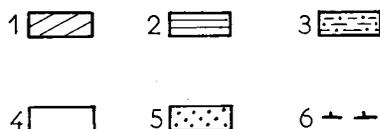


Fig. 94. — Distribution schématique des unités géologiques du modèle du Douaisis.

Légende : B, Biache-St-Vaast. — BT, Beaumont. — V, Vitry-en-Artois. — D, Douai. — A, Arleux. — L, Lewarde. — P, Pecquencourt. — F, Féchain. — AT, Auberchicourt. — M, Marchiennes. — R, Raimbeaucourt. — S, Somain. 1. Limite étanche ou à très faible échange de débit. — 2, limite à potentiel imposé (rivière). Affleurements. — 3, argiles et sables du Tertiaire (Landénien). — 4, terrains crayeux. — 5, alluvions. — 6, limite de captivité de la nappe de la craie.

les limons et également, mais dans des proportions plus faibles, au fond du forage (entre 37 et 39 m) dans la craie blanche (10,3 % du débit).

Il apparaît que, très souvent, dans les zones d'affleurement le niveau de la nappe se trouve bien en deçà de la zone de bonne perméabilité qui est consécutive à l'érosion et à la dissolution des terrains crayeux par les précipitations. Cette zone peut certainement atteindre, lorsque les limons sont inexistants, une dizaine de

mètres et s'amenuiser rapidement sous le recouvrement tertiaire.

Une zone particulièrement intéressante à exploiter est celle qui réunit à la fois les conditions d'un régime captif et l'existence de la zone de bonne perméabilité.

Un schéma (fig. 93) montre la répartition des zones de perméabilité. Les secteurs de la vallée possèdent indépendamment du reste, de bonnes perméabilités. On comprend que, dans les régions où existe la superposition d'une vallée à la limite du recouvrement tertiaire, les caractéristiques hydrodynamiques soient très favorables.

2° Piézométrie.

— Allure des courbes isopiézométriques.

Les cartes piézométriques levées aux étiages de 1970 et de 1972 (*) permettent de voir que les circulations se font du S vers le N dans la partie E du Douaisis et du SW vers le NE dans la partie W. On peut remarquer trois zones principales :

— sur toute la partie S du domaine étudié, les pompages sont rares et des dômes piézométriques apparaissent à l'emplacement des buttes topographiques (Vitry-en-Artois, Estrée et Bugnicourt). Ils sont dus à une transmissivité médiocre de la craie sous le recouvrement tertiaire. Le dôme piézométrique au niveau de Biache-St-Vaast a pour origine des pertes du canal de la Scarpe supérieure ;

— dans la partie N, entre la vallée de l'Escrebieux et Marchiennes, la nappe est déprimée en raison des soutirages importants centrés sur Pecquencourt, Sin-le-Noble, Flers-en-Escrebieux et Corbehem. Le vaste cône de dépression de Pecquencourt montre la transmissivité médiocre de l'aquifère.

— dans les autres domaines, le gradient hydraulique reste assez bas et passe de 15 ‰ à Auberchicourt-Pecquencourt à 10 ‰ entre Corbehem et Douai. Cette observation indique une grande homogénéité de l'aquifère, donc de faibles variations de transmissivité.

— Relation entre la nappe et les cours d'eau.

La Scarpe est en position de drainage par rapport à la nappe alluviale du Sud au Nord de

(*) Cartes archivées au Service Géologique National du B.R.G.M. de Lezennes, Fort de Lezennes, B.P. 26, 59260 Hellemmes-Lille.

Douai et en position d'alimentation vis-à-vis de la nappe de la craie entre Biache-St-Vaast et le Nord-Est de Vitry. La Sensée canalisée est en position d'alimentation par rapport à la nappe de la craie alors que l'Escrebieux est en position de drainage en amont puis en position d'équilibre vers l'aval.

— Régime de la nappe.

Le régime hydraulique de la nappe a pu être établi à partir de l'examen des coupes de sondage disponibles et de la piézométrie. La limite de captivité de la nappe a pu être ainsi tracée. Elle suit la limite du recouvrement tertiaire avec un décalage de 0,5 à 1 km ; dans le secteur de Douai, elle affecte les terrains crayeux sous recouvrement alluvionnaire. Une petite zone captive apparaît à Bellonne.

— Variations piézométriques.

La surveillance piézométrique de la nappe a été réalisée sur quatre puits (fig. 36), dont deux en régime captif.

— *En nappe libre*, le graphique de la station d'Auberchicourt (indice 27-4X-143) à l'E du Douaisis montre des périodes de fortes remontées (printemps 1966, 1967, été 1970 et automne 1974). Une décrue très longue affecte la nappe à partir de l'été 1970 avec un palier pendant trois années consécutives. Les grandes oscillations piézométriques sont ici le signe de caractéristiques hydrauliques médiocres.

— *En nappe captive*, on enregistre des phénomènes similaires à la station de Marchiennes (indice 28-1X-2) et à la station de Douai (indice 27-3X-151). A l'W du Douaisis à la station de Bellonne (indice 27-6X-30), les variations piézométriques sont faibles et la décrue de 1970 à 1974, bien qu'existante, affecte beaucoup plus modestement la nappe car la station est en bordure de la vallée de la Sensée qui est en position d'alimentation sur la rive nord vis-à-vis de la nappe de la craie.

3° Echanges de la nappe avec l'extérieur.

Nous envisagerons successivement l'alimentation et les soutirages.

L'alimentation de la nappe de la craie est constituée par : la pluie efficace dans les zones d'affleurement de la craie, le ruissellement des précipitations sur les buttes constituées par des sables et des argiles du Tertiaire, le débit des

sources des sables du Tertiaire, la drainance éventuelle des alluvions qui reposent directement sur la craie, la drainance induite à partir des sables tertiaires, des pertes consécutives au creusement de canaux qui traversent le pays crayeux.

Seule l'alimentation par la pluie efficace peut être calculée avec certitude.

— Calcul de la pluie efficace.

Ce calcul a été effectué selon l'hypothèse de Thornthwaite sur les années 1970 et 1971 et pour 4 stations pluviométriques (Pecquencourt, Douai, Gœulzin et Lécluse). Les calculs aboutissent à une alimentation moyenne allant de 6 l/s/km² au N du Douaisis à 7 l/s/km² au S. Ces chiffres seront pris en compte dans le modèle en considérant que le ruissellement sur les pays crayeux est négligeable.

— Les alimentations difficilement mesurables

Parmi les alimentations difficilement mesurables, le ruissellement sur les buttes méridionales peut être pris en compte dans le secteur S. Les bassins versants sont dissymétriques avec une pente plus douce vers le S. A cause des grandes surfaces mises en jeu, on ne considèrera d'alimentation supplémentaire de la nappe de la craie que dans cette direction (région d'Arleux à Féchain). On peut estimer le ruissellement à environ 70 % de la pluie efficace, ce qui nous amène à une alimentation totale de la craie de 10 l/s/km² dans la partie S.

Le débit, insignifiant, des sources des sables du Tertiaire est très difficile à évaluer et peut être considéré comme négligeable ou entrant au titre des erreurs.

La drainance des alluvions et des sables tertiaires (sous ces dernières) vers la nappe de la craie est également un paramètre important qui varie selon les pompages effectués dans l'aquifère crayeux et qui ne peut qu'être estimé (environ 10 l/s/km²).

Les pertes en eau des canaux peuvent être évaluées par jaugeage dans le cas d'une vitesse de courant suffisamment rapide. Les canaux de la Scarpe et de la Sensée à écoulement très lent ne sont pas jaugés de façon très précise et les erreurs de mesure importantes sont de l'ordre de la perte, vraisemblablement de 3 à 30 l/s/km².

Les prélèvements les plus importants dans la nappe de la craie sont situés essentiellement

le long des vallées de l'Escrebieux et de la Scarpe (1.364 l/s).

2) Calage du modèle.

Le modèle a été réalisé à l'aide de mailles carrées constantes et en régime permanent.

a) Préparation du modèle.

1° Limites du modèle.

Le modèle, qui s'étend sur une superficie de 463 km² (fig. 94), englobe le bassin versant de la Scarpe, de Biache-St-Vaast (SW) à Marchiennes (NE), le plateau crayeux de Beaumont (NW) et le secteur allant au S du Bassin d'Orchies (Lewarde-Auberchicourt) à la vallée de la Sensée (Arleux-Féchain). Les limites E et W seront constituées par les lignes de courant séparant le bassin douaisien respectivement du bassin valenciennois et du bassin lensois.

La limite S est constituée par les niveaux de la rivière de la Sensée afin de simuler, soit un drainage, soit une alimentation de la nappe. La limite N-NE a été établie arbitrairement sous recouvrement tertiaire le plus loin possible des affleurements.

2° Discrétisation.

La discrétisation du domaine à étudier a été réalisée à l'aide de mailles carrées de 1.000 m de côté et un seul panneau de 600 mailles (20 x 30) a été nécessaire.

3° Introduction des données.

La distribution géographique des terrains tertiaires, crayeux et alluvionnaires a été retenue (fig. 94). Dans un premier stade, les seules valeurs de pluie efficace sur les affleurements (6 à 7 l/s/km²) et de prélèvements ont été appliqués.

Ce sont les valeurs d'altitude de la nappe au centre des mailles et relatives au levé piézométrique de l'étiage 1970 qui ont été utilisées. Les valeurs de transmissivité introduites au départ sont issues des essais de pompage. Un lissage et une extension géographique des valeurs ont été réalisés en tenant compte du contexte hydrogéologique.

b) Calage du modèle.

— Du 1^{er} au 10^e passage (1^{re} hypothèse - Transmissivités initiales et alimentation par les précipitations seulement).

L'existence des deux dômes piézométriques du S du Douaisis (Estrées et Bugnicourt) provoque un resserrement important des courbes piézométriques. La modulation progressive des valeurs de la transmissivité dans ces secteurs n'amène aucune amélioration. Un nouvel examen de la piézométrie réelle montre que l'on peut éviter la mise en place de dômes piézométriques.

— Du 11^e au 18^e passage (2^e hypothèse - Transmissivités très fortes à Douai).

L'accroissement progressif des valeurs des transmissivités dans le secteur de Douai, qui est compatible avec de fortes épaisseurs de craie mouillée, n'amène que peu d'amélioration sur les courbes piézométriques du SW. Le gradient y reste toujours très élevé.

— Du 19^e au 21^e passage (3^e hypothèse - Drainance des alluvions et du Tertiaire au N).

On revient à des valeurs de transmissivité moyennes, entre celles utilisées précédemment et celles de départ dans la zone de Douai, et on essaye de voir si l'hypothèse d'une drainance des alluvions et du Tertiaire vers la nappe de la craie peut exister dans le secteur de Pecquencourt - Lallaing - Sin-le-Noble. On applique successivement sur l'ensemble des 45 mailles 225 l/s, 90 l/s puis 20 l/s de débit entrant sans amélioration notable. L'application d'une drainance de 110 l/s (sur 8 mailles) à partir des alluvions de l'Escrebieux améliore par contre la piézométrie.

— Du 22^e au 29^e passage (4^e hypothèse - Drainance des alluvions et pertes des canaux au S).

La mise en place d'une drainance des alluvions de la Scarpe de Biache-St-Vaast à Vitry et des pertes d'eaux par le Canal de la Sensée améliore efficacement la piézométrie.

— Au 30^e passage, la réduction des débits sortants par la diminution des transmissivités sur les limites aboutit à une représentation piézométrique calculée proche de la réalité.

c) Résultats du calage.

1° Répartition des transmissivités de l'aquifère crayeux du modèle calé.

Dans le Douaisis, les zones de transmissivité suivantes (fig. 95) peuvent être individualisées :

— Zone 1 de très bonne transmissivité supérieure ou égale à 5.10^{-2} m²/s qui se ren-

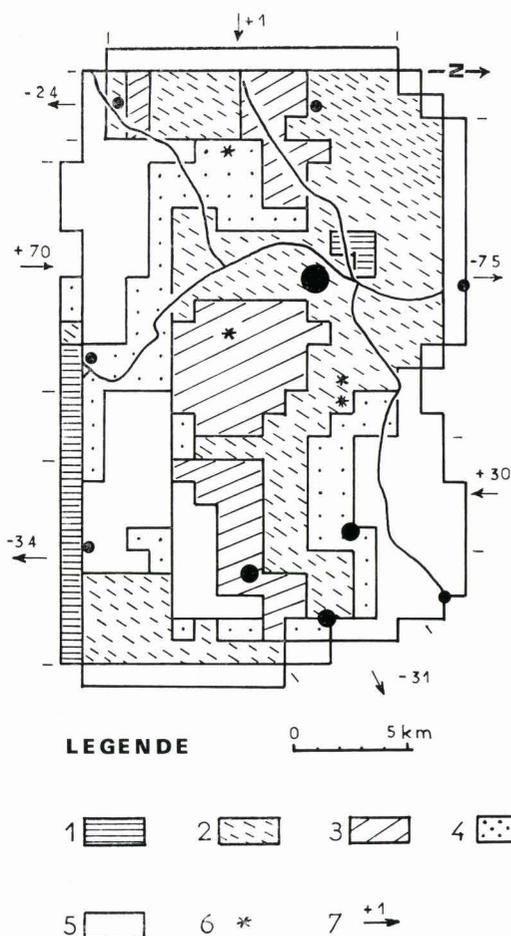


Fig. 95. — Distribution géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle du Douaisis.

Légende : 1, $T \geq 5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. — 2, $5.10^{-2} > T \geq 1,7.10^{-2}$. — 3, $T = 1,5.10^{-2}$. — 4, $7,5.10^{-2} < T \leq 1,25.10^{-2}$. — 5, $T \leq 7,5.10^{-3}$. — 6, sites d'alimentation artificielle pris en compte dans l'exploitation du modèle. — 7, valeurs en l/s des débits sortants (signe \rightarrow) du modèle.

contre essentiellement dans la vallée de la Sensée au S et à la confluence de l'Escrebieux et de la Scarpe à Douai.

— Zone 2 de bonne transmissivité ($1,7$ à $5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) qui forme une bande parallèle à la limite de captivité et englobe le N du plateau de Beaumont ainsi que la zone de jonction de la Scarpe et du canal de la Sensée (zone alluvionnaire).

— Zone 3 de transmissivité moyenne ($1,5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) qui englobe le plateau de Férin, d'Auberchicourt et de la haute vallée de l'Escrebieux.

— Zone 4 de transmissivité faible (entre $7,5.10^{-3}$ et $1,25.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) qui s'étend sur la zone captive au N, sur le plateau entre l'Escrebieux et la Scarpe et en bordure des buttes tertiaires.

— Zone 5 de transmissivité médiocre (inférieure à $7,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) qui affecte la zone captive éloignée (Pecquencourt-Lallaing), les terrains crayeux sous recouvrement tertiaire au S et les limites N, W et E du modèle.

2° Carte piézométrique restituée.

La restitution de la piézométrie calculée (fig. 96) a été obtenue au bout de trente passages avec quelques aménagements. Ainsi a-t-il fallu supprimer les dômes piézométriques de Bugnicourt et de Bellonne, qui ne semblent pas justifiés sur la carte piézométrique levée à l'étiage de 1970.

Le vaste cône de dépression du champ captant de Pecquencourt a par contre été obtenu

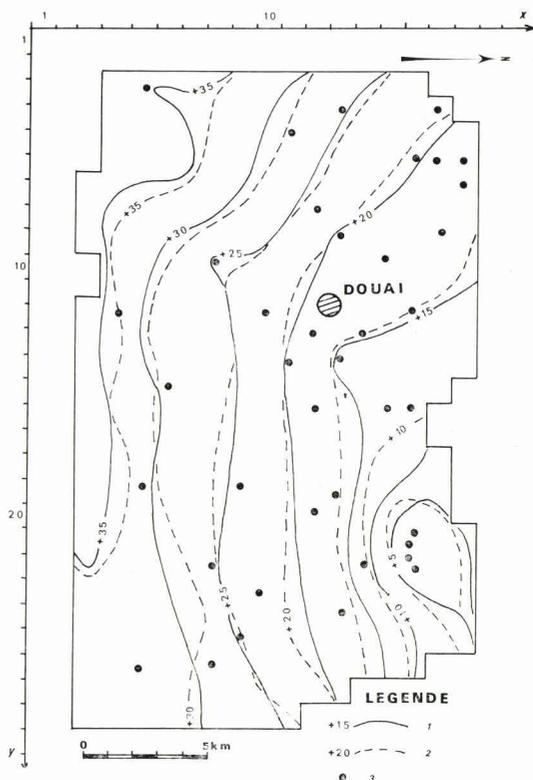


Fig. 96. — Comparaison entre la piézométrie réelle et la piézométrie calculée au 30° passage (modèle du Douaisis calé).

Légende : 1, courbe isopièze calculée. — 2, courbe isopièze réelle. — 3, forage d'exploitation.

très facilement. Dans l'ensemble, la correspondance entre les cartes piézométriques calculées et réelles est correcte.

3° Etablissement du bilan.

Deux parties dans le bilan de la nappe de la craie sont distinguées : celle des débits d'entrée et celle des débits de sortie (tableau XXV) à partir du modèle calé au 30^e passage.

— Débits d'entrée.

Pour le Douaisis, les six alimentations suivantes sont envisagées :

L'alimentation verticale par la pluie efficace représente 67,4 % des débits totaux d'entrée avec des valeurs importantes dans la vallée de la Sensée sur le plateau de Beaumont et sur le plateau de Férin.

La drainance verticale de la nappe des alluvions vers celle de la craie représente 10 % des débits. Elle est concentrée dans la vallée de la Scarpe supérieure (secteur de Biache-St-Vaast à Vitry) et dans celle de l'Escrebieux.

Les pertes des canaux sont dues au creusement et au passage des canaux de la Scarpe supérieure et de la Sensée dans les terrains crayeux provoquant ainsi des débits de fuite de l'ordre de 12,2 %. Ces derniers sont importants dans la région de Biache-St-Vaast. Dans ce secteur, un dôme piézométrique est décelable et vérifie indirectement cette perte.

L'analyse des relevés de jaugeage effectués par le Service Hydrologique Centralisateur a permis de confirmer les pertes importantes des canaux à partir de cinq stations de jaugeage.

DEBITS D'ENTREE				DEBITS DE SORTIE					
Définition des entrées	Quantité en l/s		Pourcentage		Définition des sorties	Quantité en l/s		Pourcentage	
	Partielles	Total	Partiel	Total		Partielles	Total	Partiel	Total
1 : Alimentation verticale par la pluie efficace					1 : Prélèvements				
- Plateau de Beaumont	230		14,43		- Douai Sin-le-Noble				
- Vallée de l'Escrebieux	56		3,51		- Waziers	366		23,0	
- Interfluve Escrebieux	152		9,54		- Pequencourt Lallaing (S.I.D.E.N.)	329		20,8	
- Scarpe supérieure	51		3,20		- Vallée de l'Escrebieux (S.E.N.)	320		20	
- Plateau de Férin	205		12,86		- Corbehem (Béghin)	154		9,7	
- Plateau d'Auberchicourt	98		6,15		- Biache-St-Vaast	69		4,3	
- Vallée de la Sensée (rivière + canal)	290		18,20		- Secteur Auby Moyelles				
		1082		67,89	- Beaumont	126		7,9	
					- Auberchicourt Marquette: vallée de la Sensée				
					- Arleux	48	1412	3,0	88,7
2 : Drainance verticale des alluvions					2 : Echanges aux limites				
- Vallée de l'Escrebieux	62		3,89		a. Les rivières (drainage)				
- Vallée de la Scarpe supérieure	99		6,21		- Sensée inférieure	44		2,8	
		161		10,10	- Sensée supérieure	25		1,5	
					b. Drainage aux limites				
3 : Pertes des canaux					- Limite N	80		5,0	
- Canal de la Sensée	27		1,69		- Limite NE	32		2,0	
- Canal de la Scarpe	170		10,67				181	11,3	
		197		12,36					
4 : Ruissellement sur le tertiaire									
- S du Douaisis	52		3,26						
		52		3,26					
5 : Alimentation naturelle par les rivières									
- La Sensée supérieure	70		4,39						
		70		4,39					
6 : Echanges aux limites du modèle									
- Au NE	30								
- Au NW	1								
		31	1,94	1,94					
TOTAL ENTREES		1593		100	TOTAL SORTIES		1593		100

Tableau XXV. — Etablissement du bilan en régime permanent de la nappe de la craie à partir du modèle calé (Douaisis).

On constate l'existence, de Biache-St-Vaast à Vitry, d'une perte de l'ordre de 140 l/s (basses eaux) à 390 l/s (hautes eaux). Sur le canal de la Sensée, de Gœulzin à Courchelettes, les pertes sont estimées entre 1 m³/s (basses eaux) et 4 m³/s (hautes eaux). Dans ce dernier cas, on ignore cependant les fuites dues à la vétusté de l'Ecluse de Courchelettes (qui a été refaite en 1974). Les chiffres appliqués dans le modèle sont ainsi justifiés.

Le ruissellement sur les terrains tertiaires n'intervient que pour 3,2 % des débits avec une localisation méridionale qui va de pair avec des surfaces de bassins versants importantes.

L'alimentation naturelle par les rivières pour la Sensée supérieure (Arleux) est située en amont des écoulements de la nappe de la craie et apporte en permanence une alimentation naturelle de l'ordre de 70 l/s (4,3 % du bilan des entrées).

Les échanges aux limites du modèle affectent la limite NE (Pecquencourt) et ne sont pas négligeables (18 %). Ils sont dus au fait que le modèle ne génère pas de lignes piézométriques parfaitement perpendiculaires aux lignes de courant. En outre, il n'est pas possible d'afficher des transmissivités nulles en raison de la continuité de l'aquifère vers le bassin d'Orchies.

— Débits de sortie.

Ils ont pour origine les prélèvements et les échanges aux limites du modèle.

Les prélèvements représentent 88,7 % du bilan total, soit 44 millions de mètres cubes par an. Deux champs captants se distinguent par leur importance : celui de Pecquencourt (20,8 %) et celui de la vallée de l'Escrebieux (20 %).

Les échanges aux limites. Les rivières : au S du domaine étudié, la Sensée inférieure (Féchain) et la Scarpe supérieure constituent des limites à potentiel hydraulique à peu près constant. Un drainage de la nappe de la craie existe ainsi dans une partie de la vallée de la Sensée (44 l/s) et dans le secteur de Biache (25 l/s) où se manifeste le dôme piézométrique.

Le drainage aux limites : Un débit de fuite de l'ordre de 80 l/s apparaît en bordure N du modèle. Il représente une partie de l'alimentation du Bassin d'Orchies. Au NE (entre Marchiennes et Somain), le débit de sortie (31 l/s) correspond à la zone de passage du Douaisis au Valenciennois et elle est due à une super-

position imparfaite de la ligne de courant sur la limite du modèle.

d) Conclusions.

Le modèle mathématique du Douaisis a permis de mettre en évidence les relations hydrodynamiques de la nappe de la craie avec les diverses possibilités d'alimentation : pluie, perte, drainage et de chiffrer les divers éléments du bilan.

Quatre hypothèses de travail ont été successivement testées dans les phases de calage du modèle :

- alimentation unique par les précipitations,
- transmissivités fortes dans le secteur de Douai,
- drainage des alluvions de l'Escrebieux et des terrains tertiaires dans le secteur de Pecquencourt-Lallaing,
- *Drainance des alluvions* de l'Escrebieux, de la Sensée et de la Scarpe supérieure et pertes des canaux.

Seule cette dernière hypothèse est satisfaisante, car les valeurs de transmissivité concordent avec celles obtenues sur le terrain.

On peut remarquer, d'autre part, que le champ captant de Pecquencourt n'est pas situé dans la zone la plus perméable.

Quelques remarques importantes peuvent être formulées à la suite du calage du modèle :

- la drainage des alluvions est un phénomène transitoire qui s'intensifie avec l'accroissement du décalage piézométrique entre les nappes des alluvions et celle de la craie ;
- le débit de fuite des canaux peut s'atténuer progressivement par suite du phénomène de colmatage ;
- le coefficient de la perméabilité a été considéré constant sur toute la hauteur de l'aquifère. Une seule donnée ponctuelle (Féchin-Dechy) à l'aide du micromoulinet a montré qu'il n'en était rien. Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, en raison du manque de données de ce type, d'introduire l'hétérogénéité verticale dans un modèle multicouche.

E) MODELE DES BASSINS DE LA DEULE ET DE LA SCARPE.

Les besoins en eau de l'agglomération Lille-Roubaix-Tourcoing sont assurés en partie par les

pompages effectués dans la nappe du calcaire carbonifère et dans la nappe de la craie. Journet et Ramon (228) montrent que la mauvaise qualité physico-chimique des eaux de la craie (pollution urbaine et industrielle) sous Lille et la précarité des ressources a conduit les organismes privés et publics de distribution d'eau vers la recherche de nouveaux sites d'approvisionnement. Parmi les zones productives choisies, on citera la vallée de la Deûle entre Haubourdin et Carvin, la vallée de l'Escrebieux d'Esquerchin à Flers, et la vallée de la Scarpe entre Pecquencourt et Douai. Le bassin tertiaire d'Orchies qui sépare le Douaisis de la région lilloise n'a jamais pu fournir de débits importants malgré l'existence de deux aquifères superposés : crayeux et sableux (du Landénien).

Le nombre limité de zones productives nécessite un aménagement des ressources disponibles.

On envisage ainsi de stocker en période de hautes eaux dans le réservoir crayeux non saturé l'excédent des eaux superficielles transitant dans les canaux.

Afin de mieux définir le schéma hydrodynamique de la nappe de la craie et d'envisager une gestion correcte des eaux souterraines, un modèle d'ensemble appelé « Deûle-Scarpe » sera présenté. Il couvre en partie le Mélantois, le Weppes, l'Ostrevent, le Pévèle et la Gohelle. Ces régions sont traversées par la Marque au N, la Deûle au NW, la Scarpe et la Sensée au Sud.

Ce modèle synthétique utilise les renseignements acquis lors d'études antérieures sur le Bassin d'Orchies (27), sur le bassin de la moyenne Deûle (196) et sur le Douaisis qui vient d'être envisagé.

1) Définition de l'aquifère crayeux.

a) Cadre géologique.

La géologie du secteur (feuilles au 1/50.000^e de Carvin et Douai) est marquée structurellement au Nord par le dôme du Mélantois et au Sud par le plateau de Férin à Cantin (entre la Scarpe et la Sensée). Entre le dôme et le plateau, les couches de terrain sont disposées en un vaste synclinal : celui du Bassin d'Orchies. Dans ce dernier, les terrains tertiaires, très bien représentés, sont à l'origine d'une inversion de relief : le vaste synclinal correspondant au mont de Mons-en-Pévèle. Les terrains crayeux affleurent au N, à l'W et au S du Bassin d'Orchies (fig. 97).

Les coupes géologiques CD et EF (fig. 98) montrent bien cette structure compliquée par quelques failles longitudinales N 110 (de Seclin et d'Oignies) et des failles transversales (Râches, Leforest, Ostricourt, Carvin et Annœullin).

L'étude sur la répartition des faciès et la géométrie des niveaux du Crétacé a montré :

— une grande dépression topographique du toit primaire entre Douai et Auberchicourt due à l'existence d'un paléo-relief très accusé des terrains paléozoïques (226),

— un remplissage de cette dépression par des terrains marneux du Cénomaniens (25 à 50 m d'épaisseur), et du Turonien inférieur (30 à 40 m d'épaisseur),

— le Turonien moyen, constitué de marnes bleues, possède une épaisseur plus constante (environ 30 m) sauf à l'approche du Mélantois (25 m) et du Valenciennois (20 m) ; une sur-épaisseur est décelable à Hénin-Liétard (40 m),

— le Turonien supérieur crayeux diminue d'épaisseur entre la vallée de la Sensée (20 m) et Douai (10 à 15 m), et entre Marchiennes (15 m) et Sainghin-en-Weppes (10 m), il passe à 5 m dans le Mélantois.

On peut signaler une autre dépression très locale du toit du Turonien moyen, entre Annœullin et Sainghin-en-Weppes, centrée sur la vallée de la Deûle.

b) Cadre hydrogéologique.

Le réservoir crayeux est continu sous le bassin d'Orchies. L'alimentation de la nappe de la craie dans les zones d'affleurement par les précipitations et par le réseau hydrographique assurent un renouvellement du stock des eaux souterraines.

1°) Vallée de la Deûle.

Le recouvrement alluvionnaire dans le secteur Wattignies-Noyelles-Emmerin est représenté par des formations argilo-sableuses (3 à 7,50 m d'épaisseur) recouvrant les terrains crayeux (176). Les caractéristiques de l'aquifère y apparaissent bonnes avec un débit spécifique de 1 à $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

Dans le secteur de Seclin - Houplin-Ancoisne, l'épaisseur des alluvions en bordure du canal de Seclin passe de 2 à 11 m d'épaisseur. Les valeurs de transmissivité de l'aquifère crayeux oscillent entre $5 \cdot 10^{-2}$ et 10^{-1} m²/s pour un coefficient d'emménagement de $4 \cdot 10^{-4}$ (nappe captive).

MODELE DEÛLE-SCARPE

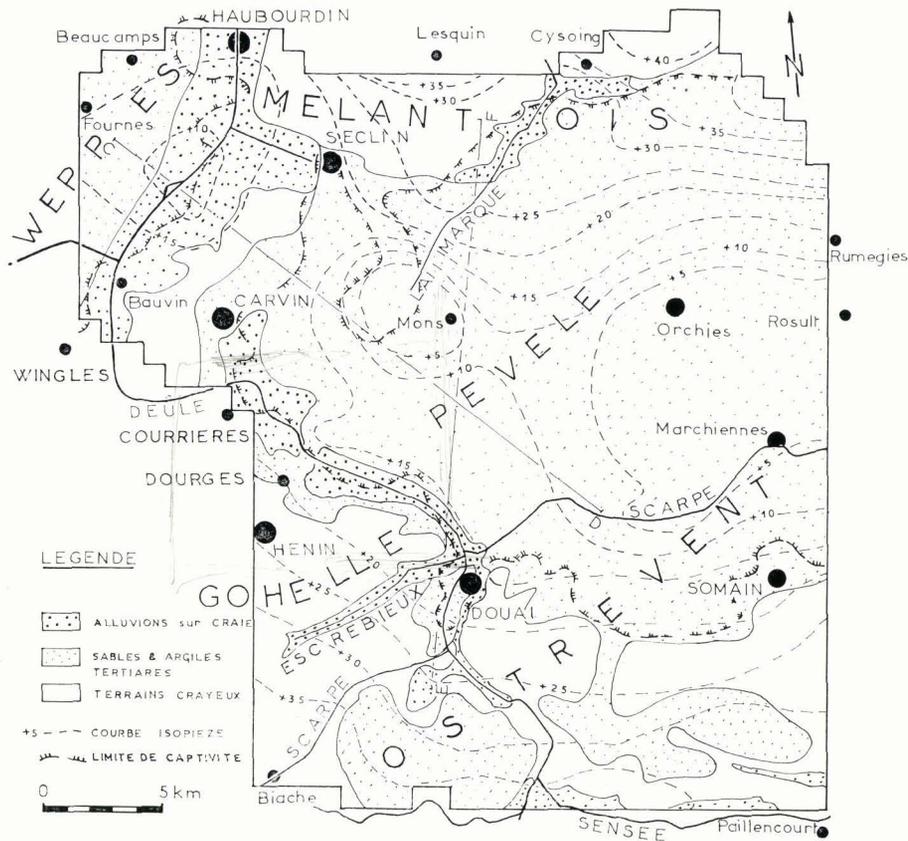


Fig. 97. — Situation géographique du modèle Deûle-Scarpe. Géologie et piézométrie.

Le sous-sol de la vallée de la Deûle au niveau de Wavrin-Annœullin, est constitué d'alluvions argilo-sableuses et tourbeuses épaisses de 10 à 15 m au centre de la vallée.

Vers le NW et vers le SE, les alluvions diminuent d'épaisseur ainsi entre Annœullin et Allennes où elles atteignent 2 à 5 m. Les caractéristiques de l'aquifère crayeux y sont bonnes (transmissivité de l'ordre de 1 à $2.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$).

Dans la région de Bauvin-Courrières-Carvin, la vallée de la Deûle possède une extension moindre à la traversée des affleurements crayeux. Les dépôts alluvionnaires s'étendent en superficie dès que la Deûle coule sur la bordure des terrains tertiaires du Bassin d'Orchies (secteur Carvin-Oignies). Les valeurs de

transmissivité restent bonnes entre 1 et $4.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

Entre Courcelles-les-Lens et Douai, la Deûle passe légèrement au Nord de la limite de recouvrement des terrains crayeux par les argiles de Louvil. Les alluvions (de 8 à 25 m d'épaisseur) reposent sur les terrains crayeux et remanient les sables landéniens.

Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux restent très bonnes (de 1 à $3.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ à Douges, Courcelles, Aubry, Roost-Warendin).

De manière générale, les valeurs de la transmissivité diminuent très rapidement dès que l'on s'enfonce sous le Bassin d'Orchies.

2° Vallée de la Scarpe.

Comme nous l'avons déjà signalé lors de l'établissement du modèle du Douaisis, les caractéristiques de l'aquifère restent médiocres en raison de l'existence d'une forte épaisseur d'argiles de Louvil entre les alluvions et les niveaux crayeux.

Les limites de recouvrement Tertiaire-Crétacé sont situées à 5 km vers le sud.

Les transmissivités ont des valeurs allant de 4 à $9.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ entre Anhiers et Pecquencourt.

3° Vallée de la Marque et Mélandois.

La Marque entaille la partie Sud du Dôme du Mélandois. L'épaisseur réduite de l'aquifère (de l'ordre de 10 m) est associée en général aux mauvaises caractéristiques hydrauliques. Dans le secteur de Fretin, les valeurs de transmissivité atteignent $1,6.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

A la limite du recouvrement tertiaire, les caractéristiques s'améliorent nettement ($4,4.10^{-2}$

m^2/s à Pont-à-Marcq), par contre, la zone d'Avelin située à la limite des bassins de la Deûle et de la Marque ne possède qu'une valeur de transmissivité faible : $3,3.10^{-3}$ à $6,5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

4° Le Bassin d'Orchies.

Cette région représente le bassin tertiaire interfluve Scarpe-Deûle.

La craie sous recouvrement possède des valeurs de transmissivité qui décroissent au fur et à mesure que l'on s'éloigne des affleurements crayeux, ainsi :

— sur la partie nord du Bassin d'Orchies, entre Mérignies ($1,1.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$), Templeuve ($1,6.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) et Genech ($1.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$),

— au centre du bassin de Mons-en-Pévèle ($1,14.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), à Auchy ($5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), Orchies ($4.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) et Beuvry ($4,6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$),

— sur la partie méridionale du bassin de Thumeries ($2.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$), à Leforest ($3,3.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) vers Marchiennes ($2,7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

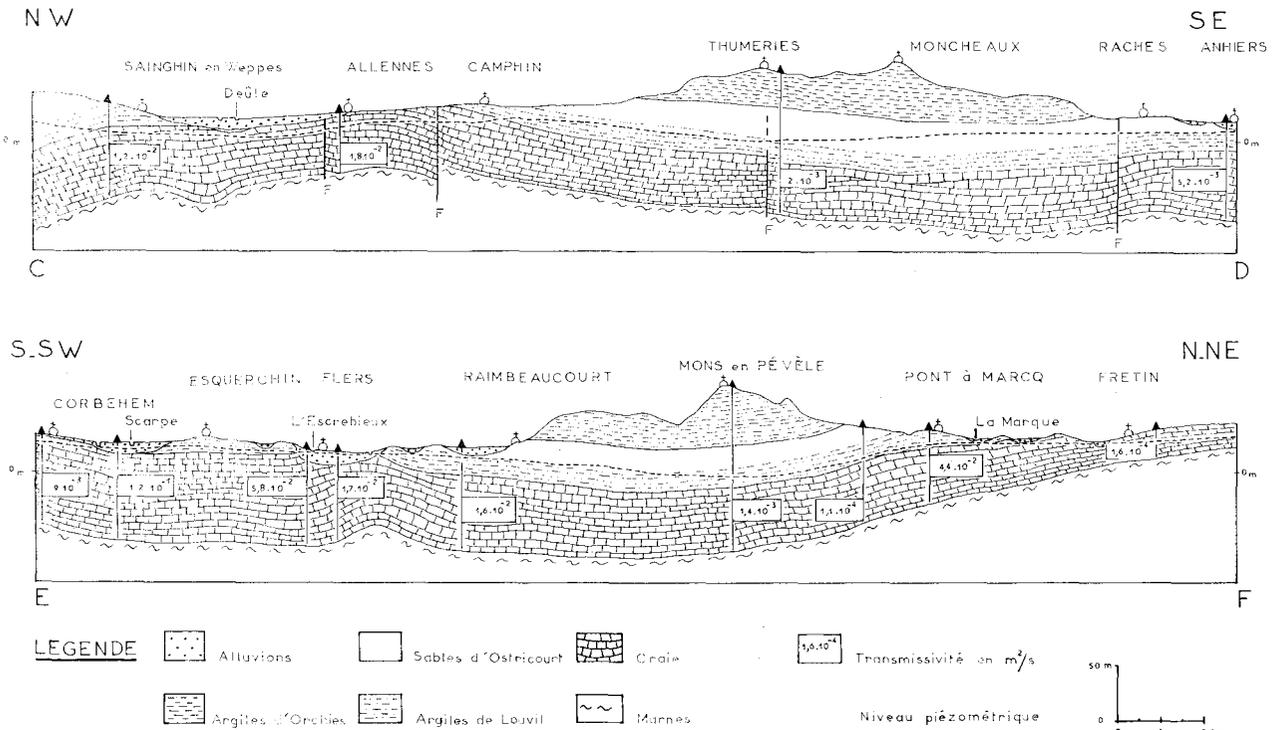


Fig. 98. — Coupe géologique générale de Sainghin-en-Weppes (NW) à Anhiers (SE).
Coupe géologique générale de Corbehem (SSW) à Fretin (NNE).
Evolution des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux (Deûle-Scarpe).

c) Piézométrie.

La carte piézométrique dressée pendant la période d'étiage (fin 1970 à 1971) montre l'existence (fig. 97) :

— de cônes de dépression centrés sur la région d'Annœullin (pompages de la Société des Eaux du Nord), de Mons-en-Pévèle (Brasserie de Mons et Sucrerie Béghin à Thumeries) et de Pecquencourt (Captages SIDEN),

— d'un drainage naturel par les rivières dans la vallée de la Marque entre Cysoing et Fretin et dans la vallée de la Sensée,

— de dômes piézométriques dans le Mélan-tois, d'Haubourdin à Fretin puis à l'E de Cysoing, dans le secteur SW de Carvin sur le cours de la Deûle de Pont-à-Vendin à Oignies, au N de la vallée de la Sensée au niveau de Gouy-sous-Bellonne et de Bugnicourt,

— de forts gradients hydrauliques entre Orchies et Phalempin qui dénotent la mauvaise perméabilité de l'aquifère dans ce secteur.

Les évolutions piézométriques interannuelles de la nappe de la craie ont pu être suivies en régime libre : à Provin (indice 20-1X-126), à Cysoing (20-4X-115), à Hénin-Liétard (20-5X-28) et à Auberchicourt (27-4X-143) et en régime captif : à Bouvignies (21-5X-48), à Marchiennes (28-1X-2), à Bellonne (27-6X-30) et à Douai (27-3X-151) (fig. 34 et 35).

1° Piézométrie en régime libre.

Les graphiques d'évolution piézométrique de Provin, Hénin-Liétard et Auberchicourt indiquent une décrue générale de la nappe de l'été 1970 à l'automne 1974. La station de Cysoing montre l'existence d'un niveau de base constant qui est le signe d'une communication entre l'aquifère crayeux et la nappe alluviale. Le drainage de la nappe de la craie n'est réalisé qu'en période de hautes eaux.

2° Piézométrie en régime captif.

L'évolution piézométrique de la nappe à Bouvignies, Marchiennes, Bellonne et Douai montre une mauvaise réalimentation de la nappe par comparaison avec le régime libre entre 1968 et 1970. La décrue générale consécutive à la baisse du taux de pluie efficace entre 1970 et 1974 est bien visible.

3° Les relations de la nappe avec l'extérieur.

L'examen de la carte piézométrique, des évolutions interannuelles de la nappe et l'allure

des courbes de descente lors des pompages d'essai (Chapitre 4) indiquent :

— une drainance de la nappe alluviale de la Deûle vers l'aquifère crayeux dans les secteurs de Seclin, Annœullin et Carvin,

— une alimentation de la nappe de la craie par la Deûle qui constitue une limite piézométrique entre Courrières et Carvin (courbe + 19 m NGF). Une autre alimentation semble exister dans la haute Marque au niveau de Pont-à-Marcq, alors qu'en aval le drainage de l'aquifère se manifeste bien.

Une relation entre la nappe alluviale et la nappe de la craie est visible dans le cas du site de Cysoing.

En bordure des vallées de la Deûle, de la Marque et de la Scarpe, la nappe des alluvions est contiguë à celle des sables landéniens et des relations hydrodynamiques ne sont pas impossibles.

La nappe des sables possède une charge hydraulique supérieure à celle de la nappe de la craie et peut s'écouler aux abords des vallées.

2) Calage du modèle.

Le calage d'un modèle nécessite plusieurs stades de mise en œuvre : l'élaboration d'un schéma de travail où seront définies les limites, les débits et les transmissivités, le calage propre qui nécessite la vérification d'hypothèses de travail et l'établissement du bilan de la nappe.

a) Elaboration du modèle.

Un maillage carré constant a été utilisé. Chaque maille possède 1 km de côté. Le nombre total de mailles atteint 1.105. Un programme de traitement des écoulements bidimensionnels en régime permanent pour un milieu homogène et isotrope (DRPC 1) a été mis en œuvre.

1° Les limites.

Elles peuvent être constituées par de véritables limites imperméables ou par des lignes de courant que l'on supposera non influencées par les simulations ultérieures. Ces lignes de courant ne sont évidemment traversées par aucun débit et sont donc assimilées à une limite imperméable.

Le drainage de la nappe par une rivière peut être considéré comme une limite à niveau constant, donc susceptible de recevoir ou fournir un débit théoriquement illimité. De même, les lignes

de potentiel qui pourront être considérées comme immuables par la suite, sont assimilables à des limites à niveau constant.

2° Les limites situées sur les lignes de courant.

Elles ont été imposées de la manière suivante :

— à l'W entre Wingles et Fournes, puis entre Biache et Hénin, perpendiculairement aux courbes + 19, + 17,5 et + 15 m NGF ;

— à l'E entre Paillencourt, Somain, Marchiennes et Rumegies, orthogonalement aux courbes + 30, + 20, + 10, + 5, + 10, + 20, + 30 et + 40 m NGF ;

— au N entre Haubourdin, Lesquin, Cysoing, la limite est fixée sur l'axe des dômes piézométriques surimposés au dôme du Mélantois ;

— sur la partie Wingles-Hénin, la courbe piézométrique + 19 m NGF qui semble liée soit au niveau du canal de la Deûle, soit à la nappe alluviale en contact direct avec le canal.

3° Les limites situées sur des rivières.

La limite sud suit le tracé de la rivière Sensée dont les cotes ont été prises en considération.

Au Nord, dans la vallée de la Marque et de son affluent (le Ruisseau de Quennaumont), une altitude a été imposée sur dix mailles qui permettront la simulation d'un drainage ou d'une alimentation de la nappe.

4° Les débits mis en jeu.

Les débits pompés sont connus par les relevés de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (*). Pour représenter la nappe en régime permanent, nous avons utilisé les débits moyens des préleveurs en 1969 et 1970.

Les volumes soutirés à la nappe sont évalués dans le Bassin d'Orchies à 162 l/s, dans la vallée de la Deûle à 1.369 l/s et dans le Douaisis à 1.412 l/s.

Sur l'ensemble du territoire couvert par le modèle Deûle-Scarpe, il a été prélevé un volume d'eau souterraine de $91,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$.

Les débits apportés par les pertes de canaux (canal de la Deûle) et par les nappes des allu-

vions et des sables landéniens ont été modulés au fur et à mesure du calage du modèle.

Il a été possible de mettre en évidence au niveau d'Auby, à partir d'une surveillance piézométrique localisée, une alimentation de la nappe de la craie par le canal (183).

Les débits d'alimentation par la pluie efficace (fig. 99) ont été calculés à partir de l'hypothèse de Thornthwaite en utilisant les données pluviométriques des stations de Pecquencourt, Douai, Gœulzin et Lécluse pour l'Ostrevent et la station de Lesquin pour le Mélantois. Pour cette dernière station, le taux de la pluie efficace a atteint, de janvier à avril 1970, le chiffre de 151 mm, soit encore 5 l/s/km². Nous avons apporté une modification à cette dernière valeur au cours du calage pour le secteur de Lesquin-Cysoing. En effet, l'affleurement des terrains marneux et la topographie en bordure de la vallée de la Marque entraînent un ruissellement plus important et une recharge souterraine plus faible. Cette diminution, chiffrée à 60 %, est basée sur d'autres travaux réalisés sur les bassins versants de l'Artois (87).

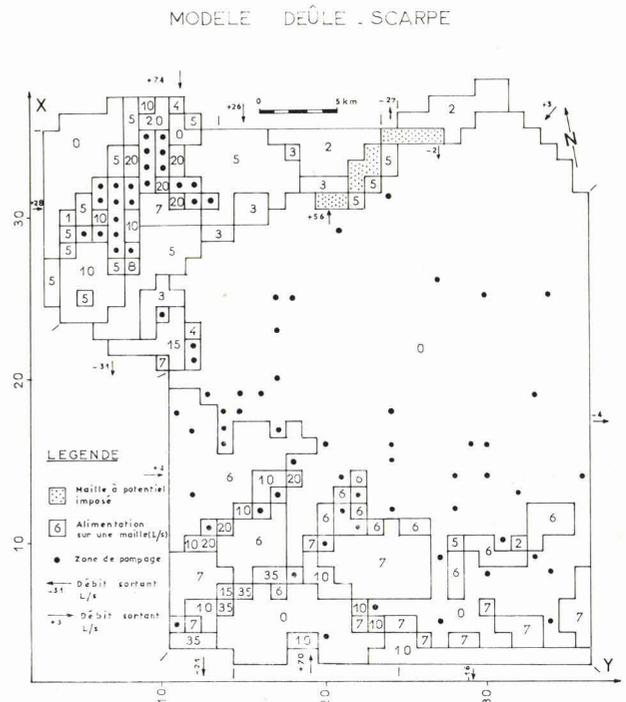


Fig. 99. — Répartition géographique des débits imposés et calculés dans le modèle calé "Deûle-Scarpe".

(*) Agence de l'Eau Artois-Picardie, 764, Boulevard Lahure, 59500 Douai.

b) Le calage.

La juxtaposition et la synthèse de trois modèles (Deûle, Orchies et Douai) se heurte au problème des limites de ces derniers qui introduisent des échanges positifs ou négatifs et entraînent des modifications parfois importantes des valeurs de transmissivité. Le calage du modèle Deûle-Scarpe a nécessité vingt-cinq passages sur ordinateur.

Les problèmes majeurs apparus en cours de calage ont été successivement :

— l'évaluation des pertes du canal de la Deûle et du canal de Seclin,

— l'estimation des débits de drainage de la nappe alluviale de la Deûle et de la Haute-Marque vers la nappe de la craie.

En effet, il s'est avéré impossible de procéder au calage de la piézométrie dans le secteur Carvin, Seclin, Haubourdin. Seuls les apports par drainage de la nappe alluviale et par le canal de Seclin pouvaient permettre un relèvement des niveaux calculés proches de la réalité.

L'existence au Sud de Cysoing dans la haute vallée de la Marque, d'une piézométrie à très faible gradient (entre les courbes + 25 et + 30 m NGF) ne pouvait être simulée qu'en imposant sur quelques mailles (fig. 99) l'altitude de la rivière. Lors du calage, un débit de drainage (ou peut-être une perte) a été introduit.

1° Distribution finale des transmissivités.

La répartition géographique des valeurs de transmissivité (fig. 100) conduit aux remarques suivantes :

— deux zones à très forte transmissivité sont décelées à Douai et au NW de Seclin,

— une grande zone à très faible transmissivité s'étend sous le Bassin d'Orchies et le Dôme du Mélançois,

— une zone à faible transmissivité enveloppe le bassin d'Orchies et affecte l'aquifère sous les buttes tertiaires qui dominent la vallée de la Sensée,

— une très vaste zone à moyenne transmissivité occupe le reste du territoire. On signalera ici une petite zone, sur la partie orientale de la vallée de la Marque qui peut être intéressante sur le plan local.

MODELE DEÛLE - SCARPE

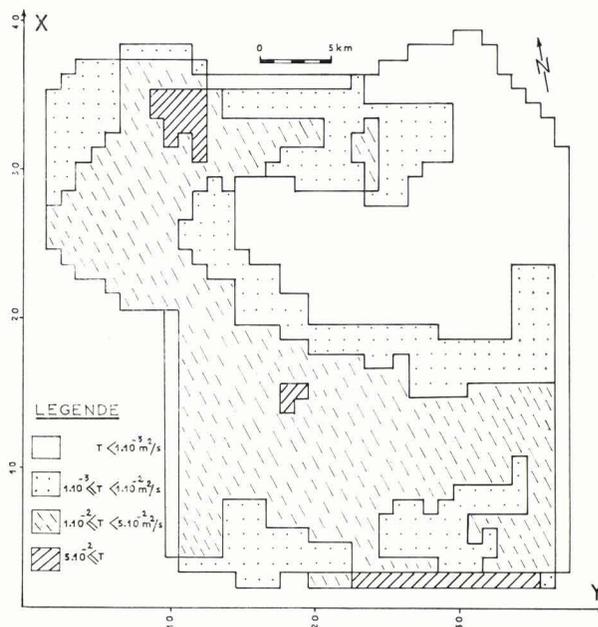


Fig. 100. — Distribution géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle Deûle-Scarpe.

2° Restitution de la piézométrie.

La restitution de la piézométrie calculée est celle du passage n° 25 (fig. 101). Plusieurs difficultés de calage sont apparues au cours du travail :

— restitution laborieuse des courbes piézométriques + 5 et + 10 m NGF entre Mons-en-Pévèle, Orchies et Marchiennes,

— le calage de la courbe piézométrique + 25 entre Cysoing et Mons-en-Pévèle n'a été réalisable qu'après avoir imposé le potentiel sur le cours de la haute Marque,

— les courbes + 15 et + 17 m NGF entre Carvin et Mons-en-Pévèle présentent de légers écarts avec les résultats de terrain.

c) Etablissement du bilan de la nappe.

L'élaboration du bilan hydrologique de la nappe (tabl. XXVI) nous permet d'émettre deux remarques majeures :

— seule la moitié des débits d'entrée est fournie par l'alimentation verticale de la pluie efficace,

DÉBITS D'ENTRÉE					DÉBITS DE SORTIE				
Définition des entrées	Quantité en l/s		Pourcentage		Définition des sorties	Quantité en l/s		Pourcentage	
	Partielle	Total	Partiel	Total		Partielle	Total	Partiel	Total
1) Alimentation verticale par la pluie efficace	:	:	:	:	1) Prélèvements	:	:	:	:
Mélantois et Vallée de la Marque	:	:	:	:	Douaisis	1 412	:	46,3	:
Vallée de la Deûle	244	:	8	:	Vallée de la Deûle	1 369	:	44,9	:
Douaisis	205	:	6,7	:	Bassin d'Orchies	162	:	5,3	:
	1 082	:	35,5	:		2 943	:	96,50	:
		1 531		50,21					
2) Drainance verticale des alluvions et des sables landéniens	:	:	:	:	2) Drainage	:	:	:	:
Vallée de l'Escrebieux	62	:	2	:	De la Sensée	16	:	0,5	:
Vallée de la Scarpe sup.	99	:	3,2	:	De la Marque	27	:	0,9	:
Vallée de la Deûle	700	:	25	:	De la Scarpe	21	:	0,7	:
Vallée de la Haute Marque	56	:	1,8	:		64	:	2,10	:
		917		30					
3) Pertes des canaux	:	:	:	:	3) Echanges aux limites	:	:	:	:
Canal de la Deûle	80	:	2,6	:	Limite au Sud de Carvin	31	:	1	:
Canal de la Sensée	27	:	0,9	:	Limite Est du modèle	4	:	0,1	:
Canal de la Scarpe	170	:	5,5	:		35	:	1,14	:
Canal de Seclin	60	:	2	:					
		337		11					
4) Ruissellement	52	52		1,70					
5) Alimentation naturelle par la Haute Sensée	70	70		2,30					
6) Echanges aux limites du modèle	:	:	:	:					
Secteur Beaucamps-Haubourdin	74	:	2,4	:					
Dôme du Mélantois à l'Ouest de la Marque	26	:	0,8	:					
limite SW du modèle	4	:	0,1	:					
Limite	28	:	0,9	:					
		135		4,42					
TOTAL ENTREES		3 042		100					
						3 042		100	

Tableau XXVI. — Bilan, en régime permanent, de la nappe de la craie dans le modèle Deûle-Scarpe.

— la drainance de la nappe des alluvions de la Deûle est particulièrement importante (23 %).

1° *Alimentation verticale par la pluie efficace.*

Les affleurements crayeux du Douaisis reçoivent plus de 35 % de l'alimentation naturelle de l'ensemble de la région Deûle-Scarpe.

— *Drainance verticale des alluvions et des sables tertiaires.*

Le mécanisme de la drainance de la nappe alluviale de la Deûle vers la nappe de la craie permet d'expliquer les gros volumes d'eau souterraine que l'on peut y prélever. Le phénomène de la drainance est mis en évidence sur les courbes de descente du niveau piézométrique en cours de pompage et répond à l'hypothèse de Boulton.

Les précipitations seules (205 l/s) ne suffiraient pas à compenser les prélèvements qui atteignent 1.369 l/s.

— *Pertes des canaux.*

Une perte au niveau du canal de Seclin qui se termine en cul-de-sac sur le territoire de la commune de même nom a été mise en évidence. A l'origine, ce canal était alimenté par des sources naturelles d'émergence de la nappe de la craie en pression sous le « semi-perméable » alluvionnaire d'épaisseur variable (de 2 à 11 m). Par la suite, en raison de la baisse de la nappe, le mécanisme inverse s'est mis en place avec une réalimentation de la nappe. Cette hypothèse repose sur l'examen de la qualité des eaux souterraines des forages de la ville de Lille à Houplin-Ancoisne et Seclin. Les jauges ne sont guère envisageables en raison des faibles vitesses de courant. En ce qui concerne le canal de la Deûle au niveau de Wavrin (les Ansereuilles), il existe une relation étroite entre ce dernier et la nappe alluviale et la nappe de la craie. Les alluvions étant relativement épaisses (10 à 15 m) au centre de la vallée, il

MODELE DEÛLE - SCARPE

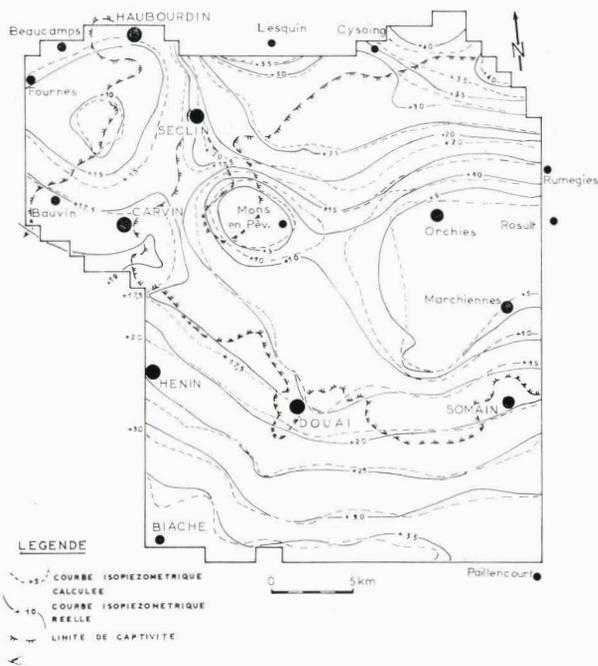


Fig. 101. — Comparaison des piézométrie calculée et réelle (Deûle-Scarpe).

n'y a pas de contact direct entre le fond du canal et l'aquifère crayeux ; cependant, des percolations se manifestent lorsque l'on compare les évolutions chimiques des eaux de la craie et de la Deûle (196).

Dans le secteur de Dourges-Courrières (au S de Carvin), le canal de la Deûle entaille l'aquifère crayeux. L'altitude supérieure du plan d'eau maintenu dans le canal est à l'origine d'une perte estimée dans le modèle à 80 l/s.

2° Le drainage de la nappe par les rivières.

Les débits drainés par les rivières sont insignifiants en raison de l'abaissement général de la nappe de la craie.

Toutes les relations hydrodynamiques initiales ont été perturbées par l'activité humaine.

3) Conclusions générales.

Le modèle Deûle-Scarpe constitue un modèle de synthèse bien cerné sur le plan hydrogéologique. Il a permis d'aboutir à la compréhension des mécanismes hydrodynamiques de la

nappe de la craie avec les nappes superficielles et le réseau hydrographique.

Le déséquilibre des échanges a entraîné un processus d'alimentation, très néfaste pour la qualité des eaux souterraines, dans le bassin de la Deûle.

Les évaluations de la drainage de la nappe des alluvions et des pertes justifient que l'on mette rapidement en place un plan de traitement des eaux de la Deûle qui constituent déjà une part importante de l'eau de consommation.

Au niveau de la région étudiée, le secteur situé entre Haubourdin et Carvin montre une densité élevée de captages. Une meilleure gestion des ressources mériterait d'être tentée (Chapitre 6).

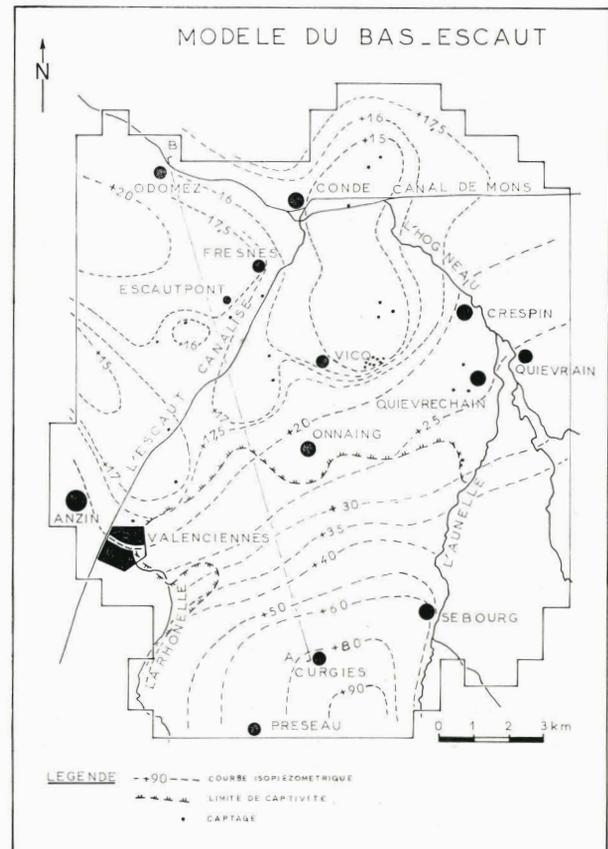


Fig. 102. — Délimitation géographique du modèle Bas-Escaut, piézométrie et implantation des captages.

AB : ligne de coupe géologique.

(d'après Crémille et Jacques Ricour, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 09 NPA).

Le Bassin d'Orchies demeure, sur le plan hydrogéologique, un vaste barrage vis-à-vis des circulations des eaux souterraines. Il possède l'originalité d'être alimenté par trois zones au Sud (Douaisis), au Nord (Mélantois) et à l'W (vallée de la Deûle).

F) MODELE DU BAS-ESCAUT VALENCIENNOIS.

1) Introduction.

La nappe de la craie du Valenciennois a fait l'objet d'études dans le cadre de la mise en valeur des ressources en eau souterraine. Il faut citer les travaux de Dassonville et coll. en 1962 et 1963 (207) (Service Géologique Régional du Nord - Pas-de-Calais), de Lakshmanan en 1963 (83) (Compagnie de Prospection Géophysique Française), de Bonnet en 1966 (105 et 106) (Géohydraulique) ainsi que de Baille et Durousseau en 1969 (188) (Agence de Bassin Artois-Picardie). L'aménagement du canal de l'Escaut dans le but de le porter au grand gabarit et le raccorder au réseau du Bassin de la Deûle a d'autre part suscité de nombreuses études d'ordre hydraulique effectuées par le Service Géologique Régional du Nord - Pas-de-Calais et qui figurent dans les rapports de Bernard et coll. en 1969 (102), de Ramon et coll. en 1970 (236), de Crémille et Jacques Ricour en 1974 (4). Enfin, des travaux ont été entrepris dans le même cadre par le Service des Voies Navigables du Nord - P.-de-C., la S.O.G.R.E.A.H. avec le rapport de Carry en 1961 (197), le B.U.R.G.E.A.P. avec le rapport de Bize en 1968 (190) et par la S.I.M.E.C.S.O.L.

Tous ces travaux sont à l'origine de nombreuses données surtout concentrées le long de la vallée de l'Escaut. Il faut également rappeler les nombreux sondages effectués par les Houillères du Bassin Nord - Pas-de-Calais et les Sociétés de sondage, qui nous renseignent sur la géologie du sous-sol.

Sur le plan des ressources en eau, les prélèvements effectués à Vicq, Fresnes, Escautpont et Quiévrechain sont à l'origine d'une dépression croissante de la nappe de la craie.

Il apparaissait nécessaire de définir rapidement les origines des alimentations de la nappe et d'établir l'équilibre des bilans de la nappe. La réalisation d'un modèle mathématique

en régime permanent a donc été effectuée (*). Après un rappel des caractères principaux de la géologie locale et de l'hydrogéologie, nous aborderons la phase de modélisation.

2) Caractères principaux de la géologie et de l'hydrogéologie du Valenciennois.

Les limites géographiques de la zone d'étude envisagée (fig. 102) s'étendent de la partie N du canal de Mons et de l'Escaut (secteur d'Odomez et Condé) jusqu'au Sud de la région interfluviale Rhonelle-Aunelle (secteur de Curgies). D'W en E, les limites partent de la frontière des bassins Scarpe-Escaut jusqu'au ruisseau de l'Hogneau qui coule en territoire belge.

a) Cadre géologique.

Dans la moitié N du modèle, la majeure partie du Bas-Escaut est constituée en surface d'alluvions qui masquent les terrains crayeux et une partie des niveaux argileux et sableux du Tertiaire. Dans la partie Sud, les vallées de l'Aunelle et de la Rhonelle entaillent les assises tertiaires et crétacées. Il faut souligner la faible superficie des terrains crayeux à l'affleurement. Les principaux traits géologiques sont les suivants :

— une forte variation des épaisseurs (de 10 à 80 m) de l'aquifère crayeux d'âge Sénonien-Turonien supérieur (fig. 103) dont le substratum théorique est constitué par les marnes du Turonien moyen inférieur et du Cénomaniens ;

— la craie du Sénonien s'amenuise en épaisseur jusqu'à disparaître dans le secteur de Vieux-Condé-Odomez où les terrains tertiaires reposent directement sur le Turonien moyen et inférieur ;

— le toit du substratum marneux présente un relief en "tôle ondulée" qui reflète les "paléocreux" des terrains paléozoïques (carte géologique au 1/50.000^e St-Amand, Crespin, Mons) ;

— la vallée de l'Escaut possède un remplissage alluvionnaire important atteignant parfois vingt mètres d'épaisseur (236) qui peut reposer directement sur la craie ou sur quelques lambeaux d'argiles tertiaires ;

(*) Travaux financés par le Ministère du Développement industriel et scientifique et par le Service des Voies Navigables.

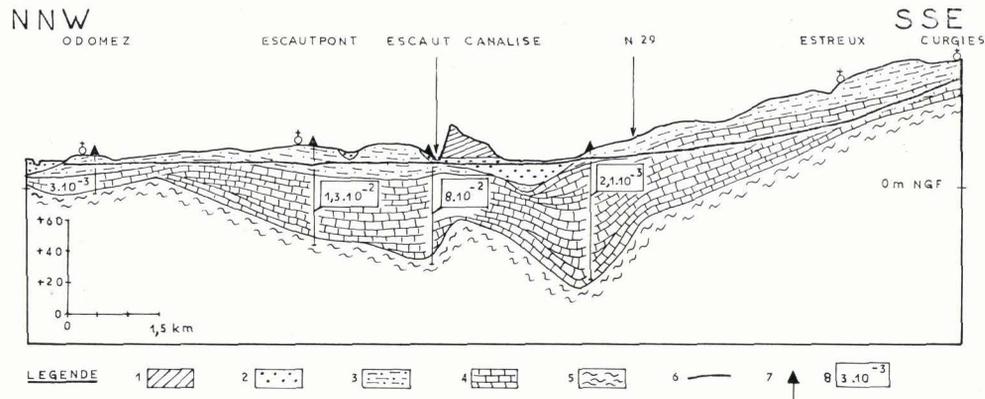


Fig. 103. — Coupe géologique et hydrogéologique synthétique réalisée entre Curgies (SSE) et Odomez (NNW) à travers le bassin du Bas-Escaut dans la région de Valenciennes (voir trait de coupe sur la fig. 102).

Légende : 1, dépôts artificiels. — 2, alluvions de l'Escaut. — 3, sables et argiles du Tertiaire. — 4, craie du Sénonien et du Turonien supérieur. — 5, marnes du Turonien moyen et inférieur et du Cénomaniens. — 6, niveau piézométrique de la nappe de la craie à l'étiage de 1969. — 7, forage en projection. — 8, valeur de la transmissivité en m^2/s au niveau du forage.

— les alluvions de l'Escaut sont constituées, du haut vers le bas, de silts jaunes, de sables fins, de tourbe et de graviers constitués de fragments de silex brisés ou roulés.

b) Cadre hydrogéologique.

Trois aquifères de faible profondeur peuvent être distingués dans le Valenciennois :

— l'aquifère des sables landéniens (Sables d'Ostricourt) repose sur un substratum plus argileux (Argiles de Louvil) et possède des caractéristiques hydrodynamiques médiocres : perméabilité de l'ordre de $10^{-6} m/s$;

— l'aquifère crayeux qui est souvent limité à son toit soit par les argiles de Louvil, soit par les alluvions de l'Escaut. Sa grande extension géographique et les facilités techniques de captage en font l'aquifère principal du Valenciennois. Il est parfois en relation hydraulique avec la nappe alluviale et la nappe des sables landéniens. Le passage vertical ou latéral (en bordure de vallée) des sables et graviers alluvionnaires aux sables landéniens conduit à un système aquifère multicouche qui possède une piézométrie globale unique.

Ainsi nous envisagerons d'examiner, par souci de simplification, deux nappes seulement : celle de la craie et celle des terrains dits "superficiels".

1° Nappe superficielle.

L'établissement d'une carte piézométrique en 1968 a permis de montrer qu'il existait des dômes piézométriques vers Crespin, au Nord de Condé et entre Odomez et Escautpont et des cuvettes dépressionnaires au droit des sites de pompage à la craie au niveau de Vicq, de Fresnes et de part et d'autre du Canal de Mons. Nous avons ainsi la preuve de l'existence d'une relation hydrodynamique par drainance de la nappe superficielle vers la nappe de la craie. Les fluctuations piézométriques des deux nappes apparaissent synchrones. Il faut noter d'autre part que le canal de l'Escaut draine la nappe à l'aval de Condé et l'alimente en amont.

2° La nappe de la craie.

La carte piézométrique dressée à l'étiage de 1969 a permis de mettre en évidence les points suivants (fig. 102) :

— un vaste dôme piézométrique s'étend au Sud dans la région de Préseau, Curgies, Sebourg,

— une grande dépression englobe le secteur de Vicq jusqu'au-delà du canal de Mons (pompages de la fosse Ledoux),

— les niveaux de la nappe et de l'Escaut canalisé sont pratiquement identiques de Condé à Valenciennes alors qu'à l'aval de cette ville, le canal joue le rôle de drain.

3° Fluctuations piézométriques des nappes.

Les surveillances piézométriques des nappes sont réalisées par le Service Géologique Régional. Parmi les relevés annuels continus, on signalera le poste de contrôle de Fresnes-sur-Escaut (indice 22-5X-175) qui, implanté dans la nappe de la craie (en régime captif), montre des fluctuations saisonnières nettes avec un étiage en automne (fig. 36). Les battements de la nappe oscillent entre deux et trois mètres.

La faible profondeur des niveaux (entre 0,5 et 3 m du sol) s'explique par l'existence d'une nappe superficielle qui se déverse dans l'aquifère crayeux.

Cette dernière affirmation est mise en évidence par les graphiques d'évolution piézométrique synchrone de la nappe de la craie et de la nappe superficielle à Fresnes pour l'année 1969 (fig. 104) et la forme des courbes de descente lors des pompages d'essai (Chapitre 4).

4° Prélèvements.

Les prélèvements d'eau souterraine les plus importants sont réalisés par la Société "Eau et Force". Les volumes soutirés sont actuellement de quatre millions de mètres cubes par an (en 1974-1975), soit plus du double des débits prélevés en 1945 ($1,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). On peut noter également, parmi les gros préleveurs, les "Ateliers du Nord de la France", la verrerie et les aciéries de Blanc-Misseron et la fosse Ledoux.

5° Caractéristiques hydrauliques des aquifères.

Elles ont été obtenues à la suite des pompages d'essai réalisés dans le cadre de l'aménagement du canal de l'Escaut et de la mise en valeur des ressources aquifères. Nous distinguerons les formations superficielles et les terrains crayeux.

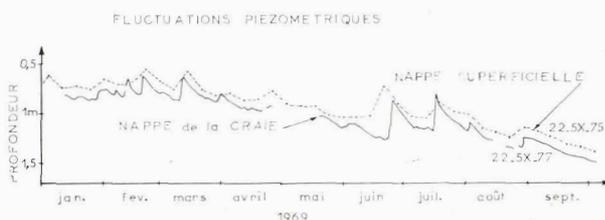


Fig. 104. — Fluctuations piézométriques comparées entre la nappe superficielle des alluvions et de la nappe de la craie à Fresnes/Escaut (d'après les archives du B.R.G.M., NPA).

— Les formations superficielles constituées par :

- des sables fins argileux du Tertiaire, ou des alluvions, possédant des perméabilités très faibles (10^{-6} m/s) mais un emmagasinement non négligeable de 5 à 10 % (8 % à Thivencelles),
- des sables et graviers à la base des alluvions de l'Escaut présentant au contraire des perméabilités très fortes (10^{-3} m/s).

— Les terrains crayeux testés présentent :

- de bonnes perméabilités (10^{-2} à 10^{-3} m/s) à Valenciennes et à Bruay-sur-Escaut le long de la vallée de l'Escaut,
- des perméabilités moyennes (10^{-3} à 10^{-4} m/s) à Fresnes, Raismes, Odomez, Onnaing, Saint-Saulve et Anzin,
- des perméabilités faibles (10^{-4} à 10^{-5} m/s) à Vicq, Condé, Quiévrechain et Saultain.

3) Réalisation du modèle.

a) Préparation.

Le modèle mathématique qui a été choisi permet de résoudre les problèmes relatifs à des écoulements bidimensionnels en régime permanent.

1° Limites du modèle.

La région étudiée couvre environ 300 km^2 entre Valenciennes, Condé-sur-Escaut, Quiévrechain et Curgies. Les limites ont été choisies de manière à les faire coïncider, dans la mesure du possible, avec les limites naturelles du milieu hydrogéologique (fig. 102).

Seule, la limite avec la Belgique se révèle assez imprécise.

Parmi les limites, se trouvent des rivières dont l'examen sera détaillé. Le modèle comporte 520 mailles carrées de 750 m de côté ($0,562 \text{ km}^2$).

2° Données climatologiques et hydrologiques

Trois stations pluviométriques : Curgies au S, Valenciennes (partie moyenne) et Vicq au N, nous ont donné des valeurs de pluviosité. De manière générale, la pluviométrie augmente du NW au SE, alors que l'altitude passe de 30 m NGF à 100 m NGF. La moyenne pluviométrique sur 9 années (1962-1970) est de 710 mm pour la station de Vicq et 759 mm pour celle de Curgies.

Il ressort des travaux de Crémille et Jacques Ricour en 1974 (4, p. 11 à 17) :

« — Infiltration (nappe libre) calculée par la méthode de Thornthwaite.

La pluie efficace qui s'infiltré réellement sur la partie libre de la nappe a été estimée à 128 mm par an, soit 4 l/s/km². Le débit par infiltration affecté à chaque maille de la partie libre de la nappe de la craie, égal à 2,25 l/s par maille, a été porté à 2,5 l/s par maille compte tenu de l'observation ci-dessus.

L'alimentation globale par infiltration équivaut ainsi à un débit de 310 l/s pour une surface libre de 75 km².

— Drainance (nappe captive).

L'alimentation verticale de la nappe se fait par un mécanisme de drainance dans la partie captive de la nappe. La valeur des débits de percolation est alors directement fonction de la pression de la nappe et il est nécessaire de choisir un modèle mathématique multicouche. Compte tenu du manque de données sur le réservoir superficiel (surface piézométrique et transmissivité verticale), on peut, dans la phase de calage d'un modèle permanent, traiter l'alimentation par drainance comme une grandeur dont on recherche directement la valeur par une suite d'approches successives. Lorsque de nouvelles conditions d'écoulement de la nappe se présenteront, il faudra effectuer la simulation du nouvel état piézométrique et voir si les variations dans l'alimentation par drainance sont telles qu'il faut envisager la simulation du réservoir superficiel pour mieux représenter le système réel.

Un calcul approché (236) permet de cerner le volume mis en jeu dans la drainance. A l'E de Condé, un réseau de drainage qui conduit à l'étang de la Fosse Saint-Pierre, couvre un bassin versant de 20 km². Le plan d'eau de l'étang est maintenu constant par un pompage dont les débits sont connus. En utilisant les valeurs de pluviosité de la station de Vicq, on peut calculer l'évapotranspiration potentielle (selon Turc, annuel ici).

On posera l'égalité suivante :

Pluviométrie — (pompage + évapotranspiration) = infiltration verticale.

Ainsi, pour la période 1965-1968, la moyenne de pluviométrie fut de 800 mm, celle de l'évapotranspiration de 490 mm et les pompages de 210 mm. Ces chiffres permettent de calculer une infiltration de 100 mm qui se traduit par un module de 3 l/s/km² ou encore 1,5 l/s par maille. Une modulation de valeur 0 ou 1 l/s a été effectuée au cours du calage du modèle ».

3° Débits prélevés à la nappe.

« Les prélèvements dans la nappe de la craie s'effectuent :

— par les forages des Sociétés de distribution d'eau et des industriels,

— par les stations de relevage des H.B.N.P.C.

Si les prélèvements s'effectuent directement dans la nappe pour les forages, ils se font par l'intermédiaire du dénuyage de zones marécageuses pour les stations de relevage. Dans ce dernier cas, les prélèvements représentent non seulement la perte d'alimentation par drainance mais aussi un apport direct de la nappe par induction d'un écoulement vertical ascendant.

Cet apport peut être calculé théoriquement, à l'aide des hypothèses de Boulton et Hantush en faisant intervenir l'épaisseur et la perméabilité du semi-perméable ainsi que les coefficients d'emmagasinement respectifs des deux aquifères superposés. En fait, les chiffres obtenus sont calculés approximativement en raison de la mauvaise connaissance des paramètres hydrodynamiques en notre possession et ajustés lors du calage du modèle ».

4° Relations nappe-rivières.

« Les seules rivières se trouvant en communication avec la nappe de la craie sont l'Aunelle et la Rhonelle (fig. 102) :

— L'Aunelle, à l'E, draine la nappe dans la région de Sebourg, puis se trouve pratiquement isolée de la nappe en amont de Quiévrechain par la présence d'un recouvrement tertiaire. Entre ces deux communes, des jaugeages ont relevé la présence d'une perte d'eau vers la nappe, confirmé par le modèle.

— La Rhonelle, au SW, est en position de drainage par rapport à la nappe de la craie de façon nette en amont. En aval, la Rhonelle est en position d'alimentation par rapport à la nappe. Le calage du modèle fait apparaître un apport de cette rivière dans cette partie.

Notons qu'une absence quasi totale de points d'observation de la nappe dans la ville de Valenciennes est très préjudiciable à la connaissance des écoulements dans cette zone.

La carte piézométrique n'indique aucune autre relation entre le reste du réseau hydrographique et les eaux souterraines, notamment entre l'Escaut et la nappe de la craie ».

b) Calage du modèle.

« Compte tenu de conditions imposées aux limites et des échanges verticaux affichés sur chaque maille, on recherche par une suite d'approximations successives dans la fourchette des possibilités une répartition des transmissivités qui fournit une surface piézométrique calculée conforme à la surface piézométrique interprétée d'après les mesures de terrain.

D'après ce qui a été dit au paragraphe 3 a 2, non seulement, la transmissivité mais aussi l'alimentation verticale et le débit de relevage des stations H.B.N.P.C. ont fait l'objet d'une recherche par tâtonnements.

La distribution des hauteurs piézométriques calculées est unique pour la répartition des transmissivités choisies, si le schéma hydrogéologique correspondant est correct et conforme à la réalité. Le calage a pu être réalisé en trente-deux passages successifs. La fig. 105 représente la dernière simulation (n° 32) pour laquelle la coïncidence des courbes a été jugée satisfaisante, compte tenu des données disponibles et de leur précision ».

c) Résultats.

1° Comparaison entre les cartes piézométriques calculées et "réelles".

« Dans l'ensemble, les isopièzes calculées épousent la forme des isopièzes « réelles » d'autant mieux que l'identité entre les deux séries d'isopièzes s'est améliorée en réinterprétant les courbes de référence de la carte piézométrique. Il a, en effet, été possible de retoucher ces courbes sans être en contradiction avec les valeurs ponctuelles mesurées. Cette réaction du modèle sur le schéma de référence

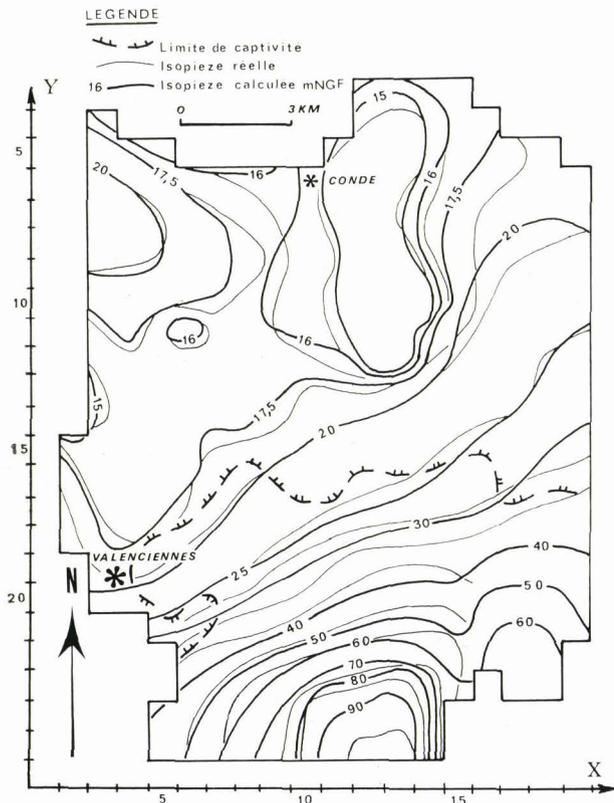


Fig. 105. — Isopièzes calculées. Simulation n° 32 (modèle du Bas-Escaut) (d'après Crémille et Jacques Ricour, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 09 NPA).

mérite d'être soulignée. La simulation par modèle mathématique permet ainsi d'éliminer la subjectivité inhérente au traitement "manuel" des données ».

2° Valeur et répartition des transmissivités.

« Le modèle "calé" permet de mettre en évidence de grandes zones de transmissivité (fig. 106) :

— au S de la région étudiée, l'aquifère en régime libre possède une transmissivité faible comprise entre 2.10^{-4} et $2.10^{-3} m^2/s$, qui est mise en évidence par le fort gradient hydraulique de la nappe ;

— au droit de la limite de captivité (suivant l'axe Valenciennes Quiévrechain) se situe un aquifère à bonne transmissivité ($1.3.10^{-2} m^2/s$) pouvant atteindre localement 2 à $3.10^{-2} m^2/s$ (Valenciennes, W de Vicq, N de Quiévrechain). Ces indications peuvent guider l'implantation de nouveaux captages en vue de l'exploitation rationnelle de la nappe ;

— au N de la limite de captivité, nous pouvons distinguer :

- au NE, vers la frontière franco-belge, une zone de transmissivité moyenne ($5.10^{-3} m^2/s$). Ces valeurs doivent être prises avec précautions du fait du manque de renseignements de terrain dans cette zone. Le

modèle demandera à être précisé parallèlement à l'acquisition de nouvelles données (notamment par des mesures de la transmissivité *in situ* et par le raccordement des cartes piézométriques française et belge),

- la dépression due aux pompages de Vicq et à la station de relevage de la Fosse Ledoux qui est affectée d'une transmissivité médiocre (1 à $5.10^{-3} m^2/s$),
- la partie Est du bassin d'Orchies sur laquelle nous n'avons que peu de données de terrain. Le modèle nous indique un secteur à faible transmissivité (5 à $10.10^{-4} m^2/s$), alors que plus au S un cône de dépression délimité par l'isopièze $+15,00 m$ se place au droit d'une région à meilleure transmissivité ($5.10^{-3} m^2$ par seconde) ».

3° Etablissement du bilan.

Les résultats du bilan obtenus au dernier stade de calage du modèle sont relatifs aux hypothèses introduites au niveau des valeurs de transmissivité mais aussi des débits d'infil-

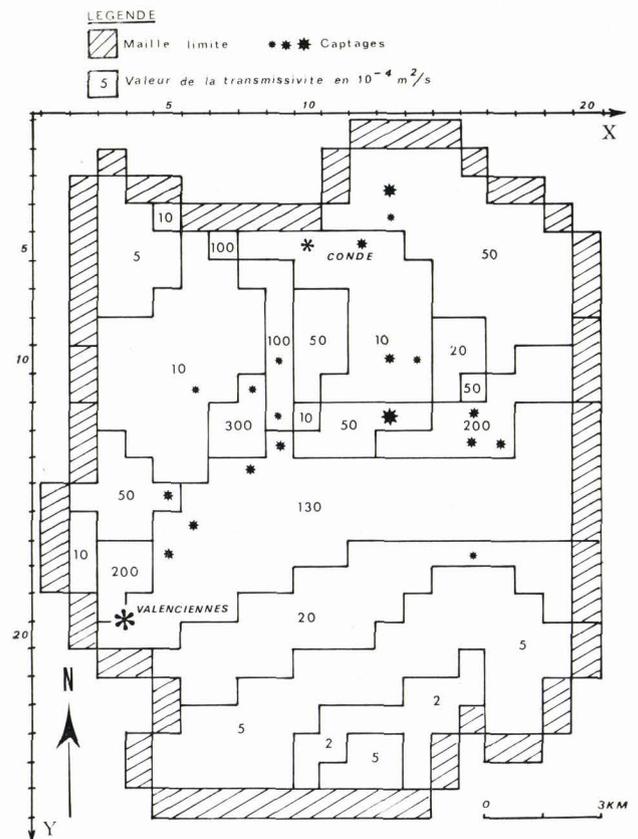


Fig. 106. — Répartition des transmissivités après calage du modèle du Bas-Escaut (fin de calage - simulation n° 32). (d'après Crémille et Jacques Ricour, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 09 NPA).

tration naturelle par drainance et pluie efficace. La fermeture du bassin est loin d'être strictement étanche et des relations entre les parties belges à l'E et du bassin d'Orchies à l'W se traduisent par des transferts de débit dont les chiffres sont assujettis à des approximations de calcul. C'est l'hydrogéologue qui fixe, d'après les données de terrain, ces valeurs qui seront respectées au cours de la modélisation.

L'analyse (tabl. XXVII) des divers éléments du bilan hydrogéologique conduit aux observations suivantes :

— l'alimentation par la pluie efficace des affleurements crayeux ne représente que 38 % des apports, alors que les captages à la craie prélèvent 52 % des volumes disponibles ;

— la drainance (19 %) pallie l'insuffisance des apports par la pluie ;

— les débits prélevés par les stations de relevage des H.B.N.P.C. sont importants (25 %) et posent le problème de leur maintenance au niveau actuel en raison de la baisse des niveaux de la nappe de la craie ;

— les apports latéraux (23 %) en provenance de la Belgique constituent une inconnue qu'il est nécessaire de lever au plus vite en

réalisant un modèle franco-belge sur l'ensemble de l'aquifère (en projet pour 1976-1977) ;

— le modèle confirme les pertes observées lors de l'exécution de profils de jaugeage sur l'Aunelle. Des mesures de terrain devront être maintenant effectuées sur la Rhonelle, en amont de Valenciennes, pour étayer l'hypothèse introduite dans le modèle. Les pertes de l'Aunelle (53 l/s) soutiennent le niveau de la nappe entre Quiévreachain et Onnaing, grâce à l'existence d'une zone de bonne transmissivité qui transmet rapidement les répercussions de ce débit entrant dans un secteur où les prélèvements sont élevés.

4) Conclusions.

La réalisation du modèle mathématique en régime permanent de la nappe de la craie du Bas-Escaut a permis de synthétiser la distribution géographique des valeurs de transmissivité et de mieux comprendre le processus d'alimentation de la nappe de la craie, en majeure partie recouverte par des alluvions ou des terrains tertiaires.

Le modèle restitue logiquement la distribution spatiale des valeurs de transmissivité dont les meilleures s'orientent parallèlement au cours de l'Escaut (Valenciennes, Fresnes, Odomez) et

DEBITS D'ENTREE		DEBITS DE SORTIE	
	en l/s	en %	
- Alimentation par la pluie efficace			- Prélèvements par captage
Secteur Valenciennes Curgies Sebourg	301	38	420
			201
- Alimentation naturelle			- Prélèvements par relevage
. par drainance de la nappe superficielle	156	19	
. par perte de rivière			- Sorties latérales
la Rhonelle	40	14	- Limite NE
l' Aunelle	53	7	- Limite E
			- Limite W
- Apports latéraux français	73	9	- Limite N
- Apports latéraux belges	187	23	- Drainage par l' Aunelle
			28
			- Drainage par la Rhonelle
			21
T O T A L	810	100	T O T A L
			807
			100

Tableau XXVII — Etablissement du bilan hydrologique de la nappe de la craie issu du modèle calé (Bas-Escaut) (d'après Crémille et Jacques Ricour, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 09 NPA).

de la limite de captivité de la nappe (ligne Valenciennes, Onnaing, Quiévrechain qui correspond à une zone de forte épaisseur de craie mouillée).

De faibles transmissivités affectent la région des plateaux du Sud (Curgies), le secteur de Vicq où sont implantés de nombreux captages d'eau et les terrains crayeux sous fort recouvrement tertiaire à l'Ouest d'Odomez en bordure du bassin d'Orchies.

L'établissement du bilan hydrologique a montré que l'apport par la pluie efficace seule n'est pas suffisant pour pallier les prélèvements et qu'un mode d'alimentation de la nappe de la craie par la drainance des terrains superficiels était réalisé. Cela pose le problème de l'activité des stations de relevage des H.B.N.P.C. qui drainent une zone marécageuse où se manifestent des affaissements miniers. En effet, les volumes croissants prélevés dans la nappe de la craie pour les besoins collectifs et industriels seront bientôt suffisants pour créer un drainage par égouttement vertical. Il suffit donc d'implanter les futurs captages à l'emplacement des stations de relevage qui seront stoppées progressivement. Cependant, comme cette solution ne correspond pas à l'analyse hydrogéologique, nous testerons, dans le cadre de la gestion, des solutions qui verront l'implantation de captages dans les zones de bonne transmissivité.

IV. — MODELE ANALOGIQUE DE LA NAPPE DES SABLES LANDÉNIENS EN FLANDRES FRANCO-BELGES

La simulation du bilan de la nappe des sables landéniens à l'aide d'un modèle analogique électrique a été réalisée en raison du caractère particulier de la lithologie des sables : homogénéité latérale de la granulométrie des sables et épaisseur constante. En 1971 et 1972, nous avons constaté (229, 230) que le bilan hydrogéologique, très largement excédentaire en raison des faibles prélèvements effectués, n'expliquait pas l'abaissement régulier du niveau de la nappe. L'étude analogique devrait confirmer le bilan établi.

1) Contexte géologique.

L'aquifère est constitué des niveaux sableux regroupés sous le terme de Sables d'Ostricourt

qui sont subdivisés dans le Nord de la France en :

- 1) Sables du Quesnoy : sables blancs d'origine continentale ou fluviale à extension latérale irrégulière ;
- 2) Sables de Grandglise : sables verts glauconieux d'origine marine.

A la base, et l'isolant de la craie sénonienne, on remarque un ensemble argileux : Argile de Louvil à intercalations de grès à ciment d'opale : le Tuffeau de Valenciennes ou de St-Omer.

Au sommet des sables apparaissent les Argiles yprésiennes très épaisses.

Les Sables landéniens affleurent de façon continue autour du bassin d'Orchies et dans une ceinture St-Omer, Aire, Béthune, Lille, où ils disparaissent rapidement vers le N sous l'Argile yprésienne (fig. 107).

Le régime captif de la nappe des sables sous les Argiles yprésiennes est très important dans les Flandres avec une bande d'alimentation réduite.

a) Le Landénien à l'affleurement.

Le Landénien affleure en une ceinture étroite de 2 à 8 km d'extension allant de Lille par Béthune et St-Omer, jusqu'aux environs de Guînes où il disparaît sous le Quaternaire. Au niveau de Calais, le Landénien passe sous le détroit du Pas-de-Calais pour réapparaître en Angleterre.

La ceinture landénienne est guidée par deux unités structurales liées génétiquement à l'histoire tectonique du Primaire et du Secondaire. De ce fait, des accidents importants affectent le Tertiaire. On distingue :

— à l'E, dans la région lilloise, le dôme du Mélantois, qui imprime au Tertiaire des directions EW ;

— à l'W, de Béthune à Calais, l'axe anticlinal de l'Artois donne au Tertiaire des directions SE-NW. Des failles débitent en gradins toutes les formations.

L'hydrologie se caractérise par :

— un réseau hydrographique très dense et très important qui détermine de nombreuses cuvettes marécageuses ;

— un drainage, suivant les directions tertiaires, qui recueille les eaux des ruisseaux traversant la craie, et qui se modifie en prenant une direction NS ou SE-NW ;

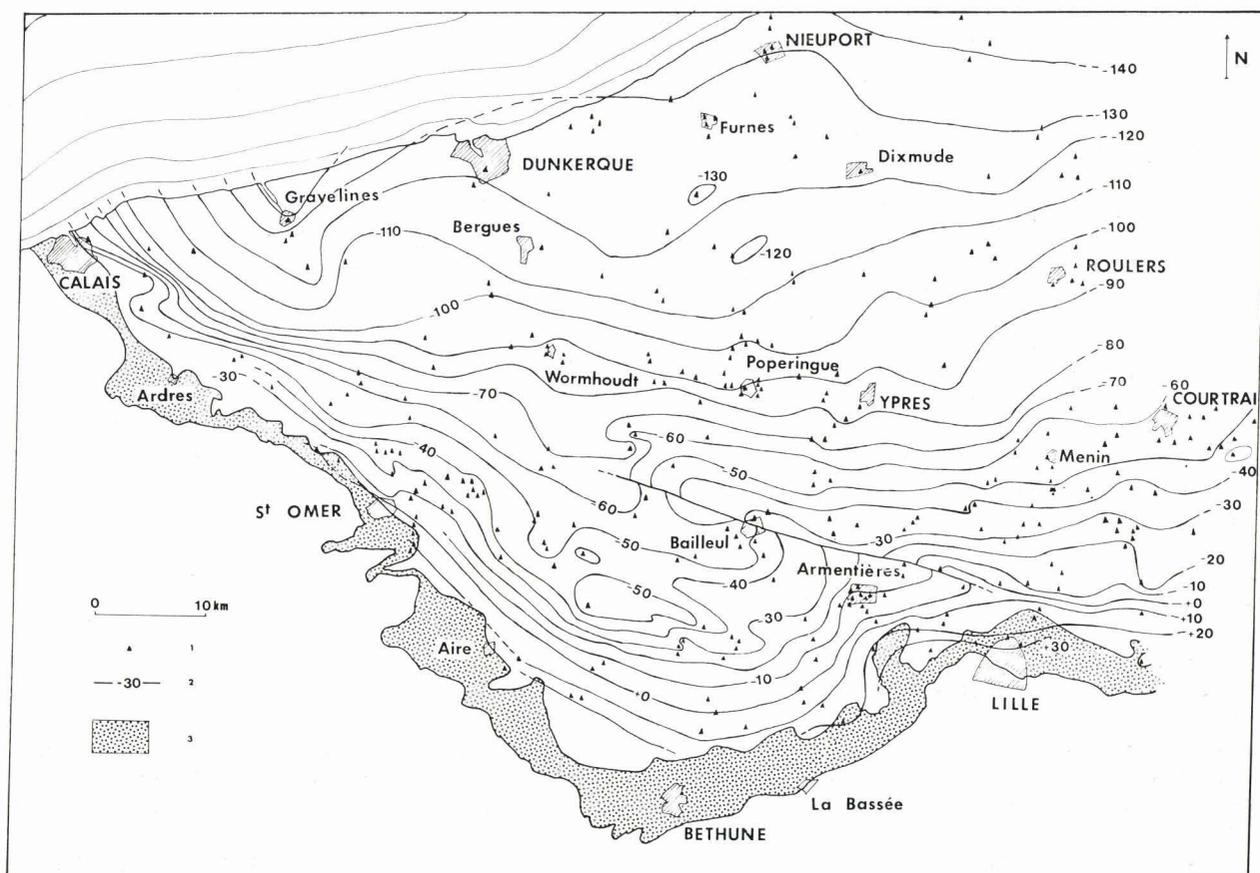


Fig. 107. — Carte du toit des sables landéniens en Flandres franco-belges (Mania, S.G.N., 1972, p. 56).

Légende : 1, emplacement des sondages. — 2, ligne isobathe du toit des sables (cote NGF). — 3, zone d'affleurement des sables (= zone d'alimentation).

— une intercommunication fréquente de l'aquifère des alluvions avec la nappe libre landénienne ;

— une contamination par les eaux saumâtres de Guînes à Calais.

Les sondages effectués au niveau de Calais révèlent des Sables landéniens recouverts par des terrains quaternaires de 20 à 30 m d'épaisseur. Dans ce secteur, les alluvions possèdent à leur partie supérieure, une nappe d'eau douce qui se superpose à une nappe d'eau salée. La contamination de la nappe de la craie et de la nappe du Landénien s'effectue par l'intermédiaire des sables pissards (213).

b) Le Landénien sous le recouvrement yprésien.

On assiste à l'interférence des deux structures du dôme du Mélantois et de l'anticlinal de

l'Artois (fig. 107). Cela se manifeste par l'existence, à l'E, de nombreuses ondulations anticlinales et synclinales et d'une faille (242).

La faille de Bailleul, qui n'est due qu'à la remise en mouvement d'accidents d'âge hercynien, provoque l'effondrement du compartiment sud avec un rejet de 25 m. La faille n'est plus mise en évidence au N de Lille et au S de Wormhoudt. Au N de la faille de Bailleul, les directions générales deviennent sensiblement W-E avec de très légères ondulations centrées sur Ypres et avec un approfondissement constant du toit du Landénien qui atteint la cote — 140 m NGF au N de Nieuport. Le Landénien, en Flandres, dessine une vaste hernie dirigée vers le S. Les deux directions principales SE-NW de l'Artois et W-E du Mélantois interfèrent au S de Bailleul. Au N de la faille de Bailleul,

les directions sont W-E avec un pendage faible mais constant vers le N. On retrouve cette allure générale pour le toit du Crétacé (199). La structure du Paléozoïque se retrouve au niveau de Gravelines où elle commande le synclinal de même nom.

2) Caractéristiques physiques des sables.

La perméabilité a été déterminée expérimentalement en laboratoire et par des essais de pompage *in situ* (229)

L'examen des courbes de remontée de la nappe après un pompage continu sur trois forages a permis d'évaluer quelques valeurs de transmissivité.

Ainsi à :

Roesbrugge avec

$$Q = 5,0 \text{ m}^3/\text{h}, \quad T = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s},$$

Vieux-Berquin avec

$$Q = 10,4 \text{ m}^3/\text{h}, \quad T = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s},$$

Lestrem avec

$$Q = 6,5 \text{ m}^3/\text{h}, \quad T = 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Les valeurs de transmissivité faibles indiquent un aquifère très médiocre avec des rabattements très importants pour un débit relativement réduit de l'ordre de 5 à 10 m³/h. Les essais de débit sont marqués par des entraînements de sable dès que l'on dépasse un volume horaire de 5 à 6 m³.

Les valeurs de perméabilité sont nettement plus faibles que celles obtenues par le calcul ou par expérimentation sur des échantillons sableux remaniés (229).

a) Introduction.

L'imprécision des coupes lithologiques à partir des déblais de forage qui sont remaniés lors de leur remontée dans la boue, surtout s'il s'agit de sables argileux, et l'impossibilité technique d'obtenir des carottes entières, font que les seules techniques qui puissent fournir une image continue du Landénien sous recouvrement yprésien en Flandres sont celles de la diagraphie.

La connaissance des lois reliant les paramètres physiques mesurés à la nature de la roche permet de définir la lithologie et d'entreprendre des analyses sédimentologiques et même séquentielles. Des niveaux-repères peuvent être mis en évidence dans de vastes bas-

sins. La permanence d'un critère physique sur plusieurs logs indique une analogie des conditions de dépôt à l'emplacement des différents sondages.

b) Les moyens.

Les sociétés de prospection pétrolière (199) travaillant dans le Nord de la France ont été amenées à effectuer plusieurs campagnes de core-drills pour reconnaître le Paléozoïque sous la couverture secondaire. A la fin de chaque core-drill, une série de diagraphies était généralement enregistrée.

Quelques diagraphies intéressantes (*) du Landénien ont été cataloguées (229) et nous donnent des valeurs de variation de potentiel (courbe de la polarisation spontanée) et de radio-activité naturelle.

c) Les résultats et leur interprétation.

Les analyses diagraphiques ont été réalisées sur onze ouvrages (fig. 108) répartis en deux secteurs (Dunkerque et Lille). Les corrélations à grande distance sont basées sur les limites suivantes :

— l'Argile yprésienne (e3) et le toit des sables (e2b),

— les Sables et l'Argile de Louvil (e2a) accompagnée du Tuffeau,

— la base du Landénien et le toit de la craie sénonienne (c4).

L'épaisseur totale du Landénien oscille de 43 m à 48,50 m (tabl. XXVIII). Les sondages 1, 2 et 3 au niveau de Dunkerque traversent des épaisseurs constantes voisines de 48 m. Les sondages 4 et 5, à la hauteur de Calais, ne rencontrent respectivement que 45 m et 43 m de Landénien. Nous remarquons l'augmentation d'épaisseur des Argiles de Louvil du N vers le S allant de 23,50 m au sondage 1 à 27,50 m au sondage 5. Cette variation d'épaisseur se fait en sens inverse de celle des Sables d'Ostrecourt. Les principales entités argileuses se retrouvent aisément avec quelques variations d'épaisseur, surtout dans les sondages 1, 2 et 3. Les échelles assez différentes des diagraphies peuvent, comme c'est le cas pour le sondage 4, faire mal apparaître les différents

(*) Archivées au B.R.G.M. de Lezennes.

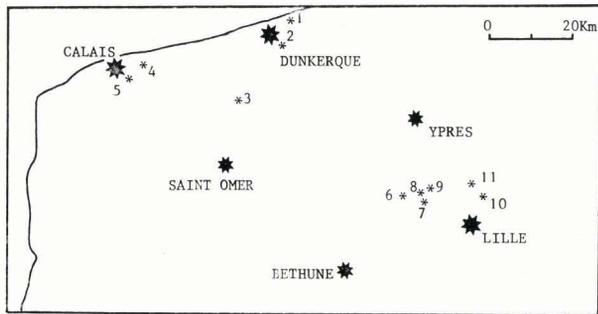


Fig. 108. — Position géographique des forages aux sables landéniens ayant été testés par diagraphie (Mania, 1971, Thèse Université, Lille).

repères. La diagraphie du forage n° 5 montre, à la base du niveau des Sables landéniens, un banc de tuffeau.

— Secteur SE de Lille.

Par rapport au secteur NW, une diminution nette de l'épaisseur du Landénien est constatée. Le niveau landénien e2a conserve une épaisseur de 23 à 24 m au détriment, semble-t-il, des sables qui oscillent autour de 15 m d'épaisseur. Le tuffeau apparaît assez régulièrement sur les différentes diagraphies et toujours vers la base du Landénien. L'utilisation des diagraphies permet de déceler des cycles de sédimentation à tendance essentiellement argileuse ou sableuse, qui se retrouvent sur des superficies assez importantes. La base du niveau landénien e2b, déjà sablo-argileuse, sera peu aquifère.

Forage	Lieu	Landénien Épaisseur totale e2b + e2a en m	Épaisseur du niveau e2b en m	Épaisseur du niveau e2a en m	Épaisseur du Tuffeau en m
1	Bray-Dunes	47,50	24	23,50	0
2	Ticteghem	48,50	21,5	24	0
3	Eringhem	48,50	23	25	0
4	Marck-en-Calaisis	45	21	24	0
5	Calais	43	15,50	27,50	3,50
6	Armentières	39,50	18	21,50	-
7	La Chapelle d'Armentières	38,50	14	24,50	5
8	Houplines	38,50	15	23,50	4
9	Frelinghien	38	14,5	23,50	4,50
10	Marcq-en-Baroeul	39,50	15	24,50	5
11	Bauduc	37	15,50	20,50	3

Tableau XXVIII. — Variation d'épaisseur des niveaux du Landénien d'après l'examen diagraphique (valeurs exprimées en mètres) (Mania, 1971, Thèse Université Lille).

3) Piézométrie de la nappe landénienne en Flandres.

a) Allure piézométrique générale en juillet-août 1970.

La nappe libre de la zone d'affleurement suit en général le modèle topographique. On observe dans la région lilloise des dômes piézométriques (fig. 109) dont une partie des écoulements est dirigée vers le S. Ce volume d'eau est, soit perdu pour la nappe au profit du bassin crayeux, soit drainé par les vallées de la Deûle et de la Marque.

La majeure partie de la nappe passe en régime captif très rapidement dès le recouvrement par l'argile yprésienne. Elle est alors sous pression contre son toit imperméable. La surface piézométrique mesurée se trouve au-dessus du toit des sables. Seule la zone des pompages d'Armentières est dénoyée.

En général, la surface de la nappe captive s'infléchit à mesure que l'on s'éloigne de la limite de recouvrement. On observe une vaste zone de dépression au N d'une ligne allant d'Hazebrouck à Tourcoing en passant par Bailleul, provoquée par les pompages effectués en Flandres belges.

Des régions d'artésianismes existent, en outre, au niveau de Clairmarais, de Watten, d'Audruicq et au S de Nieupoort. Ce phénomène est mis en relief par le fait que ces régions correspondent à des parties basses d'altitude moyenne + 2. L'écoulement général de la nappe s'effectue vers le N. Cependant, au niveau de Calais, la circulation des eaux est préférentiellement dirigée vers la mer. Dans la région s'étendant de Dunkerque à Ostende, le sens des lignes de courant s'effectue d'W en E à la suite de la dépression créée par de nombreux pompages.

L'existence d'un petit dôme piézométrique de cote + 5 m NGF au S de Dunkerque s'explique par les faits suivants :

- un écoulement vers l'W, donc vers la mer ;

- un écoulement vers l'E créé artificiellement par les soutirages ;

- un écoulement naturel vers la zone d'artésianisme du NE.

On remarque que le gradient hydraulique, en dehors des zones de pompage, est ici très

BRS
LILLE

NAPPE CAPTIVE DES SABLES LANDÉNIENS
DANS LES FLANDRES FRANCO-BELGES

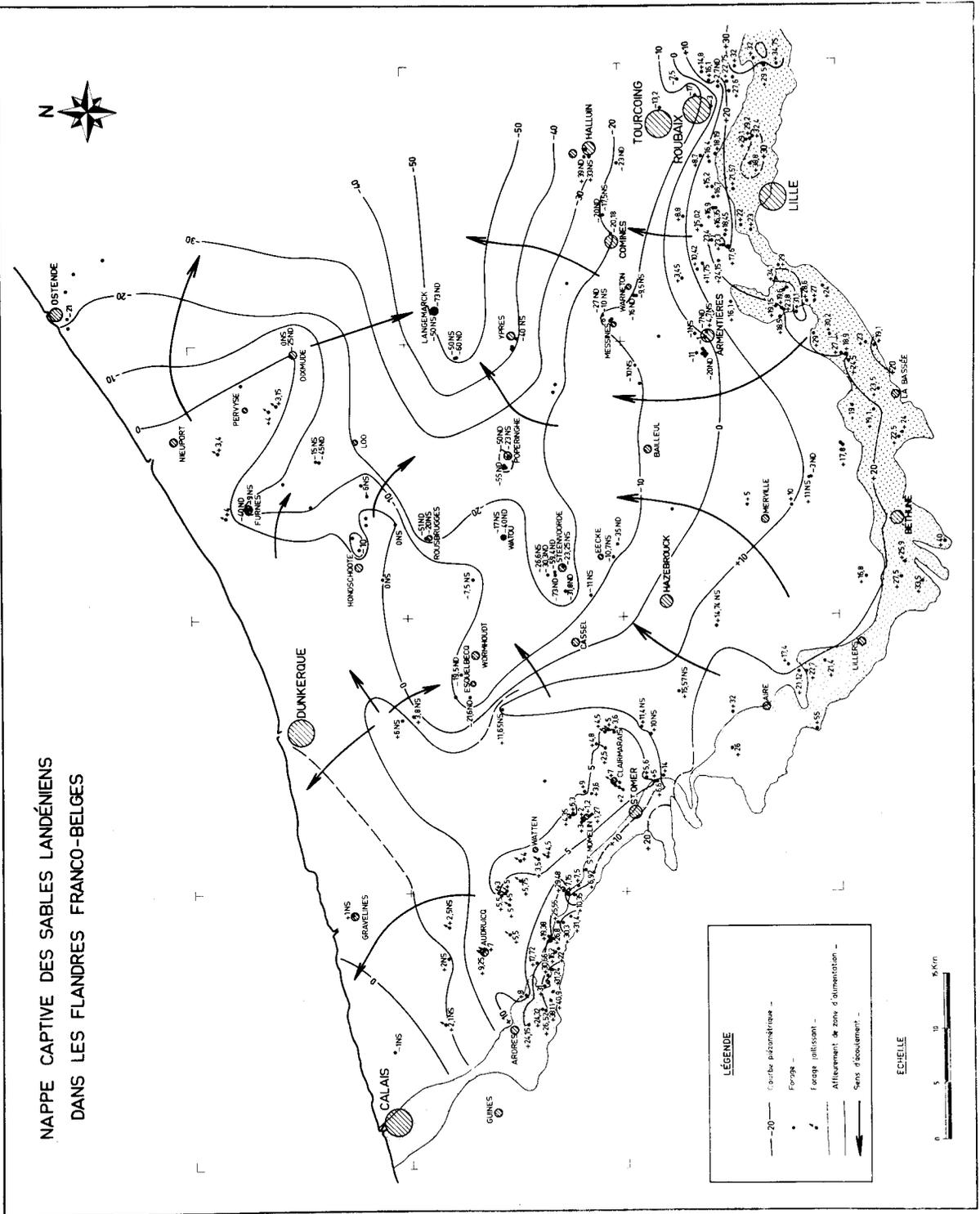


Fig. 109. — Carte piézométrique de la nappe des sables landéniens en 1970 (Mania, S.G.N., 1972, p. 60).

faible, de l'ordre de 1 à $5 \cdot 10^{-3}$, ce qui donne une vitesse d'écoulement allant de 0,40 à 1,60 m par an seulement. Ceci est corroboré par la datation.

b) *Mesures isotopiques et relation avec la circulation des eaux.*

Une datation a été réalisée en 1970 sur deux échantillons d'eau prélevés en zone captive, l'un à 2 km de la limite de captivité (à Watten-Bleue Maison) et l'autre à 16 km (à Killlem au S d'Hondschoote). Puis, en 1976, une campagne de prélèvements a été effectuée sur une ligne de courant allant de Pérenchies (W de Lille) à Ypres (Belgique).

— *Principes.*

L'utilisation des isotopes radioactifs tels le tritium et le carbone 14, permet de déterminer le temps de renouvellement des eaux d'une nappe (86, 89, 90) ainsi que la vitesse de l'écoulement des eaux qui dépend étroitement de la perméabilité de l'aquifère. Nous avons utilisé ici la datation par le tritium. Le tritium H^3 est un isotope radioactif de l'hydrogène. Son origine est en liaison étroite avec les rayons cosmiques, les cycles solaires et les essais thermonucléaires. La vie moyenne du tritium est de 12, 26 ans et sa concentration initiale en radio-isotopes (Co) décroît selon la formule classique :

$$C = Co \cdot e^{-\lambda t}$$

Ceci n'est vrai que dans le cas d'une nappe sans mélange. Dans les eaux de plus de 50 ans, la quantité de tritium est ainsi inférieure à 6 % de la quantité initiale (82). Toute la difficulté de la datation radiométrique réside dans la détermination de Co .

— *Résultats en 1970.*

Deux unités de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène ont été trouvées dans l'échantillon de Watten alors qu'il était impossible de le doser dans celui de Killlem. Ces faits montrent que les eaux à deux kilomètres de la limite de captivité sont vieilles de plus de 50 ans, si ce n'est bien plus, comme le montre l'évaluation de la vitesse d'écoulement (voir paragraphe précédent).

— *Données récentes - Mise en évidence de l'effet de la faille de Bailleul.*

Les analyses chimiques et isotopiques (81) des eaux de la nappe des Sables landéniens

ont été réalisées sur un profil proche d'une ligne de courant allant d'Armentières à Ypres. Ces estimations vérifient les hypothèses formulées antérieurement (229, 230) sur l'âge élevé des eaux. Nous avons repris les analyses de Garnier (p. 79) en les reportant sur un graphique bi-logarithmique (la distance du point de prélèvement aux affleurements sableux étant reportée sur l'axe des coordonnées et l'âge des eaux sur l'axe des abscisses). Il est aisé de constater l'accroissement régulier de l'âge des eaux selon les modèles chimiques de Tamers ou de Vogel (81). Ainsi à 4 km des affleurements, les eaux possèdent un âge de 10 000 ans alors qu'à 30 km, elles atteignent 30 000 ans (fig. 110). Les modèles hybrides (isotopique avec C^{13} et chimique) de Pearson et Garnier (distinction entre carbone mort et carbone actif) apportent des résultats différents. On observe nettement l'effet de la faille de Bailleul qui semble être la cause d'un rajeunissement (par apports d'eaux récentes) des eaux de la nappe des Sables du Landénien.

Les vitesses de filtration calculées à partir de la concentration des eaux en isotope C^{14} oscillent entre 0,5 et 4,4 m/an et sont donc très proches de la vitesse tirée du gradient hydraulique (0,4 à 1,60 m).

4) *Application de l'analogie électrique à la nappe captive des Sables landéniens.*

a) *Les diverses phases de la construction des modèles.*

Il est nécessaire d'élaborer un schéma du domaine réel à partir des observations de terrain qui font l'objet d'une interprétation subjective aboutissant à la carte piézométrique. Ce schéma délimite le domaine réel et fixe les conditions aux limites les plus vraisemblables des modèles. Le modèle analogique choisi est du type papier conducteur (Télédelto).

— *Caractéristiques du papier conducteur télédelto.*

Le papier conducteur télédelto, d'une épaisseur de 0,1 mm, est constitué par deux feuillets collés par un composé graphité. Ce papier, sensible aux variations de température et d'humidité, possède une résistance électrique de l'ordre de 2.250 ohms. Avant chaque expérience, un échantillon de papier est testé et sert de référence pour les mesures futures.

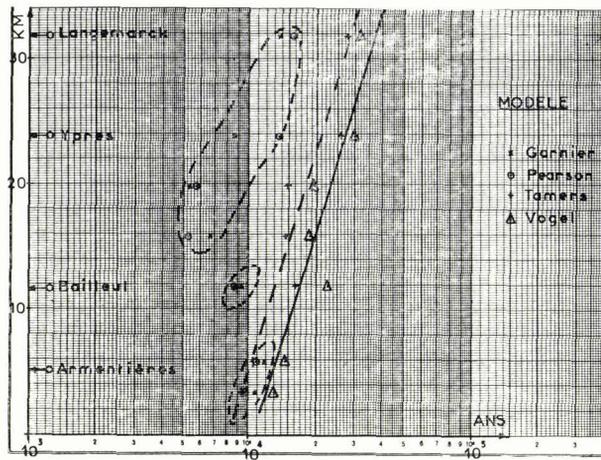


Fig. 110. — Graphiques de représentation de la datation des eaux de la nappe des sables landéniens à l'aide des isotopes et des analyses géochimiques. Comparaison de quatre modèles d'évaluation (d'après Garnier, 1976, Thèse Université Paris VI).

— Préparation des modèles.

Les modèles analogiques sont découpés suivant la forme géométrique du domaine étudié et des limites arbitraires que l'on s'impose. Les électrodes sont constituées en badigeonnant à la peinture d'argent les bords du papier. Les portions isolantes sont de simples coupures de papier. Les électrodes sont reliées à un pont de Wheatstone par un fil conducteur.

— Alimentation des modèles et mesures.

Le montage analogique possède un circuit d'alimentation (source de tension et potentiomètre) et un circuit de mesure. Ce dernier est un montage "pont de Wheatstone" branché en parallèle au circuit d'alimentation et comporte généralement un ensemble de 1.000 résistances égales placées en série. La résistance totale du pont est de l'ordre de 2 ohms. L'appareillage que nous utilisons ne comporte que 100 résistances (des points 450 à 550), deux résistances remplaçant les points 0 à 450 et les points 550 à 1.000.

Le potentiomètre permet d'imposer les potentiels voulus aux électrodes du modèle. Il est d'autre part aisé de mesurer le potentiel en un point quelconque du modèle à l'aide d'une "sonde" (pointe métallique) reliée au potentiomètre.

Pour la limite S le long de la zone d'alimentation des sables, nous avons choisi la

courbe isopièze + 20 de Lille à St-Omer, puis la courbe + 10 jusqu'à la courbe 0 à Calais. La limite E est arbitraire et recoupe, selon une ligne N-S partant de la région lilloise, les courbes isopièzes + 10, 0, - 10, - 20, - 30, - 40 et - 50 (fig. 111).

La limite nord longeant la côte du détroit du Pas-de-Calais a été très souvent modifiée.

b) La vérification de la cohérence des données de la carte piézométrique.

Elle se fait en comparant la distribution des équipotentielles des modèles et des hauteurs piézométriques relevées. On cherche, en modifiant les valeurs affectées aux caractéristiques de l'aquifère, c'est-à-dire en formulant d'autres hypothèses possibles, une solution satisfaisante qui nécessite plusieurs modèles intermédiaires jusqu'à l'obtention d'un modèle représentatif du système réel.

c) Les modèles.

Les deux figures 111 et 112 présentent quelques modèles intéressants.

1^{er} stade. - Dans un premier stade, des relevés piézométriques belges datant de 1960 ont été pris en considération. Nous avons supposé que les variations jusqu'à ce jour avaient été minimales. Cela conduit au schéma I de la fig. 111.

Phase A : C'est le modèle le plus simple, avec une limite S continue, de Lille au S de Calais, de potentiel + 20 ; puis + 10 et + 5 à Calais même.

La courbe isopièze 0 longe la côte de part et d'autre de Dunkerque, d'où l'application d'un potentiel analogue à cette électrode, puis par une série de paliers - 50, - 10, on rejoint la limite NS partant de la région lilloise.

A ce stade, les pompages belges et quelques pompages français de peu d'importance avaient été négligés. Les équipotentielles qui ont été obtenues montrent, en les comparant avec le schéma I, des différences importantes dans le secteur NW.

Les courbes + 10 et + 5 sont trop septentrionales. Les courbes + 5 et 0 ne s'invaginent pas assez vers l'intérieur de la Flandre belge.

Phase B : Les critiques du modèle précédent nous amènent :

— à descendre vers le S l'électrode + 10 du secteur NW et à installer des paliers + 5, + 2, 0 jusqu'à Calais ;

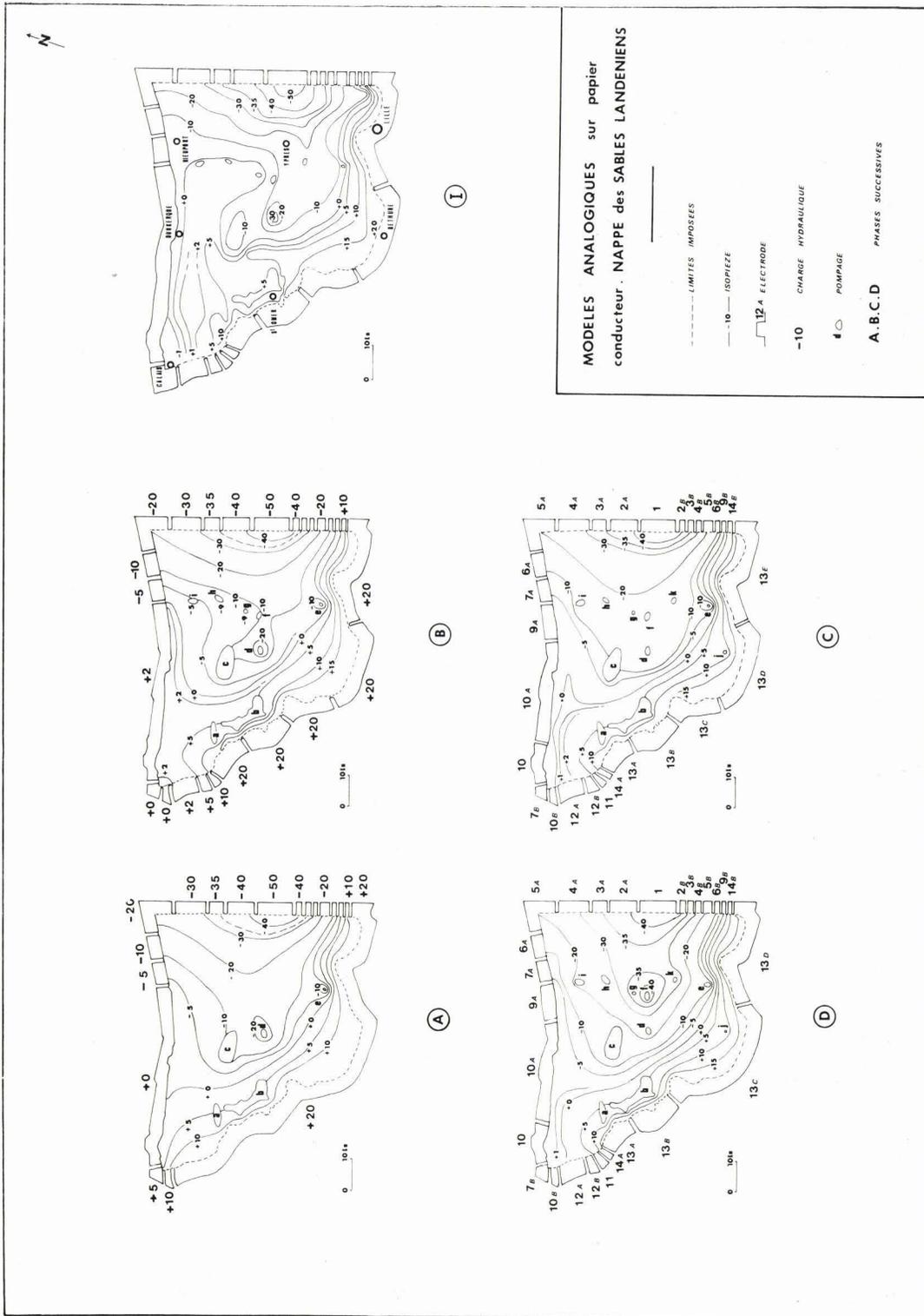


Fig. 111. — Modèles analogiques sur papier conducteur. Nappe des sables landéniens (Premier stade) (Mania, 1971, Thèse Université Lille).



— à augmenter le potentiel de 0 à + 2 au niveau de Dunkerque ;

— à implanter les forages belges (de f à i).

En outre, pour les estimations futures d'alimentation, plusieurs électrodes ont été découpées sur la ligne Lille, Béthune, Aire-sur-la-Lys, St-Omer (de potentiel + 20).

On constate sur ce modèle le décalage des équipotentielles + 5 et + 10 vers le S et l'avancée nette de l'équipotentielle 0 vers l'E sans toutefois dessiner une boucle.

Phase C : La correction de l'équipotentielle 0 passe par l'imposition des potentiels négatifs sur Calais-Dunkerque. Les pompes J + 3 de Lestrem et k — 20 de Dikkebus - Mesen - Neuve-Eglise ont été ajoutés.

Pour éviter des entrées par les forages belges, nous avons augmenté les rabattements. A ce stade, il était utile de connaître l'importance des soutirages et des alimentations. La valeur de la transmissivité T a été fixée à 2.10^{-4} m²/s pour le calcul du débit Q exprimé en m³/s dans la relation :

$$Q = I \cdot r_p \cdot T \cdot \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

Ce modèle semble correspondre au schéma de départ. Cependant, l'équipotentielle 0 reste encore trop rejetée vers l'W. La mise en place de potentiels positifs élevés le long de la côte sera la solution retenue dans le schéma II. On peut remarquer ici l'importance des débits dans les zones d'artésianisme de Ruminghem (a) et de Watten (b) dont l'alimentation semble directement issue des secteurs 13 A et 13 B. L'alimentation des électrodes 6 A + 6 B est relative à l'existence proche des équipotentielles — 20 à — 50.

La comparaison des données de l'alimentation par le modèle et le bilan des apports réels calculés ici à partir de l'hypothèse de Turc montre :

- un excédent important au profit de la nappe dans un rapport de 10 à 100,
- une faible partie du volume d'eau participe à l'alimentation du bassin,
- le stockage naturel réalisé ainsi semble attaché à des caractéristiques particulières des sables, à savoir, une granulométrie et l'existence d'argile dispersée dans le sable.

Il faut noter que tous les secteurs envisagés correspondent à des régions marécageuses, ce qui montre que les sables ne sont pas assez transmissifs et qu'ils ne peuvent pas emmagasiner toute l'eau disponible.

L'évacuation des 90 % du volume d'eau constituant ainsi le surplus se fait par le drainage de milliers de ruisseaux dont les niveaux d'eau peuvent être confondus au niveau de la nappe des sables. Un jaugeage est pratiquement impossible à effectuer à cause de la complexité du réseau hydrographique.

Phase D : Son but essentiel est de montrer l'influence de l'augmentation des débits surtout dans les Flandres belges, grandes utilisatrices des forages au Landénien.

Nous constatons une évolution rapide en territoire belge et relativement modérée en territoire français. Les nouveaux secteurs mis à contribution se situent dans la zone calaisienne (électrode 7 B et 10 B) et le long de la côte (électrode 7 A, 9 A, 10 A) donc de la nappe actuellement sous le détroit du Pas-de-Calais. Ces nouveaux secteurs mis à contribution n'entraînent que très modestement les réserves aquifères.

2^e stade. - L'impossibilité de retrouver une courbe équipotentielle 0 s'infléchissant largement en Flandres belges nous a amené à réaliser de nouvelles mesures en territoire belge dans la région de Furnes, Nieupoort, Dixmude, Poperinghe, Ypres, Warneton.

Un nouveau schéma (schéma II de la fig. 112) a été constitué. Il montre essentiellement le recul net de l'isopièze 0 et un abaissement de 10 m de la nappe en certains endroits dans un laps de temps de 10 ans, surtout dans la région de Poperinghe à Dixmude. Au S de Nieupoort, existent encore des forages jaillissant naturellement. Cette dernière constatation invite à imposer des potentiels positifs le long de la côte. Deux phases ont été reproduites.

Phase A : La partie s'étendant de St-Omer à Calais subit quelques légères modifications avec intercalation d'une électrode + 10 (n° 13 C) entre deux électrodes + 20 face à St-Omer ; puis, par des paliers successifs + 10, + 5, + 2, 0 ; on impose un potentiel — 1 à Calais (n° 10). Le long de la côte, les potentiels affichés seront successivement 0 (n° 9), + (n° 8 A), + 4 (n° 7), 0 (n° 6 A) et — 10 (n° 5 A).

Les équipotentielles obtenues (fig. 112) montrent :

— une ligne 0 dessinant une flexure vers le Sud,

— et un réseau assez semblable au schéma II proposé.

Phase B : Pour intensifier la flexure de l'équipotentielle 0, il a fallu afficher un potentiel positif + 9 (électrode n° 7) le long de la côte.

On constate un déplacement modéré des lignes 0 et -10 dans le secteur N (fig. 112).

Un domaine à charge hydraulique assez élevée semble exister sous le détroit. Cette constatation amène à envisager des apports issus de la Grande-Bretagne (Landénien à altitude élevée). Cette pression pallie actuellement l'abaissement général de la nappe en Flandres belges.

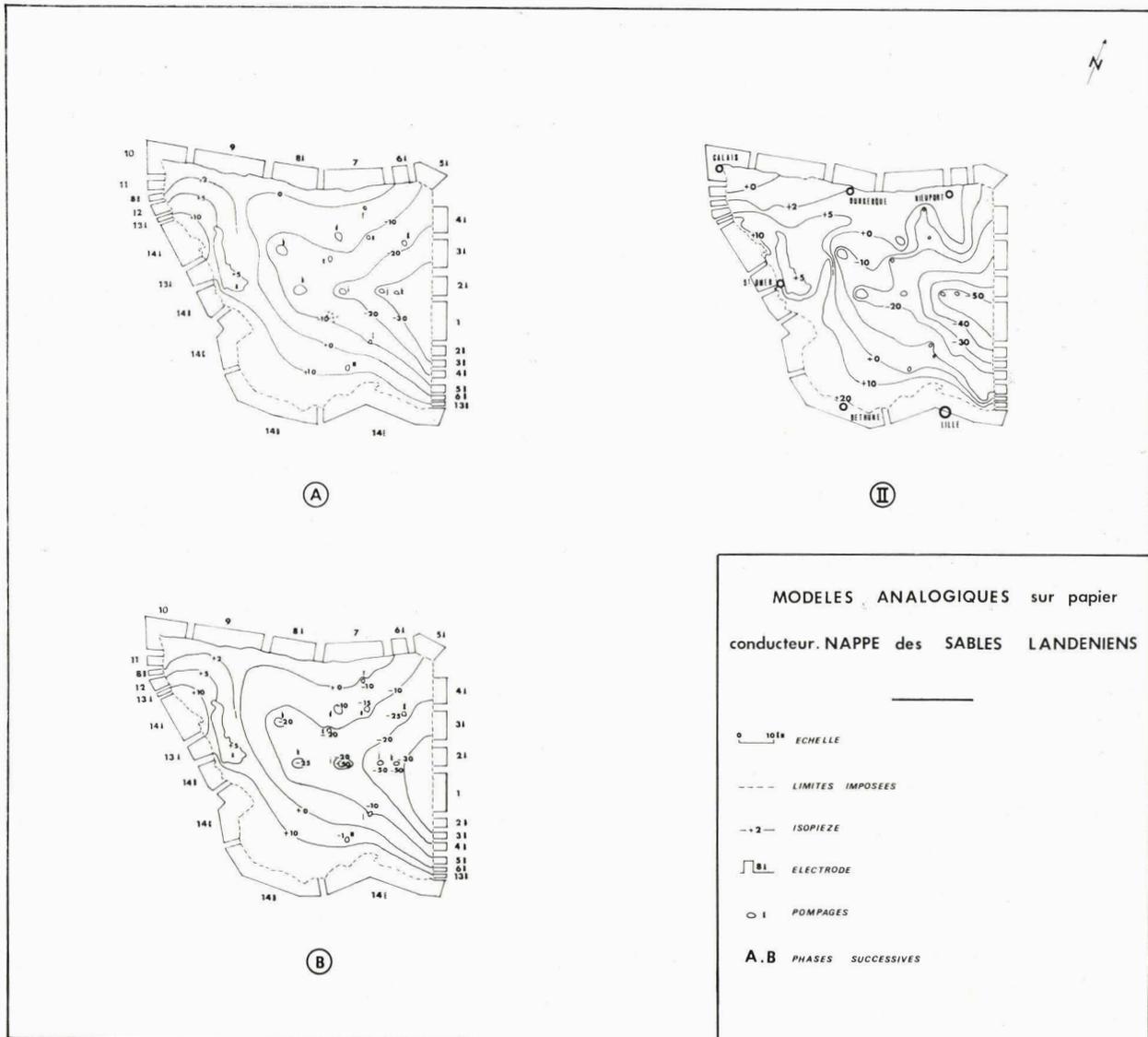


Fig. 112. — Modèles analogiques sur papier conducteur. Nappe des sables landéniens (Deuxième stade) (Mania, 1971, Thèse Université Lille).

La comparaison des données du modèle et de celles du schéma réel montre toujours l'excédent de l'alimentation par rapport au volume aquifère entrant réellement en jeu.

d) *Calcul des transmissivités.*

Connaissant le débit réel Q pour chaque zone de forage, il est possible d'estimer la transmissivité en partant de la relation :

$$T = Q \frac{\Delta V}{\Delta H} \cdot \frac{1}{l_{rp}}$$

Les valeurs de transmissivité atteignent $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Elles s'accordent avec les valeurs obtenues à la suite des pompages d'essai ($T = 1,5$ à $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$).

Conclusions.

L'analogie électrique restitue assez bien le comportement de la nappe captive des sables landéniens et permet de montrer l'importance du volume d'eau n'entrant pas dans le cycle d'alimentation. Elle apporte de nombreux renseignements quant à la contribution de chaque secteur.

Le modèle est ainsi un outil de synthèse et de reconnaissance qui permet de vérifier la comptabilité des données collectées et de prévoir le comportement de la nappe pour diverses hypothèses de prélèvement.

V. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les modèles du Calaisis, des interfluves Hem-Aa-Lys, des bassins de la Scarpe et de la Deûle et du Bas-Escaut ont permis de confirmer qu'il était impossible d'équilibrer le bilan de la nappe de la craie sans faire appel à des mécanismes hydrodynamiques mettant en jeu des venues d'eau supplémentaires. Ainsi, nous avons dû faire appel à la drainance des alluvions et des sables du Tertiaire des Flandres maritimes, de l'Aa, de la Deûle, de l'Escrebieux, de la Sensée et de l'Escaut. Des apports par les rivières ont été localisés par les modèles puis vérifiés dans certains cas sur le terrain pour la Hem, la Haute Aa, la Deûle, la Scarpe, la Sensée, la Rhonelle et l'Aunelle (affluents de l'Escaut).

Le modèle de la nappe du Calcaire carbonifère de la région lilloise nécessite, pour maintenir l'équilibre des échanges, des apports par drainance, soit de la nappe de la craie sus-jacente, soit d'eaux profondes. Des transferts de débit par perte des rivières de l'Escaut, de la Marque et de la Deûle sont en outre indispensables pour maintenir les niveaux piézométriques actuels.

La modélisation effectuée à une échelle régionale contribue de manière opérationnelle aux simulations immédiates de nouvelles conditions d'exploitation qui permettent d'apprécier les modifications des relations hydrodynamiques : apparition de drainances, suppression d'émergences, extension de cônes de rabattement et tarissement de puits.



CHAPITRE SIXIEME

Gestion des ressources en eau

La simulation des systèmes aquifères a permis, dans un premier stade (Chapitre 5), de définir des bilans hydrologiques quantitatifs correspondant à un équilibre global des transferts en eau souterraine ou en eau superficielle à une époque déterminée. Les éléments dynamiques du système aquifère modélisé (fig. 2) provoquent, au cours du temps, une évolution des variations de réserve ou des variations de la surface piézométrique en particulier à la suite d'un accroissement des débits de pompage ou d'une alimentation artificielle. En faisant appel à l'historique des prélèvements et à l'estimation future des besoins en eau, il devient alors possible de réaliser une gestion optimale des ressources afin d'améliorer l'exploitation.

Trois thèmes de gestion sont développés à partir de problèmes régionaux qui existent également dans d'autres régions françaises : l'optimisation conjointe des ressources en eaux souterraine et superficielle (exemple du bassin de la Liane dans le Boulonnais), optimisation de nouveaux sites d'exploitation compte tenu de contraintes sur des champs captants (bassins de la craie) et prévision des relèvements de la surface piézométrique des nappes à la suite d'une alimentation artificielle (bassins crayeux et aquifère du calcaire carbonifère).

I. — OPTIMISATION DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN DE LA LIANE (Boulonnais)

Le bassin de la Liane est constitué (fig. 113 et cartes géologiques au 1/50.000^e de Desvres et Boulogne) par :

— des terrains du Crétacé supérieur crayeux sur sa bordure Est (entre Nabringhen et Lottin-

ghen) et sur sa bordure Sud (entre Desvres et Neufchâtel-Hardelot) ;

— des terrains jurassiques sur le reste du bassin (90 % environ). Ce sont surtout des terrains argileux (225 m de puissance pour 345 m d'épaisseur totale, du Bathonien inférieur au Portlandien supérieur) avec des intercalations de calcaires (Bathonien, Séquanien) et de grès (Kimméridgien inférieur : Grès de Connincthun, Kimméridgien supérieur : Grès de Châtillon, Portlandien inférieur : Grès de la Crèche) qui peuvent constituer des aquifères locaux non négligeables. Les affleurements des aquifères sont de superficies très réduites et sont très discontinus (contrairement à ce qui se passe en pays crayeux) en raison de leurs faibles épaisseurs. Aussi aucun aquifère important n'existe à proximité même de l'agglomération boulonnaise.

L'existence d'un ruissellement important sur le bassin de la Liane provoque l'apparition de forts débits de pointe sur les hydrogrammes relevés à Hesdigneul. En période sèche, le débit de la rivière est très faible (moins de 1 m³/s de juin à octobre) puisqu'il n'existe qu'un apport faible par la vidange des aquifères. Pour disposer du volume d'eau mis en jeu par l'écoulement superficiel, seule une retenue (barrage en terre par exemple) est envisageable.

En effet, les difficultés d'approvisionnement en eau potable du Syndicat intercommunal de la région de Boulogne-sur-Mer, depuis plus d'un siècle, ont conduit à la recherche de plusieurs sources d'approvisionnement (que l'on appelle "variables") qui sont, dans l'ordre chronologique (fig. 113 et 114) :

— les drains de Tingry et la galerie du Molinet sur la bordure crétacée du Boulonnais : variables X₄ et X₅ (débits) ;

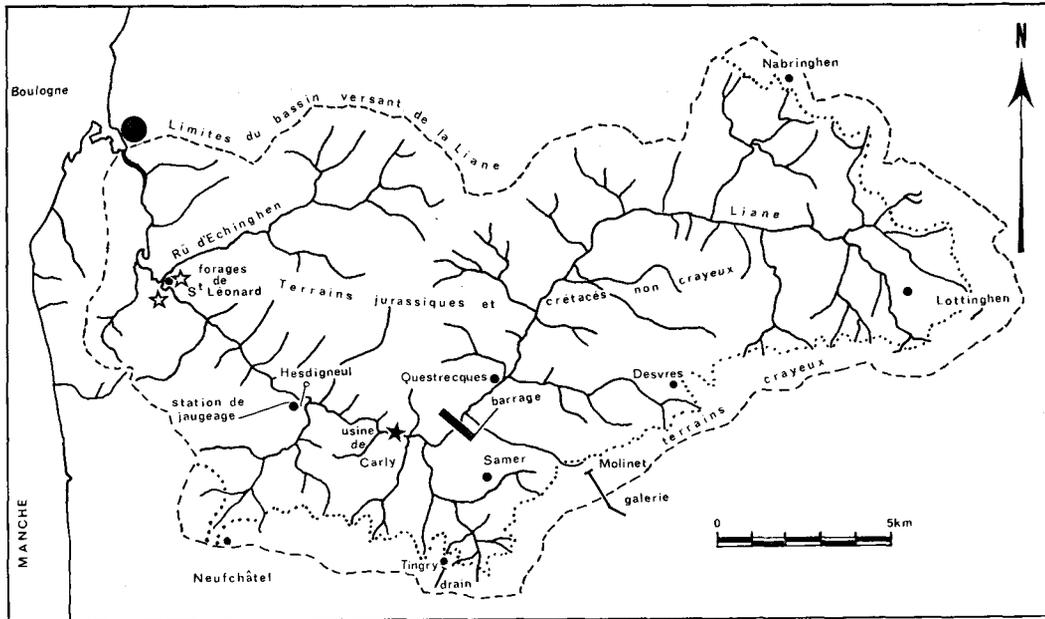


Fig. 113. — Schéma de l'alimentation en eau de Boulogne-sur-Mer et localisation géographique du bassin de la Liane.

— les trois forages du Séquanien dans le secteur de Saint-Léonard : variables X_1 , X_2 et X_3 (débits) ;

— la station de traitement des eaux superficielles de la Liane à Carly : variable X_6 (débits).

Deux autres projets sont actuellement à l'étude :

— un barrage d'accumulation des eaux de la Liane à Questrecques, qui pourrait contenir 5.10^6 m^3 : variable X_7 (volume ramené à un débit) ;

— un appoint issu du massif primaire et de l'aquifère bathonien dans la région de Marquise (cette dernière possibilité est actuellement écartée en raison des faibles débits découverts à ce jour et de l'éloignement géographique).

1) Les besoins.

Une analyse des besoins en eau de l'agglomération de Boulogne-sur-Mer (18 communes), a été faite dans le cadre de l'élaboration du schéma d'aménagement et d'urbanisme par Debuissou en 1972 (210) compte tenu :

— d'un accroissement de 1,9% par an de la population sédentaire ;

— de l'existence d'une population saisonnière (touristes) de 42.500 unités par an ;

— de besoins unitaires qui atteindront en 1985 : 250 l/jour/habitant en milieu urbain et 160 l/jour/habitant en milieu rural ;

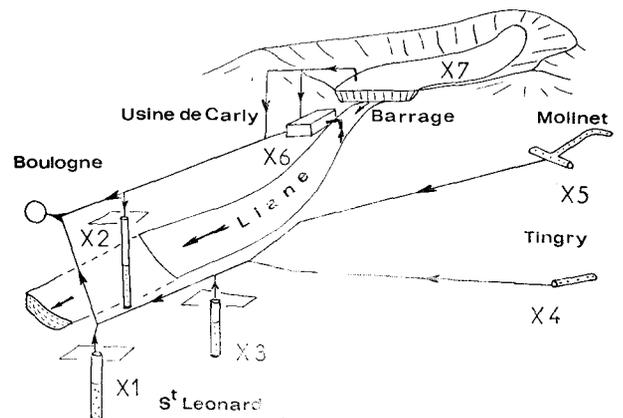


Fig. 114. — Schéma de gestion des ressources en eaux superficielles et souterraines du bassin de la Liane.

Légende : X_1 , X_2 et X_3 : débit des forages de St-Léonard. — X_4 et X_5 : débit des drains de Tingry et du Mollinet. — X_7 : volume efficace du barrage de retenue sur la Liane.

— des besoins unitaires qui oscilleront en l'an 2000 autour de 350 l/jour/habitant ;

— de l'équipement de 385 hectares de zones industrielles nécessitant 15 m³/hectare d'eau d'adduction publique.

Sur ces bases, on peut prévoir des besoins en eau :

- de 0,9 .10⁶ m³/mois en 1975 (1.250 m³/h) ;
- de 1,95.10⁶ m³/mois en 1985 (2.700 m³/h) ;
- de 2,7 .10⁶ m³/mois en 1990 (3.300 m³/h) ;
- de 3,45.10⁶ m³/mois en 2000 (4.800 m³/h).

2) Exposé du problème.

Une statistique des variations de débit s'étendant sur les années 1959 à 1972 montre l'importance des disponibilités en eaux souterraine et de surface. Une chronique des valeurs mensuelles des diverses sources d'approvisionnement et des soutirages effectués entre 1969 et 1973 est présentée sur les fig. 115 et 116.

De nombreuses contraintes (C₁ à C₁₀) vont limiter les prélèvements :

— des contraintes liées au rabattement de la nappe sur chacun des trois forages de Saint-Léonard dont les caractéristiques ont été établies au préalable par Mania (148, 149) et que l'on résumera dans le tableau XXIX. On peut ainsi écrire les trois relations suivantes :

$$147.X_1 + 59.X_2 + 138.X_3 < R = \text{rabatt. max. saisonnier admissible (point 1),}$$

$$67.X_1 + 269.X_2 + 74.X_3 < R = \text{rabatt. max. saisonnier admissible (point 2),}$$

$$117.X_1 + 57.X_2 + 200.X_3 < R = \text{rabatt. max. saisonnier admissible (point 3),}$$

VARIABLES = OUVRAGES	RABATTEMENTS SPECIFIQUES A/Q en m ⁻² . h			Cq ^{max}
	R _{ii}	R _{ji}		
X ₁ (10-3-2)*	R ₁₁ = 0.0147	R ₃₁ = 0.0138	R ₂₁ = 0.0059	270 m ³ /h
X ₂ (10-3-168)*	R ₂₂ = 0.0269	R ₃₂ = 0.0074	R ₁₂ = 0.0067	130 m ³ /h
X ₃ (10-3-308)*	R ₃₃ = 0.0200	R ₁₃ = 0.0117	R ₂₃ = 0.0057	250 m ³ /h

Tableau XXIX. — Contraintes d'optimisation des forages de Saint-Léonard.

— des contraintes représentées par des débits maximaux d'exploitation.

On prendra dans les optimisations successives des rabattements qui ne risquent pas de provoquer une chute des niveaux de la nappe en-dessous de 14 mètres en raison du danger d'envahissement des eaux de la nappe par des eaux marines salées. On se reportera à l'évolution piézométrique de 1972 qui est issue de la surveillance effectuée sur l'ouvrage 10-3-1 à l'arrêt (fig. 41).

Les contraintes de chaque ouvrage sont également représentées par leur débit propre maximal.

En ce qui concerne le débit disponible à la station de traitement de Carly, on se basera sur la capacité de fonctionnement de l'usine qui est, en 1975, de 1.080 m³/h (avec des extensions possibles à 1.460 m³/h en 1985, 1.840 m³/h en 1990 et 2.560 m³/h en 2000), compte tenu d'un écoulement minimal de la rivière fixé à 1 m³/s et qui sera assuré de façon continue par le lac de barrage. On écrira ainsi que X₆ < 1.080. Les ressources issues des drains de Tingry et du Molinet varient saisonnièrement et ne dépendent que du réservoir crayeux. Le faible coût d'utilisation de ces ressources nous amène à les utiliser pleinement.

On procèdera à trois optimisations annuelles en janvier, août et novembre. On posera par exemple, pour la période de janvier 1975, les équations et relations suivantes représentatives des rabattements :

$$\begin{aligned} 147.X_1 + 59.X_2 + 138.X_3 &< 70.000 \\ 67.X_1 + 269.X_2 + 74.X_3 &< 50.000 \\ 117.X_1 + 57.X_2 + 200.X_3 &< 35.000 \end{aligned}$$

et représentatives des débits limites : X₁ < 250, X₂ < 130, X₃ < 250, X₄ < 178, X₁ + X₅ < 448, X₆ < 1.080, X₇ < 361 et X₁ + X₂ + X₃ + X₄ + X₅ + X₆ + X₇ = 1.250 (besoin en eau à satisfaire en priorité).

On envisagera deux hypothèses de travail : la première est fondée sur l'utilisation modérée du champ captant de St-Léonard et la deuxième repose sur la possibilité d'alimenter artificiellement la nappe du Séquanien (§ suivant), ce qui permet une exploitation plus intensive en période de basses eaux.

a) Première hypothèse.

Elle sera testée sur plusieurs périodes : 1975, 1980, 1990.

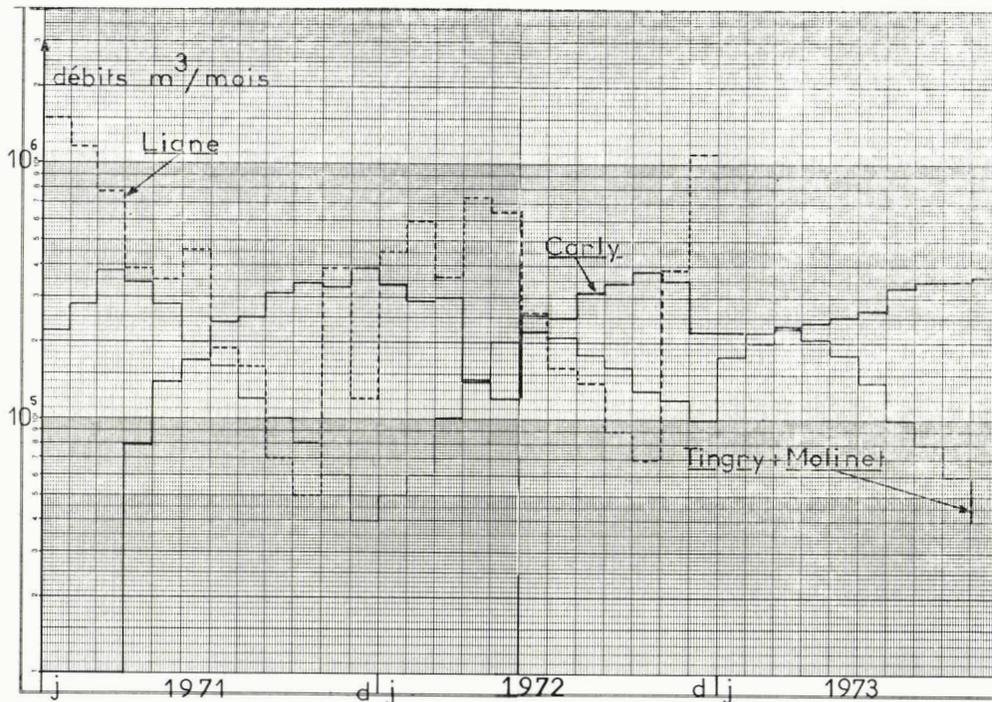


Fig. 115. — Evolution mensuelle des débits de la Liane, des débits traités à l'usine de Carly et du débit des drains de Tingry et Molinet (d'après S.H.C. et C.G.E.).

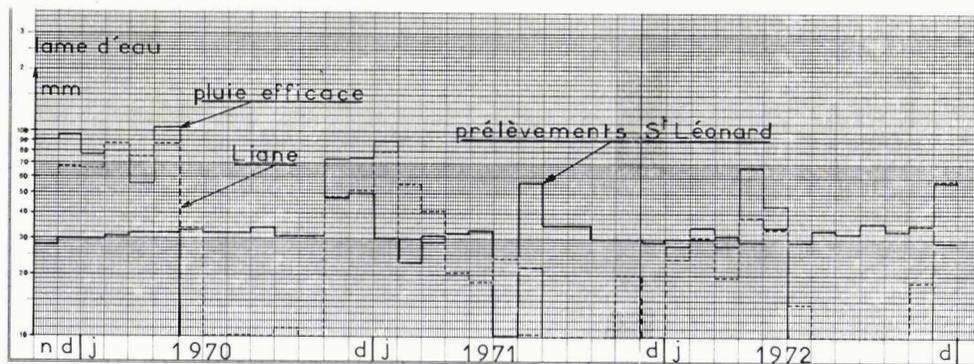


Fig. 116. — Fluctuations mensuelles des prélèvements à St-Léonard dans les calcaires du Séquanien, du débit de la Liane et de la pluie efficace (d'après C.G.E. et S.H.C.).

— Horizon 1975.

On utilisera les chiffres saisonniers obtenus statistiquement sur une période décennale ; ils constitueront également une contrainte. On posera : $X_4 + X_5 =$ débit de la période envisagée. L'examen des réserves disponibles à la suite de la construction d'un barrage sur la Liane

montre (tabl. XXX) une période de remplissage (de novembre à mai) et une période de vidange (de juin à octobre). On a d'abord effectué une correction des débits moyens de jaugeage mesurés de 1966 à 1972 à Hesdigneul pour les ramener au niveau d'une station virtuelle (au droit du barrage projeté). La superficie du bas-

	JANV.	FEVR.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	JUILL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV.	DEC.
Jaugeage Liane Hedigneul S.BV ₃ = 196 km ² en m ³ /s	4,67	5,73	3,70	3,16	2,07	1,13	1,09	0,91	0,92	1,83	4,11	4,83
Jaugeage Liane Questrecques N1 calculé S.BV = 130 km ²	3,03	3,76	2,44	2,04	1,32	0,72	0,66	0,59	0,59	1,18	2,7	3,16
Reste après retenue de 1 m ³ /s pour la Liane	2,03	2,76	1,44	1,04	0,32	- 0,28	- 0,34	- 0,41	- 0,41	0,18	1,7	2,16
Soit en 10 ⁶ m ³ /mois	5,26	7,15	3,73	2,69	6,97	4,28	3,40	2,34	1,28	1,74	6,14	5,6
Excédent après la retenue de 5.10 ⁶ m ³	0,26	2,15	3,73	2,69	6,97	-	-	-	-	-	1,14	0,60
Cumulé	0,26	7,41	11,14	13,83	20,80	-	-	-	-	-	1,14	1,74
Soit en m ³ /h	361	2 986	5 180	3 736	9 583	0	0	0	0	0	1 583	833
Cumulé	361	10 291	15 472	19 166	28 888	0	0	0	0	0	1 583	2 416
Observations	Barrage rempli à 5.10 ⁶ m ³					Vidange du Barrage					Remplissage du Barrage	

Tableau XXX. — Relations entre les débits de la Liane et le remplissage d'un barrage d'après les statistiques 1966-1972.

sin versant atteignant 130 km² au lieu des 192 km² précédents. La soustraction d'un débit minimal de 1 m³/s permet un écoulement adéquat de la Liane et le remplissage d'un réservoir estimé à 5.10⁶ m³, le surplus éventuel allant grossir le débit de la Liane.

Un excédent, disponible pour l'alimentation en eau potable, est ainsi décelable et peut atteindre des chiffres importants virtuels cumulés.

La période excédentaire favorise le maintien d'un remplissage constant du lac de barrage qui verra la diminution de son volume au fur et à mesure de l'avancement de la période estivale et automnale. De juin à octobre, on ne procédera à aucun prélèvement en eau souterraine, sauf en cas d'accident (arrêt de la station de Carly, rupture de conduite ou avarie des pompes à St-Léonard), puisqu'il est nécessaire également d'assurer un écoulement stable à la Liane. Nous avons ainsi une contrainte X₇ qui aura pour valeur un débit excédentaire très largement supérieur aux besoins de l'agglomération boulonnaise.

La fonction objectif qui sera établie devra minimiser le prix de revient de l'exploitation des ressources en eau, soit minimiser $f(3.X_1 + 3.X_2 + 3.X_3 + 1.X_4 + 2.X_5 + 10.X_6 + 50.X_7)$ (*).

Les coefficients introduits traduisent des unités de coût qui dépendent de l'investissement, de l'amortissement et de l'entretien du matériel ou du site.

On peut dégager les enseignements suivants (tableau XXXI) :

— l'appel à des ressources issues d'un lac de barrage ne s'impose pas ;

— la station de Carly ne fonctionne qu'entre 50 et 70 % (capacité totale de traitement : 1.080 m³/h) ;

— le forage 1 est sollicité totalement de manière continue pour toutes les périodes envisagées, compte tenu des rabattements imposés ;

— le coût des charges financières croît au fur et à mesure que l'on s'avance dans l'année

(*) D'après les estimations de la C.G.E.

VARIABLES	Forages de St Léonard			Tingry	Molinet	Carly	Barrage	MINIMUM FONCTION OBJECTIF
	1	2	3	4	5	6	7	
JANV. 75	250	11,6	25,4	178	270	514,9	0	6 728
AOUT 75	250	10,1	13,3	123	161	692,5	0	8 191
NOV. 75	250	8,6	1,3	110	170	710	0	8 331
NOV. 85	250	8,6	1,3	110	170	1 460	700	50 830
NOV. 90	250	8,6	1,3	110	170	1 840	920	65 630

CONTRAINTES	Rabattements à St Léonard			Débits							
	1	2	3	4	5	6	à fournir	Carly	Tingry + Molinet	Barrage	Tingry
JANV. 75	40 950	50 000	35 000	250	11,66	25,4	1 250	514,9	448	0	178
valeur limite	(70 000)	(50 000)	(35 000)	(250)	(130)	(250)	=	(1 080)	(448)	(361)	(178)
AOUT 75	39 190	45 000	32 500	250	10,1	13,3	1 250	692,5	284	0	123
valeur limite	(57 000)	(45 000)	(32 500)	(250)	(130)	(250)	=	(1 080)	(284)	0	(123)
NOV. 75	37 440	40 000	30 000	250	8,6	1,3	1 250	710	280	0	110
valeur limite	(48 000)	(40 000)	(30 000)	(250)	(130)	(250)	=	(1 080)	(280)	(1 580)	(110)
NOV. 85	37 440	40 000	30 000	250	8,6	1,3	2 700	1 460	280	700	110
valeur limite							=	(1 460)			
NOV. 90	37 440	40 000	30 000	250	8,6	1,3	3 300	1 840	280	920	110
valeur limite							=	(1 840)			

Tableau XXXI. — Première hypothèse : Gestion avant alimentation artificielle de la nappe du Séquanien.

(utilisation croissante des eaux de la Liane à Carly) en raison de la baisse de débit des drains de Tingry et du Molinet. Les graphiques de la fig. 115 montrent bien cette concordance pour les années 1971 à 1973.

— Horizons 1985, 1990.

La station de Carly est sollicitée pleinement. Un appel important aux ressources du réservoir de barrage apparaît en 1985, qui ira en croissant puisqu'il existe des limites physiques sur le champ captant de St-Léonard et des limites temporelles concernant l'extension de l'usine de Carly (tranches de fonctionnement de l'ordre de 360 m³/h). Les coûts d'exploitation ont été multipliés par sept par rapport à la situation de 1975.

b) Deuxième hypothèse.

Les contraintes de rabattement sur le champ captant de St-Léonard sont allégées en raison de la mise en place d'un dispositif d'alimentation artificielle de la nappe. Le rabattement maximal admissible sur les ouvrages X₂ et X₃ est identique à celui imposé sur le forage X₁.

— Horizon 1975.

Le passage à une exploitation plus importante de la nappe entraîne une baisse de l'activité de l'usine de Carly dans la mesure où les eaux injectées proviennent soit de la station de traitement en période de hautes eaux de la Liane soit, comme nous le verrons dans un paragraphe suivant, du Rû d'Echinghen ou d'un arrêt des activités des ouvrages pendant une période de l'année. On constate (tabl. XXXII) que l'ouvrage X₂ (10-3-168) n'est utilisé qu'au dixième de ses capacités, les deux autres ouvrages étant davantage sollicités. Les eaux du barrage ne sont pas nécessaires à l'alimentation.

On remarque un appel croissant, au cours de l'année, aux volumes traités à Carly sans toutefois atteindre l'activité maximale (1.080 m³ par heure).

— Horizons 1985, 1990.

Dès janvier 1985, les ressources du lac de barrage sont sollicitées avec d'ailleurs un accroissement important (d'un facteur 5) du coût d'exploitation. La station de Carly est utilisée

au maximum compte tenu même de l'accroissement de sa production qui sera de 1.460 m³ par heure en 1985 et 1.840 m³/h en 1990. L'appel croissant aux eaux superficielles, qui va de pair avec un coût élevé passant de 33.110 unités en 1985 à 61.930 en 1990, n'exclut cependant pas l'abandon des autres ressources qui sont utilisées de manière optimale.

3) Conclusions sur l'optimisation.

Le recours aux eaux superficielles s'impose pour l'alimentation future de la région boulonnaise en raison des possibilités limitées d'exploitation des aquifères du Séquanien et du Crétacé.

A court terme, le champ captant de Saint-Léonard et les drains de Tingry-Molinet restent les moyens les plus économiques de l'alimentation avec cependant un appel croissant aux capacités de l'usine de Carly qui permet le traitement des eaux de la Liane.

A long terme, malgré un accroissement brutal du coût de l'eau, il faut envisager un ouvrage de retenue des eaux sur la Liane pour régulariser le débit de cette rivière (à concentration rapide des eaux pluviales en raison des nombreux affleurements argileux) et constituer une réserve en eau assurant une alimentation certaine.

Les autres ressources seront toutefois conservées, en raison de la qualité chimique des eaux qui ne nécessitent aucun traitement onéreux.

Le site de Saint-Léonard peut faire l'objet d'un stockage différé des ressources en eaux superficielles par alimentation artificielle de la nappe du Séquanien (180), afin de bénéficier d'un volume d'eau en période critique (étiage

de la Liane) et stocker éventuellement les surplus de l'usine de Carly.

4) Hydrogéologie et alimentation artificielle de la nappe du Séquanien.

Les éléments suivants ont été démontrés par Mania et Jacques Ricour en 1974 (180, p. 133 à 147) :

« Une exploitation intensive accompagnée d'une alimentation artificielle saisonnière de la nappe captive du Séquanien a été décidée dans une première étape afin de pallier les besoins les plus urgents. Des études préliminaires avaient été déjà entreprises au préalable pour définir le contexte hydrogéologique de la nappe du Séquanien (215). L'établissement d'un bilan très précis amène à établir un programme de reconnaissance géologique et diagraphique sous les alluvions de la Liane. Des pompages d'essai de longue durée ont été effectués avec la mise en place de stations limnigraphiques. L'ensemble de ces opérations conduit à élaborer un bilan et à définir les lignes directrices de la gestion de la nappe du Séquanien ».

a) Généralités.

« Les affleurements respectifs du Jurassique dans les vallées de la Liane et du Rû d'Echingen montrent successivement des pendages vers l'W (fig. 117 et 118). Au niveau de St-Léonard, les côtes du substratum du Séquanien mettent en évidence une structure faillée. La faille majeure appelée "faille de la Liane" de direction N120 possède un rejet de l'ordre de 20 m au niveau de Saint-Léonard. Le compartiment S, qui constitue le flanc gauche de la Liane, est affaissé. Une faille transverse N30 d'un rejet faible (5 m) affecte la faille majeure.

L'épaisseur des divers niveaux lithologiques du Séquanien, dont la stratigraphie a été finement étudiée (219) et reconnue grâce à des carottages continus et à la mise en œuvre de la prospection diagraphique (178, 237).

L'examen des diagraphies de radioactivité naturelle et de résistivité (fig. 119) montre une bonne corrélation des niveaux lithostratigraphiques. Les faciès argileux à radioactivité naturelle forte apparaissent nettement (Argiles du Rauracien, marnes du Kimméridgien). On remarque l'existence d'un banc marneux épais de 2 m entre l'oolithe et les calcaires de Bellebrune. Les résistivités les plus fortes mesurées sont celles des grès de Brunembert et de la

VARIABLES	1	2	3	4	5	6	7	MINIMUM FONCTION OBJECTIF
JANV. 75	250	14,3	199,7	178	270	338	0	5 490
AOUT 75	250	11,2	135,5	123	161	569	0	7 328
NOV. 75	221,8	9,36	107,6	110	170	631	0	7 779
JANV. 85	250	14,3	199,7	178	270	1 460	328	33 110
NOV. 85	221,8	9,36	107,6	110	170	1 460	621,3	47 130
NOV. 90	221,8	9,36	107,6	110	170	1 840	841,3	61 930

Tableau XXXII. — Deuxième hypothèse : Gestion avec alimentation artificielle de la nappe du Séquanien.

partie supérieure de l'oolithe. On remarque en outre (tabl. XXXIII), que l'épaisseur totale du Séquanien, qui oscille entre 15,80 et 20,25 m dans la vallée de la Liane, passe à plus de 24 m dans la vallée du Rû d'Echinghen par apparition de niveaux gréseux (reconnus à l'affleurement dans le secteur compris entre Baincthun, Wirwignes et Questrecques) et de calcaires compacts sublithographiques (les caillasses d'Hesdigneul). Au forage des Acières de Paris-Outreau (APO), près du quai minéralier à Boulogne, les calcaires séquanien se révèlent peu productifs malgré une épaisseur de 26 mètres (195). Les niveaux marneux du Kimméridgien sont très peu radioactifs sous les alluvions en raison de leur altération.

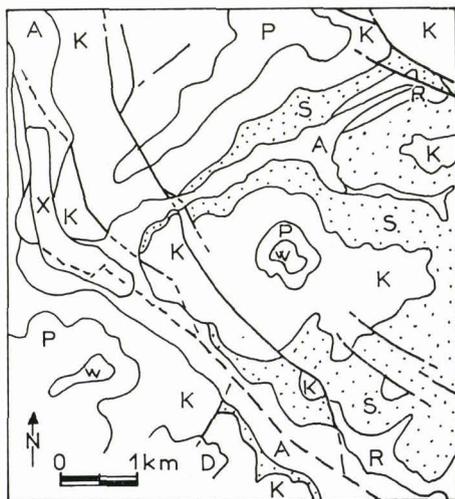


Fig. 117. — Carte géologique du secteur d'étude (Mania et Jacques Ricour, 1974, S.G.N., p. 134).

A, alluvions de la Liane. — X, dépôts superficiels (remblais). — D, dunes. — W, Wealdien. — P, Portlandien. — K, Kimméridgien. — S, Séquanien (figuré en points). — R, Rauracien. — Les failles sont portées en traits forts.

Quatre essais de pompages de longue durée ont été réalisés à des dates diverses (148, 149, 178) afin d'évaluer les paramètres de l'aquifère et de déterminer le type de l'alimentation de la nappe du Séquanien. Le contexte géologique montre une superposition d'alluvions et de marno-calcaires du Kimméridgien sur l'aquifère séquanien. Une communication entre les trois nappes des niveaux précités est possible.

Deux schémas hydrogéologiques ont été mis en évidence :

— La nappe du Séquanien est en communication à travers sa couverture semi-perméable (marno-calcaire du Kimméridgien) dont l'emmagasinement est négligeable avec une nappe à niveau d'eau constant (celle des alluvions de la Liane).

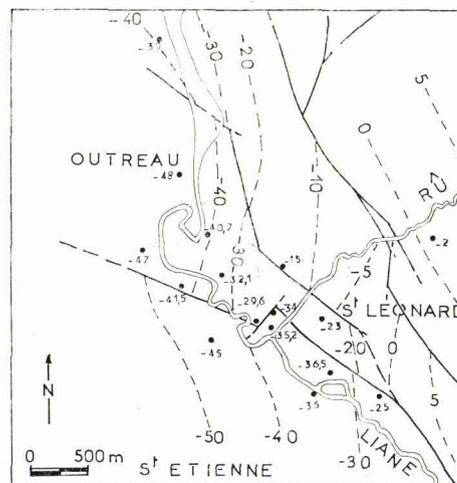


Fig. 118. — Carte structurale du toit des argiles rauraciennes. Les courbes isobathes sont portées en tiretés. Les failles sont portées en traits forts (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 135).

Epaisseur en m	Indice B.R.G.M.	10/2/303	10/2/304	10/2/305	10/3/168	10/3/2	10/2/308	10/3/289	10/3/290	10/3/7	10/3/171
		ALLUVIONS	7	13	5,6	16,6	14	19,30	8,3	8	0
KIMMERIDGIEN	Marnes et calcaires	22	17	15,60	7	8	3,50	14,50	8	0	10
SEQUANIAN	Caillasses d'Hesdigneul	0	0	0	0	0	0	0	0	1,75	0
	Grès de Wirwignes	0	0	0	0	0	0	0	0	4,50	0
	Calcaires de Bellebrune	6	5,50	5,50	+	6,50	3,2	6	5,50	6,25	+
	Oolithe d'Hesdin	7,50	8	8		9,25	6	10	9	8,50	
	Grès de Brunembert	3,50	3	3		4,50	6,6	3	3,50	3,35	
Epaisseur totale du SEQUANIAN		17	16,50	16,50	inconnue	20,25	15,8	19	18	24,35	?

Tableau XXXIII. — Répartition des divers niveaux lithologiques de la vallée de la Liane (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 138).

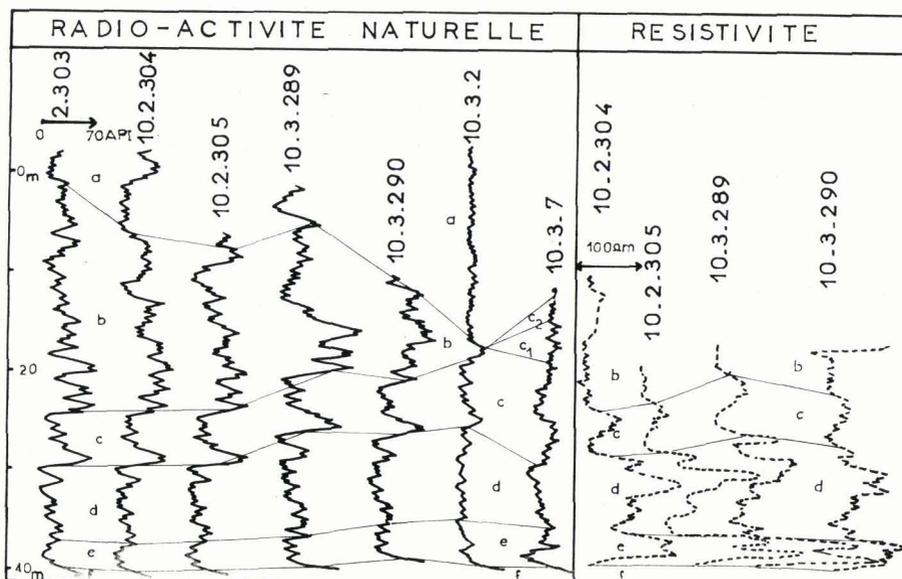


Fig. 119. — Correlations lithostratigraphiques d'après les diagrapies (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 135).

a, alluvions. — b, marnocalcaires (Kimméridgien). — c, calcaires de Bellebrune (Séquanien). — C₁, caillasses d'Hesdigneul (Séquanien). — C₂, grès de Wirwignes (Séquanien). — d, calcaire oolithique d'Hesdin l'Abbé (Séquanien). — e, grès de Brunembert (Séquanien). — f, argiles (Rauracien).

Le débit d'alimentation par les alluvions est suffisant pour maintenir une pression constante, ce qui se traduit après la phase de décompression, par un palier de stabilisation. Le type des courbes obtenues permet une résolution bilogarithmique en régime transitoire dite de Walton applicable à une nappe semi-captive (courbe B de la fig. 48). Les forages 10-3-2, 10-3-269 et 10-3-168 (fig. 120) ont conduit à l'obtention de courbes de descente de type "Walton" (fig. 121).

— La nappe semi-captive du Séquanien est réalimentée par effet de drainance à partir des alluvions et des niveaux du Kimméridgien. Cela se traduit, après le stade de décompression du réservoir rocheux, par un palier de drainance suivi d'un accroissement des rabattements. Un tel type de courbe est expliqué par l'existence d'alluvions aquifères épaisses drainées par la nappe du Séquanien, dont la pression est inférieure à celle de la nappe des alluvions. La méthode de détermination des paramètres de la nappe sera effectuée d'après l'hypothèse de Boulton en régime transitoire (courbe D de la fig. 48). Les forages 10-2-308 ont conduit à l'obtention de courbes de descente de type "Boulton" (fig. 122).

Lors d'un pompage de longue durée effectué sur le forage 10-3-308, les mesures réalisées sur le piézomètre aux alluvions supérieures de la Liane ont montré un rabattement de 0,19 m de la nappe des alluvions au bout de 72 heures de pompage (fig. 123). Il y a donc bien drainage de la nappe alluvionnaire vers le réservoir sous-jacent. Le rabattement y est cependant 13 fois plus faible que celui observé pour la nappe du Séquanien à la même distance en raison des pertes de charge. La courbe de variation du niveau de la nappe alluviale possède une pente supérieure à la courbe théorique de Theis, ce qui indiquerait que les

réserves sont entamées et que l'apport de l'eau environnante n'est pas assez rapide en raison de faibles vitesses de circulation de l'eau dans les sables argileux alluvionnaires.

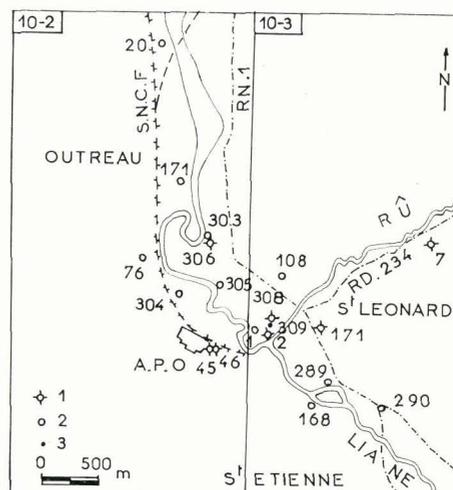


Fig. 120. — Plan de situation (les ouvrages portent les indices B.R.G.M.) (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 134).

1, forage d'exploitation. — 2, piézomètre de contrôle du Séquanien. — 3, piézomètre aux alluvions.

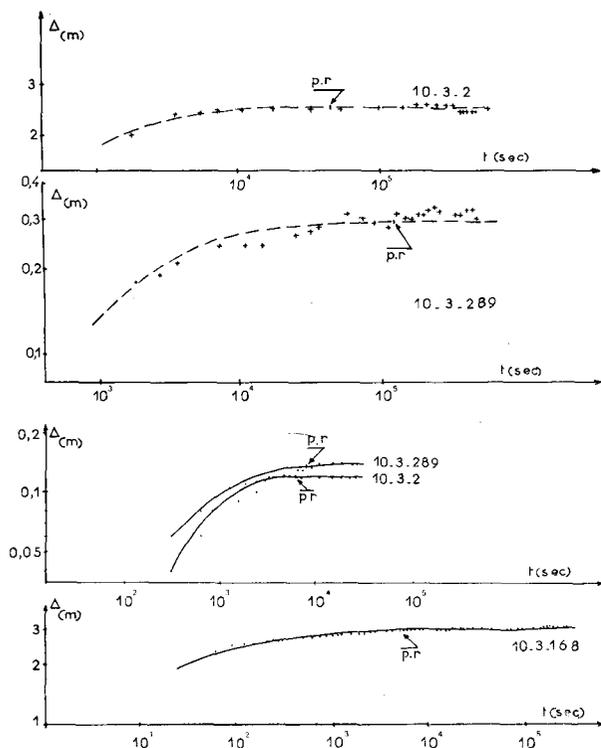


Fig. 121. — Courbes de descente lors des pompages de longue durée dans la nappe du Séquanien (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 137).

p. r., point de référence pris en compte dans les calculs. Δ (m), rabattement de la nappe en mètres. — t sec., temps de pompage en secondes.

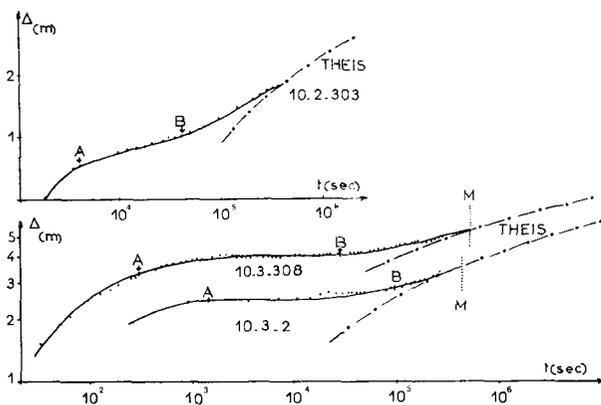


Fig. 122. — Courbes de descente lors des pompages de longue durée dans la nappe du Séquanien (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 137).

A et B représentent les points de référence pris en compte dans les calculs. — M, limite à partir de laquelle la descente suit une loi de Theis. — Δ (m), rabattement de la nappe en mètres. — t (sec), temps de pompage en secondes.

— Conclusions relatives aux pompages d'essai.

On voit apparaître deux mécanismes hydrodynamiques de la nappe du Séquanien :

— une alimentation importante de l'aquifère semi-captif, à travers une épouche semi-perméable et à partir d'une nappe alluviale jouant le rôle d'un niveau d'eau constant. Cette alimentation est d'autant plus favorable que les niveaux du Kimméridgien sont peu épais et que les alluvions sont épaisses. D'autre part, la proximité de la Liane, qui est sans doute en relation avec la nappe alluviale, vient renforcer le potentiel hydraulique de cette dernière. C'est le cas des ouvrages 10-3-2 et 10-3-168 ;

— une alimentation de l'aquifère séquanien par effet de drainage des niveaux alluvionnaires et kimméridgiens sus-jacents dont le débit retardé n'arrive pas à résorber le rabattement de la nappe du Séquanien. Ce cas de figure est particulièrement concrétisé à l'ouvrage 10-3-306 situé en flanc de vallée avec une très faible épaisseur d'alluvions et une forte épaisseur de marno-calcaires altérés qui renferme une petite quantité d'eau.

À l'ouvrage 10-3-308, le débit pompé est supérieur au débit de transit de l'eau des alluvions de la Liane et l'on constate le décrochement progressif des niveaux de la nappe. Ce phénomène est accentué du fait de la décreue forte des nappes en juillet 1974 ».

b) Bilan hydrologique de la nappe du Séquanien.

« Nous possédons un relevé piézométrique hebdomadaire effectué sur les forages de la C.G.E. (*) qui montre des variations relativement normales (fig. 41) jusqu'en 1971. Puis une chute spectaculaire de la nappe est visible jusqu'en novembre 1973. L'abaissement de la nappe est consécutif à des années sèches déficitaires et à des prélèvements accrus suite à une pénurie d'eaux superficielles.

— Données climatiques.

Deux postes pluviométriques : Boulogne-sur-Mer et Desvres nous renseignent sur les valeurs des précipitations. La station de Boulogne nous fournit en outre des relevés thermométriques. La recherche de l'infiltration efficace dans la nappe a nécessité l'utilisation d'une formule d'évapotranspiration mensuelle (hypothèse de Thornthwaite).

— Comparaison de l'évolution piézométrique et des infiltrations.

Le graphique de la variation de l'infiltration efficace calculée permet d'aboutir (88) à une évolution piézométrique simulée (fig. 124). Les valeurs déduites de la pluviométrie de la station de Desvres semblent plus valables que celles issues de la station de Boulogne et correspondent de manière satisfaisante à la réalité. Cependant, une meilleure corrélation est réalisée en prenant en compte le volume d'exhaure mensuel des forages qui, ramené à une tranche d'eau, est soustrait à la valeur d'infiltration. Les calculs sont basés sur une zone d'exploitation de 6 km².

— Recherche du bilan.

Trois périodes de comparaison intéressantes apparaissent : de novembre 1967 à août 1971, de novembre 1971 à mai 1973 et de novembre 1972 à juin 1973 (tabl. XXXIV). Pour chacun de ces trois cycles, la piézométrie est revenue au même niveau de départ, ce qui montre que les variations des réserves se compensent. Pour chaque période, une

(*) C.G.E. : Compagnie Générale des Eaux.

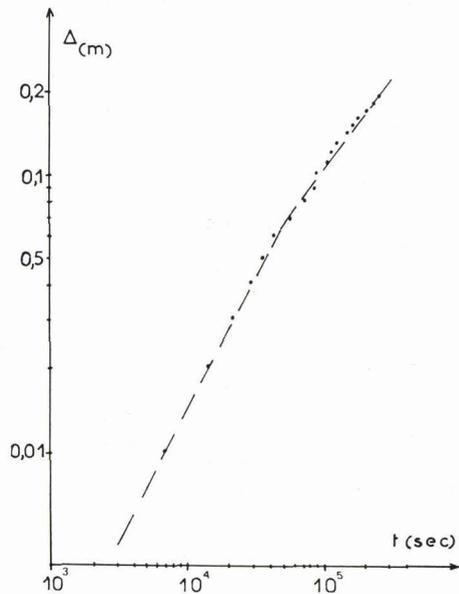


Fig. 123. — Courbes de descente de la nappe des alluvions lors du pompage de longue durée dans la nappe du Séquanien (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 138). Δ (m), rabattement de la nappe en mètres. — t (sec), temps de pompage en secondes.

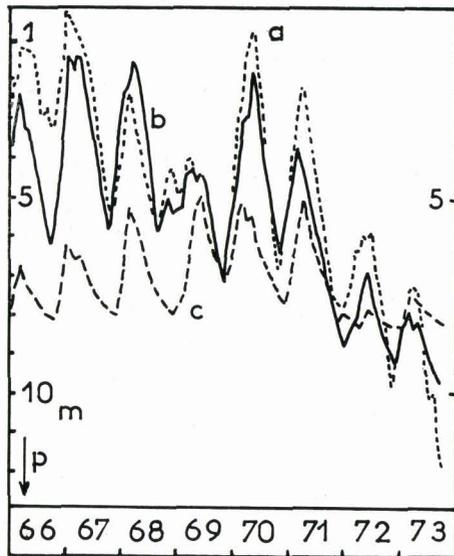


Fig. 124. — Corrélation de la piézométrie réelle avec la piézométrie calculée d'après l'infiltration efficace (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 141). a, courbe piézométrique réelle. — b, courbe piézométrique d'après les valeurs corrigées d'infiltration de la station de Desvres. — c, courbe piézométrique calculée d'après les valeurs brutes d'infiltration de la station de Desvres.

	Volume en 10^6 m ³	Lame équiv. en mm	Nbre de mois
Prélèvements nov. 67 à août 71	9,4	1 560	46
Apports des précipitations à la nappe	9,16	1 527	30
Déficit global	0,198 \pm 0,2	33	16
Déficit mensuel	0,012	2	1
Prélèvements nov. 71 à mai 73	3,7	620	19
Apports à la nappe	2,1	356	10
Déficit global	1,6	264	9
Déficit mensuel	0,18	29,3 \pm 30	1
Prélèvements nov. 72 à juin 73	1,6	266	8
Apports à la nappe	0,9	152	4
Déficit global	0,7	114	4
Déficit mensuel	0,18	28,5 \pm 30	1

Tableau XXXIV. — Bilan hydrogéologique de la nappe à diverses périodes (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 141).

comparaison est faite entre les prélèvements et les apports par les précipitations. On peut voir dans le tabl. XXXIV que la première période considérée est relativement équilibrée avec un faible déficit. Par contre, pour les deux autres périodes, on constate, lors de la décrue de la nappe, un déficit important de 180.000 m^3 par mois. Depuis août 1972 et jusqu'à novembre 1973, on comptabilise 13 mois de déficit, soit 390 mm, auxquels il faut ajouter 33 mm de la période 67-71. Soit un total de 423 mm ou encore $2,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Si l'on ajoute à ce déficit les volumes qui seront prélevés en 1974, soit $1,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, la nappe sera déficitaire d'un volume de $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ environ. Encore a-t-on considéré ici une année 1974 équilibrée ».

c) Réalimentation de la nappe du Séquanien.

« Dès 1974, il faut injecter dans la nappe un volume de $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Les années suivantes, une injection de $1,73 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ par an sera encore nécessaire. Ce dernier chiffre correspond à l'augmentation du prélèvement à St-Léonard effectué par la Compagnie Générale des Eaux de Boulogne-sur-Mer pour le compte du Syndicat Intercommunal de la région boulonnaise.

a) Plusieurs possibilités, quant à l'origine de l'eau nécessaire à l'alimentation artificielle, s'offrent à nous, avec chacune des avantages et des inconvénients.

— Arrêt saisonnier des forages de Saint-Léonard.

L'arrêt des pompages aux A.P.O. (*) (10-2-45, 46) et à la C.G.E. (10-3-72) pendant les six mois de hautes eaux de la nappe permet de stocker dans le sous-sol $1,25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ qui seraient utilisés en période sèche. Pendant l'arrêt des

(*) A.P.O. : Aciéries Paris-Outreau.

pompages, il faudrait assurer un débit d'appoint venant de Carly et du Rû d'Echinghen pour l'eau industrielle.

Inconvénients :

- l'arrêt des pompages des A.P.O. est assujéti à leur programme de recyclage industriel ;
- l'usine de Carly devrait fournir et traiter de grosses quantités d'eau ;
- coût du traitement de l'eau.

— Utilisation des eaux de l'usine de Carly.

Le passage de la capacité de production et de traitement de l'eau à l'usine de Carly, de 540 à 720 m³/h permet de compter sur un excédent éventuel représentant une marge de sécurité de 8.640 m³/jour qui seraient injectés, après traitement, en période de hautes eaux de la Liane.

Inconvénients :

- Le coût du traitement de l'eau et de l'énergie dépensée pour le transport.

Avantages :

- Les pompages de St-Léonard resteraient en activité ;
- la nappe constitue un réservoir de stockage de l'usine de Carly qui, à tout moment, peut réinjecter ses excédents éventuels ;
- la canalisation de Carly-Boulogne passe à proximité du champ captant.

— Utilisation des eaux du Rû d'Echinghen.

Les mesures de jaugeage effectuées mensuellement en 1968-1969 montrent que le débit d'étiage du Rû est de l'ordre de 70 l/s, soit 252 m³/h, au Pont d'Echinghen (178).

Une corrélation linéaire a pu être établie entre les débits du Rû d'Echinghen et ceux de la Liane jaugée à Hesindeul. Il apparaît que les débits du Rû d'Echinghen sont dix fois plus faibles que ceux de la Liane. En outre, on remarque que ce rapport est comparable au rapport des surfaces de bassin versant qui sont de 196 km² pour la Liane et de 24,5 km² pour le Rû d'Echinghen.

En période de crue, le débit moyen du Rû d'Echinghen peut être estimé à environ 1.200 m³/h.

Avantages :

- L'eau est relativement peu chargée en polluants mais peut être contaminée par des particules argileuses en période de crue, ce qui nécessite la création de bassins de décantation.

L'eau du Rû d'Echinghen peut être envoyée par canalisation à l'usine de Carly pour traitement, ce qui nécessiterait un investissement pour l'extension des unités de traitement des eaux et pour la mise en place d'une nouvelle canalisation.

Actuellement, les A.P.O. prélèvent sur le Rû d'Echinghen un débit de l'ordre de 200 m³/h. Ce qui donne un volume utilisable de l'ordre de 1.000 m³/h disponibles de décembre à mars, soit un volume total de 2.88.10⁶ m³ pour 4 mois.

On procéderait à une réinjection de ce volume deux années consécutives, puis à un taux moindre (1,8.10⁶ m³) les années suivantes.

Aucun pompage n'est arrêté et on ne perturbe pas la marche de l'usine de Carly pour les besoins futurs.

Inconvénients :

- Le coût du traitement de l'eau et des installations. Les débits du Rû sont irréguliers en raison de la faible superficie du bassin versant.

b) Les aspects techniques de la réalimentation sont relatifs à la qualité des eaux superficielles traitées, à la position et au nombre de forages.

— Qualité des eaux superficielles traitées.

Seules les analyses chimiques complètes associées aux jaugeages de la Liane permettent d'apprécier les réactions hydrochimiques qui seraient provoquées par le mélange de l'eau de la nappe et de l'eau injectée. Une grande stabilité chimique des eaux superficielles est souhaitable pour éviter les risques de dégazage (CO₂ et H₂S) et de précipitation (CaCO₃).

— Position et nombre des forages.

La position des forages d'injection est tributaire de quatre paramètres :

La qualité de l'eau.

Le calcul montre une vitesse de circulation de l'eau souterraine de l'ordre de 24 m/jour. Plus l'eau sera de bonne qualité et moins il faudra de temps de circulation à l'eau pour s'épurer dans le sol, donc plus les forages de réinjection peuvent être proches des ouvrages d'exploitation.

Contexte hydrogéologique.

En nappe captive, la réinjection produira une onde de pression presque immédiate qui se répercutera sur l'ensemble de la nappe. Il faut cependant, pour bénéficier du maximum du volume injecté, se placer à un endroit où la nappe est relativement déprimée. En effet, plus la dénivellée entre le niveau de la nappe et la pression d'injection est grande et plus le volume d'eau que l'on pourra envoyer dans l'aquifère sera élevé.

On a intérêt à avoir des forages nombreux et espacés afin de répartir de façon uniforme la réalimentation et de ne pas faire chevaucher entre eux les cônes de réinjection.

Il faut remarquer qu'au cours du temps de réalimentation en raison de la diminution de l'écart entre le niveau de la nappe et le niveau du sol (niveau supposé de réinjection), il y aura une chute des débits possibles à injecter et cela en fonction d'une loi logarithmique.

Un dispositif d'injection sous pression peut être prévu si l'on veut se limiter à un nombre faible de forages.

Le diamètre utile des forages d'injection doit être important (500 mm au minimum) afin d'éviter les pertes de charge au niveau des ouvertures de crépine. Il faut diminuer la vitesse de l'eau à travers la crépine, soit en réduisant le débit d'injection, soit en augmentant le diamètre de l'ouvrage.

L'importance de la géologie.

On a remarqué, à la suite des travaux de reconnaissance (149), que les alluvions du Rû d'Echinghen étaient très importantes (15 m) et érodaient les calcaires du Séquanien. Pour bénéficier du maximum d'épaisseur de l'aquifère, il faut se placer de part et d'autre de la vallée du Rû d'Echinghen à sa jonction avec la Liane (forage 10-3-308).

Le prix de revient.

Les conduites d'amenée d'eau doivent être aussi courtes que possible afin de diminuer au maximum le

coût de l'opération et les pertes de charge. Les forages d'injection fonctionnent comme des forages d'exploitation en période d'étiage. Un raccordement sur le circuit de distribution est alors nécessaire. L'alternance du cycle injection-pompage est d'autre part conseillée pour éviter le colmatage des crépines et de l'aquifère au niveau de l'ouvrage (172).

c) L'injection d'un volume d'eau estimé à 4.10^6 m^3 dans le secteur de St-Léonard peut améliorer très rapidement les niveaux de la nappe captive avec l'apparition à long terme d'un palier d'injection. Il y aura alors recharge, dans un premier temps, de la nappe alluviale et des strates du Kimméridgien, puis de la nappe du Séquanien libre dans la partie amont des vallées de la Liane et du Rû d'Echinghen (fig. 125).

Les volumes de stockage peuvent être évalués grossièrement et sont reportés dans le tableau XXXV. Les calcaires du Séquanien et les alluvions grossières emmagasineront la majeure partie (94 %) du volume injecté.

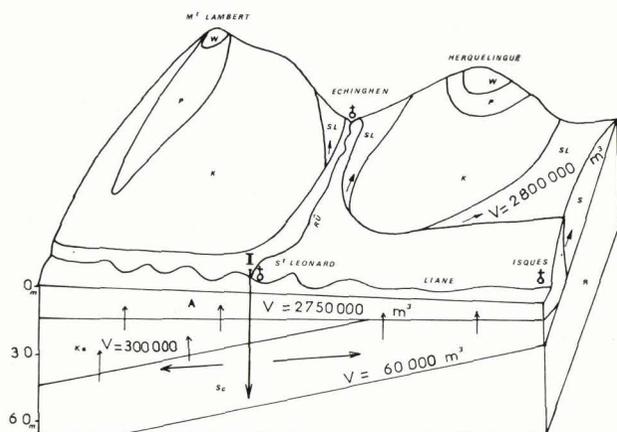


Fig. 125. — Schéma en bloc-diagramme des capacités de stockage des aquifères dans le secteur de Saint-Léonard (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 144).

A, alluvions. — W, Wealdien. — P, Portlandien. — K, Kimméridgien. — Ka, Kimméridgien altéré. — Sl, Séquanien en régime libre. — Sc, Séquanien en régime captif. — I, injection artificielle. — V, volume de stockage présumé.

d) Les prévisions de l'influence d'une injection dans la nappe, à court et long termes, sont effectuées à partir de l'ouvrage 10-3-308 réalisé en vue de l'injection. Nous utiliserons les données obtenues par le pompage effectué au débit de $241,8 \text{ m}^3/\text{h}$. Des prévisions de ce type ont déjà été envisagées par différents auteurs (185) pour un schéma différent.

En partant de l'hypothèse que la courbe de relèvement lors d'une injection est symétrique de la courbe de descente obtenue par un pompage à débit identique à celui que l'on veut injecter, il est possible de calculer l'influence de l'injection. On considérera que les pertes de charge à l'injection sont négligeables.

Comme nous possédons une courbe avec un palier, il est intéressant de noter les prélèvements en fonction de la distance au forage d'injection pendant ce palier. *Palier d'injection.*

Nous supposons que le temps de pompage de 2 à 4 heures est suffisant pour que s'établisse un équilibre entre le volume pompé et l'apport par drainance, ce qui se traduit par les paliers relevés sur les courbes de descente du forage testé et du point de surveillance 10-3-2 (fig. 122).

Nous utiliserons la méthode bilogarithmique symétrique de Jacob où le relèvement s'exprime de la manière suivante :

$$s = \frac{0,159 Q}{T} \cdot Ko(r/B) = 1,49 Ko(r/B)$$

avec :

Q = le débit d'injection, soit $241 \text{ m}^3/\text{h}$,

T = la transmissivité, soit $7,5.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,

Ko(r/B) = la fonction de Bessel modifiée de second degré et d'ordre zéro,

B = facteur de drainance calculé précédemment = 750 m.

Les diverses valeurs de relèvement obtenues à une distance croissante du forage sont données dans le tableau XXXVI et représentées dans la fig. 126.

Injection de longue durée.

Après le palier de courte durée, la courbe d'injection amorcera un relèvement de plus en plus important selon une hypothèse symétrique de Theis dans le schéma de Boulton. On établit alors en fonction du temps et de la

	Coefficient d'emmagasinement ¹	Surface (en km ²)	Epaisseur utile (en m)	Volume de stockage (en m ³)
Séquanien en régime captif ..	1.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻³	14 6	10 10	5 000 60 000
Séquanien en régime libre ...	1.10 ⁻²	5	20	2 800 000
Alluvions	1.10 ⁻² 1.10 ⁻¹	5 5	5 5	250 000 2 500 000
Kimméridgien inférieur altéré ..	1.10 ⁻²	3	10	300 000
TOTAL				5 915 000

Tableau XXXV. — Volumes d'eau stockables dans le sous-sol de la vallée de la Liane (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 144).

Distance en m (r)	Coefficient r/B	Fonction de Bessel Ko(r/B)	Relèvement en m (*)
100	0,133	2,16	3,07
150	0,200	1,75	2,45
250	0,333	1,28	1,79
475	0,633	0,74	1,04
500	0,666	0,70	0,98
720	0,96	0,45	0,63
750	1	0,42	0,59
787,50	1,050	0,39	0,54
1 000	1,33	0,28	0,39
1 250	1,67	0,17	0,23
1 275	1,70	0,16	0,22
1 500	2	0,11	0,15
2 500	3,33	0,024	0,033
3 750	5	0,003	0,004

(*) $s = 1,49 \cdot K_0(r/B)$.

Tableau XXXVI. — Relèvements calculés pendant le palier d'injection (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 145).

distance les divers relèvements calculés pour un milieu infini et sans barrière latérale.

La méthode de calcul suivante a été choisie :

— Calcul de la valeur de $u'1$ (argument de la fonction puits) pour plusieurs périodes (7, 10, 20, 30, 60, 90 et 120 jours) et diverses distances :

$$u'1 = \frac{4 T t}{S' r^2} = 15,4 \frac{t}{r^2}$$

avec :

T = transmissivité égale à $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,

S' = coefficient d'emmagasinement retardé égal à $1,94 \cdot 10^{-3}$.

— Recherche de la valeur de la fonction $F(u'1)$ par méthode graphique sur l'abaque de Boulton.

— Calcul de la valeur du relèvement s d'après

$$s = \frac{0,08 Q}{T} F(u'1)$$

avec Q = débit d'injection de $241,8 \text{ m}^3/\text{h}$.

L'ensemble des valeurs de relèvement est présenté sous forme d'un tableau XXXVII et d'un abaque (fig. 126).

Les calculs intermédiaires [$u'1$ et $F(u'1)$] ne sont pas reproduits ici et le nombre de jours maximal pris en compte est de 120 (4 mois), ce qui correspond à un débit d'injection total de 696.384 m^3 . Les prélèvements ont été calculés jusqu'à une distance de 3.750 km . On peut constater une amélioration intéressante des niveaux de la nappe jusqu'à des distances assez importantes. Nous ne pouvons pas, malheureusement, établir de telles relations pour la nappe des alluvions qui emmagasinera 95 % du débit injecté, ce qui y entraînera une remontée des niveaux ».

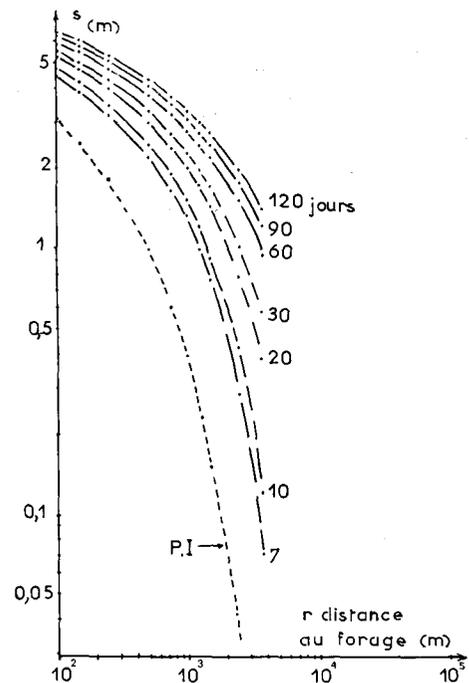


Fig. 126. — Répercussions de l'injection en fonction de la distance et du temps sur la nappe du Séquanien (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 145).

S (m), relèvements calculés en mètres. — r (m), distance au forage d'injection. — P.I., palier d'injection de courte durée.

d) Conclusions sur l'alimentation artificielle.

« L'étude du bilan hydrogéologique de la nappe du Séquanien montre un déficit local important de l'aquifère. Des pompages d'essai de longue durée et une surveillance étroite des variations piézométriques ont permis de mettre en évidence deux types de mécanisme hydrodynamique : ceux de Walton et ceux de Boulton. Ce dernier existe en bordure de la vallée, là où les alluvions possèdent une faible épaisseur. Au centre de la vallée, un drainage des alluvions vers le Séquanien semi-captif explique le schéma de Walton. L'ensemble de ces données permet une meilleure gestion des ressources et nous conduit à rechercher la solution de l'alimentation artificielle à partir d'eaux superficielles en période de crue, afin d'améliorer les stockages souterrains naturels de la nappe du Séquanien et de la nappe alluviale. Le forage d'injection de St-Léonard se situe dans un contexte hydrogéologique très favorable. Les débits soutirés par pompage sont de l'ordre de 250 m^3 par heure. L'analyse de descente montre un schéma de type Boulton avec drainance de la nappe des alluvions vers la nappe du Séquanien. Un contrôle du niveau de la nappe des alluvions supérieures y a montré un rabattement de $0,20 \text{ m}$ à une distance de 10 mètres , au bout de 72 heures . A partir des valeurs issues des essais de pompage, un abaque distance-temps a été établi afin d'estimer l'évolution spatio-temporelle du cône d'injection.

Jours	Distance		Forage	100	150	250	475	500	720	750	787,5	1000	1250	1275	1500	2500	3750
	Temps	m															
	en 10 ⁻⁶ sec.																
7	0,604		5,40	4,44	3,85	3,15	2,25	2,18	1,69	1,64	1,58	1,32	0,97	0,96	0,75	0,28	0,07
10	0,864		5,70	4,70	4,15	3,40	2,50	2,43	1,82	1,80	1,79	1,50	1,18	1,16	0,90	0,42	0,14
20	1,728		6,30	5,20	4,05	3,94	3,00	2,93	2,40	2,36	2,25	1,97	1,64	1,60	1,41	0,78	0,38
30	2,59		6,60	5,47	4,96	4,22	3,29	3,22	2,68	2,65	2,57	2,25	1,93	1,90	1,68	1,00	0,57
60	5,18		7,20	5,96	5,42	4,65	3,80	3,70	3,18	3,15	3,06	2,72	2,40	2,35	2,15	1,50	0,93
90	7,77		7,40	6,30	5,71	5,00	4,07	4,00	3,46	3,43	3,37	3,00	2,68	2,65	2,40	1,74	1,19
120	10,36		7,90	6,50	6,00	5,20	4,30	4,22	3,69	3,65	3,55	3,22	2,95	2,66	2,68	1,93	1,38

Tableau XXXVII. — Valeurs des relèvements à l'injection (en m) en fonction du temps et de la distance (Mania et Jacques Ricour, S.G.N., 1974, p. 146).

Le nombre maximal de jours pris en compte est de 120 (4 mois). Les relèvements ont été établis jusqu'à une distance de 3,750 km. L'estimation a été effectuée pour la phase courte du "palier d'injection" d'après une hypothèse de Jacob et pour une phase de longue durée selon la loi de Theis ».

II. — GESTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DU CALAISIS

Le modèle mathématique du Calaisis, calé en régime permanent, conduit à un bilan équilibré entre les apports hydrauliques (pluies, drainage, recharge par la rivière) et les débits sortants (pompages, artésianisme, émergences naturelles). Si l'on veut procéder à de nouveaux pompages, compte tenu de l'accroissement de la demande en Calaisis, il est possible de prévoir les fluctuations de la nappe ainsi que leurs répercussions pratiques sur les ouvrages déjà en activité. L'utilité des simulations réside aussi dans le fait qu'elles indiquent les secteurs hydrologiques sollicités en priorité et dont le potentiel d'appoint par la mise en place d'un mécanisme de transfert sera vérifié.

1) Exposé des problèmes.

Les liaisons hydrodynamiques entre les nappes superficielles et la nappe de la craie sont régies par un débit constant dès l'apparition du régime libre permanent dans la nappe sous-jacente. Nous nous placerons ainsi dans ces conditions strictes.

La région artésienne au Nord de Guines peut disparaître à la suite d'une baisse de 1 m de

la nappe de la craie, consécutive à des pompages plus intensifs, et provoquer la réduction de la superficie des marais actuels. Nous simulerons des situations telles que le débit critique des zones de pompage entraînera la disparition de l'artésianisme.

La piézométrie actuelle de la nappe (fig. 127) présente une vaste dépression s'étendant du Sud de Calais à l'Est de Guines (courbe piézométrique 0 m NGF) qui provoque un apport modéré des eaux marines stockées dans les dépôts côtiers (+ 3 l/s pour 8 mailles). Il irait en s'intensifiant si des pompages importants étaient effectués. Nous essaierons d'estimer ces débits qui, s'ils étaient trop élevés, induiraient une pollution saline en prévalence de la mer.

2) L'artésianisme du Marais de Guines.

Le débit de l'artésianisme est estimé à environ 50 l/s dans les modèles de simulation, compte tenu des pompages actuels (Chapitre 5). L'existence de cet artésianisme est vitale pour la pérennité du Marais de Guines dans sa partie étendue artificiellement par les creusements de nombreux forages. Nous pouvons être inquiets sur le devenir de ce marais en cas d'exploitation plus forte de la nappe de la craie et essayer d'appréhender la tolérance admissible d'un soutirage supplémentaire éventuel sur le champ captant de Guines.

Nous estimerons qu'un abaissement de 1 m de la nappe de la craie est la tolérance limite à partir de laquelle l'artésianisme risque de cesser sur le secteur englobant le Marais de

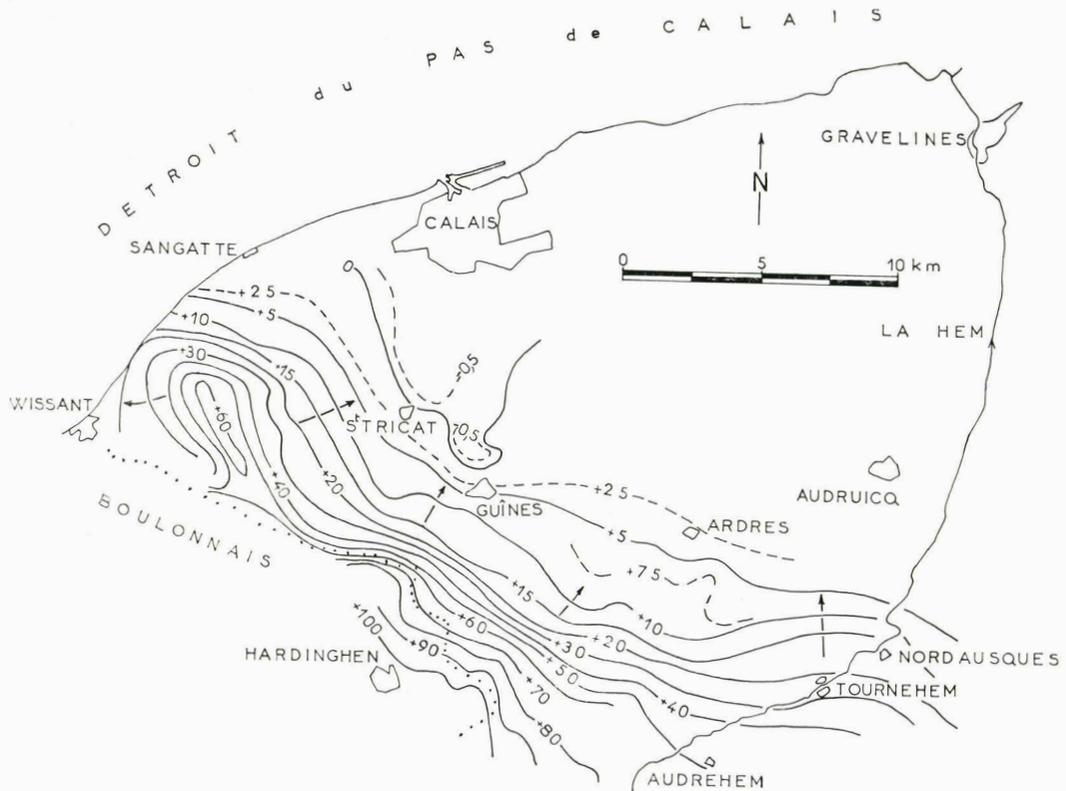


Fig. 127. — Etat hydrodynamique de la nappe de la craie en période de basses eaux (janvier 1972 à juin 1974). Calaisis (d'après Crémille et Mania, 1974, Rapport B.R.G.M., 74 SGN 367 NPA).

Guines, c'est-à-dire sur les mailles contrôles suivantes (fig. 128) : X 13/Y 16, X 13/Y 17 et X 13/Y 18.

Nous choisissons les champs captants de Guines et de St-Tricat, soit les mailles n° 1 (X 14/Y 13 : St-Tricat), n° 2 (X 13/Y 14 : E d'Hames Boucres), n° 3 (X 12/Y 14 : W de Guines), n° 4 (X 11/Y 14 : SW de Guines) et n° 5 (X 12/Y 16 : NE de Guines).

On aboutit à un soutirage supplémentaire permanent limite de 19,3 l/s (70 m³/h) sur le champ captant de St-Tricat qui s'avère être le moins contraignant vis-à-vis du Marais de Guines. La recherche de l'origine du débit supplémentaire et la comparaison avec le modèle calé (6^e hypothèse) conduit à un accroissement de 10 l/s des débits extérieurs entrants et à un abaissement de 10 l/s des débits extérieurs sortants.

Le débit extérieur entrant supérieur est issu de la rivière Hem qui alimenterait ainsi naturellement l'aquifère crayeux. Les débits extérieurs sortants affectent essentiellement les limites E et NE.

3) Optimisation des prélèvements.

Le but de l'optimisation consiste à choisir le site idéal de pompage, compte tenu de contraintes imposées sur d'autres sites déjà utilisés. La contrainte affectée est généralement un rabattement maximal tolérable sur l'ouvrage afin d'éviter un dénoyage de la partie supérieure de l'aquifère exploité.

Choix des captages et des contraintes.

Nous proposons quatre sites virtuels de pompage situés à l'Est de Guines (fig. 129) afin d'éviter une extension trop importante de la dépression piézométrique allant de Calais à

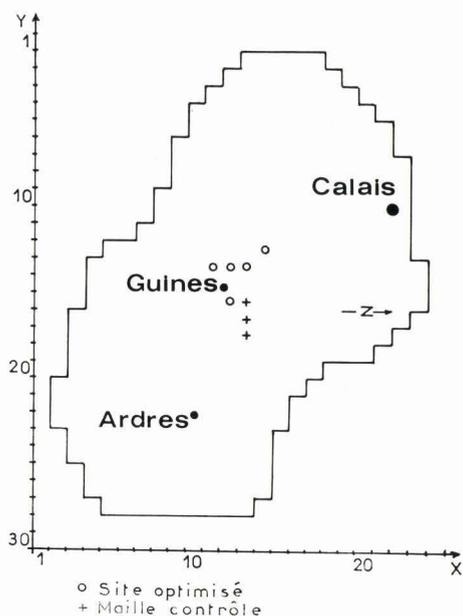


Fig. 128. — Optimisation des prélèvements avec pérennité de l'artésianisme du Marais de Guines. Situation des mailles contrôles et des sites fictifs d'optimisation. Calais.

Guines : n° 1 (X 10/Y 19 : S d'Ardres D 231), n° 2 (X 10/Y 21 : N de Brêmes), n° 3 (X 9/Y 24 : SE d'Ardres N 43) et n° 4 (X 13/Y 18 : E du Marais de Guines). Signalons la présence de bonnes caractéristiques hydrodynamiques dans le secteur allant de Guines à Ardres. Nous avons imposé des contraintes (sur 10 mailles contrôles) qui s'échelonnent entre des valeurs de rabattement de 1 et 10 m. Elles correspondent à la présence d'une dépression piézométrique qu'il ne faut pas faire croître et à des horizons aquifères d'épaisseur restreinte à ne pas dénoyer (chute du débit d'exploitation et abaissement exagéré du niveau de la nappe qui risquerait d'amener des eaux salées marines).

Après simulation, les meilleurs sites de captage sont représentés par les mailles X 10/Y 21 et X 9/Y 24, donc très à l'Est du champ captant de Guines (secteur d'Ardres). Le débit optimal global d'exploitation est de 55,6 l/s. L'accroissement du soutirage ainsi envisagé, et comparativement au bilan établi par le modèle de simulation (chap. 5), a pour origine des alimentations naturelles à partir de la Hem (+ 20 l/s), de la mer (+ 13 l/s) et des limites E et NE (23 l/s) à partir de l'interfluve Hem-Lys. Nous voyons ici les répercussions graves (invasion forte de

la nappe de la craie par des eaux salées) d'une surexploitation. La carte piézométrique restituée (fig. 130) montre un approfondissement de la dépression piézométrique qui passe de 0 à -2 m NGF. Une baisse généralisée (de 4 à 5 m) de la nappe est visible de la région de

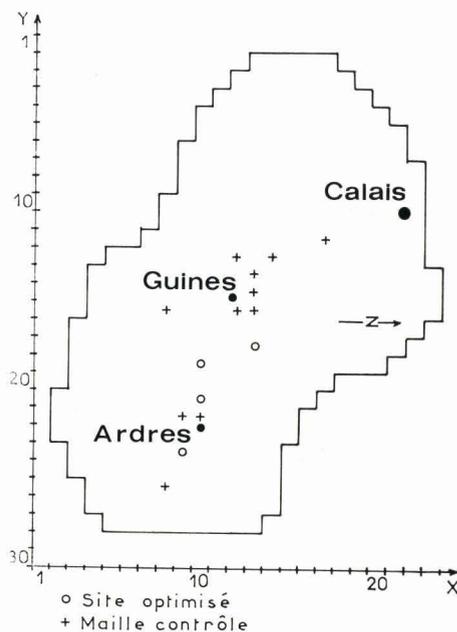


Fig. 129. — Optimisation des prélèvements dans la partie orientale du modèle. Calais.

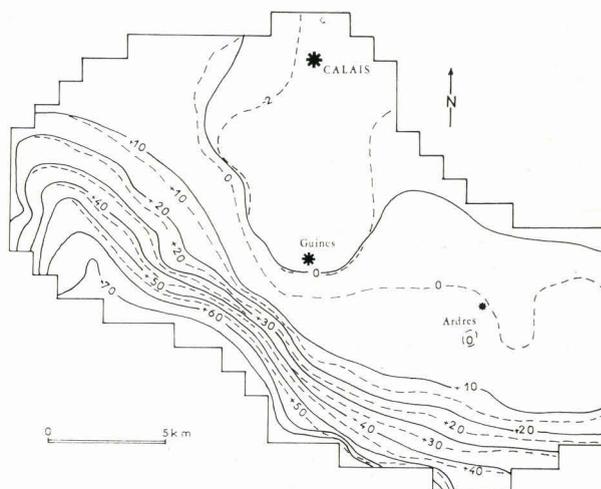


Fig. 130. — Comparaison entre les isopièzes calculées avant (trait plein) et après optimisation (traits discontinus). Cotes N.G.F. Calais.

Guines à la limite Est du modèle. Il faut noter l'existence d'une pollution par des eaux salées des captages industriels (Courtaulds) situés au S de Calais. Les forages réalisés autrefois à la craie dans la ville de Calais même ont fourni des eaux chlorurées sodiques (213). Au vu du contexte géologique, les relations de la nappe de la craie avec les eaux salées sont de deux types :

- un contact direct entre la craie et l'eau de mer en bordure du détroit du Pas-de-Calais ;

- une drainance verticale des eaux salées stockées dans les sables pissards et les anciens cordons littoraux (galets des Pierrettes) vers la nappe de la craie.

La réalisation d'une galerie de descente dans la craie sur 290 m à Sangatte, en vue d'acheminer le matériel de creusement du tunnel sous la Manche, a permis de montrer une relation linéaire (dans les limites de l'essai) entre le débit d'exhaure et la salure de l'eau de la nappe au cours du creusement (fig. 131). Un débit de 150 l/s entraîne ainsi une salinité de 18 g/l de ClNa.

4) Discussion et conclusions.

Nous venons de voir l'importance des alimentations naturelles en cas d'exploitation plus intensive de la nappe de la craie dans le Calaisis. Si les venues d'eaux salées, à partir des

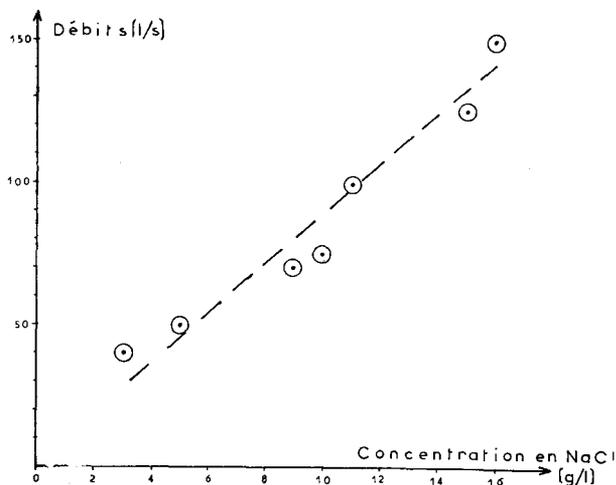


Fig. 131. — Evolution des concentrations en NaCl de l'eau pompée au cours du creusement de la descendrière du Tunnel sous la Manche à Sangatte en 1974. Calaisis. (d'après les données fournies par Gélinet, 1973).

dépôts alluvionnaires marins ou directement par venue marine, ne présentent pas de limitation au niveau des quantités, il n'en est pas de même pour la rivière Hem. Nous avons vu, dans le cadre du calage du modèle du Calaisis (Chapitre 5), que le débit de la rivière Hem était de 1,435 m³/s alors que l'alimentation naturelle provoquée par une surexploitation de la nappe serait de l'ordre de 62 l/s (50 + 12). L'importance respective des valeurs de débit montre qu'une alimentation de la nappe par la rivière est très possible. Une limitation en raison d'un colmatage des berges doit cependant exister.

L'orientation de la gestion de la nappe du Calaisis réside dans les points suivants :

- la pérennité du Marais de Guines par conservation de l'artésianisme ;

- la limitation des prélèvements en bordure de la côte afin d'éviter l'invasion de la nappe par les eaux marines ;

- une extension possible du champ captant dans le secteur d'Ardres afin de bénéficier au maximum d'une alimentation naturelle induite par la rivière Hem. Le débit exploitable serait d'environ 200 m³/h.

III. — GESTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DANS LES INTERFLUVES HEM - AA - LYS

La réalisation du modèle mathématique des bassins versants situés dans les interfluves Hem - Aa - Lys (Chapitre 5) a permis de dégager certains enseignements de haut intérêt pour une bonne utilisation des eaux souterraines. Ainsi, il apparaît que l'alimentation artificielle, déjà en cours depuis 1972 à Houlle, est nécessaire au maintien des niveaux de la nappe de la craie et en particulier à la conservation de la zone artésienne de Tilques située à mi-distance des champs captants de Houlle-Moulle et de Saint-Omer-Arques.

Les débits d'alimentation naturelle de 1972 à 1974 sont légèrement inférieurs aux prélèvements effectués dans le bassin versant audomarois. En outre, il existe actuellement des réserves en eau souterraine exploitables dans le bassin de la Lys. Les buts de la gestion qui sera entreprise seront les suivants :

- la prévision des répercussions d'une variation de l'alimentation artificielle sur l'état de la nappe,

- l'influence d'une période de hautes eaux sur les niveaux piézométriques,
- l'examen des modifications apportées au drainage des rivières,
- la recherche de nouveaux sites d'exploitation.

1) Répercussion des variations de l'alimentation sur la nappe.

L'exploitation intense de la nappe de la craie dans le bassin versant audomarois pose le problème de la quantité d'eau nécessaire au maintien du niveau de la nappe. Cette quantité ou ressource supplémentaire peut être constituée par l'alimentation artificielle, nécessairement modulée saisonnièrement en raison des variations de l'alimentation par la pluie efficace et la demande en eau souterraine. Un autre paramètre limitant est celui de la qualité des eaux superficielles que l'on désire infiltrer dans l'aquifère. Nous n'aborderons pas ici ce dernier point qui fait l'objet d'études en cours.

Jacques Ricour a examiné en 1975 (31) les répercussions de l'alimentation artificielle sur la nappe en fonction de l'alimentation naturelle en période de basses eaux et en hautes eaux. L'état de la zone artésienne de Tilques sera également abordée.

a) Alimentation artificielle en période de basses eaux.

L'étude de Jacques Ricour a montré (31) :

« En période de basses eaux de la nappe, les valeurs de pluie efficace oscillent entre 3 et 4 l/s/maille (0,81 km²). Dans le dernier calage du modèle, il a été injecté, au niveau du site de Moulle, un débit moyen de 216 l/s. En diminuant ce débit d'injection de 216 l/s à 130 l/s (valeur du mois d'avril 1972), on constate, par simulation, une chute brutale des niveaux d'environ huit mètres sur le site d'Houille-Moulle (fig. 132) et de trois mètres sur le site de Saint-Omer (fig. 133). La baisse traduit une extension importante des cônes de pompage qui se rejoignent et forment une vaste dépression de Nordausques à Arques. Les niveaux calculés à Tilques passent respectivement de -0,17 m NGF à -4,71 m NGF. Dans les faits, cela correspond à la suppression de la zone artésienne et par contre-coup, à l'arrêt de l'exploitation des cressonnières ».

b) Alimentation artificielle en période de hautes eaux (*).

« Nous avons utilisé des valeurs de pluie efficace allant de 5 à 7 l/s qui correspondent aux périodes pluvieuses du

(*) La simulation de la nappe en période de hautes eaux serait plus adéquate dans le cadre d'un modèle transitoire.

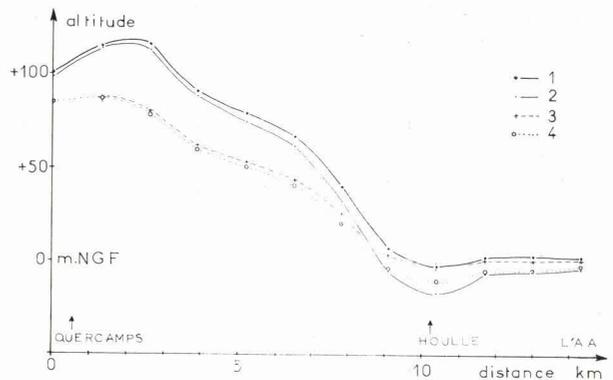


Fig. 132. — Profils piézométriques calculés par simulation entre Quercamps, Houille et le Canal de l'Aa. Hem, Aa, Lys. **Légende :** 1, hautes eaux, alimentation artificielle de 130 l/s. — 2, hautes eaux, alimentation artificielle = 0 l/s. — 3, basses eaux, alimentation artificielle de 216 l/s. — 4, basses eaux, alimentation artificielle de 130 l/s.

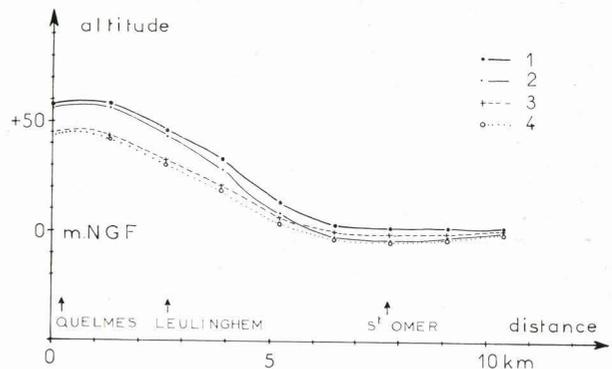


Fig. 133. — Profils piézométriques calculés par simulation entre Quelmes, Leulinghem et St-Omer. Hem, Aa, Lys. **Légende :** 1, hautes eaux, alimentation artificielle de 130 l/s. — 2, hautes eaux, alimentation artificielle = 0 l/s. — 3, basses eaux, alimentation artificielle de 216 l/s. — 4, basses eaux, alimentation artificielle de 130 l/s.

printemps et aux hautes eaux de la nappe. Les deux simulations ont été effectuées d'abord avec un débit d'alimentation artificielle nul afin de se rendre compte de l'influence de l'alimentation naturelle, puis au débit de 130 l/s.

— Comparaison avec la période de basses eaux.

On constate, par rapport à la période des basses eaux, un relèvement très important de la nappe, de 25 m, sur le plateau de Quercamps (fig. 132) et de 15 m sur le plateau de Leulinghem-Quelmes (fig. 133). C'est l'effet inverse qui se manifeste au niveau des champs captants où la baisse atteint environ 8 m à Houille-Moulle et 5 m à St-Omer-Arques (fig. 134).

— Influence des débits d'alimentation artificielle.

Si l'on n'enregistre que de légères variations sur le plateau, il n'en va pas de même au niveau des champs

captants où l'écart calculé atteint 15 m à Houlle-Moulle (fig. 132) et 5 m à St-Omer-Arques (fig. 133). Les chiffres obtenus par calcul montrent qu'une période de hautes eaux sans alimentation artificielle reste beaucoup plus catastrophique (au niveau du champ captant uniquement) qu'une période de basses eaux pendant laquelle une alimentation artificielle minimum est maintenue.

En ce qui concerne la zone de Tilques, les niveaux calculés atteignent $-4,58$ m NGF si le débit d'alimentation artificielle est annulé et, par contre, $+2,39$ m NGF s'il est maintenu à 130 l/s.

Ce dernier point très important suppose qu'il est nécessaire de toujours maintenir l'alimentation artificielle de la nappe. Une injection effective de 105 l/s suffirait à maintenir un niveau artésien minimum de $+1$ m NGF à Tilques ».

c) Autres conséquences.

« Les variations piézométriques consécutives à une modification des alimentations, qu'elles soient naturelles ou artificielles, entraînent des modifications au niveau des débits d'échange avec les rivières. Il est très intéressant à ce sujet de procéder à quelques comparaisons (tableau XXXVIII).

— Simulation en basses eaux.

Une diminution de 86 l/s du débit d'alimentation artificielle provoque un léger accroissement du débit d'alimentation naturelle de la nappe par l'Aa (24 l/s).

— Simulation en hautes eaux.

Par rapport à la période des basses eaux, une baisse sensible du débit d'alimentation naturelle de la nappe par l'Aa (de 224 à 142 l/s) est constatée. L'accroissement du débit d'alimentation artificielle aboutit à un résultat similaire avec des répercussions moins importantes (de 184 à 142 l/s). Des débits de fuite légers apparaissent en direction des vallées de la Hem (13 l/s) et de l'Aa (12 l/s) ».

2) Optimisation de la nappe - Recherche de nouveaux sites.

La grosse concentration des captages dans le secteur de Nordausques à St-Omer ne permet

Simulation	Basses eaux	Hautes eaux
Alimentation artificielle	216	130
Alimentation naturelle par l'Aa	200	224
Drainage par la nappe		
- la Hem	115	108
- l'Aa	249	233
- la Lys	141	140
- le Bléquin	14	14

Tableau XXXVIII. — Comparaison des débits d'échange en basses eaux et en hautes eaux. Hem, Aa, Lys. Les débits sont exprimés en litres par seconde.

(d'après Jacques Ricour, 1975. Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

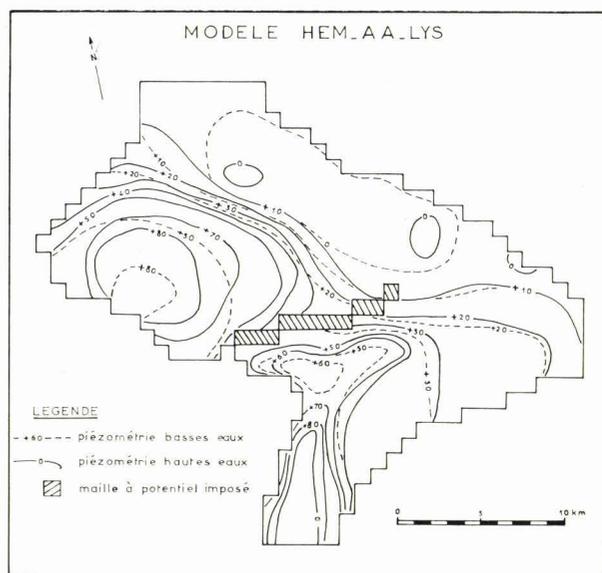


Fig. 134. — Comparaison des piézométries calculées en période de basses eaux et en période de hautes eaux. Les conditions d'alimentation artificielles étant identiques (130 l/s), (d'après Jacques Ricour, 1975, Rapport B.R.G.M., 75 SGN 039 NPA).

plus d'effectuer des prélèvements supplémentaires. Le seul secteur à caractéristiques hydrauliques valables et gardant encore de fortes ressources potentielles exploitables est celui des vallées de la Melde et de la Liauwette, toutes deux affluents de la Lys.

Nous allons essayer de dégager les sites les plus favorables à des prélèvements futurs tout en ménageant au maximum les niveaux de la nappe dans la région de Saint-Omer et des principaux lieux de cressiculture où l'artésianisme de la nappe ne doit pas être altéré. L'optimisation est réalisée pour une période de basses eaux et une alimentation artificielle de 130 l/s.

a) Première phase : Vallée de la Melde.

Trois sites peuvent être optimisés. Ils se situent dans une zone de transmissivité égale à 10^{-2} m²/s (fig. 135). Les caractères principaux de ces sites sont reportés au tableau XXXIX.

Ces sites, situés en zone captive de la nappe, peuvent être sollicités en raison de l'altitude basse du toit de l'aquifère (-10 à -23 m NGF) et des niveaux piézométriques relativement élevés ($+16$ à $+24$ m NGF).

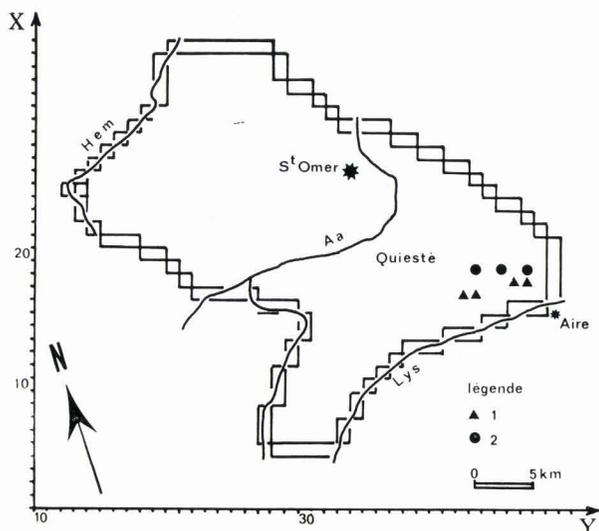


Fig. 135. — Schéma d'implantation des sites optimisés en première phase, puis en deuxième phase. Hem, Aa, Lys.
Légende : 1, sites de première phase. — 2, site de deuxième phase.

N°	Maille d'affectation	Niveau piézométrique	Toit de l'aquifère	Débit après optimisation
3	WITTES X 19 Y 47	+ 16	- 23	188 l/s
2	COHEM 19 Y 45	+ 22	- 15	0
1	QUIESTÈDE X 19 Y 43	+ 24	- 10	0

Tableau XXXIX. — Liste des mailles testées dans l'optimisation de première phase : Vallée de la Melde. Hem, Aa, Lys.

LIEU	MAILLE D'AFFECTATION	NIVEAU PIEZOMETRIQUE m NGF	TOIT DE L'AQUIFERE m NGF	CONTRAINTES IMPOSEES en m	CONTRAINTES CALCULEES APRES SIMULATION en m
PONT D'AQUIN	X 24 Y 44	0	- 45	5	0,73
St OMER	X 29 Y 35	+ 1	- 35	2	0,03
ROQUETOIRE	X 18 Y 43	+ 25	+ 2	13	3,37
RINCQ	X 16 Y 45	+ 21	0	2	1,32
LA JUNELLE	X 17 Y 46	+ 21	- 40	5	4,53
QUIESTÈDE	X 18 Y 40	+ 24	- 8	2	2,00

Tableau XL. — Liste des mailles contrôles dans l'optimisation de première phase : Vallée de la Melde, Hem, Aa, Lys.

Sept points de contrôle ont été choisis (dont deux des sites testés) afin d'imposer une contrainte physique aux exploitations projetées (tableau XL). Ces contraintes portent essentiellement sur les rabattements admissibles, en particulier dans les secteurs exploités de Saint-Omer, Pont d'Aquin et les régions cressonnnières de Quiestède et de Rincq. Sur ces dernières, des modifications modestes de la piézométrie peuvent conduire à l'arrêt de l'artésianisme.

Les résultats de première phase indiquent que seul le site de Wittes répond aux contraintes avec un débit relativement important de 188 l/s (676 m³/h). Les répercussions piézométriques de ce prélèvement virtuel sont faibles au niveau de St-Omer (3 cm) et de Pont d'Aquin (0,7 m) respectivement situés à 10 et 3 km de Wittes. La contrainte est maximale à Quiestède (2 m) mais moyenne à Rincq (1,32 m).

b) Deuxième phase : Vallée de la Liauwette.

Nous avons choisi quatre sites (fig. 135) répartis le long du cours de la Liauwette jusqu'aux abords de la localité d'Aire-sur-la-Lys et qui sont les suivants : Ligne, Roquetoire, La Jumelle et St-Martin (tableau XLI).

Ces sites sont implantés dans une zone de bonne transmissivité (10⁻² m²/s) et la nappe de la craie y possède un régime captif.

Les contraintes imposées (tableau XLII) doivent éviter l'abaissement exagéré des niveaux dans la vallée de la Lys où se sont développées des cressicultures ainsi qu'au niveau de Quiestède. Après optimisation, il apparaît que trois sites de pompage peuvent être retenus : Roque-

N°	LIEU	MAILLE D'AFFECTATION		NIVEAU PIEZOMETRIQUE m NGF	TOIT DE L'AQUIFERE m NGF	DEBIT OPTIMISE l/s
1	LIGNE	X 17	Y 42	+ 27	+ 20	2,5
2	ROUETOIRE	X 17	Y 43	+ 26	+ 15	64
3	LA JUELLE	X 18	Y 46	+ 21	- 10	0
4	St MARTIN	X 18	Y 47	+ 20	- 18	56

Tableau XLI. — Liste des mailles testées dans l'optimisation de deuxième phase : Vallée de la Liawette. Hem, Aa, Lys.

toire, avec un débit de 64 l/s (230 m³/h) ; Saint-Martin, avec 56 l/s (201 m³/h) ; et enfin Ligne avec 2,5 l/s (9 m³/h).

Les contraintes ont atteint des valeurs maximales de deux mètres sur les mailles de contrôle, sauf pour Rincq (0,87 m).

c) Bilan des débits d'échange.

La simulation nous montre que les débits supplémentaires optimisés proviennent en grande partie de la vallée de la Lys, de Mametz à Aire-sur-la-Lys. L'aquifère crayeux reste toujours dans des conditions strictes de captivité. En première phase, 83 % (156 l/s) du débit proviennent de la vallée de la Lys. En deuxième phase, cette proportion atteint encore 79 % (97 l/s). Ces chiffres s'appliquent à huit mailles situées sur la limite du modèle. Une alimentation de la nappe de la craie apparaît alors avec la mise en place d'une drainance verticale de la nappe des alluvions et des sables du Tertiaire, comme c'est le cas dans la vallée de l'Aa.

d) Conclusions.

Les vallées de la Melde et de la Liawette possèdent des ressources en eau souterraine exploitables respectivement de 188 l/s et de

123 l/s. Ces chiffres sont obtenus en imposant des contraintes qui assurent la pérennité des cressonnières moyennant une perturbation négligeable du champ captant de St-Omer.

Nous avons constaté que ces volumes d'eau souterraine avaient pour origine la vallée de la Lys, entre Mametz et Aire-sur-la-Lys, et qu'ils entraînaient logiquement l'apparition d'une drainance verticale de la nappe des alluvions et des sables tertiaires vers la nappe de la craie.

IV. — GESTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DU DOUAISIS

Nous avons, à l'aide du modèle mathématique, établi et équilibré le bilan hydrogéologique de la nappe de la craie du Douaisis. Il nous reste maintenant à exploiter le modèle calé, de manière à gérer au mieux les disponibilités de l'aquifère et de voir s'il n'y a pas possibilité de mobiliser de nouvelles ressources en eau par accroissement, par exemple, de l'alimentation accidentelle et naturelle des rivières ou en procédant à des alimentations artificielles à partir des eaux superficielles. Nous allons examiner tout d'abord la simulation des alimentations artificielles sur des sites donnés en exploitant le modèle mathématique, puis l'optimisation d'une exploitation supplémentaire de la nappe.

1) Exposé des problèmes.

L'accroissement des prélèvements en eau souterraine à des fins industrielles et urbaines provoque l'abaissement continu du niveau de la nappe. La demande, qui s'établissait à 4.10⁷ mètres cubes en 1970, est passée à 5,9.10⁷ m³ en 1973 et devrait atteindre 1,00.10⁸ m³ en 1980. Ce volume dépasse les possibilités d'exploita-

LIEU	MAILLE D'AFFECTATION		NIVEAU PIEZOMETRIQUE m NGF	TOIT DE L'AQUIFERE m NGF	CONTRAINTES IMPOSEES en m	CONTRAINTES CALCULEES APRES SIMULATION en m
GLOMENGHEM	X 16	Y 43	+ 24	+ 11	2	2,00
RINCQ	X 16	Y 45	+ 21	0	2	0,87
MOULIN-LE-COMTE	X 17	Y 46	+ 21	- 8	2	2,00
QUIESTEDE	X 18	Y 40	+ 24	- 8	2	2,00

Tableau XLII. — Liste des mailles contrôles dans l'optimisation de la deuxième phase : Vallée de la Liawette, Hem, Aa, Lys.

tion de la nappe et on envisage de procéder à une alimentation artificielle par injection ou infiltration d'eaux superficielles traitées au préalable. Les eaux superficielles seraient ainsi soutirées de la Scarpe dans le secteur de Corbehem. Une autre possibilité consisterait à utiliser les eaux de relevage des H.B.N.P.C. (dans le secteur de Dechy-Waziers-Lallaing) qui sont envoyées à la Scarpe au débit moyen de 12.10^9 mètres cubes par an. En ce qui concerne le champ captant de Corbehem, une étude préliminaire (184) financée par l'Agence de Bassin Artois-Picardie, a permis de mettre en évidence géographiquement deux secteurs d'alimentation particulièrement favorables, l'un à Férin (Maille X 9/Y 14) et l'autre à Brebières (Maille X 9/Y 6) afin de soutenir les niveaux de la nappe du champ captant de Corbehem-Férin (fig. 136).

Nous envisagerons également une alimentation artificielle en zone captive dans le Marais de Dechy (Maille X 14/Y 17) afin de soulager le champ captant de Pecquencourt (fig. 136).

2) Alimentations artificielles simulées.

a) Simulation à Férin (X 9/Y 14).

— Mise en œuvre et résultats.

Le site de Férin se situe à mi-distance des communes de Dechy et de Férin. La cote du sol est de + 43 m NGF et la cote imposée à la maille est de + 38 m NGF (soit 1 m au-dessous

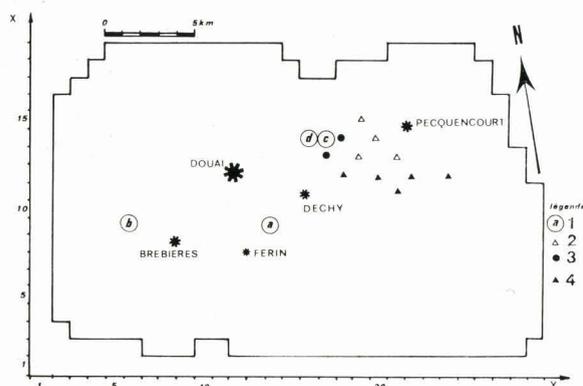


Fig. 136. — Position des puits d'optimisation dans le modèle du Douaisis.

Légende : 1, sites d'alimentation artificielle. — 2, puits fictifs optimisés en première phase. — 3, puits fictifs optimisés en première et deuxième phase. — 4, puits fictifs optimisés en deuxième phase.

de la limite craie-limons). Le débit simulé calculé et restitué par le modèle est de 272 l/s ($980 \text{ m}^3/\text{h}$), avec un relèvement de 13 m sur la maille concernée.

Il est important de calculer le niveau du relèvement sur l'ouvrage d'alimentation. Ce niveau sera plus important que sur l'ensemble de la maille concernée. On appliquera la formule de Dupuit suivante :

$$R = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{a}{r_p} - \frac{H}{2} \right)$$

(assimilation de la maille à un puits circulaire) où R représente le relèvement en mètres, Q le débit d'alimentation en m^3/s , soit $0,272 \text{ m}^3/\text{s}$, T la transmissivité en m^2/s , soit $1,5.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, a le côté de la maille en m, soit 1.000 m et r_p le rayon de l'ouvrage.

Ainsi, pour une fosse circulaire (*), d'alimentation de 50 m de rayon, le relèvement serait de 4,10 m, ce qui amène le niveau du plan d'eau à la limite du sol. Tout l'aquifère crayeux serait ainsi saturé. L'examen du relèvement pour un régime final stabilisé à différentes distances de la zone d'alimentation a été réalisé dans le tableau XLIII et reproduit sur la fig. 137. On constate que les relèvements calculés sur les secteurs déprimés de Corbehem-Courchelettes atteignent 6 m environ. Les captages de la vallée de l'Escrebieux accusent un relèvement de 3 m. L'effet de l'alimentation se fait sentir jusqu'aux champs captants de Pecquencourt ($R = 2 \text{ m}$) et de Waziers ($R = 4,7 \text{ m}$).

— Conséquences.

L'alimentation artificielle entraîne deux effets contradictoires sur la nappe :

— elle joue un rôle positif, car elle relève les niveaux des secteurs déficitaires, c'est ce qui a été démontré précédemment ;

— elle inhibe ou accroît respectivement les débits extérieurs d'entrée et de sortie.

Si l'on compare le bilan des entrées et des sorties au niveau des débits extérieurs avant et après alimentation (tabl. XLIV), on constate :

— une chute de l'alimentation naturelle par la Sensée (— 83 %) ;

— un accroissement des drainages de la nappe par les rivières (+ 132 % pour la Sensée

(*) pouvant être remplacée par une batterie de forages.

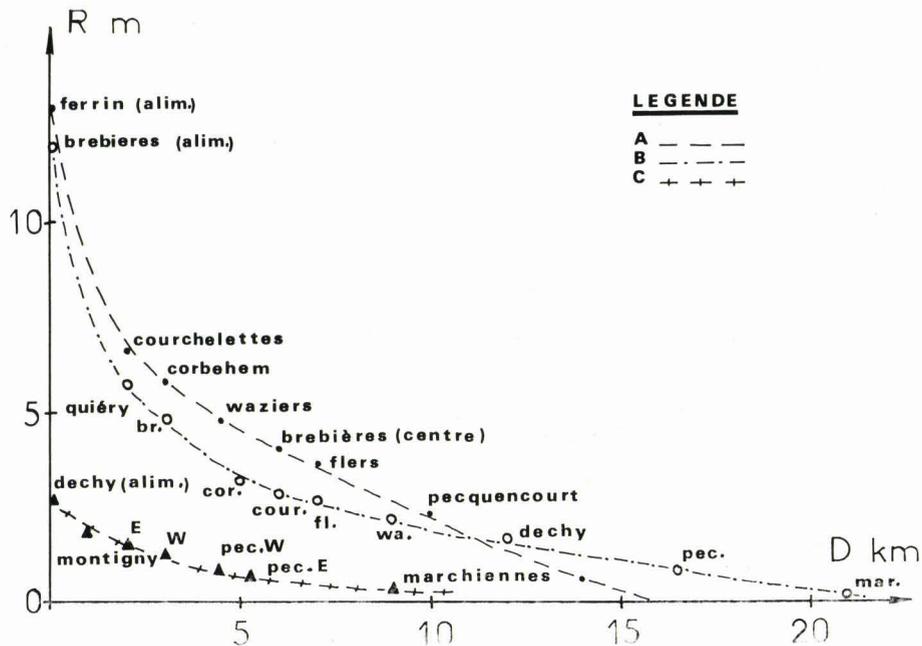


Fig. 137. — Comparaison des profils de relèvement en fonction de la distance pour des simulations d'alimentation artificielle à Férin et Brebières (Douaisis).

Légende : A, relèvements calculés à partir d'une alimentation artificielle à Férin $Q = 272 \text{ l/s}$. — B, relèvements calculés à partir d'une alimentation artificielle à Brebières ($Q = 200 \text{ l/s}$). — C, relèvements calculés à partir d'une alimentation artificielle au Marais de Dechy ($Q = 49 \text{ l/s}$). — R m, relèvements calculés en mètres. D km, distance à la maille d'observation.

inférieure et + 92 % pour la Scarpe supérieure) et des débits de fuite importants vers le N en direction du Bassin d'Orchies (+ 95 %). Ce dernier fait est très intéressant à noter car il permettra, si l'alimentation artificielle est réalisée, d'améliorer les prélèvements dans le secteur de Thumeries (sucrierie Béghin).

b) Simulation à Brebières (X 9/Y 6).

— Mise en œuvre et résultats.

Le site proposé est à mi-distance des communes de Quiéry-la-Motte et de Brebières au N de l'aérodrome de Vitry-en-Artois et en bordure de la route D 40. La cote du sol est d'environ + 44 m NGF et la cote de la nappe de + 30,75 m NGF. Une alimentation artificielle de 200 l/s ($720 \text{ m}^3/\text{h}$) provoque un relèvement de 12 m sur la maille concernée et au niveau de l'ouvrage (rayon de 100 m) un accroissement supplémentaire de 1,62 m. Ce qui amène l'altitude du plan

d'eau stabilisé à la cote du sol. La craie étant affleurante à cet endroit, tout le réservoir crayeux sera ainsi saturé. L'analyse des relèvements pour un régime final stabilisé à différentes distances de la zone d'alimentation a été réalisée dans le tableau XLV et reproduite sur la fig. 137. Les relèvements dans le secteur de Brebières-Corbehem atteignent 3 et 4,80 m.

— Conséquences.

Comme dans le cas de simulation précédent, on observe (tabl. XLVI) :

— une chute des débits d'alimentation naturelle par la Sensée supérieure (— 44%) qui est cependant plus basse que celle calculée dans la simulation de Férin (— 83 %) ;

— un accroissement des débits drainés par la Sensée inférieure (+ 13,6 %) et la Scarpe supérieure (+ 250 %) ainsi qu'une augmentation des débits de fuite aux limites.

LIEU	MAILLE X : Y	Cote du sol NGF	Cote de la nappe sur la maille (NGF) avant injection	Cote de la nappe sur la maille (NGF) après injection	Relèvement calculé sur la maille en m	Distance à la maille d'alimentation en km
FERIN	9 : 14	+ 38 *	+ 24,92	+ 38,00	13,08	0
COURCHELETTES	9 : 12	+ 35	+ 24,76	+ 31,37	6,61	2
CORBEHEM	9 : 11	+ 34	+ 24,74	+ 30,54	5,80	3
BREBIERES (centre)	8 : 8	+ 43	+ 29,98	+ 34,13	4,15	6
FLERS-EN-ESCREBIEUX	15 : 10	+ 23	+ 16,22	+ 19,85	3,63	7
QUIERY-LA-MOTTE	11 : 5	+ 40	+ 25,43	+ 28,49	3,06	6,250
PECQUENCOURT	16 : 21	+ 19	- 8,60	- 6,31	2,29	10
WAZIERS	13 : 14	+ 24	+ 13,26	+ 18,00	4,74	4,5
MARAIS-DE-DECHY	14 : 17	+ 18	+ 15,39	+ 19,45	4,06	6
MARCHIENNES	18 : 25	+ 16	+ 5,84	+ 6,41	0,57	14

(*) Cote imposée sur la maille d'alimentation artificielle.

Tableau XLIII. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Férin (Douaisis).

DEBITS D'ENTREE				DEBITS DE SORTIE			
Définition des entrées	Avant simulation	Après simulation	Ecart	Définition des sorties	Avant simulation	Après simulation	Ecart
1. Alimentation naturelle: par la Sensée sup.	70	12	58 (- 83%)	1. Drainage par les rivières - Sensée inférieure	44	102	58 (+132%)
				- Scarpe supérieure	25	48	23 (+ 92%)
2. Echanges aux limites				2. Echanges aux limites			
- au NE	30	25	5 (-16,8%)	- au N	80	156	76 (+ 95%)
- au NW	1	0	1 (-100%)	- au NE	32	44	12 (+37,5%)
TOTAL	101	37	64 (- 63%)	TOTAL	181	350	169 (+93,5%)

Tableau XLIV. — Modifications apportées aux valeurs des débits extérieurs d'entrée et de sortie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle à Férin (passage n° 31). Douaisis.

LIEU	MAILLE X : Y	Cote du sol NGF	Cote de la nappe sur la maille (NGF) avant injection	Cote de la nappe sur la maille (NGF) après injection	Relèvement calculé sur la maille en m	Distance à la maille d'alimentation en km
BREBIERES	9 : 6	+ 42,75	+ 30,75	+ 42,75	12	0
BREBIERES (centre)	8 : 8	+ 43	+ 29,98	+ 34,78	4,80	3
CORBEHEM	9 : 11	+ 34	+ 24,74	+ 27,87	3,13	5
COURCHELETTES	9 : 12	+ 35	+ 24,76	+ 27,62	2,86	6
FLERS-EN-ESCREBIEUX	15 : 10	+ 23	+ 16,22	+ 18,89	2,67	7
QUIERY-LA-MOTTE	11 : 5	+ 40	+ 25,43	+ 31,17	5,74	2
WAZIERS	13 : 14	+ 17	+ 13,26	+ 15,45	2,19	9
PECQUENCOURT	16 : 21	+ 19	- 8,60	- 7,80	0,80	16,5
MARAIS DE DECHY	14 : 17	+ 18	+ 15,39	+ 17,03	1,64	12
MARCHIENNES	18 : 25	+ 16	+ 5,84	+ 6,03	0,19	21

(*) Cote imposée sur la maille d'alimentation artificielle.

Tableau XLV. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Brebières (Douaisis).



— Comparaison des simulations de Férin et de Brebières.

Au niveau du bilan des échanges, il semble que le site de Brebières soit préférable à celui de Férin. En effet, sur le total des débits d'entrée, la chute n'est que de 33 % pour Brebières (contre 63 % pour Férin), et sur le total des débits de sortie, la baisse pour Brebières atteint 63,5 % contre 93,5 % à Férin. Si l'on se place sur le plan des relèvements à Corbehem, il apparaît qu'en raison de la proximité du site de Férin, ce dernier l'emporte sur le site de Brebières. L'influence de l'alimentation artificielle sur le site de Férin reste en général supérieure en valeur absolue à celle du site de Brebières avec cependant une répercussion moindre dans l'espace en raison de la distribution des valeurs de transmissivité.

Dans les deux cas considérés, la drainance des alluvions doit certainement diminuer en rai-

son du relèvement de la nappe de la craie, et entraîne de ce fait une diminution des débits d'entrée intérieurs.

Le calcul de la variation de la drainance suppose, dans le cas d'une drainance de type Hantush, la connaissance au préalable des valeurs du potentiel hydraulique de la couche alluvionnaire et de sa perméabilité verticale. Nous n'avons malheureusement aucune donnée actuelle qui permettrait l'ébauche d'un tel calcul.

c) Simulation au Marais de Dechy (X 14/Y 17).

— Mise en œuvre et résultats.

Le Marais de Dechy est situé à mi-distance de Lallaing et de Sin-le-Noble. La cote au sol du Marais de Dechy est d'environ + 18 m NGF et le niveau de la nappe de la craie vers + 15,40 m NGF. Le faible écart (2,60 m) existant entre le sol et la nappe ne permet pas un débit

DEBITS D'ENTREE				DEBITS DE SORTIE			
Définition des entrées	Avant alimentation	Après alimentation	Ecart	Définition des sorties	Avant alimentation	Après alimentation	Ecart
1. Alimentation naturelle par la Sensée sup.	70	39	31 (- 44%)	1. Drainage par les rivières - Sensée inférieure	44	50	6 (+13,6%)
				- Scarpe supérieure	25	88	63 (+250%)
2. Echanges aux limites - au NE	30	28	2 (- 6,6%)	2. Echanges aux limites - au N	80	122	42 (+ 52%)
- au NW	1	0	1 (-100%)	- au NE	32	36	4 (+12,5%)
TOTAL	101	67	34 (- 33%)	TOTAL	181	296	115 (63,5%)

Tableau XLVI. — Modifications apportées aux valeurs des débits extérieurs d'entrée et de sortie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle à Brebières (passage n° 32). Douaisis.

LIEU	MAILLE		Cote du sol NGF	Cote de la nappe sur la maille (NGF)		Relèvement calculé sur la maille en m	Distance à la maille d'alimentation en km
	X	Y		avant injection	après injection		
MARAI DE DECHY	14	17	+ 18	+ 15,40	+ 18	2,60	0
DECHY	14	18	+ 18	+ 15,50	+ 17,34	1,84	1
MONTIGNY W	14	19	+ 20	+ 15,20	+ 16,65	1,45	2
MONTIGNY E	15	20	+ 19	+ 8,22	+ 9,36	1,14	3
PECQUENCOURT W	16	21	+ 19	- 8,60	- 7,80	0,80	4,50
PECQUENCOURT E	16	22	+ 17	- 5,85	- 5,20	0,65	5,25
MARCHIENNES	18	25	+ 16	+ 5,84	+ 6,00	0,26	9

Tableau XLVII. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Dechy (Douaisis).

d'alimentation important. En effet, après exploitation (passage n° 33), il s'avère que le débit d'alimentation atteint 49 l/s (176 m³/h ou 1,52.10⁶ mètres cubes par an), ce chiffre est 8 fois plus faible que le débit d'alimentation que l'on se proposait d'injecter. Les relèvements calculés sont présentés dans le tabl. XLVII. Les valeurs sont basses au niveau du champ captant de Pecquencourt (0,65 à 0,80 m).

— *Conclusion.*

Il semble nécessaire d'utiliser plusieurs sites de réinjection, en particulier au Marais de Sin-le-Noble (Maille X 14/Y 16). Le débit d'alimentation artificielle simulé a été ainsi porté pour deux mailles à 65 l/s (234 m³/h ou 2.10⁶ m³/an).

Il apparaît donc que les sites de Dechy et de Sin-le-Noble sont peu favorables à une injection massive dans l'état actuel de la nappe (régime captif, niveau et exploitation). Il serait cependant possible de remédier à ces difficultés en opérant de la manière suivante :

Première étape : On réalisera autour de ces sites une batterie de puits qui exploitera la nappe de manière intensive jusqu'à son dénoyage afin de créer un réservoir crayeux non saturé sur 5 à 6 km². Pendant ce temps-là, les captages de Pecquencourt seraient mis à l'arrêt.

Deuxième étape : L'injection artificielle démarrerait alors en utilisant soit la batterie de puits précédente, soit de nouveaux ouvrages, le champ captant de Pecquencourt fonctionnant dès le début de cette alimentation. Ces processus seraient répétés alternativement en fonction des apports d'eaux superficielles (importantes en automne et en hiver). Les sites de Dechy - Sin-le-Noble serviraient de lieu de stockage temporaire avec un rôle d'épuration ou plutôt d'affinage physico-chimique des eaux injectées.

3) **Optimisation.**

a) *Introduction.*

L'objectif de l'optimisation est de rendre maximal le débit global exploitable compte tenu des limites dues aux rabattements admissibles. Nous utiliserons le programme OPPER, établi par Vandenberg (72), qui nécessite les jeux de données du modèle permanent.

b) *Choix des captages - contraintes.*

Nous avons vu dans le calage du modèle permanent du Douaisis que le champ captant

de Pecquencourt était situé dans une zone à transmissivité médiocre (1,5.10⁻³ m²/s). Nous allons essayer de rechercher sur une bande parallèle à la limite de captivité les positions optimales d'ouvrages futurs et de leurs débits d'exploitation, compte tenu d'une contrainte sur les rabattements d'autres ouvrages.

Nous n'avons pas recherché d'autres sites d'exploitation dans les secteurs de Corbehem ou de l'Escrebieux à cause de la surexploitation de la nappe.

— *Dans une première phase,* nous sommes partis de 6 puits fictifs pour l'exploitation et de 13 mailles de contrôle. Deux essais seront effectués avec des contraintes différentes.

— *Dans une seconde phase,* on retiendra les ouvrages sélectionnés précédemment et on y ajoutera d'autres sites. Les essais seront réalisés avec 7 puits.

— *Première phase (passages n° 1 et 2).*

La liste des puits d'exploitation est la suivante : Marais de Dechy (X 13/Y 17), Montigny W (X 14/Y 19), Montigny E (X 13/Y 21), Lallaing S (X 14/Y 16), Montigny N (X 14/Y 18) et Lallaing E (X 15/Y 19).

Les mailles contrôles avec les rabattements maximaux tolérés par essai sont présentées dans le tableau XLVIII.

N°	LIEU	MAILLE : CONTRAINTES EN METRES			
		X	Y	1er essai	2ème essai
1	WAZIERS W	15	16	2,50	5,00
2	RACHES	16	16	2,50	5,00
3	PECQUENCOURT	16	21	1,25	2,50
4	PECQUENCOURT	16	22	1,25	2,50
5	DORIGNIES	16	12	2,00	4,00
6	FLERS-EN-ESCREBIEUX	15	10	2,50	5,00
7	CUINCY	13	9	2,50	5,00
8	ESQUERCHIN	12	8	2,50	5,00
9	QUIERY	11	5	2,50	5,00
10	WAZIERS S	13	14	2,50	5,00
11	DOUAI	12	13	2,50	5,00
12	SIN-LE-NOBLE	12	16	2,50	5,00
13	CORBEHEM	8	10	2,50	5,00

Tableau XLVIII. — Mailles contrôles choisies dans la première phase de l'optimisation des ressources du Douaisis.

Après calcul des rabattements sur chaque maille contrôle pour un débit unitaire de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ appliqué tour à tour pour chaque puits d'exploitation, le programme maximise les débits prélevés pour des rabattements inférieurs ou égaux aux contraintes imposées.

Les résultats pour l'exploitation optimale sont reportés dans le tableau XLIX.

Seuls, deux ouvrages ont été retenus à chaque fois : ceux du Marais de Dechy et ceux de Lallaing S. Si l'on examine les bilans des débits extérieurs d'entrée et de sortie, on s'aperçoit que c'est la rivière de la Sensée qui doit théoriquement fournir les quantités d'eau demandées dans une proportion de 50 %. Il y a, d'autre part, réduction des débits de fuite au N vers le bassin d'Orchies et vers le SW à Biache-Saint-Vaast (Scarpe supérieure).

— Deuxième phase (passages n° 3 et 4).

Nous avons repris les deux ouvrages optimisés précédemment et cinq autres situés beaucoup plus près de la limite de captivité dans des secteurs à transmissivité plus favorable.

La liste des puits d'exploitation est reportée au tableau L.

N°	PUITS		DEBIT OPTIMAL			
	LIEU	MAILLE	1er essai		2ème essai	
		X : Y	L/s : m^3/h	L/s : m^3/h	L/s : m^3/h	L/s : m^3/h
1	Marais de Dechy	13 : 17	47	170	94	339
4	Lallaing S	14 : 16	40	144	80	287
TOTAL			87	314	174	626

Tableau XLIX. — Résultats de l'optimisation en première phase des ressources dans le Douaisis.

N°	LIEU	MAILLE	RESULTATS OPTIMISES	
			DEBITS EN L/s	
			1er essai	2ème essai
1	Marais de Dechy	13 : 17	47	
2	Lallaing S	14 : 16	40	18
3	Masny	11 : 21	0	20
4	Guesnain N	12 : 18	0	0
5	Montigny S	12 : 20	0	0
6	Ecaillon	12 : 22	0	0
7	Bruille	12 : 24	0	16

Tableau L. — Puits d'exploitation optimisés en deuxième phase dans le Douaisis.

Les mailles contrôles sont les mêmes que celles utilisées en première phase. Deux essais ont été réalisés, l'un avec des contraintes identiques à celle du premier essai de la première phase et l'autre avec des contraintes égales à 1 m de façon uniforme sur les 13 mailles contrôles.

Premier essai : l'optimisation aboutit au choix des puits n° 1 et n° 2 débitant respectivement 47 l/s et 40 l/s , donc des débits identiques à ceux du premier essai de la première phase.

Deuxième essai : les contraintes ont été modifiées (1 m) et l'optimisation aboutit à la sélection de 3 puits d'exploitation : n°s 2, 3 et 7, soit les sites de Lallaing S, Masny et Bruille S. Le débit total d'exploitation passe du premier essai de 87 l/s ($313 \text{ m}^3/\text{h}$) à 54 l/s ($194 \text{ m}^3/\text{h}$) au deuxième essai.

Pour des contraintes comparables en première et deuxième phase, deux sites futurs d'exploitation apparaissent en zone captive : le Marais de Dechy et le S de Lallaing. Les essais d'optimisation ont montré en outre que la sollicitation de la Sensée était très forte pour fournir l'appoint en eau (50 % des débits).

4) Conclusions.

Le modèle du Douaisis a été exploité afin de voir la répercussion sur la nappe des futures alimentations artificielles et de prévoir leurs influences sur le bilan d'ensemble de la nappe. Il apparaît ainsi que :

— les débits d'entrée à partir de la Sensée supérieure sont très fortement réduits ;

— la nappe de la craie est drainée plus intensivement dans les secteurs de la Scarpe supérieure et de la Sensée inférieure ;

— des débits de fuite vers le bassin d'Orchies se manifestent.

Le site de Dechy - Sin-le-Noble, qui a également été testé, montre que le débit d'injection reste très faible vis-à-vis des disponibilités existantes. Il faut prévoir un système mixte de pompage et d'injection pour dénoyer l'aquifère crayeux puis ensuite pour le remplir.

L'optimisation de futurs ouvrages a montré qu'il existait des sites particulièrement intéressés.

(*) La simulation conjointe de l'alimentation artificielle et de l'optimisation des sites peut conduire à des informations complémentaires intéressantes.

sants du point de vue exploitation : le S de Lallaing et l'W de Montigny. Les débits soutirés (300 à 600 m³/h) seraient fournis en grande partie par une alimentation naturelle plus importante de la Sensée supérieure.

V. — GESTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DANS LE BASSIN DE LA DEÛLE

Nous avons constaté, à la suite du calage du modèle mathématique Deûle-Scarpe et de l'établissement du bilan de la nappe de la craie, qu'il existait un déséquilibre net dans le bassin de la Deûle entre les apports des précipitations (205 l/s) et les prélèvements d'eau souterraine (1.369 l/s). Il s'est ainsi avéré nécessaire de faire appel à des mécanismes hydrodynamiques comme celui de la drainance de la nappe alluviale et la perte des canaux. La drainance est vérifiée par les pompages d'essai et par l'examen physico-chimique des eaux souterraines (196). En effet, la dégradation des eaux superficielles (rejets des eaux usées urbaines et industrielles) s'est étendue progressivement à la nappe semi-captive de la craie. Les pertes des canaux, en l'absence de jaugeages valables, sont moins évidentes et ne se manifestent que très localement le long du cours par le chimisme particulier des eaux souterraines (présence d'ammonium).

L'Agence de l'Eau Artois-Picardie envisage, dans le cadre de l'aménagement du Parc de la Deûle, de procéder à une amélioration des qualités de l'eau du canal de la Deûle en créant sur sa rive droite des étangs d'autoépuration. Ces bassins seraient creusés à travers les alluvions jusqu'au toit de la craie et permettraient l'alimentation artificielle de la nappe de la craie.

Une étude de reconnaissance géologique du sous-sol crayeux ainsi que du recouvrement tertiaire et alluvionnaire de la vallée de la Deûle a été entreprise dans une première étape en 1972 par Debuissou (176) pour définir les zones d'implantation des futurs sites d'alimentation artificielle.

Dans une deuxième étape, un essai d'infiltration expérimentale a été tenté à Annœullin en 1972 par Ramon (182) sur un bassin pilote de petite dimension. Le débit d'infiltration est de l'ordre de 0,5 à 0,8 m³/h par m² de bassin pour des charges respectives sur le fond de 0,7 et 1 m.

Enfin, la réalisation du modèle mathématique permet d'envisager les répercussions d'une alimentation artificielle sur les niveaux de la nappe.

1) Résultats de la simulation d'une alimentation artificielle.

Nous supposons au départ que les bassins d'infiltration touchent effectivement le sommet de l'aquifère crayeux.

Quatre mailles ont été choisies (fig. 138) pour la représentation des bassins d'infiltration et le niveau du plan d'eau a été fixé à + 19 m NGF de manière constante alors que la cote du sol naturel y oscille entre + 20 et + 21 m NGF.

a) Répercussions sur la piézométrie de la nappe.

Nous avons représenté sur la fig. 138 l'état piézométrique initial de la nappe puis celui obtenu après simulation de l'alimentation artificielle. Les relèvements suivants sont observés : de 5 à 7,5 m entre Wavrin, Gondecourt et Houplin-Ancoisne, puis de 2,5 m à Seclin, Haubourdin et Annœullin.

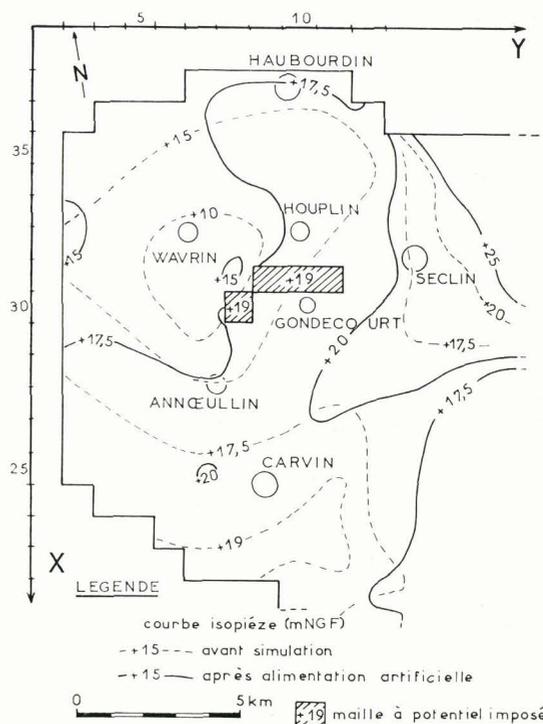


Fig. 138. — Résultats de la simulation d'une alimentation artificielle dans la vallée de la Deûle. Comparaison entre les piézométries calculées avant et après alimentation.

b) *Débits calculés.*

La simulation montre une grande variation des débits d'infiltration qui deviennent d'autant plus élevés que la dénivellation entre la nappe et le plan d'eau fictif est forte (tabl. LI). Une maille (X = 31, Y = 11) montre même un débit nul en raison d'une transmissivité légèrement inférieure à celle des autres mailles. Les sites d'Annœullin et d'Allennes sont apparemment plus intéressants en raison des débits mobilisés. La valeur du débit obtenu à l'aide de la simulation s'avère inférieure à celle extrapolée à partir du bassin d'infiltration expérimentale d'Annœullin (100.000 m³/j par hectare de bassin, soit encore 1.157 l/s/ha). Si l'on retient les deux seuls sites précités, le modèle ne nous restitue que 363 l/s pour 200 hectares (2 mailles). Cette différence est due essentiellement au fait que nous comparons un essai d'infiltration expérimentale à régime transitoire de très courte durée (deux jours) et une simulation en régime permanent.

Dans la réalité, les volumes injectés seront sans doute très importants (500.000 m³/j prévus) dans les premiers jours de l'alimentation, puis décroîtront fortement au fur et à mesure que l'on se rapprochera d'un régime stabilisé pour atteindre le débit moyen de 385 l/s.

2) **Conclusions.**

L'alimentation artificielle inhibera les mécanismes de la drainage actuelle des alluvions et des pertes du canal qui entraînent, en raison de la mauvaise qualité des eaux superficielles, une dégradation accrue de la nappe. Le processus recherché permettra une amélioration des caractéristiques physico-chimiques de la nappe de la craie et contribuera à une meilleure gestion intégrée des ressources en eaux superficielles

COMMUNE	MAILLE		VALEUR DE LA TRANSMISSIVITE en m ² /s	ALTITUDE DE LA NAPPE AVANT INFILTRATION	DEBIT CALCULE en l/s
	X	Y			
ANNOEULLIN	30	8	3.10 ⁻²	+ 10	+ 200
ALLENNES	31	9	3.10 ⁻²	+ 10,6	+ 163
HERRIN	31	10	3.10 ⁻²	+ 12,7	+ 22
GONDECOURT	31	11	2.10 ⁻²	+ 14	0
TOTAL					+ 385

Tableau LI. — Mailles choisies dans le cadre d'une alimentation artificielle de la nappe de la craie dans le parc de la Deûle.

et en eaux souterraines. Seuls les projets d'épuration des eaux des canaux avec un affinage biochimique lors de l'infiltration à travers le sous-sol permettront à la région de bénéficier des ressources en eaux superficielles.

VI. — **GESTION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DANS LE BASSIN DU BAS-ESCAUT**

La réalisation du modèle mathématique en régime permanent de la nappe de la craie dans le bassin du Bas-Escaut nous amène à réfléchir sur quelques points particuliers des résultats. En effet, il apparaît qu'un débit important en provenance des stations de relevage des Houillères Nationales est soutiré dans la nappe superficielle et par contrecoup dans la nappe de la craie. L'arrêt des activités minières à moyen terme va conduire vraisemblablement à l'abandon des stations et il est dès lors nécessaire d'apprécier l'influence d'un tel fait sur les niveaux de la nappe.

Sur le plan des distributions spatiales des valeurs de transmissivité, il est apparu que l'un des plus gros champs captants : celui de Vicq, est implanté dans une zone à transmissivité médiocre. il serait logique d'entrevoir dans l'avenir une implantation des captages plus méridionale sur l'axe Valenciennes-Onnaing-Quévrechain-Mons. Nous envisageons de gérer la nappe en considérant successivement les étapes suivantes :

- arrêt des stations de relevage des Houillères Nationales,
- pompage accru sur de nouveaux forages de manière à retrouver un état piézométrique proche du précédent.

Dans un autre cas de figure, nous rechercherons les effets d'un stockage d'eaux de surface dans l'aquifère. Ce stockage a pour but de régulariser le débit de l'Aunelle en période de hautes eaux et, en même temps, de soutenir les niveaux de la nappe au droit des champs captants.

1) **Répercussions de l'arrêt des stations de relevage des H.B.N.P.C.**

La simulation de l'arrêt des prélèvements des Houillères Nationales permet de nous indiquer l'ampleur des relèvements de la nappe.

Nous avons reporté dans le tableau LII les valeurs piézométriques pendant la période de fonctionnement des ouvrages puis, après l'arrêt de leur activité. Les relèvements déduits semblent importants et peuvent osciller entre 5 et 8 m. Le champ captant de Vicq voit un relèvement de 2,65 m. Le niveau piézométrique s'établira à une profondeur faible sous le sol en raison des altitudes basses de la région (entre + 20 et + 24 m NGF). Des inondations sont à craindre dans les zones d'affaissement minier et il sera nécessaire soit de laisser les stations de relevage en activité, soit d'intensifier les prélèvements sur les captages actuels (ce qui est pratiquement difficile en raison d'une sur-exploitation des ouvrages) ou alors à partir de nouveaux forages à réaliser dans un secteur de bonne transmissivité (ligne Valenciennes-Onnaing-Quévrecrain). C'est ce qui sera tenté dans le paragraphe suivant.

2) Recherche de nouveaux sites de pompage.

La recherche de nouveaux sites de pompage doit à la fois permettre la mise en valeur de nouveaux secteurs à transmissivité meilleure (axe Valenciennes-Quévrecrain) et atténuer si possible le relèvement piézométrique issu de l'arrêt de l'exploitation des stations de relevage des H.B.N.P.C.

Quatre sites sont proposés (tableau LIII).

Stations de relevage HBNPC	Maille : X : Y	Charge simulée en m : en activité	Charge simulée en m : en arrêt	Débit : en l/s	Relèvement calculé en m
Fosse Ledoux	13 : 4	9,45	17,54	85	8,09
Fosse St Pierre	12 : 6	10,30	17,88	15	7,58
Putemont	9 : 10	15,53	21,80	10	6,27
Escautpont	8 : 11	16,26	22,98	10	6,72
St Saulve	9 : 12	16,39	23,10	8	6,71
Les Prés n° 1	9 : 13	17,00	23,55	15	6,55
n° 2	8 : 14	17,22	23,80	25	6,58
Bruay n° 1	5 : 15	16,00	21,83	18	5,87
n° 2	5 : 16	16,97	21,80	35	4,97

Tableau LII. — Relèvement piézométrique calculé après simulation de l'arrêt des stations de relevage des Houillères Nationales. (Bas-Escaut).

puits	lieu	maille	Débit après optimisation
1	Onnaing W	X 7 Y 15	9,75 l/s
2	Onnaing S	X 10 Y 16	0
3	Quarouble	X 14 Y 15	0
4	Blanc Misseron	X 15 Y 13	105 l/s

Tableau LIII. — Sites optimisés dans le modèle du Bas-Escaut.

Nous prenons comme mailles de contrôle celles où existent des stations de relevage des H.B.N.P.C. (fig. 139). Les rabattements limites affichés sont équivalents aux valeurs de relèvement calculées au tableau LII. Deux mailles de contrôle supplémentaires sur le champ captant de Vicq (X 13, Y 12) et les ouvrages industriels de Blanc-Misseron (X 16, Y 13) sont mises en place avec des contraintes de 5 m. Les résultats de l'optimisation conduisent au choix des puits n° 1 et n° 4 avec des débits d'exploitation respectifs de 9,75 et 105 l/s.

Le calcul des contraintes après optimisation (tabl. LIV) montre que seuls les secteurs de la fosse Ledoux et de la fosse St-Pierre ne verront pas une baisse importante du niveau piézométrique. Dans ces deux secteurs, un pompage devra donc être maintenu. Sur le plan économique, nous voyons que l'optimisation entraîne l'arrêt de huit stations de relevage sur dix dans la mesure où le futur champ captant de Blanc-Misseron est mis en valeur au débit de 105 l/s (378 m³/h.).

3) Alimentation artificielle.

La régulation du débit de l'Aunelle et du canal de l'Escaut peut être réalisée en période de crue (automne à printemps) en stockant les eaux de surface dans le sous-sol crayeux. Cet appoint aux débits d'alimentation naturelle de la nappe de la craie permettra également d'augmenter artificiellement les réserves en eau souterraine. Après l'établissement d'une méthode de recherche systématique de sites favorables à l'alimentation artificielle (173), l'implantation de tels sites de stockage a été effectuée dans le Valenciennois (174). Les zones les plus favorables (épaisseur de craie sèche maximale) ont été définies dans le secteur d'Estreux. Cependant, l'éloignement de ce site vis-à-vis des champs captants de Vicq et de Fresnes-sur-Escaut est important, d'où la nécessité de choisir des secteurs plus proches afin de faire diminuer les temps de transfert des écoulements souterrains. Les trois sites (fig. 139) situés respectivement à Saint-Saulve (Le Bas Marais), Rombies (Petit Rétian) et Quévrecrain (La Polka) se trouvent à proximité de la limite de captivité de la nappe afin de provoquer, à la suite de l'alimentation artificielle, une remontée très rapide des niveaux de la nappe. Nous y avons simulé les alimentations artificielles au débit moyen de 100 l/s (1,55.10⁶ m³/semestre), et cela pour un régime strictement permanent.

— Site de Quiévrechain (maille X 15, Y 15).

Implanté au lieu-dit « La Polka », le site correspond à une zone où le recouvrement argilo-sableux possède une épaisseur inférieure à 5 m. La cote au sol est d'environ + 33 m NGF et la nappe à l'étiage se situe à 8 m de profondeur. Le volume calculé de la craie sèche a été éva-

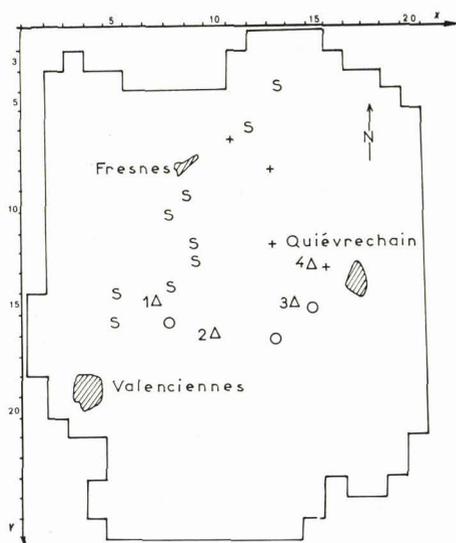


Fig. 139. — Implantation des sites optimisés, des champs captants de référence et de contrôle dans le modèle Bas-Escaut.

Légende : O, Sites d'alimentation artificielle. — 1Δ, site de pompage optimisé. — S, Stations de relevage des H.B.N.P.C. utilisées comme maille de contrôle. — +, Champ captant pris comme maille de contrôle ou de référence.

LIEU	MAILLE CONTROLE		CM	Co	ECART EN M
	X	Y			
FOSSÉ LEDOUX	13	04	8,09	0,18	7,91
FOSSÉ ST-PIERRE	12	06	7,58	0,92	6,66
PUTEMONT	09	10	6,27	4,75	1,52
ESCAUTPONT	08	11	6,72	5,79	0,93
ST SAULVE	09	12	6,71	5,87	0,84
LES PRES	09	13	6,55	6,07	0,48
LES PRES (bis)	08	14	6,58	6,58	0
BRUAY	05	15	5,83	5,14	0,69
BRUAY (bis)	05	16	4,97	4,81	0,16

VICQ	13	12	5,00	5,00	0

BLANC MISSEYON	16	13	5,00	3,91	1,09

Tableau LIV. — Résultats de l'optimisation sur les contraintes. (Bas-Escaut).

Légende : CM : Contrainte Maximale en mètres
Co : Contrainte Optimisée en mètres.

lué à $7,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Nous supposons qu'au niveau du site de Quiévrechain la transmissivité reste homogène et proche de la valeur imposée de $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ sur toute la hauteur de l'aquifère. Les résultats de la simulation (tabl. LV) montrent un relèvement de 4,8 m sur la maille d'injection et des relèvements de 0,7 à 2,1 m sur les champs captants de Fresnes, Vicq et Blanc-Misseron.

— Site de Rombies (maille X 13, Y 17).

Ce site, choisi au lieu-dit « Le Petit Rétian », d'une altitude de + 45 m NGF, possède un recouvrement argilo-sableux d'une épaisseur de 5 m. La nappe de la craie se stabilise vers 18 m de profondeur à l'étiage. Le volume de craie sèche est évalué à $14,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. La simulation d'une alimentation artificielle (tableau LV) montre un relèvement très important (17,5 m) sur la maille d'alimentation.

Pratiquement, la charge hydraulique imposée se situera au niveau du sol.

Ce site apparaît donc localement très médiocre en raison d'une transmissivité faible de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Les relèvements sur les mailles de référence oscillent entre 1,1 et 2,4 m.

— Site de Saint-Saulve (maille X 8, Y 16).

Ce dernier site s'étend au lieu-dit « Le Bas Marais », à l'altitude + 28 m NGF. Le recouvrement argilo-sableux y est peu épais (moins de 5 m). La transmissivité de l'aquifère crayeux est bonne ($1,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) et le volume rocheux rechargeable est estimé à $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. La nappe de la craie oscille en période de basses eaux autour de 8 m de profondeur.

La simulation d'une injection réalisée sur ce site (tabl. LV) montre un relèvement de 7,4 m sur la maille (ce qui amène le niveau d'eau à la cote du sol naturel). Les relèvements calculés au niveau des champs captants de référence varient entre 1 et 2 m.

— Conclusions.

En régime permanent et pour un débit d'injection de 100 l/s, les simulations relatives à trois sites choisis relativement près des champs captants montrent des relèvements assez semblables.

Sur les sites même, en raison des valeurs différentes de la transmissivité et de l'importance du réservoir crayeux non saturé, le site de Quiévrechain apparaît meilleur (relèvement de 4,8 m sur la maille).

Valeur du relèvement calculé (R) en mètres sur les champs captants											
Sites	Lieux de référence	Blanc-Misseron	Vicq E	Vicq NE	Fresnes	Sur la maille					
d'injection	Maille	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	d'injection	
	X	Y	16	13	13	12	13	10	11	7	
QUIEVRECHAIN (La Polka)	15	15	R = 1,8	R = 2,1	R = 1,3	R = 0,7	R = 4,8				
	T = 1,3.10 ⁻²	m ² /s	D = 1,5 km	D = 2,5 km	D = 4 km	D = 5,7 km	D = 0 km				
ROMBIES (Le Petit Rétian)	13	17	R = 1,4	R = 2,4	R = 1,6	R = 1,1	R = 17,5				
	T = 2.10 ⁻³	m ² /s	D = 3,3 km	D = 3,6 km	D = 5 km	D = 6 km	D = 0 km				
St-SAULVE (Le Bas Marais)	8	16	R = 1	R = 2	R = 1,7	R = 1,6	R = 7,4				
	T = 1,3.10 ⁻²	m ² /s	D = 6,2 km	D = 4,6 km	D = 5,7 km	D = 4,6 km	D = 0 km				

Tableau LV. — Relèvements calculés après simulation d'une injection de 100 l/s (360 m³/h) sur chacun des trois sites de Quiévrechain, Rombies et Saint-Saulve (Bas-Escaut).

Légende : T, transmissivité. — D, distance entre les sites d'injection et de relèvement.

4) Conclusions.

La recherche d'une meilleure gestion de la nappe de la craie dans le bassin du Bas-Escaut a permis de montrer :

— les répercussions importantes de l'arrêt des stations de relevage des H.B.N.P.C. sur le niveau de la nappe ;

— l'existence, après arrêt des stations de relevage, d'un site de pompage (*) permettant de rabattre la nappe dans des conditions très similaires mais avec cependant la nécessité de conserver les deux stations de relevage de la Fosse Ledoux et de la Fosse Saint-Pierre ;

— l'influence des divers sites d'alimentation artificielle avec un bon rendement pour le site de Quiévrechain.

VII. — GESTION DE LA NAPPE DU CALCAIRE CARBONIFERE A LILLE, ROUBAIX, TOURCOING

La modélisation en régime transitoire de la nappe du Calcaire carbonifère a montré la complexité des échanges de la nappe avec l'extérieur. Trois principales hypothèses ont été ainsi testées dans des calages successifs :

— drainage ou non de la nappe de la craie ou/et d'eaux profondes vers la nappe du Calcaire carbonifère,

— perte faible ou forte de l'Escaut au nord de Tournai,

(*) Cette optimisation du champ captant n'est qu'une solution parmi d'autres en raison du choix des contraintes (relèvement au lieu de rabattement).

— épaisseur d'aquifère utile de 30 ou 50 m.

Dans le cadre de la gestion, nous abordons ici le problème de la prévision des niveaux de la nappe à long terme aux horizons 1980, 1990 et 2000 afin de déceler les zones critiques qui verraient le dénoyage de l'aquifère.

Les opérations d'alimentation artificielle seront en outre testées afin d'évaluer le temps de réponse et l'ampleur des relèvements sur plusieurs champs captants.

1) Prévisions à long terme.

Comme nous l'avons déjà démontré (Mania, 1976, p. 55 à 60) :

« L'état prévisionnel de la nappe aux horizons 1980, 1990 et 2000 a été tenté grâce au modèle dans le cas des deux épaisseurs utiles de l'aquifère choisies auparavant. On a, d'autre part, considéré que l'exploitation de la nappe se ferait toujours à un débit global proche de celui de 1974. Les taux de pluviométrie efficace appliqués dans la zone d'alimentation ont été fixés à 175 mm par an. Ce chiffre est la moyenne arithmétique des pluies efficaces des soixante-dix dernières années.

Les buts recherchés sont de :

- localiser les zones de dénoyage de la nappe, donc de mettre en évidence les secteurs critiques,
- situer la limite de la zone captive,
- indiquer l'état piézométrique général.

— Cas de l'épaisseur moyenne égale à 30 m.

1° Carte 1980.

On constate un dénoyage dans le secteur français de Lesquin, Hem, Lannoy, Willems, Baisieux. En territoire belge, les captages de la S.N.D.E. à Pecq et Helchin sont situés dans la zone dénoyée. Le secteur E du modèle est, en raison de sa position sur une ligne de partage des

eaux souterraines, mis en dénoyage. Le recul de la limite de captivité par rapport à sa position de 1973 est d'environ 2 km dans le secteur de Roubaix-Tourcoing et de 4 km en secteur belge.

2° Carte 1990.

Les zones dénoyées s'agrandissent et atteignent le secteur Roubaix-Wattrelos en France et les captages de Saint-Léger en Belgique. La limite de captivité de 1990, par rapport à la situation de 1980, montre un recul de 750 m à l'ouest de Roubaix-Tourcoing et de 3 km au nord de Roubaix.

3° Carte 2000.

L'ensemble de l'agglomération de Lille-Roubaix-Tourcoing est affecté par le dénoyage. La limite de captivité montre un décalage d'environ 1 km par rapport à celle de 1990. On est frappé par la rapidité de la chute des niveaux piézométriques dès que la nappe acquiert un régime libre. Ce phénomène est expliqué par le fait d'une baisse brutale de la transmissivité en raison de la diminution de la valeur de l'épaisseur d'aquifère mouillé. Au niveau d'une maille sollicitée, les rabattements s'accroissent rapidement en raison de la diminution de la diffusivité (T/S.) qui entraîne l'apparition d'un cône de pompage de faible étendue mais très profond par opposition avec le cône de pompage en nappe captive qui est étendu mais de faible profondeur.

Par contre, les mailles peu sollicitées ne sont pas affectées d'une chute aussi importante des niveaux. La nappe se dénoie donc très fortement au niveau des zones de pompage intensif sans que pour autant elle soit profondément affectée dans son ensemble.

— Cas de l'épaisseur moyenne égale à 50 m.

Rappelons que le calage interannuel du modèle a nécessité une modification des perméabilités.

1° Carte 1980.

Aucun dénoyage important n'apparaît en secteur français (sauf à Willems). A la limite E du modèle, quelques mailles sont dénoyées à cause de leur position sur une ligne de partage des eaux souterraines. Par rapport à 1975, la limite de zone de captivité recule de 0,5 à 1,5 km. La Ville de Lille et les secteurs centre et E de Roubaix sont dans la zone libre de la nappe (fig. 140 a).

2° Carte 1990.

Aucune modification majeure n'apparaît en dehors du recul important de la limite de captivité en secteur français (1,5 et 2 km) et en Belgique (3 km). Le sud de Tourcoing, le secteur de Wattrelos et les captages de Saint-Léger sont inclus dans la zone libre (fig. 140 b).

3° Carte 2000.

La limite de captivité s'est éloignée par rapport à celle de 1990 d'environ 3 km. Tous les champs captants majeurs sont situés dans la zone libre de la nappe. La zone captive s'étend sur le secteur d'Halluin-Comines et Armentières (fig. 140 c).

— Conclusions sur les deux cas.

On constate l'importance de l'épaisseur de l'aquifère utile dans la rapidité de dénoyage des zones fortement sollicitées. Si les zones dénoyées sont pratiquement absentes dans le deuxième cas, il apparaît par contre que les limites de la zone captive correspondent assez bien à celles trouvées dans le premier cas.

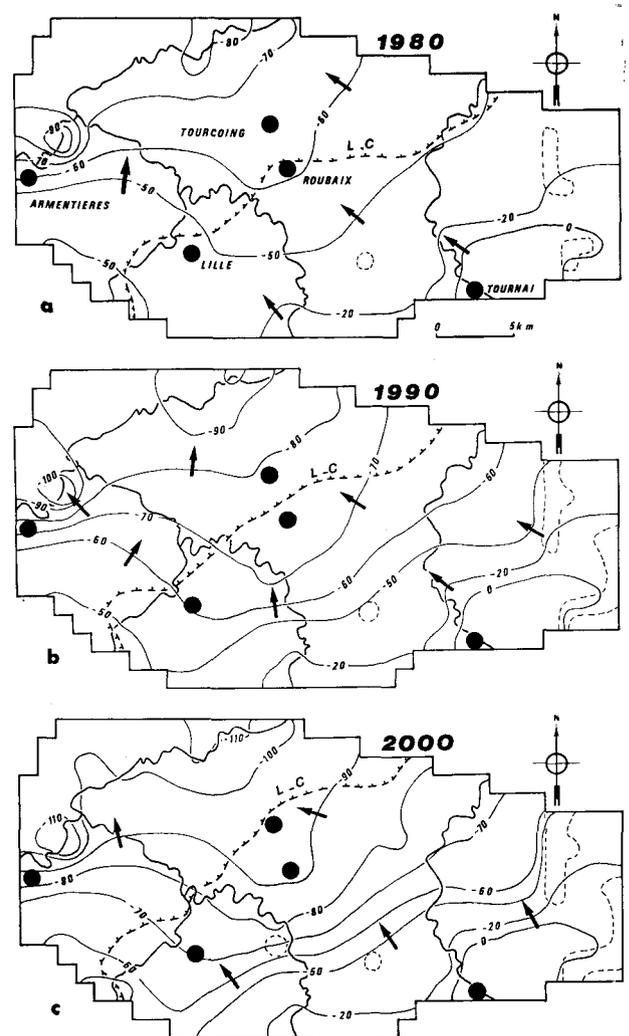


Fig. 140 a, b, et c. — Carte prévisionnelle des états de la nappe du Calcaire carbonifère aux horizons 1980 (a), 1990 (b) et 2000 (c). (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 57-58).

Légende : LC, limite de captivité. Les barbelures sont orientées vers la zone captive. L'altitude de la nappe est exprimée en m NGF.

Le calcul des piézométries futures permet d'établir une décroissance moyenne annuelle, de 1970 à 2000, allant de 1,1 à 1,5 m/an (tableau LVI) ».

2) Simulation d'une alimentation artificielle dans le cas d'une épaisseur d'aquifère égale à 30 mètres.

« La décroissance continue des niveaux piézométriques de la nappe du Calcaire carbonifère a posé le problème d'une alimentation artificielle de la nappe à partir d'eaux superficielles traitées au préalable.

- EPAISSEUR MOYENNE DE L'AQUIFERE : 50 m

Maille	Lieu	Niveaux de la nappe calculés				Evolution annuelle moyenne en m/an
		1970	1980	1990	2000	
9 26	HEM	-41	-55,50	-69,50	-80	1,3
11 25	ROUBAIX	-46	-60	-76	-91	1,5
11 32	PECQ	-36	-48,50	-59,50	-67	1,1
12 21	BONDUES	-47	-60	-75	-89	1,4
12 26	WATTRELOS	-46	-60	-76	-92	1,5
13 23	TOURCOING	-50,5	-64	-79	-95	1,5
13 31	St LEGER	-44,5	-59	-73	-87	1,4
16 26	MOUSCRON	-50	-64	-79	-94	1,4

- EPAISSEUR MOYENNE DE L'AQUIFERE : 30 m

Maille	Lieu	Niveaux de la nappe calculés				Evolution annuelle moyenne en m/an
		1970	1980	1990	2000	
9 26	HEM	-38,7	-60	-60	-60	0,7
11 25	ROUBAIX	-47,7	-75	-86	-86	1,3
11 32	PECQ	-37,5	-56	-56	-56	0,6
12 21	BONDUES	-52	-72	-86	-94	1,4
12 26	WATTRELOS	-46	-76	-88	-91	1,5
13 23	TOURCOING	-54,5	-77	-92	-99	1,5
13 31	St LEGER	-52	-72	-86	-92	1,3
16 26	MOUSCRON	-53	-79	-91	-96	1,4

Tableau LVI. — Evolution à long terme de la nappe aux horizons 1980, 1990 et 2000. Epaisseur moyenne de l'aquifère : 50 m (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 57 et 58).

Trois sources d'alimentation peuvent être sollicitées régionalement : l'eau de l'Escaut dans le secteur de Tournai (Ramegnies Chin), l'eau de la Lys (traitée à Aire-sur-la-Lys) injectable à Bondues et l'eau de la Marque (Sainghin-en-Mélantois).

Nous n'envisagerons ici que la simulation relative à l'alimentation artificielle à partir des eaux de l'Escaut (179). On espère traiter 100.000 m³/jour d'eau soutirés à l'Escaut pendant quatre mois (janvier à avril). Ces eaux seront ensuite filtrées à travers les alluvions ou injectées directement dans l'aquifère. Des essais expérimentaux d'infiltration ont permis de fixer les modalités d'une telle opération (179).

Le modèle mensuel simule l'effet d'une alimentation de 1.100 l/s pendant la période de janvier à avril 1973 inclus.

Afin d'appréhender les effets à court terme, la période testée s'étendra sur 18 mois. Il faut rappeler que l'Escaut alimente naturellement la nappe et que nous avons considéré que le débit d'alimentation artificielle s'y ajoutait. Le modèle ne montre d'ailleurs pas d'inhibition sur cette alimentation naturelle (fig. 141). Les résultats des relèvements ont été reportés dans le tableau LVII avec les écarts relatifs par comparaison des variations piézométriques avant et après alimentation à 2, 4, 6 et 12 mois du début de l'opération. Au bout du quatrième mois d'alimentation, les relèvements atteignent 2 m à Roubaix-Tourcoing, 3 m à Hem et Wattrelos, 1 m à Lille et 1,6 m à Bondues. Le relèvement sur le site d'alimentation (cote + 13 à + 15) montre des valeurs proches de 20 m.

Le réservoir calcaire sera noyé et mis peut-être en légère charge puisque l'épaisseur des alluvions est d'environ 18 m à Ramegnies-Chin. En règle générale, il apparaît que les relèvements subsistent pendant plusieurs mois.

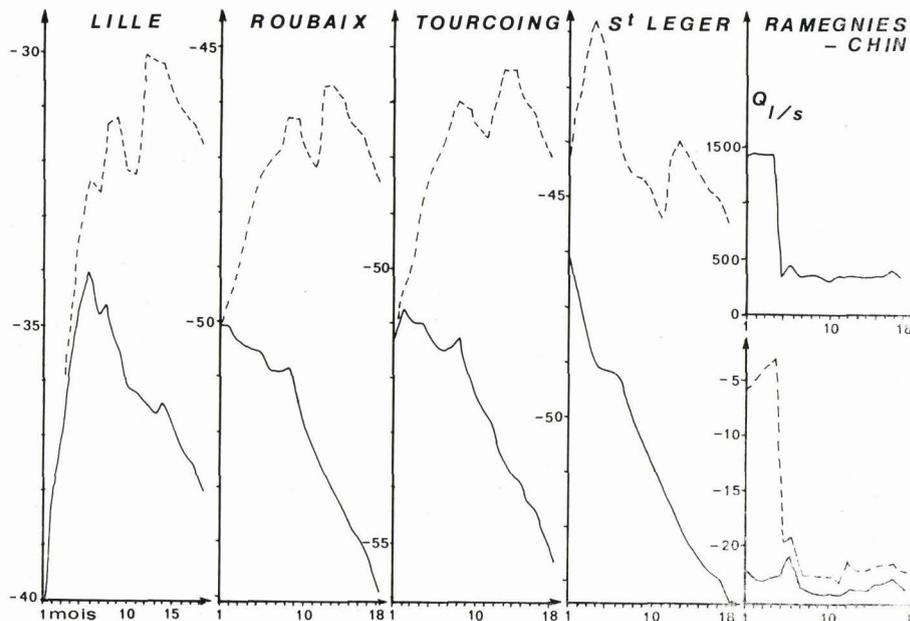


Fig. 141. — Simulation des relèvements du niveau piézométrique de la nappe du Calcaire carbonifère après alimentation artificielle sur le site de Ramegnies-Chin. (Mania, Bull. B.R.G.M., 1976, p. 59).

Légende : Trait continu : piézométrie avant alimentation. — Trait discontinu : piézométrie après alimentation. — Q : débit d'alimentation totale en litres/seconde.

Mailles	Lieu	DECALAGE PIEZOMETRIQUE (m)			
		avec alimentation à Tournai 1100 l/s			
		à 2 mois	4 mois	6 mois	12 mois
6 20	LILLE	0	0,8	2	5,5
9 26	HEM	1	3	4	>5
11 6	WATTRELOS	1	3,1	4,1	>5
12 24	ROUBAIX	0,6	2,4	3,5	5,8
12 21	BONDUES	0,2	1,6	3,3	5,4
13 23	TOURCOING	0,4	2	3,5	5,6
16 16	COMINES	0,1	1,2	2	4,4
16 20	LINSELLES	0,2	1,4	2,7	5
13 21	St LEGER	3,5	4,9	4,8	5,8
8 33	RAMEGNIES CHIN (Belgique)	19	20	4	3

Tableau LVII. — Relèvements des niveaux de la nappe par comparaison des évolutions piézométriques avant et après alimentation artificielle.

(Mania, *Bull. B.R.G.M.*, 1976, p. 60).

N.B. - Les relèvements intéressent l'ensemble de la maille concernée.

L'alimentation provoque en amont immédiat du site, la mise en captivité de la nappe et la transmission rapide des pressions. Il ne faut donc pas attendre la remise en captivité de l'ensemble de la nappe jusque Tournai pour voir l'influence de l'alimentation artificielle. Les simulations des

alimentations artificielles montrent que le site de Ramegnies Chin au nord de Tournai est très favorable. Les débits injectables (1.100 l/s) provoquent des relèvements de quelques mètres dans les secteurs franco-belges de pompage intensif. Le modèle n'a pas montré de débordement au niveau du site ».

3) Conclusions.

Les évolutions à long terme montrent l'apparition de zones critiques de dénoyage dès 1980 dans l'hypothèse d'un aquifère d'une épaisseur utile de 30 m. Les déplacements de la limite de la zone de captivité de la nappe sont identiques dans les deux hypothèses d'épaisseur (30 ou 50 m), ils montrent que dès 1980 le secteur de Roubaix-Wattrelos sera situé en zone libre et qu'en 1990, cette dernière affectera l'ensemble des champs captants français. Les simulations d'une alimentation artificielle indiquent que le site de Ramegnies Chin (en Belgique) est très favorable en raison de l'importance des relèvements qui se feront sentir sur l'ensemble de la nappe. La simulation d'une alimentation artificielle à Tournai a été tentée sur le modèle mensuel afin d'apprécier l'importance et la rapidité des relèvements de la nappe.

Il apparaît très important de définir de manière exacte l'importance de l'aquifère productif en réalisant des sondages profonds sur la totalité des calcaires viséens et tournaisiens (400 à 500 m d'épaisseur au cœur du synclinal de Roubaix). Les techniques de la diagraphie devraient nous apporter dans les prochaines années la réponse à ce problème qui conditionne la profondeur des ouvrages.

Conclusions générales

La gestion des systèmes aquifères fait appel à des méthodes particulières de traitement des éléments statiques et dynamiques d'un système quelconque. La méthodologie développée ici est appliquée au cadre du Nord de la France particulièrement bien pourvu en nappes d'eau souterraine dans un contexte géologique varié et déjà bien connu. De multiples méthodes d'analyse sont exposées et conduisent à une meilleure définition des processus d'alimentation directe et/ou indirecte des systèmes, compte tenu d'une répartition statistique et historique de données de base. L'ensemble des analyses permet d'établir des modèles théoriques relativement proches du domaine naturel qui seront gérés et optimisés en fonction de contraintes d'exploitation particulières à la région.

L'alimentation des systèmes aquifères nécessite au préalable une bonne connaissance des fluctuations climatologiques et hydrométriques. Nous avons ainsi examiné l'évolution des excédents mensuels du bilan hydrique singulièrement faibles dans les zones géographiques de basse altitude (inférieur à + 60 m NGF). La partie ouest de l'Artois et le bassin de la Sambre restent particulièrement bien pourvus sur le plan hydrique. On notera que la période interannuelle 1971-1974 se caractérise par un fort déficit d'alimentation particulièrement pénalisant pour les nappes d'eau souterraine.

Le régime d'écoulement des rivières est subordonné, en pays crayeux, aux fluctuations de débit des sources de la nappe de la craie. L'existence d'un réservoir aquifère étendu, épais et bien perméable, permet de régulariser le débit des cours d'eau. Les rivières de l'Artois

possèdent ainsi des hydrogrammes plus réguliers que ceux du bassin de l'Escaut.

L'analyse des données hydroclimatologiques permet d'établir les bilans des écoulements total et souterrain des bassins de l'Artois et de l'Escaut. Des anomalies se révèlent au niveau des valeurs de l'évapotranspiration réelle calculée à partir de l'hypothèse de Turc. Les originalités décelées résultent de l'hétérogénéité de l'emmagasinement des aquifères crayeux et dépendent en grande partie de l'état de la couverture sédimentaire de l'aquifère (l'infiltration et le ruissellement en dépendent). L'établissement d'une cartographie des écoulements souterrains conduit à la mise en évidence de bassins recevant une alimentation potentiellement importante (10 l/s/km^2) comme ceux de la Canche, de l'Aa, de l'Authie et de la vallée du Bas-Escaut. De très faibles ressources en eau souterraine (moins de 5 l/s/km^2) sont mobilisables dans les bassins de la Lys, de la Clarence, de la Lawe, de l'Hogneau, de l'Aunelle et de la Rhonelle.

L'examen des principaux systèmes aquifères régionaux est effectué sur les plans de leur individualisation géologique, de l'état piézométrique d'ensemble de leur nappe et des fluctuations ponctuelles du niveau des eaux souterraines. La grande diversité du comportement des nappes traduit les multiples variations des sites hydrogéologiques, des paramètres physiques du réservoir rocheux et de l'évolution des prélèvements et des alimentations naturelles ou induites.

Le passage d'une analyse descriptive et intuitive des variations piézométriques à une analyse physique fait appel à des fonctions

théoriques de transfert d'une lame d'eau issue d'une série de précipitations. Nous avons utilisé de telles fonctions en milieu non saturé puis en milieu saturé afin de simuler des fluctuations piézométriques interannuelles sur la période 1966-1972. La critique des paramètres physiques et la comparaison des courbes piézométriques calculées et expérimentales nous ont montré la difficulté d'une modélisation dans le cas d'un réservoir aquifère crayeux fissuré et hétérogène. Cette application a été effectuée sur seize sites du Bassin de la Canche. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement apparaissent d'autant plus élevées que le battement de la nappe est faible et cela même pour des niveaux de nappe relativement profonds. Les chiffres obtenus nous paraissent supérieurs à ceux issus par exemple des pompages d'essai. Les changements d'échelle et de temps peuvent expliquer la divergence d'application des fonctions hydrauliques.

La vérification de modèles théoriques par comparaison au domaine naturel, sur le plan de la caractérisation des paramètres hydrauliques et des schémas hydrodynamiques, a été abordée. L'examen de l'évolution, au cours du temps, des rabattements du niveau d'une nappe lors d'un pompage, fait l'objet de la mise au point de méthodes de calcul automatique des données de mesure afin d'aboutir à des paramètres hydrauliques un peu plus précis que ceux obtenus graphiquement. Des programmes informatiques ont été élaborés pour les hypothèses de Theis, Boulton et Hantush. Le développement et l'application de la théorie de l'écoulement des eaux en milieu fissuré nous a amené à ébaucher une cartographie de la distribution géographique des fractures et des perméabilités associées en pays crayeux. La théorie du calcul du tenseur des perméabilités a été appliquée à la suite d'une vérification positive effectuée sur le site expérimental du Cran d'Escalles. Nous avons, en plus de l'apport de données supplémentaires de perméabilité, souligné la forte liaison de la direction des écoulements, souterrains et de surface, avec la tectonique.

La présentation de quelques exemples choisis de pompages d'essai dans l'aquifère crayeux nous conduit à dégager divers schémas hydrodynamiques qui se vérifient sur le plan théorique et qui guideront les hypothèses de la modélisation. Nous prouvons ainsi l'existence et la répétition d'un mécanisme de recharge ver-

ticale de l'aquifère crayeux à la limite du recouvrement tertiaire et/ou sous un recouvrement alluvionnaire aquifère.

La diagraphie des vitesses d'écoulement de l'eau souterraine dans les forages, par utilisation du micromoulinet, est appliquée à l'aquifère crayeux et rend compte de la complexité de ce dernier. Nous avons défini quatre sites hydrogéologiques différents qui expliquent et permettent la distinction de divers comportements hydrodynamiques de la nappe. Au mode de gisement s'additionne un facteur lithologique qui peut favoriser (craie fissurée du Cénomanién) ou bloquer (Tun, bancs de silex) les circulations des eaux souterraines. L'aquifère du calcaire carbonifère se caractérise par une chute régulière des valeurs de la vitesse d'écoulement en fonction de la profondeur. Les essais au micromoulinet apparaissent riches en enseignements car ils confirment la complexité des réservoirs sédimentaires stratifiés que nous considérons, faute d'investigations plus poussées, homogènes.

La théorie et l'application des modèles de simulation des nappes d'eau souterraine ont été détaillées. Douze modèles mathématiques et un modèle analogique électrique ont été réalisés dans certains secteurs des nappes du Calcaire carbonifère, de la Craie et des Sables landéniens et ont contribué à l'établissement de bilans hydrologiques relativement précis et à une meilleure connaissance des mécanismes hydrodynamiques mis en jeu (drainances, pertes, émergences, tarissements). Une meilleure synthèse de la distribution géographique des transmissivités est également apportée en fin de calage des modèles.

Le modèle mathématique transitoire de la nappe du Calcaire carbonifère de la région de Lille, Roubaix, Tourcoing et Tournai a nécessité un calage interannuel sur la période 1899-1973, puis un calage mensuel sur la période janvier 1973-janvier 1974. L'équilibre des échanges nécessite des apports d'eau par drainance, soit de la nappe de la craie sus-jacente, soit d'eaux profondes ainsi que l'existence de pertes de canaux (Escaut, Deûle) et de rivières (La Marque) qui ont été parfois vérifiées par jaugeage et par des mesures isotopiques.

Le modèle mathématique de la nappe dans le Calaisis a entraîné pour son calage l'application de six hypothèses hydrodynamiques diffé-

rentes où apparaissent des apports d'eau, soit latéraux (en provenance de la mer ou de la rivière Hem), soit verticaux (nappe des alluvions, modulation des précipitations et des débits d'émergence).

Cinq hypothèses ont été testées dans le modèle des bassins de la Hem, de l'Aa et de la Lys, afin de :

— vérifier l'existence et l'importance des débits de la drainance de la nappe des sables tertiaires et des alluvions dans la vallée de l'Aa (Arques),

— constater les effets de l'alimentation artificielle sur l'extension du cône de pompage de Houille-Mouille,

— moduler le débit d'exploitation des cressonnières,

— faire varier les niveaux imposés (sur l'Aa) qui règlent la perte naturelle de la rivière vers la nappe,

— modifier la répartition des valeurs de la pluie efficace.

Nous avons montré l'importance de l'alimentation artificielle dans le maintien des niveaux de la nappe et déterminé les volumes d'eau mis en jeu dans la drainance des nappes superficielles.

Le modèle mathématique bicouche de la nappe de la craie de la région lilloise fait intervenir la piézométrie de la nappe alluviale de la Deûle qui apporte près de la moitié des alimentations de la nappe. Les débits d'écoulement latéral et vertical sont calculés à partir du niveau de la nappe alluviale et des valeurs de perméabilité des alluvions.

Les modèles mathématiques du Douaisis et des bassins de la Deûle et de la Scarpe confirment :

— une drainance de la nappe alluviale de la Deûle vers l'aquifère crayeux dans le secteur allant de Seclin à Carvin (700 l/s),

— une alimentation par pertes de la Deûle (80 l/s) entre Courrières et Carvin, du canal de Seclin (60 l/s) et de la Scarpe (170 l/s).

L'élaboration du bilan nous permet d'émettre deux remarques majeures :

— seule la moitié des débits d'entrée est fournie par l'alimentation verticale de la pluie efficace,

— la drainance de la nappe des alluvions de la Deûle est particulièrement importante (25 %) et pose le problème de la qualité physico-chimique des eaux de la nappe de la craie.

Le bassin d'Orchies demeure, sur le plan hydrogéologique, un vaste barrage vis-à-vis des circulations d'eaux souterraines et possède l'originalité d'être alimenté par trois zones : au Sud (Douaisis), au Nord (Mélantois) et à l'Ouest (vallée de la Deûle).

Le calage du modèle mathématique du Bas-Escaut conduit aux observations suivantes :

— l'alimentation par la pluie efficace des affleurements crayeux ne représente que 38 % des apports,

— une drainance (19 %) de la nappe alluviale du Bas-Escaut et de la nappe des Sables du Tertiaire pallie à l'insuffisance de l'alimentation par les pluies,

— les débits prélevés par les stations de relevage des H.B.N.P.C. (25 %) posent le problème de leur maintenance en raison de la forte baisse des niveaux de la nappe de la craie,

— le modèle confirme les pertes observées lors de l'exécution de profils de jaugeage sur l'Aunelle (53 l/s).

La réalisation du seul modèle analogique électrique adapté à la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges a permis de vérifier le bilan hydrologique global et confirme l'existence d'un excédent de l'alimentation sur les affleurements sableux d'où l'inondation régulière de ces secteurs.

Le souci d'utiliser au mieux les ressources en eau souterraine et en eau de surface (dans le bassin de la Liane) nous a conduit à utiliser et à généraliser l'emploi de l'outil de la programmation linéaire facilement adaptable aux modèles mathématiques déjà réalisés.

Dans le Boulonnais, nous avons démontré par l'optimisation que le recours aux eaux superficielles s'imposait pour l'alimentation future de l'agglomération en raison des possibilités restreintes d'exploitation des aquifères du Jurassique et du Crétacé. A long terme, il faut envisager un ouvrage de retenue des eaux sur la rivière de la Liane afin de régulariser son débit et constituer une réserve en eau. A court terme, le site de St-Léonard peut faire

l'objet d'un stockage différé des ressources en eaux superficielles par alimentation artificielle de la nappe des calcaires du Séquanien afin de bénéficier d'un volume d'eau en période critique (étiage de la Liane) et stocker éventuellement les surplus de l'usine de traitement des eaux de surface.

La gestion de la nappe de la craie dans le Calaisis reste étroitement guidée par :

— la pérennité du marais de Guînes, donc de la conservation de l'artésianisme,

— la limitation des prélèvements en bordure de la côte afin d'éviter une pollution par les eaux salées,

— une extension possible du champ captant dans le secteur d'Ardres afin de bénéficier de l'alimentation naturelle induite par la rivière Hem.

Le débit optimal d'exploitation dans ce nouveau secteur atteindrait ainsi $1,75 \cdot 10^6$ m³/an.

La gestion des ressources en eau dans les bassins de la Hem, de l'Aa et de la Lys a été menée afin de déterminer la répercussion des fluctuations du débit de l'alimentation artificielle sur les niveaux de la nappe de la craie en période de basses eaux puis en période de hautes eaux.

Il apparaît nécessaire de conserver des débits d'alimentation artificielle élevés afin de soutenir le niveau de la nappe. De nouveaux sites de captage sont mis en évidence dans la vallée de la Melde à Wittes avec des ressources exploitables atteignant $5,9 \cdot 10^6$ m³/an et dans la vallée de la Liauwette, à Roquetoire et à Saint-Martin, avec des réserves en eau égales respectivement à $2 \cdot 10^6$ m³/an et $1,76 \cdot 10^6$ m³/an. Les contraintes imposées respectent les niveaux minimaux des cressicultures. Une drainance verticale des nappes alluviales et des sables landéniens vers l'aquifère crayeux apparaîtrait automatiquement pour fournir une partie des ressources en eau.

La gestion des ressources en eau dans le Douaisis comporte des simulations d'alimentation artificielle à proximité de Douai puis des optimisations de nouveaux sites dans le secteur S du champ captant de Pecquencourt. Les sites d'alimentation artificielle testés ont été ceux de Férin, Brebières, Dechy et Sin-le-Noble. Les secteurs marécageux de Dechy et de Sin-le-Noble sont peu favorables à une alimentation

artificielle dans l'état actuel de la nappe. Nous y proposons une solution de gestion pouvant conduire à la résorption des eaux de relevage des H.B.N.P.C.

L'optimisation aboutit à la détermination de deux nouveaux champs captants particulièrement intéressants en vue d'une exploitation future : au Sud de Lallaing et à l'Ouest de Montigny-en-Ostrevent (Marais de Dechy). Les débits exploitables atteignent respectivement $1,26 \cdot 10^6$ m³/an et $1,48 \cdot 10^6$ m³/an.

La gestion des ressources de la vallée de la Deûle doit répondre aux critères de la quantité et de la qualité. Nous avons simulé la répercussion d'une alimentation de la nappe par de vastes bassins d'infiltration dans le secteur s'étendant d'Annœullin à Gondécourt. Le débit d'injection calculé est proche du chiffre de 385 l/s ($1,21 \cdot 10^7$ m³/an). Nous constatons une inhibition des mécanismes de la drainance des alluvions en raison des relèvements de la nappe (de 2,5 à 7,5 m). Les objectifs de qualité et de quantité des ressources en eaux souterraines seront ainsi atteints.

La gestion de la nappe de la craie du Bas-Escaut pose le problème de l'arrêt des stations de relevage des H.B.N.P.C. dont la simulation nous a indiqué l'ampleur des relèvements (de 5 à 8 m). La recherche de nouveaux sites répond à la fois aux soucis du maintien d'un niveau de nappe suffisamment bas pour empêcher l'inondation de régions d'altitude basse et à celui d'une meilleure exploitation des ressources. L'optimisation entraîne ainsi l'arrêt de huit stations de relevage sur dix dans la mesure où le futur champ captant de Blanc-Misseron sera mis en valeur au débit de $3,31 \cdot 10^6$ m³/an. D'autre part, trois sites d'alimentation artificielle (Quiévrechain, Rombies et Saint-Saulve) sont testés afin d'estimer les débits limites de stockage des eaux superficielles en période de crue du canal de l'Escaut et de l'Aunelle afin de régulariser le niveau des cours d'eau et d'accroître les réserves en eaux souterraines. Le site de Quiévrechain apparaît particulièrement intéressant (relèvement de 4,8 m pour un débit d'injection de 100 l/s ou encore $3,15 \cdot 10^6$ m³/an).

Dans le cadre du modèle transitoire de la nappe du Calcaire carbonifère, plusieurs sites d'injection sont testés à des débits variables. La chronologie des temps d'arrivée du front d'alimentation artificielle aux différents champs cap-

tants de Lille-Roubaix-Tourcoing a été estimée. En outre, des prévisions de l'état de la nappe aux horizons 1980, 1990 et 2000 ont été réalisées afin de prévoir les secteurs névralgiques (dénoyage).

La gestion des systèmes aquifères, après un premier stade relatif à l'analyse des éléments statiques et dynamiques conduit à la réalisation des modèles mathématiques et à l'application de l'optimisation linéaire. De multiples hypothèses hydrogéologiques liées au bilan global d'un aquifère et la mise en jeu de mécanismes hydrodynamiques permettent de penser à la

possibilité d'un accroissement des ressources en eau souterraine.

De nouveaux secteurs de prélèvement des eaux de la nappe de la craie sont définis et les débits globaux d'exploitation optimisée atteignent respectivement, avant et après alimentation artificielle, $1,75 \cdot 10^7$ m³/an et $5,1 \cdot 10^7$ m³/an. Cette ressource en eau supplémentaire, qui représente 11 % de la totalité des prélèvements actuels effectués dans le Nord - Pas-de-Calais ($4,36 \cdot 10^8$ mètres cubes par an), n'a pu être décelée qu'en faisant appel à une méthodologie développée dans ce travail.



ANNEXES

Annexe A : Procédure du calcul des dérivées partielles dans les hypothèses de Boulton et d'Hantush

Cette procédure fait l'objet du sous-programme appelé FUN (voir ordinogramme) qui appelle quatre autres sous-programmes : BOUL 1, BOUL 2, BOUL 3 et BOUL 4. Ces derniers ont pour objet de calculer les diverses intégrales des expressions entrant dans le calcul des dérivées partielles. Nous avons appelé le rabattement théorique F et les dérivées partielles de T, S, S', α , K' par FP(1), FP(2), FP(3), FP(4) et FP(5).

Les calculs analytiques de base des dérivées partielles sont représentés dans les fonctions FON A, FON B, FON C 1, FON C 2, FON C 3, FON C 4, et FON E.

La procédure d'intégration est effectuée par le sous-programme SIMPFOR basé sur la méthode de Simpson (in Geminard, 1962, p. 160), qui consiste à remplacer la courbe à intégrer par une autre courbe dont l'équation est un polynôme (méthode des polynômes d'interpolation).

Il est fait appel aux procédures de calcul des fonctions de Bessel de première espèce J_0 et J_1 , respectivement du premier et deuxième ordre.

Seule la Fonction FON B utilise J_1 , aussi avons-nous stocké en mémoire les valeurs de J_0 calculées pour un certain pas d'intégration afin de les utiliser dans les autres fonctions.

Cet arrangement a permis d'économiser beaucoup de temps calcul.

Le calcul des intégrales des développements où intervenait la fonction de Bessel a un caractère oscillatoire à amortissement avec existence de nœuds où l'amplitude est nulle.

Ainsi pour J_0 et J_1 , on aura pour les dix premiers nœuds (tiré de Watson - Theory of Bessel function) les valeurs suivantes (tabl. I).

On constate que l'écart successif entre deux nœuds tend à croître pour J_0 et à décroître pour J_1 jusqu'à la valeur limite proche de $P_1 = 3,1416$. Nous avons choisi d'effectuer l'intégration de la manière suivante :

pour J_0 :

- de $Z_1 = 0,0001$ à $Z_2 = 2,4048$ pour la première arche,
- de $Z_1 = 2,4048 + 3,1340 (i - 1)$ à $Z_2 = Z_1 + 3,1340$ pour les arches suivantes (de nombre 1).

pour J_1 :

- de $Z_1 = 0,0001$ à $Z_2 = 3,8317$ pour la première arche,

Noeuds n	:	:	:	:	:			
:	:	:	:	:	:			
:	:	:	:	:	:			
:	:	:	:	:	:			
1	:	2,4048	:	-	:	3,8317	:	-
2	:	5,5200	:	3,1152	:	7,0155	:	3,1838
3	:	8,6537	:	3,1337	:	10,1734	:	3,1579
4	:	11,7915	:	3,1378	:	13,3236	:	3,1502
5	:	14,9309	:	3,1394	:	16,4706	:	3,1470
6	:	18,0710	:	3,1401	:	19,6158	:	3,1452
7	:	21,2116	:	3,1406	:	22,7600	:	3,1442
8	:	24,3524	:	3,1408	:	25,9036	:	3,1436
9	:	27,4934	:	3,1410	:	29,0468	:	3,1432
10	:	30,6346	:	3,1412	:	32,1896	:	3,1428
:	:	:	:	:	:	:	:	:

Tableau I

— de $Z_1 = 3,8317 + 3,1568 (i - 1)$ à $Z_2 = Z_1 + 3,1568$ pour les arches suivantes (de nombre 1).

A partir de chaque résultat d'intégration entre deux nœuds consécutifs s, nous formons la somme suivante :

$$S_i = s_1 + \dots + s_i$$

A la fin de la dernière intégration, en raison du caractère alterné de la fonction (arches négatives et positives) et de manière à minimiser au maximum les résidus finaux, la valeur de la fonction intégrée sera égale à :

$$W = (S(i - 1) - S_i)/2$$

Nous donnons un exemple d'application de ce type de calcul relatif à l'évaluation de la fonction exposée au paragraphe 2 :

$$W = \int_0^{\infty} \frac{1 - f}{x} \cdot J_0(\psi x) dx$$

avec les paramètres fixés :

$$n = 30, \quad \psi = 0,4 \quad \text{et} \quad k = 2,$$

nous obtenons pour les huit premières arches les résultats suivants (tabl. II).

Arche n°	v *	Total partiel S
1	4,3596	4,3596
2	- 0,4240	3,9356
3	0,1715	4,1071
4	- 0,0982	4,0089
5	0,0655	4,0744
6	- 0,0478	4,0266
7	0,0368	4,0634
8	- 0,0294	4,0340

(*) Valeur de la fonction après intégration entre deux nœuds successifs.

Tableau II

Nous prenons finalement comme valeur de la fonction

$$W = \frac{(S_7 + S_8)}{2}$$

soit

$$W = \frac{(4,0634 + 4,0340)}{2} = 4,0487 \text{ (et non 4,0340).}$$

En s'arrêtant à la septième arche, nous aurions obtenu par ce procédé une valeur $W = 4,0450$, soit un écart de 3/1.000 avec le cas précédent.

Le découpage de l'arche en vue de son intégration a été fixé dans le programme définitif à 2^{10} , soit 1.024, pas d'intégration amenant une précision très fine atteignant 10^{-20} dans certains cas (tabl. III).

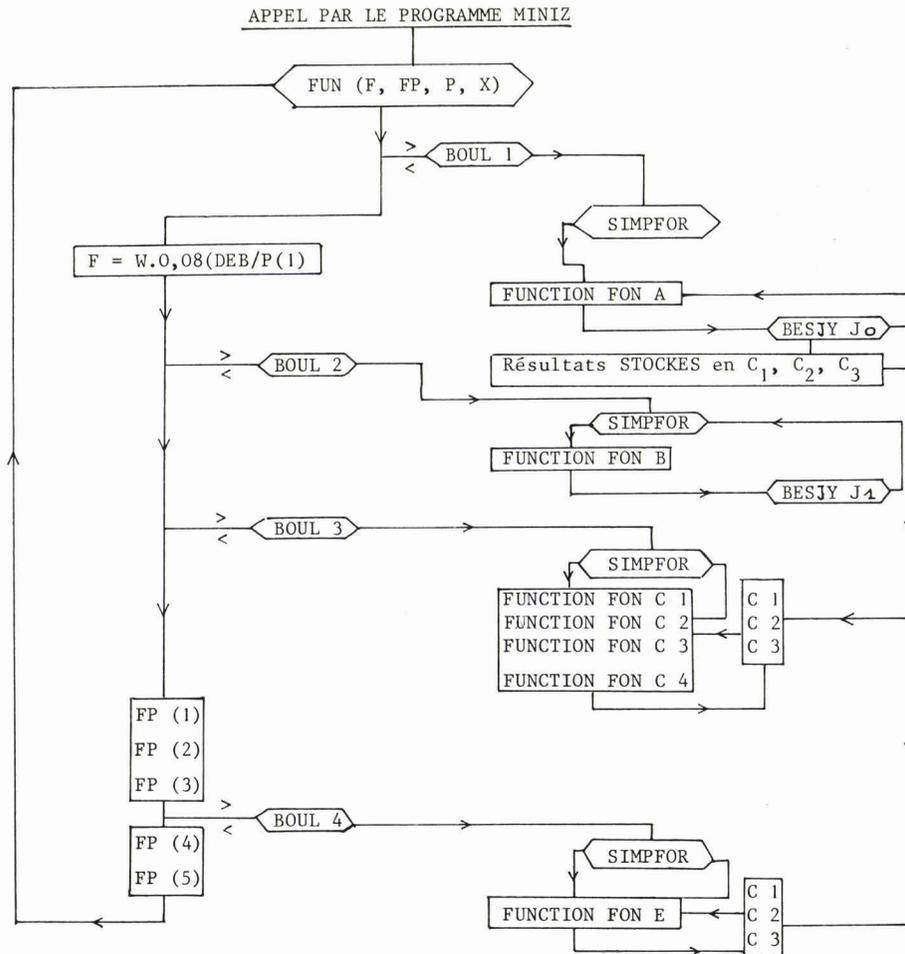


Tableau III. — Ordinogramme du sous-programme FUN

JUSTIFICATION THEORIQUE DES DERIVEES PARTIELLES

Cette justification théorique a été établie en 1978 par Mania et Sucche (152).

1) Exposé de la méthode.

La fonction s(t) dépendant du temps et d'un ensemble de paramètres indique de façon théorique l'évolution du niveau piézométrique dans un puits implanté dans une couche aquifère répondant à l'un des schémas décrits précédemment. Des observations de ce niveau, de valeurs $\sigma(t_i)$, sont faites pour des temps t_i différents et permettent de déterminer les paramètres de telle sorte que s(t) rende compte, au mieux, du phénomène observé.

Ce problème a été abordé par Boulton en comparant directement un ensemble de courbes théoriques à celles obtenues expérimentalement. Pour améliorer cette première estimation des paramètres, on utilisera la méthode des moindres carrés : les meilleurs paramètres seront ceux

qui rendent la somme $\sum_{i=1}^n [s(t_i) - \sigma(t_i)]^2$ minimum.

Programmé par Sampson (1971), cette méthode fait intervenir les dérivées de s par rapport aux différents paramètres : partant d'un ensemble de paramètres obtenu empiriquement ou par la méthode de Boulton, l'ordinateur détermine un nouvel ensemble de paramètres rendant la somme des carrés aussi petite que le désire l'utilisateur.

2) Notations - Expressions de s(t) et de ses dérivées partielles.

— Paramètres à déterminer :

S, S', α , T dans le premier schéma.

S, S', α , K', T dans le second.

— Notations intermédiaires :

$$\eta = 1 + \frac{S'}{S}$$

$$k = \frac{\alpha \cdot t}{2}$$

$$y = \sqrt{\eta^2 [1+x^2]^2 - 4\eta x^2}$$

$$f = \left[\text{ch}(k \cdot y) + \frac{\eta \cdot (1-x^2)}{y} \cdot \text{sh}(k \cdot y) \right] \cdot \exp[-k \cdot \eta \cdot (1+x^2)]$$

$$v = r/B$$

$$\rho = \frac{v \cdot \sqrt{\eta}}{\sqrt{\eta-1}}$$

I_0 fonction de Bessel d'ordre 0.

— Expression de s(t) et de ses dérivées partielles.

$$W = \int_0^\infty \frac{2}{x} [1-f] \cdot I_0(\rho \cdot x) dx$$

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W$$

ainsi par l'intermédiaire de W, s(t) apparaît comme intégrale généralisée d'une fonction dépendant de paramètres, l'existence des dérivées partielles nécessite une justification théorique. Leurs expressions étant différentes dans les deux schémas envisagés.

Dans le premier schéma :

$$\frac{\partial s}{\partial T} = -\frac{Q}{4\pi T^2} \cdot [W + \frac{r}{2} \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot S'}{T}} \cdot \frac{\partial W}{\partial v}]$$

$$\frac{\partial s}{\partial S} = -\frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{S'}{S^2} \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial s}{\partial S'} = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \left[\frac{1}{S} \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta} + \frac{r}{2} \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{S' \cdot T}} \cdot \frac{\partial W}{\partial v} \right]$$

$$\frac{\partial s}{\partial \alpha} = \frac{Q}{8\pi T} \left[t \cdot \frac{\partial W}{\partial k} + r \cdot \sqrt{\frac{S'}{\alpha T}} \cdot \frac{\partial W}{\partial v} \right]$$

Dans le deuxième schéma :

$$\frac{\partial s}{\partial T} = -\frac{Q}{4\pi T^2} \left[W + \frac{r}{2} \cdot \sqrt{\frac{K'}{b' T}} \cdot \frac{\partial W}{\partial v} \right]$$

$$\frac{\partial s}{\partial S} = -\frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{S'}{S^2} \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial s}{\partial S'} = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial W}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial s}{\partial \alpha} = \frac{Q}{8\pi T} \cdot t \cdot \frac{\partial W}{\partial k}$$

$$\frac{\partial s}{\partial K'} = \frac{Q}{8\pi T} \cdot \frac{r}{\sqrt{K' \cdot T \cdot b'}} \cdot \frac{\partial W}{\partial v}$$

3) Justification de l'existence des dérivées partielles.

Une meilleure connaissance des fonctions à intégrer est apportée par les majorations suivantes :

- Pour $x > 0$; $\eta > 1$; $k \in [a, b] \subset]0, \infty[$

$$0 \leq \frac{1}{y} \leq \frac{1}{|x^2-1|}$$

$$\frac{1}{1+x^2} \leq \frac{\eta}{y} \leq \frac{1}{|x^2-1|}$$

$$0 < \exp[-k \cdot \eta \cdot (1+x^2) + k \cdot y] \leq \exp\left[-\frac{2a \cdot x^2}{1+x^2}\right]$$

$$0 < \exp[-k \cdot \eta \cdot (1+x^2) - k \cdot y] \leq \exp[-2a \cdot x^2]$$

- Pour $x \geq 1$

$$0 \leq 1 + \frac{\eta \cdot (1-x^2)}{y} \leq \frac{2}{1+x^2}$$

$$\frac{2x^2}{1+x^2} \leq 1 - \frac{\eta \cdot (1-x^2)}{y} \leq 2$$

$$0 \leq 1 + \frac{2}{y} - \frac{\eta}{y} (1+x^2) \leq \frac{2}{x^2-1}$$

$$0 < 1 - \frac{2}{y} + \frac{\eta}{y} (1+x^2) \leq \frac{2x^2}{x^2-1}$$

$$0 \leq \frac{\eta}{3} (x^2-1) \leq \frac{1}{(x^2-1)^2}$$

$$0 < \frac{\eta}{y^2} \cdot [\eta \cdot (x^2+1)^2 - (3x^2+1)] + \frac{1}{y} [\eta(x^2+1) - 1] \leq \frac{2x^2 \sqrt{1+x^2}}{(x^2-1)^2}$$

$$-\frac{2 \sqrt{x^2+1}}{(x^2-1)^2} \leq \frac{\eta}{y^2} [\eta(x^2+1)^2 - (3x^2+1)] - \frac{1}{y} [\eta(x^2+1) - 1] < 0.$$

— Compte tenu des inégalités précédentes et de l'expression asymptotique des fonctions de Bessel au voisinage de l'infini :

$$I_p(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot x}} \cdot \cos\left[x - (2p+1)\frac{\pi}{4}\right] + O\left(\frac{1}{x^{3/2}}\right)$$

(Watson - Theory of Bessel Function).

On montre la convergence uniforme des intégrales généralisées qui interviennent dans

$$\frac{\partial W}{\partial k}, \frac{\partial W}{\partial v} \text{ et } \frac{\partial W}{\partial \eta}$$

par rapport aux différents paramètres dans tout segment de R^+ pour k et v , de $]1, \infty[$ pour η .

Convergence uniforme acquise par calcul direct pour

$$\int_1^\infty I_1(\rho \cdot x) dx$$

sachant que $I_1(X) = -I_0'(X)$ et en utilisant la technique suivante dans les autres cas : on majore la valeur absolue des fonctions à intégrer entre 1 et ∞ par une fonction indépendante des paramètres, équivalente au voisinage de l'infini à une expression de la forme

$$\frac{K}{x^\alpha} |I_p(\rho \cdot x)| \text{ avec } K \text{ réel positif, } \alpha > \frac{1}{2} \text{ et } \rho = 0 \text{ ou } 1,$$

L'expression asymptotique de $I_p(\rho \cdot x)$ permet de conclure.

— en remarquant enfin que seule l'intégrale de W est généralisée en 0 et converge, les théorèmes classiques de permutation des dérivations et des intégrales généralisées permettent d'écrire les expressions des dérivées partielles :

$$\frac{\partial W}{\partial k} = 2\eta \cdot \int_0^\infty x \cdot \left[(\exp[-k\eta(2+x^2)+ky]) \left(1 + \frac{2}{y} - \frac{\eta(1+x^2)}{y}\right) + (\exp[-k\eta(1+x^2)-ky]) \left(1 - \frac{2}{y} + \frac{\eta(1+x^2)}{y}\right) \right] I_0(\rho \cdot x) dx$$

$$\frac{\partial W}{\partial v} = \frac{2\sqrt{\eta}}{\sqrt{\eta-1}} \cdot \int_0^\infty [1-f] I_1(\rho \cdot x) dx$$

$$\frac{\partial W}{\partial \eta} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 \text{ avec}$$

$$I_1 = \frac{v}{(\eta-1)\sqrt{\eta(\eta-1)}} \cdot \int_0^\infty [1-f] I_1(\rho \cdot x) dx$$

$$I_2 = 2k \int_0^\infty x \cdot (\exp[-k\eta(1+x^2)+ky]) \left(\frac{\eta}{y} [\eta(x^2+1)^2 - (3x^2+1)] - \frac{1}{y} [\eta(x^2+1)-1]\right) I_0(\rho \cdot x) dx$$

$$I_3 = -2\eta \int_0^\infty \frac{x(x^2-1)}{y^3} (\exp[-k\eta(1+x^2)+ky]) I_0(\rho \cdot x) dx$$

$$I_4 = 2k \int_0^\infty x (\exp[-k\eta(1+x^2)-ky]) \left(\frac{\eta}{y} [\eta(x^2+1)^2 - (3x^2+1)] + \frac{1}{y} [\eta(x^2+1)-1]\right) I_0(\rho \cdot x) dx$$

$$I_5 = 2\eta \int_0^\infty \frac{x(x^2-1)}{y^3} (\exp[-k\eta(1+x^2) - ky]) I_0(\rho \cdot x) dx$$

Pour l'évaluation numérique des dérivées partielles, le changement de variable $X = \rho \cdot x$ ramène chaque expression à la forme

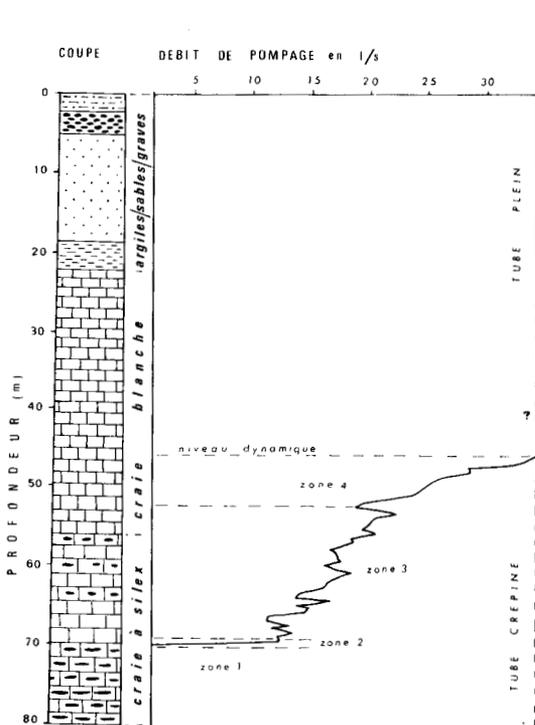
$$\int_0^{\infty} g(X) I_0(X) dX \quad (\text{ou} \int_0^{\infty} g(X) I_1(X) dX)$$

avec g fonction de signe constant. On introduit les valeurs approchées $s_1 \dots s_n$ des zéros de I_0 (ou de I_1) et on prend comme valeur approchée de l'intégrale une somme partielle du rang n de la série alternée dont le terme général est

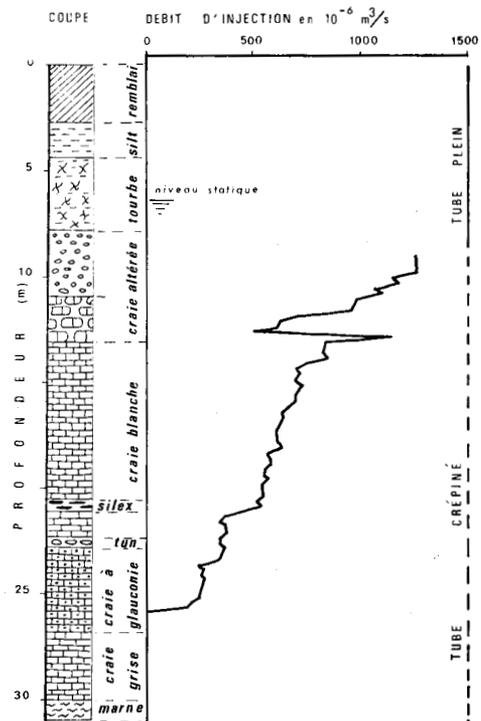
$$\int_{s_{n-1}}^{s_n} g(X) I_0(X) du \quad (\text{ou} \int_{s_{n-1}}^{s_n} g(X) I_1(X) dX)$$

* * *

Annexe B : Diagraphies des vitesses d'écoulement obtenues par utilisation du micromoulinet en forage

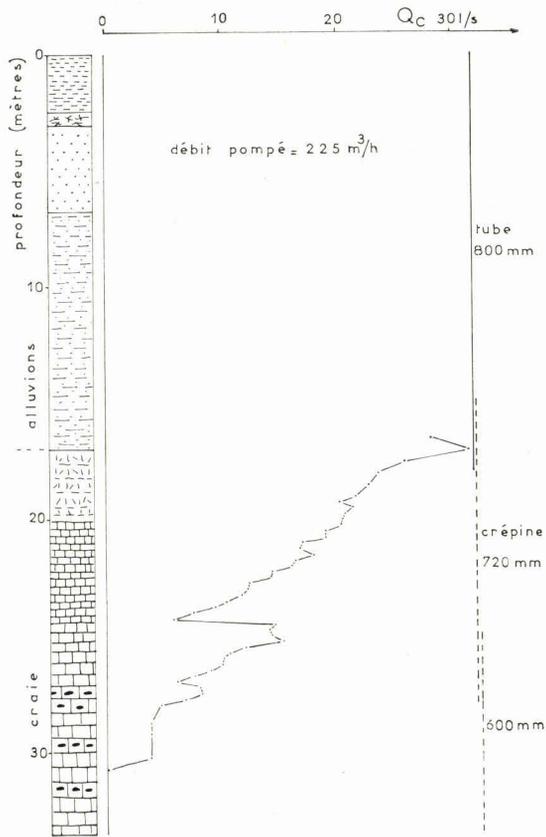


a : ARQUES
(B.R.G.M., 76 NPA 47, F. Rossignol).

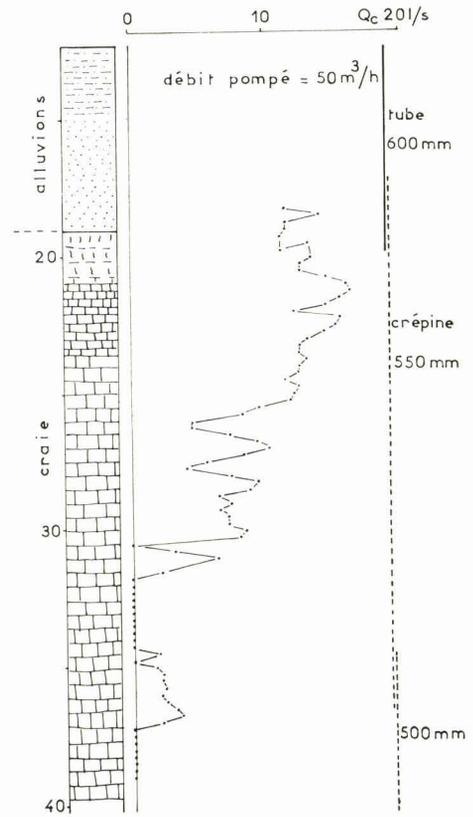


b : LILLE
(B.R.G.M., 75 SGN 325 NPA, A. Dieudonné, J.M. Rogez).

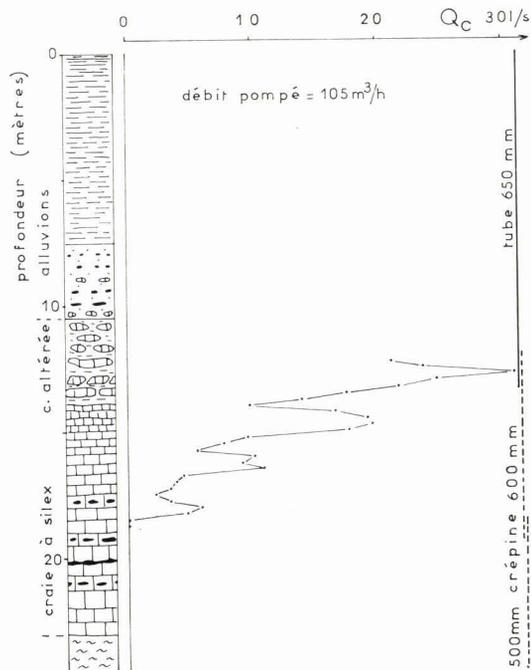




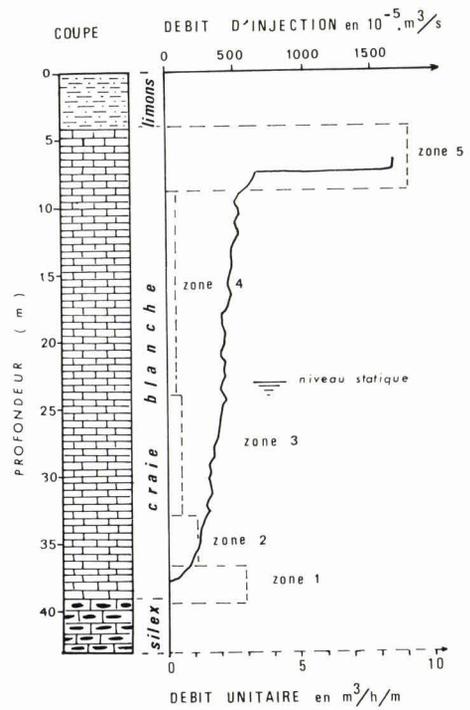
c: LILLERS



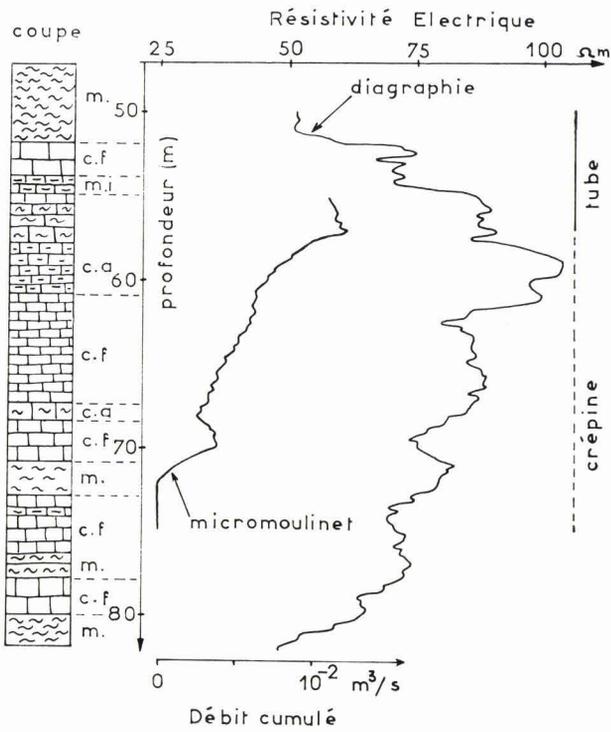
e: CONDE-SUR-ESCAUT



d: AGNY

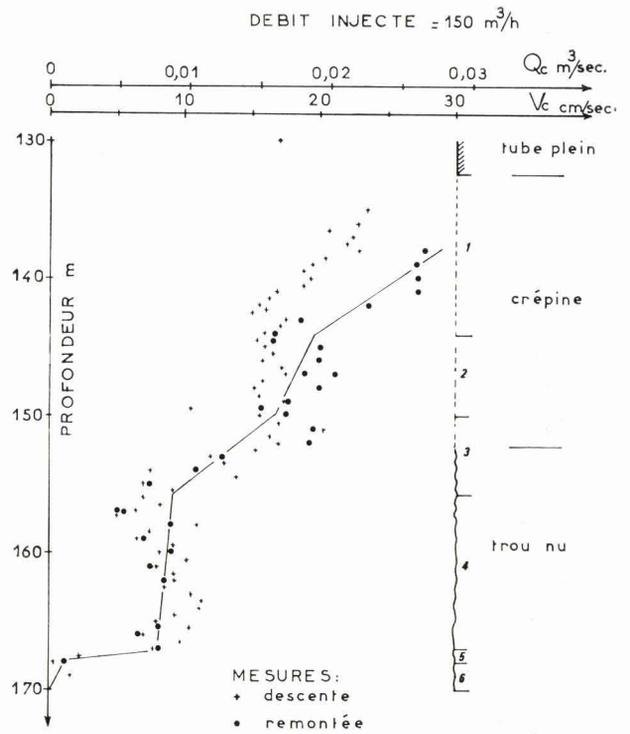


f: DECHY



g : FRUGES

Légende : m, marnes. — m.i., marnes indurées. — c.f., craie fissurée. — c.a., craie argileuse.



h : BONDUES

Diagraphies des vitesses d'écoulement
obtenues par utilisation du micromoulinet
en forage.

SIGLES UTILISES

A.B.A.P. : Agence de Bassin Artois-Picardie.

A.E.P. : Adduction d'Eau Potable.

B.R.G.M. : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (*).

B.U.R.G.E.A.P. : Bureau d'Etudes de Géologie Appliquée.

C.I.T.I. : Centre Interuniversitaire de Traitement Informatique.

C.P.G.F. : Compagnie de Prospection Géophysique Française.

C.U.D.L. : Communauté Urbaine de Lille.

H.B.N.P.C. : Houillères du Bassin Nord - Pas-de-Calais.

S.A.F.E.G.E. : Société Anonyme Française d'Etude et de Gestion.

S.E.N. : Société des Eaux du Nord.

S.G.E.C. : Société Générale des Eaux de Calais.

S.G.R. : Service Géologique Régional.

S.H.C. : Service Hydrologique Centralisateur.

S.I. : Syndicat Intercommunal.

S.I.D.E.N. : Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord.

S.L.E.E. : Société Lyonnaise des Eaux et de l'Eclairage.

S.O.G.R.E.A.H. : Société Grenobloise d'Etudes et d'Aménagements
Hydrauliques.

(*) Les rapports internes du B.R.G.M. peuvent être consultés au Service Géologique National, B.P. 6009, 45018 Orléans Cedex.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

ABREVIATIONS UTILISEES

A.B.A.P. : Agence de Bassin Artois-Picardie.
 Agr. Exp. Sta. Misc. : Agricultural Expositions State Miscellaneous.
 A.I.H.S. : Association International of Hydrological Sciences.
 Ann. Soc. géol. Nord : Annales de la Société géologique du Nord.
 Bull. : Bulletin.
 Bull. Liaison lab. routiers P. et Ch. : Bulletin de Liaison des laboratoires routiers des Ponts et Chaussées.
 B.R.G.M. : Bureau de Recherches géologiques et minières.
 Bull. Soc. neuchatoise Sc. Nat. : Bulletin de la Société neuchatoise de Sciences Naturelles.
 Comm. : Comité.
 C.P.G.F. : Compagnie de Prospection Géophysique Française.
 C.R. Ac. Sc. : Comptes rendus de l'Académie des Sciences.
 C.R. somm. Soc. géol. Fr. : Comptes rendus sommaires de la Société géologique de France.
 Congr. : Congrès.
 Contrib. : Contribution.
 D.E.A. : Diplôme d'Etudes Approfondies.
 D.E.S. : Diplôme d'Etudes Supérieures.
 Eclogae geol. helv. : Eclogae geologica helvetica.
 Ed. : Edition.
 Fac. Sci. : Faculté des Sciences.
 Hydraul. Lab. Water Resour. Center Univ. of Calif. : Hydraulic Laboratory Water Resources Center University of California.
 J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng. : Journal of the Hydraulic Division of American Society.
 Jour. of Hydrology : Journal of Hydrology.
 Minist. Agric., Eau et Gén. rur. : Ministère de l'Agriculture, de l'Eau et du Génie rural.
 Proc. Inst. Civil Engrs : Proceedings of the Institut of Civil Engineers.
 Publ. Inst. franç. Pétrole : Publications de l'Institut français du Pétrole.
 Publ. Lab. Calcul : Publications du Laboratoire de Calcul.
 Rapport CIG ENSM : Rapport du Centre Informatique de Géologie de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines (Paris).
 Razvedka Okhr. Nedr. SSSR : Razvedka Okhrana Nedr. SSSR.

Serv. géol. Belgique : Service géologique de Belgique.
 Symp. Intern. Assoc. Sci. Hydrology : Symposium international of Association Science of Hydrology.
 Trans. Am. Geophys. Union : Transactions of American Geophysical Union.
 Univ. Sc. et Tech. Lille : Université des Sciences et Techniques de Lille.
 U.S. Geol. Surv. : United States Geological Survey.
 Water Res. Research : Water Resources Research.

Thème 1 : MODELISATION

- 1) BITTINGER M.W, DUKE H.R. et LONGENBAUCH R.A. (1967). — Mathematical simulation for better aquifer management. *Publication n° 72, International Association for Scientific Hydrology*, Symposium of Haifa Israel, march 19-26 1967, p. 509-519.
- 2) BONNET M. et RICOUR J. (1975). — La prévision de l'effet des aménagements fluviaux sur les nappes. Analyse de deux cas concrets. *La Houille blanche*, n° 2-3, 1975, p. 109-116, 10 fig.
- 3) CREMILLE L. et MANIA J. (1974). — Etude des ressources en eau du Calaisis (Pas-de-Calais). Bilan de la nappe de la craie. Elaboration d'un modèle mathématique général. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 367 NPA, 29 p., 10 tabl., 12 graph., 14 fig., 2 cartes.
- 4) CREMILLE L. et RICOUR Jacques (1974). — Modèle mathématique de gestion de la nappe de la craie de l'Escaut à l'aval de Valenciennes (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 009 NPA, 25 p., 5 ann.
- 5) CREMILLE L. et RICOUR Jacques (1974). — Etude des ressources en eau du bassin versant Audomarois. Modèle mathématique de dégrossissage de la nappe de la craie. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 434 NPA, 16 p., 6 ann.
- 6) DEGALLIER R. (1972). — Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 3, p. 23-42, 6 tabl.
- 7) EMSELLEM Y. et PRUDHOMME P. (1967). — Traitement des mesures hydrogéologiques à l'aide des modèles. *Annales des mines*, janv. 1967, p. 39-58, 13 fig.
- 8) EMSELLEM Y. (1971). — Modèles mathématiques pour la gestion intégrée des ressources en eau. *Rapport R/71/6 Centre d'informatique géologique de l'Ecole des Mines de Paris*, Fontainebleau.

- 9) EMSELLEM Y. (1972). — Hydrogéologie mathématique moderne. *Annales des mines*, déc. 1972, p. 55-72, 18 fig.
- 10) ESHETT A. et LONGENBAUGH R.A. (1965). — Mathematical model for Transient Flow in Porous Media. *Progress Report CER 65 RAL- AE 59*, Civil Engineering Section Colorado State University, Fort Collins, Colo.
- 11) FRIED J.J. (1975). — Groundwater pollution. 330 p., Ed. Elsevier.
- 12) FUJINAVA K. (1977). — Finite element analysis of groundwater Flow in multiaquifer systems II. A quasi three dimensional flow model. *Jour. of Hydrology*, 33, p. 349-362.
- 13) GEMINARD L. (1962). — Techniques mathématiques à l'usage des ingénieurs du génie chimique et du génie civil. T. 1, 255 p., T. 2, 210 p., Ed. Technip.
- 14) GUPTA S.K. et TANJI K.K. (1976). — A Three-dimensional Galerkin finite element solution of flow through multiaquifers in Sutter Basin - California *Water Res. Research*, vol. 12, n° 2, p. 155-162, 6 fig.
- 15) HABIB P. et SABARLY F., (1953). — Etude de la circulation de l'eau dans un sol perméable par analogie électrique à trois dimensions. 3^e Congrès International de Mécanique des Sols, II, p. 250-254.
- 16) HELWEG O.J. et LABADIE J.W. (1976). — A salinity management strategy for stream aquifer systems. *Hydrology Papers*, n° 84, Colorado state Univ. Fort Collins, p. 1-34.
- 17) HUARD DE LA MARRE P. (1952). — Calcul expérimental analogique. Etude rhéoelectrique des problèmes d'infiltration. *Le Génie civil*, 1^{er} nov. 1952.
- 18) HUARD DE LA MARRE P. (1958). — Résolution des problèmes d'infiltration à surface libre au moyen d'analogies électriques. Thèse Fac. Sc. Paris, juin 1956; *Publ. Scient. et Tech. du Min. de l'Air*, n° 340, 1958, 154 p.
- 19) KARPLUS W.J. (1958). — Analog simulation. Mc Graw-Hill Book Company, New-York.
- 20) KORN G.A. et KORN T.M. (1952). — Electronic Analog Computers. Mc Graw-Hill Book Company, New-York.
- 21) LAFFITTE P. (1972). — Traité d'informatique géologique. 624 p. Ed. Masson et Cie.
- 22) LONGENBAUGH R.A. (1967). — Mathematical Simulation of a Stream Aquifer System. *Report CER 67-68 RAL22*, Department of Civil Engineering. Colorado State University. Fort Collins. Colo.
- 23) MALLET J.L. (1971). — Etude numérique de l'équation de la diffusion. Problème direct. Problème inverse. Thèse doctorat Etat, Fac. Sc. Univ. Nancy I.
- 24) MANIA J. (1976). — Modèle transitoire de la nappe du Calcaire carbonifère de la région de Lille (Nord) à Tournai (Belgique). Simulation de l'alimentation artificielle. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 1-2, p. 47-61, 8 fig., 4 tabl.
- 25) PRUDHOMME P. et SOUQUET G. (1964). — Principe de l'analogie électrique. *B.R.G.M., Chronique d'hydrogéologie*, n° 4, déc. 1964, p. 15-20, 2 fig.
- 26) PRUDHOMME P. et SOUQUET G. (1964). — Utilisation pratique des modèles électriques. *B.R.G.M., Chronique d'hydrogéologie*, n° 4, déc. 1964, p. 21-23.
- 27) RAMON S. (1972). — Nappe de la craie dans le bassin d'Orchies (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 325 NPA, 15 p., 2 fig., 10 ann.
- 28) RAMON S. (1972). — Etude de la nappe de la craie sous Lille. Conception du schéma hydrogéologique et élaboration d'un modèle mathématique. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 026 NPA, 23 p., 4 fig., 12 ann.
- 29) RAMON S. (1973). — Vallée de l'Aa d'Esquerdes à Arques (P.-de-C.). Données de 1972 et réalisation d'un modèle mathématique de la nappe de la craie en régime permanent. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 061 NPA, 18 p., 8 ann.
- 30) RAMON S. et CREMILLE L. (1974). — Nappe de la craie sous Lille. Modèle mathématique à 1.800 mailles des écoulements sous l'agglomération lilloise. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 137 NPA, 17 p., 7 ann., 1 fig., 1 tabl.
- 31) RICOUR Jacques (1975). — Inventaire des ressources en eau dans l'interfluve Aa-Lys. Modèle mathématique de gestion de la région comprise entre la Hem et la Lys. *Rapport B.R.G.M.*, 75 SGN 039 NPA, 30 p., 9 fig., 7 ann., 5 tabl.
- 32) ROUSSELOT D. (1970). — Informatique hydrogéologique. Simulation par modèle mathématique des écoulements bidimensionnels à surface libre en milieu poreux. Régime transitoire. Programme DRTRA (1.800 mailles). *Rapport B.R.G.M.*, 70 SGN 358 HYD, 14 p., 30 pl.
- 33) ROUSSELOT D. (1971). — Informatique hydrogéologique. Simulation par modèle mathématique des écoulements bidimensionnels à surface libre en milieu poreux. Régime permanent. Programme DRPLIBY (1.800 mailles). *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 176 HYD, 4 p., 12 pl. ann.
- 34) ROUSSELOT D. (1971). — Informatique hydrogéologique. Simulation par modèle mathématique des écoulements bidimensionnels à surface libre en milieu poreux. Régime transitoire. Programme DRAQULA. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 364 HYD, 10 p., 23 pl.
- 35) ROUSSELOT D. (1972). — Simulation par modèle mathématique des écoulements bidimensionnels en milieu poreux. Régime permanent, mailles carrées. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 401 AME, 88 p., 60 fig.
- 36) ROUSSELOT D. (1974). — Simulation par modèle mathématique des écoulements bidimensionnels en milieu poreux. Régime transitoire, mailles carrées. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 041 AME, 136 p., 97 fig.
- 37) SAUCEROTTE M. (1969). — Méthodes d'étude régionale des ressources en eau. Application au bassin de l'Allier. Modèles mathématiques des nappes aquifères. DRGST Action concertée Eau. *Groupe Hydrologie*, Fac. Sciences Montpellier, 1966-1970, p. 45-47.
- 38) SAUTY P.P. (1969). — Présentation d'un modèle mathématique de la propagation d'un front de pollution dans une nappe d'eau souterraine. *La Houille Blanche*, n° 8, p. 731-736.

- 39) SOURIEAU P. (1963). — Etude de déplacement de fluides dans les milieux poreux à l'aide de modèles physiques. *La Houille Blanche*, n° 8, p. 897-908.
- 40) STALLMAN R.W. (1963). — Calculation of Resistance and Error in an Electric Analog of Steady flow through Nonhomogeneous Aquifers. *U.S. Geol. Surv. Water Supply*, Paper 1544 G.
- 41) STETTNER P. (1968). — Aquifer Models Mathematical and Physical. *Thesis* presented to Colorado State University at Fort Collins. Colo., in 1968, Master of Science.
- 42) SUZANNE P. et UNGEMACH P. (1970). — Exemples d'application des modèles électriques et mathématiques à la gestion des nappes aquifères. *Convegno Intern. sulle acque sotterranee*, Palerme, 6-8 déc. 1970.
- 43) TRESMOTT R.C., PINDER G.F. et LARSON S.P. (1976). — Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. *Techniques of water resources Investigations of the US Geological Survey*. Book 7, Ch. C1, 116 p., 30 fig.
- 44) UNGEMACH P. (1968). — Application des modèles analogiques électriques à l'étude hydrodynamique de la nappe phréatique d'Alsace. *Dipl. Ing. Géophys.*, Strasbourg.
- 45) UNGEMACH P., PRUDHOMME P. et ROGNON P.H. (1968). — Etude sur modèle analogique électrique de l'alimentation par le Rhin de la nappe phréatique d'Alsace. *La Houille Blanche*, n° 5, p. 419-428.
- 46) UNGEMACH P. (1973). — Simulation de nappes d'eaux souterraines. Outils, méthodes, problèmes. Application aux modèles de ressources, d'aménagement et de pollution. *Thèse Doctorat Etat*, Univ. L. Pasteur, Strasbourg.
- 47) UNGEMACH P. et REBOUCAS A. (1973). — Modèles pour la gestion des eaux souterraines. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 408 AME, 60 p.
- 48) WALTON W.C. et NEILL J.C. (1960). — Analyzing Groundwater Problems with Mathematical Models and a Digital Computer. *Intern. Assoc. Sci. Hydrology*, Publ. 52.
- 49) WALTON W.C. et PRICKETT T.A. (1963). — Hydrogeologic Electric Analog Computers. *J. Hydraulics Div.*
- 50) WALTON W.C. (1964). — Electric Analog Computers and Hydrogeologic System Analysis in Illinois. *Ground Water*, vol. 2, n° 4.
- 51) WASS C.A.A. (1955). — Introduction to Electronic Analog Computers. Mc Graw-Hill, Book Company, New-York.
- 52) ARON G. (1969). — Optimization of conjunctively managed surface and ground water resources by dynamic programming. *Contrib.* 129, 158 p., Water Resour. Center Univ. Calif. Davis.
- 53) ASHKANASY N.M. et MAZEL C.P. (1974). — The conjunctive utilisation of surface and groundwater supplies. A case Study. *Civil Engineering Transactions*, p. 108-114, 4 fig.
- 54) AURIOL J., BONNET M. et VANDENBEUSCH M. (1975). — Optimisation des dispositifs de captage pour l'irrigation par simulation sur modèles mathématiques et programmation linéaire. *Comm. 9^e Congr. mondial C.I.I.D.*, Moscou, 1975, 17 p.
- 55) BRUTSAERT W.F. et GEBHARD T.G. (1975). — Conjunctive availability of surface and groundwater in the Albuquerque Area, New Mexico: A modelling approach. *Ground Water*, vol. 13, n° 4.
- 56) BURAS N. (1963). — Conjunctive operation of dams and aquifers. *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil eng.*, 89, (HY6), p. 111-131.
- 57) BURT O.R. (1964). — The economics of conjunctive use for ground and surface water. *Hilgardia*, 36 (2), p. 31-111.
- 58) CASTLE E.N. et LINDEBERG K.H. (1961). — Economics of ground water allocation. *Agr. Exp. Sta. Misc.*, 108, Oreg. State Univ. Corvallis.
- 59) DRACUP J.A. (1965). — The optimal use of a ground water and surface water system. A parametric linear programming approach. *Tech. Pap. 6-24 Contrib.* 107. Hydraul. lab. Water Resour. Center, Univ. of Calif Berkeley.
- 60) DUDLEY N.J. et BURT O.R. (1973). — Stochastic reservoir management and system design for irrigation. *Water Res. Research*, 9, (3), p. 507-552.
- 61) FLETCHER R. (1969). — Optimization. 325 p. (recueil d'articles), Ed. Academic Press.
- 62) GUIGNARD M. (1971). — Programmation linéaire et applications. *Publ. Lab. Calcul*, Univ. Sc. et Techn. Lille, 52 p.
- 63) HARTLEY H.O. (1961). — Modified Gauss-Newton method for fitting on non-linear regression functions. *Technometrics*. vol. 3, p. 269-280.
- 64) JENNRICH R.I. et SAMPSON P.F. (1968). — Application of stepwise regression to non-linear least squares estimation. *Technometrics*, vol. 10, p. 63-72.
- 65) JOHNSTON P.R., LAURENSEN E.M. et HOWELL D.T. (1974). — A design for conjunctive use of surface and Ground Water storages. *Australian Water Resour. Council*, Technical Paper, n° 3, 35 p., 16 fig.
- 66) LONGENBAUGH R.A. (1970). — Determining optimum operational policies for conjunctive use of ground and surface water using linear programming. *Hydraul. Div. Spec. Conf. Amer. Soc. of Civil Eng.* Minneapolis Minn., 19-21.
- 67) MADDOCK T. (1974). — The operation of a stream Aquifer System under stochastic demands. *Water Res. Research*, vol. 10, n° 1, p. 1-10, 2 fig.
- 68) MILLIGAN J.H. (1970). — Optimizing conjunctive use of groundwater and surface water. *Utah Water Res. Lab. State Univ. Logan*, p. 100.
- 69) NIESWAND G.H. et GRANSTROM M.L. (1971). — A chance-contained approach to the conjunctive use of surface waters and ground waters. *Water Res. Research*, 7, (6), p. 1425-1436.

Thème 2 : OPTIMISATION

- 70) PALCIAUSKAS V.V. et DOMENICO P.A. (1973). — On the optimal operation of groundwater basins: a calculus of variations approach. *Jour. of Hydrology*, 20, p. 181-189.
- 71) SAMPSON P.F. (1971). — Program BMD 07R non linear least squares. *Health Sciences Computing Facility UCLA*, p. 387-394.
- 72) VANDENBEUSCH M. (1973). — Implantation optimale de captages. Programme Opper. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 161 AME, 18 p.
- 73) VANDENBEUSCH M. (1973). — Gestion des ressources. Programme d'optimisation PROLI. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 433 AME, 8 p., 2 ann.
- 74) YOUNG R.A. et BREDEHOEFT J.D. (1972). — Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems. *Water Res. Research*, 8, (3), p. 533-556.
- 84) LEGRAND R. (1968). — Le Massif du Brabant. *Serv. géol. Belgique*, mém. n° 9, 148 p., 9 fig. 5 cartes.
- 85) LEPLAT J. et VIVIER M. (1969). — Les sables de la région du Nord. *Bull. Liaison lab. routiers P. et Ch.*, n° 38, réf. 633, p. 61-92, 36 fig., 5 pl.
- 86) MANGANO F., MARCE A., MARTIN J.M. et OLIVE P. (1969). — Les isotopes radio-actifs pour la datation des eaux souterraines. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 3, p. 39-46, 10 fig.
- 87) MANIA J. (1973). — Contribution à l'étude hydrogéologique des bassins versants de l'Artois. Application du calcul automatique. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCIII, p. 85-93, 7 fig., 4 tabl.
- 88) MANIA J. (1975). — Calcul mensuel du bilan hydrique. Mise au point d'un programme de restitution automatique de la piézométrie d'une nappe d'eau souterraine. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCV, p. 93-100.

Thème 3 : ALIMENTATION DES AQUIFERES ET PIEZOMETRIE

- 75) CASTANY G. (1963). — Traité pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris, 2^e éd., 696 p., 410 fig.
- 76) CAUCHETIER B. et RAMON S. (1972). — Relation entre les fluctuations de la nappe et le bilan de Thornthwaite dans la région de Dunkerque. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 320 NPA, 6 p., 3 ann.
- 77) COLLIN J.J., DELAROZIERE O., LEBLANC M. et LEGRAND D. (1968). — Abaque de détermination pratique de l'évapotranspiration réelle annuelle selon la formule de Turc. *Rapport B.R.G.M.*, 68 SGL 067 HYD, 5 p., 1 carte h.t.
- 78) CREMILLE L. (1976). — Etat piézométrique de la nappe de la craie dans la région Nord. Période de basses eaux prolongées. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 124 NPA, 8 p., 2 pl.
- 79) CREMILLE L. et MANIA J. (1976). — Annuaire piézométrique du Nord de la France. Evolution relative à 50 ouvrages sélectionnés. Période 1964-1974. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 123 NPA, 8 p., 56 graph.
- 80) DEGALLIER R. (1975). — Interprétations des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Applications aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). *Doctorat d'Etat*, Univ. Sc. et Techn. Montpellier, 231 p., 50 tabl., 71 pl., 147 fig.
- 81) GARNIER J.M. (1976). — Un modèle de l'estimation de l'activité initiale du carbone dissous et des vitesses d'écoulement en régime captif. Application aux nappes des sables aptiens de l'Hérault, des sables landéniens des Flandres franco-belges, des calcaires carbonifères du Nord. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Pierre et Marie Curie, 82 p., 18 fig., 13 tabl.
- 82) LJAL'KO V.I. (1960). — L'emploi de la méthode au tritium dans les recherches hydrogéologiques. *Razvedka Okhr. Nedr. SSSR*, n° 12, p. 52-55, 3 fig.
- 83) LAKSHMANAN J. (1963). — Nappe aquifère du Bas-Escaut. Etude géophysique. *Rapport C.P.G.F.*, mars 1963.
- 89) MARGAT J. (1966). — Age des eaux souterraines et renouvellement des réserves des nappes. Réflexions sur les bases de l'hydrochronologie. *Bull. B.R.G.M.*, n° 6, 1966, p. 37-51, 3 tabl.
- 90) MARGAT J., VUILLAUME Y (1967). — Datation des nappes d'eau souterraines par le radio-carbone. *Rapport B.R.G.M.*, DS 67 A 37, p. 54.
- 91) RAMBERT B. (1973). — Recherches sur la signification hydrogéologique de la densité du drainage. Application à la détermination et à la cartographie de l'écoulement souterrain. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 422 AME, 63 p., 12 tabl., 12 graph.
- 92) RAMBERT B. (1971). — Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 389 HYD, 34 p., 19 fig.
- 93) REMENIERAS G. (1960). — L'hydrologie de l'ingénieur. 413 p. Ed. Eyrolles.
- 94) REZAI-VALYCE G.H. (1970). — Recherche des facteurs de l'écoulement dans les bassins de Picardie et de Haute-Normandie. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Sc. Paris VI, 144 p.
- 95) SCHOELLER H. (1962). — Les eaux souterraines. 642 p., 187 fig.. Ed. Masson et Cie.
- 96) THORNTHWAITE C.W. (1948). — An approach toward a rational classification of climates. *Geogr. Review*, vol. 38.
- 97) TURC L. (1961). — Evolution des besoins en eau d'irrigation. Evapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.*, 12, 1, p. 13-49.
- 98) VARLET H. (1966). — Barrages réservoirs. T. 1, 335 p. Ed. Eyrolles.

Thème 4 : CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES

- 99) BERKALOFF E. (1969). — Interprétation des pompages d'essai. Cas des nappes captives avec une strate conductrice d'eau priviligée. *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 175 HYD, 25 p., 8 fig.

- 100) BERKALOFF E. (1969). — Interprétation des remontées de niveau d'eau après un pompage à débit constant. Cas de nappes captives dotées d'une strate conductrice d'eau privilégiée. *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 228 HYD, oct. 1969, 16 p., 3 fig.
- 101) BERNARD G. (1969). — Interprétation des essais de débit effectués aux Ansereuilles en 1965. *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 226 NPA 8 p., 3 ann.
- 102) BERNARD G., RAMON S. et SOYEZ C. (1969). — Liaison Deûle-Escaut. Etude hydrogéologique de la variante sud du canal. Estimation du débit drainé. *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 284 NPA, 29 p., 6 fig., 6 ann.
- 103) BERNARD G. et RAMON S. (1969). — Essai de pompage de l'Ecluse de la Folie dans les alluvions de l'Escaut à Bruay-sur-Escaut (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 069 NPA, 9 p., 12 fig.
- 104) BESBES M. et KORGANOFF A. (1973). — Restitution des paramètres hydrauliques d'un aquifère à partir de l'historique des niveaux en un puits-témoin. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 2, p. 113-117, 3 fig.
- 105) BONNET M. (1966). — Interprétation d'essais de pompage effectués dans la nappe de la vallée de l'Escaut en aval de Valenciennes. *Rapport géohydraulique*, Geop 596, 33 p., 2 ann., 23 pl.
- 106) BONNET M. (1966). — Interprétation d'essais de pompage effectués dans la région de Fresnes-sur-Escaut. *Rapport Géopétrole*, n° 684, 45 p., 16 pl.
- 107) BOULTON N.S. (1963). — Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed field from storage. *Proc. Inst. Civil Engrs* (London), vol. 26, n° 6693, p. 469-482.
- 108) BOULTON N.S. (1973). — The influence of delayed drainage on data from pumping test in unconfined aquifers. *Jour. of Hydrology*, 19, p. 157-169.
- 109) BOULTON N.S. et STRELTSOVA T.D. (1975). — New equations for determining the formation constants of an aquifer from pumping test data. *Water Res. Research*, vol. 11, n° 1, p. 143-153.
- 110) BRAILLON J.M., RICOUR J. et ROSSIGNOL F. (1974). — Diagraphie des vitesses d'écoulement dans le forage d'injection de Férin-Dechy (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 75 NPA 14, 5 p., 3 ann.
- 111) BRAILLON J.M., CAULIER P., CREMILLE L., MANIA J., PHILIPPART A. et ROSSIGNOL F. (1977). — Données nouvelles sur les caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Utilisation du micromoulinet. *5^e Réunion annuelle des Sciences de la Terre*, Rennes, 19-22 avril 1977, p. 107.
- 112) BYLOOS J., 1976 — Calcul automatique des paramètres hydrauliques d'un aquifère captif à partir d'un pompage d'essai. *La technique de l'eau*, juin-juillet 1976, p. 17-22, 5 fig.
- 113) CANCEILL M., PEAUDECERF P. et POITRINAL D. (1974). — Recherches sur l'identification de fonctions d'égouttement à partir de données de pompage d'essai. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 2, p. 207-211, 3 fig.
- 114) CASTILLO E., KARADI G. et KRISEK R.J. (1972). — Unconfined flow through jointed rock. *Water Resources Bull.*, vol. 8, n° 2, 1972, p. 266-281, 12 fig.
- 115) CAULIER P. et RAMON S. (1971). — Etude de la nappe de la craie sous Lille. Caractéristiques hydrauliques de l'aquifère. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 222 NPA, 11 p., 4 ann.
- 116) CAULIER P. (1974). — Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Sc. et Tech. Lille, 156 p., 37 fig., 32 pl., 7 ann.
- 117) COLBEAUX J.P. et MANIA J. (1976). — Relations entre la fracturation et l'écoulement des eaux superficielles et souterraines en pays crayeux au Cran d'Escalles. Application à l'Artois. *2^e Colloque d'Hydrologie en pays calcaire*. Univ. Besançon et Neufchâtel, 7 et 10 oct. 1976. *Ann. Scientifique*, 25, 3^e série, p. 79-194.
- 118) CREMILLE L. (1970). — Forage de Quiestède des Etablissements Bonduelle (P.-de-C.). Influence du pompage sur les cressonnières. *Rapport B.R.G.M.*, 70 SGN 148 NPA, 4 p., 3 ann.
- 119) CREMILLE L. et MINNE B. (1971). — Compte rendu et interprétation des pompages d'essai effectués sur le forage F3 du District Urbain de la région Audomaroise. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 320 NPA, 11 p., 7 ann.
- 120) CREMILLE L. (1972). — « Etablissements Bonduelle ». Compte rendu et interprétation de la surveillance des niveaux et débits de 1970 à 1972. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 433 NPA, 18 p., 10 ann.
- 121) CREMILLE L. et RICOUR J. (1975). — Compte rendu et interprétation des pompages d'essai effectués en juillet, août 1974 sur le nouveau forage F12 de la S.G.E.C. à Guines (P.-de-C.). *Rapport B.R.G.M.*, 75 SGN 404 NPA, 9 p., 10 ann.
- 122) DAGUE P. et GALLE-CAVALLONI H. (1971). — Mesures des vitesses verticales de circulation de l'eau dans les forages. Emploi du micromoulinet. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 215 HYD, 16 p., 7 fig.
- 123) DASSONVILLE G., DEZWARTE J.M. et EMSELLEM Y. (1964). — Interprétations des essais de débit réalisés en 1960 et 1961 dans la vallée de la Sensée (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, DSGR 64 A 7, 33 p., 2 ann.
- 124) DASSONVILLE G. (1967). — Résultats des essais de débit effectués sur le nouveau forage de la ville d'Arques (P.-de-C.) au lieu-dit « Le Havelst ». *Rapport B.R.G.M.*, DSGR 67 A 33, 17 p., 2 ann.
- 125) DEBUISSON J. (1971). — Compte rendu et interprétation des pompages d'essai réalisés sur le forage F2 de la féculerie Flourent à Allennes-les-Marais (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 276 NPA, 12 p., 5 ann.
- 126) DEGALLIER R. (1976). — Effets de la pénétration des piézomètres sur l'interprétation de pompages en nappe libre. Abaques de Stallman. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 189 AME, 6 p., 22 fig.
- 127) FERRIS J.G., KNOWLES D.B., BROWN R.H. et STALLMAN R.W. (1962). — Theory of Aquifer Tests. *U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper* 1536-E.

- 128) FORKASIEWICZ J. (1970). — Guide bibliographique méthodique sur l'interprétation des données des pompages d'essai (évaluation des paramètres des aquifères). *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 1, p. 67-72.
- 129) FORKASIEWICZ J. (1972). — Interprétation des données de pompages d'essai pour l'évaluation des paramètres des aquifères. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 273 AME, 50 p., 6 pl., 13 fig.
- 130) FORKASIEWICZ J. (1972). — Cahier des travaux pratiques d'interprétation des pompages d'essai. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 299 AME, 10 exemples.
- 131) FORKASIEWICZ J. et PEAUDECERF P. (1973). — Effets de la pénétration partielle d'un puits de pompage sur l'évolution des rabattements. *Rapport B.R.G.M.*, 73 SGN 441 AME, 23 p., 9 ann.
- 132) FORKASIEWICZ J. et PEAUDECERF P. (1976). — Evaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 032 AME, 45 p., 27 abaques.
- 133) FORKASIEWICZ J., MARGAT J. et PEAUDECERF P. (1976). — Essais sur les forages artésiens jaillissants et sur les sources. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 349 AME, 41 p., 6 ann.
- 134) HANTUSH M.S. (1956). — Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 37, n° 6, p. 702-714.
- 135) HANTUSH M.S. (1959). — Non steady flow to flowing in leaky aquifers. *J. Geophys. Res.*, vol. 64, n° 8, p. 1921-1932.
- 136) HANTUSH M.S. (1961). — Aquifer test on partially penetrating wells. *Proc. Am. Soc. civ. Engrs*, 87 HY5, p. 171-195.
- 137) HANTUSH M.S. (1964). — Hydraulics of wells in « advances in hydroscience ». *Academic Press Inc.*, New-York.
- 138) HELWEG O.J. et LABADIE J.W. (1975). — Step-Drawdown test analysis by computer. *Ground Water*, vol. 13, n° 5, p. 438-444.
- 139) JACOB C.E. et LOHMAN S.W. (1952). — Non steady Flow to a Well of Constant Drawdown, in an Extensive Aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 33, n° 4.
- 140) JACOB C.E. et HANTUSH M.S. (1955). — Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 36, n° 1, p. 286-292.
- 141) Journées d'hydraulique des sols (1963). — Hydraulique des sols. *Bull. Liaison lab. routiers P. et Ch.*, spécial N, 1970, 246 p.
- 142) KIRALY L. (1969). — Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés. *Eclogae geol. helv.*, vol. 62/2, p. 613-619, 3 fig.
- 143) KIRALY L., MATHEY B. et TRIPET J.P. (1971). — Fissuration et orientation des cavités souterraines. Région de la grotte de Milandre (Jura tabulaire). *Bull. soc. neuchateloise Sc. nat.*, t. 94, p. 99-114.
- 144) KORGANOFF A. et BESBES M. (1973). — Restitution des paramètres hydrauliques d'un aquifère à partir de l'historique des niveaux en un puits témoin. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 2, p. 113-117, 3 fig.
- 145) KRUSEMAN G.P., DE RIDDER N.A. et MEILHAC A. (1974). — Interprétation et discussion des pompages d'essai. 213 p., I.L.R.I., Wageningen, 2° éd.
- 146) LIAKOPOULOS A.C. (1965). — Variation of the permeability tensor ellipsoid in homogeneous anisotropic soils. *Water Res. Research*, 1, 1965, p. 135-141.
- 147) LOUIS C. (1974). — Introduction à l'hydraulique des roches. *Bull. B.R.G.M.*, sect. III, n° 4, p. 283-356, 67 fig.
- 148) MANIA J. (1974). — Surveillance d'un pompage d'essai au captage S.N.C.F. de Pont-de-Briques (P.-de-C.). Exécution de diagraphies gamma-ray. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 079 NPA, 28 p., 7 fig., 4 ann.
- 149) MANIA J. (1974). — Compte rendu des essais de pompage sur le forage d'injection exécuté à Saint-Léonard (P.-de-C.). *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 312 NPA, 30 p., 10 fig., 6 tabl.
- 150) MANIA J. (1976). — Un exemple d'analyse automatique par ordinateur des rabattements des nappes d'eau souterraines : Application à l'hypothèse de Theis. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCVI, p. 113-119, 3 fig., 3 ann., 2 tabl.
- 151) MANIA J. et SUCCHE M. (1976). — Mise au point d'un programme d'ordinateur pour l'analyse automatique des courbes de descente. Restitution des paramètres hydrauliques d'un aquifère appliquée aux hypothèses de Theis et de Boulton. *Quatrième réunion annuelle des Sciences de la Terre*, Paris, avril 1976, p. 280.
- 152) MANIA J. et SUCCHE M. (1978). — Automatic analysis of pumping test data. Application at Boulton and Hantush hypothesis. *Jour of Hydrology*, 1978, 37, p. 185-194.
- 153) MINNE B. (1971). — Pompage d'essai du forage n° 15 de la Brasserie Motte-Cordonnier à Armentières (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, NPA 71 SGN 136, p. 6. 5 ann.
- 154) NAPIAS J.C., SANGNIER P. et PHILIPPART A. (1968). — Compte rendu des essais de pompage par la S.A. des fonderies, laminoirs et cimenteries de Biache-St-Vaast (P.-de-C.). *Rapport B.R.G.M.*, 68 SGL 134 NPA, 10 p., 5 ann.
- 155) PAPADOPOULOS I.S. (1965). — Non steady flow to a well in an infinite anisotropic aquifer. *Symp. Intern. Assoc. Sci. Hydrology*, Dubrovnik.
- 156) PHILIPPART A. (1972). — Diagraphie des vitesses d'écoulement dans le forage FC2 de Fruges (P.-de-C.). *Note B.R.G.M.*, 72 NPA 36, 6 p. 2 ann.
- 157) POINTET T. (1975). — Essai de caractérisation du coefficient de tarissement des nappes. *Thèse de Docteur Ingénieur*, Université de Nancy I, 115 p., 9 ann., 63 fig.
- 158) POUCHAN P. (1964). — Etude des forages à l'aide d'un moulinet. Localisation des horizons producteurs. *A.I.H.S.*, Berkeley, 1963, n° 64, p. 235-238.

- 159) PRICKETT T.A. (1965). — Type-curve Solution to Aquifer Tests under Water-table Conditions. *Ground Water*, vol. 3, n° 3.
- 160) RAMON S. (1969). — Compte rendu d'interprétation de l'essai de pompage de l'Ecluse Folien à Valenciennes (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 69 SGL 068 NPA, 10 p., 11 fig.
- 161) ROSSIGNOL F. (1976). — Diagraphie des vitesses d'écoulement verticales dans le forage de la ville d'Arques (P.-de-C.). *Rapport B.R.G.M.*, 76 NPA 47, 5 p., 3 ann.
- 162) SALEEM Z.A. (1970). — A computer method for pumping-test analysis. *Ground Water*, vol. 8, n° 5, p. 21-24, 2 fig.
- 163) SCHNEEBELI G. (1966). — Hydrologie souterraine 362 p. Ed. Eyrolles.
- 164) SERRA O. (1970). — Diagraphies et stratigraphie. *Colloque sur les méthodes et les tendances de la stratigraphie*. Comité français de stratigraphie, 86 p., 41 fig.
- 165) SNOW D.T. (1969). — Anisotropic permeability of fractures media. *Water Res. Research.*, 5, p. 1273-1289.
- 166) STRELTSOVA et RUSHTON (1973). — Water table drawdown due to a pumped well in an unconfined aquifer. *Water Res. Research.*, vol. 9, n° 1, févr. 1973, p. 236-242.
- 167) THEIS C.V. (1935). — The relation between the lowering of Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground-water Storage. *Trans. Am. Geophys. Union*, 16th Ann. Meeting, pt. 2.
- 168) WALTON W.C. (1962). — Selected Analytical Methods for Well and Aquifer Evaluation. *Illinois State Water Surv.*, Bull. 49, 81 p., 6 app., 4 ann., 76 fig.
- 169) WENZEL L.K. (1942). — Methods of Determining Permeability of Water-bearing Materials, with Special Reference to Discharging-well Methods. *U.S. Geol. Surv. Water Supply*, Paper 887.
- 170) WITTKÉ W. et LOUIS Cl. (1968). — Modellversuche zur Durchströmung klüftiger Medien. *Felsmechanik und Ingenium geologie*, suppl. IV, p. 52-78.
- 171) YAKOWITZ S. (1976). — Model-Free Statistical Methods for Water table Prediction. *Water Res. Research*, 12, n° 5, p. 836-844, 14 fig.
- 175) CAULIER P. et PHILIPPART A. (1976). — Renforcement du débit d'étiage de la Lys par surexploitation saisonnière de la nappe de la craie. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 252 NPA, 37 p., 4 fig., 15 tabl., 17 ann.
- 176) DEBUISSON J. (1972). — Etude des possibilités d'alimentation artificielle de la nappe de la craie liée à l'aménagement de plans d'eau dans la région de Seclin (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 270 NPA, 18 p., 11 ann.
- 177) DUROUSSEAU M. et RAMON S. (1971). — Renforcement du débit d'étiage de la Lys par surexploitation saisonnière de la nappe de la craie. Interprétation des travaux effectués en 1970. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 191 NPA, 32 p., 17 ann.
- 178) MANIA J. (1974). — Etude de la nappe du Séquanien de la région de Boulogne-sur-Mer. Recherche de nouveaux sites d'exploitation et de réalimentation artificielle. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 014 NPA, 45 p., 13 fig., 7 ann.
- 179) MANIA J. (1974). — Expérience d'infiltration artificielle dans les alluvions de l'Escaut à Tournai (Belgique). *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 136 NPA, 36 p., 13 fig., 4 ann.
- 180) MANIA J. et RICOUR J. (1974). — Hydrogéologie et alimentation artificielle de la nappe du Séquanien dans la région de St-Léonard (P.-de-C.). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCIV, p. 133-147, 10 fig., 7 tabl.
- 181) MARSILY (DE) G. (1975). — Possibilités de suralimentation de la nappe de la Haute Lys dans la région de Verchin à partir des eaux de la conduite Canche-Lys. *Rapport C'IG ENSM de Paris*, LHM/RC/75/19, 33 p., 23 fig.
- 182) RAMON S. (1972). — Infiltration expérimentale d'Annoeullin (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 291 NPA, 13 p., 5 fig.
- 183) RAMON S. (1973). — Inondation d'Auby (Nord). Note Technique. *Rapport B.R.G.M.*, 73 NPA 05, 8 p., 4 fig., 3 ann.
- 184) RICOUR Jacques (1974). — Etude hydrogéologique des zones de réalimentation de Corbehem, Férin et Brebières (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 034 NPA, 20 p., 7 ann.
- 185) WITHERSPOON et NEUMAN S.P. (1973). — Hydrodynamics of fluid injection. *Water Res. Research*, vol. 9, n° 9, p. 258-272, 11 fig.

Thème 5 : ALIMENTATION ARTIFICIELLE

- 172) BIZE J., BOURGUET L. et LEMOINE J. (1972). — L'alimentation artificielle des nappes souterraines. 199 p., 61 fig., Ed. Masson, Paris.
- 173) CREMILLE L. et RAMON S. (1970). — Méthode de recherche systématique des sites favorables à l'alimentation artificielle des nappes libres. *Ann. soc. géol. Nord*, t. XC, p. 436-439, 6 fig.
- 174) CREMILLE L. (1970). — Région NE de Valenciennes (Nord). Recherche de sites d'alimentation de la nappe libre de la craie. *Rapport B.R.G.M.*, 70 SGN 345 NPA, 17 p., 14 ann.

Thème 6 : HYDROGEOLOGIE

- 186) AMEDRO F., DEJONGHE L., DUPUIS Ch. et ROBAS-ZYNSKI F. (1976). — Les falaises crayeuses du Boulonnais : lithostratigraphie et repères biostratigraphiques de l'Aptien au Sénonien. *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, fasc. 3, p. 91-94, 2 fig.
- 137) ARCY (D') D. (1969). — Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de l'Authie. *Thèse 3^e cycle*, Fac. Sci. Paris, 167 p., 94 fig., 7 pl., 22 tabl.
- 188) BAILLE J.F. et DUROUSSEAU M. (1969). — Contribution à l'étude des ressources en eau dans l'arrondissement de Valenciennes. *Rapport A.B.A.P.*, RB 69-2, 53 p., 14 ann.

- 189) BERNARD D., CAULIER P., CREMILLE L. et MANIA J. (1977). — Etat et évolution de la qualité chimique de l'eau de la nappe de la craie dans le Nord de la France. *Colloque national sur la Protection des Eaux souterraines captées pour l'Alimentation humaine*. Orléans-la-Source, France, 1 et 2 mars 1977. Thème I, p. 65-92, 9 fig.
- 190) BIZE J., BOURGUET L. et LEMOINE J. (1968). — Etude hydrogéologique de l'aménagement du Bas-Escaut. *Rapport BURGEAP*, NT 42 ES 57.
- 191) BRAILLON J.M. (1976). — Contribution à l'étude des caractères hydrogéologiques des régions minière et lilloise (Nord - Pas-de-Calais) en vue de leur synthèse cartographique. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Sc. et Tech. Lille, 153 p., 9 fig., 12 ann., 29 pl.
- 192) BONNET M. et MARGAT J. (1976). — Aide-mémoire sur l'évaluation des ressources en eau des aquifères subordonnés aux cours d'eau. *Rapport B.R.G.M.*, 76 SGN 060 AME, 32 p., 4 fig., 1 ann.
- 193) BONTE A. (1955). — Vallées quaternaires remblayées dans les environs de Lille. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. LXXV, p. 111-122.
- 194) BONTE A. (1958). — Les eaux profondes du Nord de la France et leur utilisation éventuelle. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. LXXVIII, p. 212-229.
- 195) BONTE A. (1974). — Lias et Bajocien dans le Boulonnais. Le sondage de Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCIV, p. 11-18.
- 196) CARNEZ J.L. (1974). — Contribution à l'étude hydrochimique de la nappe de la craie. *D.E.A.*, Univ. Sc. et Tech. Lille, 162 p., 56 fig., 20 tabl.
- 197) CARRY C. (1969). — Etude hydrogéologique du Bas-Escaut. Etude du rabattement de la nappe dans la zone du canal. *Rapport SOGREAH*, R 10353.
- 198) CAUDRON M. et CLEMENT J.P. (1972). — Données géologiques et hydrogéologiques acquises à la date du 31 décembre 1972 sur le territoire des feuilles topographiques de Maubeuge et de Trélon. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 428 NPA, 52 p., 7 fig., 3 pl., 10 tabl.
- 199) C.F.P. (M.), COPESEP, R.A.P. et S.N.P.A. (1965). — Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. LXXXV, fasc. 3, p. 273-281, 3 cartes.
- 200) CLEMENT J.P. (1970). — Données géologiques et hydrogéologiques sur le territoire des feuilles topographiques au 1/25.000^e de Trélon (5 à 8) et Hirson (1 à 3). *D.E.S.*, Fac. Sc. Lille, 82 p., 14 fig. 11 tabl., 6 ann.
- 201) COLBEAUX J.P. (1974). — Mise en évidence d'une zone de cisaillement Nord-Artois. *C.R. Ac. Sc.*, t. 278, p. 1159-1161, 1 fig.
- 202) COLBEAUX J.P. (1975). — Géométrie et cinématique de la fracturation en Boulonnais. Extension vers l'Est. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Sc. et Tech. Lille, 141 p., 9 pl., 2 ann., 67 fig.
- 203) COLBEAUX J.P., DEBRABANT P., LEPLAT J. et ROBASZYNSKI F. (1975). — Les craies de Sainghin-en-Mélantois (Nord) : faunes du passage turonoconiacien, tectonique cisailante, physico-chimie. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCV, p. 17-35, 2 ann., 1 pl., 5 fig., 2 tabl.
- 204) CREMILLE L. (1972). — Etude des ressources en eau du Calaisis (P.-de-C). Bilan de la nappe de la craie. *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 227 NPA, 9 p., 4 ann h-t.
- 205) CREMILLE L. (1974). — Etude des ressources en eau du bassin versant audomarois. Acquisition des données et premières interprétations. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 110 NPA, 39 p., 11 tabl, 8 graph., 4 cartes.
- 206) CREMILLE L. (1974). — Plan d'exploitation de la nappe de la craie dans le bassin minier à l'intérieur du quadrilatère Maisnil-les-Ruitz, Gorre, Leforest, Fresnes-les-Montauban. *Rapport B.R.G.M.*, 74 SGN 174 NPA, 39 p., 5 tabl., 18 cartes et 8 graph.
- 207) DASSONVILLE G., DESOIGNIES J. et RICOUR J. (1963). — Mises au point sur les connaissances acquises sur les nappes situées dans la vallée de l'Escaut à l'aval de Valenciennes. *Rapport D.S.G.R.*, 63 A 18, 31 p., 8 fig., 3 ann.
- 208) DAUBREE A. (1879). — Etude synthétique de la géologie expérimentale. Ed. Dunod, 828 p., 257 fig., 7 pl.
- 209) DAVIS S.N. et DEWIEST R.J.M. (1966). — Hydrogeology. 463 p., Ed. John Wiley et Sons.
- 210) DEBUISSON J. (1972). — Aménagement à long terme pour la statistique des besoins en eau de distribution publique du Syndicat intercommunal de la région boulonnaise. *C.R. de l'A.B.A.P.* du 7-12-1972, 6 p., 2 fig.
- 211) DEGOUSEE (1841). — Sondages exécutés dans diverses régions. *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 12, p. 437-441.
- 212) DEGOUSEE (1842). — Sur quelques résultats obtenus dans des forages récents. *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 14, p. 916-917.
- 213) DELLERY B., RICOUR J. et WATERLOT G. (1961). — Essai de détermination du potentiel de la nappe de la craie dans la région de Calais. *Rapport NPA*, A 1850, 44 p., 5 fig, 6 ann.
- 214) DESBRANDES R. (1968). — Théorie et interprétation des diagaphies. *Publ. Inst. franç. pétrole*, 545 p. Ed Technip.
- 215) DESTOMBES J.P. et al. (1968). — Données géologiques et hydrogéologiques du Bas-Boulonnais. *Rapport B.R.G.M.*, 68 SGL 77 NPA, 78 p., 10 fig., 8 ann.
- 216) DEWIEST R.J.M. (1965). — Geohydrology, 306 p. Ed. John Wiley et Sons.
- 217) DIEUDONNE A. et ROGEZ J.M. (1975). — Projet de construction d'un moyen de transport rapide métropolitain sur le territoire de la Communauté Urbaine de Lille. Tronçon Place de la République - rue Chaude Rivière. Reconnaissance géologique, hydrogéologie et géotechnique générale. *Rapport B.R.G.M.*, 75 SGN 325 NPA, 34 p., 10 ann.

- 218) DOLLE L. (1923). — Etudes sur les eaux souterraines de la région de Cambrai. *Minist. Agric. Eau et Gén. rur., Etudes sur les eaux souterraines. Dép. du Nord*, 1, 1923, Thèse doc. Fac. Sc. Lille, 1924, 256 p., 165 fig.
- 219) DUTERTRE A.P. (1924). — Observations sur les terrains jurassiques supérieurs dans la vallée de la Liane (Bas-Boulonnais). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XLIX, p. 216-236, 1 pl.
- 220) GELINET P. (1973). — Puits de Sangatte galerie haute. Rapport interne de la SITUMER du 5 juin 1973.
- 221) GERIN B. (1966). — Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Canche. *Thèse 3^e cycle*, Fac. Sc. Paris, 185 p., 36 fig., 28 tabl., 32 pl.
- 222) GOSSELET J. (1886). — Leçons sur les nappes aquifères du Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XIV, p. 249.
- 223) GOSSELET J. (1904). — Les nappes aquifères de la craie au Sud de Lille. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XXXIII, p. 133.
- 224) GOSSELET J. (1905). — Essai de comparaison entre les pluies et les niveaux de certaines nappes aquifères du Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XXXIV, p. 162-188, 4 pl.
- 225) GOSSELET J. (1906). — Etude sur la nappe aquifère du Calcaire carbonifère à Roubaix et à Tourcoing. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XXXV, p. 178.
- 226) GOSSELET J. (1913). — Les paléocreux ou cavités à la surface du terrain houiller. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XLII, p. 145-157, 8 fig.
- 227) GOSSELET J. (1913). — Note sur le torrent d'Anzin. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XLII, p. 170-175, 4 fig.
- 228) JOURNET J.M. et RAMON S. (1971). — Chimisme de la nappe de la craie dans la région lilloise. *Rapport B.R.G.M.*, 71 SGN 209 NPA, 31 p., 9 ann.
- 229) MANIA J. (1971). — Contribution à l'étude de la nappe des Sables landéniens en Flandres franco-belges et dans le bassin d'Orchies. *Thèse 3^e cycle*, Univ. Sc. et Tech. Lille, 161 p., 29 fig., 43 tabl., 11 pl.
- 230) MANIA J. (1972). — Hydrogéologie des Sables landéniens en Flandres franco-belges. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCII, p. 55-56, 10 fig., 2 tabl.
- 231) MASSON M. et al. (1975). — Terrassements rocheux de l'emprunt crayeux du terminal pétrolier d'Antifer. *Bull. Liaison P. et Ch.*, 77, p. 31-44, 21 fig.
- 232) MISEREZ J.J. (1973). — Géochimie des eaux du karst jurassien. *Thèse*, Univ. Neuchâtel (Suisse), 313 p., 54 tabl., 60 fig.
- 233) NAPIAS J.C. et SAVOYE J. (1967). — Données sur la nappe de la craie de la région de Guines, Hames-Bougres, St-Tricat, Frethun. *Rapport B.R.G.M.*, 67 A 87, 15 p., 2 ann.
- 234) PRUVOST P. (1914). — Résultats de quelques sondages profonds exécutés au Sud-Ouest de Lille. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XLIII, p. 177-189, 1 fig.
- 235) RAMBERT B. (1967). — Etude de la nappe de la craie dans le bassin de la Canche. *Bull. B.R.G.M.*, 4, p. 109-114, 3 fig.
- 236) RAMON S., CREMILLE L. et SOYEZ C. (1970). — Escaut canalisé - Aménagement à grand gabarit à l'aval de Valenciennes (Nord). *Rapport B.R.G.M.*, 70 SGN 039 NPA, 39 p., 6 fig., 8 ann.
- 237) RAMON S. (1972). — Alimentation en eau potable de la région boulonnaise. Etude hydrogéologique du Séquanien de la région de St-Léonard (P.-de-C.) *Rapport B.R.G.M.*, 72 SGN 330 NPA, 18 p., 5 fig., 4 ann.
- 238) ROUX J.C. (1963). — Contribution à l'étude hydrogéologique du Bassin de la Somme. *Thèse 3^e cycle*, Fac. Sc. Paris, 509, p., 20 pl., 40 tabl., 65 fig.
- 239) SYSSAU A. (1970). — Contribution à l'étude de la nappe du Séquanien dans le bassin de la Liane (Bas-Boulonnais). *D.E.S.*, Univ. Sc. de Lille, 86 p., 10 ann., 15 fig.
- 240) TRIPET J.P. (1972). — Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse. *Thèse Docteur ès Sciences*, Université de Neuchâtel (Suisse), 183 p.
- 241) WALTON W.C. (1970). — Groundwater Resource Evaluation. 664 p. Ed. Mc Graw-Hill, Book Company, New-York.
- 242) WATERLOT G. (1957). — Les ressources hydrogéologiques du Nord de la France. *Le Monde Industriel*, 83, n° 532, p. 5-27.
- 243) WHITTEN E.H.T. (1966). — Structural geology of folded rocks. Rond Mc Mally et Company, Chicago.
- 244) YOUSSEF H. (1973). — Hydrology karstique du calcaire carbonifère de la Belgique et du Nord de la France. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Université des Sciences et Techniques de Lille, 126 p., 17 fig., 17 ann.

INDEX ALPHABETIQUE

	Pages		Pages
Algorithme	19, 118	Craie	47, 100, 117, 120, 128, 136
Alimentation artificielle	13, 111, 159, 166, 171, 175, 181, 183 186	Cycle piézométrique (ou évolution, ou fluctuation, ou variation - journa- lier, mensuel, interannuel)	14, 50, 54, 57, 64, 99, 138
Alimentation verticale (naturelle)	13, 21	DARCY	15
Alluvions	49, 72, 78, 79, 80, 81, 82, 83	Débit de base	30, 31, 32, 38
Analogie électrique	16, 147, 148	Débit d'exploitation (prélevé par pompage)	96, 110, 119, 127, 132, 139
Analyse automatique	70, 71, 72, 73, 74	Débit entrant	13
Anisotropie (des perméabilités)	69, 76, 86	Débit sortant	13
Aquiclude (formation)	13	Déficit d'écoulement	33
Aquifère parfait	68	Dérivées partielles	17, 71, 195
Aquifère semi-infini	70	Diagraphies	47, 144
Aquifuge (formation)	13	Diffusivité	21, 58, 62
Artésianisme (zone d')	13, 103, 110, 150, 167	DIRICHLET (conditions de)	16
		Discretisation (discrétisé)	16, 111, 124
Barrage	154	Distance réduite	60, 61
Barrière étanche (voir limite étanche)	70	Distribution géométrique des fissures (ou des fractures)	74, 76, 85, 86
Basses eaux	48, 102, 109, 171	Drainance	73, 82, 97, 99, 112, 118, 126, 127, 131 133, 134, 141, 162
Bassins hydrogéologiques	32	Eau salée (marine)	155, 170
Bassins versants	32, 34, 38, 41	Écoulement bidimensionnel	16
BESSEL (fonction de)	195, 196, 197, 198	Écoulement souterrain	13, 14, 33, 37, 38, 40
BOULTON	70, 73, 78, 81, 161, 195	Écoulement total	32, 37
Bilan hydrologique (de nappe)	104, 112, 119, 133, 140, 162	Écoulement unidimensionnel	58
		Egouttement	70, 73, 81
Calage d'un modèle	18, 97, 103, 110, 119, 124, 131, 139	Éléments dynamiques	13
Calcaires	44, 45, 46, 54, 94, 159, 185	Éléments statiques	14
Caractéristiques hydrauliques	14, 15, 67, 68	Essais Lefranc	67
Caractéristiques hydrogéologiques (contexte et cadre)	14, 94, 106, 116, 121, 128, 137	Essais Lugeon	67
Carte piézométrique	29, 48, 96, 102, 104, 109, 112, 117, 122, 131, 137, 145	Essai micromoulinet	58, 89
Charge hydraulique	15	Essai sonde triple	68
Coefficient d'emménagement	16, 63, 68, 72, 96, 165	Evaporation	25
Coefficient d'infiltration (paramètre) ..	13	Evapotranspiration potentielle	25, 60
Coefficient de perméabilité	15, 74, 84, 96, 144	Evapotranspiration réelle	25, 34, 38, 39
Conductivité hydraulique	85	Excédent mensuel	25
Conjointe (optimisation)	153	Exutoire	13, 57
Contraintes d'optimisation	19, 155		
Courbe de rabattement (ou de descente)	68, 70, 162	Facteur de drainance	69
		Familles de fractures	85
		Fissures (ou fractures)	74, 76, 85, 86

	Pages		Pages
Fonction complémentaire d'erreur ..	57	NEUMANN (condition de)	16
Fonction convexe (uniforme)	71	Niveau de base	55, 61
Fonction objectif	19, 157	Optimisation des ressources en eau	18, 19, 153, (Ch. 6)
FRANKEL-YOUNG (méthode de)	17	Optimisation linéaire	18, 19, 172, 179
GALERKIN (méthode de)	17	Outil informatique	11
GAUSS NEWTON (méthode de)	71	Papier conducteur	147
GAUSS SEIDEL (méthode de)	17	Pénétration partielle	69
Gradient hydraulique	77	Perméabilité (horizontale, verticale) ..	70, 118
Gestion des ressources en eau	(Ch. 6)	Perméabilité principale	74, 85
HANTUSH	69, 70, 80, 82, 83,	Piezomètre	51, 59
	84	Pluie efficace	25, 26, 27
Hautes eaux	171	Pompage d'essai	67, 77
Humidité relative	25	Précipitations	21, 22, 23
Hydrogramme	30, 31	Programmation (programme ordinat.)	11, 18, 32, 71, 74,
			195
Images (théorie des)	70	Qualitative (analyse)	50
Infiltration efficace (voir pluie efficace)	25	Quantitative (analyse)	57
Injection	67, 179	Rabattement	68, 69, 70, 161
Insolation	24	Régime laminaire	74
Isohyètes	23	Régime permanent	16, 17
Isotrope (aquifère)	68	Régime transitoire	16, 17
Itérative (méthode)	7, 71	Régression non linéaire	71
Jaugeage	99, 105, 126	Relèvements	165, 175, 176, 181,
			182, 183, 184, 187
LAPLACE	16	Ruissellement	30, 31, 34, 103, 127,
Limites à potentiel	18		153
Limites d'un modèle	18, 95, 103, 111,	Sables landéniens	142
	118, 124, 131, 138,	Semi-perméable (horizon)	69, 78, 79, 80, 82,
	148		160, 162
Limites étanches	18, 70, 118	Simplexe	19
Limites à flux nul	18	Simulateurs	16
Ligne de courant (hydraulique)	58, 60, 103	Stations de relevage (des H.B.N.P.C.)	139, 141
Maille	16, 17, (Ch. 5)	Substratum	13
Marais	103, 169, 178	Système aquifère	13
Matrice	17	Température (de l'air)	24
Micromoulinet	68, 69, 199, 200	Tenseur des perméabilités	74
Milieu fissuré	14	THEIS	71
Milieu mixte	14	THORNTHWAITE	25, 96, 112, 139
Milieu poreux	14	Transferts (en milieu non saturé)	62
Milieu non saturé	62	Transferts (en milieu saturé)	62
Minimum local	74	TURC	25, 34, 37, 96, 112,
Modèle analogique	16, 142, 147		123
Modèle mathématique	16, 57, (Ch. 5)	Valeurs propres (du tenseur de	
Moindres carrés (méthode des)	71	perméabilité)	74, 75
Moyenne cumulée du bilan (écart à)	27	Vecteurs propres (du tenseur des	
		perméabilités)	74, 75
Nappe alluviale	49, 72, 78, 80	Vitesse d'écoulement (ou de filtration)	15, 74
Nappe captive	52, 54, 56, 68	Viscosité cinématique	15, 74
Nappe libre	44, 49, 52, 54, 56,		
	70	WALTON	69, 161
Nappe semi-captive	59, 69, 161		

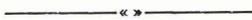


TABLE DES FIGURES

	Pages		Pages
Fig. 1. — Les éléments statiques d'un système aquifère	13	Fig. 16. — Graphiques de l'évolution inter-annuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations d'Epinoy (1964-1974), de Solesmes (1962-74), de Blendecques (1965-74)	31
Fig. 2. — Les éléments dynamiques d'un système aquifère	13	Fig. 17. — Distribution du maillage des bassins de l'Aa, la Lys, la Clarence, la Lawe, la Canche et l'Authie	34
Fig. 3. — Les limites de l'enveloppe du modèle de simulation	18	Fig. 18. — Carte de classification hydrogéologique des bassins de l'Artois ..	35
Fig. 4. — Distribution géographique des stations climatologiques dans la région du Nord (Document S.H.C.) ...	22	Fig. 19. — Distribution de l'évapotranspiration moyenne interannuelle réelle après réajustement (1962-1969)	36
Fig. 5. — Courbes isohyètes établies pour l'année 1970 dans la région du Nord (Document S.H.C.)	23	Fig. 20. — Relation pluie-évapotranspiration réelle après correction	36
Fig. 6 à 11. — Evolution mensuelle de la pluie efficace aux stations de Dunkerque, Desvres, Lesquin, St-Pol-sur-Ternoise, Epinoy et Avesnelles ..	26, 27	Fig. 21. — Carte des écoulements souterrains des bassins de l'Artois	36
Fig. 12. — Graphique de l'évolution inter-annuelle (1931-1974) des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan à la station de Frévent (P.-de-C.) ..	29	Fig. 22. — Distribution de la pluviométrie dans les bassins de la Scarpe, de l'Escaut et de la Sambre. Données moyennes interannuelles (1962-1970)	37
Fig. 13. — Graphique de l'évolution inter-annuelle (1945-1974) des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan à la station de Lesquin (Nord)	30	Fig. 23. — Distribution du maillage du bassin versant de l'Escaut	38
Fig. 14. — Graphique de l'évolution inter-annuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations de Boulogne (1964-74), du Touquet (1964-74), de Dunkerque (1964-74) et de Desvres (1966-74)	30	Fig. 24. — Carte de classification hydrogéologique du bassin de l'Escaut ..	39
Fig. 15. — Graphique de l'évolution inter-annuelle des variations de l'écart à la moyenne cumulée du bilan. Stations de Fruges (1962-74), d'Hesdin (1965-1974), de Fauquembergues (1966-74) et de St-Pol (1964-74)	30	Fig. 25. — Relation pluie-évapotranspiration après correction	40
		Fig. 26. — Carte des écoulements souterrains du bassin de l'Escaut	41
		Fig. 27. — Localisation géographique des principaux aquifères du Primaire, du Jurassique et du Cénomaniens dans le Nord de la France	44

	Pages		Pages
Fig. 28. — Localisation géographique des aquifères calcaires du Dévonien et du Carbonifère de l'Avesnois	45	Fig. 44. — Courbes théoriques du tarissement d'une nappe aquifère pour un piézomètre isolé	61
Fig. 29. — Carte piézométrique de la nappe du calcaire carbonifère de la région Lille-Roubaix-Tourcoing-Tournai	46	Fig. 45. — Analyse des courbes de tarissement de la nappe de la Craie dans le bassin de la Canche. Estimation de la valeur des distances réduites	61
Fig. 30. — Distribution géographique des zones de qualité de production hydraulique de l'aquifère crayeux ..	47	Fig. 46. — Exemple de variation du bilan mensuel selon l'hypothèse MERO. Site d'Humières (25-1-44)	62
Fig. 31. — Carte piézométrique de la nappe de la craie	48	Fig. 47. — Restitution des variations calculées de la piézométrie. Comparaison avec la piézométrie réelle. Période 1966-1972	64
Fig. 32. — Position des aquifères sableux du Landénien et des alluvions de l'Escaut	50	Fig. 48. — Courbes théoriques de descente du niveau d'une nappe en cours de pompage	70
Fig. 33. — Carte de situation des puits en surveillance piézométrique	51	Fig. 49. — Evolution des valeurs calculées du coefficient d'emmagasinement	72
Fig. 34. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans la région côtière entre le Boulonnais et les Flandres	52	Fig. 50. — Evolution des valeurs calculées de la transmissivité	72
Fig. 35 et 36. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans la région minière et lilloise	53	Fig. 51. — Cas 1 : Egouttement d'une nappe libre. Programme Boulton-Hantush	73
Fig. 37 et 38. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe de la craie dans la région méridionale des deux départements	55	Fig. 52. — Cas 2 : Drainance en milieu semi-captif. Programme Boulton-Hantush	73
Fig. 39. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe des sables pissards en Flandres maritimes	56	Fig. 53. — Comparaisons des diverses méthodes et restitution des rabattements. Programme Boulton-Hantush .	74
Fig. 40. — Graphiques de l'évolution piézométrique de la nappe des sables landéniens en Flandres et dans le Bassin d'Orchies	56	Fig. 54. — Entrée des données dans le programme TENSEUR	75
Fig. 41. — Graphiques de l'évolution piézométrique des nappes des grès et calcaires du Jurassique dans le Boulonnais	56	Fig. 55. — Répartition géographique des pompages d'essai et des diagraphies au micromoulinet	77
Fig. 42. — Graphiques de l'évolution piézométrique des nappes des calcaires paléozoïques dans la région de Lille et dans l'Avesnois	57	Fig. 56. — Courbe de descente à Guînes	78
Fig. 43. — Répartition géographique des points de surveillance piézométrique du bassin de la Canche	59	Fig. 57. — Courbe de descente à St-Tricat	78
		Fig. 58. — Courbe de descente à Saint-Martin-au-Laert	79
		Fig. 59. — Courbe de descente à Arques	79
		Fig. 60. — Courbe de descente à Quies-tède	80
		Fig. 61. — Courbe de descente sur la rive droite de la Deûle à Don, Annœullin (F. 18)	80

	Pages		Pages
Fig. 62. — Courbe de descente sur la rive droite de la Deûle à Don, Annœullin (F. 17)	80	Fig. 77. — Extension géographique du modèle du Calaisis	101
Fig. 63. — Courbe de descente à Allennes	81	Fig. 78. — Elaboration du modèle Calaisis. Répartition géographique des transmissivités au premier passage	102
Fig. 64. — Courbe de descente à Bache-St-Vaast	81	Fig. 79. — Carte piézométrique et répartition des zones d'affleurements dans le modèle Calaisis	102
Fig. 65. — Courbe de descente à Fresnes-sur-Escaut	82	Fig. 80. — Répartition géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle du Calaisis lors de la 6 ^e hypothèse	104
Fig. 66. — Courbe de descente à Valenciennes	83	Fig. 81. — Restitution calculée des lignes isopièzes pour les 5 ^e et 6 ^e hypothèses de calage du modèle Calaisis	105
Fig. 67. — Distribution géographique des directions de fractures dans les terrains crayeux et des perméabilités principales associées	86	Fig. 82. — a) Coupe géologique et hydrogéologique effectuée de Coyecques (SW) à Arques (NE) dans les bassins versants de la Lys et de l'Aa	107
Fig. 68. — Situation géographique des différentes études de modélisation et d'optimisation	94	b) Coupe géologique et hydrogéologique effectuée de Coulomby (SW) à Wulverdinghe (NE) à travers le bassin versant audomarois	107
Fig. 69. — Extension géographique du modèle mathématique transitoire. Schéma directeur de l'hydrogéologie des formations paléozoïques sous les terrains crétacés	95	Fig. 83. — Extension géographique du modèle du bassin audomarois	108
Fig. 70. — Carte de distribution des perméabilités (modèle Calcaire carbonifère)	96	Fig. 84. — Limites du modèle Hem-Aa-Lys	109
Fig. 71. — Carte de distribution des coefficients d'emménagement en régime libre (Calcaire carbonifère)	96	Fig. 85. — Implantation des captages, distribution des zones d'infiltration et définition des limites du modèle calé Hem-Aa-Lys	111
Fig. 72. — Carte de distribution des coefficients d'emménagement en régime captif (Calcaire carbonifère)	96	Fig. 86. — Distribution géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle calé Hem-Aa-Lys	113
Fig. 73. — Evolution interannuelle des valeurs de pluie efficace, des débits soutirés, des apports par pertes et drainage (Calcaire carbonifère)	97	Fig. 87. — Restitution de la piézométrie calculée dans le modèle calé Hem-Aa-Lys et comparaison avec la piézométrie réelle	114
Fig. 74. — Exemple de comparaison interannuelle des évolutions piézométriques calculées et observées à Roubaix (Calcaire carbonifère)	99	Fig. 88. — Coupes géologiques et hydrogéologiques synthétiques dans la région lilloise	116
Fig. 75. — Datation des eaux de la nappe du Calcaire carbonifère à partir d'un modèle isotopique et géochimique ..	99	Fig. 89. — Comparaison entre la piézométrie calculée et la piézométrie réelle dans le modèle de Lille	117
Fig. 76. — Profil de jaugeage de la Marque à l'étiage de 1973	100		

	Pages		Pages
Fig. 90. — Variation comparative du niveau des nappes de la craie et des alluvions à Lille	118	Fig. 103. — Coupe géologique et hydrogéologique synthétique réalisée entre Curgies (SSE) et Odomez (NNW) à travers le bassin du Bas-Escaut dans la région de Valenciennes	137
Fig. 91. — Extension géographique et schéma hydrogéologique du modèle de Lille	119	Fig. 104. — Fluctuations piézométriques comparées entre la nappe superficielle des alluvions et de la nappe de la craie à Fresnes-sur-Escaut ..	138
Fig. 92. — Carte des valeurs de la perméabilité et de la transmissivité horizontale de l'aquifère crayeux. Distribution des perméabilités verticales des alluvions. Modèle de Lille	119	Fig. 105. — Comparaison des lignes isopièzes calculées et réelles. Modèle Bas-Escaut	140
Fig. 93. — Schéma de l'évolution spatiale des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux dans le Douaisis ..	121	Fig. 106. — Répartition des transmissivités dans le modèle calé Bas-Escaut	140
Fig. 94. — Distribution schématique des unités géologiques du modèle du Douaisis	122	Fig. 107. — Carte du toit des sables landéniens en Flandres franco-belges	143
Fig. 95. — Distribution géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle du Douaisis	125	Fig. 108. — Position géographique des forages aux sables landéniens	145
Fig. 96. — Comparaison entre la piézométrie réelle et la piézométrie calculée au 30 ^e passage (modèle calé)	125	Fig. 109. — Carte piézométrique de la nappe des sables landéniens en 1970	146
Fig. 97. — Situation géographique du modèle Deûle-Scarpe. Géologie et piézométrie	129	Fig. 110. — Graphiques de représentation de la datation des eaux de la nappe des sables landéniens à l'aide des isotopes et des analyses géochimiques	148
Fig. 98. — Coupe géologique générale de Sainghin-en-Weppes (NW) à Anhiens (SE). Coupe géologique générale de Corbehem (SSW) à Fretin (NNE). Evolution des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux (Deûle-Scarpe)	130	Fig. 111. — Modèles analogiques sur papier conducteur. Nappe des sables landéniens (1 ^{er} stade)	149
Fig. 99. — Répartition géographique des débits imposés et calculés dans le modèle calé Deûle-Scarpe	132	Fig. 112. — Modèles analogiques sur papier conducteur. Nappe des sables landéniens (2 ^e stade)	151
Fig. 100. — Distribution géographique des valeurs de transmissivité dans le modèle Deûle-Scarpe	133	Fig. 113. — Schéma de l'alimentation en eau de Boulogne-sur-Mer et localisation géographique du bassin de la Liane	154
Fig. 101. — Comparaison des lignes isopièzes calculées et réelles. Modèle Scarpe	135	Fig. 114. — Schéma de gestion des ressources en eaux superficielles et souterraines du bassin de la Liane	154
Fig. 102. — Délimitation géographique du modèle Bas-Escaut	135	Fig. 115. — Evolution mensuelle des débits de la Liane, des débits traités à l'usine de Carly et du débit des drains de Tingry et Molinet	156
		Fig. 116. — Fluctuation mensuelle des prélèvements à St-Léonard dans les calcaires du Séquanien, du débit de la Liane et de la pluie efficace	156

	Pages		Pages
Fig. 117. — Carte géologique du secteur de St-Léonard	160	Fig. 130. — Comparaison entre les isopièzes calculées avant et après optimisation. Calaisis	169
Fig. 118. — Carte structurale du toit des argiles rauraciennes dans le secteur de St-Léonard	160	Fig. 131. — Evolution des concentrations en NaCl de l'eau pompée au cours du creusement de la descenderie du Tunnel sous la Manche à Sangatte en 1974	170
Fig. 119. — Corrélations lithostratigraphiques d'après les diagraphies	161	Fig. 132. — Profils piézométriques calculés par simulation entre Quercamps, Houlle et le canal de l'Aa. Hem, Aa, Lys	171
Fig. 120. — Plan de situation des forages du champ captant de St-Léonard	161	Fig. 133. — Profils piézométriques calculés par simulation entre Quelmes, Leulinghem et St-Omer. Hem, Aa, Lys	171
Fig. 121. — Courbes de descente lors des pompages de longue durée dans la nappe du Séquanien	162	Fig. 134. — Comparaison des piézométries calculées en période de basses eaux et en période de hautes eaux dans les bassins Hem, Aa, Lys	172
Fig. 122. — Courbes de descente lors des pompages de longue durée dans la nappe du Séquanien	162	Fig. 135. — Schéma d'implantation des sites optimisés en 1 ^{re} et 2 ^e phases. Hem, Aa, Lys	173
Fig. 123. — Courbe de descente de la nappe des alluvions lors du pompage de longue durée dans la nappe du Séquanien	163	Fig. 136. — Position des points d'optimisation dans le modèle Douaisis	175
Fig. 124. — Corrélation de la piézométrie réelle avec la piézométrie calculée d'après l'infiltration efficace	163	Fig. 137. — Comparaison des profils de relèvement en fonction de la distance pour des simulations d'alimentation artificielle (Douaisis)	176
Fig. 125. — Schéma en bloc diagramme des capacités de stockage des aquifères dans le secteur de St-Léonard	165	Fig. 138. — Résultats de la simulation d'une alimentation artificielle dans la vallée de la Deûle	181
Fig. 126. — Répercussions de l'injection en fonction de la distance et du temps sur la nappe du Séquanien ..	166	Fig. 139. — Implantation des sites optimisés dans le modèle du Bas-Escaut ..	184
Fig. 127. — Etat de la surface piézométrique de la nappe de la craie du Calaisis en période de basses eaux (janvier 1972 à juin 1974)	168	Fig. 140 a, b et c. — Carte prévisionnelle des états de la nappe du Calcaire carbonifère aux horizons 1980 (a), 1990 (b) et 2000 (c)	186
Fig. 128. — Optimisation des prélèvements avec pérennité de l'artésianisme du Marais de Guînes. Situation des mailles contrôles et des sites fictifs d'optimisation. Calaisis	169	Fig. 141. — Simulation des relèvements du niveau piézométrique de la nappe du Calcaire carbonifère après alimentation artificielle sur le site de Ramegnies-Chin	187
Fig. 129. — Optimisation des prélèvements dans la partie orientale du modèle, Calaisis	169		

TABLE DES TABLEAUX ET ANNEXES

	Pages		Pages
Tabl. I. — Variation de la pluviométrie en fonction de l'altitude pour quelques années choisies au hasard	24	Tabl. XII. — Caractéristiques de la nappe de la craie et des puits d'observation dans le bassin de la Canche ..	61
Tabl. II. — Liste des stations pluviométriques et thermométriques qui ont fourni les éléments nécessaires au calcul des excédents	28	Tabl. XIII. — Bilans annuels (en mm) de la nappe de la craie aux différents sites hydrogéologiques testés dans le bassin de la Canche. (Bilan = Pluie - Evapotranspiration - Ruissellement - Infiltration)	62
Tabl. III. — Rapport du débit de base et du débit total d'écoulement des rivières de l'Artois	31	Tabl. XIV. — Paramètres physiques et caractéristiques hydrauliques de l'aquifère crayeux en milieu saturé et en milieu non saturé après ajustement des fluctuations piézométriques calculées sur les fluctuations piézométriques réelles dans le bassin de la Canche	63
Tabl. IV. — Valeurs du débit de base annuel des rivières du bassin de l'Escaut par rapport au débit total (en pourcentage)	32	Tabl. XV. — Comparaison des résultats par méthode graphique et méthode automatique. Programme THEIS appliqué à la nappe de la Crau à Istres (B.-du-R.)	72
Tabl. V. — Caractéristiques des bassins versants de l'Artois	32	Tabl. XVI. — Comparaison des résultats par méthode graphique et méthode automatique. Programme THEIS appliqué à la nappe des alluvions à Bruay-sur-Escaut (Nord)	72
Tabl. VI. — Débit total moyen interannuel des rivières de l'Artois sur la période 1962-1969	32	Tabl. XVII. — Caractéristiques structurales et hydrauliques des fractures de la craie au Cran d'Escalles (Blanc-Nez)	85
Tabl. VII. — Rapport entre l'écoulement souterrain et l'écoulement total (bassins de l'Artois)	33	Tabl. XVIII. — Comparaison des débits mesurés et calculés au Cran d'Escalles pour une fissure de 3 m d'extension	87
Tabl. VIII. — Justification des variations d'évapotranspiration (bassins de l'Artois)	34	Tabl. XIX. — Calcul des vitesses de filtration le long de la vallée de la Canche avec un gradient hydraulique moyen N_{30} et de valeur 0,02	87
Tabl. IX. — Débits moyens interannuels 1962-1970 des bassins de l'Escaut. Débits d'écoulement total et de base	38		
Tabl. X. — Etapes du calcul de simulation des débits de base et des débits d'écoulement total des bassins de la Selle, de l'Ecaillon et de la Rhonelle	38		
Tabl. XI. — Justification des variations d'évapotranspiration par des modifications éventuelles des températures moyennes interannuelles (ΔT) ou des précipitations	40		

	Pages		Pages
Tabl. XX. — Perméabilités des terrains crayeux issues des essais Lugeon ..	101	Tabl. XXXVI. — Relèvements calculés pendant le palier d'injection (secteur de St-Léonard)	166
Tabl. XXI. — Bilan hydrologique de la nappe de la craie dans le Calaisis ..	104	Tabl. XXXVII. — Valeurs des relèvements à l'injection (en m) en fonction du temps et de la distance (secteur de St-Léonard)	167
Tabl. XXII. — Jaugeage de la rivière Hem	105	Tabl. XXXVIII. — Comparaison des débits d'échange en basses eaux et en hautes eaux. Hem, Aa, Lys	172
Tabl. XXIII. — Bilan hydrologique de la nappe de la craie issue du modèle mathématique calé (Hem, Aa, Lys)	115	Tabl. XXXIX. — Liste des mailles testées dans l'optimisation de première phase : Vallée de la Melde. Hem, Aa, Lys	173
Tabl. XXIV. — Bilan de la nappe de la craie dans la région lilloise	120	Tabl. XL. — Liste des mailles contrôles dans l'optimisation de première phase : Vallée de la Melde. Hem, Aa, Lys	173
Tabl. XXV. — Etablissement du bilan hydrologique en régime permanent de la nappe de la craie à partir du modèle calé (Douaisis)	126	Tabl. XLI. — Liste des mailles testées dans l'optimisation de deuxième phase : Vallée de la Liauwette. Hem, Aa, Lys	174
Tabl. XXVI. — Bilan en régime permanent de la nappe de la craie dans le modèle Deûle-Scarpe n° 25	134	Tabl. XLII. — Liste des mailles contrôles dans l'optimisation de deuxième phase : Vallée de la Liauwette. Hem, Aa, Lys	174
Tabl. XXVII. — Etablissement du bilan hydrologique de la nappe de la craie issu du modèle calé (Bas-Escaut) ..	141	Tabl. XLIII. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Férin (Douaisis)	177
Tabl. XXVIII. — Variation d'épaisseur des niveaux du Landénien d'après l'examen diagraphique	145	Tabl. XLIV. — Modifications apportées aux valeurs des débits extérieurs d'entrée et de sortie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle à Férin (passage n° 31). (Douaisis) ..	177
Tabl. XXIX. — Contraintes d'optimisation des forages de St-Léonard	155	Tabl. XLV. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Brebières (Douaisis)	177
Tabl. XXX. — Relations entre les débits de la Liane et le remplissage d'un barrage d'après les statistiques 1966-72	157	Tabl. XLVI. — Modifications apportées aux valeurs des débits extérieurs d'entrée et de sortie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle à Brebières (passage n° 32) (Douaisis)	178
Tabl. XXXI. — Première hypothèse : gestion avant alimentation artificielle de la nappe du Séquanien	158		
Tabl. XXXII. — Deuxième hypothèse : gestion avec alimentation artificielle de la nappe du Séquanien	159		
Tabl. XXXIII. — Répartition des divers niveaux lithologiques de la vallée de la Liane	160		
Tabl. XXXIV. — Bilan hydrogéologique de la nappe à diverses périodes (secteur de St-Léonard)	163		
Tabl. XXXV. — Volumes d'eau stockables dans le sous-sol de la vallée de la Liane	165		

	Pages		Pages
Tabl. XLVII. — Relèvements calculés de la nappe de la craie à la suite de la simulation de l'alimentation artificielle sur le site de Dechy (Douaisis)	178	Tabl. LV. — Relèvements calculés après simulation d'une injection de 100 l/s (360 m ³ /h) sur chacun des sites de Quiévrechain, Rombies et St-Saulve (Bas-Escaut)	185
Tabl. XLVIII. — Mailles contrôles choisies dans la première phase de l'optimisation des ressources du Douaisis . .	179	Tabl. LVI. — Evolution à long terme de la nappe du Calcaire carbonifère aux horizons 1980, 1990, 2000	187
Tabl. XLIX. — Résultats de l'optimisation en première phase des ressources dans le Douaisis	180	Tabl. LVII. — Relèvement des niveaux de la nappe par comparaison des évolutions piézométriques avant et après alimentation	188
Tabl. L. — Puits d'exploitation optimisés en deuxième phase (Douaisis)	180		
Tabl. LI. — Mailles choisies dans le cadre d'une alimentation artificielle de la nappe de la craie dans le cadre du parc de la Deûle	182	* **	
Tabl. LII. — Relèvement piézométrique calculé après simulation de l'arrêt des stations de relevage des Houillères Nationales (Bas-Escaut)	183	Annexe A. — Procédure de calcul des dérivées partielles dans les hypothèses de BOULTON et d'HANTUSH	195
Tabl. LIII. — Sites optimisés dans le modèle du Bas-Escaut	183	Annexe B. — Diagraphies des vitesses d'écoulement obtenues par utilisation du micromoulinet en forage. a) Arques, b) Lille, c) Lillers, d) Agny, e) Condé-sur-Escaut, f) Dechy, g) Fruges, h) Bondues	199
Tabl. LIV. — Résultats de l'optimisation sur les contraintes (Bas-Escaut)	184		

————— « » —————

TABLE DES MATIERES

<p>Chapitre I. - Systèmes aquifères et modèles adaptés 13</p> <p>1) Introduction 13</p> <p>2) Méthodes d'analyse des éléments statiques et dynamiques d'un système aquifère 14</p> <p>3) Quelques rappels théoriques de l'écoulement d'un fluide dans un matériau poreux 15</p> <p>4) Les simulations 16</p> <p>5) Optimisation des ressources en eau 18</p> <p>Chapitre II. - Traitement et utilisation des données climatologiques et hydrologiques 21</p> <p>1) Les précipitations 21</p> <p>2) Insolation, température de l'air et humidité relative de l'air 24</p> <p>3) Evapotranspiration 25</p> <p>4) Hydrologie de surface 28</p> <p>5) Application des résultats hydrologiques et climatologiques aux bassins de l'Artois et de l'Escaut 32</p> <p>6) Conclusions 41</p> <p>Chapitre III. - Etat et analyse de l'évolution de la piézométrie des nappes 43</p> <p>1) Introduction 43</p> <p>2) Rappel succinct des principaux aquifères régionaux et état piézométrique général des nappes 43</p> <p>3) Analyse qualitative de l'évolution piézométrique des nappes du Nord de la France 50</p> <p>4) Analyse quantitative et essais de restitution des fluctuations piézométriques 57</p> <p>5) Conclusions 65</p>	<p>Chapitre IV. - Transferts hydrodynamiques des systèmes aquifères. Procédures de traitement des données 67</p> <p>1) Introduction 67</p> <p>2) Procédures de traitement des données hydrogéologiques 68</p> <p>3) Exemples choisis de pompages d'essai dans la région du Nord 77</p> <p>4) Application du calcul des perméabilités à l'Artois 84</p> <p>5) Apports récents de la diagraphie des vitesses d'écoulement 88</p> <p>6) Conclusions 92</p> <p>Chapitre V. - Application des systèmes aquifères et des modèles associés au Nord de la France 93</p> <p>1) Introduction 93</p> <p>2) Modèle de la nappe du Calcaire carbonifère de la région de Lille .. 94</p> <p>3) Modèle de la nappe de la craie .. 100</p> <p style="padding-left: 20px;">a) modèle du Calaisis 100</p> <p style="padding-left: 20px;">b) Modèles des interfluves Hem-Aa-Lys 105</p> <p style="padding-left: 20px;">c) Modèle de la région de Lille 114</p> <p style="padding-left: 20px;">d) Modèle du Douaisis 120</p> <p style="padding-left: 20px;">e) Modèle des bassins de la Deûle et de la Scarpe 127</p> <p style="padding-left: 20px;">f) Modèle du Bas-Escaut Valenciennois 136</p> <p>4) Modèle analogique de la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges 142</p> <p>5) Conclusions 152</p> <p>Chapitre VI. - Gestion des ressources en eau 153</p> <p>1) Optimisation des ressources en eau du bassin de la Liane (Boulonnais) .. 153</p>
---	---

2) Gestion de la nappe de la craie du Calaisis	167	Annexes	195
3) Gestion de la nappe de la craie dans les interfluves Hem-Aa-Lys ..	170	Liste bibliographique	205
4) Gestion de la nappe de la craie du Douaisis	174	Thème 1. - Modélisation	205
5) Gestion de la nappe de la craie dans le bassin de la Deûle	181	Thème 2. - Optimisation	207
6) Gestion de la nappe de la craie dans le bassin du Bas-Escaut	182	Thème 3. - Alimentation des aquifères et piézométrie	208
7) Gestion de la nappe du Calcaire carbonifère à Lille, Roubaix, Tourcoing	185	Thème 4. - Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères ..	208
Chapitre VII. - Conclusions générales	189	Thème 5. - Alimentation artificielle ..	211
		Thème 6. - Hydrogéologie	211
		Index alphabétique	215
		Table des figures	217
		Table des tableaux et annexes	223

