BRGM

Ministère de l'Éducation Nationale
Université de Strasbourg

Ministère du Développement
Industriel et Scientifique
Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Service Géologique National

SERVICE GEOLOGIQUE D'ALSACE ET DE LORRAINE

B. R. G. M.
BIBLIOTHÈQUE

204, Route de Schirmeck
STRASBOURG/3
Téléph. 30.12.62
C. C. P. Strasbourg 5.005-60

71 SGN 111 SGA

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG
SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE
D'ALSACE ET DE LORRAINE

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA PLAINE DU RHIN ENTRE BALE ET MULHOUSE

Résultats du modèle mathématique
en régime permanent destiné à tester
la cohérence des données de transmissivité

5 mai 1971

B. R. G. M.
BIBLIOTHÈQUE

204, ROUTE DE SCHIRMECK
STRASBOURG-MONTAGNE-VERTE
TÉL. 30.12.62-63-64
C.C.P. STRASBOURG 5.005.60

SOMMAIRE

- INTRODUCTION -

CHAPITRE I - Rappel théorique

1.1. Généralités
1.2. Principe de la méthode utilisée

CHAPITRE II - Application à la nappe alluviale du Rhin entre Bâle et Mulhouse
Hypothèses de base

2.1. Le modèle mathématique utilisé
2.2. Définition des conditions aux limites du modèle
2.3. Choix de la piézométrie à reconstituer
2.4. Débits de pompage et d'alimentation imposés au modèle
2.5. Aspect pratique de la vérification de la cohérence des transmissivités

CHAPITRE III - Présentation des résultats

3.1. Comparaison entre la carte piézométrique réelle et la carte piézométrique calculée
3.2. Analyse de la carte des transmissivités
3.3. Remarque

ANNEXES

1 - Carte de la piézométrie moyenne en 1970

2 - Carte des transmissivités et de l'épaisseur des alluvions mouillées.

INTRODUCTION

Depuis deux ans, une étude hydrogéologique est développée sur le secteur alluvial de la plaine du Rhin entre Bâle et Mulhouse. Le but de cette entreprise est d'acquérir une parfaite connaissance des ressources en eau de la région. Elle doit aboutir à la mise au point d'un modèle de gestion de ces ressources.

Le financement des travaux est assuré par les organismes suivants :

- Agence Financière de Bassin Rhin Meuse
- Minitère de l'Agriculture
- Ministère de l'Equipement
- Ville de Mulhouse
- Port Rhénan de Mulhouse Ottmarsheim
- Chambre de Commerce de Mulhouse.

Le recueil des données sur le terrain a été facilité grâce au concours :

- Du Service des Eaux de la Ville de Mulhouse
- De la Compagnie Générale des Eaux (St Louis)
- De l'Electricité de France
- Du Service de l'Aménagement des Eaux.

L'équipe du Service Géologique chargée de la réalisation de l'étude est constituée :

./.

- par Monsieur MARTELAT, ingénieur, pour les travaux de terrain
- par Messieurs KIEFFER F. et KIEFFER C., techniciens pour les jaugeages
- par Monsieur FEUGA, ingénieur, pour l'élaboration du modèle mathématique.

Elle était dirigée par Monsieur SOMMELET, chef de la section Etudes du S.C.G.A.L.

Dans l'immédiat, afin de pouvoir entreprendre dans les meilleurs conditions possibles la mise au point du modèle de gestion, il s'est avéré indispensable de vérifier au préalable la cohérence des données de terrain qui seront imposées et qui ont pu jusqu'à présent être recueillies. En particulier, il convenait de définir quelle répartition des transmissivités serait adoptée sur le milieu alluvionnaire étudié (1). Ce problème a été résolu à partir de l'analyse des résultats acquis à l'aide d'un modèle mathématique en régime permanent. Son principe est de retrouver la piézométrie réelle de la nappe en imposant diverses conditions de transmissivité sur le milieu alluvial.

Le présent rapport expose les résultats ainsi acquis.

./.

---

(1) Cette recherche a d'ailleurs fait l'objet de rapports antérieurs. Des cartes approchées de la répartition des transmissivités ont déjà été dressée à partir des résultats des prospections géophysique (carte de résistance transversale) et à partir de l'étude de la géométrie du réservoir (carte de l'épaisseur des alluvions mouillées).

CHAPITRE I

RAPPEL THEORIQUE

1.1. GENERALITES

L'équation régissant la circulation de l'eau dans un aquifère en régime permanent s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(T\,\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(T\,\frac{\partial h}{\partial y}\right) + q = 0,$$

avec :

x et y : coordonnées d'espace (en m)
T (x, y) : transmissivité de l'aquifère (en m^2/s)
h (x, y) : niveau piézométrique (en m)
q (x, y) : débit injecté ou soutiré par unité de surface d'aquifère (en m^3/s par m^2).

Cette équation peut être utilisée par les hydrogéologues de deux façons :

- On peut, connaissant la répartition des transmissivités T et des débits q, ainsi que les conditions imposées aux limites (niveaux ou débits), calculer en tout point le niveau piézométrique sur le secteur étudié. L'analyse mathématique démontre que la solution du problème ainsi posé est unique. Le développement des ordinateurs a permis de mettre au point des programmes de calcul (les "modèles mathématiques") conduisant rapidement à cette solution.

./.

- On pourrait également envisager, connaissant la répartition de q et la piézométrie h, de déterminer la répartition de la transmissivité T. Ce problème nommé "problème inverse", n'a pas, contrairement au précédent, reçu à ce jour de solution théorique satisfaisante. Des travaux récents donnent même à penser qu'une telle solution n'existe pas dans le cas général.

1.2. PRINCIPE DE LA METHODE UTILISEE

En dépit de ce qui précède, le but des recherches qui font l'objet de la présente étude était d'établir, à partir d'observations piézométriques nombreuses et précises, une carte des transmissivités sur le secteur Bâle-Mulhouse.

En l'absence d'une méthode de calcul directe et sûre, on a eu recours au procédé suivant :

a) En premier lieu est mis au point un modèle mathématique permettant de calculer la piézométrie sur le secteur d'étude en fonction des caractéristiques de l'aquifère et des conditions aux frontières du domaine (débits et niveaux).

b) A l'aide de ce modèle, on cherche ensuite à reproduire une piézométrie réellement observée, en modifiant la répartition des transmissivités jusqu'à faire correspondre le résultat du calcul à la réalité. La carte des transmissivités donnant lieu à la correspondance la meilleure est considérée comme très voisine de la carte des transmissivités réelles.

Ce procédé se heurte à une objection théorique d'importance : l'analyse mathématique montre en effet que dans le cas général, il y a une infinité de répartitions des transmissivités pouvant donner lieu à une même piézométrie ; autrement

./.

dit, le fait d'avoir trouvé une répartition des transmissivités permettant de reproduire une carte piézométrique observée ne prouve nullement que cette répartition corresponde à la réalité.

L'indétermination est en particulier totale quand l'écoulement de la nappe se fait parallèlement aux lignes d'égale transmissivité de l'aquifère.

L'objectif énoncé amène à rechercher un critère supplémentaire ; c'est encore l'analyse mathématique qui le fournit. Elle montre en effet qu'une répartition des transmissivités conduisant à une piézométrie et à des débits d'échange donnés ne peut être qu'unique.

Par conséquent, si on parvient à déterminer une carte des transmissivités permettant de reproduire la piézométrie et les débits d'échange réels, cette carte est la carte des transmissivités réelles.

Le paragraphe suivant illustre l'application qui a été faite de ces principes théoriques dans le cas de la nappe alluviale du Rhin entre Bâle et Mulhouse.

./.

CHAPITRE II

APPLICATION A LA NAPPE ALLUVIALE DU RHIN ENTRE BALE ET MULHOUSE HYPOTHESES DE BASE (1)

2.1. LE MODELE MATHEMATIQUE UTILISE

Le procédé exposé au paragraphe précédent implique l'utilisation d'un modèle mathématique en régime permanent.

On a donc mis au point un programme général de calcul par la méthode dite de "sur-relaxation par lignes", avec stockage des données sur disque magnétique (ce qui permet, la capacité du disque étant très importante, d'utiliser le programme pour des domaines à très grand nombre de mailles).

Avec ce modèle, qui pour le secteur d'étude envisagé comportait 803 mailles, la solution était atteinte, sur l'ordinateur IBM 1800 du S.G.A.L., en une quarantaine d'itérations d'une minute et demie chacune. La précision obtenue était de l'ordre de l'erreur d'arrondi de la machine (1 mm en chaque noeud).

./.

---

(1) Notes : Ce chapitre se borne à exposer la façon dont les données de terrain ont été utilisées. Ces données ont déjà été publiées dans des rapports antérieurs du S.G.A.L. sous forme de cartes et d'annuaires.

2.2. DEFINITION DES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

La zone d'étude a été découpée en 803 mailles carrées de 500 m de côté, le nombre de noeuds étant de 895 .

Les limites du modèle étaient les suivantes :

- Au Sud, la vallée de la Birs (canton de Bâle-Ville) où affleurent les marnes oligocènes constituant le substratum du réservoir alluvionnaire ; cette limite a été considérée comme imperméable, les échanges entre la nappe et la Birs étant très faibles.

- A l'Est : dans la ville de Bâle, le Rhin ; entre Huningue et Kembs, le contre-canal de drainage E.D.F. ; au Nord de Kembs, le Rhin (et non pas le Grand canal d'Alsace dont les berges sont étanches). Sur cette limite a été imposée une condition de niveau.

- Au Nord, on s'est fixé une limite arbitraire constituée par une ligne droite reliant l'Ile-Napoléon à Chalampé. On a imposé sur cette limite une condition de niveau.

./.

- A l'Ouest, la limite naturelle est constituée par le Sundgau ; sur cette frontière a été imposée une condition de débit : les divers ruisseaux débouchant du Sundgau s'infiltrent en effet entièrement dès leur arrivée dans la plaine alluviale.

2.3. CHOIX DE LA PIEZOMETRIE A RECONSTITUER

La piézométrie à reconstituer devrait correspondre à un régime permanent. Or on ne peut observer un tel régime qu'à la fin d'une longue période d'étiage au cours de laquelle l'écoulement de la nappe a eu le temps de se stabiliser. L'examen du mécanisme de la nappe sur la zone d'étude montre qu'on n'observe jamais de régime d'étiage étendu à l'ensemble du secteur Bâle-Mulhouse : ceci est dû à la propagation d'une onde de hautes eaux qui prend naissance au printemps en bordure du Sundgau et qui met environ huit mois pour parvenir dans la région d'Ottmarsheim et Chalampé ; les hautes eaux et les basses eaux n'ont donc pas lieu au même moment en tout point de la napp

Considérant cette inexistence de régime permanent réel, on a décidé de reconstituer un régime permanent fictif de la façon suivante : on a calculé, pour tous les points d'eau régulièrement observés, la moyenne arithmétique pour l'année 1970 du niveau piézométrique. Les résultats obtenus ont permis de tracer la carte de l'annexe 1 qui a donc été considérée comme document de base.

Cette méthode ne s'accomode certes pas d'une justification théorique : on peut admettre toutefois qu'elle constitue un moyen d' "intégrer" toutes les irrégularités passagères ayant pu survenir au cours de l'année dans le régime de la nappe.

./.

Par ailleurs et surtout, on a pu constater que les écarts entre cette carte moyenne et l'une quelconque des cartes "instantanées" réellement observées étaient petits par rapport à ceux auxquels pouvaient donner lieu sur les cartes calculées à l'aide du modèle mathématique des modifications de la transmissivité pourtant modérées en certaines parties du modèle.

2.4. DEBITS DE POMPAGE ET D'ALIMENTATION IMPOSES AU MODELE

Après avoir défini la piézométrie que l'on cherche à reconstituer (et qui est celle qu'on impose au modèle sur les frontières où existent des conditions de niveau), il ne reste plus qu'à déterminer la répartition des débits introduits dans le modèle.

Ces débits sont de plusieurs sortes :

- Débit d'alimentation provenant de l'infiltration de la pluie ; ce débit, uniformément réparti, a été calculé par interpolation entre les diverses stations pluviométriques, à partir des données moyennes pour 1970 et en supposant un coefficient d'infiltration moyen annuel de 15 % (déterminé dans des études antérieures du S.G.A.L.).

- Débit d'alimentation provenant de l'infiltration des ruisseaux du Sundgau ; pour les quatre ruisseaux (Hegenheim, Blotzheim, Sierentz et Dietwiller) équipés de stations limnigraphiques, on a calculé directement le débit moyen annuel ; ce débit a été injecté aux neeuds correspondant au débouché de ces ruisseaux dans la plaine (sauf pour le ruisseau d'Hegenheim qui ne s'infiltre pas immédiatement). Entre ces divers débouchés, on

a calculé les apports en provenance du Sundgau par interpolation entre stations limnigraphiques et en tenant compte de la taille des petits bassins versants contribuant à ces apports. Les débits ainsi calculés ont été répartis uniformément le long de la frontière Ouest.

- Débits d'alimentation provenant des infiltrations des cours d'eau dans la plaine.

Deux cours d'eau alimentent la nappe dans la plaine alluviale elle-même : le ruisseau de Hegenheim, qui est le seul ruisseau important à ne pas d'infilter dès sa sortie du Sundgau ; le canal à grand gabarit qui a présenté des fuites durant l'année 1970 sur des secteurs localisés par le Service de la Navigation.

L'alimentation globale de la nappe par ces cours d'eau (déterminée pour le ruisseau d'Hegenheim grâce à la station de jaugeage et pour le canal à l'aide des courbes de consommation établies par le Service de la Navigation) a été répartie entre les divers points où se produisaient les infiltrations les plus importantes.

- Débits de pompage : Il n'a pas été possible de disposer des consommations en eau pour 1970 des industries et collectivités. On a donc utilisé les données de 1969. Il est à noter toutefois que les consommations ont peu varié d'une année à l'autre.

./.

2.5. ASPECT PRATIQUE DE LA VERIFICATION DE LA COHERENCE DES TRANSMISSIVITES

Suivant les principes exposés au paragraphe 1.2, une répartition des transmissivités, pour représenter la réalité, doit permettre de reconstituer à la fois la piézométrie et les débits d'échange observés. Autrement dit, sur une frontière où est imposée une condition de débit, on doit vérifier la bonne correspondance des niveaux calculés avec les niveaux réels ; sur une frontière où est imposée une condition de niveau, on doit vérifier que les débits calculés sont bien les débits réels. Dans le cas présent, compte tenu des hypothèses faites sur les conditions aux limites, cette deuxième vérification était inutile : en effet, on sait que le débit s'écoulant à travers un tube de courant reste constant (aux pompages et alimentations près). Or, comme on le voit sur la carte piézométrique de l'annexe 1, tous les tubes de courant débouchant sur les limites Est et Nord (où il faudrait effectuer la vérification des débits) prennent naissance sur la limite Ouest, le long de laquelle, précisément, on a imposé les débits réels. Ces mêmes débits se retrouvent donc forcément, aux pompages et alimentants près, sur les limites Nord et Est. La vérification de la cohérence des transmissivités se ramène donc à celle de la bonne correspondance des piézométries réelle et calculée en tout point du domaine.

./.

CHAPITRE III

PRESENTATION DES RESULTATS

3.1. COMPARAISON ENTRE LA CARTE PIEZOMETRIQUE REELLE ET CALCULEE

Dix passages machine, pour chacun desquels les transmissivités étaient modifiées de telle sorte que le résultat du calcul se rapproche de la réalité, ont permis d'aboutir à la carte piézométrique représentée en annexe 1. On voit que cette carte coïncide de façon satisfaisante avec la carte réelle, l'écart entre les deux étant très rarement supérieur à deux mètres. Il importe de noter que les niveaux calculés sur la limite Ouest du modèle sont très voisins de ceux que l'on observe réellement ce qui prouve - le gradient général de la nappe étant correctement restitué - que globalement les transmissivités utilisées sont bonnes.

3.2. ANALYSE DE LA CARTE DES TRANSMISSIVITES

La carte des transmissivités retenue est donnée en annexe 1. On voit que les lignes d'égale transmissivité sont grossièrement perpendiculaires au sens d'écoulement de la nappe, ce qui est le cas le plus favorable pour l'application de la méthode utilisée et constitue donc une garantie supplémentaire de la validité des résultats obtenus.

On peut faire quelques remarques sur la physionomie de cette carte des transmissivités.

./.

Elles présente en gros le même aspect que la carte de l'épaisseur moyenne des alluvions mouillées (annexe 2) ; les contrastes de transmissivité sont toutefois plus importants, ce qui prouve que la perméabilité des terrains est plus faible le long du Sundgau qu'au milieu de la plaine (l'examen des coupes géologiques le confirme d'ailleurs : dans la partie Ouest du secteur, on note de nombreuses intercalations de lentilles d'argile entre des couches de sable ou de graviers).

Les valeurs de la transmissivité à l'extrémité Sud du secteur d'étude (Bâle, Saint-Louis) sont très faibles. Elles augmentent quand on remonte vers le Nord et on note des zones assez favorables à Village-Neuf et au Nord de l'aéroport de Bâle-Mulhouse. Entre Sierentz et Kembs, on a une zone de faibles transmissivités.

Plus au Nord, les caractéristiques s'améliorent à nouveau, en particulier sur la bordure Ouest de la zone d'étude, entre Dietwiller et Eschentzwiller et surtout au centre de la plaine, où les transmissivités vont en croissant jusqu'à atteindre $2,5.10^{-1}$ m^2/s au niveau de Chalampé.

Cette zone de fortes transmissivités est bordée à l'Ouest (Rixheim, aérodrome de Habsheim) et à l'Est (Niffer, Petit-Landau) par deux secteurs où les caractéristiques de l'aquifère semblent très mauvaises.

3.3. REMARQUES

On a reporté sur la carte de l'annexe 2 des valeurs de la transmissivité obtenues sur le secteur à l'aide d'essais de pompage. Ces valeurs diffèrent parfois sensiblement de celles établies avec l'ordinateur. On peut trouver à ceci une raison :

./.

Un essai de pompage donne une indication "ponctuelle", ou du moins intéressant une partie de la nappe très limitée. La méthode utilisée avec l'ordinateur donne au contraire une valeur moyenne de la transmissivité sur une maille du modèle. La transmissivité étant une caractéristique qui peut être sujette à des variations très fortes sur de très faibles distances, on peut fort bien observer en certains points des écarts importants par rapport à la valeur moyenne sans que ceci veuille dire que cette valeur soit fausse.

./.

CONCLUSION

L'étude qui vient d'être présentée a permis de définir à partir des données de terrain recueillies et de leur interprétation par un modèle mathématique en régime permanent la répartition des transmissivités sur le secteur alluvial de la plaine du Rhin entre Bâle et Mulhouse.

Les résultats acquis sont très satisfaisants mais pourront être encore améliorés dans le futur .

- Par l'apport d'informations plus précises sur certaines données de terrain (en particulier sur l'alimentation de la nappe à partir des cours d'eau)

- Par les résultats d'essais de pompage qui pourront être effectués sur le secteur (forage de la Ville de Mulhouse)

Néanmoins, les résultats peuvent d'ores et déjà être utilisés pour la mise au point du modèle de gestion de la nappe en régime transitoire, objectif poursuivi dans l'étude Bâle Mulhouse. Il convient d'ajouter que la carte de transmissivité obtenue n'est pas seulement un "document d'école", mais qu'elle constitue à elle seule un document directement utilisable. En effet, elle permet de définir de façon précise la qualité de l'aquifère et donc le rendement d'un forage implanté dans le milieu alluvial. Ceci bien sûr indépendamment des ressources à long terme du réservoir, problème que doit résoudre le modèle de gestion.

La Direction du Service Géologique
d'Alsace et de Lorraine

Annexe 1

ETUDE BALE-MULHOUSE

ETABLISSEMENT DE LA CARTE DES TRANSMISSIVITES

CARTE PIEZOMETRIQUE MOYENNE POUR 1970

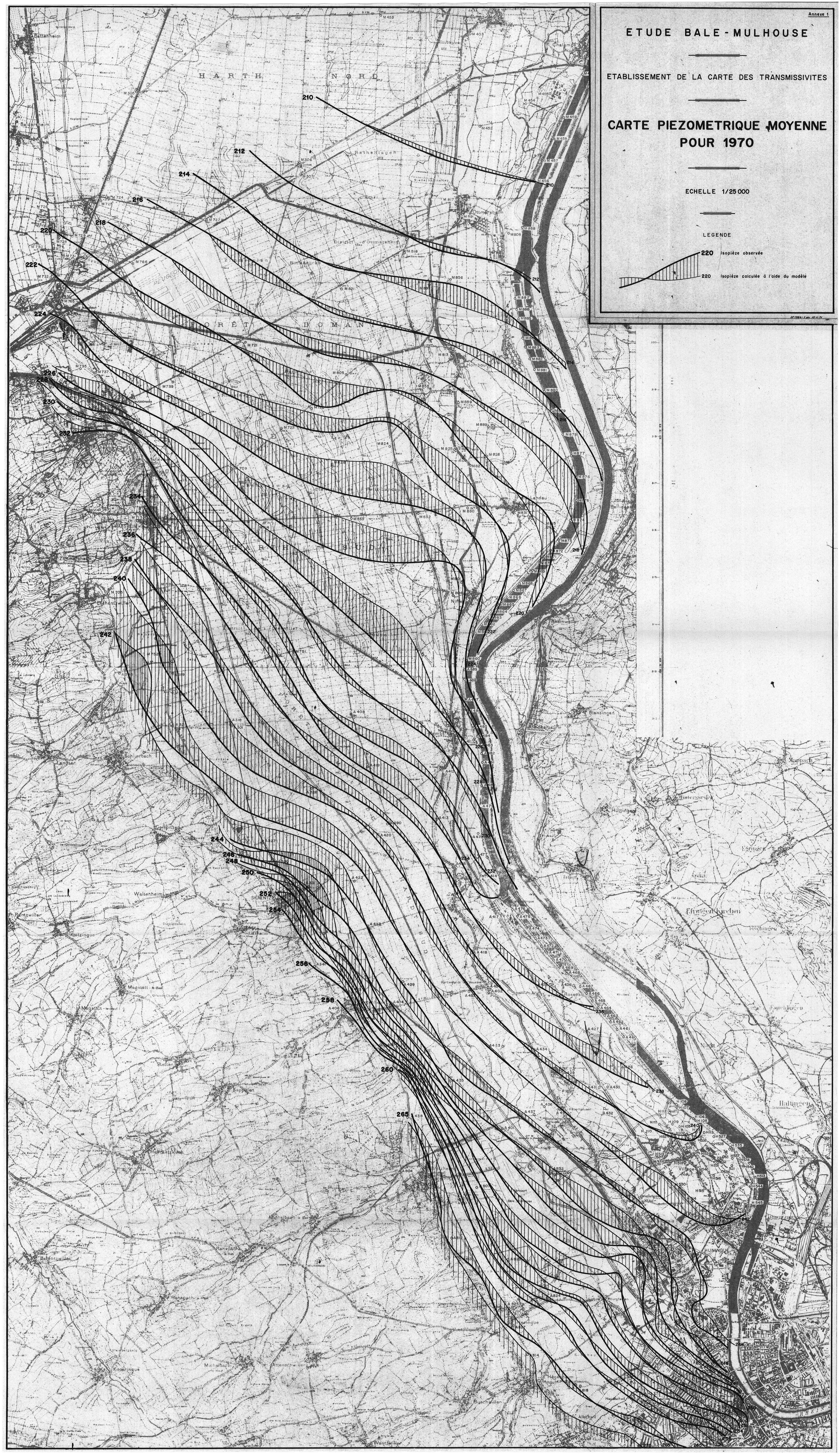
ECHELLE 1/25 000

LEGENDE

220 Isopièze observée

220 Isopièze calculée à l'aide du modèle

M 1386-1 du 12-4-71



Annexe 2

ETUDE BALE-MULHOUSE

ETABLISSEMENT DE LA CARTE DES TRANSMISSIVITES

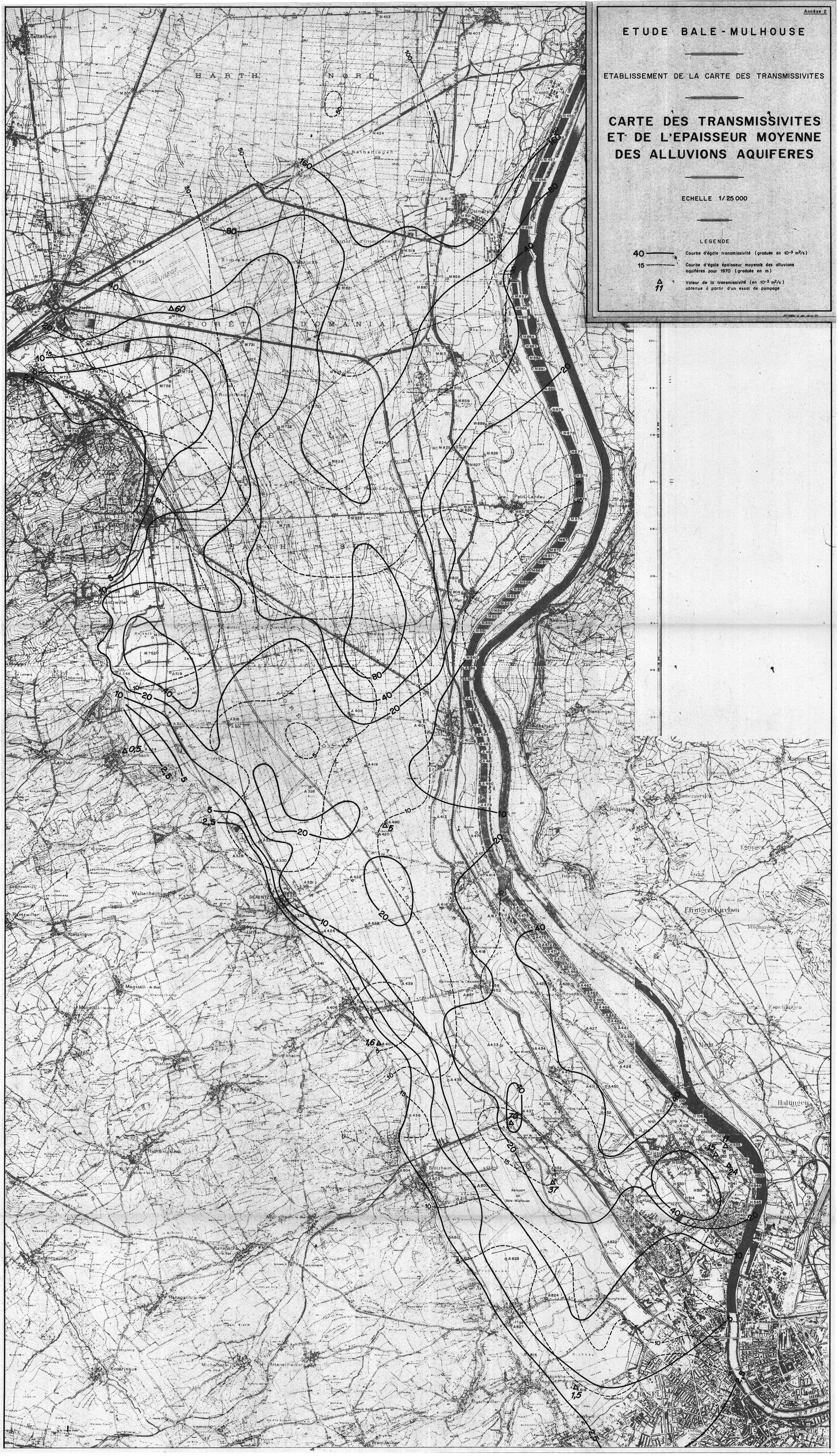
CARTE DES TRANSMISSIVITES ET DE L'EPAISSEUR MOYENNE DES ALLUVIONS AQUIFERES

ECHELLE 1/25 000

LEGENDE

40 ——— Courbe d'égale transmissivité (graduée en 10^{-3} m^2/s)

15 - - - - Courbe d'égale épaisseur moyenne des alluvions aquifères pour 1970 (graduée en m)

△ 11 Valeur de la transmissivité (en 10^{-3} m^2/s) obtenue à partir d'un essai de pompage

M 1386-2 du 18-6-71