

376
981
197

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

U.E.R DES SCIENCES DE LA TERRE

50376
1981
197

THÈSE

PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION DU

DOCTORAT DE TROISIÈME CYCLE

en

SCIENCES NATURELLES

MENTION GÉOLOGIE APPLIQUÉE

TRAITEMENT RÉGIONALISÉ DES PARAMÈTRES

CONTRIBUANT À LA GESTION DES NAPPES

APPLICATION A LA MODÉLISATION DE LA NAPPE DE LA CRAIE

DANS LE BASSIN DE L'AA ET DE LA MOYENNE LYS

(Région Nord - Pas-de-Calais)

PAR

Jean **BECKELYNCK**

Commission d'examen



- | | |
|-------------------------|-------------------|
| MM. P. DEBRABANT | Président |
| N. CRAMPON | Rapporteur |
| J. MANIA | Examineur |
| E. LEDOUX | Invité |
| P. SANGNIER | Invité |

à ma fille, Anne

REMERCIEMENTS

Au moment d'exposer les résultats qui font l'objet de ce mémoire, c'est avec plaisir que je remercie toutes les personnes qui m'ont permis de l'entreprendre et de le mener à bien.

Monsieur le Professeur P. DEBRABANT m'a fait l'honneur de juger ce travail et d'accepter la présidence du jury. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma profonde gratitude.

Monsieur le Professeur N. CRAMPON m'a accueilli dans son laboratoire à l'issue du second cycle et a guidé la poursuite du travail entrepris avec l'appui de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique. Je lui dois notamment l'intérêt porté aux problèmes de qualité et de protection des eaux souterraines. Ses nombreux conseils et encouragements ont été très précieux. Je lui exprime ma très sincère reconnaissance.

Je sais gré à Monsieur J. MANIA, Maître-Assistant à l'Université des Sciences et Techniques de Lille d'avoir bien voulu juger cette thèse portant sur une région où il a contribué depuis longtemps à l'avancement des études hydrogéologiques.

Monsieur E. LEDOUX, Maître de Recherches à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, m'a initié aux techniques de modélisation et m'a facilité l'usage de programmes disponibles au Centre Informatique Géologique. Son aide a été précieuse et je lui exprime mes profonds remerciements.

Monsieur P. SANGNIER a accepté de représenter le Bureau de Recherches Géologiques et Minières malgré les multiples et importantes charges qui l'occupent au sein de sa direction. Je l'en remercie d'autant plus vivement.

J'exprime également ma vive reconnaissance à Monsieur G. SOULIEZ, coordinateur interrégional du B.R.G.M. région Nord, qui m'a accueilli dans son service et m'a permis de collaborer à la réalisation concrète d'enrichissantes études.

Je ne saurais oublier Messieurs P. CAULIER et A. TALBOT, ingénieurs hydrogéologues au Service géologique régional Nord Pas-de-Calais, qui n'ont pas compté leur temps pour suivre mon travail en me faisant bénéficier de leur expérience par de nombreux conseils, judicieux et constructifs. Deux années durant ils m'ont assuré de leurs encouragements et amitiés ; je les en remercie très sincèrement.

C'est avec plaisir que je remercie mes prédécesseurs et amis stagiaires, et plus particulièrement Mademoiselle B. TILLIE qui m'a fait bénéficier largement de sa pratique de l'informatique.

Ce mémoire n'aurait pu être mené à son terme sans la compétence et la disponibilité de tous ceux qui ont permis sa mise en forme. La dactylographie revient à Mesdames D. VON, M. BEVENS, A. DUPONT et M. BACK ; les dessins et tirages à Messieurs B. MONNIER, J. STANKO et E. VOLCKCRICK. Qu'ils voient ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

C'est avec grand plaisir que j'adresse mes remerciements à tout le personnel du Service géologique régional Nord Pas-de-Calais pour leur amitié et leur collaboration.

Je ne saurais terminer sans associer à ce travail mon épouse Béatrice, qui m'a assisté patiemment tout au long de cette étude. Je lui renouvelle toute mon affection et l'assure de ma profonde gratitude.

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
AVANT-PROPOS	1
<u>PREMIERE PARTIE : CONTRIBUTION A UNE SYNTHESE CARTOGRAPHIQUE</u>	
REGIONALE.....	3
CHAPITRE I : ESTIMATION DES APPORTS NATURELS.....	5
1 - INTRODUCTION.....	7
2 - REPARTITION DES PRECIPITATIONS MOYENNES	
INTERANNUELLES.....	10
21 - Stations pluviométriques utilisées -	
Extension des données de courte durée.....	10
22 - Représentation cartographique.....	14
221 - Reconnaissance structurale.....	14
222 - Krigeage des précipitations.....	18
23 - Régime des pluies.....	21
24 - Conclusion sur la pluviométrie.....	23
3 - REPARTITION DES EXCEDENTS MOYENS INTERANNUELS.....	25
31 - Introduction.....	25
32 - Choix des stations thermométriques.....	26
33 - Calcul de l'évapotranspiration potentielle aux	
stations.....	27
34 - Evapotranspiration réelle et excédent d'eau	
aux stations.....	28
35 - Cartographie de l'excédent d'eau annuel moyen..	32
36 - Approche sur une répartition de l'infiltration	
efficace à l'échelle régionale.....	32
4 - CONCLUSION.....	35
CHAPITRE II : REPARTITION ET EVOLUTION DES PRELEVEMENTS.....	37
1 - INTRODUCTION.....	39
11 - Une nouvelle base de données.....	39
12 - Cadre de la synthèse.....	42
121 - La notion de prélèvements.....	42
122 - Les données utilisées.....	43

	<u>Pages</u>
2 - ANALYSE GLOBALE ET EVOLUTION REGIONALE.....	43
21 - Une région à part.....	43
22 - Evolution statistique et tendances.....	47
3 - APERCU SUR LA REPARTITION SPATIALE DES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS.....	53
4 - CONCLUSIONS.....	56
 CHAPITRE III : DISTRIBUTION DES TRANSMISSIVITES.....	 61
1 - INTRODUCTION.....	63
2 - PERMEABILITE ET TRANSMISSIVITE.....	64
3 - TRAITEMENT ET EXTENSION DES DONNEES DES TRANSMISSI- VITES.....	66
4 - CONCLUSION.....	73
 CHAPITRE IV : QUALITE ET VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES....	 75
1 - INTRODUCTION.....	77
2 - CARTOGRAPHIE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES.....	78
21 - Principes d'élaboration des cartes.....	78
22 - Commentaires.....	80
3 - CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES A LA POLLUTION.....	85
31 - Définitions et critères.....	85
32 - Conception de la carte.....	87
4 - CONCLUSION.....	88
 <u>DEUXIEME PARTIE</u> : MODELISATION DE LA NAPPE DE LA CRAIE DU BASSIN DE L'AA ET DE LA MOYENNE LYS.....	 91
CHAPITRE I : CADRE DE L'ETUDE.....	93
1 - GEOLOGIE.....	95
2 - HYDROGEOLOGIE.....	101
21 - Structure et géométrie des aquifères.....	102
22 - Piézométrie de référence.....	103

	<u>Pages</u>
CHAPITRE II : MODELISATION DES ECOULEMENTS.....	107
1 - GENERALITES.....	109
2 - CONSTRUCTION DU MODELE.....	111
21 - Conditions aux limites.....	111
22 - Choix du maillage.....	113
3 - VARIABILITE SPATIALE DES APPORTS.....	114
4 - PRELEVEMENTS.....	117
5 - TRAITEMENT DES DONNEES PIEZOMETRIQUES.....	119
6 - CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT.....	119
61 - Calage de la piézométrie.....	123
62 - Bilan des flux.....	123
63 - Répartition des transmissivités après calage.....	126
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	131
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	
<u>ANNEXES</u>	

LISTE DES FIGURES

	<u>Pages</u>
FIGURE 1 - Diagramme schématique des principales méthodes d'estimation des apports aux nappes.....	8
FIGURE 2 - Implantation des stations climatologiques.....	12
FIGURE 3 - Demi-variogramme moyen des précipitations des stations de longue durée.....	15
FIGURE 4 - Carte des précipitations moyennes sur 20 ans - Stations de longue durée seules.....	16
FIGURE 5 - Carte des isohyètes des précipitations moyennes annuelles sur 20 ans - Stations de longue durée et de courte durée étendues.....	17
FIGURE 6 - Ecart-types des précipitations moyennes interannuelles (période 1956-1975).....	20
FIGURE 7 - Graphiques des hauteurs de précipitations intermen- suelles.....	22
FIGURE 8 - Blocs diagrammes des précipitations moyennes dans la région Nord Pas-de-Calais.....	24
FIGURE 9 - Corrélation entre les excédents moyens calculés sur 20 années réelles et ceux calculés à partir des années moyennes.....	30
FIGURE 10A- Carte des excédents annuels moyens (mm).....	33
FIGURE 10B- Distribution des écart-types des excédents (mm).....	33
FIGURE 11 - Evolutions piézométriques de longue durée dans les nappes de la craie et du Calcaire carbonifère.....	40
FIGURE 12 - Evolution globale des prélèvements (1972-79).....	48
FIGURE 13 - Prélèvements par origine - Evolution par département...	49
FIGURE 14 - Prélèvements en eaux souterraines - Evolution par secteur d'utilisation et département.....	49
FIGURE 15 - Evolution du rapport utilisation, $U = AEP/AEI$, suivant l'origine.....	50
FIGURE 16 - Evolution du rapport origine, $R = ESO/ESU$, suivant l'utilisation.....	50
FIGURE 17 - Relation entre l'évolution des types d'utilisation et types de ressource.....	52
FIGURE 18 - Système des ressources et d'utilisation d'eau.....	53

FIGURE 19 - Carte de répartition des prélèvements moyens en eau souterraine par arrondissement (%).....	55
FIGURE 20 - Carte de répartition de la population par arrondissement (%).....	55
FIGURE 21 - Carte des prélèvements en nappes (1/500 000) - année 1979.....	57
FIGURE 22 - Carte des transmissivités déterminées par pompages d'essais (1/320 000).....	67
FIGURE 23 - Corrélation entre transmissivités et débits spécifiques (logarithmes).....	69
FIGURE 24 - Histogramme des logarithmes des transmissivités et débits spécifiques corrilés.....	69
FIGURE 25 - Carte des transmissivités avec prise en compte des débits spécifiques (1/320 000).....	71
FIGURE 26 - Carte géologique du secteur d'étude (1/250 000).....	97
FIGURE 27 - Coupe hydrogéologique schématique transversale à l'Artois.....	96
FIGURE 28 - Coupes de sondages et diagraphies dans les bassins de l'Aa et de la Lys.....	104
FIGURE 29 - Graphique d'évolution piézométrique à Mametz (1965-79).....	106
FIGURE 30 - Graphique d'évolution piézométrique à Nort-Leulinghem (1965-79).....	106
FIGURE 31 - Conditions aux limites - Répartition des prélèvements.	112
FIGURE 32 - Maillage du modèle.....	114
FIGURE 33 - Répartition de l'alimentation naturelle.....	116
FIGURE 34 - Carte des prélèvements dans la nappe de la craie (1974).....	118
FIGURE 35 - Répartition des données piézométriques.....	120
FIGURE 36 - Carte des écarts réduits des données piézométriques reconstituées.....	121
FIGURE 37 - Ecart-types d'estimation de la piézométrie krigée....	122
FIGURE 38 - Répartition des transmissivités après calage.....	127

LISTE DES TABLEAUX

	<u>Pages</u>
TABLEAU 1 - Valeurs du coefficient de corrélation r.....	11
TABLEAU 2 - Coefficients pluviométriques mensuels en pourcentage par rapport au module pluviométrique annuel.....	21
TABLEAU 3 - Températures moyennes mensuelles en °C (période 1956- 75).....	27
TABLEAU 4 - Valeurs moyennes mensuelles et annuelles de l'ETP calculées sur la période 1956-75 (mm).....	28
TABLEAU 5 - Eléments du bilan hydrique annuel, période 1956-75.....	29
TABLEAU 6 - Bilan régional moyen sur 20 ans.....	36
TABLEAU 7 - Prélèvements de 1972 à 1979 dans les départements de la région Nord Pas-de-Calais - Eaux souterraines et de surface (en millions de m ³ /an).....	44
TABLEAU 8 - La région et la France : l'eau en quelques chiffres....	45
TABLEAU 9 - Prélèvements en eaux souterraines par arrondissement (1972-79).....	54

LISTE DES ANNEXES

1ère partie

ANNEXE I	Liste des stations climatologiques - Valeurs moyennes annuelles du module pluviométrique et de l'excédent.
ANNEXE II	Aperçu sur une méthode d'analyse de variable régionalisée : le krigeage.
ANNEXE III	Bilan hydrologique et excédent d'eau.
ANNEXE IV	Tableaux des valeurs de transmissivités.
*ANNEXE V	Carte de qualité générale des eaux souterraines (échelle 1/250 000).
*ANNEXE VI	Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution (échelle 1/250 000).

* : Annexe hors texte.

2ème partie

- *ANNEXE VII Carte du toit du Turonien moyen (1/100 000).
- *ANNEXE VIII Carte du toit du Sénonien (1/100 000).
- *ANNEXE IX Carte piézométrique de basses eaux (1/100 000).
- ANNEXE X Les écoulements souterrains - Principe des modèles mathématiques de simulation.
- *ANNEXE XI Piézométrie de référence obtenue par krigeage.
- *ANNEXE XII Comparaison entre piézométrie de référence et calculée.

AVANT - PROPOS

Le présent travail s'inscrit dans le cadre des travaux entrepris par le Bureau de Recherches géologiques et minières depuis 1956, en vue d'établir l'inventaire des ressources en eau de la région Nord - Pas-de-Calais, inventaire qui s'est avéré nécessaire pour les besoins de son aménagement.

La première phase de toute planification judicieuse consiste à déterminer l'emplacement, la quantité, la qualité et la disponibilité de toutes les eaux de surface et souterraines d'une région donnée. Si cet objectif doit être atteint à terme, on conviendra qu'il est nécessaire de dégrossir la tâche à entreprendre en s'attaquant séparément à différents secteurs économiques. C'est ainsi qu'au titre de la Gestion des ressources en eau souterraine, il a paru dans un premier temps urgent de rassembler et de valoriser au mieux le stock d'informations disponibles dans la zone médiane et occidentale du bassin minier, travail réalisé récemment par B. TILLIE.

Reprenant plusieurs études antérieures et utilisant des données nouvelles complémentaires systématiquement recueillies, le mémoire ici présenté s'inscrit dans sa continuité en entreprenant la modélisation de la nappe de la craie dans le bassin de l'Aa et de la Moyenne Lys. Il donne une synthèse de ce secteur en insérant ce dernier dans son contexte régional.

Alors que les problèmes de géométrie et de faciès du vaste domaine crayeux ont été traités par P. CAULIER, notre attention s'est plus particulièrement portée sur l'estimation des apports naturels à l'échelle régionale, estimation qu'il est dès lors possible de confronter avec les quantités d'eaux pompées. Encore faut-il que ces ressources potentielles soient réellement exploitables. La cartographie de la qualité des eaux souterraines souligne ce problème dans une région caractérisée par de fortes concentrations urbaines liées à une vocation industrielle marquée. La carte de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution constitue alors à la fois un élément explicatif du chimisme, mais surtout un outil de prévention de la qualité d'eaux à réserver en priorité à l'alimentation.

PREMIERE PARTIE

CONTRIBUTION A UNE SYNTHESE

CARTOGRAPHIQUE REGIONALE

***ESTIMATION
DES APPORTS NATURELS***

1 - INTRODUCTION

En permettant d'évaluer la ressource renouvelable, l'identification des apports aux nappes représente un terme fondamental de l'expression de la ressource exploitable. L'estimation des apports participe ainsi à la valorisation des réserves : "sous-exploiter l'eau souterraine lorsqu'elle constitue une ressource vitale est aussi grave qu'une surexploitation non désirée" (BESBES M. - 1978).

Dans le cadre d'une étude régionale, et notamment lors de la réalisation de modèles de gestion, il s'avère généralement nécessaire de connaître les apports aux nappes souterraines en tout point du domaine étudié. Cette détermination se heurte cependant à différents problèmes qui sont liés, d'une part à la complexité des phénomènes de percolation dans le milieu non saturé, et d'autre part aux observations locales de terrain difficilement représentatives de domaines étendus en raison de leur nombre limité.

Parmi les solutions proposées pour résoudre ces problèmes (figure 1) nous ne ferons qu'évoquer les diverses méthodes que l'on peut différencier par les types de démarches sur lesquelles elles s'appuient [14].

La première démarche, intuitivement la plus exacte, consiste à mesurer les flux de percolation dans la zone non saturée, soit directement à l'aide de lysimètres [76, 62, 42], soit indirectement par l'analyse des profils de teneur en eau et de succions, [56, 57, 62] ou encore à partir de traçages chimiques ou isotopiques [50, 86, 6]. Si la mise en place de tels dispositifs de mesure peut être envisagée pour des études locales, la limite de leur représentativité nécessite un nombre important de stations expérimentables dès lors que l'on s'intéresse à des espaces importants ; les problèmes de coût deviennent alors prépondérants et limitent l'utilisation de ces méthodes.

Pour estimer les apports, l'hydrogéologue a alors recours à des méthodes de calcul qui s'attachent, soit à quantifier le flux entrant (infiltration efficace) à partir de données climatologiques, soit à l'identifier en analysant ses effets, c'est-à-dire les variations observées de débits et/ou des niveaux des nappes.

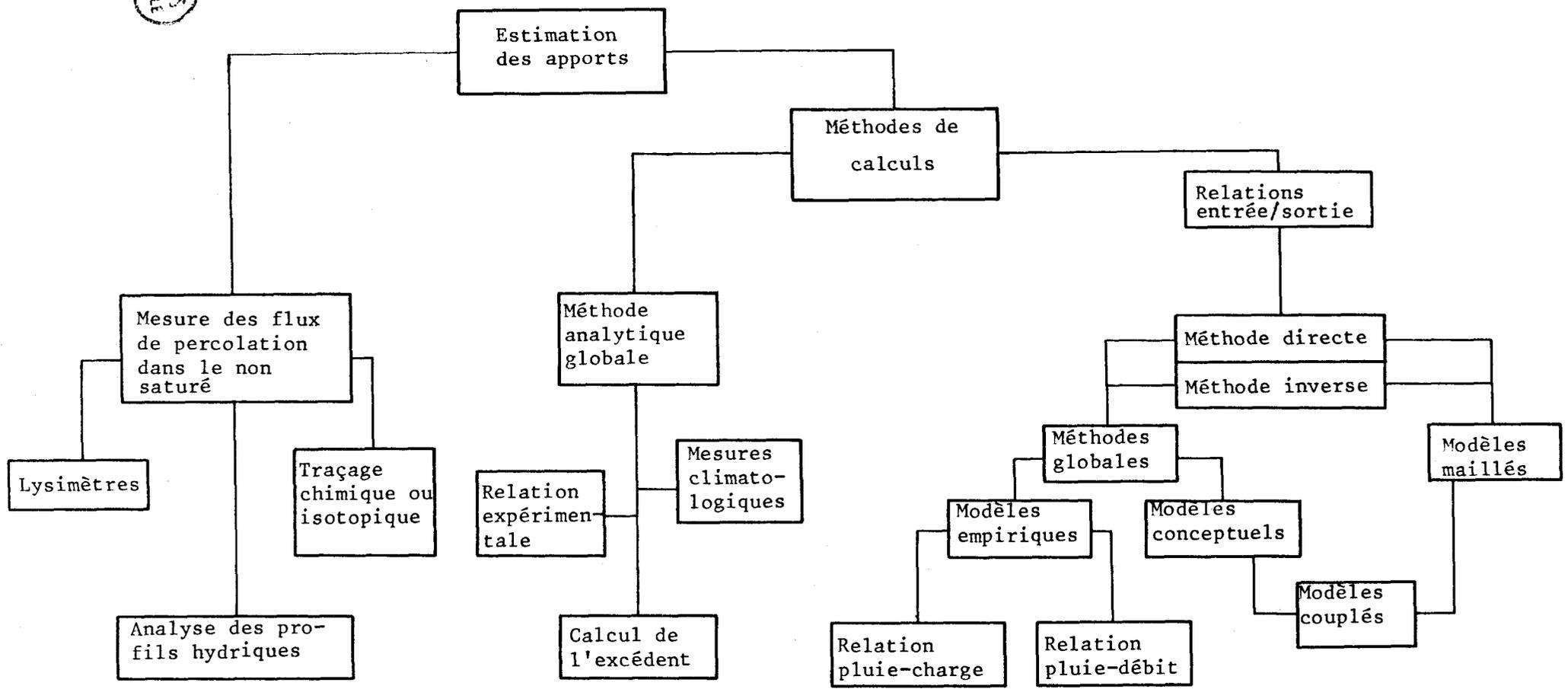


Diagramme schématique des principales méthodes d'estimation des apports aux nappes

Dans le premier cas il s'agit d'estimer le déficit d'écoulement (ou excédent d'eau) à partir du calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) ; on dispose pour cela de formules empiriques (établies expérimentalement), et qui, pour une latitude donnée, utilisent les mesures de température et de précipitations ; ces méthodes de calcul seront détaillées au § 3 de ce chapitre et à l'annexe III.

Dans le second cas, les diverses méthodes ont pour objectif l'estimation des entrées en ajustant les paramètres du système par approximations successives, soit pour obtenir les sorties observées (méthode directe), soit en imposant les sorties pour déterminer les entrées (méthode indirecte).

Parmi ces processus de calcul il convient de citer en premier lieu le modèle global où n'est pas considérée la répartition spatiale des variables ou paramètres ; si le système est assimilé à une boîte noire, la relation empirique (correspondant à une fonction de retard entre entrées et sorties) est identifiée par les techniques de déconvolution [67, 15] ; si la fonction de retard est analytique, le modèle de type conceptuel simule le transfert dans la nappe mais nécessite l'ajustement d'un grand nombre de paramètres [36, 64]. Toutefois, les modèles de type global ne peuvent constituer à eux seuls des outils de gestion ils prennent tout leur intérêt dans leur couplage avec des modèles maillés de simulation dont un exemple récent de développement est fourni par le modèle couplé eaux de nappes-eaux de surface élaboré par E. LEDOUX [59].

Quelque soit le processus adopté, une bonne connaissance des données hydro-météorologiques demeure malgré tout indispensable. Suivant les cas, elle sera considérée suffisante pour l'estimation des apports, ou bien elle permettra d'établir une référence utile pour apprécier la qualité d'un modèle adopté. Dans cet esprit, et vu le caractère régional de l'étude, le choix s'est donc porté sur l'évaluation de la répartition spatiale des apports en partant des données climatologiques. Nous avons en particulier recherché à tirer le meilleur parti des données disponibles correspondant à huit bassins versants, cela en utilisant des méthodes permettant notamment d'exprimer l'erreur sur les estimations compte-tenu de la qualité des informations recueillies.

Enfin, l'objectif étant d'aboutir à un bilan, les résultats portent sur l'estimation des moyennes interannuelles, d'une part des précipitations, et d'autre part de l'eau disponible pour la recharge des nappes d'eau souterraine (pluie efficace) et le ruissellement, autrement dit de l'excédent.

L'accent est mis sur l'établissement de cartes dont les données brutes correspondent aux mesures des stations thermométriques et pluviométriques. En chaque station, la valeur et la précision du résultat dépendent de la fréquence et de la durée des mesures, puis de la méthode utilisée pour le calcul de l'excédent. Spatialement, l'estimation des variables est établie en chaque maille de 4 km de côté d'une grille régulière orientée suivant les axes Lambert. La précision de ces estimations est fonction de la densité du réseau d'observations et de la méthode d'interpolation employée pour le calcul en-dehors des points expérimentaux.

2 - REPARTITION DES PRECIPITATIONS MOYENNES INTERANNUELLES

21 - Stations pluviométriques utilisées-Extension des données de courte durée

L'établissement d'une carte de référence des précipitations nécessite une répartition homogène et un nombre suffisant de postes pluviométriques, ainsi qu'une chronique des observations assez longue.

La période souvent adoptée en météorologie est égale à 30 ans [72], mais il n'y a dans la région Nord Pas-de-Calais qu'une dizaine de stations ayant des mesures sur une durée continue aussi longue.

Pour l'intervalle de 20 ans 1956-75, ce nombre passe à 24, soit en moyenne un pluviomètre pour 520 km², ce qui représente une densité de données d'autant plus insuffisante que la répartition des postes sur l'ensemble de la zone étudiée est assez hétérogène.

Un nombre important de postes ayant été créé entre 1960 et 1962, la solution retenue a été de conserver l'intervalle de 20 ans, et d'étendre les données des stations de plus courte durée à partir de celles de longue durée les plus proches; par ailleurs, un complément d'information a été apporté en adjoignant certaines des stations limitrophes de la Belgique et du département de la Somme. Si la période de référence paraît un peu courte, il convient d'observer que pour les hydrologues une durée de 20 ans est suffisante pour donner à quelques pour cent près la valeur du module pluviométrique annuel moyen [76, 78].

Aux données mensuelles* sur 20 ans de 30 stations régionales sont donc ajoutées celles de 36 stations de plus courte durée ; les lacunes correspondantes ont été comblées par corrélations (J.P. KLESZCZ non publié). On aboutit ainsi à 66 stations dont 26 sont situées dans le Nord, 29 dans le Pas-de-Calais, 5 dans la Somme et 6 en Belgique, soit en moyenne un pluviomètre pour 220 km² ; la carte d'implantation tracée automatiquement** (figure 2) permet de considérer la répartition des stations suffisamment homogène.

La valeur des coefficients de corrélation (r) donnant la qualité de celles-ci (tableau I) est comprise entre 0,83 (Audruicq-Marck) et 0,95 (Saint-Omer-Watten), avec une moyenne centrée de 0,89.

TABLEAU I : Valeurs du coefficient de corrélation r

Station de longue durée	Station de courte durée	r	Station de longue durée	Station de courte durée	r
BEAUMONT (BELGIQUE)	MAUBEUGE	0.90	LENS	DOUAI	0.86
BEAUMONT	AVESNELLE	0.93	St POL/TERNOISE	SAVY BERLETTE	0.91
FORGE (BELGIQUE)	FOURMIES	0.91	FREVENT	TERRAMESNIL (SOMME)	0.88
HEUSIES (BELGIQUE)	VICQ	0.94	FREVENT	DOULLENS (SOMME)	0.87
KAIN (BELGIQUE)	ANZIN	0.86	FIEFS	LILLERS	0.92
KAIN	LICELLES	0.89	WINGLES	BETHUNE	0.86
TROISVILLE	LANDRECIES	0.88	BAILLEUL	MERVILLE-LYS	0.91
TROISVILLE	CARNIERES	0.90	BAILLEUL	ARMENTIERES	0.88
TROISVILLE	CURGIES	0.89	SAINT OMER	WATTEN	0.95
TROISVILLE	SOLESMES	0.88	FRUGES	LUMBRES	0.85
TROISVILLE	VILLERS FAUCOU (SOMME)	0.88	FRUGES	FAUQUEMBERGUES	0.92
EPINOY	PAILLEN COURT	0.91	CAMPAGNE LES HESDIN	MARCONNELLE	0.93
EPINOY	LECLUSE	0.85	CAMPAGNE LES HESDIN	VRON (SOMME)	0.91
EPINOY	GOEULZIN	0.84	LE TOUQUET	ATTIN	0.94
EPINOY	QUEANT	0.93	BOULOGNE	BAINGHEN	0.89
EPINOY	YTRES	0.88	BOULOGNE	AUDEMBERT	0.90
LESQUIN	THUMERIES	0.90	AUDRUICQ	CALAIS-MARCK	0.83
LESQUIN	WAVRIN	0.88	LESQUIN	SECLIN	0.94

* Les données proviennent de la Météorologie nationale, du Service des Voies Navigables, du Service de la protection des végétaux, du Bureau de Recherches Géologiques et Minières et de l'Institut Royal de Météorologie de Belgique.

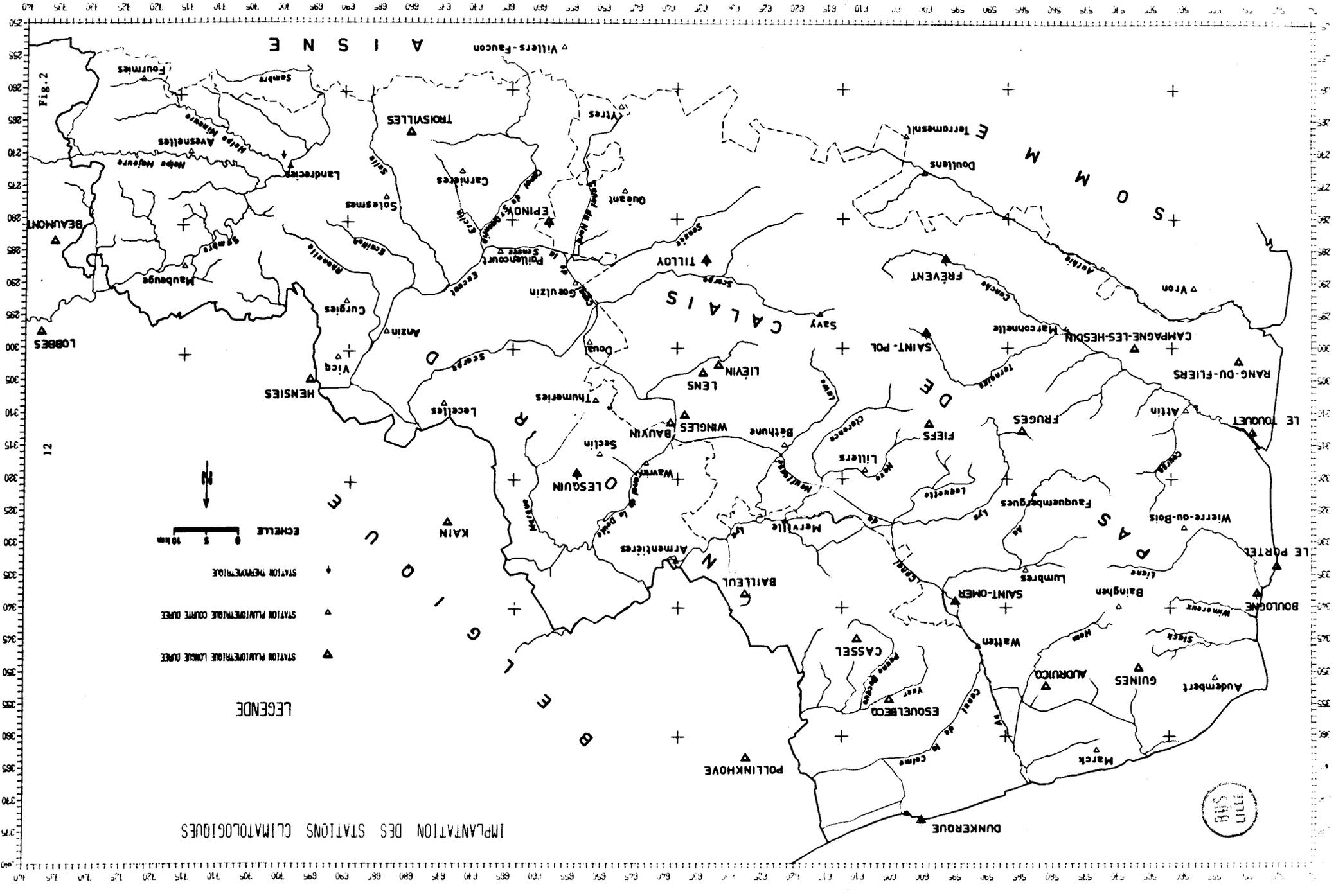
** Programme IMPLANT réalisé dans le cadre de ce travail.

IMPLANTATION DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

LEGENDE

- ▲ STATION PLUVIOMETRIQUE LONGUE DUREE
 - △ STATION PLUVIOMETRIQUE COURTE DUREE
 - ◆ STATION METEOROLOGIQUE
- ECHELLE 0 5 10 km
- N

12



A I S N E

C A L A I S

D E M

S A S

G I O



Le gain d'information apporté par l'extension est quantifié à partir de l'équation de VERON [78] qui exprime l'efficacité relative E et où k est le nombre de valeurs de l'échantillon de courte durée, n celui de l'échantillon de longue durée :

$$E = 1 + \left(1 - \frac{k}{n}\right) \left[\frac{1 - (k - 2) r^2}{k - 3} \right]$$

E varie de $\frac{k}{n}$ à 1, et augmente lorsque le gain d'information diminue

D'une autre manière on peut traduire cette efficacité sous la forme du gain réel d'information qui s'exprime à l'aide du nombre de mois "fictifs" ou "efficaces" n' : $n' = \frac{k}{E}$.

Si on considère par exemple la corrélation Audruicq-Marck qui présente le plus mauvais coefficient et où, de plus, k est petit (144 mois, soit 12 ans) ; on obtient une efficacité relative E de 0,725 et 198 mois "efficaces", soit un gain d'information valide de 4,5 ans.

Connaissant deux séries de longue durée, on peut tenter, après avoir supprimé un certain nombre de valeurs sur l'une d'entre elle, de reconstituer celles-ci par simple corrélation. On peut ainsi se faire une idée de la qualité de l'extension d'une série de courte-durée. Ce travail a été fait, à titre d'exemple, pour les données pluviométriques recueillies à Fiefs corrélées avec celles obtenues à Saint-Pol-sur-Ternoise. En supprimant suivant deux cas de figure distincts 5 années de mesures consécutives, la reconstitution a donné :

	r	Moyenne		Ecart
		Reconstituée	Réelle	
1er cas	0,90	902	886	2%
2ème cas	0,95	858	886	3%

Ces résultats permettent de considérer comme réaliste la méthode ici utilisée pour l'extension d'un historique existant, l'incertitude affectant les valeurs moyennes annuelles fournies par le calcul étant peu élevée.

22 - Représentation cartographique

Partant des données des stations climatologiques (cf. annexe I), les précipitations moyennes interannuelles sont calculées en chaque maille de la grille choisie (cf. § 1) par krigeage qui n'est autre qu'un procédé de cartographie automatique (cf. [40] , annexe II). Cette méthode est particulièrement bien adaptée au traitement d'une variable continue ; elle permet d'estimer en chaque maille la valeur étudiée ainsi que la précision de cette estimation sous la forme d'un écart-type d'estimation.

Avant d'aborder le krigeage proprement dit, une première phase nécessaire est constituée par l'étude de la structure du phénomène. Dans le cas présent, la variable régionalisée est le module pluviométrique interannuel dont la répartition des valeurs est recherchée sur l'ensemble des deux départements du Nord et du Pas-de-Calais.

C'est donc à cette échelle que vont être réalisés, d'une part la recherche structurale, et d'autre part le traitement des données par krigeage.

221 - Reconnaissance structurale

La structure du phénomène régional est déterminée par la demi-variance d'accroissements qui définit la façon dont se détériore une information ponctuelle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de ce point ; le variogramme constitue l'outil mathématique utilisé pour représenter les fluctuations du phénomène analysé.

Par souci de concision, il ne sera présenté ici que les résultats de cette recherche structurale, les fondements théoriques étant repris par ailleurs (annexe II).

Les variogrammes des précipitations ont été calculés* pour une distance de 100 km, soit un peu moins de la moitié de la plus grande dimension de la zone étudiée. Les différences entre variogrammes de directions distinctes étant peu significatives, le variogramme moyen (figure 3) peut être considéré représentatif de la structure (par conséquent estimée isotrope) calculée à partir des mesures des 30 stations de longue durée.

* CHILES J.P. - Programme GAMMA : E.N.S.M.P. - CMM - 1975.

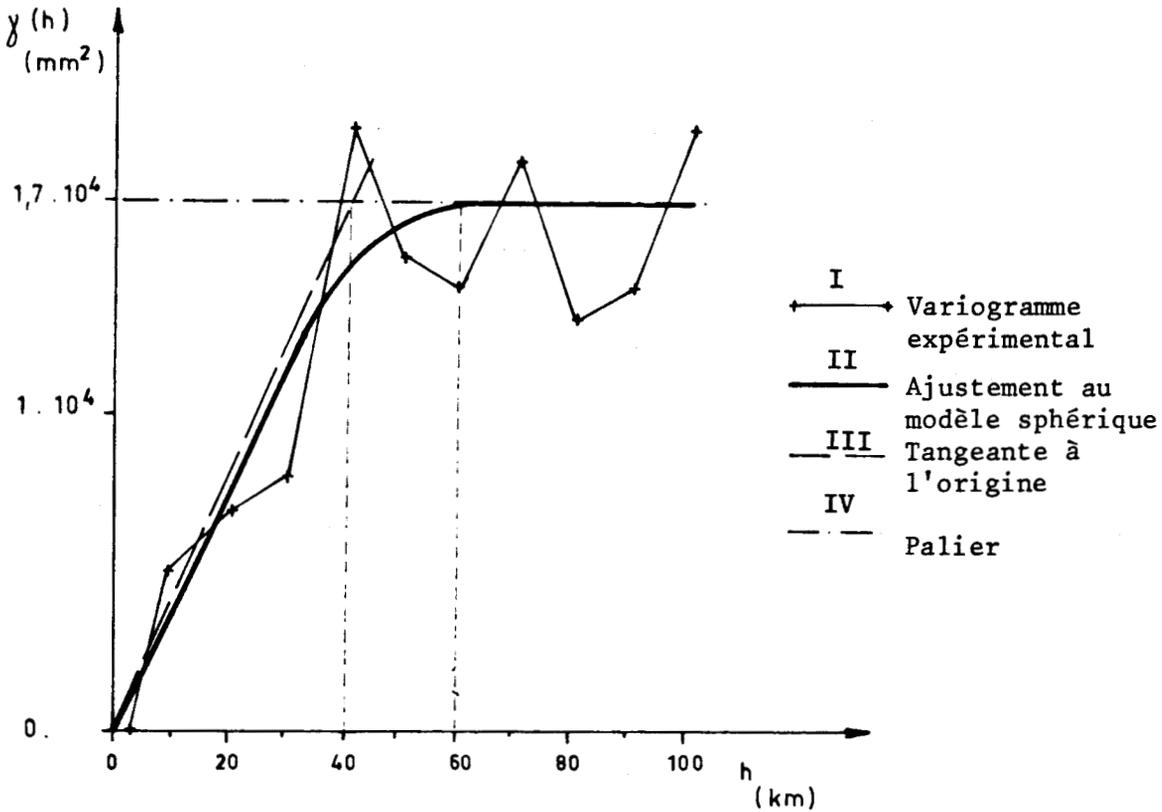


Figure 3 : Demi-variogramme moyen des précipitations des stations de longue durée.

Le variogramme expérimental (figure 3_I) permet d'ajuster une courbe lissée présentant les caractères principaux suivants :

- ordonnée à l'origine nulle,
- absence de dérive (existence d'un palier),
- linéarité à l'origine,

L'absence d'une discontinuité à l'origine (effet de pépite) indique la régularité locale des données ; autrement dit, les données recueillies en des points très voisins correspondent à des valeurs également très proches. Cette propriété peut être vérifiée, par exemple, pour les données provenant des stations voisines de Lens et Liévin (cf. figure 1 et annexe I) ; elle est le témoin en particulier de la bonne qualité des mesures expérimentales et d'une répartition spatiale des stations adaptée à l'échelle du phénomène étudié.

Figure 4 : Carte des précipitations moyennes sur 20 ans. Stations de longue durée seules.

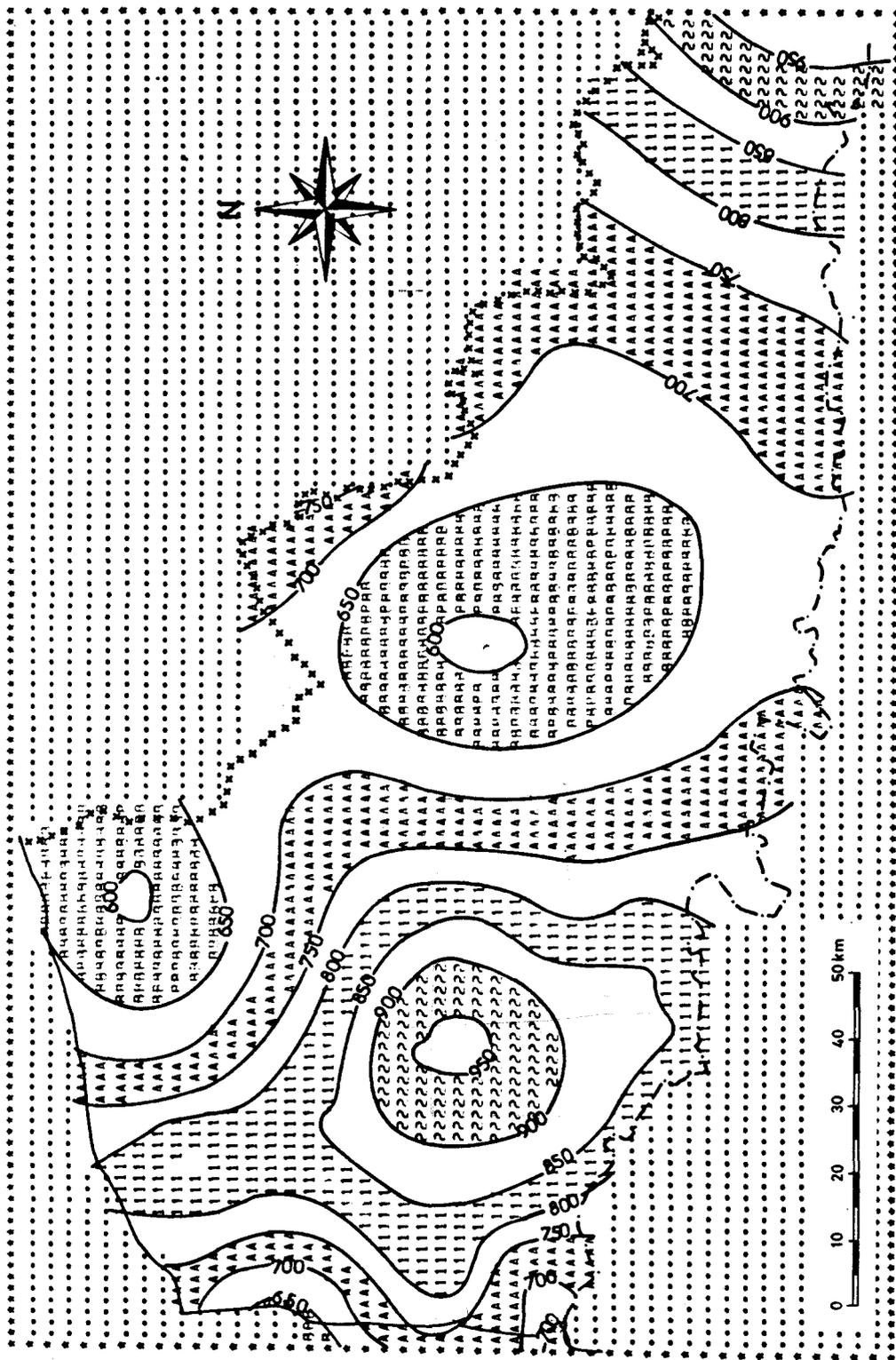
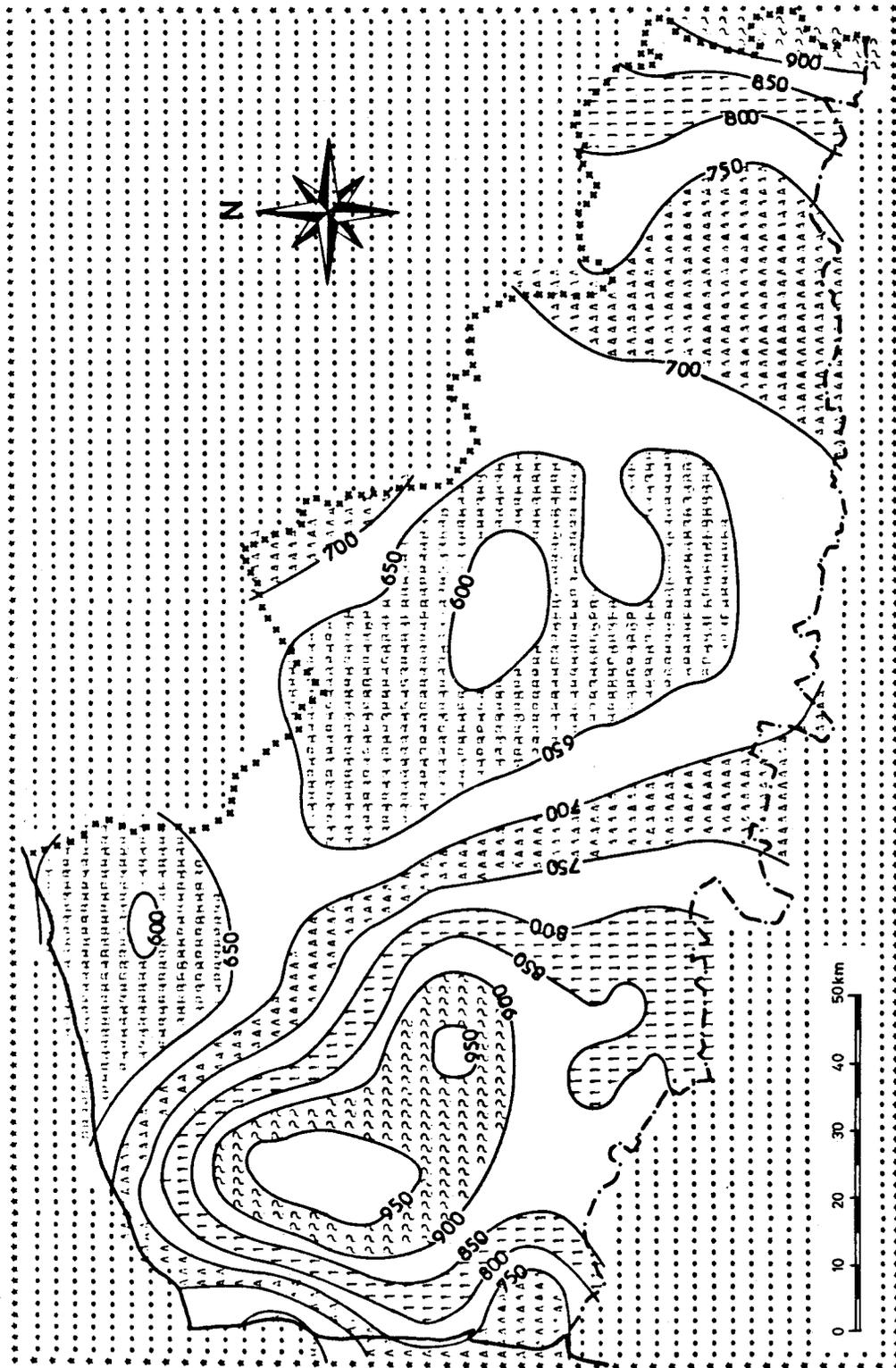


Figure 5 : Carte des isohyètes des précipitations moyennes annuelles sur 20 ans (mm). Stations de longue durée et de courte durée étendues.



Depuis l'origine du variogramme, la partie linéaire importante montre que la variable (pluie de la région) présente un caractère moyennement structuré et est continue en moyenne quadratique.

A partir du variogramme expérimental (figure 3_I), le meilleur ajustement théorique est obtenu pour le modèle sphérique (figure 3_{II}) ; dans ce cas, l'abscisse de l'intersection de la tangente à l'origine (figure 3_{III}) avec le palier valant 40 km, la portée est de 60 km. On en déduit les paramètres qui permettent d'écrire l'équation du variogramme ajusté caractérisant la structure de la variable régionale étudiée :

$$\begin{aligned} \gamma(h)_{\text{mm}^2} &= 17\ 000 \left[\frac{3}{2} \frac{|h|}{60} - \frac{1}{2} \frac{|h|}{60} \right]^3 && \text{pour } h < 60 \text{ km} \\ \gamma(h)_{\text{mm}^2} &= 17\ 000 && \text{pour } h > 60 \text{ km} \end{aligned}$$

Le début du palier (ou portée) marque l'apparition du comportement aléatoire, signifiant dans notre cas que les corrélations sont nulles ou du moins non significatives pour des points distants de plus de 60 km, valeur relativement élevée qui s'accorde cependant bien avec l'échelle des variations climatiques régionales.

222 - Krigeage des précipitations

L'objectif étant de définir en chaque maille du domaine étudié une valeur moyenne tout en utilisant les observations faites aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de ce domaine, la méthode d'estimation correspond à ce qui est désigné par "krigeage étendu régionalement".

L'exploitation des données pluviométriques correspondant aux seules stations de longue durée permet la réalisation d'une première carte krigée* (figure 4) en utilisant le principe du "voisinage glissant" (cf. annexe II).

* DELFINER P., DELHOMME J.P., et CHILES J.P. : Programme BLUEPACK - ENSMP.
CMM - CIG - 1976.

Exception faite du Haut-Boulonnais, la morphologie des courbes isohyètes majeures est déjà proche de celle tracée lors de synthèses régionales antérieures réalisées néanmoins sur une période plus courte [72, 18]. La carte fait d'abord apparaître une zone de précipitations relativement faibles (inférieures à 700 mm/an) s'étendant de la Flandre maritime au Cambrésis, et intéressant la région lilloise et le Bassin Minier. Les régions de précipitations abondantes se distinguent nettement à l'Ouest et à l'Est de cette zone : il s'agit d'une part du Boulonnais, du Haut-Artois, des pays de Montreuil et du Ternois, d'autre part de l'Avesnois, premier contrefort de l'Ardenne.

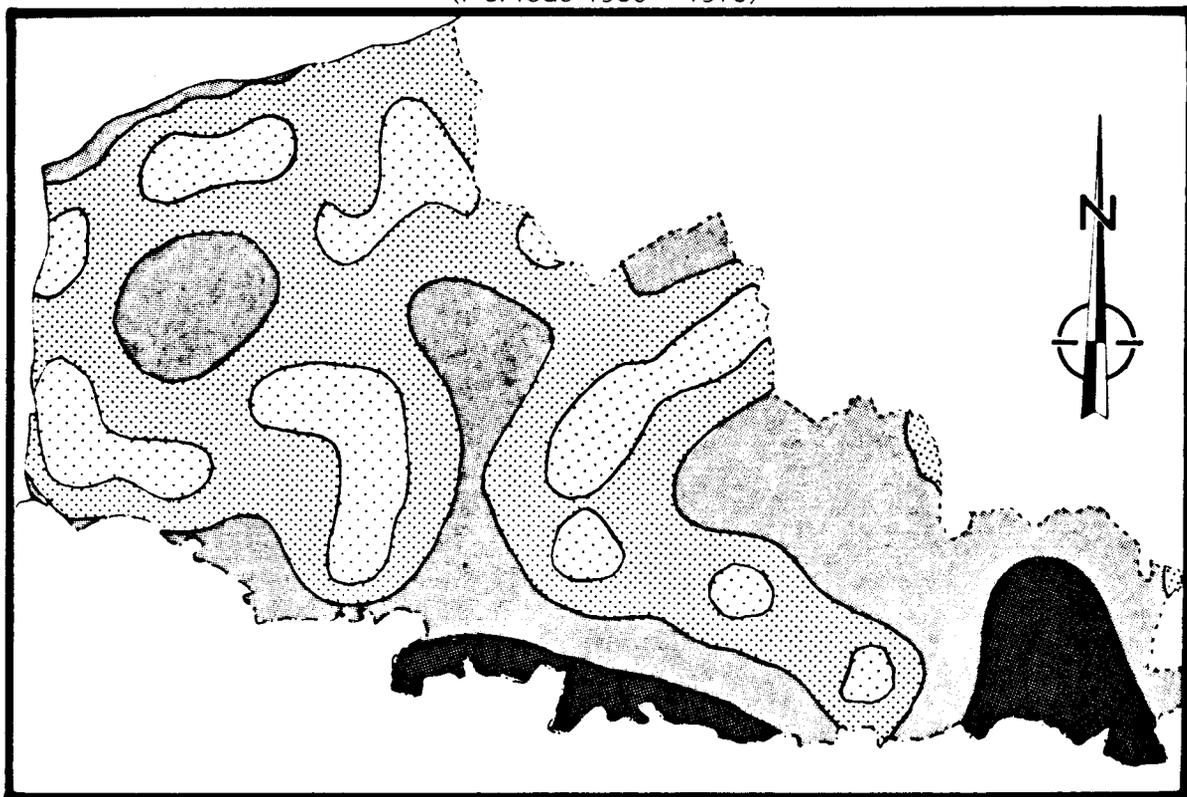
Une seconde carte (figure 5) de la pluviométrie moyenne a été élaborée en ajoutant les valeurs des stations de courte durée étendues à 20 ans ; une variance d'erreur a été attribuée à ces données en considérant que chaque valeur est connue avec une incertitude de plus ou moins 5%, compte tenu des tests cités précédemment (§ 21).

La comparaison des figures 4 et 5 met en évidence l'apport de l'extension des données puisque le tracé des isohyètes est précisé notamment dans l'Ouest du Pas-de-Calais et dans l'Avesnois. Par contre, la pluviométrie des Flandres et du Bassin Minier semble déjà bien connue en ne considérant que les valeurs des stations de longue durée.

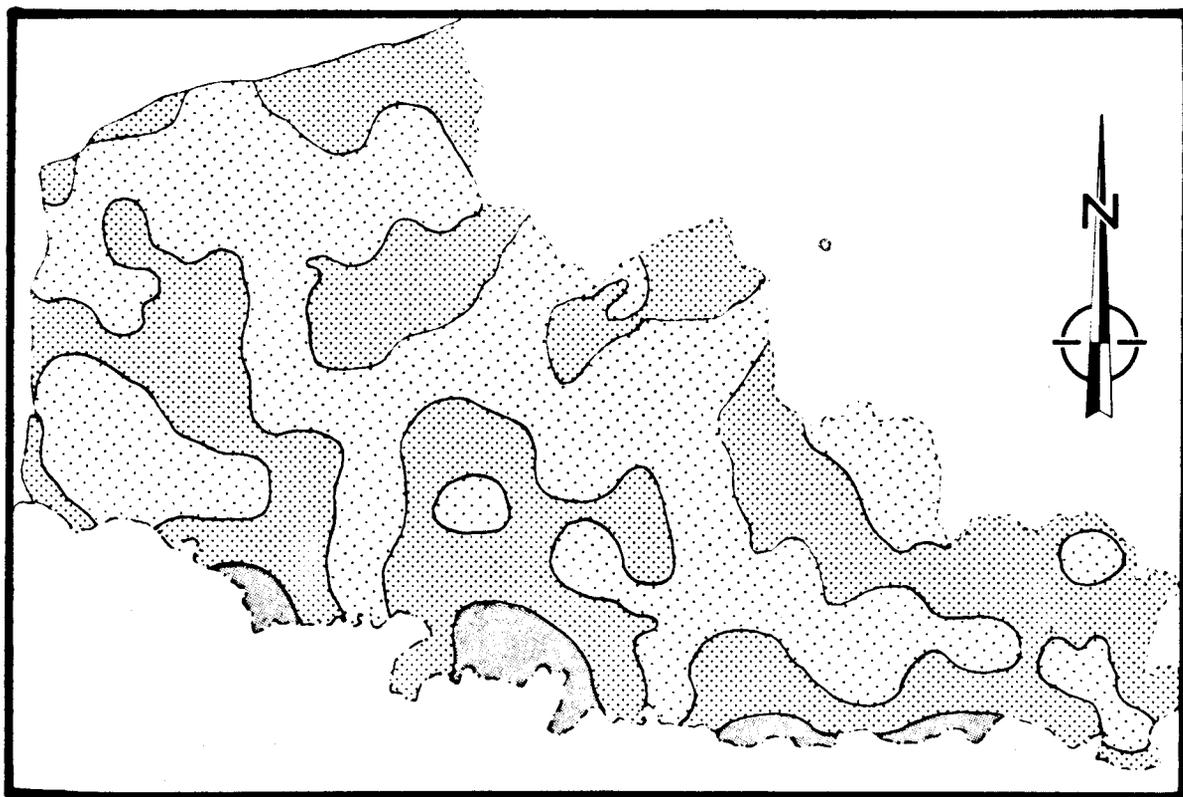
Ces cartes permettent également de constater l'effet de pondération réalisé par le krigeage. En effet, alors que les données expérimentales de Forges et de Bainghen auraient conduit à tracer manuellement des courbes isohyètes de 1000 mm respectivement dans l'Avesnois et le Haut-Boulonnais, le krigeage lui, ne détermine pas de valeur aussi élevée. Il faut y voir ici, telle que l'a déduite la reconnaissance structurale, une conséquence de la continuité réduite du phénomène analysé.

Respectivement pour chacun des échantillons précédents, le krigeage fournit la répartition des écarts-types d'estimation des précipitations. La carte présentée sur la figure 6A montre qu'avec un échantillon de 30 données, les écarts-types sont compris généralement entre 60 et 90 mm, pouvant excéder 100 mm dans l'Avesnois et dans le Sud de la région. Dans ce cas, on peut donc considérer que les précipitations sont connues avec une incertitude moyenne de 10 à 15%.

FIG. 6 ECARTS-TYPES DES PRECIPITATIONS MOYENNES INTERANNUELLES
(Période 1956 - 1975)



A : ECARTS-TYPES OBTENUS AVEC 30 STATIONS PLUVIOMETRIQUES



B : ECARTS-TYPES OBTENUS AVEC 66 STATIONS PLUVIOMETRIQUES



Avec un échantillon de 66 données (figure 6B), les écarts-types diminuent sensiblement puisqu'ils ne dépassent qu'exceptionnellement 75 mm. La majeure partie est comprise entre 30 et 70 mm, ce qui correspond à une incertitude moyenne de plus ou moins 5%. On voit donc qu'il aurait été regrettable de rejeter, du fait de leur manque de représentativité pour la **période** longue, les données obtenues à l'aide des stations de courte durée.

23 - Régime des pluies

Pour mettre en évidence la répartition saisonnière des pluies, il est traditionnel d'établir des courbes de hauteurs de pluie moyennes mensuelles [76]. Sans entrer dans le détail, il nous a paru cependant utile de présenter quelques exemples de variation du module pluviométrique intermensuel, élément de base pour la caractérisation des types climatiques.

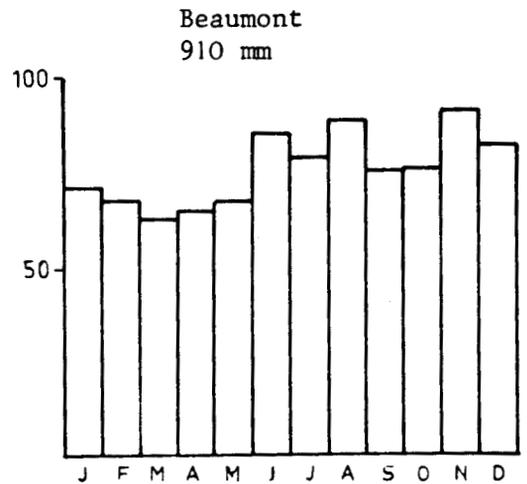
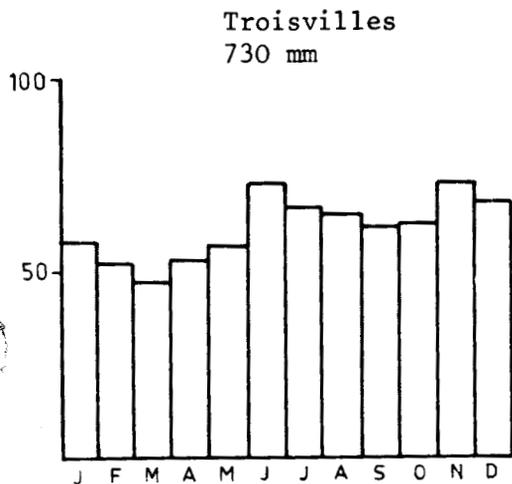
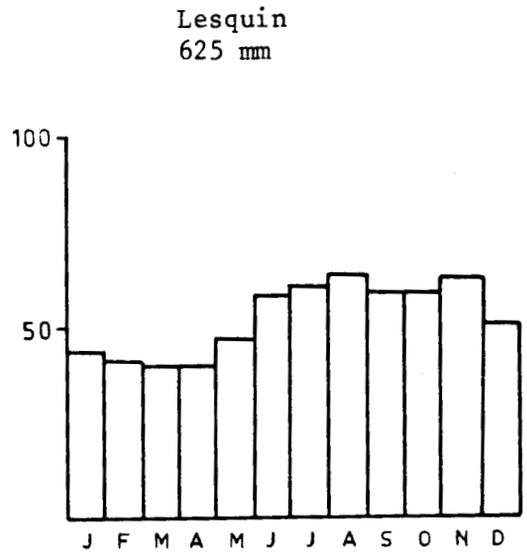
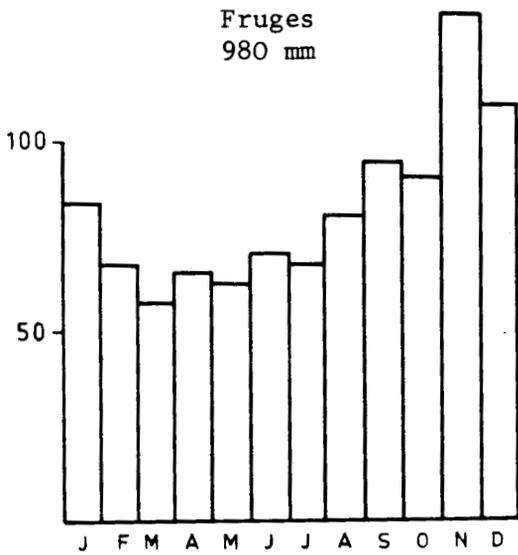
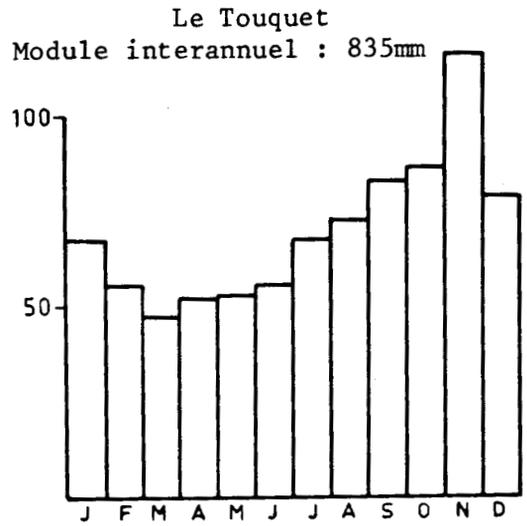
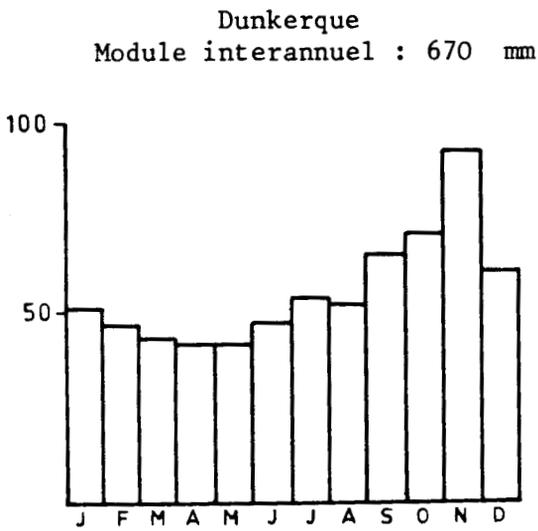
Cette variation en une station donnée, ou régime des pluies, s'exprime également par un coefficient pluviométrique (en %), qui est le rapport du module mensuel sur le module annuel.

L'analyse des graphiques de la figure 7 montre une évolution du régime des précipitations du littoral vers l'intérieur du continent. Le caractère océanique que révèlent les diagrammes de Dunkerque et du Touquet (maximum en automne et minimum au printemps) est altéré à Lesquin et à Troisvilles (Cambrésis) ; là, la répartition mensuelle des pluies est plus uniforme avec une augmentation des coefficients pluviométriques des mois d'été (tableau II).

TABLEAU 2 : Coefficients pluviométriques mensuels en pourcentage par rapport au module pluviométrique annuel

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
DUNKERQUE	7.6	7.0	6.4	6.3	6.2	7.0	8.2	7.9	9.8	10.6	13.9	9.1
LE TOUQUET	8.2	6.6	5.7	6.2	6.3	6.6	8.0	8.6	9.9	10.5	13.9	9.5
FRUGES	8.5	7.4	5.8	6.6	6.2	7.0	6.9	8.1	9.6	9.1	13.5	11.1
LESQUIN	7.0	6.5	6.4	6.3	7.6	9.3	9.8	10.0	9.4	9.4	10.1	8.2
TROISVILLES	7.8	7.2	6.4	7.3	7.8	10.1	9.2	8.8	8.5	8.6	10.3	8.0
BEAUMONT	7.7	7.3	6.9	7.2	7.4	9.4	8.7	9.8	8.2	8.4	10.0	9.0

Figure 7 : Graphiques des hauteurs de précipitations inter-mensuelles



Ceci prouve qu'à faible distance de la mer, le régime des pluies acquiert déjà des caractéristiques continentales ; on observe en effet à peu près la même répartition mensuelle à Beaumont, station située dans les Ardennes belges.

Cet aperçu sommaire montre que les variations saisonnières sont parfois importantes et qu'elles pourraient justifier une étude fine de la répartition spatiale sinon mois par mois du moins saison par saison. Si une telle approche n'entre pas dans le cadre des objectifs de ce travail, on peut néanmoins souligner, en regard des résultats obtenus, que le krigeage constituerait un outil bien adapté pour une telle étude.

24 - Conclusion sur la pluviométrie

Le traitement des données de 66 stations pluviométriques suivant un maillage régulier a permis de préciser la répartition des précipitations moyennées interannuelles sur 20 ans tout en chiffrant l'erreur sur les estimations faites.

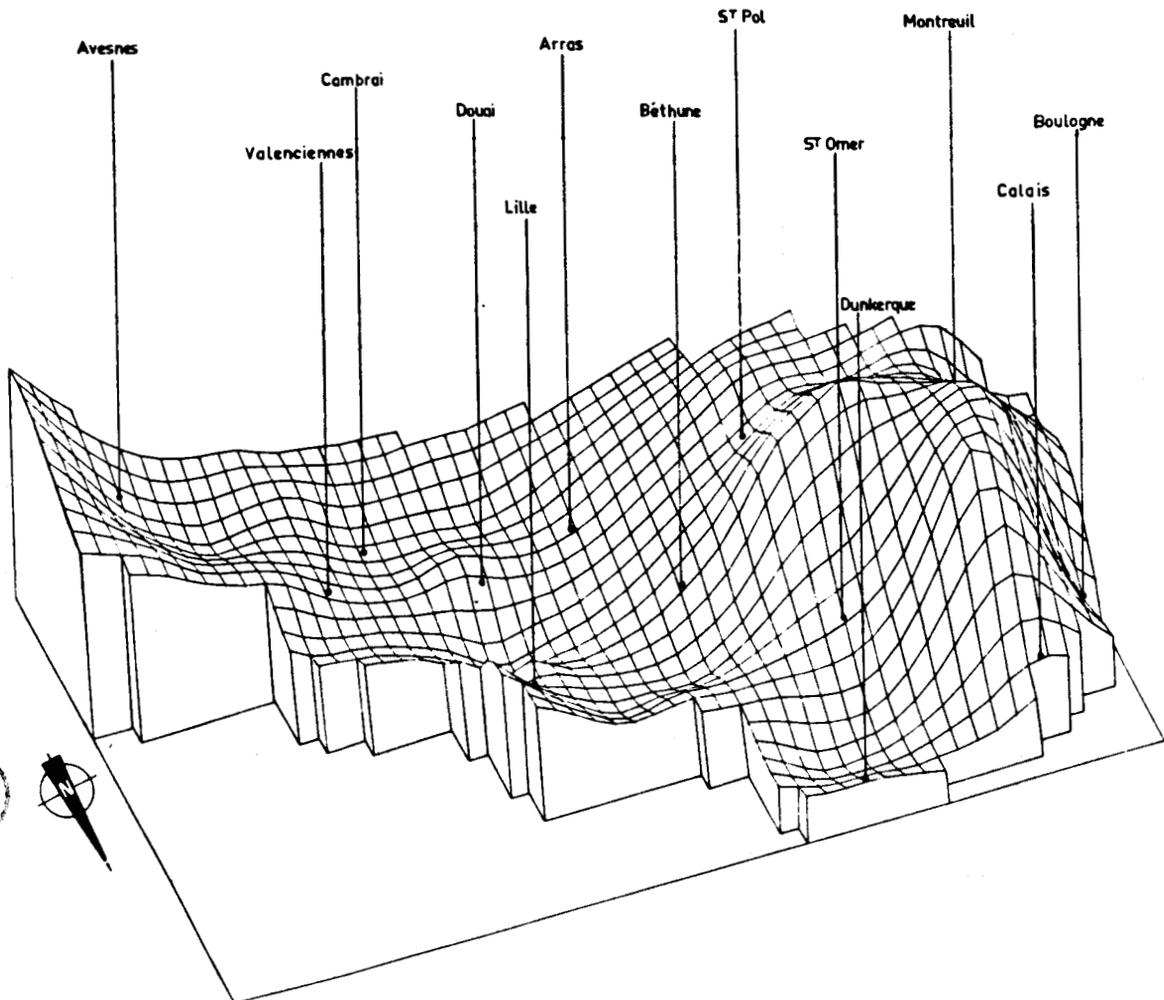
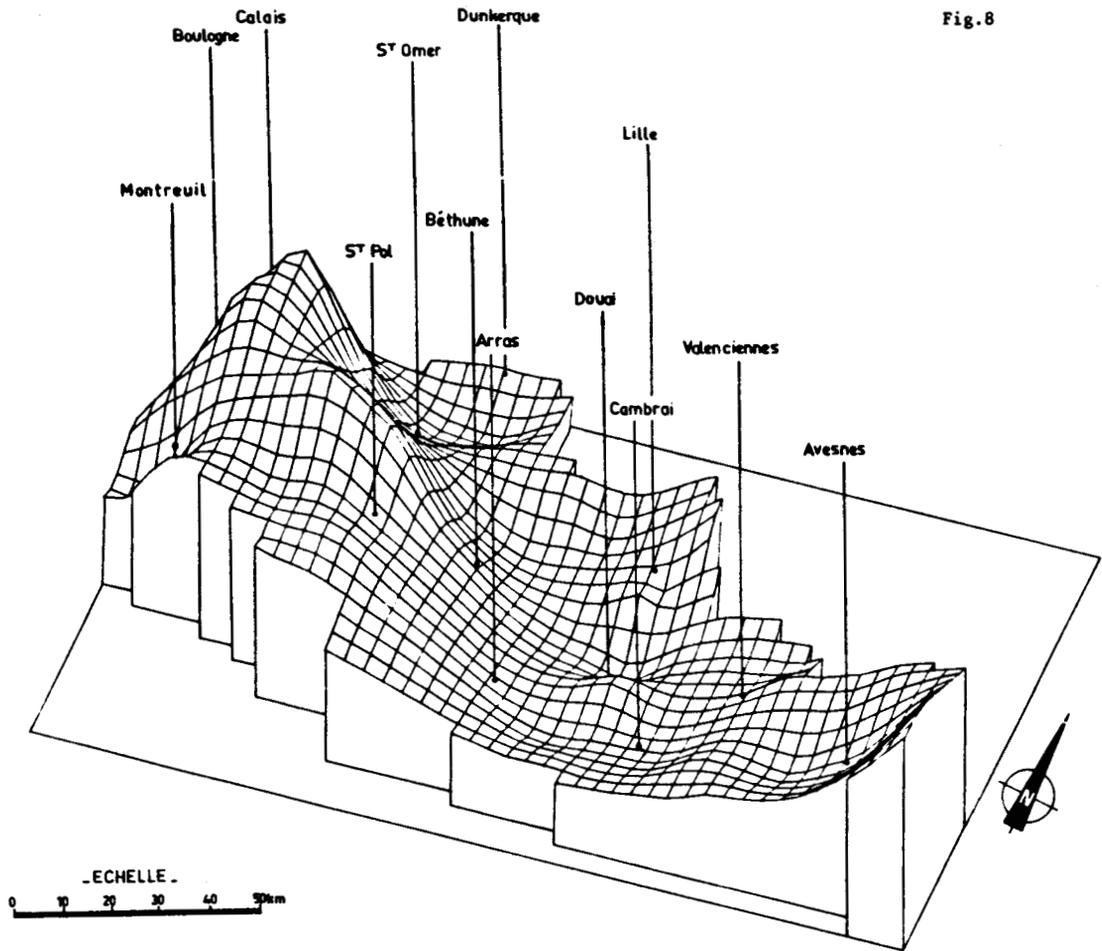
Le volume total calculé de cet apport brut atteint 10 milliards de mètres cubes par an pour les deux départements du Nord et du Pas-de-Calais ; ceci correspond à un module moyen interannuel de 800 mm, soit un flux moyen de 25 l/s. km².

Les blocs diagrammes* (figure 8) montrent clairement que la distribution spatiale des précipitations est assez hétérogène avec notamment deux dômes pluviométriques situés à l'Ouest et à l'Est de la région. Leur existence est due à la position relative des reliefs aux vents dominants humides de secteur ouest ; une telle configuration explique par ailleurs la faible pluviosité de la zone médiane dont l'altitude plus réduite permet une diminution de condensation des masses nuageuses qui ont franchi les collines de l'Artois.

* T.T. CAO : Programme CAO 3D et PERSPEC - Note B.R.G.M. DPAI/DI n° 90.

PRECIPITATIONS MOYENNES DANS LA REGION NORD - PAS DE CALAIS

Fig. 8



3 - REPARTITION DES EXCEDENTS MOYENS INTERANNUELS

31 - Introduction

A l'échelle du domaine étudié, l'établissement d'une carte de répartition des excédents moyens interannuels fait appel à trois stades de calcul. Dans un premier temps, il s'agit d'estimer l'excédent moyen aux points expérimentaux où les données sont suffisantes, et cela compte tenu du processus de calcul utilisé. La deuxième phase consiste à choisir une méthode d'interpolation qui permettra la détermination de la variable en dehors des points expérimentaux. Enfin, le calcul porte sur la détermination de cet excédent pour toutes les mailles d'une grille choisie.

Terme du bilan hydrique, l'excédent^{*} E est défini comme la somme du ruissellement et de l'infiltration ; pour une période donnée, il est égal à la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration ou déficit d'écoulement D

$$E = P - D$$

L'évapotranspiration, moteur du cycle de l'eau, est l'élément principal du bilan où l'excédent est le résidu passif. Aussi, la majeure partie des travaux sur le bilan hydrique tant en hydrologie, en agronomie qu'en hydrogéologie porte sur sa détermination.

Après un aperçu sur les termes du bilan hydrique, il a été repris ici (annexe III) les principales méthodes de détermination de l'évapotranspiration, en précisant notamment les paramètres nécessaires à son calcul à partir des formules proposées par différents auteurs.

Traitant d'un phénomène régional, il a fallu choisir en premier lieu une méthode d'estimation de l'excédent d'eau applicable au plus grand nombre de points expérimentaux où sont connues les précipitations. Compte tenu de cette contrainte, la méthode de TURC n'a pu être retenue puisqu'elle fait intervenir l'ensoleillement, donnée expérimentale rarement mesurée. Par conséquent, nous avons utilisé la méthode de THORNTHWAITTE pour calculer l'excédent mensuel aux stations.

* les termes "pluie nette", "pluie efficace" et "excédent" sont des synonymes.

Quoiqu'il en soit, ce choix forcé ne doit pas être considéré comme un recours à une solution approximative ; en effet, pour le pas de temps défini, il a été montré que sous les latitudes régionales, l'utilisation des méthodes de TURC, PENMAN et THORNTHWAITE donne des résultats tout à fait semblables [37, 14].

Les différents termes aboutissant à la détermination de l'excédent ont été calculés automatiquement à l'aide d'un programme⁺ fournissant par ailleurs les graphiques d'évolution des précipitations et excédents.

En lieu et place des stations pluviométriques définies précédemment, l'excédent est donc déterminé successivement à partir des éléments suivants :

- . données thermométriques,
- . calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP),
- . données pluviométriques,
- . calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR).

32 - Choix des stations thermométriques

Il existe 7 stations thermométriques ayant au moins 20 ans de mesures dans la région Nord Pas-de-Calais : Dunkerque, Boulogne, Le Touquet, Lesquin, Tilloy-les-Mofflaines (Arras), Cambrai-Epinoy et Saint Pol-sur-Ternoise (cf. figure 1).

La comparaison des moyennes intermensuelles (tableau 3) montre que la variabilité entre les différentes stations est très faible, mis à part les stations littorales subissant l'influence océanique qui se traduit par un adoucissement des températures hivernales.

⁺B. DELPORTE : Calcul automatique des excédents d'eau par la méthode de THORNTHWAITE - Programme BILAN - Rapport 78 SGN 470 NPA.

Mois Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
MAROILLES	2.4	2.9	5.5	8.3	12.0	14.9	16.6	16.5	14.4	10.3	5.5	2.7	9.3
EPINOY	2.8	3.3	5.9	8.7	12.4	15.3	17.0	16.9	14.9	10.7	5.9	3.2	9.7
LESQUIN	3.2	3.7	5.8	8.6	12.2	15.1	16.8	16.8	14.8	10.7	5.9	3.3	9.7
TILLOY	2.8	3.5	5.7	8.5	12.3	15.0	16.8	16.8	14.8	10.4	5.7	3.0	9.6
FREVENT	3.2	3.6	5.7	8.5	12.5	15.3	16.6	16.5	14.5	10.5	5.8	3.2	9.6
LE TOUQUET	4.3	4.5	6.3	8.6	12.0	14.8	16.7	16.8	15.2	11.7	7.2	4.6	10.2
BOULOGNE	4.5	4.5	6.2	8.2	11.7	14.3	16.1	16.6	15.3	12.1	7.5	4.9	10.1
DUNKERQUE	4.5	4.6	6.3	8.5	12.0	14.8	16.8	17.2	15.6	12.2	7.6	5.0	10.4

Tableau 3 : Températures moyennes mensuelles en °C
(période de 1956-1975).

La qualité des mesures de Saint Pol-sur-Ternoise étant défectueuse les dernières années, elles ont été remplacées à partir de 1961 par celles de Frévent dont le profil de température est quasiment identique. Il en est de même dans l'Avesnois où il n'existe pas de station couvrant toute la période considérée. La station de Maroilles a été mise en service en 1963 ; les températures mensuelles antérieures ont été extrapolées à partir de celles d'Epinoxy, une bonne corrélation existant entre les deux séries de mesure.

33 - Calcul de l'évapotranspiration potentielle aux stations

L'ETP a été calculée pour chacune des stations de longue durée en utilisant par défaut les données thermométriques de la station la plus proche.

Pour les stations thermo-pluviométriques, le tableau 4 donne les valeurs moyennes mensuelles et annuelles de l'ETP (période 56-75); il montre que, comme dans le cas des températures, la variabilité de l'ETP est faible d'une station à l'autre.

Mois Stations	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
MAROILLES	8	10	26	46	78	100	113	102	75	46	20	8	632
EPINOY	9	11	27	47	79	101	114	104	76	47	20	9	644
LESQUIN	9	12	27	46	78	100	113	103	76	46	20	10	640
TILLOY	8	11	27	46	79	100	113	103	77	45	20	9	638
FREVENT	9	11	27	46	80	102	112	101	75	46	20	10	639
LE TOUQUET	13	14	28	45	75	96	111	109	77	50	24	14	649
BOULOGNE	14	14	28	43	73	93	107	101	78	52	26	15	644
DUNKERQUE	13	14	28	43	74	95	111	104	79	52	25	15	653

Tableau 4 : Valeurs moyennes mensuelles et annuelles de l'ETP calculées sur la période 1956-1975 (exprimées en mm).

Pour Dunkerque et Lille, ces valeurs sont légèrement inférieures mais très proches de celles établies par O. DELAROZIERE-BOUILLIN pour la période 1958-1967 [37] ; cet auteur avait obtenu respectivement des ETP moyennes de 654 et 648 mm. A titre de comparaison, la formule de TURC donnait pour les mêmes stations 590 et 582 mm.

34 - Evapotranspiration réelle et excédent d'eau aux stations

Les différents éléments du bilan hydrique annuel moyen fourni par le programme de calcul pour les stations de longue durée sont reportés au tableau 5.

Quelle que soit la station considérée, le rapport ETR/ETP est relativement constant avec en moyenne 80 à 90% de l'ETP satisfaite. La valeur des ETP locales étant par ailleurs assez stable, il en découle une variation faible de celle des ETR. Ce phénomène se répercute sur l'excédent d'eau par une amplification des écarts relatifs entre les valeurs de l'excédent calculé pour 2 stations et les hauteurs de précipitations correspondantes. Ainsi, pour les moyennes inter-annuelles le rapport des valeurs extrêmes est de 1.7 pour les précipitations, 1.1 pour les ETR et 5.9 pour les excédents.

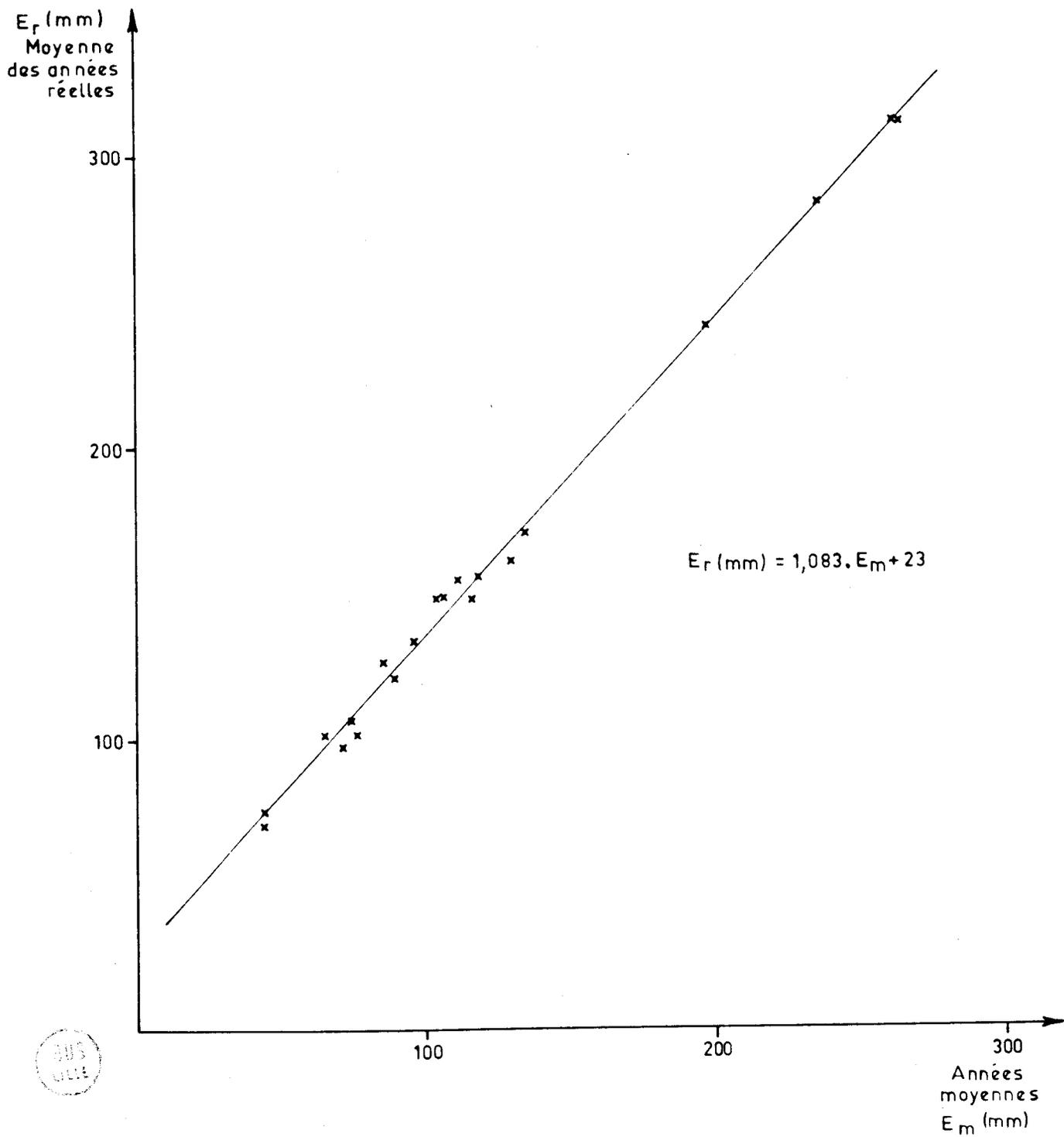
Autrement dit, plus la hauteur précipitée est importante, plus grand est le pourcentage d'eau excédentaire. Par exemple, à la station de Bauvin située dans l'Ouest du Bassin Minier, il n'y a que 12% d'une lame précipitée de 590 mm qui participe à l'alimentation de la nappe phréatique et au ruissellement ; par contre à Fruges (Haut-Artois) cette fraction passe à 41% pour une hauteur annuelle moyenne de 980 mm.

STATION	H	ETP	ETR	EXCED.	ETR/ETP	EXCED./H
DUNKERQUE	665	653	518	147	79	22
AUDRUICQ	682	653	534	148	82	22
BOULOGNE	649	644	516	133	80	20
LE PORTEL	614	644	488	126	76	21
LE TOUQUET	840	649	572	268	88	32
RANG DU F.	679	649	525	154	81	23
CAMPAGNE LES H.	879	639	569	310	89	35
FREVENT	856	639	576	280	90	33
SAINT POL	802	639	562	240	88	30
FIEFS	887	639	577	310	90	35
FRUGES	980	639	570	410	89	41
St OMER	680	639	520	160	81	24
CASSEL	668	640	520	148	81	22
ESQUELBECQ	580	653	496	84	76	14
BAILLEUL	682	640	527	155	82	23
LESQUIN	617	640	520	97	81	16
BAUVIN	593	640	523	70	82	12
WINGLES	590	640	516	75	81	13
LENS	610	638	509	101	80	17
LIEVIN	617	638	512	105	80	17
TILLOY LES M.	647	638	527	120	83	19
EPINOY	640	644	538	102	84	16
TROISVILLES	729	644	559	170	87	23

Tableau 5 : Eléments du bilan hydrique annuel, période 1956-1975.
Valeurs exprimées en mm, les rapports en %.



Figure 9 : Corrélation entre les excédents moyens calculés sur 20 années réelles et ceux calculés à partir des années moyennes.



Pour des raisons de gain de temps-calcul, l'excédent d'eau moyen mensuel et annuel aux stations de courte durée a été calculé à partir des moyennes intermensuelles de pluviométrie et de température. Pour cela une corrélation a été établie pour les stations de longue durée entre ces deux méthodes de calcul (J.P. KLESZCZ, non publié).

A chacune de ces stations, l'excédent d'eau a été calculé de deux façons :

. à partir des excédents E_i calculés pour chaque année :

$$E_r = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{i=20} E_i$$

. à partir des températures (T_m) et des précipitations (P_m) moyennes mensuelles calculées sur les 20 ans : $E_m = f(T_m, P_m)$,

Le résultat de l'excédent à partir des moyennes intermensuelles des températures et précipitations est systématiquement sous-estimé, et le graphe (figure 9) montre qu'il existe une bonne corrélation entre les deux méthodes d'estimation ; l'équation de la droite de régression qui peut être établie est :

$$E_r = 1,083 \cdot E_m + 23$$

La différence constatée entre les résultats des deux méthodes peut s'expliquer par le fait que lorsque nous considérons les moyennes intermensuelles, nous nous plaçons dans le cas théorique où il n'y a pas d'excédent pendant les mois d'été. En fait, si l'on observe la chronique des excédents sur 20 années réelles, il existe certains épisodes pluvieux suffisamment importants pour qu'ils produisent un excédent qui est comptabilisé dans la valeur moyenne.

En regard de l'erreur apportée par l'extension des données pluviométriques (cf. § 21) celle due à la régression est minime. Le traitement cartographique sera donc réalisé à partir des données d'une part des stations de longue durée introduites avec une variance nulle, et d'autre part des stations de courte durée corrigées par la droite de régression et pour lesquelles a été imposée une variance identique à celle de la pluviométrie puisque l'erreur commise sur le calcul de l'ETP peut être négligée étant donné son uniformité (cf. tableau 5).

L'ensemble des valeurs d'excédent utilisées est reporté en vis-à-vis des modules pluviométriques correspondants à l'annexe I.

35 - Cartographie de l'excédent d'eau annuel moyen

La cartographie a été faite de façon identique à celle de la pluviométrie, c'est-à-dire par krigeage (cf. § 22 et annexe II) des valeurs ponctuelles calculées aux 66 stations expérimentales, et suivant la même discrétisation de l'espace (mailles de 4 km de côté).

A partir de la grille calculée a pu être dessinée une carte des excédents annuels moyens pour la période 1956-1975 (figure/OA). Comme cela a été vu plus haut (tableau 5) les faibles variations spatiales de l'ETR donnent à la pluviométrie un poids important, ce qui se traduit ici par une morphologie de la carte des excédents similaire à celle des précipitations (cf. figure 5).

On observe ainsi des fortes valeurs de pluie nette dans l'Avesnois et la moitié Ouest du Pas-de-Calais ($E > 200$ mm) ; par contre, elle n'excède pas 150 mm en Flandres, dans le Bassin Minier et la région lilloise ; elle est même inférieure à 100 mm dans le triangle Lens-La Bassée-Douai.

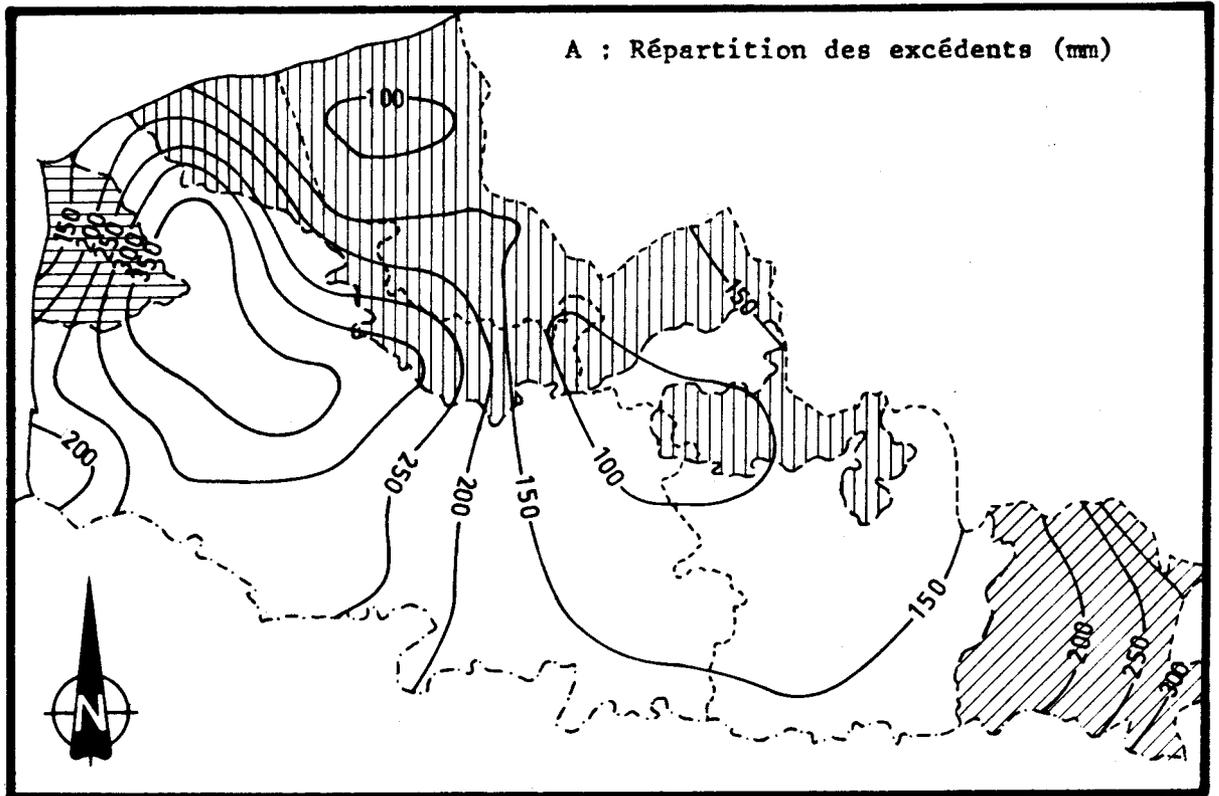
Cette carte montre également que le gradient de variation de l'excédent est très variable d'un secteur à un autre au travers de la région. Aussi peut-on être tenté lors d'une étude subrégionale de ne pas admettre, comme cela est généralement fait, une répartition uniforme des apports aux nappes ; nous verrons ainsi en deuxième partie une application de la variation de l'alimentation dans le cadre de l'établissement d'un modèle qui, il est vrai, se situe dans une zone à fort gradient.

Les valeurs de l'écart-type d'estimation (figure/OB) sont en général inférieures à 50 mm et légèrement plus faibles que celles de la pluviométrie ; cependant, l'incertitude relative varie en moyenne de 10% pour les secteurs à fort excédent jusque 40% pour certaines zones à faibles valeurs.

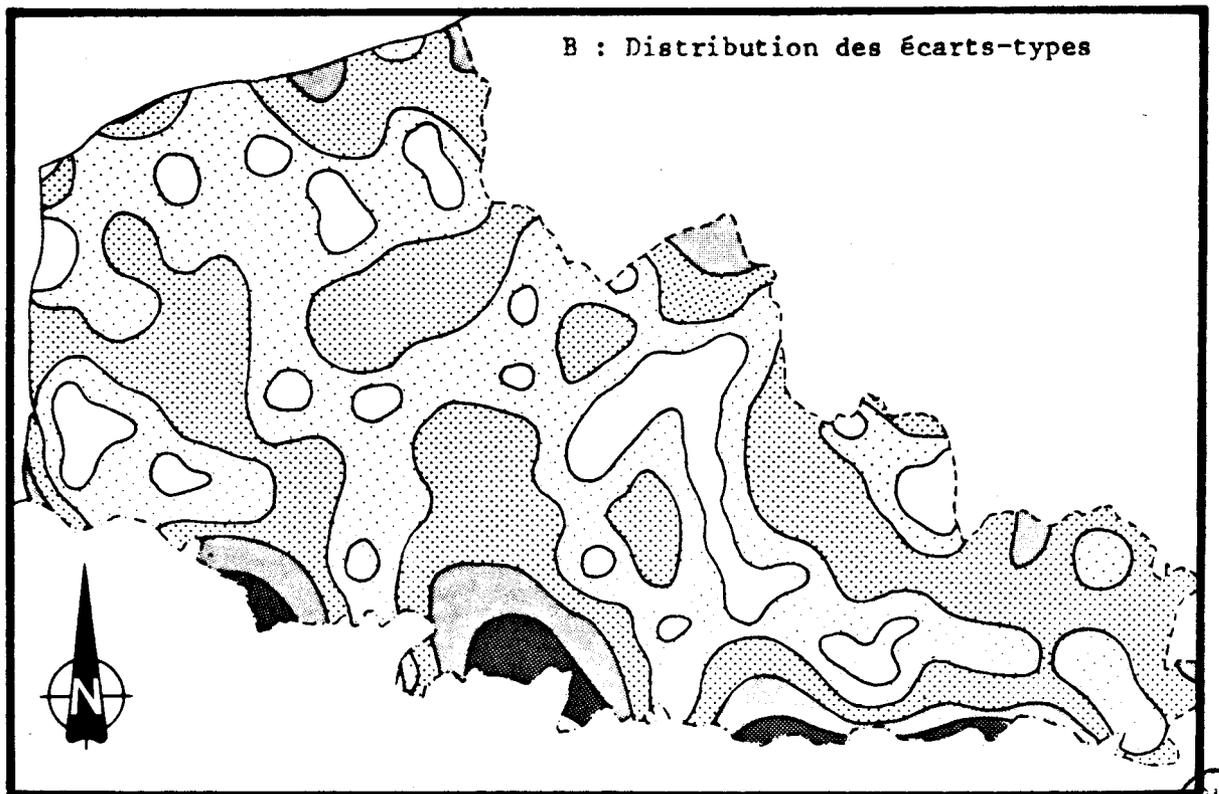
36 - Approche sur une répartition de l'infiltration efficace à l'échelle régionale

En dehors de mesures directes qui font appel à des processus complexes, la part du ruissellement ne peut qu'être évaluée qu'approximativement, d'autant plus qu'elle dépend de nombreux facteurs. Les plus importants concernent la perméabilité et les caractéristiques de surface du sol (pente, modelé et couverture végétale). Par ailleurs, la nature et la fréquence des précipitations

Figure 10: Excédents annuels moyens



- | | | | |
|---|--|---|--|
|  | Domaine des calcaires jurassique et primaire du Boulonnais |  | Domaine des formations primaires de l'Avesnois |
|  | Domaine à couverture argileuse tertiaire |  | Domaine de la craie |



- | | | | | | | | | | |
|--|------------|---|------------|---|------------|---|------------|---|------------|
|  | 25 à 30 mm |  | 30 à 40 mm |  | 40 à 50 mm |  | 50 à 60 mm |  | 60 à 70 mm |
|--|------------|---|------------|---|------------|---|------------|---|------------|

BUS
LILLE

peuvent avoir un rôle non négligeable. Ainsi, par exemple, les précipitations sous forme de neige correspondent à une infiltration efficace importante due non seulement à une très faible évapotranspiration, mais aussi, à l'absence de ruissellement ; a contrario, les terrains soumis à une averse verront un pourcentage d'eau ruisselée très important.

En ne tenant compte que des paramètres liés au sol, on peut néanmoins approcher cette quantification du ruissellement pour quelques cas types représentés dans la région étudiée :

. Pour les sols argileux, la quasi totalité de l'excédent se retrouve sous forme de ruissellement de surface qui alimente le réseau hydrographique ; c'est le cas des affleurements argileux des Flandres.

. Dans des régions où la craie est affleurante ou sous une couverture de terrains limono-sableux perméables, la fraction d'infiltration efficace est prépondérante. On y affecte le plus souvent une valeur égale à la totalité de l'excédent. BESBES et DE MARSILY [16] ont calculé que pour le bassin de la Haute Lys, le ruissellement ne représentait jamais plus de 2,5% de l'excédent.

Enfin, une grande incertitude préside à la détermination du ruissellement dans les formations primaires où l'état d'altération et de fissuration importe plus encore que la nature lithologique elle-même. L'étude du comportement hydraulique des rivières de l'Avesnois indique un taux de ruissellement de 60 à 70% de l'excédent pour les formations schisteuses [42]. Pour les calcaires une valeur de 30% de pluie efficace ruisselée peut être admise.

A partir de ces éléments et de la répartition des zones d'alimentation des principales nappes, nous avons calculé les apports moyens annuels aux nappes dus à l'infiltration efficace. Cependant, étant donné l'incertitude qui demeure sur le ruissellement et qui s'ajoute aux précédentes, nous ne ferons que dégager ici les grands traits de la répartition des apports issus des eaux météoriques.

Par similitude avec les études hydrogéologiques régionales nous exprimerons les apports non en hauteur d'eau, mais en flux, c'est-à-dire en litre par seconde par kilomètre carré (Q_e (l/s.km²) = H_e (mm) X $3,17.10^{-2}$) :

- . sur l'ensemble du recouvrement tertiaire, l'apport est nul,
- . pour le Bassin Minier, le Valenciennois et le Cambrésis, l'apport est en moyenne de 3 à 5 l/s.km²,

- . excepté la Flandre maritime, le flux côtier est inférieur à 4 l/s.km²,
- . les pays de Montreuil, du Bas-Boulonnais, du Ternois, de l'Audomarois et de l'Avesnois voient une infiltration efficace de 5 à 9 l/s.km²,
- . enfin, le Haut-Boulonnais et le Haut-Artois se distinguent nettement avec plus de 10 l/s.km².

Dans ce contexte, un déséquilibre important apparaît entre les départements du Nord et du Pas-de-Calais, ce dernier ayant une alimentation des nappes correspondant à plus des 4/5 du total infiltré.

4 - CONCLUSIONS

Le traitement des données climatologiques a permis de préciser la répartition des différents paramètres qui régissent l'alimentation des nappes en eaux météoriques.

Ces résultats représentent cependant une estimation de moyennes annuelles, et, dans ces conditions, ne peuvent être utilisés directement pour une étude que dans la mesure où l'année alors considérée présente les mêmes caractéristiques que ces moyennes. Pour cela il est possible de comparer dans un nombre limité de cas les bilans de l'année étudiée à ceux correspondant à la moyenne interannuelle. Si un écart important apparaît, on peut alors affecter un coefficient de proportionnalité pour reconstituer la répartition globale recherchée.

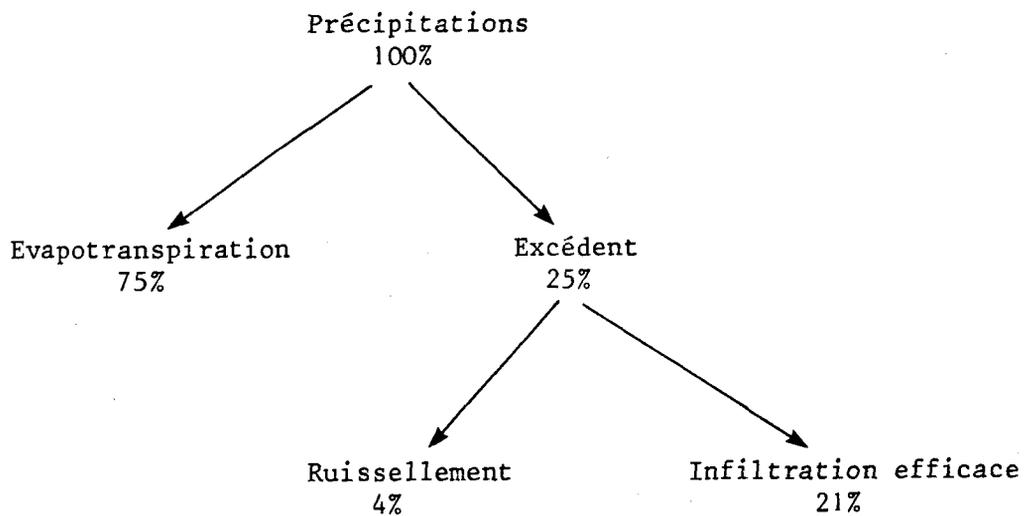
Enfin, les diverses valeurs obtenues permettent d'établir un bilan régional moyen pour chacun des paramètres étudiés (tableau 6).

Celui-là a été calculé par intégration et moyennation des valeurs obtenues en chacune des 876 mailles de la grille de travail. La valeur de l'infiltration efficace moyenne est déduite de la part ruissellée calculée en tenant compte du coefficient de ruissellement appliqué à chacun des grands types d'affleurements (cf. § 34).

	Hauteur d'eau (mm)	Flux moyen (l/s.km ²)	Volume annuel (10 ⁶ m ³ /an)
Précipitations brutes	789	25	11,050
Evapotranspiration réelle	595	18,85	8.330
Excédent	194	6,15	2.720
Ruissellement superficiel	31	1	440
Infiltration efficace	163	5,15	2.280

TABLEAU 6 : Bilan régional moyen sur 20 ans.

Pour l'ensemble de la région Nord Pas-de-Calais, le volume précipité se répartit de la manière suivante :



CHAPITRE II

REPARTITION ET EVOLUTION DES PRELEVEMENTS

1 - INTRODUCTION

Munie d'une infrastructure industrielle et urbaine importante, la région Nord demeure l'une des premières de France quant à la demande en eau des secteurs, tant industriels que collectifs. Héritage d'une activité centrée sur le bassin minier et la métropole lilloise, la répartition hétérogène des prélèvements croissants a conduit peu à peu à considérer la ressource en eau comme un problème d'autant plus crucial qu'une baisse de qualité est intervenue dans les secteurs mêmes où la demande est forte et où les rejets sont importants.

D'emblée, il faut souligner que la période récente qui fait l'objet de la présente analyse se place dans un cadre particulier du fait de la coïncidence de deux phénomènes d'importance :

- . un contexte juridique strict qui découle d'une croissance passée,
- . une situation économique régionale difficile due, notamment, à la récession des houillères et du secteur textile.

Si ces circonstances compliquent l'interprétation des observations, elles ont néanmoins permis de bénéficier d'une meilleure connaissance des données de prélèvements que par le passé.

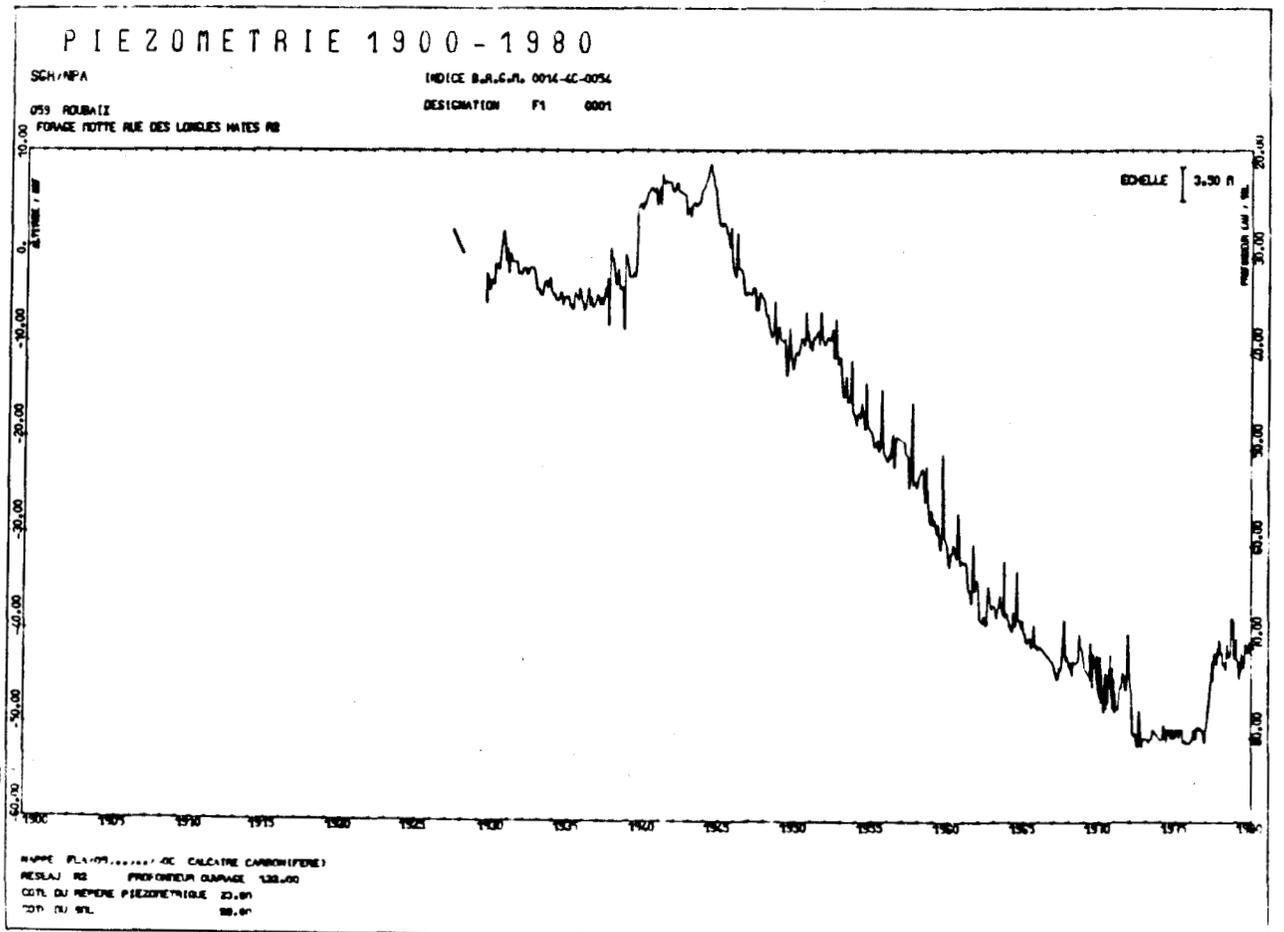
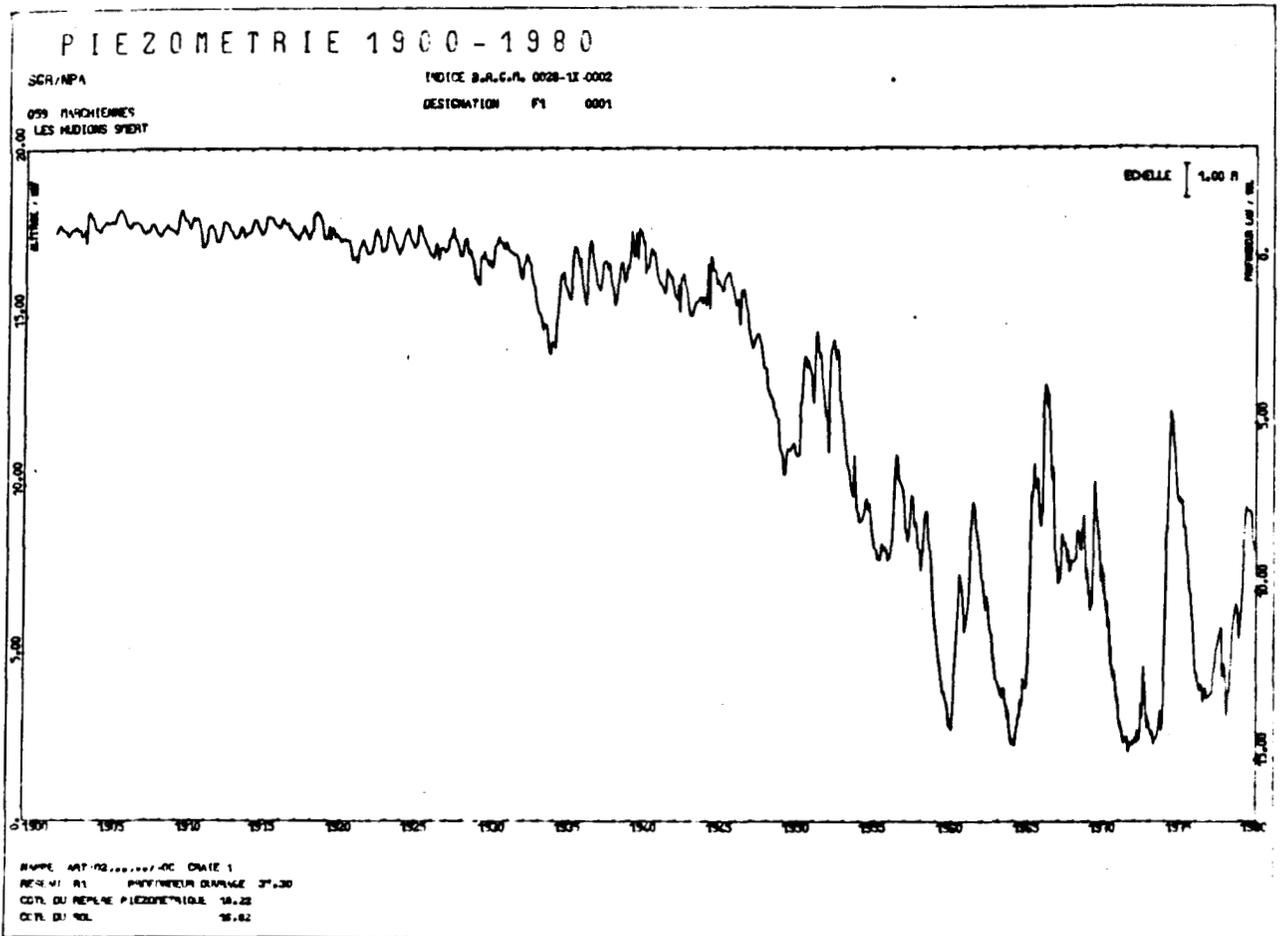
11 - Une nouvelle base de données

Dès 1939, des difficultés et réclamations avaient conduit la Préfecture du Nord à consulter le Service des Mines sur les problèmes de l'approvisionnement en eau. Du Comité d'Etudes départemental alors créé, émanait en 1946 un projet de décret sur la protection des eaux souterraines qui aurait été pris en application de l'important décret-loi du 8 août 1935. Il fallut cependant douze années pour que se concrétise ce projet, première réaction devant le constat d'une exploitation intensive des eaux souterraines (figure 11).

En 1956 était mis en place le "Service d'Inventaire des Ressources Hydrauliques du Nord Pas-de-Calais géré par le B.R.G.G.M.⁺ et qui devait se développer pour devenir, en 1962, le Service géologique régional Nord Pas-de-Calais.

⁺ B.R.G.G.M. : Bureau de Recherches géologiques, géophysiques et minières.

Fig. 11 : Evolutions piézométriques de longue durée dans les nappes de la craie et du Calcaire carbonifère.



BUS
LILLE

La création de ce Service permit de rassembler les informations nécessaires sur l'état des ressources en eau de la région, situation qui justifia l'application d'une réglementation sur l'exploitation de ces ressources.

C'est ainsi que le décret du 3 octobre 1958 étend aux Départements du Nord et du Pas-de-Calais les dispositions du décret-loi de 1935. De ce fait, est soumis à autorisation préalable tout puits ou forage :

- . de plus de 80 mètres de profondeur,
- . de plus de 10 mètres de profondeur si le débit dépasse 250 m³/jour.

Cette profondeur est réduite de 5 mètres pour la zone dite des Dunes, comprise entre le littoral et la mer du Nord d'une part, le canal de la Haute-Colme et la Basse-Colme d'autre part.

L'accroissement des besoins et les problèmes de pollution des eaux aboutissaient, par la loi du 16 décembre 1964 à modifier une nouvelle fois le contexte juridique, administratif et économique par la mise en place des Organismes de bassin.

Créées en 1968, les Agences Financières de Bassin agissent en tant qu'éléments exécutifs des Comités de Bassin en adaptant les redevances dont les objectifs principaux ont été successivement de freiner les prélèvements là où les nappes sont très sollicitées, puis, d'encourager le recours aux eaux souterraines partout où cela peut se faire sans risque [21]. Chaque Agence a défini ses priorités dans un esprit d'aménagement régional précisé en particulier par la publication de leur "livre blanc" [2].

Dans ce cadre, la région Nord Pas-de-Calais correspond à une partie (la circonscription Nord) de l'Agence Financière de Bassin Artois-Picardie qui a l'originalité de ne posséder aucun grand fleuve pour drainer son territoire. N'est-elle pas en effet la seule agence française à ne pas comporter un nom de cours d'eau dans sa dénomination ! Originale est également la densité de sa population très irrégulièrement répartie entre les zones à activité purement industrielle et celles à vocation agricole [1]

Notre propos n'est pas de présenter une perspective socio-économique sur la demande en eau à venir, ce serait une démarche qui pourrait être d'autant plus hasardeuse qu'une distorsion certaine apparaît maintenant entre la réalité des prélèvements de ces dernières années, et leur évaluation d'il y a dix ans.

Le problème est ici abordé suivant une méthode que l'on peut qualifier de statistique par le traitement de données acquises dont la plus grande homogénéité a été recherchée.

En fait, ce traitement s'est avéré intéressant grâce à la création de l'Agence de Bassin Artois-Picardie: en effet, la généralisation des points de comptage (redevance oblige) a permis de faire un progrès considérable dans la connaissance des prélèvements [21,20], progrès par rapport aux époques de l'"Inventaire" puis de l'Evaluation des Ressources Hydrauliques", mais aussi par la périodicité des données recueillies (inventaire annuel).

12 - Cadre de la synthèse.

Avant tout, il est nécessaire de préciser dans quel cadre sémantique, spatial et temporel se situent les prélèvements étudiés.

121 - La notion de prélèvement

On désigne sous le terme de prélèvement, les volumes soustraits momentanément à la ressource. Cette notion s'oppose radicalement à celle de consommation nette qui désigne les volumes soustraits quasi définitivement à la ressource, et qui s'exprime par la différence entre les volumes prélevés et les volumes restitués [20].

De plus, l'eau prélevée est la plupart du temps l'objet de plusieurs utilisations. Un mètre cube d'eau peut ainsi passer du foyer domestique à l'usine, puis servir à la navigation avant d'être repris par une centrale thermique [81].

Suivant les usages de l'eau, on admet les taux de consommation et les coefficients de réutilisation suivants [21, 20] :

	Taux de consommation	Coef. de réutilisation
Eau domestique	20 % (80% rejoignant le milieu naturel)	5 (1 m3 peut servir 5 fois)
Eau industrielle	7 à 8 % en général (1% pour les centrales)	14
Eau agricole	40 à 70 %	1,4

122 - Les données utilisées

Depuis la création de l'Agence de Bassin, il convient de distinguer deux périodes : avant 1972, les prélèvements étaient comptabilisés par établissement préleveur, et, plus exactement, répertoriés à leur adresse administrative ; ainsi, les prélèvements de la S.L.E.E.* dans l'arrondissement de St-Omer étaient comptés dans celui de Dunkerque. Depuis 1972, le regroupement par lieu de prélèvement permet de disposer de données cohérentes et homogènes que nous utiliserons donc jusqu'aux plus récentes disponibles, soit celles de 1979.

On pourra distinguer annuellement les prélèvements suivant différentes combinaisons des paramètres suivants :

<i>Secteur géographique</i>	<i>Type de ressource</i>	<i>Type d'utilisation</i>
. Région	. Eau souterraine (ESO)	. Collective (équivalent à AEP * *)
. Département	. Eau de surface (ESU)	. Industrielle (équivalent à AEI * *)
. Arrondissement		

Remarquons que l'irrigation étant négligeable dans la région, il n'y a pas distinction d'un secteur agricole parmi les utilisateurs.

Enfin, pour 1979, un traitement informatique permet de visualiser la répartition et l'importance des prélèvements par point de comptage ou champ captant.

2 - ANALYSE GLOBALE ET EVOLUTION REGIONALE21 - Une région à part.

Les prélèvements annuels par type de ressource et d'utilisation sont reportés pour la région et ses deux départements au tableau 7.

* S.L.E.E. : Société lyonnaise des Eaux et de l'Eclairage
 * * A.E.P. : Alimentation en eau potable des collectivités
 * * A.E.I. : Alimentation en eau industrielle

(en millions de m³/an)



REGION	1972			1973			1974			1975			
	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	
NORD	E.S.O.	132.844	101.931	234.776	133.137	100.196	233.332	127.033	89.871	216.903	131.658	89.203	220.861
	E.S.U.	268	137.642	137.910	498	126.350	126.848	434	132.456	132.890	1.400	116.620	118.020
	TOTAL	133.112	238.573	372.686	133.635	226.546	360.180	127.467	222.327	349.794	133.058	205.823	338.881
PAS	E.S.O.	71.819	131.496	203.315	75.059	129.549	204.608	77.864	124.086	201.949	83.224	111.336	194.560
	E.S.U.	1.743	51.504	53.247	5.445	52.801	58.246	4.561	50.470	55.031	3.411	41.601	45.012
	TOTAL	73.562	183.000	256.562	80.504	182.350	262.854	82.425	174.556	256.981	86.635	152.937	239.572
CALAIS	E.S.O.	204.664	233.427	438.091	208.195	229.745	437.940	204.897	213.956	418.853	214.882	200.549	415.321
	E.S.U.	2.011	189.146	191.157	5.943	179.151	185.094	4.995	182.926	187.921	4.811	158.221	163.032
	TOTAL	206.675	422.573	629.248	214.138	408.896	623.034	209.892	396.882	606.774	219.693	358.770	578.353
REGION	E.S.O.	204.664	233.427	438.091	208.195	229.745	437.940	204.897	213.956	418.853	214.882	200.549	415.321
	E.S.U.	2.011	189.146	191.157	5.943	179.151	185.094	4.995	182.926	187.921	4.811	158.221	163.032
	TOTAL	206.675	422.573	629.248	214.138	408.896	623.034	209.892	396.882	606.774	219.693	358.770	578.353

TABEAU 7

REGION	1976			1977			1978			1979			
	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	A.E.P.	A.E.I.	TOTAL	
NORD	E.S.O.	143.816	87.145	230.962	138.339	72.272	210.610	135.342	72.279	207.621	137.107	74.885	211.992
	E.S.U.	1.183	105.499	106.682	4.919	85.258	90.177	5.418	73.708	79.124	7.592	75.041	82.633
	TOTAL	144.999	192.644	337.643	143.258	157.530	300.787	140.760	145.987	286.745	144.699	150.770	295.669
PAS	E.S.O.	91.645	110.638	202.282	88.248	106.325	194.574	91.943	101.378	193.321	96.982	105.910	202.892
	E.S.U.	4.375	44.527	48.902	3.972	43.535	47.507	3.289	45.581	48.870	3.785	47.085	50.870
	TOTAL	96.020	155.165	251.185	92.220	149.860	242.081	95.232	146.959	242.191	100.767	152.995	253.762
CALAIS	E.S.O.	235.261	197.783	433.044	226.587	178.597	405.184	227.185	173.656	400.841	234.089	180.795	414.884
	E.S.U.	5.558	150.026	155.584	8.891	128.793	137.684	8.705	119.289	127.994	11.377	122.126	133.503
	TOTAL	240.819	347.809	588.628	235.478	307.390	542.868	235.890	292.945	528.835	245.466	302.921	548.387
REGION	E.S.O.	235.261	197.783	433.044	226.587	178.597	405.184	227.185	173.656	400.841	234.089	180.795	414.884
	E.S.U.	5.558	150.026	155.584	8.891	128.793	137.684	8.705	119.289	127.994	11.377	122.126	133.503
	TOTAL	240.819	347.809	588.628	235.478	307.390	542.868	235.890	292.945	528.835	245.466	302.921	548.387

E.S.O. : Eaux souterraines - E.S.U. : Eaux de surface - A.E.P. : Adduction en eau potable - A.E.I. : Adduction en eau industrielle

Pour l'année 1973, les données disponibles * permettent de replacer la région dans un contexte national (tableau 8) :

Tableau 8 : La Région et la France : L'eau en quelques chiffres

	FRANCE		REGION NORD - PAS-DE-CALAIS	
			(proportion à la France)	
Superficie (km ²)	SF = 550.000		12.400 (2,25% SF)	
Population (million d'h.)	PF = 51,9		3,9 (7,5% PF)	
Densité de population (h/km ²)	DF = 94		310 (3,3 fois DF)	
<u>Prélèvements</u> (millions de m ³)				
. Total	23.000		623 2,7%	
. Par origine			Répartition régionale	
Eaux de surface	18.000	Répartition nationale 78%	185 (1% du total français)	30%
Eaux souterraines	5.000	22%	438 (9% du total français)	70%
. Par utilisation				
Collectivité	4.000	17%	214	34%
Industrie	14.000	61%	409	66%
Agriculture	5.000	22%	ε	ε
<u>Taux de couverture des demandes par les eaux souterraines (%)</u>			(Rapport à la moyenne nationale)	
. Total	22		70	(3)
. Collectivité	50		97	(2)
. Industrie	14		56	(4)
. Agriculture	20		-	-

* . Pour la région, les données proviennent de l'Agence de Bassin Artois-Picardie
. Pour la France, les données de prélèvements proviennent de documents du SPE (Service des Problèmes de l'Eau) établis pour la C.E.E.



Les caractéristiques principales font de la région un cas en dehors de la moyenne nationale avec une origine des prélèvements basée pour plus des 2/3 sur les eaux souterraines:

- . La presque totalité des eaux potables distribuées aux collectivités dépend des eaux souterraines,
- . plus de la moitié (soit 4 fois la moyenne nationale) des eaux pour l'industrie provient également des eaux de nappe.

En admettant, du fait de contraintes techniques et économiques, une correction de l'écoulement moyen interannuel | 20 |, la ressource régionale disponible s'évalue à 1,5 milliard de m³ par an. En regard des 580 millions de m³ prélevés en moyenne (de 1972 à 1979), il ne devrait donc pas y avoir de problème régional. Et pourtant, ce bilan excédentaire ne peut être satisfaisant pour au moins 3 raisons

- . la région est exportatrice par l'intermédiaire de ses cours d'eau, notamment la Lys, la Scarpe, l'Escaut, la Sambre, et ce sans prendre en compte les cours d'eau côtiers,

- . l'excédent d'eau (Cf.ch.I), la productivité des aquifères (Cf.ch.III), la qualité et la protection des nappes (Cf.ch.IV) et enfin le réseau hydrographique, ont chacun une distribution hétérogène d'un bout à l'autre de la région,

- . la répartition des "gros consommateurs" (centres urbains et industriels) ne coïncide pas idéalement avec une ressource optimale, leur implantation s'étant souvent faite sur d'autres critères importants (bassin minier, axes de communications, ports....) ; parfois même leur impact a été défavorable sur la qualité, nécessitant le recours au traitement ou à une ressource plus lointaine.

De l'échelle régionale au niveau départemental apparaît déjà un déséquilibre exprimé par une inquiétude : "le Pas-de-Calais, "Château d'eau" du Département du Nord craint vivement que ses ressources surexploitées viennent à lui manquer, faute d'une politique cohérente" *

* : Extrait de la synthèse des avis sur le Livre Blanc - Service de l'Action Economique de la Préfecture du Pas-de-Calais 1971 [in 2]

A un bilan régional excédentaire on doit donc opposer des déficits locaux dont seul un découpage de la région peut permettre l'analyse.

22 - Evolution statistique et tendances

A l'échelle régionale (Fig. 12), de 1972 à 1978, la baisse des prélèvements est générale, excepté pour l'année 1976 où la sollicitation accrue des eaux souterraines peut être attribuée à un été particulièrement sec ; les aquifères jouent alors leur rôle important de réservoir de secours. En sept années, une diminution globale de 100 millions de m³ (16 %) est enregistrée, suivant un taux de décroissance annuel moyen (t.a.m.) de -2,4 % correspondant aux taux respectifs de -1,4 % pour les eaux souterraines et -4,6 % pour les eaux de surface.

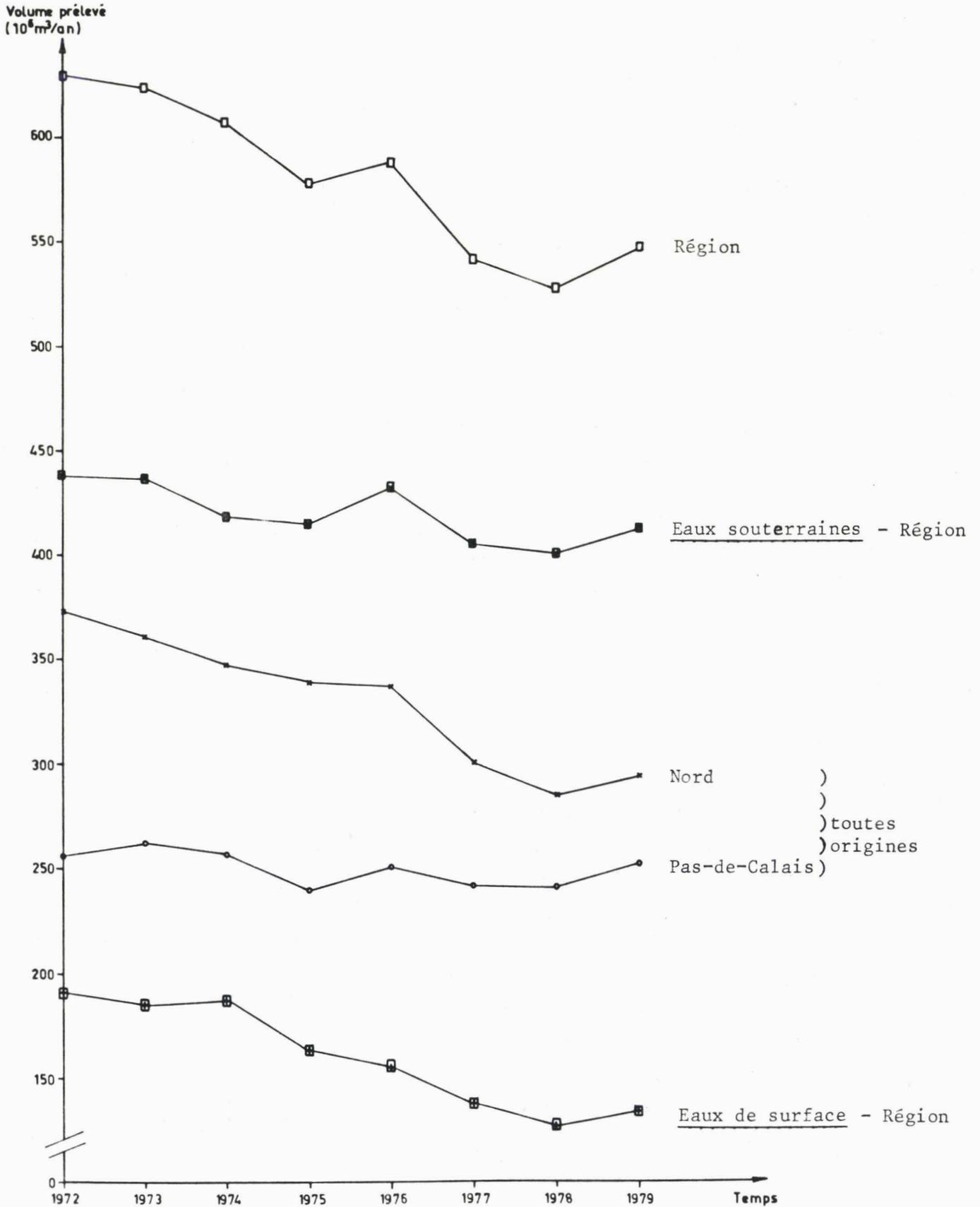
Par département, cette baisse générale intéresse presque exclusivement le Nord, où l'on est passé de 373 à 287 millions de m³ prélevés, soit une diminution de 23 % en sept ans (t.a.m. = -3,5 %).

Par contre, quelque soit le département ou le type de ressource, l'année 1979 est caractérisée par une nouvelle augmentation globale des prélèvements en eau, de l'ordre de +3,6 % par rapport à 1978.

En distinguant l'origine des eaux (Fig 13), il apparaît une relative stabilité dans le Pas-de-Calais et une baisse importante des prélèvements en eau de surface dans le Nord.

Enfin, le caractère le plus marquant concerne les évolutions contraires des prélèvements pour les deux secteurs d'utilisation des eaux souterraines (Fig. 14) : pour la période étudiée (et compte tenu de la remarque faite pour 1976), se dessine une croissance régulière pour l'alimentation en eau potable suivant un taux régional annuel de +1,9% (4,4% pour le Pas-de-Calais, 0,5% pour le Nord). Par contre, les prélèvements industriels ont fléchi de 26 % de 1972 à 1978 (baisse annuelle de 5% : 4,2% dans le Pas-de-Calais et 6,1 % dans le Nord).

Figure 12 : Evolution globale des prélèvements (1972-79)



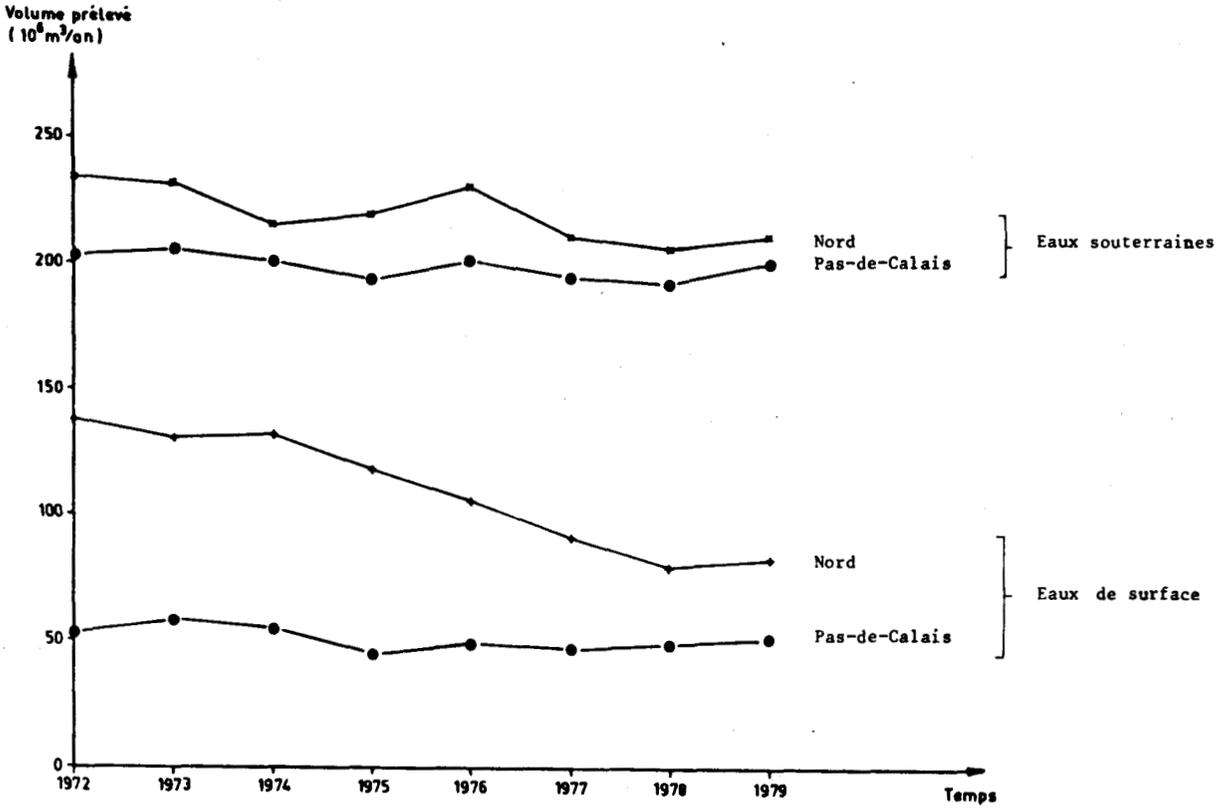


FIGURE 13 : Prélèvements par origine - Evolution par département

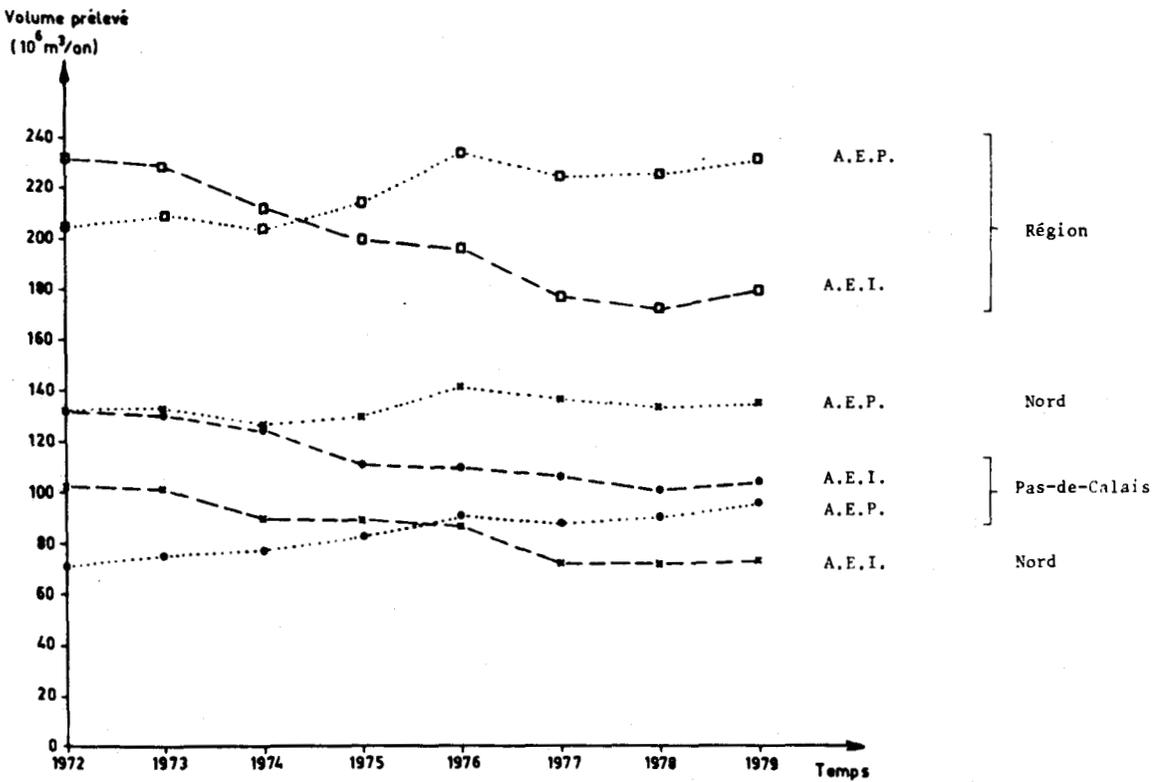
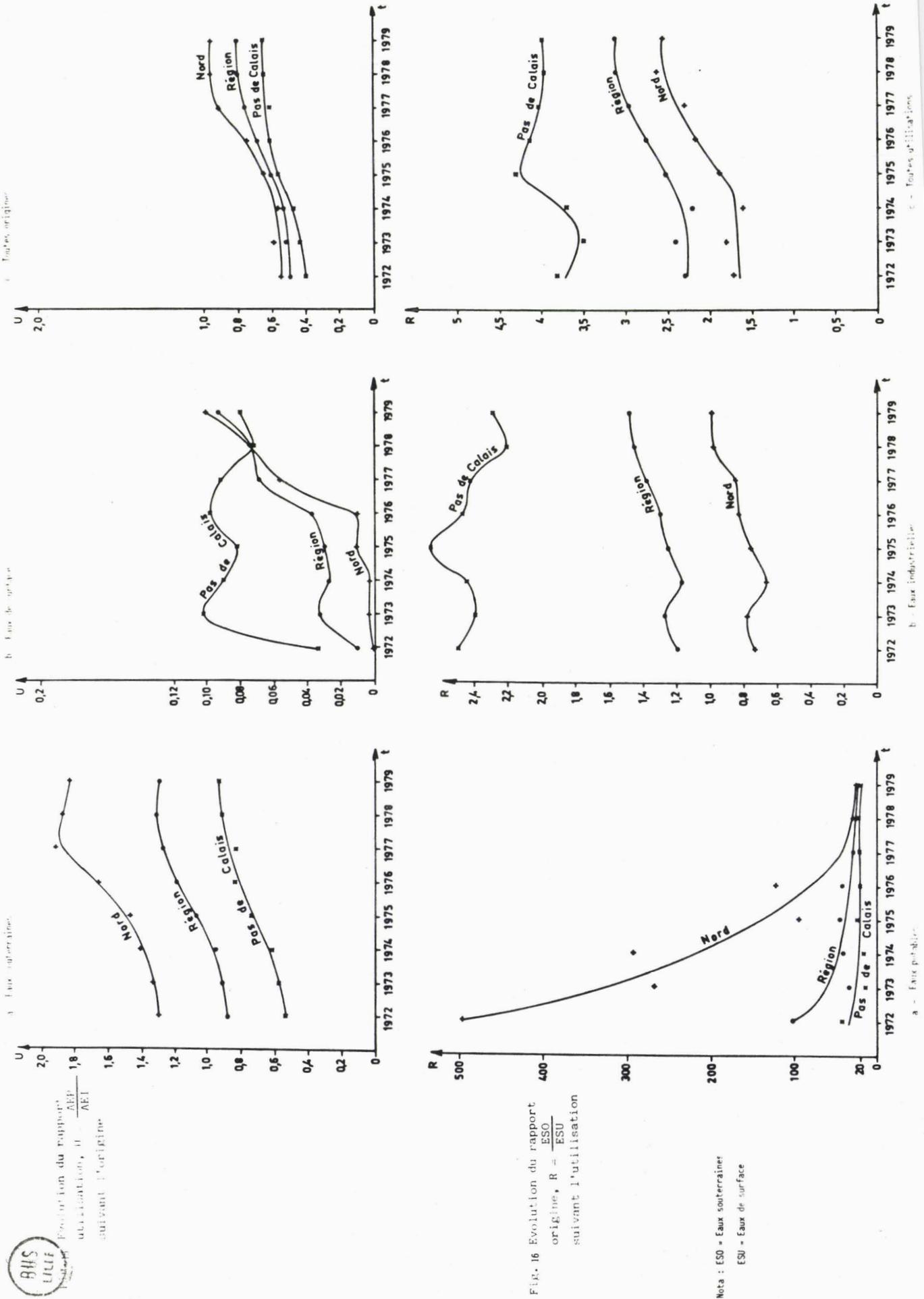


FIGURE 14 : Prélèvements en eaux souterraines - Evolution par secteur d'utilisation et département





BHS
LILLE
Production du rapport
évaluation, U = AEP / AET
suivant l'origine

Fig. 16 Evolution du rapport
origine, $R = \frac{ESO}{ESU}$
suivant l'utilisation

Nota : ESO = Eaux souterraines
ESU = Eaux de surface

Calculée à partir des données brutes, l'évolution des rapports pour chaque type de ressource (Fig.15) ou d'utilisation (fig.16) appellent les remarques suivantes :

- pour les utilisations, les rapports des eaux souterraines sont homothétiques pour les deux départements et inverses pour les eaux de surface (fig.15a et b),

- le plus grand changement a affecté le rapport des origines des eaux potables dans le Nord (fig.16 a),

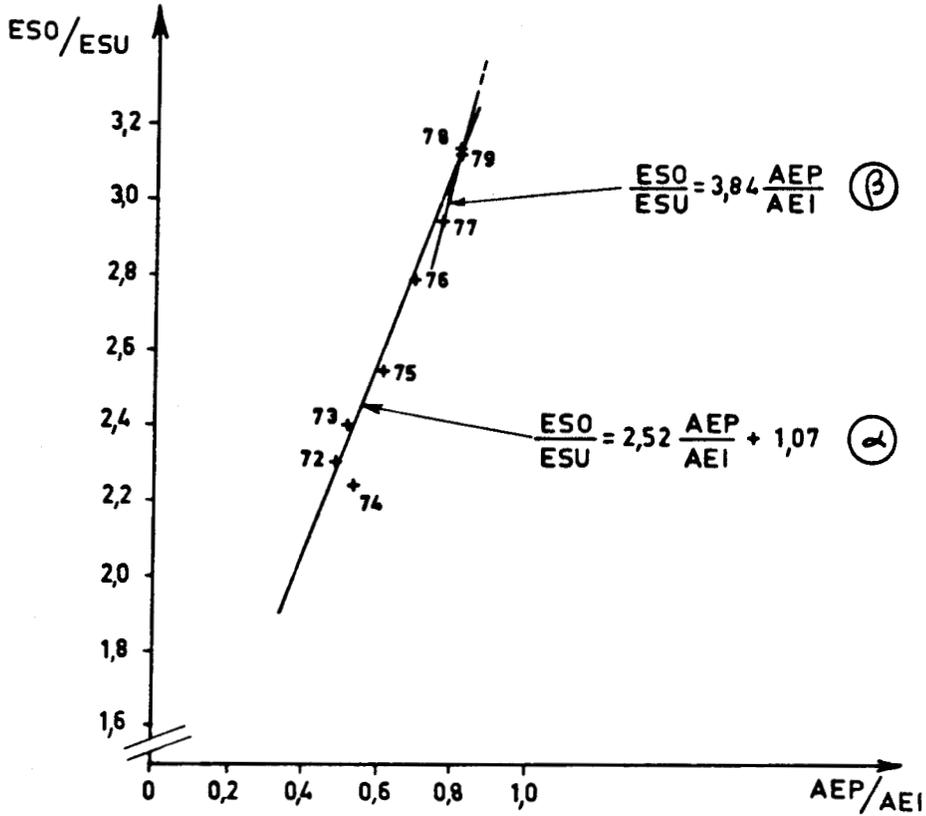
- la régularité est particulièrement marquée à l'échelle régionale pour les utilisations en eaux souterraines (15a) et pour l'origine des eaux industrielles (16b).

La similitude de comportement des courbes régionales toutes origines ou utilisations comptées (Cf. fig. 15c et 16c) nous a conduit à tenter d'établir une relation simple entre les rapports correspondants. Les graphes de la figure 17 mettent en évidence de deux manières une loi empirique qui lie les quatre grands paramètres de l'exploitation régionale des eaux. Pour toute la période étudiée, une relation linéaire moyenne (α) peut être définie avec une ordonnée à l'origine non nulle. Depuis 1977, il semble se dégager une stabilité entre les rapports (relation β) après une évolution régulièrement décroissante ; il conviendrait naturellement de la vérifier sur une période plus longue. Tout se passe comme si il y a eu changement de régime global dans l'exploitation régionale des eaux.

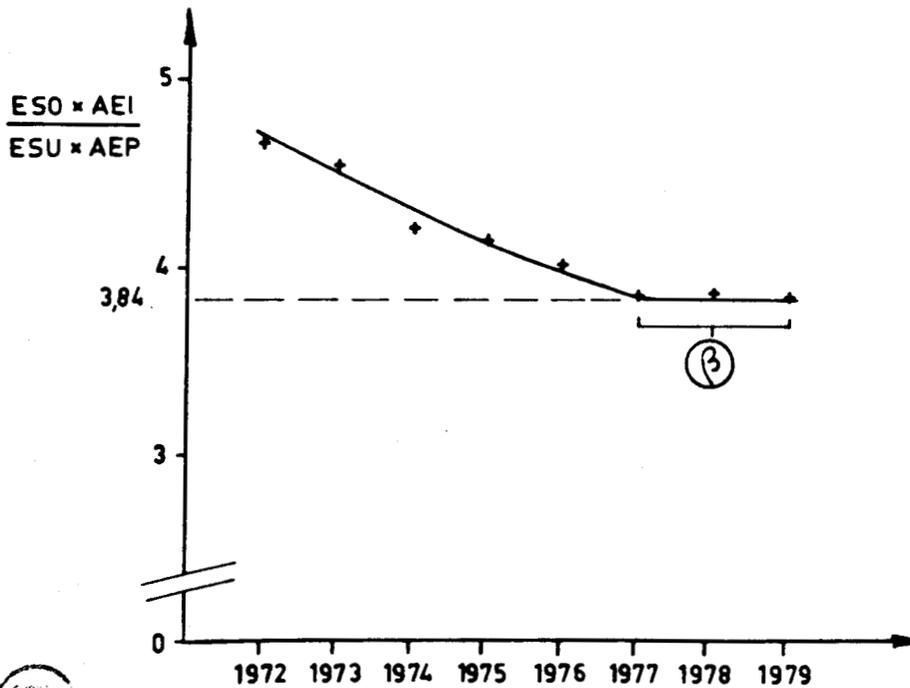
Si une telle corrélation peut paraître évidente dans la mesure où l'alimentation en eau potable provient en grande partie des eaux souterraines (Cf. tabl.7), elle n'est cependant bien perceptible qu'à l'échelle régionale. En reprenant l'expression de J. MARGAT appliquée à la France [21], ceci attesterait le caractère "eautarcique" de la région, sans cacher toutefois l'interdépendance des deux départements qui la composent.

Toute analyse de détail rendrait nécessaire la prise en compte du poids respectif de chacun des nombreux paramètres du système de ressources et d'utilisation de l'eau (fig. 18). Liés ou non, ceux-ci se combinent et peuvent agir, dans un sens identique (par exemples: accroissement de la demande - baisse de l'alimentation naturelle ; diminution de la demande - taxation des prélèvements) ou dans un sens contraire (par exemple : croissance de la demande en A.E.P - baisse de la demande en A.E.I.).

Figure 17 : Relation entre l'évolution des types d'utilisation et types de ressource



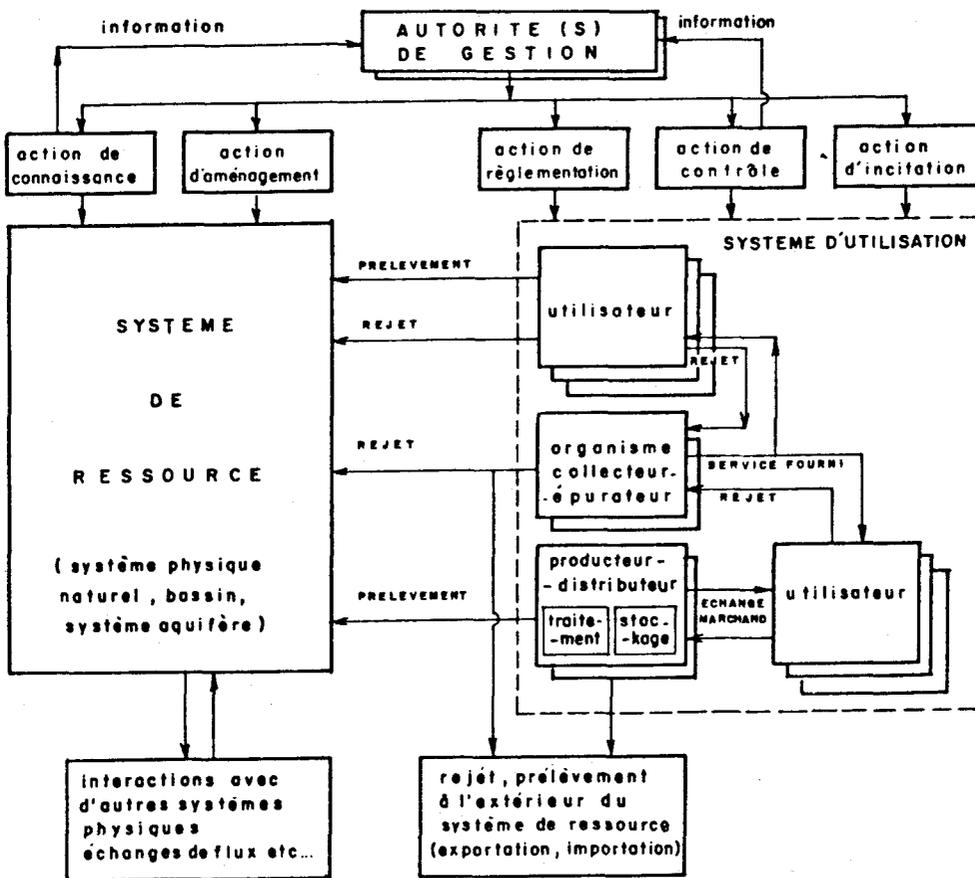
a - Corrélation entre les rapports



b - Evolution du rapport des origines à celui des utilisations



Figure 18 : Système de ressources et d'utilisation d'eau



N.B. les flèches indiquent des actions (=impulsions) et non des flux.

D'après J. MARGAT - 1978

La résultante des divers paramètres peut être observée notamment sur les graphiques d'évolution piézométrique [51], plus particulièrement sur ceux de longue durée (Cf. fig.11).

3 - APERCU SUR LA REPARTITION SPATIALE DES PRELEVEMENTS SOUTERRAINS

Les prélèvements par arrondissement (tableau 9) se caractérisent par une grande hétérogénéité spatiale, mais, toutes utilisations confondues, leur évolution est relativement semblable.

L'hétérogénéité moyenne sur huit ans (fig.19) apparaît d'autant plus importante que les surfaces intéressées sont inégales. Rapportés à la répartition de la population (fig.20), ces chiffres indiquent clairement les principaux déséquilibres qui nécessitent des transferts vers les secteurs déficitaires de Lille et Dunkerque.

ARRONDISSEMENT	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	% en plus
AVESNES	A.E.I.	7.899	8.167	5.791	7.353	7.541	6.198	6.334	6.334
	A.E.P.	14.454	15.458	16.435	16.435	17.578	21.698	18.119	18.119
	TOTAL	22.353 (5,1)	23.621 (5,4)	21.586 (5,2)	23.768 (5,7)	25.119 (5,8)	21.060 (5,2)	27.896 (7,0)	24.453 (5,9)
	A.E.I.	8.806	8.696	7.265	8.374	7.326	7.245	5.873	5.038
A.E.P.	8.196	8.412	7.581	9.829	10.167	10.009	9.349	9.548	
TOTAL	17.002 (3,9)	17.108 (3,9)	14.846 (3,5)	18.153 (4,4)	17.493 (4,0)	17.254 (4,3)	15.222 (3,8)	14.586 (3,5)	
DOUAI	A.E.I.	17.710	16.494	15.200	14.079	14.239	10.518	9.321	10.580
	A.E.P.	29.439	28.816	29.258	30.491	33.215	31.109	31.831	32.080
	TOTAL	47.149 (10,8)	45.310 (10,3)	44.459 (10,6)	44.570 (10,7)	47.454 (11,0)	41.627 (10,3)	41.152 (10,3)	42.660 (10,3)
	A.E.I.	1.591	1.737	1.875	1.787	1.779	1.944	1.780	2.169
A.E.P.	25	23	23	27	37	25	13	22	
TOTAL	1.616 (0,4)	1.898 (0,4)	1.898 (0,5)	1.814 (0,4)	1.816 (0,4)	1.969 (0,5)	1.793 (0,5)	2.191 (0,5)	
LILLE	A.E.I.	40.014	28.967	35.727	33.160	31.419	26.886	26.007	26.657
	A.E.P.	65.326	62.300	57.685	57.275	64.498	62.051	55.044	60.682
	TOTAL	105.340 (24,0)	91.267 (20,8)	93.412 (22,3)	90.385 (21,8)	95.917 (22,1)	88.937 (21,9)	81.051 (20,2)	87.339 (21,0)
	A.E.I.	25.911	26.139	24.513	24.499	24.840	21.931	23.101	24.106
A.E.P.	25.405	18.127	16.189	17.672	18.181	17.933	17.407	16.655	
TOTAL	41.316 (9,4)	44.266 (10,1)	40.702 (9,7)	42.171 (10,1)	43.021 (9,9)	39.864 (9,8)	40.508 (10,1)	40.761 (9,8)	
ARRAS	A.E.I.	21.369	24.847	21.441	21.140	21.286	20.352	23.640	18.235
	A.E.P.	12.444	13.234	14.235	15.997	22.867	19.028	19.788	17.901
	TOTAL	33.813 (7,7)	38.081 (8,7)	35.676 (8,5)	37.137 (8,9)	44.153 (10,2)	39.380 (9,7)	43.408 (10,8)	36.136 (8,7)
	A.E.I.	38.506	37.381	33.417	37.387	34.892	33.848	31.930	35.009
A.E.P.	6.540	7.145	7.499	7.838	6.151	5.986	6.628	10.617	
TOTAL	45.046 (10,3)	44.526 (10,2)	40.916 (9,8)	45.225 (10,2)	41.043 (9,5)	39.834 (9,8)	38.558 (9,6)	45.628 (11,0)	
BOULOGNE	A.E.I.	4.627	5.111	6.015	6.564	5.624	5.088	4.475	4.475
	A.E.P.	4.030	4.007	5.379	6.236	5.745	6.510	7.468	8.084
	TOTAL	8.657 (2,0)	9.118 (2,1)	11.398 (2,7)	12.800 (3,1)	11.369 (2,6)	11.598 (2,9)	10.967 (2,7)	12.559 (3,0)
	A.E.I.	6.811	6.619	6.895	5.254	4.252	4.222	5.817	6.092
A.E.P.	15.939	15.615	12.691	11.304	14.347	13.386	13.433	13.843	
TOTAL	22.750 (5,2)	22.234 (5,1)	19.586 (4,7)	16.558 (4,0)	18.599 (4,3)	17.608 (4,3)	19.250 (4,8)	19.935 (4,8)	
LENS	A.E.I.	39.166	34.035	33.429	29.082	30.412	28.929	22.756	28.064
	A.E.P.	4.640	4.809	5.105	5.636	6.264	5.804	6.079	6.597
	TOTAL	43.806 (10,0)	38.844 (8,9)	38.534 (9,2)	34.718 (8,4)	36.676 (8,5)	34.733 (8,6)	28.835 (7,2)	34.661 (8,4)
	A.E.I.	4.915	5.760	5.391	5.619	5.001	5.165	5.439	5.834
A.E.P.	6.161	7.156	6.939	7.423	5.597	7.425	7.278	8.448	
TOTAL	11.076 (2,5)	12.916 (2,9)	12.330 (2,9)	13.042 (3,1)	10.598 (2,5)	12.590 (3,1)	13.215 (3,3)	14.282 (3,4)	
ST-OMER	A.E.I.	16.100	15.796	17.499	9.290	9.170	8.721	8.297	8.200
	A.E.P.	22.066	23.092	26.015	28.289	30.673	30.110	30.792	31.493
	TOTAL	38.166 (8,7)	38.888 (8,9)	38.514 (9,2)	38.079 (9,2)	39.843 (9,2)	38.831 (9,6)	39.089 (9,7)	39.693 (9,6)
	TOTAL	438.091	437.940	418.853	415.321	433.004	405.184	400.941	414.884

UTIL : Secteur d'utilisation - A.E.I. : Adduction en eau industrielle - A.E.P. Adduction en eau potable

() : Pourcentage par arrondissement

NOTA : Volumes exprimés en milliers de m3/an



FIGURE 19 : Carte de répartition des prélèvements moyen en eau souterraine par arrondissement (%)

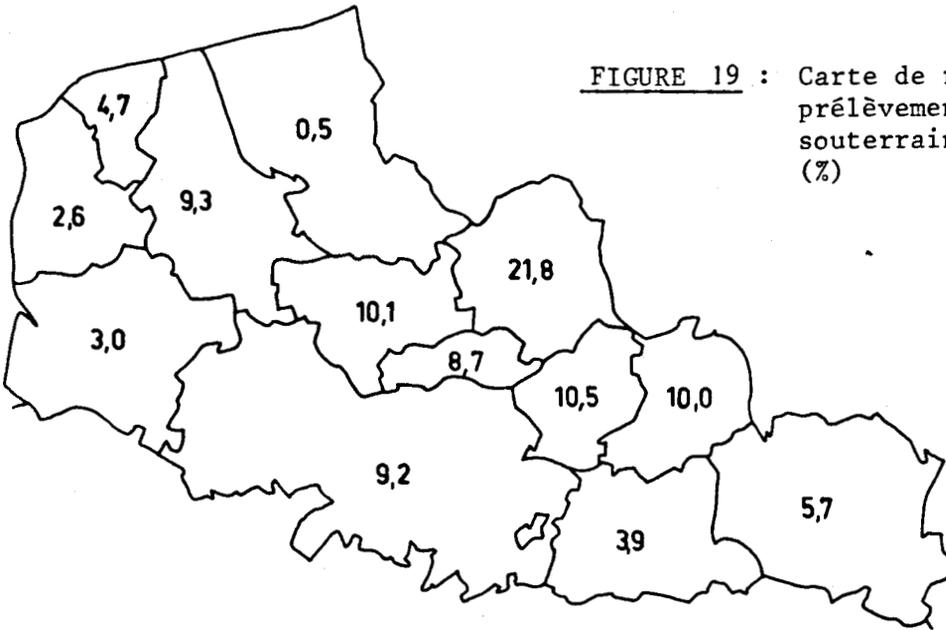
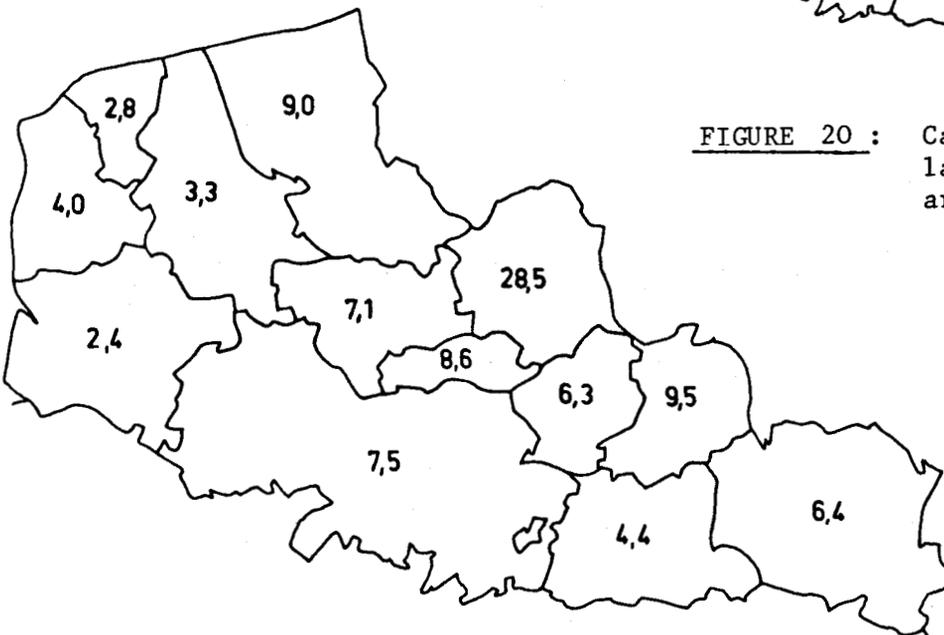


FIGURE 20 : Carte de répartition de la population par arrondissement (%)



Par contre, en comparant les valeurs absolues et non les pourcentages au total des tendances se dégagent, plus nettement encore si l'on sépare l'alimentation en eau potable de celle en eau industrielle :

- . en considérant le volume total, les prélèvements en eaux souterraines diminuent ou restent stables, excepté pour trois des treize arrondissements : Boulogne, Dunkerque et Montreuil. Les baisses les plus significatives concernent les régions à forte urbanisation et industrialisation (Bassin minier et agglomération lilloise),

- . les résultats par type d'utilisation sont encore plus contrastés avec une diminution importante des prélèvements industriels localisée, outre les régions précitées, dans les arrondissements de Saint-Omer et d'Avesnes,

- . pour l'alimentation en eau potable, la tendance à l'accroissement déjà largement évoquée incombe surtout au bassin minier et aux arrondissements de St-Omer et Boulogne. Seul le Calaisis semble connaître une régression.

Enfin, le dernier état connu des prélèvements en eaux souterraines a été représenté * cartographiquement par des cercles dont la surface est proportionnelle au volume annuel prélevé (fig. 21). Elle met l'accent sur les grandes zones de captages qui se regroupent d'une part le long de la plaine des Flandres et du Bassin d'Orchies (limite du recouvrement tertiaire), et d'autre part, suivant le tracé de la plupart des vallées.

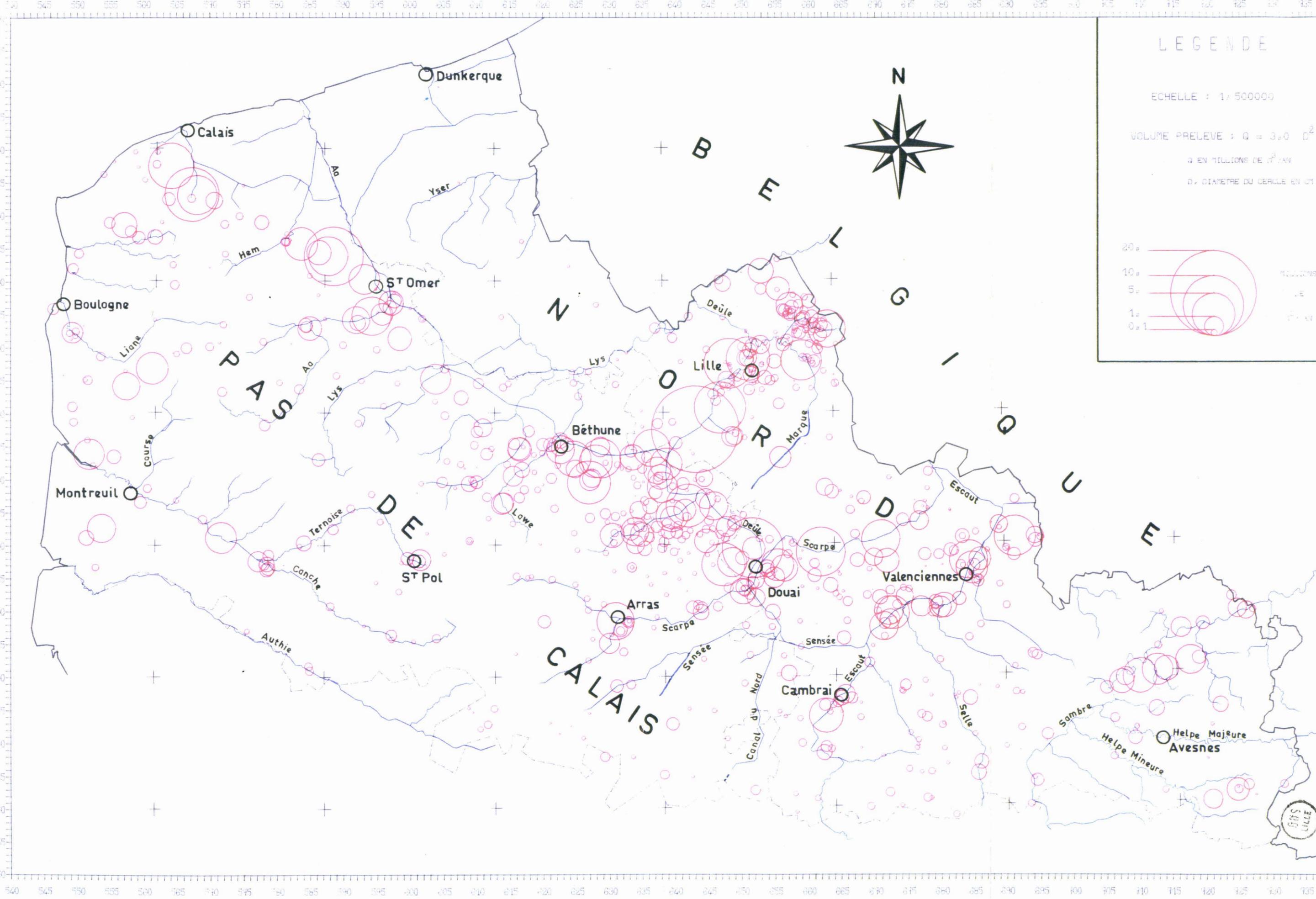
. . .
.

4 - CONCLUSIONS

L'importance des volumes prélevés, le pourcentage remarquable des eaux souterraines et les réglementations qui s'appliquent au domaine de l'eau placent la Région Nord dans une situation à part sur le plan national.

La disparité des ressources et des besoins crée un profond déséquilibre interne, rendant une partie des approvisionnements du Nord tributaire des ressources du Pas-de-Calais ; dans ce cadre, celui-ci a vu la mise en oeuvre de techniques originales, voire pilotes. Il s'agit en particulier de la réalimentation artificielle par eau de surface traitée dans l'Audomarois [68], et du procédé symétrique,

* Programme IMPLANT -S/programme PREL (B. DELPORTE et B. TULLIE) modifié



à savoir le soutien d'étiage de la Lys par exploitation de la nappe de la craie [16, 17].

Force est de constater que bien loin de s'accroître, les prélèvements ont globalement diminué pour la période étudiée, contredisant en cela les diverses prévisions qui optaient, dans les années 1970, pour un taux de croissance annuel de 2 % en moyenne [21, 31, 44] à 5,3% pour la métropole du Nord [46].

On peut y voir bien sûr un résultat de l'action de l'Agence de Bassin, notamment au travers du régime des redevances sur les prélèvements et les rejets qui a incité à diminuer la demande, à colmater les fuites des réseaux et à recycler les eaux ; les diverses zones de taxation favorisent également un développement des prélèvements en dehors de la Métropole lilloise, du Boulonnais et du Bassin minier. Sans vouloir minorer la politique d'incitation de l'Agence, il faut souligner qu'une telle analyse est altérée par l'impact économique traduit par la baisse des prélèvements industriels et la stagnation de la population.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION DES TRANSMISSIVITES

1 - INTRODUCTION

La détermination des zones où la ressource aquifère peut être exploitée avec une bonne productivité des ouvrages de captage dépend avant tout de la connaissance expérimentale des paramètres qui régissent les écoulements. Leur répartition spatiale n'est généralement pas aléatoire, et la mise en évidence des principes (on pourrait dire des "logiques") qui la conditionne constitue à la fois un guide dans la recherche des zones favorables, et une référence lors du calage des modèles de simulation des aquifères.

Sources abondantes de renseignements, les rapports de l'Inventaire des ressources hydrauliques, les dossiers instruits dans le code minier (*) et de nombreuses études locales ont déjà contribué à la réalisation de synthèses régionales ; parmi celles-ci, on retiendra non exhaustivement les travaux de J. GOSSELET - 1904 [47] , G. WATERLOT - 1957 [87] , P. LAFFITE et J. RICOUR - 1959 [54] , E. LEROUX et al. - 1960 et 1962 [60, 61] , L. CREMILLE et al. - 1970 [32] et P. CAULIER - 1974 [26] .

Par ailleurs, la réalisation de modèles mathématiques des aquifères par le B.R.G.M. depuis 1969 est venue compléter les informations existant dans le cadre d'études plus localisées, fournissant alors des outils de gestion dont une première synthèse a été faite par J. MANIA [64] .

(*) L'ensemble de ces documents est consultable au SGR/NPC.

L'objectif de ce chapitre n'est pas de réaliser une synthèse ambitieuse de ce considérable acquis ; il voudrait simplement contribuer à valoriser les données hydrodynamiques acquises dans la nappe de la craie qui, compte-tenu de sa grande extension et de l'intérêt économique croissant qui lui est porté, demeure le domaine privilégié des études hydrogéologiques régionales.

2 - PERMEABILITE ET TRANSMISSIVITE

L'aptitude d'un milieu aquifère à permettre les écoulements s'exprime par la conductivité hydraulique. Pour un milieu continu isotrope vis-à-vis d'un fluide homogène déterminé, le "coefficient" de perméabilité de Darcy exprime la facilité avec laquelle les écoulements pourront se faire notamment vers les ouvrages de captage, et son évaluation demeure un objectif fondamental des études hydrodynamiques.

Très généralement, cette mesure n'est pas directe, mais déduite de la détermination de la transmissivité (T), produit de cette perméabilité (K) par l'épaisseur de l'aquifère (e) : $T = K.e$,

Dans le cas particulier de l'aquifère crayeux, il a été montré de diverses manières que sa perméabilité est très variable non seulement horizontalement, mais encore verticalement. Dans ce deuxième cas, il s'agit notamment des déductions faites à partir des venues d'eau constatées, à l'avancement, lors du creusement des ouvrages miniers [47, 85] , et plus récemment de l'interprétation des diagraphies d'écoulement en forage qui indiquent les tranches aquifères réellement productives [26, 23, 24, 73, 82, 64, 84] .

L'ensemble des études déjà réalisées permet de dégager les principales constatations suivantes :

- . La perméabilité dépend beaucoup plus de la densité des fissures que du type de faciès crayeux : la perméabilité en grand est prédominante,
- . très forte hétérogénéité verticale des perméabilités,
- . tranche productrice d'épaisseur variable, localisée le plus souvent à la partie supérieure de la craie,

. en nappe libre, diminution de la perméabilité avec l'éloignement des zones de drainage,

. en nappe captive, diminution de la perméabilité avec l'éloignement de la limite de captivité, et également avec l'accroissement d'épaisseur du recouvrement.

Ces résultats sont interprétables par les effets simples ou conjugués des facteurs de faciès, structuraux et géomorphologiques :

. développement de la fissuration suivant les directions majeures d'une fracturation engendrée par la tectonique régionale. Les familles N 120° et N 30° semblent avoir imposé les caractères du réseau hydrographique actuel [30] ; celui-ci a alors favorisé le développement des fissures superficielles par dissolution des carbonates (apport en gaz carbonique atmosphérique).

. cette même dissolution est l'origine de l'accroissement de la perméabilité à la limite du recouvrement tertiaire ; la couverture canalise l'infiltration et, par l'action des eaux chargées en CO₂, donne naissance à des poches de dissolution [22].

. même si elles existent, les fissures soumises aux pressions de confinement sont fermées et n'autorisent qu'une très faible perméabilité.

Ces principes fondamentaux montrent qu'il est pratiquement impossible de dresser une carte de répartition des perméabilités. En effet, une perméabilité moyenne déduite d'un pompage d'essai n'est représentative que si l'on peut déterminer la somme des épaisseurs productrices.

Exception faite des rares cas où a été fait un essai au micromoulinet (ou un équivalent), la perméabilité est très souvent sous-évaluée, et elle dépend plus des caractéristiques des ouvrages que des propriétés intrinsèques du milieu crayeux. Par conséquent, il apparaît beaucoup plus significatif de considérer la répartition des transmissivités puisque celles-ci intègrent à la fois la perméabilité moyenne et l'épaisseur productrice.

Enfin, de nombreux puits et forages qui ne traversent pas complètement la craie, ne sont pas pour autant des ouvrages incomplets : il suffit qu'ils recourent la totalité de l'épaisseur de craie suffisamment fissurée et permettent à l'eau de s'écouler gravitairement ; réellement complets, la détermination des caractéristiques hydrauliques peut y être appliquée par les méthodes classiques.

3 - TRAITEMENT ET EXTENSION DES DONNEES DES TRANSMISSIVITES

Pour l'ensemble de la nappe de la craie séno-turonienne, nous disposons de 124 valeurs de transmissivités déterminées par pompage d'essais en régime transitoire. La mauvaise répartition spatiale (*) de ces données (figure 22) conduit à utiliser les résultats d'essais de courte durée (++) généralement exprimés dans les archives sous forme de couples débits-rabattement, donnant des valeurs de débit spécifique (Q/s).

Dans un souci de synthèse, nous avons éprouvé le besoin d'examiner la répartition de ce paramètre dans la nappe du Séno-Turonien supérieur au Nord des monts de l'Artois, secteur pouvant être considéré comme constituant une unité hydrogéologique bien définie. Cette étude s'inscrit dans la suite des travaux entrepris notamment par B. TILLIE dans le bassin minier [85] et par D. ROUSSELOT et J.C. PEYRIEUX dans un certain nombre d'autres systèmes aquifères [79] .

Les auteurs pré cités ont montré que la distribution des Q/s est comparable à celle des T et suit une loi log-normale,

Parmi les 412 valeurs de Q/s disponibles, 110 sont associées à une valeur de T. La dépendance linéaire entre leurs logarithmes (figure 23) s'exprime par une bonne corrélation (coefficient de 82,7 %) avec la régression suivante :

(*) Programme DISPTRA - B. TILLIE - 1978

(**) Essais en régime permanent (stabilisé à 8 heures en général)

CHAPITRE IV

QUALITE ET VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES

FIGURE 23: CORRELATION ENTRE TRANSMISSIVITES ET DEBITS SPECIFIQUES (LOG)

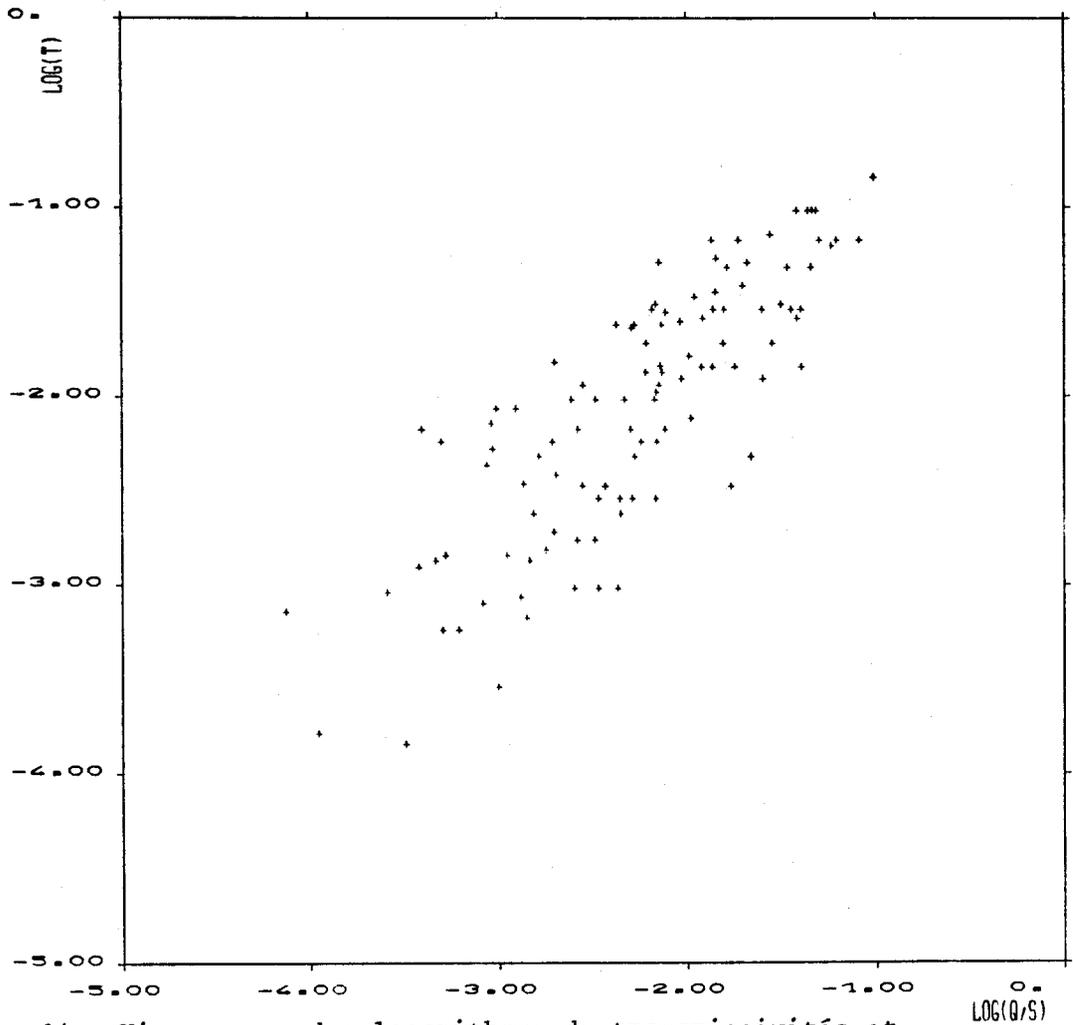


Figure 24 : Histogramme des logarithmes de transmissivités et débits spécifiques corrélés.

HISTOGRAMME NAPPE DE LA CRAIE										LOGARITHMES										CENTRES DES CLASSES															
FREQUENCE										FREQUENCE										STIGIFIF	MOJANS DE 1 %														
CHAQUE * 10 VAUT .50 %																																			
26										11										11	- .9836E+01														
25										10										21	- .9625E+01														
24										9										31	- .9402E+01														
23										8										41	- .9130E+01														
22										7										51	- .8896E+01														
21										6										61	- .8653E+01														
20										5										71	- .8410E+01														
19										4										81	- .8168E+01														
18										3										91	- .7925E+01														
17										2										101	- .7682E+01														
16										1										111	- .7439E+01														
15																				121	- .7196E+01														
14																				131	- .6954E+01														
13																				141	- .6710E+01														
12																				151	- .6467E+01														
11																				161	- .6224E+01														
10																				171	- .5981E+01														
9																				181	- .5737E+00														
8																				191	- .5494E+00														
7																				201	- .5252E+00														
6																				211	- .5010E+00														
5																																			
4																																			
3																																			
2																																			
1																																			
CLASSE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21														
MIN	- .38239E+01																																		
MAX	- .22391E+00																																		
MOY	- .20939E+01																																		
VARIANCE	.33752E+00																																		
MOY QUADRE	.47213E+01																																		
EFFECTIF DE	536 POINTS					POURCENTAGE DES VALEURS					68.1 %					96.0 %					99.1 %					99.7 %					100.0 %				
ECART-TYPE	.5810E+00					COMPRISES ENTRE					1.0 S					1.5 S					2.0 S					2.5 S					3.0 S				



$$\log T = 0,846 \log Q/s - 0,126$$

(T étant exprimé en m²/s et Q/s en m³/s.m)

Là où seul Q/s est connu, la transmissivité est alors calculée à partir de cette régression dont la qualité peut être mesurée par la variance résiduelle où n est le nombre de couples de valeurs T_i - (Q/s)_i :

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \left[\log T_i - (0,846 \log (Q/s)_i - 0,126) \right]^2$$

Dans le cas présent, cette variance résiduelle est égale à 0,14. Bien que supérieure à celle obtenue pour l'échantillon correspondant au Bassin minier (où σ_r^2 vaut 0,12), cette valeur reste peu élevée et peut être considérée comme satisfaisante.

L'erreur apportée dans l'estimation de la droite de régression est traduite sous la forme d'un facteur d'incertitude (f) associé à chaque valeur de transmissivité calculée à partir des débits spécifiques ; en prenant un intervalle de confiance de deux fois l'écart-type σ_j ,

on a :

$$f = 10^{2 \sigma_j} \quad (\text{après passage des valeurs logarithmiques aux valeurs arithmétiques des transmissivités})$$

avec :

$$\sigma_j^2 = \sigma_r^2 \left[1 + \frac{1}{n} + \frac{\left[\log (Q/s)_j - \overline{\log Q/s} \right]^2}{\sum_{i=1}^n \left[\log (Q/s)_i - \overline{\log Q/s} \right]^2} \right]$$

où $\overline{\log Q/s}$ désigne la valeur moyenne.

Pour l'échantillon des 412 valeurs de Q/s, le facteur associé aux transmissivités calculées varie entre 5,8 et 6,2. On obtient finalement 536 valeurs de transmissivités (Cf. annexe IV) dont l'histogramme des logarithmes (Figure 24) montre une bonne distribution log-normale avec 95,1 % des valeurs comprises entre plus ou moins deux écart-types.

La figure 25 montre la répartition spatiale des données ainsi obtenues, soit par pompage d'essai, soit par régression à partir d'une valeur de débit spécifique. On s'aperçoit nettement de l'apport de cette information qu'il "aurait été regrettable de négliger, compte-tenu de la qualité de la régression"

4 - CONCLUSION

Le traitement des valeurs des transmissivités avec prise en compte des débits spécifiques a permis de regrouper de manière cohérente l'ensemble des données actuellement disponibles pour la nappe de la craie qui constitue un réservoir vital pour la région.

La représentation des accidents majeurs et de la limite du recouvrement tertiaire (figures 22 et 25) montre que la distribution de ce paramètre hydrodynamique est liée aux facteurs structuraux, hydrographiques et géomorphologiques. Les valeurs sont comprises entre $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$, avec une moyenne de $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les meilleures d'entr'elles se répartissent le long de cours d'eaux (Aa, Lys, Lawe, Souchez, Sensée) et en limite de captivité (secteurs de Guines, St-Omer, Aire, Lillers, périphérie du bassin d'Orchies), contrastant avec les valeurs obtenues au droit des plateaux et sous recouvrement tertiaire.

Ainsi, bien que présentant une vaste extension, l'aquifère crayeux est caractérisé par une grande hétérogénéité de la productivité des ouvrages qui le captent, limitant en cela les zones où de forts débits peuvent être espérés. Le nombre important des paramètres qui interviennent et les brusques variations de transmissivités rendent difficile l'implantation prévisionnelle de nouveaux captages, ce qui conduit de plus en plus à la nécessité de modéliser cet aquifère en prenant en compte, outre les données hydrodynamiques expérimentales, la morphologie de la surface piézométrique.

I - INTRODUCTION

L'eau doit être considérée aujourd'hui comme une matière première dont le rôle sanitaire, social et industriel démontre l'intérêt qui lui est porté.

Précisément dans la région Nord Pas-de-Calais, la part considérable de l'exploitation des eaux souterraines rend primordiale la nécessité de gérer cette réserve de manière optimale, c'est-à-dire de dépasser le stade d'une rentabilité locale pour préserver à long terme une ressource d'intérêt régional. Cette gestion ne doit pas être seulement comprise sur le plan volumétrique, mais aussi, sur le plan de la qualité. Quelle valeur aurait une réserve d'eau disponible en quantité mais dont la qualité ne correspondrait à aucun besoin ?

Les eaux souterraines couvrant 97 % de la demande en eau potable de la région (Cf. ch. II infra), elles doivent faire l'objet d'une surveillance toute particulière. Nombreuses sont déjà les études réalisées qui ont constaté une grande hétérogénéité des caractéristiques chimiques de ces eaux tendant (théoriquement) à limiter l'exploitation de certains captages. Ceci est à rattacher avec les différents types d'activité humaine qui entraînent bon nombre de pollutions observées tant dans les zones fortement urbanisées que dans les secteurs industriels ou agricoles. Certaines régions sont ainsi d'ores et déjà marquées par une dégradation importante aussi bien des eaux de surface que souterraines, ces deux aspects n'étant d'ailleurs pas indépendants.

La dépollution d'une nappe étant une entreprise difficile, coûteuse, et de toute manière de longue haleine, l'idée première est donc de protéger en **priorité** les secteurs encore sauvegardés de manière à réserver ces eaux à un usage de qualité.

La cartographie d'un état récent de chimisme associée à celle de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution, constitue alors un outil de réflexion qui peut contribuer à la préservation de réserves vitales.

II - CARTOGRAPHIE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

Devant l'importance des prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable, il est paru intéressant de présenter une carte de répartition des données d'analyses chimiques recueillies récemment. Le document annexé à cette partie est extrait d'une étude réalisée pour l'Agence de Bassin Artois-Picardie [9] à partir de résultats mémorisés dans la Banque du Sous-Sol du B.R.G.M.

21 - Principes d'élaboration des cartes

L'objectif principal que nous nous sommes fixé a été de présenter un état récent et synchrone de la qualité chimique des eaux souterraines à l'échelle régionale. Les données recueillies sur les forages destinés à l'A.E.P. ont permis de choisir l'année 1977, celle-ci correspondant à l'échantillon le plus important (environ 2,100 analyses réparties sur 515 ouvrages).

Compte tenu de l'objectif des captages pris en considération, les critères de qualité retenus sont basés sur les normes de potabilité en vigueur pour l'alimentation en eau potable. La grille ci-dessous précise pour chaque paramètre ou élément considéré les différentes classes définies. A chacune d'elle correspond un indice de qualité représenté par une lettre qui est reportée sur la carte générale au 1/250.000 (Annexe V) selon les principes suivants :

. si plusieurs résultats d'analyse d'un élément ou paramètre sont disponibles pour l'année, seule la valeur maximale est retenue,

. L'indice reporté sur la carte est le plus élevé parmi ceux définis dans le tableau suivant :

ELEMENT ou PARAMETRE	INDICE DE QUALITE				
	B bon	C acceptable	D médiocre	E mauvais	F très mauvais
NITRATES NO ₃ ⁻	5 < ≤ 15	15 < ≤ 30	< 30 ≤ 44	44 < ≤ 100	> 100
SULFATES SO ₄ ⁻⁻	25 < ≤ 50	50 < ≤ 100	100 < ≤ 250	> 250	
CHLORURES Cl ⁻	15 < ≤ 30	30 < ≤ 50	50 < ≤ 250	> 250	
AMMONIAQUE NH ₄ ⁺	0,05 < ≤ 0,1	0,1 < ≤ 0,5	0,5 < ≤ 1	1 < ≤ 4	> 4
DURETE Th	15 < ≤ 30	30 < ≤ 40	40 < ≤ 50	> 50	
<p>- Teneur des éléments dissous en mg/l</p> <p>- Dureté en degrés français</p>					

La répartition des indices obtenus permet la délimitation de plusieurs zones de qualité distincte ; par souci de clarté, les indices E et F ont été associés caractérisant ainsi une zone de mauvaise qualité, par dépassement de la norme de potabilité d'au moins un des éléments considérés.

La carte générale est complétée par celles des éléments particulièrement indicateurs de pollution parmi lesquels les nitrates sont le plus préjudiciable du point de vue médical ("maladie bleue" des nourrissons ou méthémoglobinémie - formation éventuelle de nitrosamines à caractère cancérigène [83]). Même si la dénitrification est un traitement maintenant opérationnel, il constitue malgré tout un surcout loin d'être négligeable.

Les cartes présentées en cartouche sont en fait des réductions (échelle 1/750.000) de documents élaborés au 1/320.000 grâce à un programme d'interpolation¹ qui calcule une valeur au noeud de chaque maille de 2 km de côté d'une grille couvrant l'ensemble de la région. Sur ces cartes, seul le domaine crayeux a été représenté.

22 - Commentaires

L'étude des cartes de l'annexe V fait tout d'abord apparaître le caractère particulièrement contrasté de la qualité des eaux souterraines dans la région. Replacé dans un contexte plus vaste grâce à la carte publiée à l'échelle de la France², cet état de fait en est que plus accentué : le Nord Pas-de-Calais est marqué par une zone relativement étendue où les eaux souterraines sont de mauvaise qualité.

Il convient toutefois de signaler qu'il s'agit d'eaux prélevées immédiatement à la sortie des forages, et non d'eaux distribuées ; ces dernières peuvent avoir fait l'objet de divers traitements mais également de mélanges afin d'adapter leur qualité à un usage spécifique, notamment pour l'alimentation.

La modification importante de la concentration en certains éléments spécifiques d'activités humaines permet de parler de pollution [65] de la nappe de la craie dans trois principaux secteurs :

- . les parties centrales et occidentales du bassin minier (la limite géologique du bassin houiller est précisée sur la carte) et le bassin de la Deûle,

- . La région s'étendant entre Cambrai et Valenciennes,

- . La région Nord-Ouest d'Arras, et de manière plus circonscrite deux zones situées au Sud de cette ville.

1 - T.T. CAO (1977) : Programmes CAOISO et MAPISO - B.R.G.M./ORLEANS - non publié.

2 - Carte de la qualité chimique des eaux souterraines de la France - échelle 1/1.000.000, document B.R.G.M. 77 SGN 606 HYD -.

Bien qu'il n'y ait pas dépassement des normes de potabilité pour l'alimentation, on constate une zone de médiocre qualité qui atteste de l'état d'altération des eaux de nappe, très fréquent dans toute la partie médiane de la région.

Pour les données de 1977 relatives aux forages d'alimentation en eau potable, les régions présentant des eaux correctes s'étendent du Boulonnais au Ternois. Elles comprennent en outre l'Avesnois et le Bassin d'Orchies. La limite du recouvrement tertiaire argilo-sableux apparaît bien jouer un rôle protecteur de la nappe de la craie.

Sans que ce soit l'objet même de ce paragraphe, on peut évoquer les grands éléments d'interprétation rencontrés dans la bibliographie. Il s'agit notamment des études sub-régionales, en particulier celles concernant la région lilloise [53, 10, 52], le bassin minier [10, 11, 85], le Douaisis [74] et le Cambrésis [12, 13]. L'analyse comparée des cartes chimiques et de la répartition des sources potentielles de pollution 48 est complétée par les études récentes sur les isotopes de l'hydrogène, de l'azote et du soufre.

On retiendra principalement que la qualité est effectuée particulièrement par les pollutions minérales telles que les chlorures, les sulfates et surtout les nitrates.

Les chlorures en solution ne proviennent pas de l'attaque de la matrice carbonatée. Leur présence dans les nappes est due en premier lieu aux infiltrations d'eau de pluie chargée en chlorures par la dispersion d'eau de mer dans l'atmosphère. Cependant, la part la plus importante dérive d'activités humaines, soit par émission dans l'atmosphère, soit par épandage à la surface du sol.

Les travaux sur la pollution atmosphérique et la minéralisation des eaux de pluie mettent en évidence un excès de chlorures (mais également des sulfates et du fluor) par rapport à la teneur naturelle due aux aérosols marins. Les variations saisonnière et spatiales observées permettent d'attribuer ces excès à l'émission des gaz de combustion des produits énergétiques fossiles (charbons, fuels, carburants des véhicules automobiles)

et aux produits de l'incinération, notamment des matières plastiques. Concernant les chlorures, il faut ajouter à cela d'une part les quantités importantes dues à l'épandage, l'hiver, de sels sur les routes, et d'autre part, la pollution due aux eaux usées infiltrées par les puisards.

Il apparaît ainsi clairement que les secteurs fortement urbanisés sont les premiers soumis à une pollution notable par cet élément. La carte des chlorures confirme cet impact sur la qualité dans le bassin minier, de la région de Béthune à celles d'Hénin-Beaumont et Carvin ; les teneurs sont fréquemment supérieures à 50 mg/l, et dépassent localement 100 mg/l. Sans atteindre la norme de potabilité fixée à 250 mg/l, les concentrations en chlorures restent élevées par rapport à un "fond hydrochimique" régional situé entre 10 et 20 mg/l.

Les sulfates sont les seuls composés du soufre présents dans la nappe de la craie. L'apport naturel est représenté par les aérosols marins et par l'oxydation du H_2S libéré par la fermentation anaérobie des matières organiques. A cela doit s'ajouter le produit de l'oxydation de la pyrite présente (même en très faible quantité) dans les terrains sédimentaires ; c'est à ces sources qu'il est permis d'attribuer la présence normale de ce composé dans les eaux souterraines à une concentration de 10 à 25 mg/l.

La carte des sulfates indique que les pollutions se répartissent en premier lieu dans les zones urbanisées et industrielles ; les teneurs y sont comprises généralement entre 80 et 230 mg/l mais peuvent dépasser localement 400 mg/l. De même que pour les chlorures on peut y voir l'effet de la combustion des produits énergétiques fossiles qui libère des composés volatils du soufre (H_2S et SO_2).

A cela se surimpose l'action des eaux pluviales infiltrées après avoir lessivé des dépôts soufrés : terrils et épandages de schistes houillers [85], terrils de résidus de pyrite [53], etc... On peut également citer l'impact local mais non négligeable d'activités spécifiques telles les raffineries et les usines de traitement des huiles et goudrons, les tanneries, les usines d'engrais.

Dans les régions à vocation typiquement agricole, la source principale de soufre de la nappe libre de la craie proviendrait essentiellement des fumures minérales. En effet, les analyses réalisées à partir des différents isotopes du soufre [13] ont permis d'exclure une source de pollution par les engrais de synthèse ; pour le moment, seule la nappe des sables landéniens semble touchée par ces fertilisants dont l'usage s'est répandu il y a une vingtaine d'année.

Enfin, une dernière source d'excès de sulfates dans les eaux de la nappe de la craie n'est imputable qu'à la communication avec d'autres nappes. Connaissant le caractère sulfaté des eaux de la nappe des sables, il semble qu'elle puisse minéraliser l'eau de la craie [12]. Dans la région de St Amand, les teneurs élevées peuvent être expliquées par une contamination des eaux sur-sulfatées de la nappe captive du Calcaire Carbonifère.

o

o o

Pour les nitrates, la carte présentée permet de distinguer tout d'abord une zone étendue où la concentration est supérieure à 44 mg/l (teneur maximale suivant la norme française). Ces teneurs élevées en nappe libre contrastent avec celles rencontrées en nappe captive (limite de détection); on peut voir là un processus naturel de dénitrification.

Une fois encore, il apparaît que les zones urbaines et industrielles provoquent une augmentation du taux de nitrates dont l'origine doit se trouver non seulement dans l'infiltration des eaux usées (puisards, fuites des réseaux d'assainissement) mais aussi dans les pertes des cours d'eau.

Dans les régions agricoles, les teneurs en nitrates sont généralement comprises entre 25 et 40 mg/l, mais peuvent dépasser la barre des 44 mg/l. Il est important de rappeler qu'en conclusion des études réalisées à partir des isotopes de l'azote, il a été montré qu'actuellement la majeure partie des nitrates ne provient pas encore des engrais chimiques répandus. Leur origine, plus ancienne, serait liée à l'épandage d'engrais organiques naturels [13].

o

o o

D'une manière générale, la surveillance périodique de la pollution des cours d'eau a permis d'observer des parentées évidentes entre la composition de leurs eaux et celle de la nappe de la craie [52] . Les relations eau de surface - eau de nappe apparaissent nettement aux niveaux des canaux de Lens et de la Haute-Deûle dont les fuites sont confirmées par la modélisation des écoulements souterrains réalisée dans ce secteur [85] .

Sur l'ensemble de la région, le recouvrement tertiaire joue un rôle protecteur notamment vis-à-vis des nitrates. Le dommage que représente son absence dans la partie Est du Bassin Minier est aggravé par le développement de la fissuration de la craie affleurante, elle-même accentuée par les nombreux affaissements miniers.

o

o o

En conclusion, il convient de faire une remarque importante sur cet état de qualité des eaux souterraines pour l'année 1977. Du temps de transfert des eaux pluviales au travers de la zone non saturée et de la vitesse de circulation de l'eau dans les aquifères, résulte un déphasage entre les "entrées" et les observations en "sortie". Autrement dit, les analyses d'eaux prélevées en nappes sont la conséquence d'infiltrations d'eaux (polluées ou non) qui ont débuté dans un passé plus ou moins récent. Une évaluation de ce temps de transfert global a pu être donnée dans le Cambrésis par l'utilisation des méthodes de géochimie isotopique. Pour ce secteur, il serait supérieur à 20 ans ; les dégradations de la qualité de la nappe observées actuellement seraient donc les effets de pollutions datant de plusieurs décennies.

Cette évaluation n'est toutefois pas généralisable à l'ensemble de la nappe de la craie : les différences d'épaisseur et de nature du milieu non saturé et les caractéristiques hydrodynamiques du milieu aquifère peuvent en effet favoriser des transferts beaucoup plus rapides.

Il n'en reste pas moins que les secteurs à transfert lent peuvent susciter l'inquiétude, voire conduire à un pessimisme quant à l'évolution

de la qualité des eaux de certains captages dans les années à venir.

Pour répondre qualitativement à certains usages, une partie des réserves reste alors la solution unique qui permette d'assurer une sécurité des approvisionnements sans devoir recourir à des techniques de traitement, sinon sophistiquées, tout au moins coûteuses. Dans ces conditions, la protection des eaux souterraines s'avère indispensable tant pour sauvegarder des réserves encore de bonne qualité, que pour conduire à une amélioration des aquifères déjà dégradés.

III - CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES A LA POLLUTION

31 - Définitions et critères

Face à une évidente atteinte de la qualité des eaux souterraines et devant la persistance de nombreuses menaces de pollution, il revenait aux sciences de l'eau d'apporter une contribution à la protection des nappes.

La vulnérabilité à la pollution peut être définie comme le fait pour une nappe souterraine d'être plus ou moins exposée par les conditions naturelles à un risque donné d'être polluée (chimiquement surtout) [65]. Suivant cette définition, la vulnérabilité est donc une valeur potentielle indépendante de l'existence de foyers de pollution.

Par pollution, on entend toute action, toute introduction volontaire ou accidentelle de corps altérant la qualité chimique ou physique naturelle de l'eau souterraine. L'intervention humaine est alors liée intrinséquement à la notion de pollution. Ainsi, l'altération d'eau douce par l'intrusion d'eau salée marine n'est considérée comme une pollution que dans le cas où elle est le fait d'un phénomène non naturel ; l'exemple le plus fréquent est représenté par l'influence d'un cône d'appel produit par une exploitation de la nappe d'eau douce.

Pour définir les facteurs de vulnérabilité, et à l'inverse ceux de protection, la vulnérabilité doit être considérée sous trois aspects :

- L'introduction de polluants depuis la surface du sol jusqu'à la nappe souterraine. Cet accès se réalise plus ou moins facilement par le transit vertical dans la zone non saturée des eaux d'infiltration ou des fluides polluants,

- la propagation de la pollution suivant l'écoulement de la nappe,
- la persistance plus ou moins prolongée après la suppression du foyer de pollution.

L'ensemble de ces facteurs à prendre en considération a permis de définir les différents critères nécessaires à la détermination du degré de vulnérabilité. Ces critères établis en France notamment par M. ALBINET, J. MARGAT et L. MONITION [3, 65] ont déjà été développés et analysés suivant différentes échelles de représentation [71] ; nous nous limiterons ici à en rappeler les principes fondamentaux :

- . nature lithologique du sous-sol,
- . profondeur de la surface des nappes libres à partir du sol, c'est-à-dire la hauteur de la zone non saturée,
- . perméabilité verticale de la zone non saturée,
- . transmissivité des aquifères,
- . direction d'écoulement en zone saturée et gradient hydraulique,
- . modalité de drainage ou d'alimentation des nappes par les cours d'eau.

La multiplicité et la dimension des paramètres utilisés montrent que la détermination du degré de vulnérabilité ne peut être envisagée de manière ponctuelle. Même très localisée, une étude demande un recul suffisant pour appréhender l'ensemble des paramètres du milieu.

La cartographie apparaît ainsi le moyen le plus synthétique qui

permette de prendre en compte l'ensemble des critères retenus tout en les replaçant dans leur cadre géographique.

32 - Conception de la carte

Les critères étant définis, la conception de la carte est ajustée à certaines contraintes de manière à donner une représentation à la fois claire et précise.

La première d'entr'elles est l'échelle. Choisie à une dimension régionale, l'échelle 1/250.000 a paru bien adaptée et homogène avec les cartes publiées antérieurement en France.

Compte tenu de cette échelle et des paramètres à représenter, la conception finale revient à définir un certain nombre de classe de vulnérabilité en fonction des éléments suivants :

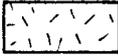
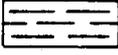
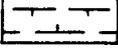
- nombre et caractère des différents domaines ; ces éléments sont propres à la géologie régionale (lithologie et extension des affleurements).

- nombre de couleurs disponibles.

Quatre couleurs de base ont été sélectionnées suivant des principes voisins de ceux définis pour la carte de France. Elles correspondent à des degrés de vulnérabilité établis en fonction des propriétés des eaux souterraines sans considération de leurs relations avec l'environnement :

COULEUR	VULNERABILITE
Rouge	Très grande
Orange	Moyenne à grande
Jaune	Faible à moyenne
Vert	Très faible à faible

Les différents degrés sont précisé à l'aide d'un figuré en surimpression dont le dessin a été adapté à la nature du terrain auquel il correspond :

Figuré	Faciès
	Alluvions
	Limons
	Dominance schisteuse
	Marneux

Le domaine de la craie ayant grande importance dans l'hydrogéologie régionale, une couleur unique (orange) lui a été réservée.

En légende de la carte (annexe VI) sont détaillées les différentes classes résultant de la composition des deux modes de représentation (couleurs et figurés).

Afin d'explicitier le contexte géologique et hydrogéologique régional, deux coupes schématiques ont été représentées. Notons à leur propos que l'épaisseur des terrains a été respectée pour l'ensemble des terrains secondaires, tertiaires et quaternaires ; par contre, pour compenser la distorsion due à la différence entre les échelles horizontale et verticale, seul le type structural des terrains primaires a été figuré.

IV - CONCLUSION

Les résultats de l'analyse cartographique de la qualité et de la vulnérabilité des eaux souterraines montrent que même si elles existent les capacités de protection et d'autoépuration des terrains sont limitées :

On ne peut que constater un état de dégradation de la qualité des eaux, associée de toute évidence aux activités humaines.

Tout en atteignant un développement important, la pollution n'est heureusement pas générale ; nombreux sont encore les secteurs où, en regard des données récentes, une bonne qualité persiste.

Cette observation doit cependant être assortie de plusieurs réserves :

- la majeure partie des secteurs présentant une bonne qualité n'est pas pour autant à l'abri des pollutions (domaine des nappes libres - de la craie et des calcaires notamment),

- l'incidence de l'utilisation en excès des engrais de synthèse reste mal connue. Les effets de cette pratique ne semblent pas avoir encore été observés sur la qualité des eaux souterraines,

- enfin, les zones favorables à une exploitation de qualité sont restreintes par les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

En somme, pour satisfaire simultanément aux conditions favorables quantitatives et qualitatives, il apparaît qu'un grand intérêt devrait se porter sur un nombre limité de bassins, tout particulièrement ceux de l'Aa et de la Lys, relativement proches des secteurs où la demande en eau est importante. On pourrait y voir un accroissement notable des prélèvements futurs.

Dans le contexte régional, gérer le capital-eau de ce secteur représente un objectif important. La deuxième partie de ce mémoire propose ainsi une contribution à cette gestion par la modélisation des écoulements de l'aquifère crayeux du bassin de l'Aa et de la Moyenne Lys.

DEUXIEME PARTIE

MODELISATION
DE LA NAPPE DE LA CRAIE
DU BASSIN DE L'AA
ET DE LA MOYENNE LYS

Dans un premier temps, les données piézométriques de basses eaux ont été rassemblées pour établir un état de référence. Elles caractérisent un état à la fois stabilisé des potentiels hydrauliques, et également minimal (pessimiste) des réserves.

Les données acquises de manière synchrone ne recouvrant pas toute la zone d'étude, on a recherché alors un état similaire de manière à compléter une partie des anciennes collectes.

Les graphiques d'évolution piézométrique (figures 29 et 30) permettent de retenir des données antérieures pour le Calaisis (octobre 1974) ; la région située au sud de la Lys a fait l'objet d'une nouvelle récolte de données (en décembre 1979). Bien que ces états présentent de légères différences (de l'ordre du mètre), elles restent tout à fait acceptables en regard du synchronisme des basses eaux sur un domaine aussi étendu, et compte tenu de la précision sur les mesures (cote du repère et profondeur du plan d'eau).

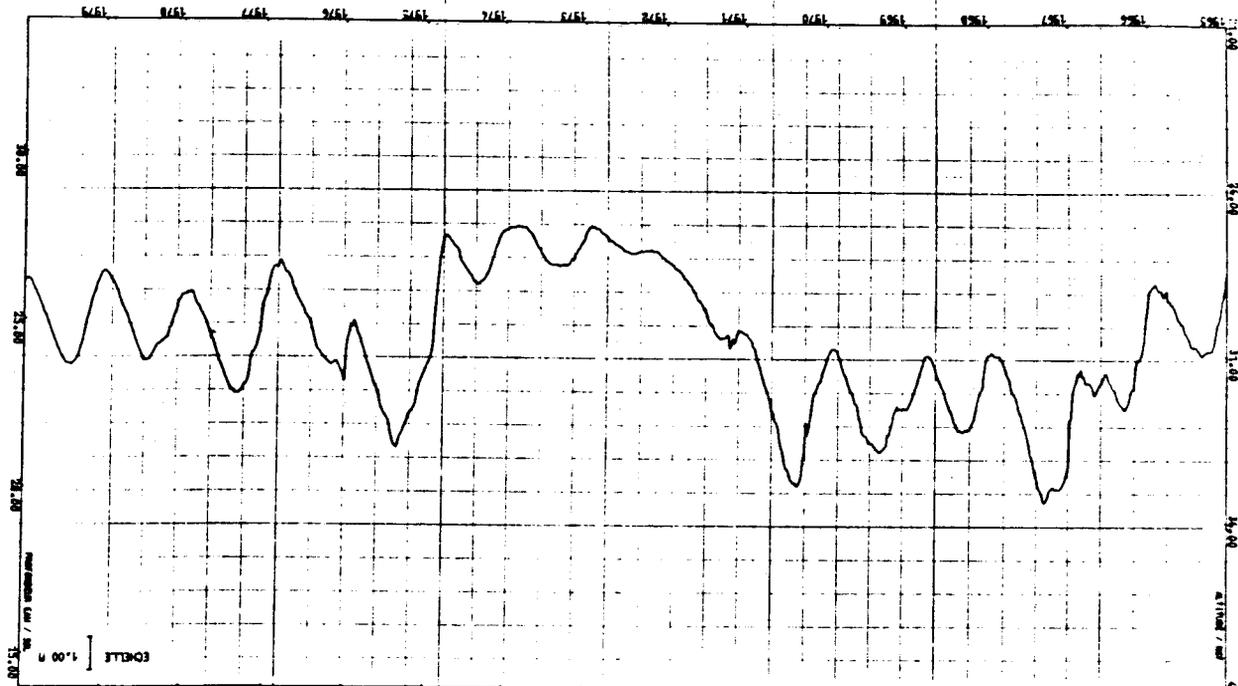
La carte manuelle obtenue (annexe IX) par interpolation linéaire entre les 307 données expérimentales permet de décrire la structure générale des écoulements :

- gradient hydraulique très important en limite Sud-Ouest du Calaisis (3,5 à 1,7%) et au Sud de la région étudiée (2,5 à 1,4%), le long de la faille de Pernes,
- drainage très marqué de l'Aa et de la Lys,
- alimentation de la nappe par le cours moyen de la Hem et le cours amont de la Laquette,
- cônes de dépression dus aux prélèvements réalisés dans les secteurs de Houille-Mouille, de Saint-Omer-Arques et d'Aire-sur-la-Lys.

Les limites et le maillage du modèle étant définis, il sera procédé à un traitement de ces données afin de fournir une valeur de référence par maille.

505
LITE

DATE: 11/03/65
MET. NO. 13
PROFONDEUR QUADR. 35.00
COTE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE 35.00
COTE DU SOL 35.00

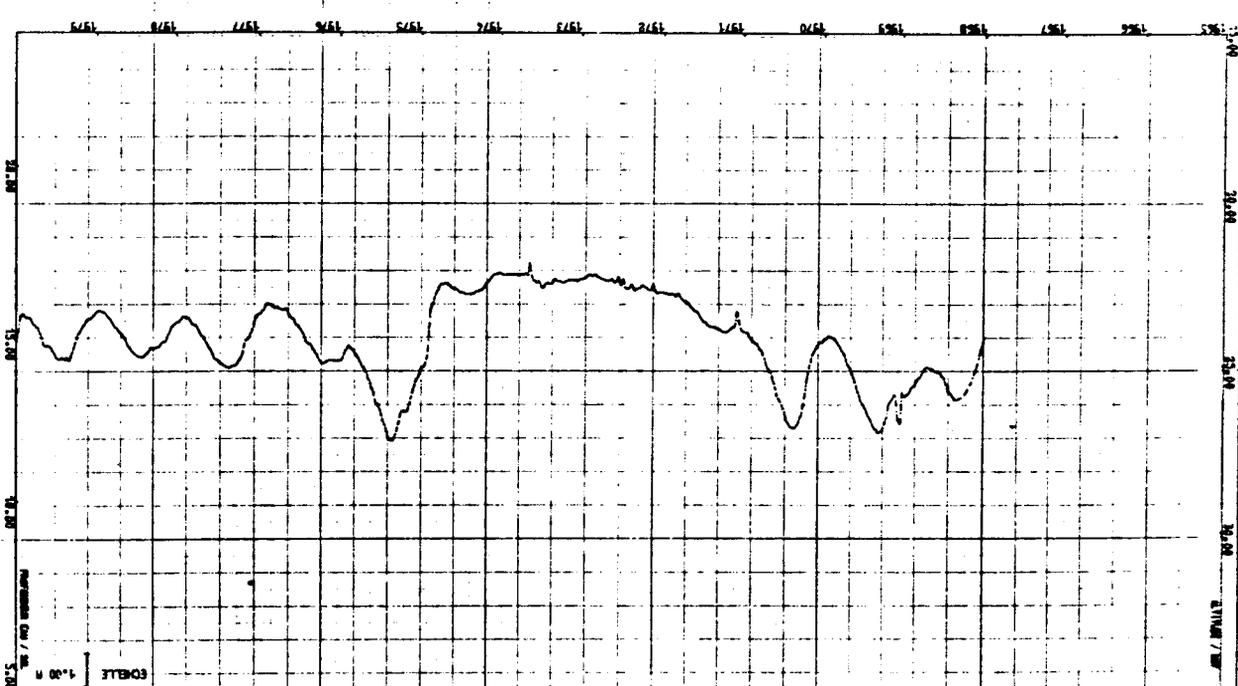


SCR/PMC
INDICE B.M.C.M. 0006-81-0010
DESIGNATION P235 0001
COTE KINC 235
666 MONT-LEUJANEN

Fig. 30

PIEZOMETRIE 1965-1979

DATE: 11/02/65
MET. NO. 13
PROFONDEUR QUADR. 34.80
COTE DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE 37.84
COTE DU SOL 39.00



SCR/PMC
INDICE B.M.C.M. 0018-61-0006
DESIGNATION P1 0001
666 MONTES LA NAVITIAIRE

Fig. 29

PIEZOMETRIE 1965-1979

CHAPITRE I

CADRE DE L'ETUDE

La région étudiée s'étend du versant nord de l'Artois à la plaine des Flandres, depuis la côte jusqu'au méridien d'Aire-sur-la-Lys. Ses limites sont définies principalement par les conditions structurales et hydrographiques qui déterminent la morphologie et le drainage de l'aquifère crayeux dont on se propose de modéliser les écoulements.

1 - GEOLOGIE

Les cartes géologiques et les différents travaux réalisés ont permis de dresser à l'échelle 1/250 000 une carte des principaux affleurements du domaine d'étude (figure 26).

L'axe de l'Artois orienté Nord-Ouest/Sud-Est autorise l'affleurement par places, de terrains grésopélitiques du Paléozoïque, et de façon plus importante de formations marno-crayeuses cénomaniennes et turoniennes bordées au Nord et au Sud par des dépôts crayeux sénoniens.

Un trait structural majeur est l'existence d'un faisceau de failles qui ont accompagné la mise en place au Tertiaire (Eocène moyen) du bombement anticlinal de l'Artois. Cette structure a constitué dès sa formation une ligne de partage des eaux et n'a permis une poursuite de la sédimentation marine qu'au Nord-Est [38].

La coupe* (figure 27) établie perpendiculairement à l'axe de l'Artois situe le domaine étudié dans un cadre plus large et montre le rôle particulièrement important joué par la faille de Pernes qui met en contact latéral des terrains primaires (au Sud) avec des terrains secondaires.

* Les données utilisées pour son tracé proviennent :

- . des cartes géologiques,
- . des dossiers de sondages répertoriés au Service géologique régional

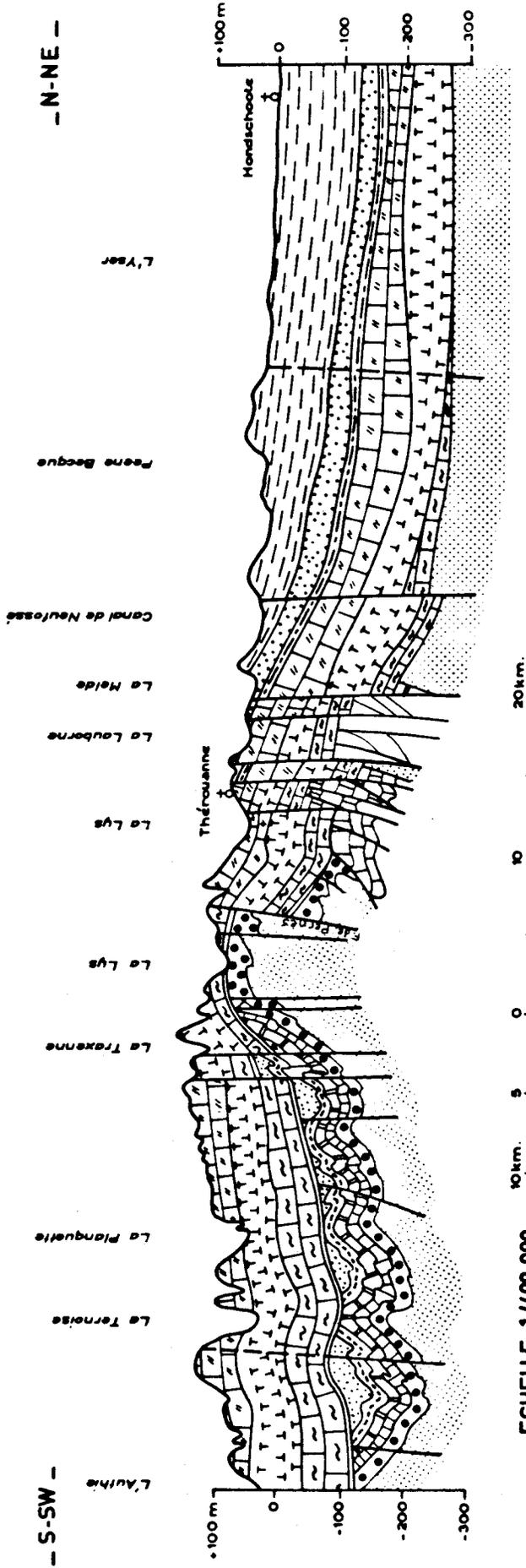
et :

- pour le Tertiaire : de la carte des sables landéniens établie par J.MANIA [63]
- pour le Secondaire : des cartes d'isohypses des formations dressées par P. CAULIER [26]
- pour le Primaire : des documents de prospection pétrolière [28]

L'échelle des hauteurs a été conservée pour les terrains de la couverture. Par contre, le style tectonique seul a été respecté pour les assises paléozoïques.

— COUPE HYDROGÉOLOGIQUE SCHEMATIQUE —

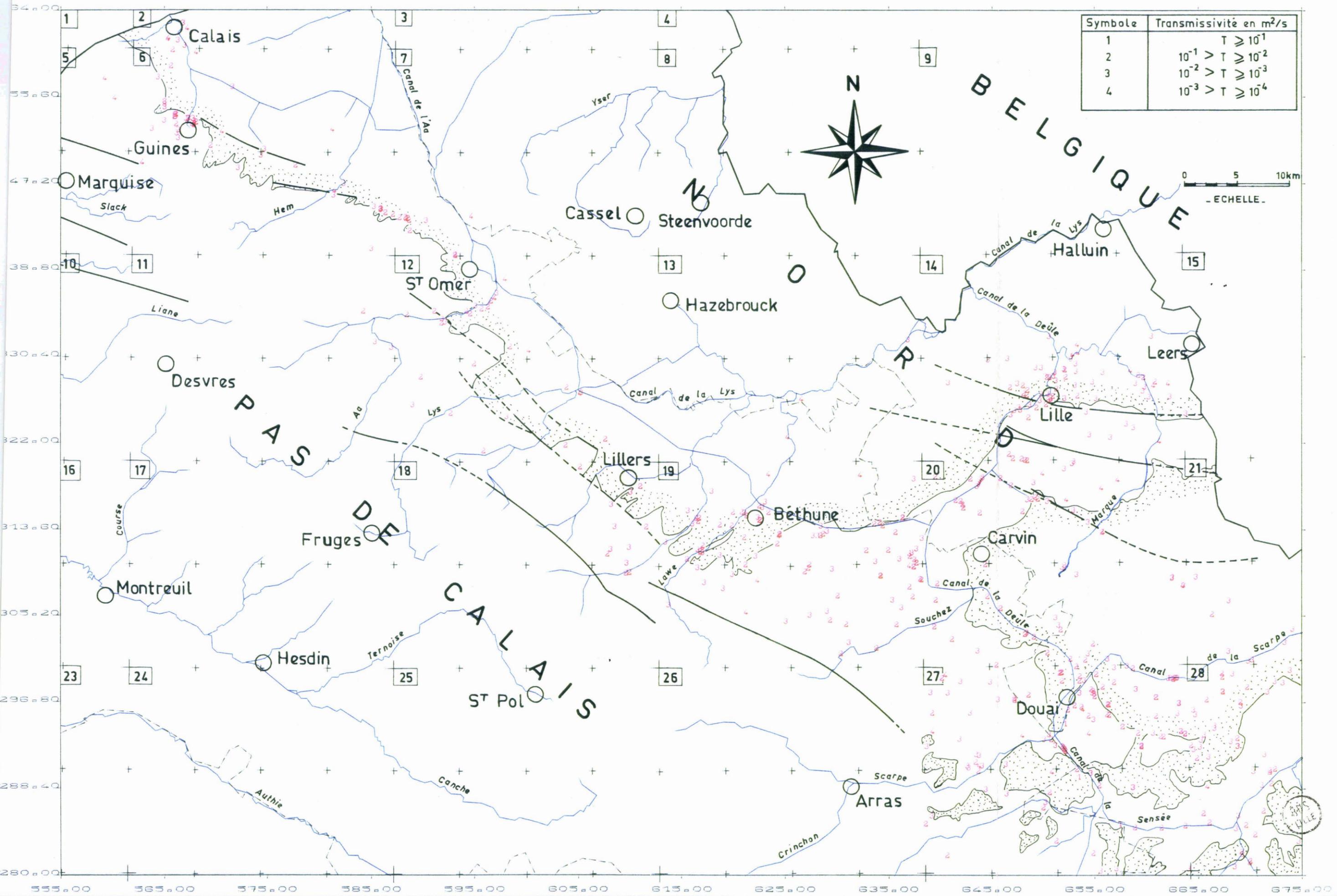
— TERNOIS — — ARTOIS — — FLANDRES —



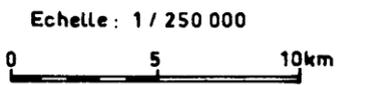
ECHELLE: 1/400 000

- | | | | |
|--|--|--|---|
| | Argiles des Flandres (Yprésien). | | Argiles du "Gault" (Albien). |
| | Sables et Grès d'Ostercourt (Landénien supérieur) -
Nappe des sables tentaires. | | Calcaires, dolomies et schistes (Carbonifère inférieur : Tournaisien et Viséen) - Nappe captive du "Calcaire carbonifère". |
| | Argile de Louvil et tuffeau (Landénien inférieur). | | Grès, schistes et calcaires (Dévonien supérieur et moyen) -
Nappe des calcaires givériens et graniviers; nappe des grès gamoniens. |
| | Craie blanche et craie grise (Séno-turonien) - Nappe de la craie. | | Grès, schistes et calcaires (Dévonien inférieur). |
| | Marnes crayeuses (Turonien moyen et inférieur). | | Schistes (Silurien). |

CARTE DES TRANSMISSIVITES (-LOGT) (AVEC PRISE EN COMPTE DES DEBITS SPECIFIQUES)



GÉOLOGIE DU SECTEUR D'ÉTUDE



FORMATIONS SUPERFICIELLES

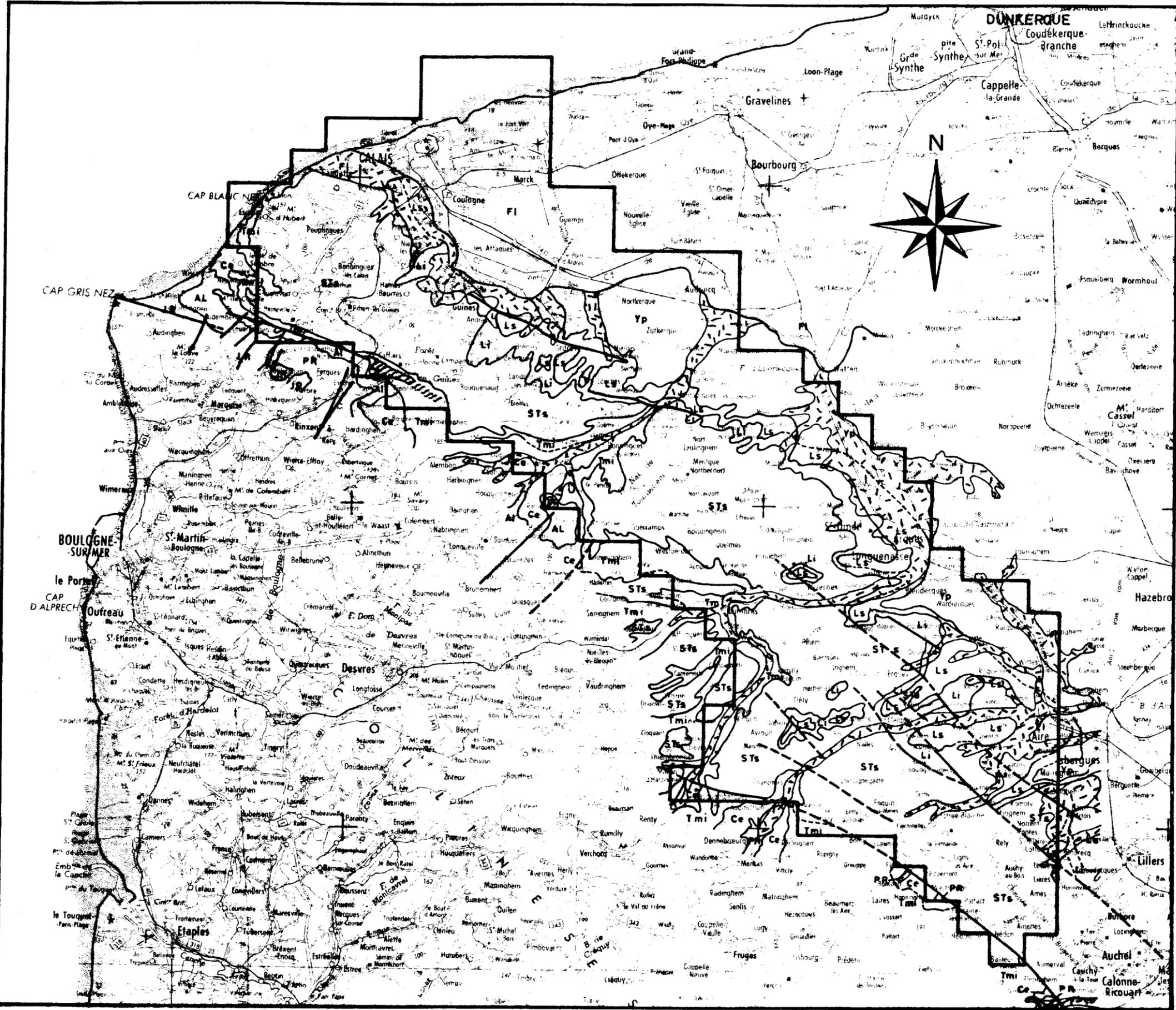
Alluvions : sables, argiles, limons, cailloutis.

FORMATIONS SÉDIMENTAIRES

- FI** Flandrien : sables, argiles, tourbes, galets, graviers.
- Yp** Yprésien : "Argiles des Flandres".
- Ls** Landénien supérieur : sables et grès.
- Li** Landénien inférieur : argiles et tuffeau.
- STs** Senonien et Turonien supérieur : craie blanche à silex.
- Tmi** Turonien moyen et inférieur : marnes crayeuses et craie marneuse.
- Ce** Cénomaniens : craie marneuse.
- Al** Albien : "Argiles du Gault" et sables glauconieux.
- JR** Jurassique : calcaires, sables, grès, argiles.
- PR** Primaire : grès, schistes, calcaires et marbres.

- 1 - Faille
- 2 - Flexure
- 3 - Limite du modèle

Note : les formations superficielles limoneuses n'ont pas été représentées.



Ces terrains comprennent de bas en haut :

. l'Albien, formé essentiellement d'argiles plus ou moins sableuse (Argile du Gault),

. le Cénomaniens qui est représenté à sa base par des dépôts argilo-sableux à galets (désignés sous le nom de "Tourtia") auxquels font suite des sables verts glauconieux. La partie supérieure est formée de marnes crayeuses ou de craies marneuses blanches ou grisâtres parfois fortement fissurées et permettant le développement d'un aquifère,

. le Turonien que l'on subdivise classiquement en trois faciès. Au Turonien inférieur formé de marnes plastiques ("dièves vertes") succède le Turonien moyen constitué de marnes crayeuses bleutées en roche fraîche (d'où le nom de "bleus" donné par les mineurs) et généralement jaunâtres à l'affleurement. Le Turonien supérieur marque le passage de la sédimentation marneuse à la sédimentation franchement crayeuse ; il est représenté par la craie grise glauconieuse dans laquelle existent des niveaux désignés sous le nom de meule [26],

. le Sénonien est constitué d'assises de craie blanche dont les bancs inférieurs contiennent des silex disposés en couches parallèles à la stratification ; à la partie supérieure, très fine et pure, peuvent être localement associés des niveaux phosphatés qui ont pu être exploités [27] ,



. la craie du Séno-Turonien supérieur peut contenir une nappe dont le développement en profondeur est lié à l'extension de fissures ; en tout état de cause, cette nappe est limitée à la base par les marnes bleues.

Vers le Nord-Est, les assises secondaires s'enfoncent sous le recouvrement tertiaire dont la base est caractérisée par les dépôts marins argilo-sableux (Tuffeau de Saint-Omer, Argile de Louvil), du Landénien inférieur. Le Landénien supérieur est formé de sables marins glauconieux, surmontés dans la région concernée par des sables à faciès continental. Cet ensemble est désigné sous le terme de "Sables d'Ostricourt" (contenant la nappe dite des sables tertiaires). A ceux-ci se superposent les argiles yprésiennes qui se développent dans la plaine des Flandres (Argiles des Flandres).

A la bordure nord du domaine étudié se sont déposés des sédiments quaternaires (Flandrien) composés d'argiles et de tourbes, de galets et de sables, ces derniers contenant localement une nappe (dite des "Sables pissards") généralement rendue saumâtres par les venues d'eau marine.

Dans toute la région existent des dépôts parfois très développés de limons (limons pléistocènes, limons à silex, limons de lavage) qui peuvent recouvrir notamment les plateaux crayeux et sédiments tertiaires.

Enfin, les alluvions qui tapissent les fonds de vallées peuvent renfermer des lits tourbeux ou des niveaux à cailloutis.

Du point de vue stratigraphie et tectonique, la région étudiée se présente donc comme une structure de direction Nord-Ouest/Sud-Est avec un pendage de quelques degrés vers le Nord-Est. Elle laisse apparaître à l'affleurement les terrains les plus anciens vers le Sud-Ouest alors que les terrains les plus récents occupent la bordure nord.

La conjugaison du réseau de failles et du réseau hydrographique qui lui est à peu près transversal sépare cette région en plusieurs domaines :

. au Nord-Ouest, le domaine du Calaisis s'étend de la côte à la limite nord du bassin de la Hem. Il comprend un vaste ensemble crayeux limité au Sud par la faille de Landrethun qui se prolonge vers l'Est par la flexure de Fiennes et qui le sépare du massif primaire du Boulonnais. La pente vers le Nord correspond approximativement à une pente structurale suivant un pendage progressivement plus faible, variant de 3% à 1,5% [88]. Au droit d'une ligne Calais-Guines, la craie s'enfonce sous les terrains tertiaires argilo-sableux,

. le bassin de la Hem correspond à une entaille importante de la structure qui laisse apparaître à l'amont, des affleurements des terrains primaires, et de manière plus large les assises du Cénomaniens [5] et du Turonien inférieur et moyen,

. le bassin audomarois est marqué par le cours de l'Aa qui a érodé d'amont en aval les formations turoniennes puis sénoniennes avant de s'écouler sur les terrains tertiaires dont un témoin isolé est représenté par la butte de Wisques. Les divers levés cartographiques tendraient à montrer l'existence d'accidents qui n'affecteraient cependant pas le Tertiaire [80],

. au Sud de la région étudiée, la tectonique a affecté l'ensemble des terrains. Le jeu des failles a permis une érosion différentielle qui sépare nettement les domaines marneux et crayeux de part et d'autre de la faille de Pernes, avec, de surcroît des pendages de direction opposée, le bassin de la Lys peut être ainsi subdivisé en deux parties : à l'amont, la Lys communique avec les terrains cénomaniens et turonien inférieur et moyen [16] ; à l'aval, elle draine l'aquifère sénoturonien supérieur.

2 - HYDROGEOLOGIE

21 - Structure et géométrie des aquifères

A partir de la nature pétrographique, de la morphologie et des zones d'alimentation possibles des terrains sédimentaires on peut distinguer les nappes suivantes (cf. figures 26 et 27).

. nappes superficielles

Les formations limoneuses, sableuses ou caillouteuses qui reposent sur un substratum imperméable sont susceptibles de contenir une petite nappe aquifère. C'est notamment le cas des limons et alluvions reposant soit sur l'Argile de Louvil, soit sur l'Argile des Flandres. Du point de vue économique, ces niveaux sont inexploitablement par suite des débits excessivement faibles qui y sont obtenus ou en raison de leur qualité (ex : Sables pissards) et du risque élevé de pollution.

. nappe des "Sables d'Ostricourt"

Les sables landéniens contiennent une nappe individualisée par la présence d'un substratum imperméable qu'est l'Argile de Louvil. Ils affleurent de façon continue en bordure du domaine d'étude ; cette zone de nappe libre est marquée par la présence de nombreuses émergences [80, 63].

Aux approches de la plaine, la nappe des sables devient captive sous l'Argile des Flandres et peut donner lieu à de l'artésianisme (zone de Clairmarais dans la région de Saint-Omer). Cependant, les caractéristiques physiques des sables en font un aquifère peu propice à des écoulements importants.

. nappe de la craie

A l'échelle régionale, la craie constitue le réservoir aquifère le plus important de la région étudiée. La nappe y est exploitée pour l'alimentation en eau potable et industrielle, en particulier dans les vallées de la Lys et de l'Aa, et le long de la bordure tertiaire au niveau des champs captants de Guînes, Houille, Arques (cf. 1ère partie, chapitre II).

Comme nous le verrons plus en détail, cette répartition est surtout due aux caractéristiques de perméabilités de la craie liées essentiellement au développement par dissolution de la porosité de fissure (perméabilité en grand).

A partir des données géologiques il convient en réalité de distinguer a priori trois nappes distinctes :

. la nappe de la craie du Cénomaniens supérieur principalement représentée dans le bassin de la haute Lys et dans celui de la Hem,

. la nappe du Turonien inférieur qui peut se développer à la faveur de niveaux crayeux,

. la nappe du Séno-Turonien supérieur, captée par la majorité des forages existants ; libre dans la partie sud-ouest de la zone étudiée, elle est de ce fait vulnérable à la pollution (cf. 1ère partie - chapitre III).

Régionalement, des variations latérales de faciès affectent les assises turoniennes qui deviennent plus homogènes d'Est en Ouest avec un faciès crayeux de plus en plus précoce. Les diagraphies de résistivités et les cartes déduites ont ainsi permis de distinguer un domaine franchement crayeux (résistivité supérieure à $40 \Omega \text{ m}$) d'un domaine plus marneux (résistivité inférieure à $40 \Omega \text{ m}$ [26]).

Parallèlement aux coupes qui mettent en évidence les différences de profondeur et d'épaisseur des assises rencontrées, les diagraphies réalisées dans quelques sondages (figure 28) permettent d'observer cette évolution des faciès notamment entre les logs d'Aire-sur-la-Lys, Bayenghem et Marck : d'Est en Ouest, le Turonien devient plus calcaire.

En conséquence, il est permis de considérer que si l'aquifère sénoturonien supérieur représente une unité bien individualisée dans la partie sud, sa communication avec les aquifères sous-jacents s'accroît vers le Nord où on peut admettre à la limite l'existence d'une seule nappe.

Pour le bassin de la moyenne Lys, l'aquifère crayeux étudié est donc limité au Sud par la faille de Pernes, et à sa base par les dièves turoniennes. Comme le montre la carte du toit du Turonien moyen (annexe VII), sa base s'enfonce vers le Nord-Est avec un pendage moyen de 1 à 2% ; les discontinuités créées par les failles déterminent des compartiments avec des rejets pouvant atteindre localement 40 mètres.

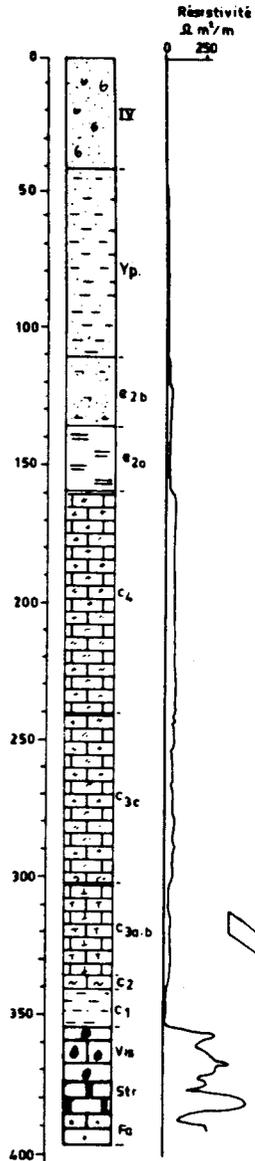
Vers le Nord-Est, les assises crayeuses aquifères s'enfoncent sous le recouvrement tertiaire au-dessous duquel la nappe devient captive (annexe VIII). Le potentiel de la nappe peut alors être suffisant pour permettre le développement des zones à forages artésiens ; il s'agit en particulier des secteurs aux nombreuses cressicultures parfois transformées en étangs d'agrément (régions de Guînes, Ardres, Tilques, Aire-sur-la-Lys [8]).

22 - Piézométrie de référence

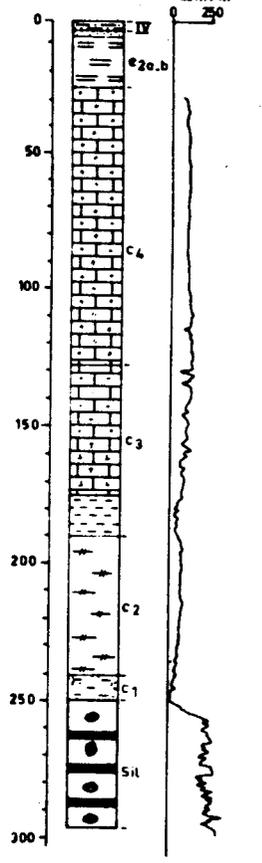
La simulation du réservoir crayeux envisagée dans des conditions de régime permanent implique l'existence d'un état connu du système dans lequel il y aurait stabilité à la fois des débits et des hauteurs piézométriques.

FIGURE 28 : Coupes de sondages et diagraphies dans les bassins de l'Aa et de la Lys.

2-6-4
MARCK
(+5)



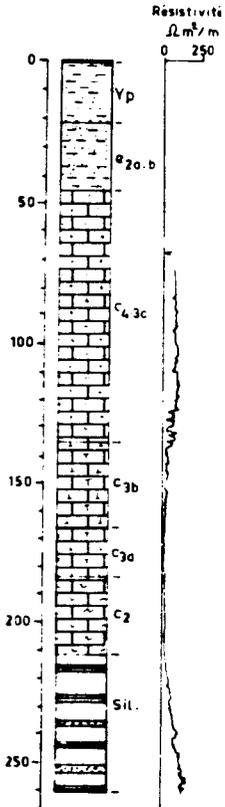
6-8-120
BAYENGHEM
(+30)



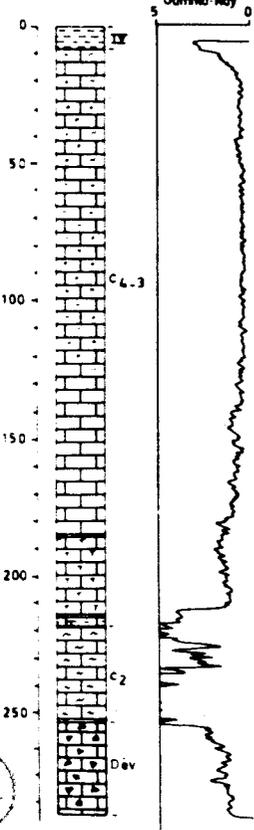
LEGENDE

- 2-6-4 : Indice national
- (+5) : Cote du sol
- IV : Quaternaire
- Yp : Yprésien
- e2b : Landénien sup.
- e2a : Landénien inf.
- C4 : Sénonien
- C3 : Turonien
- C2 : Cénomanién
- C1 : Albien

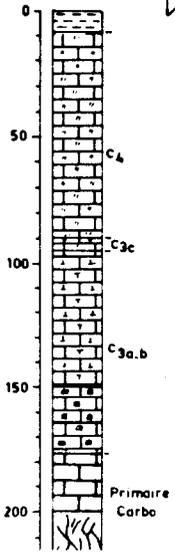
12-8-3
AIRE
(+18,80)



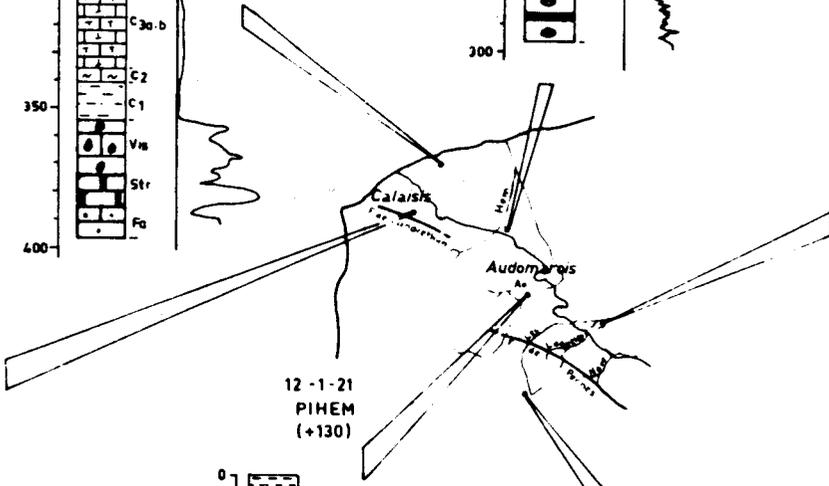
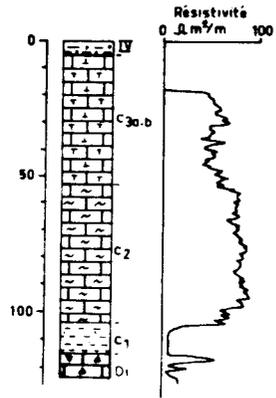
5-4-69
LANDRETHUN-NORD
(+105)



12-1-21
PIHEM
(+130)



18-1-3
VERCHIN
(+95,65)



BNS
CALLE

Quelque soit le modèle adopté, l'estimation de Z_0 par krigeage au point X_0 sera le résultat d'une pondération par voisinage, par moyenne mobile, et sera de la forme :

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i)$$

où les λ_i seront les poids à accorder aux points expérimentaux X_i .

Ces poids seront tels que l'estimation se fera sans biais (moyenne de l'erreur nulle) : $E [Z_0^* - Z_0] = 0$ et que l'erreur quadratique moyenne $E [(Z_0^* - Z_0)^2]$ sera minimale.

Cette pondération ainsi que la précision de l'estimation seront définies dans le krigeage à partir du variogramme ou de la covariance généralisée. Elles seront fonction :

- . de la position relative du domaine à estimer et des points expérimentaux ;
- . de la position relative des points expérimentaux entre eux ;
- . de la structure du phénomène.

Avant de procéder au krigeage, il faudra donc rechercher la structure de la variabilité du paramètre étudié par l'intermédiaire du variogramme dont l'examen permettra de comprendre rapidement la structure du phénomène et la précision que l'on pourra attendre sur l'estimation.

3 - LES DIFFERENTS TYPES DE VARIOGRAMME

31 - Objectif

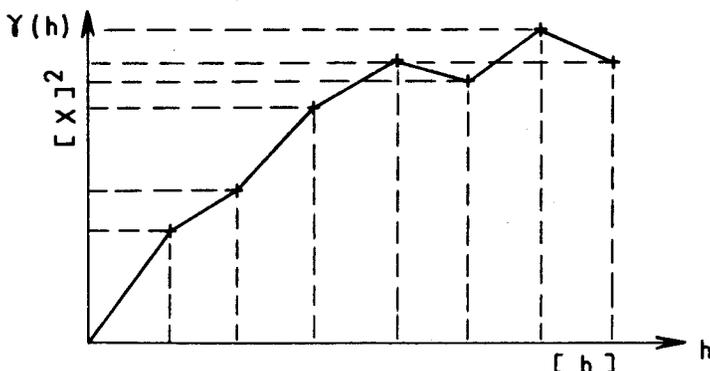
La reconnaissance d'une structure débute par la construction du variogramme expérimental qui sert à visualiser les relations entre la fonction intrinsèque et la distance h . Le variogramme $\gamma(h)$ permet de savoir dans quelle mesure la valeur de la variable en un point ressemble ou non, en moyenne, à ce qui existe dans son entourage distant de h ; il mathématise la notion de zone d'influence d'un échantillon.

Dans le cas général des études cartographiques, les points expérimentaux étant irrégulièrement espacés dans ce plan, on procède à des regroupements par classe de distance et d'angle pour calculer les accroissements quadratiques moyens. La comparaison des comportements du variogramme dans les différentes directions renseigne sur l'anisotropie du phénomène.

32 - Comportement du graphe

La relation entre $\gamma(h)$ et la distance h est matérialisée par un graphe (variogramme expérimental) établi par le calcul d'un nombre de couples de valeurs :

- | | |
|---|--|
| { | . accroissement quadratique (unité de la variable au carré : $[X^2]$) |
| | moyen de la variable X |
| | . distance (unité de longueur de h : $[h]$) |



**MODELISATION DES
ECOULEMENTS**

1 - GENERALITES

La complexité des problèmes d'alimentation et de prélèvement a conduit l'hydrogéologue à appliquer à sa démarche avant tout naturaliste les apports des sciences dites exactes. Outil d'évaluation et de gestion des ressources en eau, les modèles numériques se sont peu à peu substitués aux modèles analogiques physiques, bénéficiant du développement des techniques de programmation informatiques.

Axée sur des prévisions, le but des synthèses hydrogéologiques est alors de réduire les fourchettes auxquelles conduisent les extrapolations nécessaires, de manière à rendre l'outil qu'est le modèle le plus représentatif du milieu naturel. La construction et l'ajustement de modèles ont ainsi représenté un progrès notable dans la connaissance des systèmes aquifères et la simulation des écoulements, notamment sur les points suivants :

- . précision sur les résultats,
- . rapidité des calculs,
- . prise en compte de relations mathématiques rigoureuses correspondant, soit à des lois empiriques (boîtes noires), soit aux lois fondamentales de l'écoulement.

Lieu de difficultés dans le domaine de l'alimentation en eau, la région du Nord a vu la réalisation de nombreux modèles. En particulier, depuis 1973, plusieurs secteurs du domaine crayeux étudié ont fait l'objet de modèles distincts concernant soit le Calaisis [34], soit les bassins de la Hem, de l'Aa et de la Lys [75, 35, 77, 4, 83].

Les différentes simulations effectuées dans le cadre du premier modèle en régime permanent entre la Hem et l'Aa [35] ont montré qu'il était nécessaire d'étendre le domaine pris en compte à la région comprise entre la Hem et la Lys [77]. Le calage de ce dernier modèle en régime transitoire a permis de reconstituer (à l'aide d'un modèle de type TD1) les évolutions piézométriques observées avec une relative précision et de simuler les différentes hypothèses d'exploitation proposées par le District de la région audomaroise [4].

Devant la multiplicité des prélèvements, en particulier par le Syndicat Intercommunal de Distribution d'Eau du Nord, le modèle déjà exécuté a été affiné dans les zones intensément exploitées afin d'examiner l'impact des prélèvements prévus par le groupement FLANDRES-NORD [83].

L'intérêt grandissant porté aux ressources en eau de cette région a conduit à étendre vers le Sud la modélisation, et à réaliser une discrétisation plus poussée, notamment dans les secteurs où se sont développés les forages artésiens [7, 8]. La présente étude reprend ce récent modèle en l'étendant à l'ensemble du Calaisis, l'objectif étant d'aboutir à un calage en régime permanent ; il constitue ainsi la continuité jusqu'à la côte du modèle équivalent réalisé dans le bassin minier [85].

D'une manière synthétique et comparativement aux différents modèles antérieurs, il est caractérisé par :

- . une discrétisation en mailles variables, développée dans les zones de vallée et les secteurs d'intense exploitation,
- . une alimentation due aux précipitations modulée dans l'espace (cf. 1ère partie - ch. I),
- . une recherche de calage à partir des données piézométriques préalablement traitées,
- . un essai de reconstitution des débits artésiens jaugés.

La simulation du comportement hydraulique du réservoir étudié est mise en oeuvre avec le programme NEWSAM⁺ qui, suivant une discrétisation en mailles carrées de tailles variables, calcule la charge hydraulique moyenne en chaque maille

2 - CONSTRUCTION DU MODELE

Le choix du maillage, des limites et des possibilités d'échanges avec l'extérieur du modèle, doivent être fonction non seulement de la distribution des données géologiques et hydrogéologiques, mais encore de la position des zones où des résultats précis sont escomptés. La possibilité de définir des mailles de grande taille permet de réduire le nombre de points de calcul, tout en couvrant une grande superficie.

21 - Conditions aux limites

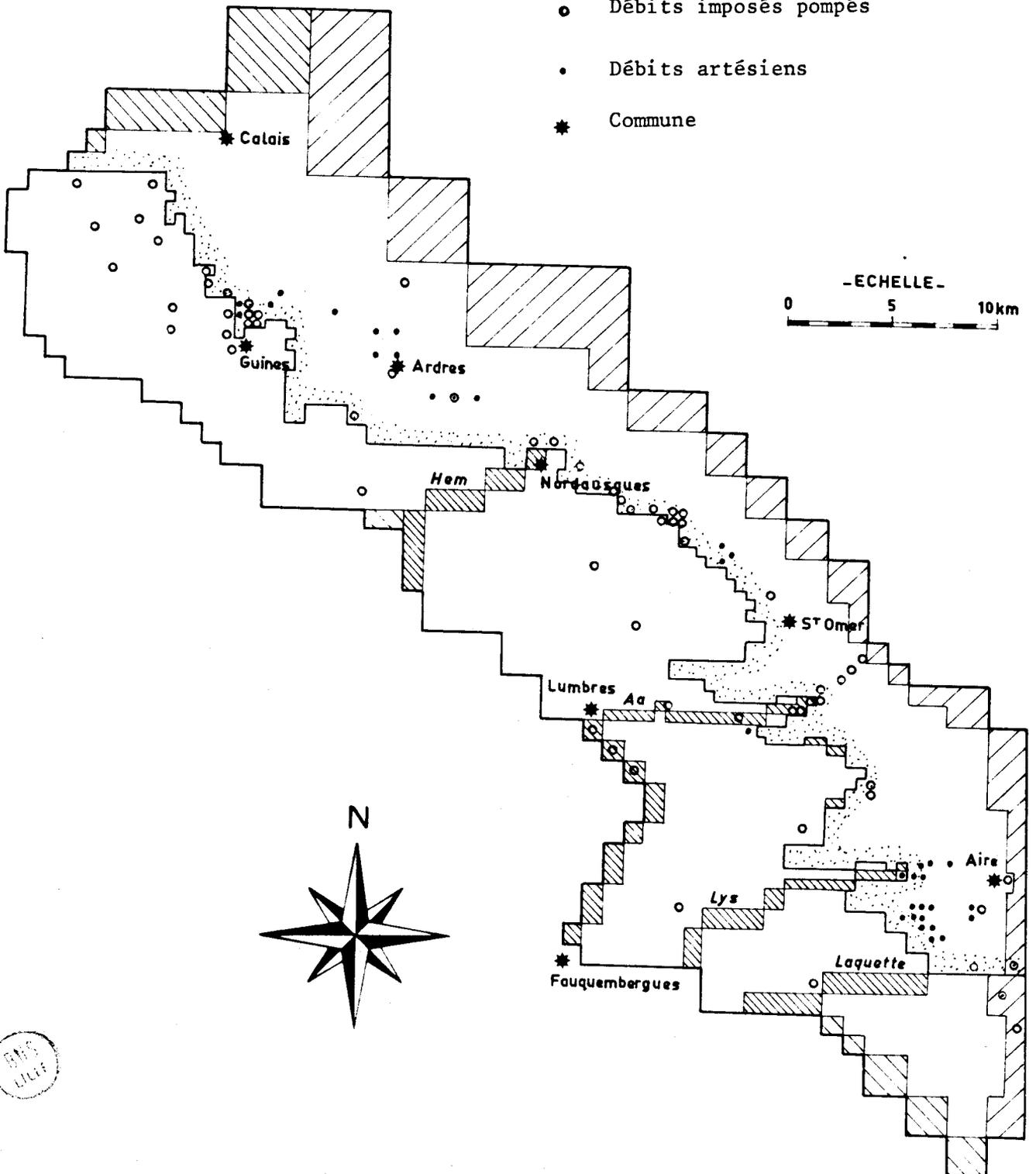
Plusieurs types de conditions aux limites peuvent être pris en compte par le programme utilisé : potentiel imposé ou flux imposé. L'examen de la carte piézométrique (cf. annexe IX), des conditions hydrographiques et structurales, permet de définir les limites suivantes (fig. 31) :

⁺ LEDOUX E : Programme NEWSAM - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - CIG. Notice d'emploi mis à jour en 1978.

CONDITIONS AUX LIMITES
REPARTITION DES PRELEVEMENTS

LEGENDE

-  Zone d'échange rivière-aquifère
-  Zone d'échange aval avec l'extérieur du modèle
-  Zone à potentiel imposé
-  Limite du recouvrement tertiaire
-  Débits imposés pompés
-  Débits artésiens
-  Commune



- . au Nord-Ouest, potentiel imposé par la mer,
- . au Sud-Ouest, potentiel de drain imposé par la Hem jusqu'à Nordausques, par l'Aa jusqu'à Blendecques,
- . au Sud, potentiel imposé par la Lys jusqu'à Mametz, par la Laquette jusqu'à Quernes,
- . une condition similaire a été affichée sur la partie amont de la Melde ainsi que de la Lauborne.

En fait, afin de prendre en compte les prélèvements réalisés le long de ces rivières, ces dernières ont été représentées à l'aide d'une seconde couche située au-dessus de la nappe, permettant de simuler les échanges possibles entre l'aquifère crayeux et les différents cours d'eau. Ainsi, dans chacune des mailles représentant ceux-ci, le drainage fonctionne librement dès que le niveau de la nappe dépasse la cote imposée. Lorsque la nappe baisse au-dessous de cette cote, la zone de drainage se transforme en zone d'alimentation.

Par ailleurs, ne connaissant ni le débit de fuite sous le recouvrement tertiaire, ni celui d'alimentation au niveau de la faille de Pernes, le calcul de ces débits a été possible en affichant des conditions de potentiels imposés sur ces limites.

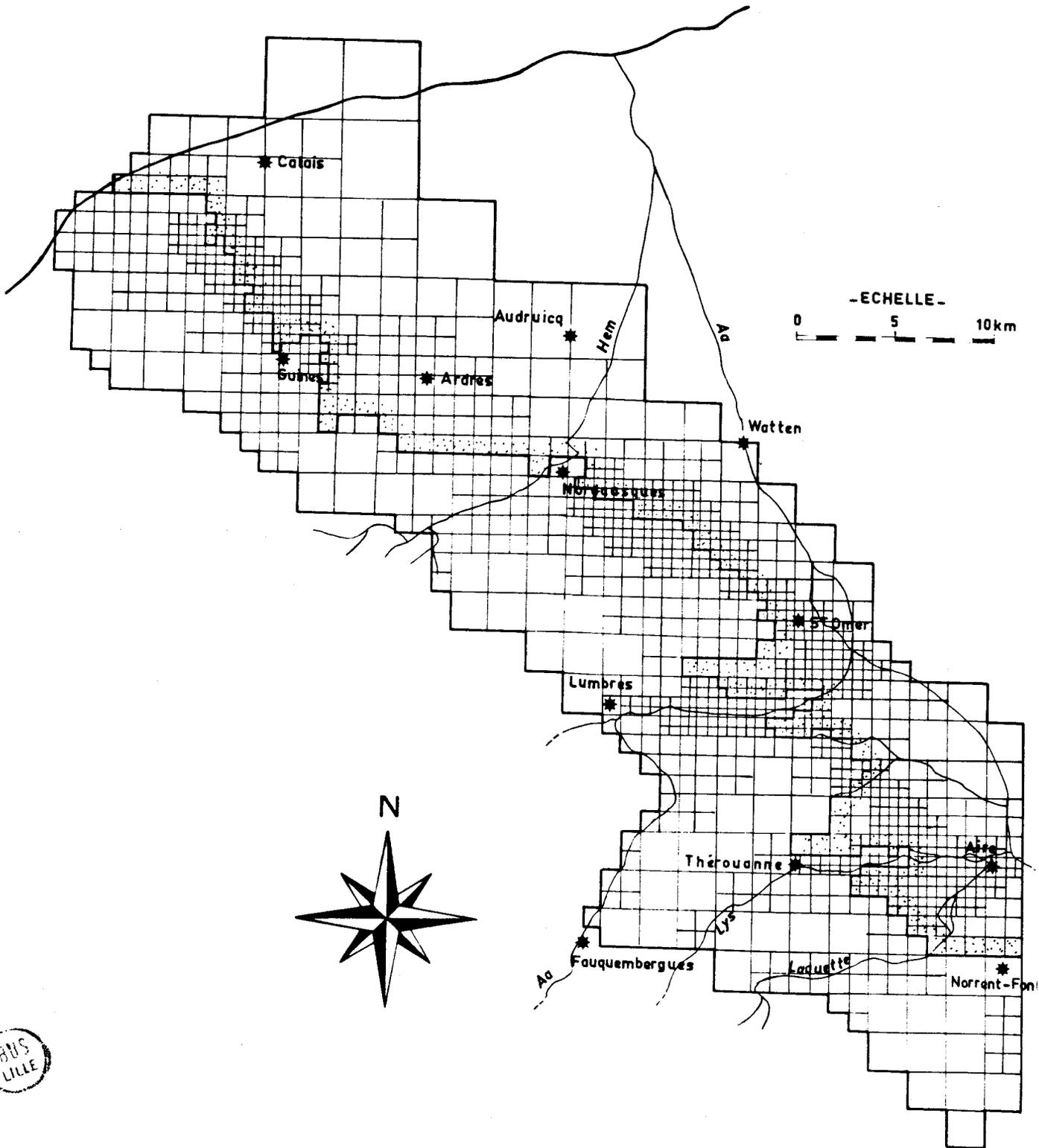
Sur toutes les autres limites, une conditions de flux nul est appliquée automatiquement.

22 - Choix du maillage

A l'intérieur des limites choisies, une discrétisation fine a été fixée en priorité dans les secteurs caractérisés par une des conditions suivantes (fig. 31 et 32) :

- . échanges entre rivière et aquifère sous-jacent,
- . pompages importants,
- . artésianisme développé et intérêt économique des ressources.

FIGURE 32 : Maillage du modèle



BUS
LILLE

Compte-tenu des règles de discrétisation dues au programme utilisé , on aboutit à un modèle de 1245 mailles réparties sur 1071 km² de la manière suivante :

Taille de la maille Couche	Grande 16 km ²	Moyenne 4 km ²	Petite 1 km ²	Micro 0,25 km ²
Zones d'échanges entre rivière et aquifère sous-jacent		1	42	39
Nappe de la craie	6	91	432	736

3 - VARIABILITE SPATIALE DES APPORTS

L'analyse régionale de la répartition des précipitations et de la pluie efficace montre (cf. 1ère partie, chapitre I) que le domaine correspondant au modèle est caractérisé par de grandes variations de l'alimentation naturelle. Importante au niveau de l'axe de l'Artois, celle-ci décroît rapidement en se dirigeant vers les Flandres et vers la côte.

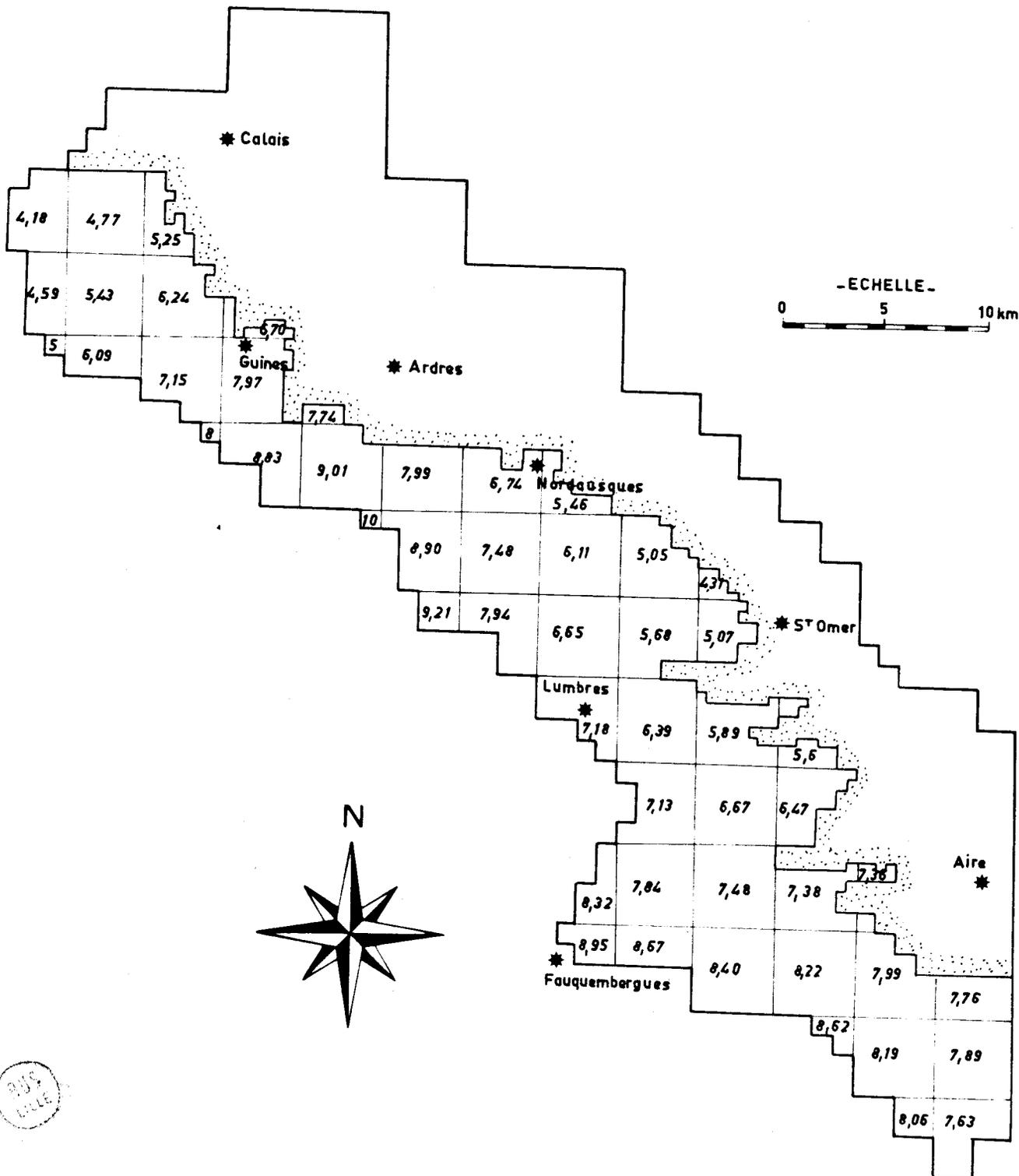
Cette constatation d'un gradient élevé a conduit à appliquer les résultats obtenus lors du krigeage des excédents pour chaque maille de 4 km de côté ; le calcul aux stations réparties sur le domaine d'étude a montré que pour l'année de référence de la piézométrie, l'excédent est environ 25% plus faible que la valeur moyenne sur 20 ans (1956-75).

Par ailleurs, les formations argileuses du tertiaire empêchent l'infiltration des eaux météoriques jusqu'à l'aquifère crayeux en limitant sa surface d'alimentation à environ 530 km².

REPARTITION DE L'ALIMENTATION NATURELLE

LEGENDE

-  Limite d'infiltration
-  6,65 Excédent pour 1'année de référence (l/s.km²)
-  Commune



Au cours du calage, l'infiltration a du être légèrement majorée, conduisant finalement à une pluie efficace moyenne de 207 mm/an, soit un flux moyen de 6,57 l/s.km². Comparée aux études antérieures, la moyenne des valeurs ainsi affichées reste tout à fait semblable pour les bassins de l'Aa et de la Lys, et légèrement supérieure pour le Calaisis ; en outre, une bonne concordance est à noter avec les valeurs calculées dans le cadre du modèle de la Haute-Lys située plus au Sud [29].

Variation du simple au double d'un secteur à l'autre (fig. 33), cette alimentation aura un poids important sur le calage du modèle et la détermination qu'on en déduira des paramètres hydrodynamiques. La différence sera alors sensible avec les résultats obtenus à partir d'une infiltration affectée de manière homogène.

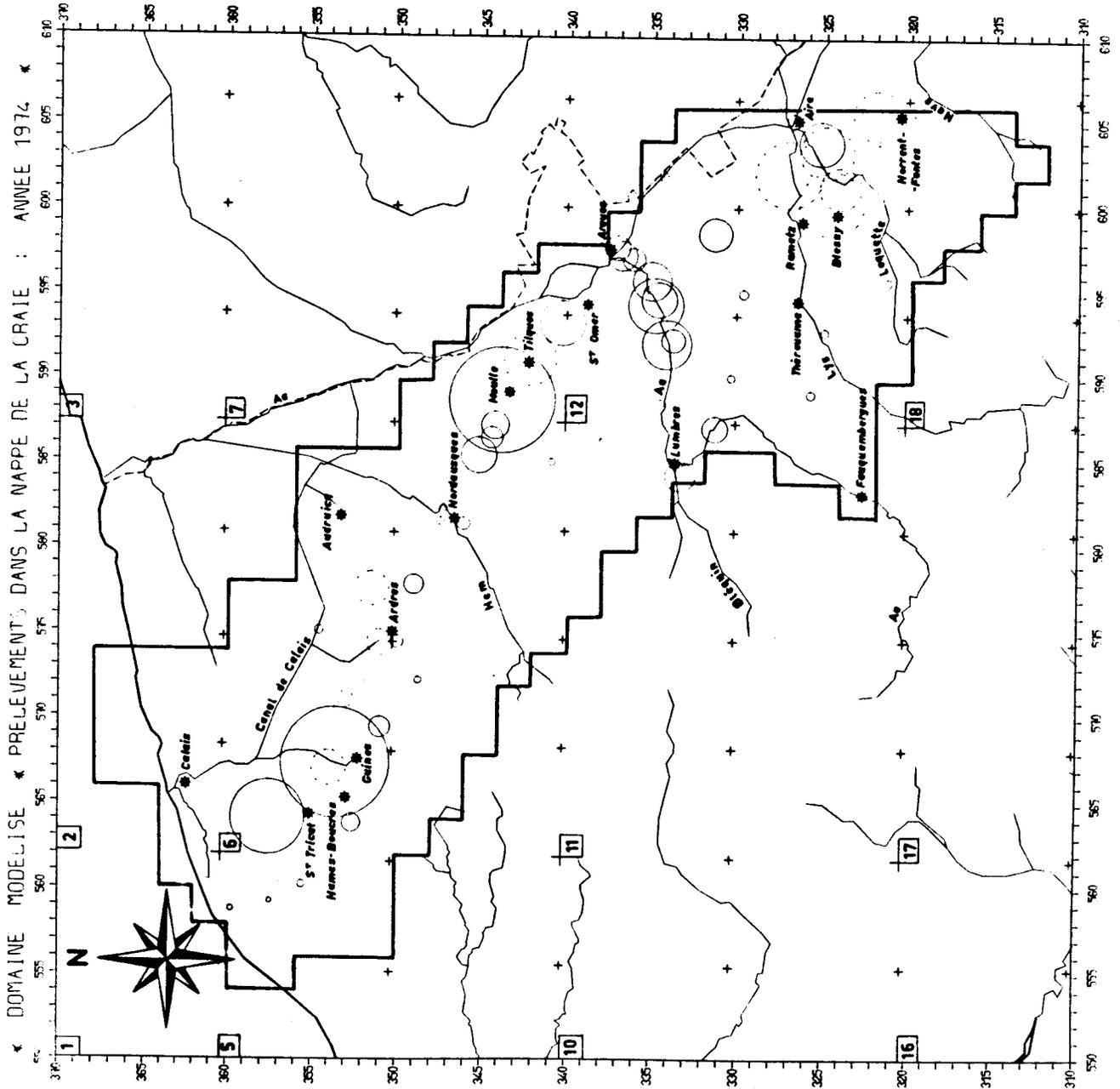
Enfin, parallèlement aux prélèvements importants de la Société Lyonnaise des Eaux et de l'Eclairage à Houille-Moulle, il a été tenu compte de l'alimentation artificielle qui y est réalisée ; en 1974, celle-ci s'est élevée à 150 l/s.

4 - PRELEVEMENTS

D'emblée il faut distinguer les débits pompés dans l'aquifère (AEP, industrie...) de ceux s'écoulant librement vers les rivières. En effet, de nombreux cours d'eau ne véhiculent en fait que le débit de cressonnières ou étangs d'agrément qui s'alimentent par des forages artésiens. Plusieurs recherches du tritium effectuées sur les eaux de ces ruisseaux ont montré par l'absence de cet isotope qu'il s'agit d'eaux infiltrées antérieurement à 1952, date à partir de laquelle eurent lieu de nombreuses explosions thermonucléaires dans l'atmosphère.

Au cours du calage de la piézométrie, une reconstitution des débits artésiens sera également recherchée, notamment dans le secteur d'Aire-sur-la-Lys où le débit des cressonnières est bien connu à partir de jaugeages.

La répartition des prélèvements est soulignée à la figure 34 où la distinction des débits pompés (traits pleins) et artésiens (traits discontinus) met l'accent sur la part relativement importante de ces derniers ; pour plus de clarté ils ont été regroupés par commune.



5 - TRAITEMENT DES DONNEES PIEZOMETRIQUES

Habituellement, la qualité du calage d'un modèle s'estime en comparant les courbes isopièzes déduites des valeurs calculées à celles obtenues sur la carte manuelle (cf. annexe IX). Le krigeage des valeurs expérimentales permet d'estimer sur les mailles précédemment définies une piézométrie moyenne et la précision de cette estimation.

La réestimation (H_K) des données expérimentales (H) représentées par classes de valeurs (fig. 35) permet d'exprimer la reconstitution des données en fonction de leur environnement et de la structure. Les valeurs des écarts-réduits (fig. 36) localisent les secteurs où la piézométrie est la moins bien reconstituée.

Du krigeage général suivant la grille adoptée pour la modélisation résulte une carte piézométrique (annexe XI) où l'on retrouve la même structure générale de l'écoulement. Ces potentiels serviront de référence lors du calage, le programme fournissant à chaque simulation la répartition des écarts réels ($H_C - H_K$) et des écarts réduits $\frac{H_C - H_K}{\sigma_K}$.

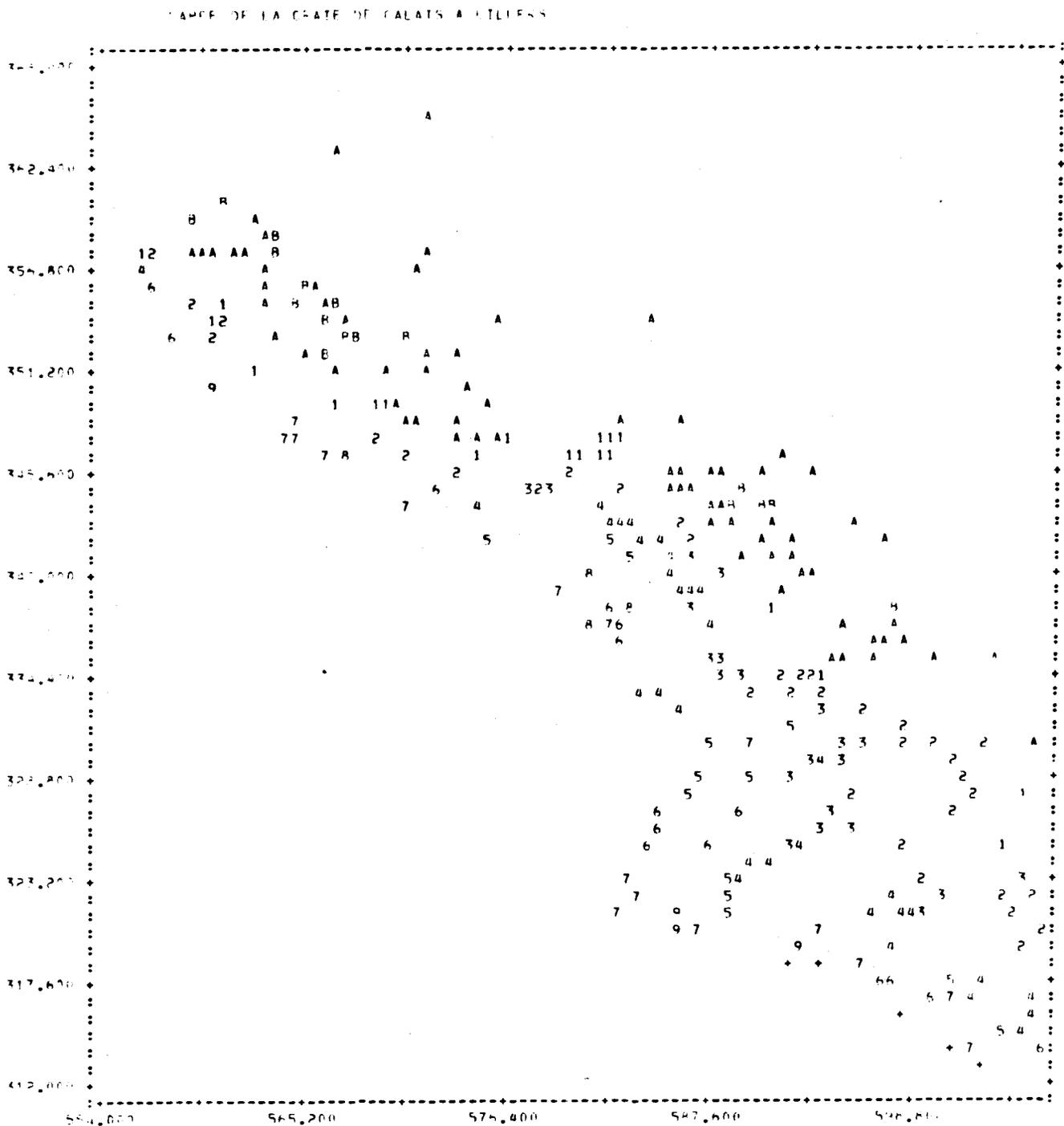
La carte des écarts-types d'estimation (fig. 37) montre une précision satisfaisante sur la majorité des secteurs étudiés. Cependant, les lacunes de données expérimentales, là où le recouvrement tertiaire est développé et au niveau des reliefs les plus marqués, entachent l'estimation d'une incertitude non négligeable.

La précision recherchée lors du calage sera fonction de ces écarts-types. En considérant une fourchette d'incertitude de plus ou moins 3σ , le calage sera jugé satisfaisant dans les zones où l'écart au calage réduit sera inférieur ou égal, en valeur absolues, à trois.

6 - CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

Le programme utilisé calcule la distribution dans l'espace de la fonction potentiel hydraulique représentant le niveau piézométrique de la nappe étudiée. Pour ce faire, il résout l'équation de diffusivité par la méthode des différences finies. En régime permanent, la charge H est indépendante du

FIGURE 35 : Répartition des données piézométriques

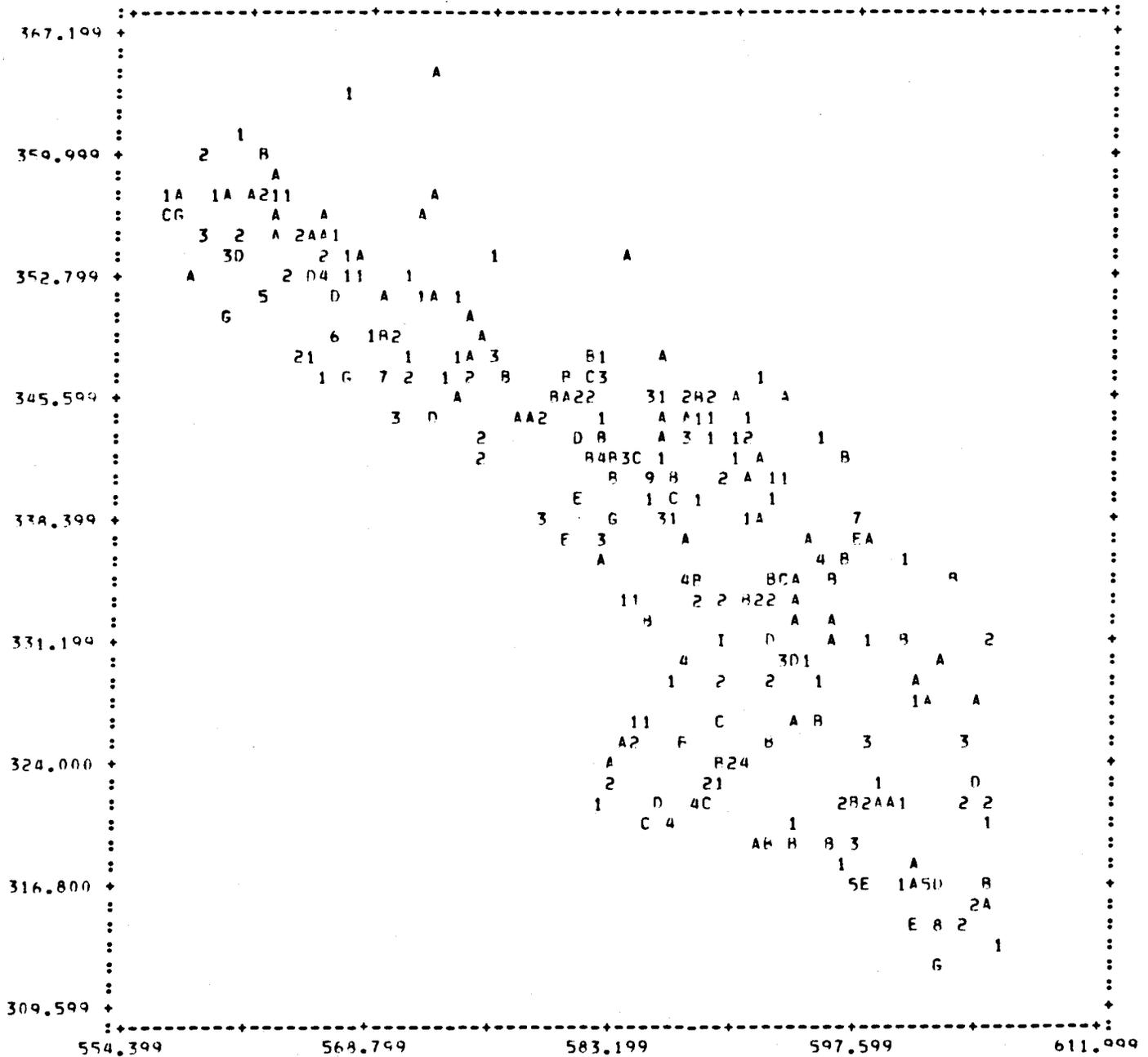


Symbole	Valeurs (m)
C	-20 à -10
B	-10 à 0
A	0 à 10
1	10 à 20
2	20 à 30
3	30 à 40
4	40 à 50
5	50 à 60
6	60 à 70
7	70 à 80
8	80 à 90
9	90 à 100
+	100 et +



FIGURE 36 : Carte des écarts-réduits des données piézométriques reconstituées

MAPPE DE LA CRAIE DE CALATS A LILLERS



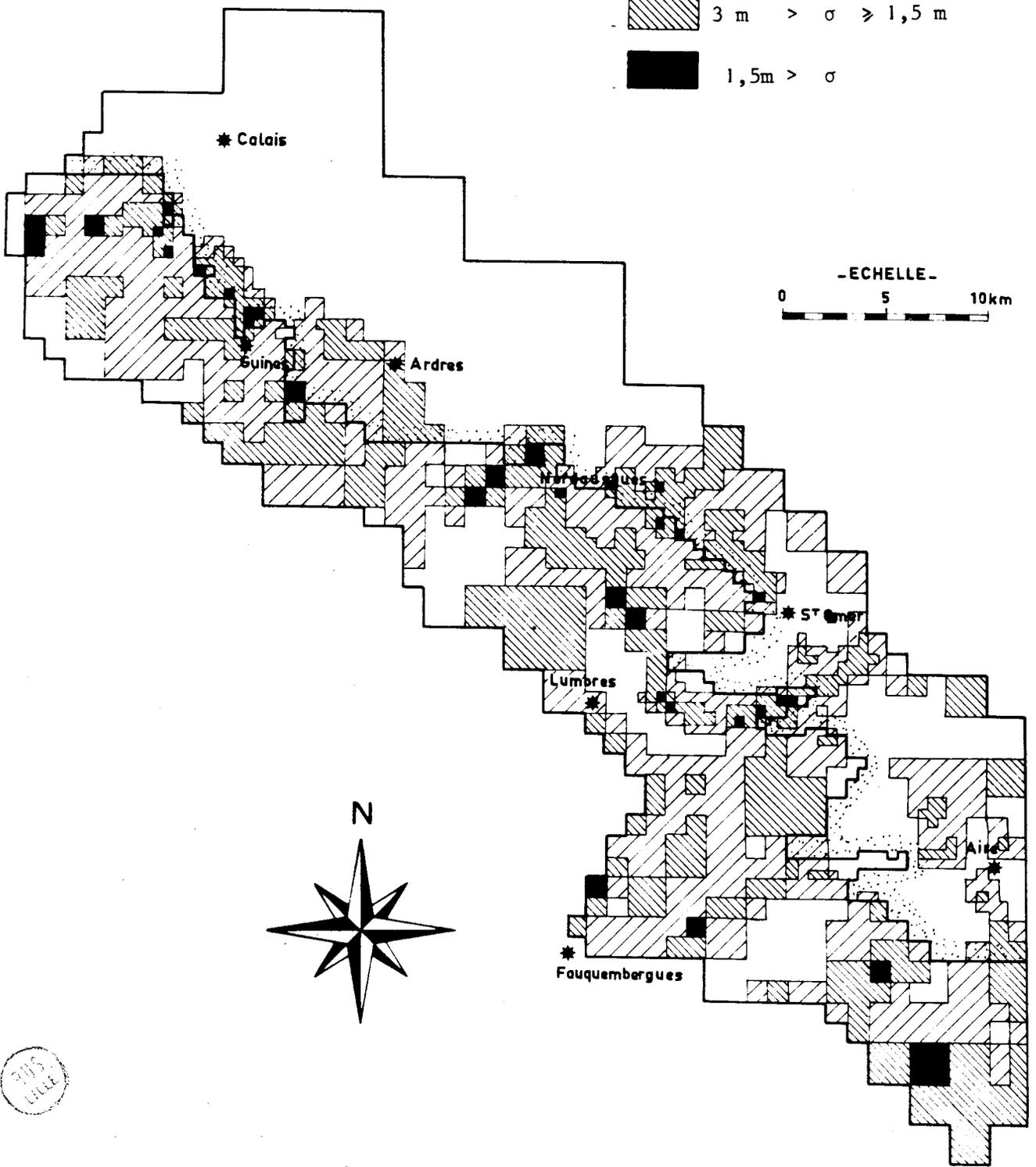
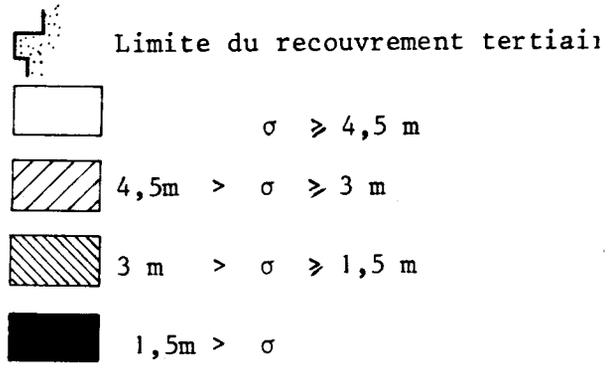
Symbole	Valeurs
G	-3,5 à -3
F	-3 à -2,5
E	-2,5 à -2
D	-2 à -1,5
C	-1,5 à -1,0
B	-1,0 à -0,5
A	-0,5 à 0
1	0 à 0,5
2	0,5 à 1,0
3	1,0 à 1,5
4	1,5 à 2,0
5	2,0 à 2,5
6	2,5 à 3,0
7	3,0 à 3,5



ECARTS-TYPES D'ESTIMATION
DE LA PIEZOMETRIE KRIGEE

FIGURE 37

LEGENDE



temps et $\frac{\partial H}{\partial t} = 0$. En admettant, pour la simplification des calculs, que l'écoulement est bidimensionnel suivant un plan horizontal, l'équation se réduit alors à :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + q = 0$$

où : H est le potentiel hydraulique,

T_x et T_y , la transmissivité selon O_x et O_y de l'aquifère,

q, le débit par unité de surface prélevé ou injecté dans l'aquifère.

Ainsi simplifiée, l'équation devient "aux dérivées partielles" et ne demande plus, pour avoir une solution unique, la connaissance des conditions initiales. Seules les conditions aux limites sont nécessaires. Plus grand sera le nombre de potentiels imposés, plus rapide sera la convergence du calcul réalisé ici par itérations.

61 - Calage de la piézométrie

L'annexe XII permet de comparer la piézométrie de référence à celle calculée lors de la dernière simulation. Afin de préciser les zones où un problème persiste, les isopièzes ont été tracées sur la grille supportant les valeurs des écarts-réduits.

D'une manière générale, la piézométrie moyenne reconstituée par le calcul est très proche de celle de référence. Le secteur situé au Nord de la Hem présente toutefois une piézométrie calculée globalement supérieure à la référence ; nous évoquerons plus loin plusieurs hypothèses sur ce problème local.

62 - Bilan des flux

Pour l'ensemble du modèle, le bilan des flux exprime l'égalité entre les débits entrants et sortants, puisqu'en régime permanent le volume stocké est nul.

Au Sud, le flux transitant par la faille de Pernes correspond à un débit entrant de 312 l/s, soit un flux moyen important de 27 l/s/km.

Enfin, pour l'ensemble du modèle il convient d'observer le volume considérable des prélèvements en nappe qui s'élèvent au total à 2722 l/s, soit environ 86 millions de m³/an. Parmi ceux-ci, l'artésianisme prend une place remarquable avec 27 millions de m³/an, soit 32% du volume total prélevé.

La reconstitution de ces débits a été simulée en imposant un potentiel de drain en chaque maille où existent des forages artésiens. Le calage a été affiné en particulier dans les secteurs où les jaugeages des cours d'eau qui évacuent essentiellement les exhaures des cressonnières en donnent une bonne appréciation. Le tableau suivant permet ainsi de vérifier la qualité de l'ajustement du modèle :

Zone d'artésianisme	Débit observé (l/s)	Débit calculé (l/s)
Guînes - St-Tricat	35 (estimation)	8
Andres	9 (estimation)	6
Ardres	> 25 (estimation)	130
Nielles-lez-Ardres	?	176
Tilques	50	38
Airois		
Indice national des forages	Exutoire	(Jaugeages)
12-6-146 à 149)		
12-7-440 à 509)	Petite Lys	104
12-7-525 à 589)		105
12-7-865 à 867)		
12-7-420 à 439)	Le Bruveau	53
12-7-063 à 107)		54
12-7-142)		
12-7-152 à 163)	Le Mardyck	205
12-7-169 à 240)		234
12-7-254 à 419)		
12-7-602 à 760)	La Laque	101
		107

63 - Répartition des transmissivités après calage

Si dans des zones intensivement connues on peut comparer utilement les valeurs des transmissivités expérimentales krigées avec celles obtenues après calage, dans le domaine d'emprise du modèle réalisé ici, leur nombre limité (cf. figure 23) ne permet une analyse critique des transmissivités de calage que localement. Aussi, le krigeage des données de transmissivités effectué suivant une grille régulière n'a été utilisé que pour initialiser le modèle.

Après la dernière simulation, la répartition des transmissivités permet de distinguer plusieurs secteurs (figure 38) :

- en limite Sud-Ouest, les régions à fort gradient piézométrique sont marquées par des faibles transmissivités. Elles varient entre 6.10^{-5} et 8.10^{-4} m²/s à proximité du Boulonnais, et entre 2.10^{-4} et 2.10^{-3} au contact de la faille de Pernes,

- les plateaux situés aux divers interfluves de la Hem à la Laquette sont caractérisés par des valeurs toujours inférieurs à $.10^{-2}$ m²/s, et en moyenne égales à $2,5.10^{-3}$ m²/s. Localement, elles atteignent même 2.10^{-4} (dôme piézométrique au Sud-Est de Lumbres),

- en limite Nord-Est, l'aquifère captif éloigné de la limite du recouvrement tertiaire ne permet pas le transit d'un flux important. Les transmissivités obtenues y ont une valeur moyenne de $2,3.10^{-3}$ m²/s,

- dans les vallées, les transmissivités sont bonnes, en particulier pour l'Aa (de 2.10^{-3} à 2.10^{-2} m²/s), la Laquette (de 1.10^{-3} à 3.10^{-2} m²/s) et surtout la Lys (de 6.10^{-3} à 4.10^{-2}),

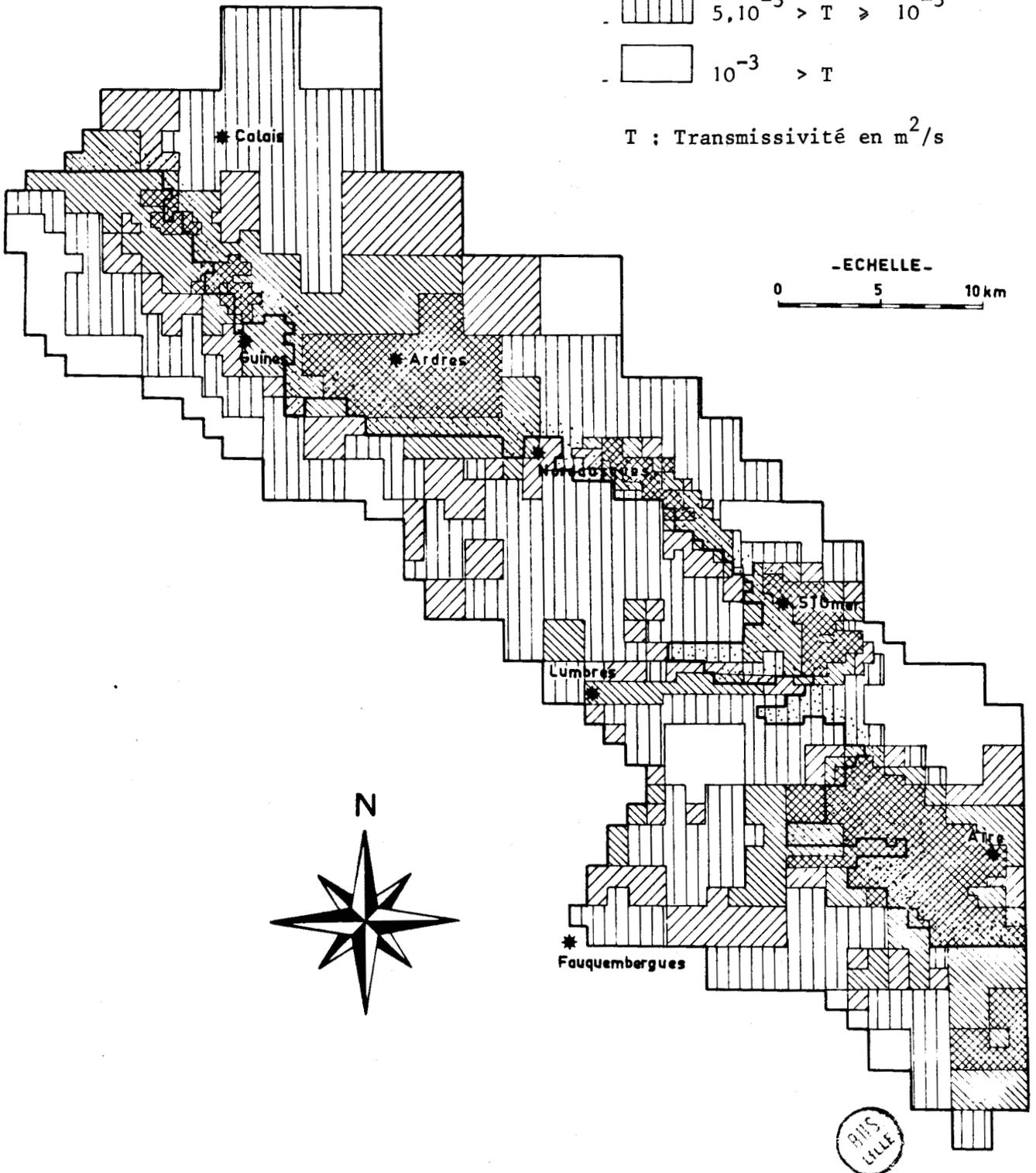
- les plus fortes transmissivités correspondent à la mise en captivité de la nappe sous le recouvrement argileux du Tertiaire. On peut distinguer successivement du Nord au Sud les secteurs de Nielles-lez-Calais - Guînes ($1.10^{-2} \leq T \leq 3.10^{-2}$) d'Ardres ($1,5.10^{-2} \leq T \leq 3.10^{-2}$), d'Eperlecques-Moulle ($1,2.10^{-2} \leq T \leq 3.10^{-2}$), Saint-Omer-Blendecques ($1.10^{-2} \leq T \leq 3.10^{-2}$) et la région d'Aire où la zone de très bonnes transmissivités ($2,5 \leq T \leq 4.10^{-2}$) est particulièrement étendue.

REPARTITION DES TRANSMISSIVITES APRES CALAGE

LEGENDE

-  Limite du recouvrement tertiaire
-  $5,10^{-2} > T \geq 2,5 \cdot 10^{-2}$
-  $2,5 \cdot 10^{-2} > T \geq 10^{-2}$
-  $10^{-2} > T \geq 5 \cdot 10^{-3}$
-  $5,10^{-3} > T \geq 10^{-3}$
-  $10^{-3} > T$

T : Transmissivité en m^2/s



Si d'une manière générale le calage de la piézométrie permet d'accepter la représentativité des transmissivités obtenues, le secteur d'Ardres laisse apparaître une zone de bonnes transmissivités particulièrement grande. Néanmoins la recherche d'un calage mieux ajusté est apparue illusoire compte tenu de la référence piézométrique elle-même très imprécise.

Différentes hypothèses peuvent alors être émises quant à cette difficulté de calage :

L'imprécision sur les données est la première caractéristique du secteur : au faible nombre de données piézométriques (pris en compte par le krigeage avec des écarts-types élevés) s'ajoute l'incertitude sur les débits artésiens ; ces volumes prélevés n'ont été jaugés qu'approximativement (secteurs d'Ardres et d'Andres) ou restent même inconnus (Nielles-les-Ardres). Par ailleurs les données de transmissivités ou débits spécifiques disponibles sont rares.

L'existence d'une relation avec la nappe des sables sus-jacente pourrait être une hypothèse. Une communication entre les deux nappes par drainance vers le haut limiterait la charge hydraulique de la nappe crayeuse ; elle justifierait une modélisation en bicouche dans ce secteur. Une telle relation pourrait être facilitée par les accidents qui affectent les aquifères (faille de Zouafques-Balinghem).

Les différentes assises crétacées du bassin de la Hem pourraient également représenter des unités hydrauliques plus indépendantes. L'alimentation importante à l'amont (assises du Turonien et du Cénomaniens) n'intéresserait alors que peu la nappe du Séno-turonien supérieur.

Enfin, une infiltration efficace réduite peut être une dernière hypothèse : les formations plus marneuses seraient alors le siège d'un ruissellement non négligeable dans ce secteur ; l'alimentation s'en trouverait d'autant diminuée, permettant une piézométrie plus basse à l'aval.

Quelle que soit l'hypothèse de travail, seule une meilleure connaissance des données expérimentales pourrait contribuer à un ajustement plus représentatif du modèle dans ce secteur. Quoiqu'il en soit, ce modèle est dès lors prêt à répondre à toutes questions concernant de nouveaux prélèvements ou aménagements de la nappe.

CONCLUSION GENERALE

La seule eau qui peut être considérée comme une ressource potentielle pour l'homme est une partie de l'ensemble des précipitations qui tombent à la surface du sol. Dans la région Nord Pas-de-Calais, celles-ci peuvent être estimées à 11050.10^6 m³/an.

En fait, les ressources renouvelables assurées par l'alimentation moyenne annuelle des aquifères sont évaluées à cette échelle à 2280.10^6 m³/an. Les prélèvements moyens s'élevant à 420.10^6 m³/an pour les eaux souterraines et 160.10^6 m³/an pour les eaux de surface, il n'y a apparemment aucun risque de déséquilibre entre les prélèvements et les ressources renouvelables. Ces chiffres masquent toutefois une hétérogénéité certaine car à côté de zones peu exploitées, on connaît des zones à prélèvements concentrés où des risques de déséquilibre apparaissent. La carte des prélèvements souligne cette réalité. La répartition spatiale de ces derniers est liée aux besoins mais surtout à l'aptitude des aquifères à permettre les écoulements. C'est pourquoi bon nombre de forages d'exploitation sont implantés dans les vallées et aussi à la limite du recouvrement tertiaire où le degré de fissuration est particulièrement important.

On remarquera que les eaux souterraines couvrent 70 % des besoins en eau de la région, ce qui représente un pourcentage important comparativement au 22 % de la moyenne nationale. Si l'on se réfère à la seule demande en eau potable, le taux de couverture par les eaux souterraines atteint 97 %. Dans ce domaine, le département du Nord (Arrondissements de Dunkerque et de Lille) est en partie tributaire des ressources en eau du Pas-de-Calais. L'évolution récente des volumes exploités indique une tendance à la diminution des prélèvements d'eau destinés à des fins industrielles (- 5 % par an) et une légère croissance (+ 1,9 % par an) de ceux réalisés pour l'alimentation en eau potable.

Ces ressources n'étant pas inépuisables, il est indispensable de les préserver et de les contrôler. A cette fin, la carte de vulnérabilité des eaux à la pollution a été conçue pour orienter l'étude et l'application de

mesures visant à la conservation et à la protection des eaux souterraines. Elle se justifie d'autant plus que les caractéristiques physico-chimiques de l'aquifère crayeux témoignent dans certains secteurs (bassin minier en particulier) d'une dégradation effective entraînant une limitation de la ressource.

L'examen simultané de ces différents documents conduit à porter un intérêt tout particulier aux bassins de l'Aa et de la Lys. Ces derniers présentent des eaux de bonne qualité et sont proches de secteurs où la demande est croissante. Avant de se lancer dans des investissements, il convient de mieux cerner la ressource existante et surtout d'élaborer un outil de gestion afin d'évaluer l'impact de nouveaux prélèvements. Même si les paramètres de ce modèle qui représentent les propriétés locales en chaque point du milieu sont parfois mal connus, l'analyse du comportement du milieu réel et du modèle sous les mêmes contraintes externes permettent de caler un tel modèle, c'est-à-dire de le rendre représentatif du milieu naturel.

Sur l'ensemble du secteur d'étude, les débits pompés en nappe s'élèvent à $59.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ auquel il faut ajouter $27.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ s'écoulant librement dans les eaux superficielles (forages artésiens), chiffre qui'il convient de comparer à l'alimentation qui s'élève à $115.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$. Les prélèvements représentent donc 63 % des sorties alors que l'infiltration efficace atteint 85 % des entrées.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par le calage du modèle de la nappe de la craie du bassin minier du Nord Pas-de-Calais où les prélèvements représentent 95 % des sorties montre que l'aquifère est sollicité de manière très différente.

Le bassin de l'Aa et de la Moyenne Lys ne doit en aucun cas être considéré comme étant surexploité. Tout en participant à l'évaluation des ressources hydrauliques, le modèle entrepris permet de simuler la croissance d'éventuels prélèvements.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- ADER - REGION NORD-PAS-DE-CALAIS (1980) : Atlas géographique régional
- AGENCE DE BASSIN ARTOIS-PICARDIE (1973) : Livre blanc du bassin Artois-Picardie
- ALBINET M., MARGAT J. (1970) : Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull. B.R.G.M., III, n° 4, p. 13-22
- AURIOL, TALBOT A. (1977) : Modèle de gestion des ressources en eau de la région comprise entre la Hem et la Lys. Rapport B.R.G.M. 77 SGN 213 NPA
- BAILLY S., KLESZCZ J.P. (1977) : Etude hydrogéologique des rivières drainant le Cénomaniens dans le Nord de la France. Note B.R.G.M. 77 NPA 70
- BECKELYNCK J. (1978) : Essai d'application de mesures physiques au traçage en milieu non saturé. DEA-LILLE
- BECKELYNCK J., TALBOT A. (1980) : Exploitation saisonnière de la nappe de la craie dans le bassin de la Moyenne-Lys pour le renforcement du débit d'étiage de la rivière. Modélisation de l'aquifère. Rapport B.R.G.M. 80 SGN 840 NPC
- BECKELYNCK J., TALBOT A. (1981) : Commune d'Hazebrouck (Nord) - Gestion des ressources en eau dans le secteur d'Aire-sur-la-Lys (Pas-de-Calais). Rapport B.R.G.M. 81 SGN 102 NPC
- BECKELYNCK J., TALBOT A. (1981) : Agence de l'eau Artois-Picardie-DOUAI (Nord) - Mémorisation et exploitation des données chimiques dans le Groupement de bassins Artois-Picardie - Années 1975 - 1976 - 1977. Rapport B.R.G.M. 81 SGN 371 NPC
- BERNARD D. (1976) : Contribution à l'étude de la pollution de la nappe de la craie dans les régions minière et lilloise. U.S.T. LILLE - DEA Géologie appliquée
- BERNARD D., CAULIER P., CREMILLE L., 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. Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation, Colloque national-ORLEANS
- BERNARD D. (1979) : Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse de 3ème cycle - U.S.T. LILLE
- BERNARD D., BOSCH B., MARCE A. (1979) : Communauté Economique Européenne - Diagnostic des pollutions agricoles dans les eaux souterraines pour les isotopes du milieu. Rapport B.R.G.M. 79 SGN 141 NPC/MGA
- BESBES M. (1978) : L'estimation des apports aux nappes souterraines - Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse Docteur ès-sciences, Université Paris VI
- BESBES M., MARSILY G. de (1977) : Modèle des débits de la Lys à Ludy. Calage d'une fonction de transfert pluie-débits sur l'historique 1970/1975. Rapport CIG-EMP/ABAP

- 16 BESBES M., MARSILY G. de (1977) : Modélisation des écoulements sous terrains dans le bassin de la Haute-Lys. Rapport CIG-EMP/ABAP
- 17 BESBES M., DUERMAEL G., LEDOUX E., MARSILY G. de, TALBOT A. (1981) Soutien des étiages d'une rivière par pompage dans la nappe qu'elle draine : mythe ou réalité ?. Bulletin B.R.G.M., III, n° 1, 1980/19 pp. 1-17
- 18 BIAYS P. : Esquisse climatologique du Nord de la France
- 19 BLANCHARD R. (1902) : La pluviosité de la plaine du Nord de la France. Annales de Géographie, tome XI - A. COLIN éditeur
- 20 BODELLE J., TIRAT M. (1977) : "Utilisation des eaux souterraines en France". Colloque Nice, thème II, rapport général
- 21 BODELLE J., MARGAT J. (1980) : "L'eau souterraine en France". Collection "Les objectifs scientifiques de demain". MASSON éditeur
- 22 BONTE A. (1967) : L'argile à silex. Bulletin liaison labo. routier Ponts et Chaussées, n° 24
- 23 BRAILLON J.M. (1975) : Contribution à l'étude des caractères hydrogéologiques des régions minière et lilloise en vue de leur synthèse cartographique. Thèse 3ème cycle, U.S.T. LILLE
- 24 BRAILLON J.M., CAULIER P., CREMILLE L., MANIA J., PHILIPPART A., ROSSIGNOL F. (1977) : Données nouvelles sur les caractéristiques hydrauliques de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Utilisation du micromoulinet. 5ème réunion annuelle des Sciences de la Terre-RENNES
- 25 CASTANY G. (1963) : Traité pratique des eaux souterraines. DUNOD éditeur PARIS
- 26 CAULIER P. (1974) : Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse 3ème cycle - U.S.T. LILLE
- 27 CELET P. (1969) : Géologie du Cambrésis et des régions environnantes. S.G.N. annales - Tome LXXXIX - LILLE
- 28 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. Annales Société géologique du Nord
- 29 CHILES J.P. (1975) : Programme GAMMA-ENSMP-CMM - PARIS (non publié)
- 30 COLBEAUX J.P., 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. 2ème colloque d'hydrologie en pays calcaire. Annales scientifiques de l'Université de Besançon, fascicule 25, 3ème série
- 31 CRAMPON N. (1976) : L'eau dans le Nord de la France

- 32 CREMILLE L., DASSONVILLE G., RAMON S., SOULIEZ G., WATERLOT G. (1970) : Hydrogéologie dans la région du Nord. Annales Société géologique du Nord, tome XC, fascicule 4, p. 429/442
- 33 CREMILLE L., GOUSTARD R. (1974) : Alimentation en eau de Saint-Omer et de Dunkerque. Rapport B.R.G.M. 74 SGN 110 NPA
- 34 CREMILLE L., MANIA J. (1974) : Etude des ressources en eau du Calaisis - Bilan de la nappe de la craie - Elaboration d'un modèle mathématique général. Rapport B.R.G.M. 74 SGN 367 NPA
- 35 CREMILLE L., RICOUR J. (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
- 36 DEGALLIER R. (1972) : Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO. Bulletin B.R.G.M., (2), III, n° 3
- 37 DELAROZIERE-BOUILLIN O. (1971) : Utilisation comparée des formules de THORNTWAITE, TURC mensuelle, TURC annuelle et PENMAN, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne - Application au territoire français. Rapport B.R.G.M. 71 SGN 173 HYD
- 38 DELATTRE C. (1969) : Les grands traits géologiques de l'Artois. In S.G.N. annales, tome LXXXIX LILLE
- 39 DELHOMME J.P. (1974) : La cartographie d'une grandeur physique à partir de données de différentes qualités. Mémoires de l'Association Internationale des Hydrogéologues, tome XIII, (1), pp. 25/39
- 40 DELHOMME J.P. (1976) : Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse docteur-ingénieur PARIS VI
- 41 DELPORTE B. (1978) : Calcul automatique des excédents par la méthode de THORNTWAITE - Programme BILAN. Rapport B.R.G.M. 78 SGN 470 NPA
- 42 DELPORTE B. (1979) : Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique - Application au bassin de la Sambre (Nord de la France). Thèse de 3ème cycle, U.S.T. LILLE
- 43 EMSELLEM Y., PRUDHOMME P. (1967) : Traitement des mesures hydrogéologiques à l'aide des modèles. Annales des mines
- 44 EMSELLEM Y. (1977) : Conservation et gestion des ressources - Réglementation des exploitations - Rapport général. Colloque Nice, thème V
- 45 ERB F. (1979) : Toxicologie humaine des produits azotés. In le problème de l'azote dans les eaux par G. MARTIN - Technique et documentation éditeur
- 46 FOURNAU M. (1971) : L'alimentation en eau de la région lilloise. A.G.H.T.M. - Congrès de Lille - 19/5/1971 - T.S.M.-L'EAU, n° 7, 1971

- 47 GOSSELET J. (1904) : Etudes hydrogéologiques - Les nappes aquifères de la craie au Sud de Lille. Société géologique du Nord, tome XXXIII, LILLE, pp. 133/156
- 48 GRILLOT H., LEMOINE B., MONITION L. (1973) : Documentation sur les pollutions industrielles. Rapport B.R.G.M. 73 SGN 439 AME
- 49 GUILLAUME A. (1977) : Analyse des variables régionalisées - Traitement du signal en Sciences de la terre. DOIN éditeur, PARIS
- 50 JEGAT H. (1975) : Etude expérimentale et simulation d'écoulement de fluides miscibles en milieux poreux non saturés. Thèse docteur-ingénieur GRENOBLE
- 51 JOURDAIN E., TALBOT A. (1980) : Conseils généraux du Nord-Pas-de-Calais - Annuaire piézométrique des nappes du Nord de la France - Evolution relative d'ouvrages sélectionnés (période de 1965 à 1979 inclus). Rapport B.R.G.M. 80 SGN 335 NPC
- 52 JOURNET J.M., RAMON S. (1969) : Pollution de la nappe de la craie dans le bassin de la Deûle. Rapport B.R.G.M. 69 SGL 119 NPA
- 53 JOURNET J.M., RAMON S. (1971) : Chimisme de la nappe de la craie dans la région lilloise. Rapport B.R.G.M. 71 SGN 209 NPA
- 54 LAFFITTE P., RICOUR J. (1959) : L'inventaire des ressources hydrauliques métropolitaines - Application aux départements du Nord et du Pas-de-Calais. Annales des mines, mai 1959, pp. 294/307
- 55 LAFFITTE P. (1972) : Traité d'informatique hydrogéologique
- 56 LALLEMAND-BARRES A. (1970) : La méthode tensiométrique pour l'étude des mouvements de l'eau dans la zone non saturée. Rapport B.R.G.M. 72 SGN 295 AME
- 57 LALLEMAND-BARRES A. (1972) : La station expérimentale de l'étude des mouvements de l'eau dans la zone non saturée du Service géologique national à ORLEANS-LA SOURCE. Rapport B.R.G.M. 72 SGN 295 AME
- 58 LEDOUX E. (1978) : Programme NEWSAM - Principe et notice d'emploi - Mise à jour janvier 1978. E.N.S.M.P. - Centre d'informatique géologique
- 59 LEDOUX E. (1980) : Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse docteur-ingénieur, E.N.S.M.P. PARIS/LHM/RD/80/57
- 60 LEROUX E., RICOUR J., WATERLOT G. (1960) : Synthèse des connaissances acquises à la date du 1/1/1960 sur les ressources aquifères des départements du Nord et du Pas-de-Calais. Rapport A. 1581
- 61 LEROUX E., RICOUR J., WATERLOT G. (1962) : Mise au point sur les besoins et les ressources en eau de la région du Nord. Bulletin B.R.G.M., n° 4, 1962

- 62 LIVET M. (1976) : Etude hydrogéologique des formations de pente de la butte d'Amance. Laboratoire des Ponts et Chaussées, rapport 52
- 63 MANIA J. (1971) : Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens en Flandres Franco-belges et dans le bassin d'Orchies. Thèse de 3ème cycle, U.S.T. LILLE
- 64 MANIA J. (1978) : Gestion des systèmes aquifères - Application au Nord de la France. Société géologique du Nord, mémoire XV
- 65 MARGAT J., MONITION L. (1970) : Qualité des eaux - Pollutions. Bulletin B.R.G.M. III, n° 4, pp. 5/12
- 66 MARSILY G. de (1976) : Cours d'hydrogéologie. E.N.S.M.P.-LHM/RD/75/37
- 67 MARSILY G. de (1978) : De l'identification des systèmes hydrogéologiques. Thèse docteur ès-sciences, Université PARIS VI
- 68 MARTIN F., THEBAULT P. (1981) : La flottation à l'usine de Moulle. La technique de l'Eau et de l'Assainissement, n° 409
- 69 MATHERON G. (1969) : Le krigeage universel. Les cahiers du C.M.M. de Fontainebleau, fascicule 1
- 70 MATHERON G. (1970) : La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du C.M.M. de Fontainebleau, fascicule 5
- 71 PARASCANDOLA M.F. (1980) : Vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution - Essai d'analyse sémantique - Essai de représentation cartographique. U.S.T. Languedoc-MONTPELLIER
- 72 PETIT-RENAUD G. (1976) : Climat de la Métropole Nord. Comité d'expansion de la Métropole Nord
- 73 PIERSON G. (1978) : Sondage de reconnaissance : commune de Pecquencourt Diagramme d'écoulement par mesure du micromoulinet. C.G.T.H.-S.A.D.E. (17)
- 74 RAMON S., PHILIPPART A. (1972) : Chimisme de la nappe de la craie dans la région du Douaisis. Rapport B.R.G.M. 72 SGN 170 NPA
- 75 RAMON S. (1973) : Vallée de l'Aa d'Esquerdes à Arques. Réalisation d'un modèle mathématique de la nappe de la craie en régime permanent. Rapport B.R.G.M. 73 SGN 061 NPA
- 76 REMENIERAS G. (1959) : Eléments d'hydrologie appliquée. A. COLIN éditeur
- 77 RICOUR J. (1975) : Inventaire des ressources en eau de 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
- 78 ROCHE (1963) : Hydrologie de surface. GAUTHIER-VILLARS éditeur-PARIS - O.R.S.T.O.M.

- 79 ROUSSELOT D., PEYRIEUX J.C. (1976) : Proposition pour une loi de distribution des perméabilités et des transmissivités. Rapport B.R.G.M. 76 SGN 337 AME
- 80 SANGNIER P. (1969) : Zone de Saint-Omer - Carte d'interprétation au 1/25 000 des données géologiques et géotechniques acquises à la date du 1/1/1969. Rapport B.R.G.M. 69 SGL 257 NPA
- 81 Syndicat professionnel des distributeurs d'eau (1980) : "Le livre bleu de l'eau potable"
- 82 TALBOT A., PHILIPPART A. (1978) : Compte-rendu de fin de travaux du forage F_{1bis} à Salomé (Nord) - 19.4D.265 - Interprétation des pompages d'essais. Rapport B.R.G.M. 78 SGN 447 NPA
- 83 TALBOT A. (1979) : S.I.D.E.N.-Roubaix (Nord) - Gestion des ressources en eau entre la Hem et la Lys (Pas-de-Calais). Rapport B.R.G.M. 79 SGN 194 NPC
- 84 TALBOT A., BAILLY S. (1980) : Commune d'Hazebrouck (Nord) - Compte-rendu de fin de travaux du forage F₄ à Aire-sur-la-Lys (Pas-de-Calais) - 12.7.872 - Interprétation des pompages d'essais. Rapport B.R.G.M. 80 SGN 253 NPC
- 85 TILLIE B. (1980) : Nappe de la craie du bassin minier du Nord-Pas-de-Calais - (zone médiane et occidentale) - Acquisition et traitement des données - Modélisation des écoulements souterrains. Thèse de 3ème cycle, U.S.T. LILLE
- 86 VACHAUD G. (1968) : Contribution à l'étude des problèmes d'écoulement en milieux poreux non saturés
- 87 WATERLOT G. (1957) : Les ressources hydrogéologiques du Nord de la France. Monde Industriel, Fr., 83, n° 352, pp. 5/27
- 88 WATERLOT G. et al (1960) : Données hydrogéologiques acquises à la date du 30/09/1959 sur le territoire des feuilles topographiques de Guînes et Cassel. Rapport A. 1581

ANNEXES

LISTE DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES

ANNEXE I

VALEURS DU MODULE INTERANNUUEL ET DE L'EXCEDENT MOYEN

Station climatologique	Dept.	Coordonnées Lambert		Hauteur précipitée (mm)	Excédent (mm)		
		X	Y				
LONGUEME	Audruicq	62	581.17	552.12	081.	140.	
	Bailleul	59	627.73	337.93	082.	155.	
	Bauvin	62	639.38	311.55	593.	70.	
	Beaumont (B)		735.50	285.50	711.	323.	
	Boulogne	62	548.30	337.87	648.	133.	
	Campagne-les-Hesdin	62	567.55	300.10	878.	308.	
	Cassel	59	610.42	344.95	670.	148.	
	Dunkerque	59	000.23	373.10	000.	147.	
	Epinoy	59	058.49	280.50	040.	102.	
	Esquelbecq	59	005.35	354.19	583.	84.	
	Fiefs	62	599.32	311.65	886.	309.	
	Forges (B)		742.50	259.50	1105.	473.	
	Frévent	62	546.78	286.18	850.	282.	
	Fruges	62	584.92	312.70	980.	406.	
	Guines	62	566.84	349.42	880.	310.	
	Hensies (B)		095.50	305.00	720.	163.	
	Kain (B)		074.00	327.00	700.	200.	
	Lens	62	634.38	303.92	610.	101.	
	DUREME	Le Portel	62	545.30	333.63	013.	126.
		Lesquin	59	053.92	317.31	024.	97.
Le Touquet		62	549.09	312.98	830.	200.	
Liévin		62	632.02	302.72	614.	105.	
Lobbes (B)			737.50	297.50	840.	750.	
Maroilles		59	099.97	270.55			
Pollinkhove (B)			027.50	303.50	074.	118.	
Rang du Fliers		62	551.29	302.15	086.	154.	
Saint-Omer		62	595.15	339.05	680.	157.	
Saint-Pol		62	599.80	297.62	001.	242.	
COURTE DUREME ETENDUE	Tilloy-les-Mofflaines	62	634.02	280.30	046.	120.	
	Troisvilles	59	079.95	206.87	728.	170.	
	Wingles	62	037.20	310.34	590.	75.	
	Anzin	59	083.67	297.67	675.	131.	
	Armentières	59	038.46	333.00	022.	108.	
	Attin	62	559.46	309.66	076.	290.	
	Audembert	62	554.90	350.92	740.	160.	
	Avesnelles	59	714.35	209.95	772.	207.	
	Bainghen	62	569.96	339.98	1013.	429.	
	Béthune	62	021.71	314.90	635.	116.	
	Carnières	59	072.00	272.90	055.	118.	
	Curgies	59	089.94	293.00	755.	143.	
	Douai	59	652.05	299.31	577.	70.	
	Doullens	80	600.11	272.98	811.	214.	
	Fauquembergues	62	583.03	322.37	092.	328.	
	Fourmies	59	721.89	258.05	886.	298.	
	Goelzin	59	654.35	290.15	099.	137.	
	Landrecies	59	698.85	272.17	689.	155.	
	Lecelles	59	074.66	308.68	080.	144.	
	Lillers	62	009.20	318.80	687.	318.	
Lumbres	62	584.30	334.29	766.	242.		
Marconnelle	62	578.14	297.15	835.	274.		
Marck	62	573.28	362.36	630.	112.		
Maubeuge	59	715.25	287.60	835.	240.		
Merville-Lys	59	021.57	326.80	598.	98.		
Pailencourt	59	665.98	285.30	639.	110.		
Quéant	62	046.65	275.90	022.	109.		
Savy-berlettes	62	016.32	294.80	719.	180.		
Seclin	59	650.34	316.44	680.	130.		
Solesmes	59	683.82	276.91	709.	151.		
Terramesnil	80	602.95	267.40	778.	203.		
Thumerie	59	051.04	308.20	559.	50.		
Vicq	59	091.20	301.66	678.	125.		
Villers-Faucon	80	056.18	253.74	745.	184.		
Vron	80	558.50	290.85	896.	290.		
Watten	59	591.61	346.14	031.	111.		
Wavrin	59	643.16	317.80	628.	105.		
Wierre-au-Bois	62	559.70	327.82	995.	403.		
Ytres	62	047.23	262.95	692.	196.		

Boulogne : Station thermométrique.

Beaumont (B) : Station implantée en Belgique.



APERCU SUR UNE METHODE D'ANALYSE
DE VARIABLE REGIONALISEE : LE KRIGEAGE*

1 - INTRODUCTION.

Dans le domaine des Sciences de la Terre et plus particulièrement dans celui des Sciences de l'Eau, on est souvent amené à établir la répartition spatiale d'une variable à partir d'un nombre limité de données ponctuelles : cote d'une formation repère, charge hydraulique, transmissivité d'un aquifère, pluviométrie, etc....

L'exploitation de ces données est facilitée par les représentations cartographiques qui donnent rapidement une idée de la variation d'un paramètre dans l'espace et permettent d'en dégager les grands traits structuraux.

Cependant, la précision des résultats obtenus par le traitement des données est généralement liée aux trois problèmes principaux suivants :

- les données disponibles sont en un nombre réduit dont l'augmentation est souvent ramenée à un problème de coût limite (par exemple : réalisation de forages ou de piézomètres, installation et suivi de stations de mesures),
- leur répartition est hétérogène à l'échelle du domaine étudié,
- la qualité de l'information varie en fonction de la source (par exemple : méthode de détermination des transmissivités, qualité de nivellement, donnée déduite d'une corrélation, erreur de mesure).

L'établissement d'une carte fait alors appel à une part d'interprétation subjective des données. Cette difficulté de quantifier la précision se retrouve en particulier quand on doit estimer les valeurs moyennes prises par un paramètre sur chacune des mailles d'un modèle mathématique discrétisé.

Les différentes méthodes classiques d'interpolation (pondération, ajustement polynomial, moindres carrés, fonctions splines, etc...) impliquent que toutes les données définissent une fonction analytique rigide exprimant la continuité systématique de la variable ; elles présentent en outre l'inconvénient de ne pas conduire à la moindre indication sur l'incertitude du résultat : seules les méthodes prenant en compte la variabilité des phénomènes étudiés.

La méthode du krigeage développée par MATHERON [69,70] permet, grâce à une argumentation statistique solide, de prendre en compte l'ensemble des données, chacune d'elles ayant été au préalable affectée d'une fourchette d'incertitude. Initialement limitée au domaine minier, cette méthode s'est étendue notamment aux Sciences de l'Eau où les travaux en particulier de J.P. DELHOMME ont montré qu'elle était très bien adaptée.

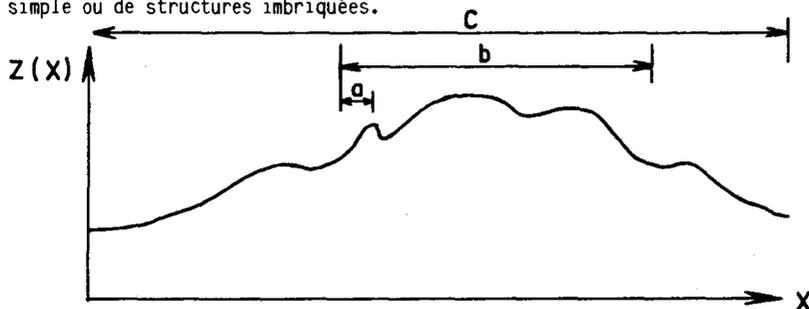
2 - VARIABLE REGIONALISEE ET KRIGEAGE.

Un phénomène est régionalisé s'il se déploie dans un espace et y montre une certaine structure. Une variable $Z(X)$ est dite régionalisée si elle désigne la valeur, en un point X de l'espace, d'une caractéristique du phénomène ; mathématiquement, Z est une fonction du point X .

Selon MATHERON, une variable régionalisée (V.R.) est une fonction généralement irrégulière, présentant deux aspects complémentaires : l'un aléatoire (irrégularité), l'autre structuré. Cette notion permet de définir les fonctions $Z(X)$ de l'espace dont la valeur varie d'un lieu à un autre avec une certaine apparence de continuité, sans qu'il soit possible d'en représenter la variation par une loi mathématique extrapolable.

* Cette annexe est largement inspirée des travaux du Centre de Morphologie mathématique - ENSMP

Par exemple, le long d'un profil topographique, la valeur de l'altitude est la variable régionalisée dont le caractère est inséparable de la notion d'échelle du phénomène. En effet, suivant que la variable est analysée sur l'espace d'un versant simple (a), sur tout un massif (b), ou à l'échelle d'une région (c), le caractère aléatoire variera à l'intérieur d'une structure simple ou de structures imbriquées.



L'estimation de $Z(X)$ et sa précision devront prendre en compte ce côté aléatoire et ce côté structuré. La structure est déterminée par la demi-variance d'accroissement qui définit la façon dont se détériore une information ponctuelle $Z(X)$ au fur et à mesure que l'on s'éloigne d'une distance h du point X :

$$\underbrace{\frac{1}{2} \text{ var } [Z(X+h) - Z(X)]}_{\text{Variance des accroissements de la variable}} = \underbrace{\frac{1}{2} E [(Z(X+h) - Z(X))^2]}_{\text{Accroissement quadratique moyen}} - \underbrace{\frac{1}{2} [E (Z(X+h) - Z(X))]^2}_{\text{Espérance de l'accroissement}}$$

Variance des accroissements
de la variable

Accroissement
quadratique moyen

Espérance de l'accroissement

Une variable régionalisée est donc considérée comme la réalisation d'une fonction aléatoire. Cependant, la plupart des variables étudiées en hydrogéologie ne sont connues que par une réalisation unique échantillonnée en un nombre fini de points et, pour reconstituer la loi de cette fonction aléatoire, il est nécessaire d'introduire des hypothèses qui caractériseront un milieu homogène (au sens probabiliste). Ces hypothèses permettront de diminuer le nombre des paramètres à estimer :

- . Hypothèse de stationnarité : elle définit l'identité de la loi de probabilité sur les valeurs prises en tous points de l'espace : la loi est stationnaire par translation de l'ensemble de ces points,
- . Hypothèse d'ergodicité : la loi de distribution des variations du paramètre dans l'espace, sur la seule réalisation disponible, suffit à rendre compte des variations qui auraient existé en un point unique.

Dans ces conditions, l'espérance mathématique de $Z(X)$ est constante et non fonction de X et la covariance n'est fonction que de h .

En fait, on peut se limiter à l'"hypothèse intrinsèque", hypothèse plus faible que celle de stationnarité, en supposant que pour tout vecteur h , l'accroissement $Z(X+h) - Z(X)$ aura une espérance mathématique et une variance indépendantes du point X .

Alors, $E [Z(X+h) - Z(X)] = 0$ et la variance d'accroissement s'exprimera par l'accroissement quadratique moyen entre deux points expérimentaux distants de h ou variogramme $\gamma(h)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [(Z(X+h) - Z(X))^2] \quad \text{ou} \quad \gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{i=n} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2$$

Cependant, certains phénomènes ne permettent pas de maintenir l'hypothèse intrinsèque, la moyenne présentant une dérive systématique. Dans ce cas, l'espérance $E [Z(X+h) - Z(X)]$ est différente de zéro. Cependant, la dérive peut, au moins localement, être décrite par un polynôme de degré k et la variance d'accroissements est déterminée à partir de la covariance généralisée d'ordre k (qui permet de filtrer les polynômes de degré k) et qui joue le rôle précédemment joué par le variogramme.

I - GENERALITES

La multiplicité des paramètres à prendre en compte pour prédéterminer l'influence de toute exploitation sur un système aquifère a conduit à orienter l'hydrogéologie vers l'utilisation de programmes mathématiques qui permettent de simuler les écoulements de l'eau dans le milieu poreux.

Le problème posé est généralement ramené à restituer, par le calcul, la distribution des hauteurs piézométriques d'une ou plusieurs nappes à partir de données fournies par les observations de terrain, données ponctuelles réparties de manière irrégulière : hauteurs piézométriques, valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emménagement, régime des sources, débit d'exploitation de captages, etc... Cependant, certaines grandeurs sont difficilement mesurables sur le terrain et font souvent l'objet d'hypothèses : alimentation latérale de l'aquifère, infiltration, débit des exutoires, délimitation hydrodynamique du bassin versant souterrain.

A l'objectif "outil de gestion" s'ajoute ainsi le rôle d'"outil de synthèse". Dans ce sens la représentativité du domaine réel qu'aura un modèle est fonction :

- . de la quantité, de la qualité et de la répartition des données recueillies,
- . du type de programme mathématique utilisé,
- . des hypothèses nécessaires qui découlent des deux conditions précédentes.

Le calage du modèle s'effectue en reconstituant les hauteurs piézométriques en chaque maille du domaine discrétisé.

Les modèles numériques tels que celui utilisé dans le cadre de ce mémoire appliquent les équations de la théorie générale des écoulements en milieu poreux. Celle-ci repose d'une part sur le principe de Lavoisier de la conservation de la masse (équation de continuité) et d'autre part sur la loi de Darcy. Suivant le cas envisagé, et pour un système aquifère plan, on établit que la somme algébrique des débits affectant un volume fini de milieu poreux est :

- . nulle, en régime permanent,
- . égale à la quantité d'eau emmagasinée (ou produite) dans le volume considéré, dans l'unité de temps (régime transitoire).

Compte tenu des données et des conditions aux limites fixées, le calage de la piézométrie revient principalement à déterminer la répartition spatiale des transmissivités. Pour être satisfaisantes, ces valeurs doivent s'approcher au mieux des valeurs expérimentales déterminées par les essais de pompage. Néanmoins, les transmissivités de calage sont des valeurs moyennes par maille ; on peut donc admettre un écart avec les données de terrains, et cela, en fonction de la taille de la maille considérée et de la qualité des données expérimentales disponibles.

II - THEORIE DES ECOULEMENTS EN MILIEU POREUX

1 - INTRODUCTION

En hydrogéologie, les équations de base sur les écoulements sont un cas particulier d'application des lois de la mécanique et de la thermodynamique des fluides. Le problème est généralement ramené à décrire l'écoulement isotherme d'un fluide incompressible: l'eau, dans un milieu poreux lui-même faiblement compressible et saturé par ce fluide (la notion de coefficient d'emménagement tient compte de la compressibilité).

A l'échelle du pore, les écoulements sont régis par l'équation de Navier-Stockes qui exprime la conservation de la quantité de mouvement : il y a équilibre entre les forces d'inertie engendrées par le mouvement et les forces agissant pour créer le mouvement.

La notion de perméabilité et la loi de DARCY n'apparaissent qu'en considérant des volumes élémentaires d'ordre centimétrique ou décimétrique, échelle à laquelle on peut considérer le milieu comme homogène. Cependant, aucune méthode courante ne permet la détermination in-situ des caractéristiques du milieu naturel à cette échelle. La complexité du milieu naturel peut encore accroître la difficulté d'appréciation de la perméabilité par la superposition de deux types de perméabilité ; le milieu crayeux en est l'exemple caractéristique avec une porosité dite d'interstice doublée d'une porosité de fissure.

La perméabilité apparaît ainsi comme ayant une signification purement locale et il faut envisager de grands volumes de terrain pour retrouver une certaine homogénéité. Dans ce sens, les méthodes connues de pompages d'essai permettent de mesurer les caractéristiques du milieu à une échelle représentative.

Un aquifère est alors représenté comme une mosaïque de blocs poreux saturés d'eau où la loi de Darcy reste valable pour chacun de ces blocs et entre blocs voisins.

S'il apparaît nécessaire, le changement d'échelle ne peut cependant pas être résolu théoriquement : il n'existe pas actuellement de méthode théorique pour déterminer les équations de Darcy à partir de celles de Navier-Stockes, et la loi de Darcy demeure une loi établie et vérifiée expérimentalement excepté dans le domaine de très faibles et forts gradients hydrauliques où existent des distorsions.

A une échelle régionale, le traitement des problèmes d'évaluation et de gestion des ressources en eau nécessite la résolution de systèmes comportant plusieurs centaines à plusieurs milliers d'équations et d'inconnues que seule la puissance de calcul des ordinateurs permet de manipuler aisément.

2 - RAPPELS THEORIQUES APPLIQUES AU MILIEU POREUX AQUIFERE

La loi de Darcy, les équations d'état de continuité permettent d'établir l'équation aux dérivées partielles du mouvement d'une nappe en charge, appelée équation de la diffusivité.

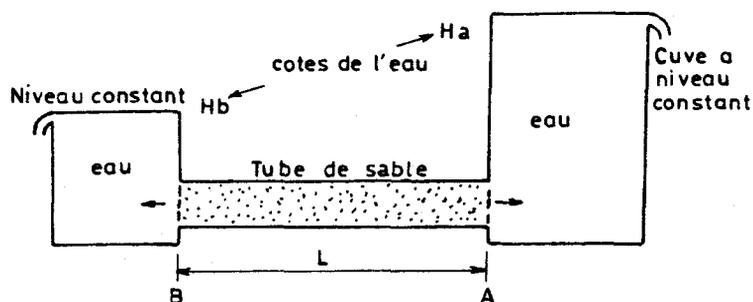
Hypothèses de base

Nous ne considérons ici que le cas des écoulements plans dans un même aquifère : la hauteur piézométrique H (charge hydraulique) est la même le long d'une verticale quelconque.

On se place en milieu isotherme et on néglige les variations dans l'espace de la densité de l'eau de même que la compressibilité des grains de la matrice solide.

Loi de Darcy

Les observations de Darcy lui ont permis d'établir expérimentalement que le débit filtrant Q au travers d'un milieu poreux saturé de section A est proportionnel à la différence de charge hydraulique Δh imposée :



$$Q = KA \left(\frac{H_b - H_a}{L} \right) = KA \frac{\Delta h}{L}$$

où :

K est une constante dépendant du milieu poreux, appelée coefficient de perméabilité.

En divisant les deux membres par A, on fait apparaître la vitesse U fictive du fluide, comme si toute la section était soumise à l'écoulement. U est la vitesse apparente de Darcy ou vitesse de filtration :

$$U = \frac{Q}{A} = K \frac{\Delta h}{L} = -K \overline{\text{grad. } H}$$

$\frac{\Delta h}{L}$ est la perte de charge par unité de longueur de milieu poreux traversé, dénommé encore gradient hydraulique.

Pour un espace à trois dimensions, $\overline{\text{grad } H}$ représente un vecteur de composantes $\left(\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}, \frac{\partial H}{\partial z} \right)$ suivant x, y et z.

Le passage à un espace à trois dimensions constitue la généralisation (non démontrée, mais vérifiée) de la loi de Darcy qui n'avait été établie que pour un écoulement unidirectionnel.

Equation de diffusivité

Prévoir ou reconstituer le comportement de l'eau dans le sol revient à pouvoir calculer la hauteur piézométrique H en tout point d'un aquifère au cours du temps.

On utilise tout d'abord un principe fondamental de la physique qui est la conservation de la masse : la somme des débits d'eau entrant dans un volume fini de milieu poreux est :

- nulle en régime permanent, c.a.d. que tout ce qui entre ressort quand l'écoulement ne varie pas avec le temps (H indépendant du temps),

LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

PRINCIPE DES MODELES MAILLES

Cette annexe présente le principe général des modèles de simulation maillés, appliqué plus particulièrement au calcul en régime permanent tel qu'il est conçu dans le cas du modèle NEWSAM utilisé ici. En ce sens, elle constitue un résumé non exhaustif de ce vaste domaine dont plus amples détails pourront être trouvés dans la bibliographie jointe.



I.N.	X	Y	T	FAC
27.4.003	662.050	292.800	.75E-02	5.9
27.4.005	662.270	292.380	.12E-01	5.9
27.4.011	662.590	292.200	.10E-01	5.9
27.4.012	662.660	292.330	.16E-01	5.9
27.4.013	662.810	292.320	.92E-02	5.9
27.4.014	662.950	292.520	.10E-01	5.9
27.4.021	662.710	291.950	.11E-01	5.9
27.4.029	661.630	292.740	.11E-01	5.9
27.4.031	659.520	292.710	.18E-01	5.9
27.4.032	659.510	292.620	.52E-01	5.9
27.4.037	657.720	294.550	.57E-01	5.9
27.4.038	657.760	294.570	.42E-01	5.9
27.4.039	660.580	293.570	.19E-02	5.9
27.4.041	663.110	296.820	.67E-02	5.9
27.4.042	660.900	297.450	.21E-01	5.9
27.4.043	660.860	297.430	.77E-01	6.0
27.4.044	658.960	298.240	.48E-01	5.9
27.4.045	658.980	298.240	.27E-02	5.9
27.4.052	661.340	292.620	.79E-02	5.9
27.4.068	662.940	293.630	.11E-01	5.9
27.4.113	663.770	293.800	.58E-02	5.9
27.4.118	663.770	293.870	.24E-01	5.9
27.4.119	663.350	294.120	.64E-02	5.9
27.4.122	663.320	294.150	.00E-02	5.9
27.4.023	639.200	285.840	.49E-01	5.9
27.4.029	643.680	290.200	.17E-02	5.4
27.4.031	638.620	285.070	.25E-01	1.0
27.4.032	644.370	288.430	.11E-01	5.9
27.4.033	650.830	288.430	.70E-02	1.0
27.4.034	650.210	290.180	.75E-03	6.0
27.4.035	650.000	287.220	.50E-02	5.9
27.4.036	646.450	286.740	.15E-01	5.9
27.4.037	650.620	288.010	.08E-02	5.9
27.4.038	651.250	288.200	.24E-01	5.9
27.4.039	651.250	283.490	.11E-01	5.9
27.4.040	654.230	290.000	.60E-02	5.9
27.4.041	655.270	288.870	.11E-01	5.9
27.4.042	655.360	288.550	.38E-02	5.9
27.4.043	657.460	285.120	.15E-01	1.0
27.4.044	653.460	289.690	.15E-01	1.0
27.4.045	657.090	280.770	.65E-02	5.9
27.4.046	654.450	282.250	.50E-01	1.0
27.4.047	654.620	290.050	.10E-01	1.0
27.4.048	658.680	286.680	.70E-02	1.0
27.4.049	664.060	280.770	.35E-02	5.9
27.4.050	663.780	284.920	.70E-01	1.0
27.4.051	661.380	284.740	.70E-01	1.0
27.4.052	658.880	284.770	.40E-01	1.0
27.4.053	658.700	284.700	.58E-02	5.9
27.4.054	675.140	292.660	.24E-01	5.9
27.4.055	675.140	292.660	.12E-01	5.9
27.4.056	675.420	294.920	.20E-01	5.9
27.4.057	689.030	300.000	.10E-01	1.0
27.4.058	685.720	299.520	.12E-01	1.0
27.4.059	688.980	292.120	.15E-03	1.0
27.4.060	689.370	292.620	.15E-02	1.0
27.4.061	689.520	293.410	.17E-03	1.0
27.4.062	689.500	293.900	.10E-02	1.0
27.4.063	687.300	289.400	.33E-01	5.9
27.4.064	688.820	292.660	.79E-02	5.9
27.4.065	689.760	288.410	.54E-01	1.0
27.4.066	687.380	287.940	.28E-01	5.9
27.4.067	686.740	285.750	.11E-02	5.9
27.4.068	687.270	289.740	.11E-01	5.9
27.4.069	686.870	291.470	.19E-01	5.9
27.4.070	689.130	296.560	.73E-02	5.9
27.4.071	685.540	293.740	.87E-02	5.9
27.4.072	684.300	292.720	.13E-01	5.9
27.4.073	686.550	294.410	.55E-02	5.9
27.4.074	686.550	294.640	.74E-02	5.9
27.4.075	685.810	297.170	.17E-01	5.9
27.4.076	688.780	293.820	.21E-01	5.9
27.4.077	689.060	296.920	.06E-01	5.9
27.4.078	684.530	296.200	.06E-02	5.9
27.4.079	685.160	292.560	.35E-02	5.9
27.4.080	687.360	297.980	.78E-02	5.9
27.4.081	685.250	293.250	.72E-02	5.9
27.4.082	686.160	281.620	.76E-02	5.9
27.4.083	688.800	283.120	.79E-02	5.9
27.4.084	684.800	292.650	.60E-02	1.0
27.4.085	684.550	292.360	.20E-02	1.0
27.4.086	671.450	297.950	.51E-02	5.9
27.4.087	672.430	294.960	.88E-02	5.9
27.4.088	673.870	300.070	.23E-02	5.9
27.4.089	673.190	298.850	.23E-02	5.9
27.4.090	669.160	299.700	.45E-02	1.0
27.4.091	668.500	291.000	.11E-01	5.9
27.4.092	669.030	292.400	.35E-02	5.9
27.4.093	669.070	281.500	.90E-01	6.0
27.4.094	669.070	281.900	.65E-01	1.0
27.4.095	670.350	290.240	.10E-02	5.9
27.4.096	665.890	298.760	.10E-02	1.0
27.4.097	664.610	294.680	.60E-02	1.0
27.4.098	664.060	295.200	.70E-01	1.0
27.4.099	665.880	286.180	.18E-01	5.9
27.4.100	664.860	285.930	.37E-01	5.9
27.4.101	670.520	285.930	.64E-02	5.9
27.4.102	669.220	284.080	.32E-01	1.0
27.4.103	669.220	292.190	.15E-01	5.9
27.4.104	671.680	299.320	.35E-01	5.9
27.4.105	671.950	299.160	.30E-01	5.9
27.4.106	674.660	283.460	.55E-02	5.9
27.4.107	671.200	284.440	.50E-02	1.0
27.4.108	672.480	290.470	.59E-01	6.0
27.4.109	672.130	289.040	.10E-01	1.0

I.N.	X	Y	T	FAC
19.2.004	622.200	311.120	.14E-02	5.9
19.2.005	622.590	316.020	.11E-01	5.9
19.2.007	622.880	315.470	.71E-02	5.9
19.2.008	623.870	315.390	.11E-01	5.9
19.2.010	622.540	314.630	.27E-01	5.9
19.2.011	623.840	319.100	.95E-03	1.0
19.2.013	623.110	316.410	.18E-02	1.0
19.2.019	624.470	313.120	.70E-03	6.0
19.2.020	619.870	314.090	.42E-01	5.9
19.2.021	621.220	310.290	.36E-01	5.9
19.2.022	621.090	315.560	.11E-01	5.9
19.2.023	621.320	315.080	.13E-01	5.9
19.2.100	621.100	312.950	.14E-01	5.9
19.2.103	622.410	314.910	.92E-02	5.9
19.2.106	620.880	315.410	.13E-01	5.9
19.2.109	624.530	313.250	.25E-01	5.9
19.2.110	624.510	313.310	.22E-01	5.9
19.2.111	624.320	312.350	.29E-01	5.9
19.2.136	622.690	314.650	.27E-01	1.0
19.2.158	620.000	315.420	.14E-01	1.0
19.3.003	628.670	313.320	.27E-01	5.9
19.3.004	628.410	313.180	.18E-01	5.9
19.3.005	628.040	313.560	.67E-02	5.9
19.3.006	628.440	314.080	.67E-02	5.9
19.3.10	627.680	313.150	.97E-02	5.9
19.3.11	628.110	313.100	.92E-02	5.9
19.3.16	627.330	310.290	.39E-01	5.9
19.4.1	637.070	311.140	.11E-01	5.9
19.4.002	633.630	314.250	.28E-01	5.9
19.4.004	637.470	314.660	.24E-02	5.9
19.4.15	636.380	314.900	.28E-01	5.9
19.4.29	633.730	310.610	.19E-02	5.9
19.4.32	636.080	310.890	.49E-02	5.9
19.4.035	637.730	311.870	.92E-02	5.9
19.4.37	637.280	311.490	.45E-02	5.9
19.4.38	637.020	311.420	.54E-02	5.9
19.4.39	637.510	310.800	.21E-01	5.9
19.4.48	634.970	311.750	.17E-01	5.9
19.4.49	632.450	311.710	.12E-01	5.9
19.4.052	634.180	314.430	.26E-01	5.9
19.4.075	637.740	310.080	.86E-01	5.9
19.4.076	638.270	312.900	.54E-02	5.9
19.4.122	632.230	319.030	.24E-03	6.2
19.4.132	637.760	310.480	.25E-01	5.9
19.4.218	635.680	313.400	.30E-01	1.0
19.4.265	636.400	314.870	.30E-01	1.0
19.5.1	613.740	306.380	.38E-02	1.0
19.5.50	616.530	310.010	.16E-02	5.9
19.5.51	617.170	308.580	.51E-02	5.9
19.6.005	622.400	308.400	.74E-03	6.0
19.6.49	621.260	405.700	.91E-03	6.0
19.6.51	619.900	309.360	.36E-02	5.9
19.6.002	625.100	304.800	.29E-02	5.9
19.6.135	619.000	308.060	.60E-02	1.0
19.7.029	631.170	302.740	.95E-02	5.9
19.7.39	630.890	304.510	.16E-01	5.9
19.7.42	629.340	304.910	.53E-01	5.9
19.7.043	630.060	307.280	.17E-01	5.9
19.7.044	629.510	309.470	.44E-02	5.9
19.7.045	629.050	305.770	.72E-02	5.9
19.7.06	627.380	305.410	.72E-02	5.9
19.7.09	626.900	309.440	.50E-01	5.9
19.7.113	630.390	301.660	.75E-01	1.0
19.7.144	627.250	309.980	.24E-01	5.9
19.8.004	634.200	309.250	.88E-01	5.9
19.8.005	637.000	310.210	.30E-03	6.2
19.8.7	637.420	310.090	.25E-01	5.9
19.8.008	637.500	310.100	.30E-01	5.9
19.8.48	635.340	306.860	.76E-02	5.9
19.8.45	636.230	306.130	.92E-02	5.9
19.8.49	637.040	308.180	.11E-01	5.9
19.8.114	633.820	302.190	.30E-01	1.0
19.8.117	634.110	308.930	.17E-01	5.9
19.8.119	634.230	308.460	.15E-01	5.9
19.8.121	634.260	309.200	.20E-01	5.9
19.8.128	637.370	307.180	.33E-01	5.9
19.8.262	635.760	304.510	.20E-01	5.9
20.1.4	643.540	317.960	.86E-02	5.9
20.1.10	643.660	318.130	.76E-02	5.9
20.1.11	643.740	318.300	.87E-02	5.9
20.1.12	645.840	318.480	.92E-02	5.9
20.1.13	644.940	318.650	.93E-02	5.9
20.1.014	644.080	318.780	.70E-02	1.0
20.1.17	642.920	318.640	.80E-01	1.0
20.1.18	642.010	316.490	.15E-01	1.0
20.1.19	642.150	316.160	.20E-01	1.0
20.1.20	642.270	315.820	.11E-01	1.0
20.1.22	641.510	316.580	.11E-01	1.0
20.1.079	644.340	310.320	.26E-01	5.9
20.1.117	639.470	318.880	.12E-01	1.0
20.1.196	643.820	315.360	.15E-01	1.0
20.2.005	649.260	316.860	.15E-01	5.9
20.2.007	649.500	316.700	.13E-01	1.0
20.2.013	650.390	316.440	.16E-02	1.0
20.2.059	648.880	314.650	.89E-02	5.9
20.2.114	649.060	313.500	.10E-01	1.0
20.2.125	646.900	318.000	.10E+00	1.0
20.2.129	645.860	318.720	.50E-01	1.0
20.2.171	648.820	315.490	.10E+00	1.0
20.2.197	649.930	319.200	.30E-03	1.0
20.2.220	648.890	316.660	.47E-01	1.0
20.3.001	655.760	313.510	.52E-01	5.9
20.3.007	654.340	314.460	.60E-02	5.9
20.3.008	652.020	319.630	.18E-02	5.9
20.3.040	652.980	315.600	.15E-02	5.9
20.3.049	657.260	318.580	.95E-03	6.1
20.3.166	652.950	320.360	.40E-02	6.1
20.3.167	652.800	320.150	.19E-02	5.9

I.N.	X	Y	T	FAC
20.4.000	655.860	311.500	.34E-03	6.2
20.4.006	654.440	314.460	.25E-02	5.9
20.4.033	652.250	316.680	.46E-03	6.1
20.4.054	655.710	317.790	.30E-03	6.2
20.5.1	639.610	308.890	.23E-01	5.9
20.5.002	639.480	308.280	.30E-01	5.9
20.5.004	641.160	303.060	.36E-01	5.9
20.5.024	643.600	301.940	.51E-02	5.9
20.5.091	644.550	307.220	.40E-01	1.0
20.5.124	639.760	308.460	.75E-01	6.0
20.6.024	645.900	306.080	.44E-01	5.9
20.6.026	644.400	303.680	.90E-02	5.9
20.6.027	644.300	303.560	.65E-02	5.9
20.6.074	650.420	301.760	.18E-01	5.9
20.6.155	648.250	303.560	.62E-01	1.0
20.6.156	648.100	303.400	.16E-01	5.9
20.6.185	645.450	300.570	.13E-01	1.0
20.7.001	655.290	301.160	.84E-02	5.9
20.7.009	652.620	301.160	.41E-01	5.9
20.7.010	653.220	309.370	.14E-02	1.0
20.7.156	654.880	302.620	.23E-01	5.9
20.7.167	654.350	301.660	.62E-02	5.9
20.7.169	654.110	301.050	.11E-01	5.9
20.7.172	651.200	305.180	.62E-02	5.9
20.7.174	653.210	300.400	.36E-01	5.9
20.7.177	651.690	303.990	.19E-01	5.9
20.7.195	651.470	304.430	.60E-02	5.9
20.7.217	652.050	310.260	.33E-02	5.9
20.7.218	651.810	310.080	.47E-02	5.9
20.8.002	662.460	309.020	.43E-02	5.9
20.8.003	658.130	300.460	.87E-02	5.9
20.8.006	663.500	308.320	.89E-03	6.0
20.8.010	662.480	309.100	.30E-02	1.0
20.8.122	663.560	308.300	.11E-02	6.0
21.5.44	667.930	301.900	.75E-02	1.0
21.5.045	669.850	300.950	.36E-02	5.9
21.5.049	667.960	406.800	.79E-02	5.9
21.5.052	666.320	305.500	.30E-01	5.9
21.5.053	664.800	309.150	.12E-02	6.0
21.5.129	670.280	301.080	.59E-02	5.9
21.6.010	673.410	302.790	.40E-02	5.9
21.6.21	674.140	304.050	.40E-02	1.0
21.6.019	676.650	303.920	.11E-01	5.9
21.7.126	681.110	305.880	.10E-02	1.0
21.8.166	687.720	305.820	.50E-02	1.0
21.8.170	684.470	303.730	.55E-02	1.0
21.8.172	687.160	302.520	.11E-01	1.0
21.1.003	639.280	294.100	.23E-03	6.2
21.1.004	638.710	292.640	.60E-02	5.9
21.1.008	639.080	297.470	.12E-02	6.0
21.1.010	639.250	295.890	.11E-01	5.9
21.1.016	640.810	298.910	.10E-02	6.0
21.1.022	641.860	293.340	.47E-02	5.9
21.1.023	642.850	295.890	.45E-02	5.9
21.1.029	640.750	297.840	.28E-02	5.9
21.1.034	641.960	298.960	.12E-02	6.0
21.1.038	640.540	299.600	.46E-03	6.2
21.1.039	642.600	298.720	.98E-02	5.9
21.1.044	643.440	291.420	.52E-02	5.9
21.1.047	644.020	298.700	.60E-02	5.9
21.1.048	643.720	298.750	.79E-03	6.0
21.1.049	643.420	291.050	.13E-01	5.9
21.1.050	642.750	290.510	.18E-02	5.9
21.1.60	640.220	299.280	.17E-01	1.0
21.1.064	643.740	291.750	.68E-02	5.9
21.2.001	651.170	292.730	.70E-02	5.9
21.2.007	648.000	293.100	.77E-03	6.0
21.2.012	650.080	293.300	.50E-02	5.9
21.2.025	648.580	297.620	.69E-01	6.0
21.2.029	647.220	297.260	.38E-01	5.9
21.2.031	647.260	297.130	.83E-01	6.0
21.2.042	645.620	297.190	.64E-02	5.9
21.2.044	646.370	290.870	.60E-02	5.9
21.2.076	650.770	293.300	.14E-01	5.9
21.2.089	650.550	294.800	.52E-02	5.9
21.2.105	651.180	292.730	.80E-02	5.9
21.3.1	652.140	292.140	.27E-01	1.0
21.3.002	652.070	292.320	.20E-01	5.9
21.3.003	652.020	292.420	.11E-01	5.9
21.3.004	651.930	292.540	.21E-01	5.9
21.3.005	651.840	292.640	.33E-01	5.9
21.3.30	653.650	296.250	.83E-03	1.0
21.3.032	652.100	294.850	.12E+00	6.0
21.3.034	654.490	295.270	.69E-02	5.9
21.3.040	655.200	299.640	.15E-01	5.9
21.3.043	651.830	299.010	.13E-01	5.9
21.3.051	651.660	299.770	.44E-01	5.9
21.3.058	651.710	299.810	.71E-01	6.0
21.3.059	651.800	299.820	.66E-01	6.0
21.3.060	653.700	296.480	.30E-01	5.9
21.3.066	653.980	299.060	.85E-02	5.9
21.3.069	655.420	298.420	.41E-01	5.9
21.3.070</				

TABLEAUX DES VALEURS DE TRANSMISSIVITES

LEGENDE

I.N. : Indice National
 X et Y : Coordonnées Lambert
 T : Transmissivités (en m²/s)
 FAC : Facteur d'incertitude

I.N.	X	Y	T	FAC
02.5.002	566,920	360,700	.19F-02	5,9
02.5.005	566,780	362,440	.19F-02	5,9
02.5.007	566,300	361,210	.20F-02	5,9
02.5.009	567,200	362,490	.48F-03	6,1
02.5.010	565,520	361,380	.18F-03	6,3
02.5.012	565,380	361,480	.41E-03	6,1
02.5.014	560,200	355,610	.10E-02	6,0
02.5.016	569,240	357,520	.45E-02	6,1
06.1.001	565,820	360,270	.13E-01	5,9
06.1.002	563,780	352,630	.68F-02	5,9
06.1.003	568,060	353,260	.11F-01	5,9
06.1.015	564,360	357,640	.57E-02	5,9
06.1.068	568,050	360,060	.26E-03	6,2
06.1.070	565,650	358,700	.25F-01	5,9
06.1.072	567,230	353,350	.60F-03	1,0
06.1.074	567,300	353,630	.14E-02	1,0
06.1.075	567,230	353,600	.71F-02	5,9
06.1.076	567,050	353,610	.43E-02	5,9
06.1.077	566,120	354,050	.31F-01	5,9
06.1.078	565,960	353,780	.15E-01	5,9
06.1.079	566,070	353,780	.59E-02	5,9
06.1.080	566,020	354,020	.12F-01	5,9
06.1.081	565,960	353,980	.16F-01	5,9
06.1.083	567,270	353,660	.43F-02	5,9
06.1.088	567,850	353,090	.92F-02	5,9
06.1.095	567,660	353,130	.39F-01	5,9
06.1.096	567,830	353,000	.82F-02	5,9
06.1.097	567,720	353,610	.34E-02	5,9
06.1.108	565,000	355,250	.80E-02	1,0
06.1.109	565,000	355,000	.34E-02	5,9
06.1.110	565,000	354,700	.50F-02	1,0
06.1.111	564,970	353,450	.19E-02	5,9
06.1.115	566,330	352,500	.30E-02	1,0
06.1.116	566,310	351,730	.97E-02	5,9
06.1.118	565,050	355,250	.32E-01	1,0
06.1.119	565,050	353,700	.50E-02	1,0
06.1.120	566,150	352,230	.30E-02	1,0
06.1.144	567,890	353,360	.88F-02	5,9
6.1.182	566,330	351,730	.10E-01	1,0
6.1.205	566,120	353,090	.26E-01	1,0
6.2.001	569,450	351,000	.13E-01	5,9
6.2.007	571,600	356,690	.13E-02	6,0
6.2.008	570,580	352,390	.60E-03	1,0
6.3.001	574,700	350,640	.18E-02	5,9
6.4.002	581,250	352,580	.17E-03	6,3
6.5.171	562,860	349,370	.63E-03	6,1
6.6.004	572,160	348,810	.25E-02	5,9
6.6.006	572,400	350,030	.42E-02	5,9
6.7.005	577,780	349,070	.19E-01	5,9
6.8.016	585,000	341,000	.25E-02	5,9
6.8.028	581,460	346,660	.85F-03	6,0
6.8.050	581,350	346,160	.85F-02	5,9
6.8.080	582,310	347,290	.20E-02	5,9
6.8.114	585,920	344,770	.16E-02	5,9
6.8.121	587,110	344,310	.23E-01	5,9
6.8.122	586,380	344,480	.30E-01	1,0
6.8.124	585,910	344,900	.13E-01	5,9
6.8.125	585,970	344,810	.92E-02	5,9
6.8.127	585,260	345,060	.35E-02	1,0
7.5.002	588,570	343,930	.30E-01	1,0
7.5.004	588,390	343,890	.45E-01	5,9
7.5.005	587,770	343,980	.15E-01	1,0
7.5.007	590,320	343,720	.19E-02	5,9
7.5.082	588,750	342,700	.30E-01	1,0
7.5.093	588,300	344,030	.41F-01	5,9
7.5.094	588,690	343,740	.13E-01	5,9
7.5.095	593,160	340,420	.43E-01	5,9
7.5.113	593,180	340,310	.35E-01	1,0
7.6.001	594,710	344,120	.98E-03	6,0
11.4.018	586,970	331,400	.55E-02	5,9
11.4.054	585,350	331,930	.90F-02	5,9
12.1.010	592,170	333,850	.25E-02	1,0
12.1.016	591,880	334,130	.25F-02	1,0
12.1.016	588,480	334,550	.14E-01	5,9
12.1.088	591,170	334,900	.15F-01	1,0
12.1.126	591,820	333,740	.20E-01	1,0
12.2.001	594,250	334,900	.50E-01	5,9
12.2.002	584,210	334,900	.10E+00	1,0
12.2.003	594,620	334,640	.27E-01	5,9
12.2.012	597,920	334,050	.50E-03	1,0
12.2.038	594,670	335,120	.11F-01	5,9
12.2.043	595,100	335,430	.57E-02	5,9
12.2.047	596,280	335,370	.30E-01	1,0
12.2.155	596,920	336,280	.10E-03	1,0
12.2.156	596,960	336,200	.92E-03	1,0
12.2.157	597,120	336,670	.50E-02	1,0
12.2.182	596,560	335,900	.20E-01	1,0
12.2.212	598,480	333,450	.30E-01	1,0
12.3.096	600,200	331,090	.86E-03	6,0
12.5.003	592,070	325,000	.41E-01	5,9
12.5.005	599,020	328,820	.29E-02	5,9
12.5.010	599,800	328,520	.42E-01	5,9
12.6.001	595,850	321,350	.15E-01	5,9
12.6.002	598,880	323,670	.39E-02	5,9
12.6.010	598,050	322,880	.42E-01	5,9
12.6.012	605,170	324,450	.85E-04	6,0
12.7.018	605,250	322,000	.17E-02	5,9
12.7.733	603,780	321,900	.14E-03	5,9
12.7.872	603,870	322,520	.24E-01	1,0
12.8.012	607,660	322,500	.53E-01	5,9
13.4.004	616,880	332,160	.21F-02	5,9
14.6.008	625,280	322,720	.41E-03	6,1
14.7.003	624,570	326,390	.48F-03	6,1

I.N.	X	Y	T	FAC
14.2.168	650,550	332,480	.19E-02	5,9
14.2.030	652,650	330,520	.05E-02	5,9
14.3.044	653,300	331,710	.77E-03	6,0
14.3.066	653,370	330,900	.60E-03	6,1
14.3.069	652,860	330,740	.54E-03	6,1
14.4.108	660,450	332,500	.13E-02	6,0
14.5.064	640,780	328,000	.35E-02	1,0
14.6.001	646,700	321,040	.12E-01	5,9
14.6.003	647,080	320,630	.11E-01	5,9
14.6.004	647,910	320,590	.14E-01	5,9
14.6.006	647,650	325,600	.35E-02	5,9
14.6.025	649,820	320,860	.79E-02	5,9
14.6.027	650,490	326,370	.15E-01	1,0
14.6.028	650,740	326,180	.30E-01	1,0
14.6.030	650,280	325,880	.20E-01	1,0
14.6.138	650,290	325,890	.20E-01	1,0
14.6.033	649,680	326,270	.79E-02	5,9
14.6.051	648,450	326,790	.18E-01	5,9
14.6.052	650,400	328,520	.32E-01	5,9
14.6.053	647,780	325,330	.69E-02	5,9
14.6.054	650,750	326,510	.89E-02	5,9
14.6.055	647,230	325,310	.50E-02	5,9
14.6.058	646,550	330,340	.70E-02	5,9
14.6.061	650,430	326,950	.70E-02	1,0
14.6.073	648,260	320,480	.41E-01	5,9
14.6.074	648,880	320,450	.98E-01	6,0
14.6.084	648,510	327,250	.31E-01	5,9
14.6.085	648,060	327,720	.16E-01	5,9
14.6.089	654,520	322,950	.53E-02	5,9
14.6.100	650,180	328,600	.68E-02	5,9
14.6.120	648,120	326,950	.18E-01	1,0
14.6.144	649,870	329,450	.33E-02	5,9
14.6.228	649,250	329,450	.39E-02	5,9
14.6.266	648,700	325,860	.59E-02	5,9
14.6.450	646,870	324,890	.68E-02	5,9
14.6.462	648,580	324,610	.70E-01	1,0
14.6.482	650,610	324,500	.30E-01	1,0
14.6.490	650,920	326,680	.17E-01	5,9
14.6.494	649,350	325,570	.10E-01	5,9
14.6.537	647,500	327,900	.73E-02	5,9
14.6.548	646,880	327,500	.18E-01	5,9
14.6.684	644,580	330,190	.13E-02	1,0
14.7.003	653,160	329,090	.41E-02	5,9
14.7.012	651,220	328,200	.51E-02	5,9
14.7.016	653,150	329,820	.41E-02	5,9
14.7.027	656,540	322,690	.67E-02	5,9
14.7.039	653,080	327,740	.71E-02	5,9
14.7.066	652,680	330,300	.20E-02	1,0
14.7.218	654,210	325,140	.35E-02	1,0
14.7.220	659,110	326,470	.47E-02	5,9
14.7.298	655,880	324,980	.24E-02	5,9
14.7.502	651,120	328,990	.40E-02	5,9
14.7.514	652,180	328,530	.13E-01	5,9
14.7.541	651,990	329,320	.39E-02	1,0
14.7.550	650,980	328,640	.46E-02	5,9
14.7.563	652,080	329,240	.14E-01	5,9
14.7.583	653,320	326,700	.35E-01	5,9
14.7.587	651,270	327,380	.10E-01	5,9
14.7.792	652,050	326,450	.60E-02	1,0
14.7.938	654,800	328,050	.15E-02	1,0
14.8.009	658,920	327,930	.28E-02	5,9
14.8.017	659,630	327,210	.29E-02	5,9
14.8.028	659,880	327,590	.92E-02	5,9
14.8.025	660,770	328,080	.18E-01	5,9
14.8.066	659,700	328,520	.13E-01	5,9
14.8.051	659,230	328,740	.11E-01	5,9
14.8.071	658,880	329,170	.98E-03	6,0
14.8.092	662,220	326,640	.64E-02	5,9
14.8.095	660,190	326,610	.18E-02	5,9
14.8.096	662,060	327,930	.51E-03	6,1
14.8.148	658,730	323,830	.91E-02	5,9
14.8.323	660,610	327,740	.31E-03	6,2
14.8.330	658,050	323,990	.50E-02	1,0
14.8.377	661,210	322,320	.10E-02	1,0
15.5.018	663,790	325,020	.29E-02	6,0
18.3.134	605,160	319,800	.29E-01	1,0
18.4.001	608,230	316,170	.50E-02	5,9
18.4.022	610,070	317,350	.37E-02	5,9
18.4.058	608,560	314,020	.34E-02	5,9
18.4.059	607,870	311,350	.20E-01	5,9
18.4.134	608,170	311,800	.27E-02	5,9
18.4.139	609,950	311,980	.52E-02	5,9
18.4.140	611,550	313,970	.56E-01	1,0
18.4.146	609,730	310,860	.36E-02	5,9
18.4.169	611,000	317,900	.10E+00	1,0
18.8.13	609,980	309,550	.15E-01	1,0
18.8.39	609,660	309,510	.16E-01	1,0
19.1.003	613,870	312,500	.73E-02	5,9
19.1.4	617,870	317,420	.18E-02	5,9
19.1.5	618,690	311,220	.63E-02	5,9
19.1.043	616,060	314,260	.77E-02	5,9
19.1.098	618,680	314,170	.35E-01	5,9
19.1.103	615,560	310,850	.15E-01	5,9
19.1.109	616,830			

Pour un pas de temps mensuel, on aura donc :

1°) si la pluviométrie est inférieure à l'ETP, un déficit ($P - ETP$) qui puisera dans la réserve du sol jusqu'à la vider en période sèche :

$$\begin{array}{l} ETP_m > P_m \\ \rightarrow \end{array} \left\{ \begin{array}{l} ETR_m = P_m + \Delta RFU \\ E_m = 0 \end{array} \right.$$

2°) si la pluviométrie égale ETP, la réserve ne change pas et l'ETR égale l'ETP :

$$\begin{array}{l} ETP_m = P_m \\ \rightarrow \end{array} \left\{ \begin{array}{l} ETR_m = ETP_m \\ E_m = 0 \end{array} \right.$$

3°) si la pluviométrie est supérieure à l'ETP, l'ETR sera égale à l'ETP, et le surplus reconstituera si nécessaire ($RFU < RFU_{max}$) la réserve en eau du sol, le solde représentant l'excédent :

$$\begin{array}{l} ETP_m < P_m \\ \rightarrow \end{array} \left\{ \begin{array}{l} ETR_m = ETP_m \\ \text{si } RFU < RFU_{max} \\ E_m = P_m - ETP_m - (RFU_{max} - RFU) \\ \text{si } RFU = RFU_{max} \\ E_m = P_m - ETP_m \end{array} \right.$$

METHODES DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE

FORMULE	PARAMETRES	unites
<p><u>A. COUTAGNE annuelle</u></p> <p>1) $ETR (mm) = 210 + 30 T$</p> <p>2)</p> <p>* si $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$: $ETR_{(m)} = P - \lambda P^2$</p> <p>* si $P < \frac{1}{8\lambda}$: $ETR_{(m)} = P$</p> <p>* si $P > \frac{1}{2\lambda}$: $ETR_{(m)} = \frac{1}{4\lambda}$</p>	<p><u>Conditions de validité :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> . entre les latitudes Nord 60° et 30° . pour précipitations = 800 mm ± 20% <p>T : température moyenne annuelle</p> <p>P : hauteur moyenne des précipitations annuelles</p> $\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T}$	<p>°C</p> <p>mm</p>
<p><u>L. TURC annuelle</u></p> $ETR (mm) = \frac{P}{0,9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}$	<p>P : hauteur moyenne des précipitations annuelles</p> $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$ <p>T : température moyenne annuelle</p>	<p>mm</p> <p>°C</p>
<p>L. TURC } mensuelles C.W. THORNTHWAITE } à partir de ETP</p> <p>* si $ETP \leq P$: $ETR = ETP$</p> <p>* si $ETP > P$: $ETR = P + a \cdot RFU$</p>	<p>ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle (cf ci-dessus)</p> <p>P : hauteur des précipitations du mois considéré</p> <p>RFU : réserve facilement utilisable</p> <p>a : coefficient valant de 0 à 1</p>	<p>mm</p> <p>mm</p> <p>mm</p>



METHODES DE CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

FORMULE	PARAMETRES	UNITES
<p><u>L. TURC mensuelle</u></p> $ETP = a \frac{t_m}{t+15} (I_g + 50) C$	<p>a : coefficient valant 0,37 pour février et 0,40 pour les autres mois t_m : la température moyenne mensuelle I_g : radiation globale moyenne d'origine solaire avec I_g = E_gA (0,18 + 0,62 h/H) E_gA : énergie de la radiation qui atteindrait le sol en l'absence d'atmosphère h : durée d'insolation mesurée pendant le mois H : durée astronomique du jour pendant ce mois C : facteur de correction mensuelle qui tient compte de l'humidité relative de l'air HR [%] : avec : $C = 1 + \frac{50 - HR}{70}$</p>	<p>°C cal. cm⁻². j⁻¹ cal. cm⁻². j⁻¹ heures heures</p>
<p><u>L. SERRA annuelle</u></p> $ETP = \frac{1080 (1 - \epsilon)}{270} e^{0,0644 T}$ <p><u>mensuelle</u></p> $ETP = 22,5 \left(\frac{1 - \epsilon_m}{0,25} \right) \left(1 - \frac{\tau^2}{1000} \right) e^{0,0644 t_m}$	<p>T : température moyenne annuelle ε : degré hygrométrique moyen annuel de l'air (= humidité relative HR) généralement fixé à 75 % t_m : température moyenne du mois considéré τ : demi-amplitude de variation des températures mensuelles extrêmes ε_m : degré hygrométrique mensuel de l'air</p>	<p>°C % °C °C %</p>
<p><u>C.W. THORNTHWAITE mensuelle</u></p> $ETP = 1,6 \frac{(10 t_m)^a}{I} K$	<p>t_m : température moyenne du mois I : indice thermique annuel, égal à la somme des indices thermiques mensuels : $I = \sum_{1}^{12} \frac{(t_m)}{5} 1,514$ K : coefficient de correction dépendant de la latitude et de la durée considérée ; pour la région, de janvier à décembre, on a : 0,74 ; 0,78 ; 1,02 ; 1,15 ; 1,33 ; 1,36 ; 1,37 ; 1,25 ; 1,06 ; 0,92 ; 0,76 ; 0,70. a : = 0,49239 + 1,792.10⁻². I - 7,71.10⁻⁵. I² + 6,75.10⁻⁷. I³</p>	<p>°C</p>



22 - LES METHODES D'EVALUATION

La quantification de l'évapotranspiration d'un sol peut être réalisée à partir des principaux procédés suivants :

- . mesure de la variation du gradient vertical de vapeur,
- . mesure à l'aide d'un évapotranspiromètre,
- . mesure en cases lysimétriques à sol nu ou planté,
- . estimation à partir de formules établies expérimentalement.

Les difficultés et coûts de mise en oeuvre limitent les trois premières méthodes à des études locales, et on s'en remet souvent à l'utilisation de la troisième pour des études hydrogéologiques.

On estime alors une évapotranspiration potentielle (ETP) correspondant à la somme de la quantité d'eau évaporée par suite du déficit hygrométrique de l'air (pouvoir évaporant de l'atmosphère) et de la quantité d'eau transpirée par la végétation. Cette ETP serait celle que l'on observerait sur un sol avec couvert végétal, où l'eau serait disponible en abondance (sol constamment saturé d'eau). En réalité, il y a évaporation tant que l'atmosphère n'est pas saturée et à la condition que les réserves d'eau soient suffisantes, autrement dit, tant que l'ETP n'est pas satisfaite. Si les réserves sont insuffisantes, l'évapotranspiration réelle (ETR) sera inférieure à l'ETP.

Etant donné la prépondérance de certains paramètres, de nombreux auteurs ont proposé des formules plus ou moins empiriques résultant d'ajustements statistiques (TURC, THORNTHWAITE, SERRA), ou établies à partir du bilan d'énergie (BOWEN, PENMAN) et basées sur la loi de DALTON [78]

L'évapotranspiration potentielle faisant abstraction de l'alimentation réelle en eau (puisque'elle est estimée abondante), son calcul nécessite, dans la plupart des formules, la connaissance d'un seul facteur principal, la température. Par contre, l'évapotranspiration réelle étant liée à l'humidité réelle du sol, doit tenir compte en plus des précipitations effectives.

Les tableaux A et B présentent les principales méthodes utilisées tout en précisant les paramètres nécessaires aux calculs mensuels ou annuels [76, 78, 25]

Notamment, pour aboutir à la valeur de l'ETR mensuelle, il convient de remarquer qu'un seul paramètre reste indéfini, à savoir la hauteur de lame d'eau emmagasinée par le sol superficiel, encore appelée réserve facilement utilisable (R.F.U.).

23 - L'EXCEDENT D'EAU

En conclusion, si on utilise les méthodes de TURC ou THORNTHWAITE, l'évaluation de l'excédent d'eau (E) dû à une pluie brute (P) se fera en calculant pour chaque pas de temps (t) choisi, l'évapotranspiration réelle (ETR) et la fraction puisée ou ajoutée à la réserve facilement utilisable (Δ RFU) :

$$E_t = P_t - ETR_t \pm \Delta \text{ RFU}$$

Le principe de ce calcul nécessite d'imposer au départ la valeur initiale de la RFU et de la RFU maximale ; en pratique, cette dernière est généralement fixée en France à 100 mm. D'autre part, on convient souvent de faire débiter le calcul en janvier, ce qui permet d'imposer une RFU initiale égale à la RFU maximale, puisque l'on se place en période hivernale où les terrains sont généralement saturés en eau ; c'est le cas du programme de calcul utilisé dans le cadre de ce travail [41].

Une manière plus couramment utilisée en hydrogéologie est d'exprimer le bilan en eau en faisant intervenir le ruissellement (r) et l'infiltration (i) dans son expression [25] :

$$P = D + r + i$$

Une fraction de l'eau de pluie infiltrée participe au renouvellement de la quantité d'eau contenue dans le sol tandis que le reste transitera vers la **nappe phréatique** (infiltration efficace).

A l'échelle d'un grand bassin versant, et qui plus est à celle de toute une région, la part évacuée par ruissellement est difficile à quantifier ; aussi se ramène-t-on généralement à ne déterminer dans un premier temps que la pluie nette (ou excédent d'eau) qui est la somme du ruissellement (r) et de l'infiltration (i).

Connaissant les précipitations mesurées, ou pluie brute (P), l'étude du bilan hydrique se limite alors à celle de l'évapotranspiration (D) dont sera déduit l'excédent E :

$$E = P - D$$

2 - DETERMINATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION

21 - Facteurs

Le taux d'évapotranspiration est défini par l'ensemble des facteurs qui régissent l'évaporation et la transpiration ; on distingue ainsi schématiquement [25, 78] :

. Les facteurs physiques :

. Facteurs atmosphériques et géographiques déterminant le pouvoir évaporant de l'atmosphère

{ Déficit hygrométrique
Température
Altitude
Insolation
Vitesse et turbulence du vent
Pression barométrique

. Facteurs hydrogéologiques conditionnant l'état de surface évaporante du sol

{ Granulométrie
Porosité
Nature lithologique
Couverture végétale
Teneur en eau

. Les facteurs physiologiques :

{ Espèce végétale
Age
Développement du feuillage
Profondeur des racines

Les observations expérimentales montrent cependant que dans cette multiplicité, les facteurs prépondérants sont la température moyenne et l'humidité. Ainsi, la plupart des formules couramment utilisées négligeront tout ou partie des autres facteurs.

BILAN HYDROLOGIQUE

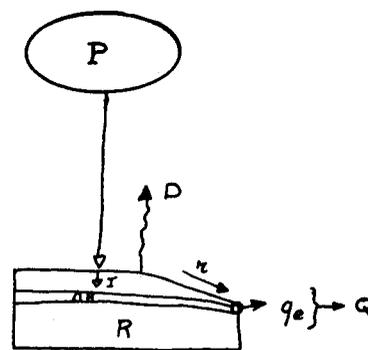
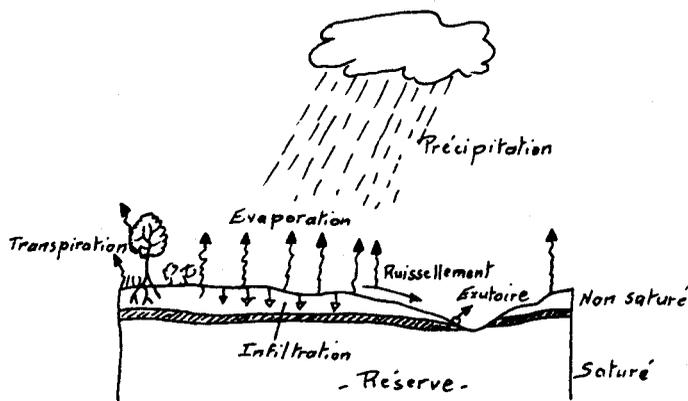
ET

EXCEDENT D'EAU

1 - LES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE

L'établissement du bilan d'eau d'une parcelle, d'un bassin versant ou d'une région, a pour objectif de comptabiliser les apports et pertes qui résultent des conditions géographiques et géologiques existantes (climat, topographie, végétation, lithologie, structure, hydrographie), mais aussi de l'exploitation humaine des réserves aquifères.

Globalement, le bilan exprime l'égalité des apports et des pertes pour une période donnée.



En se plaçant à l'échelle d'un bassin versant où l'exploitation humaine des réserves peut être négligée, le bilan peut être décomposé en plusieurs termes [76] :

Actif	{	Précipitations :	P	{	Écoulement de la période considérée :	Q
		Ressources en eaux souterraines provenant de la période précédente :	R		Evapotranspiration (ou déficit d'écoulement) D	D
					Ressources accumulées à la fin de la période considérée.....	R + ΔR

Balance : $P + R = Q + D + R + \Delta R$

Si la valeur des réserves est identique au début et à la fin de la période considérée (ou négligeable devant P et Q), ΔR est nul et le bilan s'exprime alors ainsi :

$P = D + Q$

Dans le cas général, la valeur d'une variable $Z(X)$, observée à une station de mesure et considérée comme la réalisation d'une fonction aléatoire, est la somme d'une composante régionale ($m(X)$: la dérive) et d'une composante aléatoire ($Y(X)$: la fluctuation locale) ; elle peut s'écrire :

$$Z(X) = m(X) + Y(X)$$

Deux situations se distinguent alors suivant l'existence ou non d'une dérive.

Quand il y a dérive (krigeage universel), le variogramme expérimental ne tend très généralement pas vers une limite : les valeurs de $Z(X)$ sont interdépendantes dans tout le champ d'étude, ce qui se traduit par l'absence d'une portée.

Si il n'y a pas de dérive ou si elle est constante (krigeage simple), les poids respectifs des points expérimentaux au voisinage d'un point à interpoler ne sont calculés que pour une distance inférieure à la portée du variogramme.

Suivant les besoins, la valeur de la variable régionalisée $Z(X)$ est recherchée sur des domaines d'étendue différente. On peut ainsi distinguer les trois cas principalement rencontrés :

- . Valeur prise par $Z(X)$ à différents points fixés (cartographie ponctuelle)
- . Valeur moyenne de $Z(X)$ prise pour des mailles de surface définie (méthode appliquée aux modèles numériques discrétisés)
- . valeur moyenne de $Z(X)$ sur l'ensemble d'un domaine (par exemple un bassin versant).

Pour l'estimation ponctuelle, comme d'ailleurs pour celle de moyenne par maille, il y a autant de système de krigeage que de points (ou de maille) à estimer. Si l'on prend en compte à chaque fois la totalité des données disponibles, on parlera alors de "voisinage unique".

Cependant, le nombre de point expérimentaux est généralement trop important pour pouvoir procéder ainsi sans allonger par trop le temps de calcul et compromettre la précision des résultats. On reformera alors à chaque fois le système de krigeage, en ne retenant que les données (entre 10 et 20) situées au voisinage du point (ou de la maille) à estimer. On parlera alors de "voisinage glissant".

Notons enfin que le krigeage réalise en quelque sorte une pondération "sur mesure" tenant compte de la variabilité du phénomène analysé. Quand celui-ci est continu, le krigeage accorde un poids important aux valeurs expérimentales proches, parce que, précisément, la continuité signifie que deux points voisins auront des valeurs voisines. Quand le phénomène est irrégulier, ceci n'est plus vrai, et le poids accordé aux points expérimentaux proches perd de l'importance.

Pour garantir la cohésion mathématique nécessaire aux calculs ultérieurs (krigeage proprement dit), il convient donc d'ajuster le variogramme expérimental à un modèle théorique.

Nous ne ferons ici que présenter les principaux modèles théoriques fréquemment utilisés (tableau IIA)

a	b	c	d
Modèle en h	Modèle exponentiel	Modèle sphérique	Modèle gaussien
Absence de palier	Existence d'un palier		
	Comportement linéaire à l'origine		Comportement parabolique à l'origine
$Y(h) = \omega h ^\lambda$	$Y(h) = \omega \left[1 - e^{-\frac{ h }{a}} \right]$	pour $h \leq a$ $Y(h) = \omega \left[\frac{3}{2} \frac{ h }{a} - \frac{1}{2} \left(\frac{ h }{a} \right)^3 \right]$ pour $h > a$ $Y(h) = \omega$	$Y(h) = \omega \left[1 - e^{-\left(\frac{ h }{a} \right)^2} \right]$

Parmi les types de modèles figurés, il convient de distinguer d'une part les modèles sans palier (a) où la variance augmente avec la distance (le phénomène présente une capacité illimitée de dispersion), d'autre part les modèles avec palier (b à d) où la variance est bornée.

En fonction de l'allure du variogramme expérimental, on choisit l'un ou l'autre de ces modèles, ou même une combinaison d'entre eux.

Enfin, la présence d'un effet de pépite C se traduit par l'addition de cette quantité C à un modèle classique Y_0 , en dehors de l'origine :

$$Y(h) = \begin{cases} 0 & \text{pour } h = 0 \\ Y_0(h) + C & \text{pour } h \neq 0 \end{cases}$$

La validité du choix peut se vérifier en comparant les portées et les couples de valeurs obtenues à partir du modèle, à ceux correspondants sur la courbe expérimentale.

4 - RETOUR AU KRIGEAGE PROPREMENT DIT.

L'estimation du variogramme, l'examen du comportement de son graphe et son ajustement à un modèle ont permis de se doter d'un outil capable de caractériser la variable spatiale d'un phénomène régionalisé.

Outre ces caractères analytiques, le krigeage permet une approche statistique en faisant appel à un modèle probabiliste. Il va consister à trouver la meilleure estimation linéaire possible de la valeur du phénomène dans une zone, compte tenu des données disponibles (à l'intérieur ou à l'extérieur de cette zone).

Ce graphe présente normalement le comportement suivant :

. il passe par l'origine : $\gamma(0) = 0$,

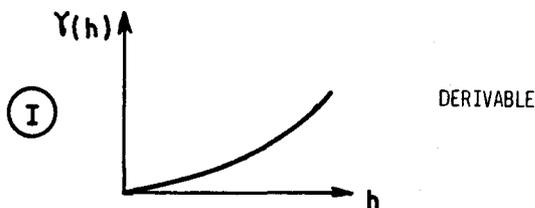
. il croit ensuite : plus la distance augmente entre les points considérés, plus les valeurs de la variable diffèrent statistiquement.

La croissance plus ou moins rapide caractérise d'une manière statistique la façon dont se détériore l'information apportée par une mesure ponctuelle quand on s'éloigne d'un point connu.

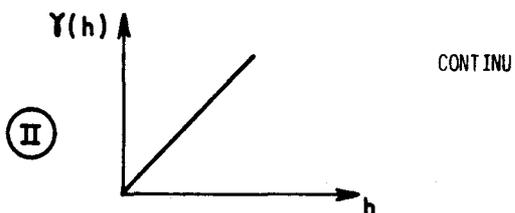
. Comportement à l'origine :

Il traduit la continuité de la variable régionalisée. Par ordre de régularité décroissante, on distingue classiquement quatre types :

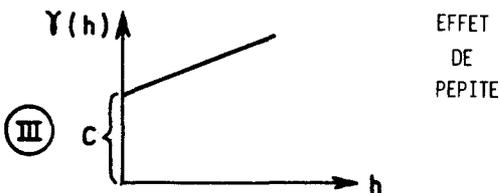
- Allure parabolique : caractérise une variable extrêmement régulière (dérivable en moyenne quadratique)



- Allure linéaire : variable moins régulière (continue en moyenne quadratique mais non dérivable)

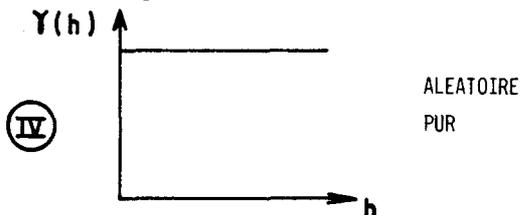


- Discontinuité à l'origine (effet de pépite) : variable très irrégulière (non continue en moyenne quadratique). Deux points distincts, mais très proches, présentent encore un écart, de variance au moins égale à l'effet de pépite C



NOTA : Le terme "effet de pépite" tire son origine des gisements d'or pépitiques, où la teneur en or varie considérablement selon que le point se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur d'une pépite. Le terme a été conservé pour désigner cette discontinuité du variogramme qui peut être due, soit à une microrégionalisation d'échelle très inférieure à l'espacement des données, soit à des erreurs de mesure.

- Aspect plat (effet de pépite pur) : correspond au cas où $Z(X)$ et $Z(X+h)$ sont sans corrélation quelque soit la distance h .



. Comportement aux grandes distances :

Contrairement aux fonctions de covariance (ou de corrélation) qui demeurent nécessairement bornées, le variogramme peut continuer indéfiniment à croître. Mais il peut aussi se stabiliser autour d'une valeur limite, appelée "palier". La distance à laquelle ce palier est atteint est appelée "portée" ; elle renseigne sur l'extension de la zone d'influence d'un point expérimental. Aux distances supérieures à la portée, les corrélations sont nulles.

33 - Principe d'ajustement à un modèle

Dans la pratique, un variogramme expérimental se présente comme une courbe généralement irrégulière établie pour des distances variant du quart à la moitié des dimensions de la zone étudiée. Les fluctuations du graphe sont la plupart du temps dues à ce que les différentes valeurs de $\gamma(h)$ calculées ne sont en fait que des estimations obtenues avec un petit nombre de couples. Le variogramme expérimental n'est alors qu'un estimateur du variogramme réel, et il ne peut être utilisé tel quel.

- ou, en régime transitoire, égale à la quantité d'eau emmagasinée dans le volume considéré (ou produite) dans l'unité de temps.

Le principe de conservation de la masse se traduit par l'équation de continuité que l'on peut établir pour un volume élémentaire correspondant à une "tranche" de milieu poreux saturé allant depuis le substratum jusqu'au toit de l'aquifère (nappe captive) :

$$\frac{dv}{dt} + Q = - \left[\frac{\partial}{\partial x} (e U_x) + \frac{\partial}{\partial y} (e U_y) \right] dx dy \quad (1)$$

avec : U = vitesse apparente de Darcy

e = épaisseur de l'aquifère

Q = débit

v = volume stocké dans l'élément $e dx dy$

En remplaçant la vitesse U par sa valeur en fonction de la charge d'après la loi de Darcy (2) et en exprimant la variation de volume dv/dt par son expression en fonction de la charge et du coefficient d'emmagasinement S de l'aquifère (3) on obtient :

$$U_x = - K_x \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$U_y = - K_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} = S dx dy \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

$$- \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(- e K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(- e K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] dx dy = S \frac{dH}{dt} dx dy + Q \quad (4)$$

Si on note T_x et T_y les transmissivités suivant x et y et en simplifiant par $dx dy$ les deux membres il vient :

$T_x = e K_x$ et Q représente la somme algébrique des débits soustraits
 $T_y = e K_y$ ou injectés par unité de surface.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = S \frac{dH}{dt} + Q$$

équation générale de la diffusivité écrite également (*) :

$$\operatorname{div} (T \operatorname{grad} H) = S \frac{dH}{dt} + Q$$

Cette équation exprime que le flux traversant la frontière d'un domaine est égal au taux de variation de la quantité d'eau emmagasinée dans le domaine.

Si T est constant, homogène et isotrope, cette équation devient :

$$\underbrace{\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2}}_{\text{"Laplacien de H"}} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{Q}{t}$$

"Laplacien
de H"

En régime permanent, le terme $\frac{\partial H}{\partial t}$ est nul et l'équation générale se réduit à :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial H}{\partial x} \right) = Q$$

(*) div (divergence) d'un vecteur F d'un espace à 2 dimensions est par définition la somme :

$\frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y}$; F_x F_y étant les composantes du vecteur F suivant x y.

III - RESOLUTION DE L'EQUATION DE DIFFUSIVITE

1 - RESOLUTION ANALYTIQUE

Intégrer analytiquement l'équation de diffusivité consiste à rechercher une fonction s'exprimant sous une forme analytique et qui soit solution exacte de l'équation aux dérivées partielles.

Cependant, une telle résolution n'est possible que dans un nombre très limité de cas, telle la fonction de puits de Theis. Sous une forme numérique tabulée, elle est utilisée très couramment pour interpréter un "essai de débit" sur un puits.

Ces solutions analytiques permettent de résoudre un grand nombre de problèmes, surtout locaux, ou pour une période de prévision relativement courte. Mais en général, elles ne permettent pas de représenter fidèlement le comportement d'un aquifère réel étendu (avec ses hétérogénéités et ses limites, ses nombreux ouvrages de captage) et sur une longue période de temps.

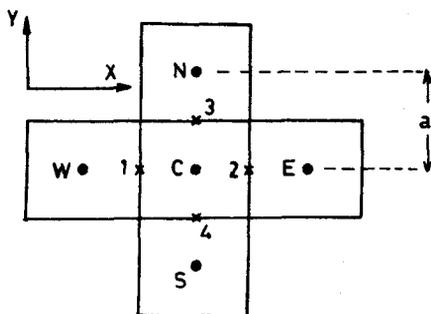
L'accroissement des besoins en eau a nécessité le recours à des techniques d'intégration approchée de l'équation de diffusivité, méthodes numériques (appelées couramment "modèles mathématiques") réparties en deux groupes :

- les méthodes de développement en série de fonctions où l'on s'efforce d'approximer la fonction H sous forme d'une somme de solutions analytiques simples,
- les méthodes de discrétisation où l'on remplace le problème posé (connaître H en tout point à toute date) par un problème simplifié : connaître H en un certain nombre de points limités sur un maillage et à certaines époques seulement.

2 - RESOLUTION NUMERIQUE PAR LES DIFFERENCES FINIES - CAS DU REGIME PERMANENT

Dans le cas du régime permanent, la résolution de l'équation de diffusivité n'exige plus la connaissance de conditions initiales, mais les conditions aux limites demeurent nécessaires.

Si l'on découpe la nappe à étudier à l'aide d'un réseau de n mailles carrées de côtés a , l'inconnue sera non plus la valeur de h en tout point x, y , mais une approximation H (valeur aux noeuds du réseau) qui soit une représentation suffisamment fine de h étant donné la précision requise (fonction du pas de discrétisation a).



Pour les n noeuds du domaine, l'inconnue est la charge H en tous les noeuds, sauf ceux des limites où une condition de potentiel est imposée. Si p est le nombre de points où une telle condition est imposée et si l'on note m le nombre ($n-p$), c'est, en fait, m inconnues simples (m valeurs numériques de la charge H aux m noeuds que l'on cherche. On parle de "vecteur" H à m composantes inconnues. On aura de même un "vecteur" T de transmissivité aux n noeuds du maillage.

Si l'on appelle T_w la transmissivité entre les points C et W , T_E la transmissivité entre les points C et E , etc... la méthode des différences finies établit que, par exemple, suivant x , la dérivée partielle $T_x \frac{\partial H}{\partial x}$ est égale à la différence de charge entre deux points voisins, divisée par la distance qui les sépare et qui est la taille de la maille.

En partant de l'équation de la diffusivité établie pour un écoulement plan en régime permanent et pour une nappe captive (ou assimilée) :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial H}{\partial y}) = Q_c$$

on évalue les termes du premier membre suivant les directions WCE et NCS où varient respectivement x et y :

$$\frac{\partial}{\partial x} (T_x \frac{\partial H}{\partial x}) = (T_E \frac{H_e - H_c}{a} - T_W \frac{H_c - H_w}{a}) \frac{1}{a}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (T_y \frac{\partial H}{\partial y}) = (T_N \frac{H_n - H_c}{a} - T_S \frac{H_c - H_s}{a}) \frac{1}{a}$$

d'où :

$$TN (H_n - H_c) + TE (H_e - H_c) + TW (H_w - H_c) + TS (H_s - H_c) = a^2 q$$

Le terme $a^2 q$ représente le débit total Q_c échangé par la maille C avec le milieu extérieur.

On peut écrire autant d'équations de ce type qu'il existe de maille m où H est inconnu : on aura un système linéaire en H, de m équations à m inconnues, problème qui possède une solution unique.

IV - CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE

Dans le cas du modèle NEWSAM utilisé, quatre tailles de mailles de dimension a, 2a, 4a, 8a sont possibles. Cette faculté de discrétisation du domaine d'étude réduit considérablement le nombre de points de calcul en permettant d'adapter le maillage à la distribution des données hydrogéologiques dont on peut disposer et à la position des zones où des résultats précis sont escomptés.

La structure du modèle ayant été définie et les conditions aux limites fixées, on introduit les données hydrologiques nécessaires au calcul. Dans le cas du régime permanent traité ici il s'agit des données suivantes :

- des conditions aux limites externes qui peuvent être soit des conditions de débits (positifs, négatifs ou nuls) soit des conditions de potentiels,
- des conditions à l'intérieur du modèle sous forme de débits positifs ou négatifs (alimentation naturelle due aux précipitations ou artificielle, pompages) ou de potentiels imposés,
- des coefficients de transfert à travers les semi-perméables (aquifères multicouches) et dans les secteurs des cours d'eau où une drainance (positive ou négative) est simulée,
- des transmissivités horizontales pour chacune des mailles.

Le calage du modèle consiste alors à ajuster, sur la piézométrie de référence, la piézométrie calculée en faisant varier par approximations successives les paramètres suivants à l'intérieur de fourchettes plus ou moins larges selon le degré de connaissance que l'on a du système, mais aussi la dimension des mailles correspondantes :

- . transmissivités,
- . débits d'alimentation.

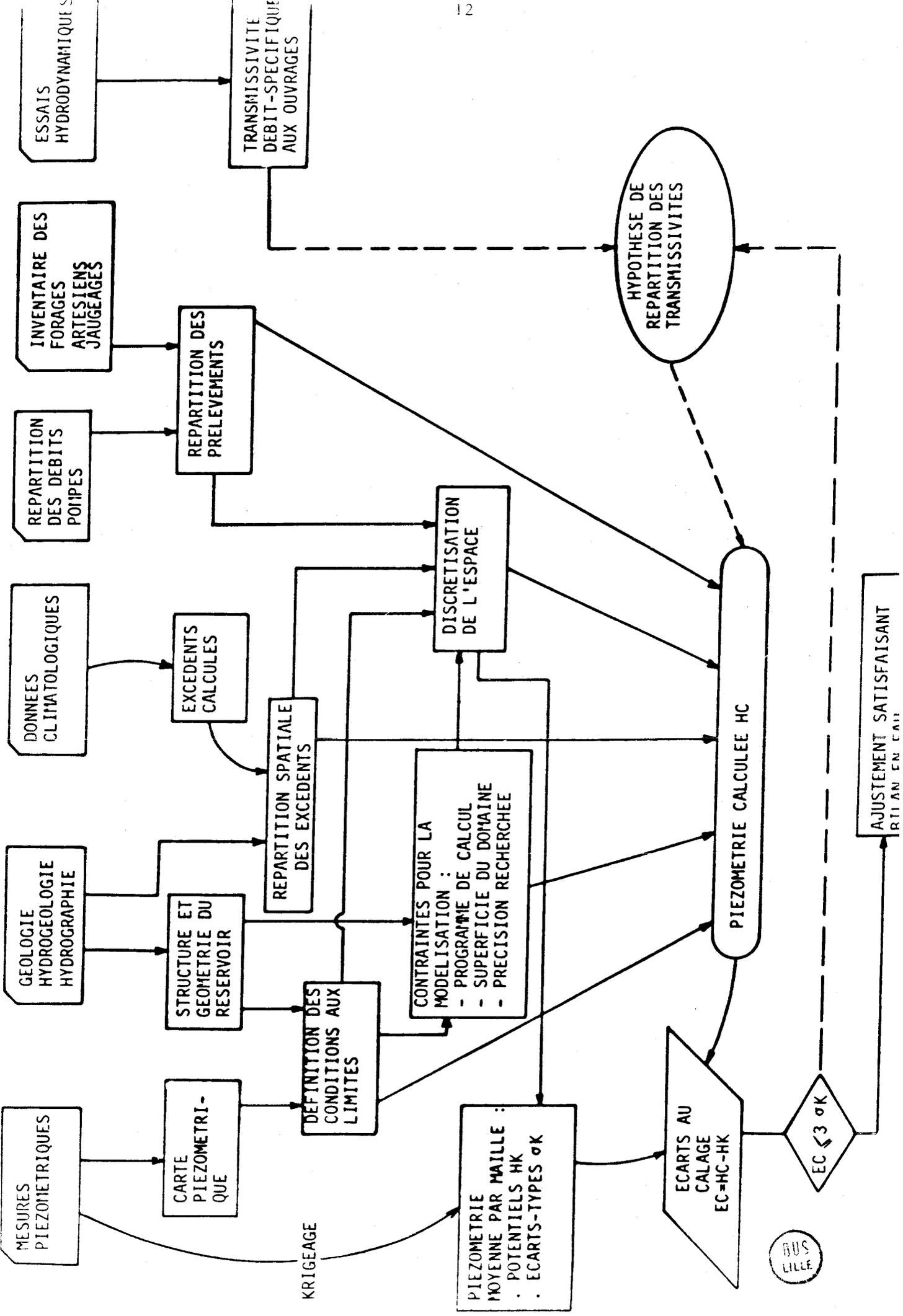
La nécessité d'avoir une valeur des différentes données en chaque maille conduit très généralement à faire des estimations dans la mesure où les données de terrains sont irrégulièrement réparties. Dans ce cadre, la modélisation effectuée ici a utilisé la méthode du krigeage afin d'estimer la valeur (et la précision sur ces estimations) en chaque maille des paramètres suivants :

- piézométrie de référence : HK , valeur moyenne du potentiel pour chaque maille du modèle ; σK , écart-type d'estimation correspondant.
- débits d'alimentation naturelle due aux précipitations en chaque maille d'une grille régulière de côté $8a$.

La planche ci-contre schématise l'ensemble des données et traitements réalisés pour aboutir à un ajustement satisfaisant. Dans la mesure où a été calculé un écart-type d'estimation (σK) de la piézométrie krigée, on admet le calage obtenu quand l'écart au calage (ϵ_c) est inférieur ou égal à $3\sigma K$; l'écart au calage représentant la différence entre le potentiel calculé et le potentiel krigé.

V - CONCLUSIONS

La représentativité du modèle et sa fiabilité en tant qu'outil de prévision sont étroitement liées à la qualité du calage effectué. Cette représentativité dépend aussi bien de la précision des données introduites dans le modèle que de la conception même du modèle. Dans cette phase de conception, qui réalise le passage de la réalité physique au modèle mathématique, s'effectuent certains choix fondamentaux, tels que l'extension du domaine à modéliser, le choix du maillage, la définition des conditions aux limites, le nombre de couches à représenter et leurs relations respectives, etc... Ces choix doivent nécessairement être faits par l'hydrogéologue.



AJUSTEMENT SATISFAISANT
RITAN EN CAU

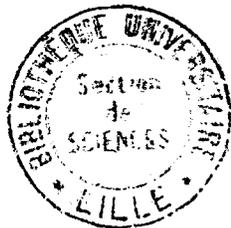
BUS LILLE

La construction d'un modèle mathématique représentant une structure complexe oblige l'hydrogéologue à une continuelle remise en question de l'observation ponctuelle par son incidence sur les limites du système hydraulique. Le modèle utilise essentiellement le principe de conservation de masse et la loi de Darcy. Pour peu que l'hydrogéologue base son raisonnement sur les mêmes principes, la phase préliminaire du modèle, consistant en une synthèse de l'ensemble des données existantes, constituera un cadre suffisamment cohérent pour que l'adaptation d'un programme de simulation adéquat ne pose pas de difficulté de calage.

La construction du modèle procède donc moins du raisonnement mathématique que de celui propre aux sciences expérimentales consistant en une chaîne d'observations et de déductions. Contrairement à ce qui est souvent admis, la part de l'observation qualitative est prépondérante, surtout lorsque l'on se place dans le cadre d'un vaste ensemble sédimentaire.

BIBLIOGRAPHIE DE L'ANNEXE X

- BESBES M. (1978) : L'estimation des apports aux nappes souterraines - Un modèle régional d'infiltration efficace. Thèse Docteur ès-sciences, Université Paris VI.
- BESBES M, DE MARSILY G, PLAUD Y, EMSELLEM, ASTIE H. : Faut-il être hydrogéologue ou informaticien pour construire un modèle ? Mémoires Congrès ATH de Montpellier, 1974.
- BONNET M. : Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie. Thèse de Docteur ès sciences, Inst. Nat. Polyt. de Lorraine, 1978.
- CROCHET P. : Etude comparative de divers programmes d'interpolation en vue de la reconstitution d'une surface piézométrique - Rapport BRGM 80 SGN 117-HYD.
- EMSELLEM Y. : Construction de modèles mathématiques en hydrogéologie. Rapport CIG-EMP, 1971.
- LEDOUX E. (1978) : Programme NEWSAM - Principe et notice d'emploi - Mise à jour janvier 1978. E.N.S.M.P. - Centre d'informatique géologique.
- LEVASSOR A. : Simulation et gestion des systèmes aquifères - Application aux nappes du Complexe Terminal du bas-Sahara algérien. Thèse de 3ème cycle, Paris, 1978.
- DE MARSILY G. : Calculs en géologie - In Traité d'Informatique Géologique, P. LAFFITE, Masson, Paris, 1972.
- DE MARSILY G., LEDOUX E., LEVASSOR A., POTRINAL D., SALEM A. : Modelling of large multilayered aquifer systems. Theory and applications. Journal of Hydrology, 35 (1978), 1-34.





Cette carte a été réalisée au Service géologique régional Nord-Pas-de-Calais par :
J. Beckelynick et J.P. Kiszcz
sous la direction de MM. P. Caulier et A. Talbot,
M. G. Souliez étant coordinateur interrégional
B.R.G.M. Région Nord

TRAVAUX ET DOCUMENTS CONSULTÉS

- Cartes géologiques au 1/80 000 : Boulogne, Saint-Omer, Lille, Montreuil, Arras, Douai, Maubeuge, Cambrai.
- Cartes géologiques au 1/50 000 : Marquise, Guines, Cassel, Steenvoorde, Saint-Omer, Lille-Halluin, Montreuil, Fruges, Lillers, Béthune, Carvin, St-Amand-Crespin-Mons, Hedin, Saint-Pol, Arras, Douai, Valenciennes, Le Quesnoy, Maubeuge, Bapaume, Cambrai, Le Cateau, Avesnes, Trélon.
- Travaux entrepris au titre du Service public.

La publication a été réalisée avec le concours financier des
Conseils généraux des départements du Nord et du Pas-de-Calais

CARTE DE VULNÉRABILITÉ
DES EAUX SOUTERRAINES A LA POLLUTION

REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

PRÉAMBULE

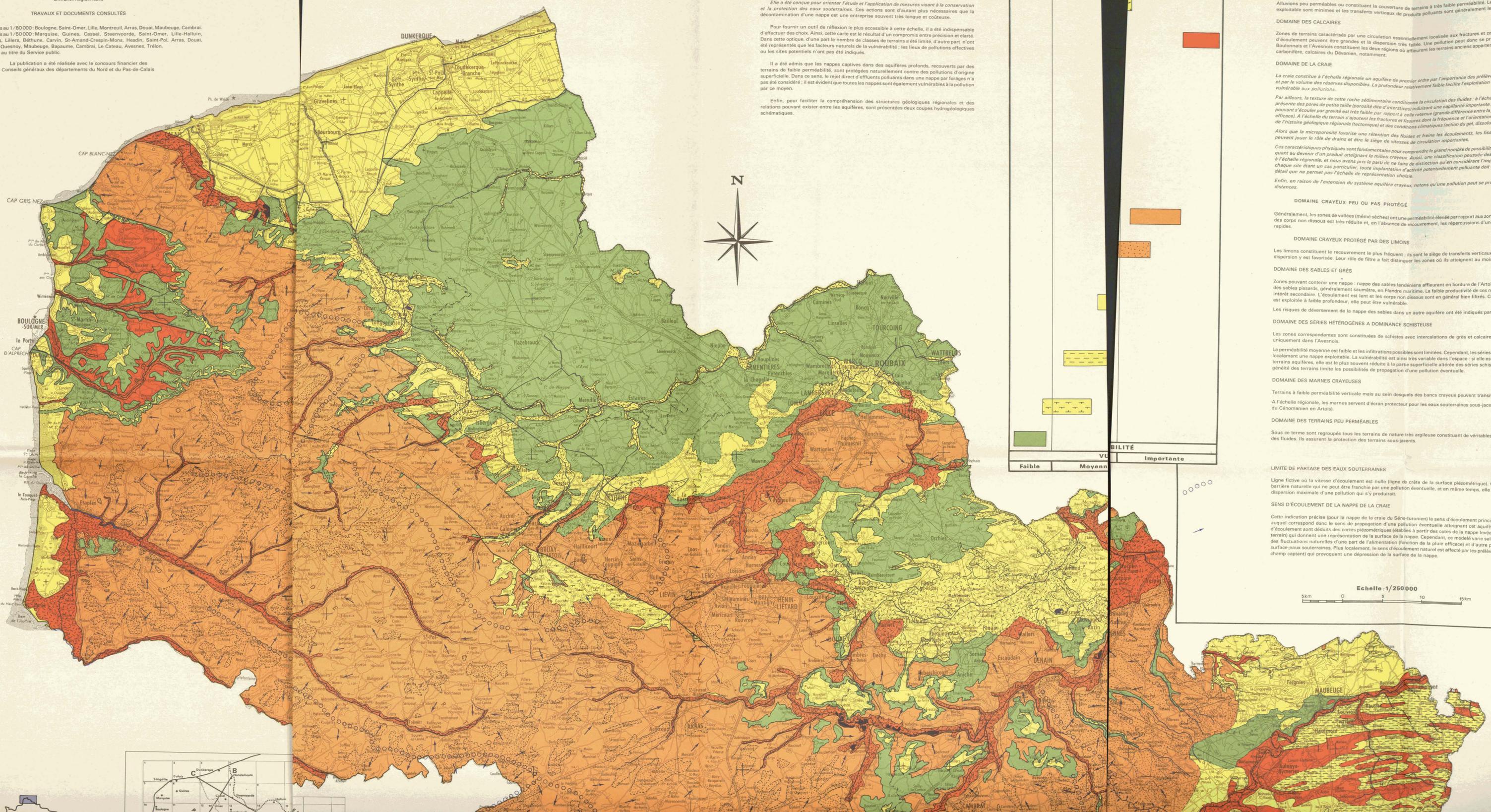
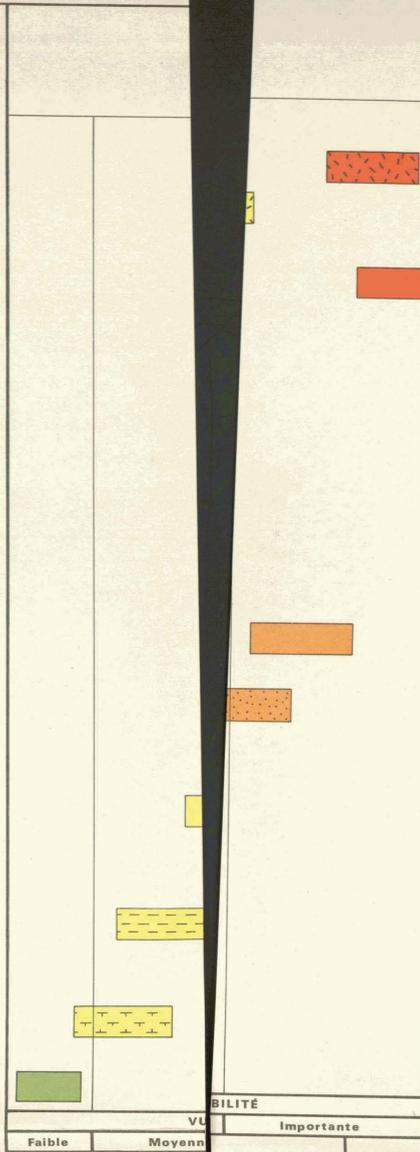
Cette carte a été dressée dans le but de montrer quelles sont, suivant la nature des terrains rencontrés en surface et les conditions hydrogéologiques, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans les aquifères, c'est-à-dire la vulnérabilité des nappes à la pollution. Cette cartographie à l'échelle 1/250 000 présente une vue régionale des paramètres qui conditionnent cette vulnérabilité.

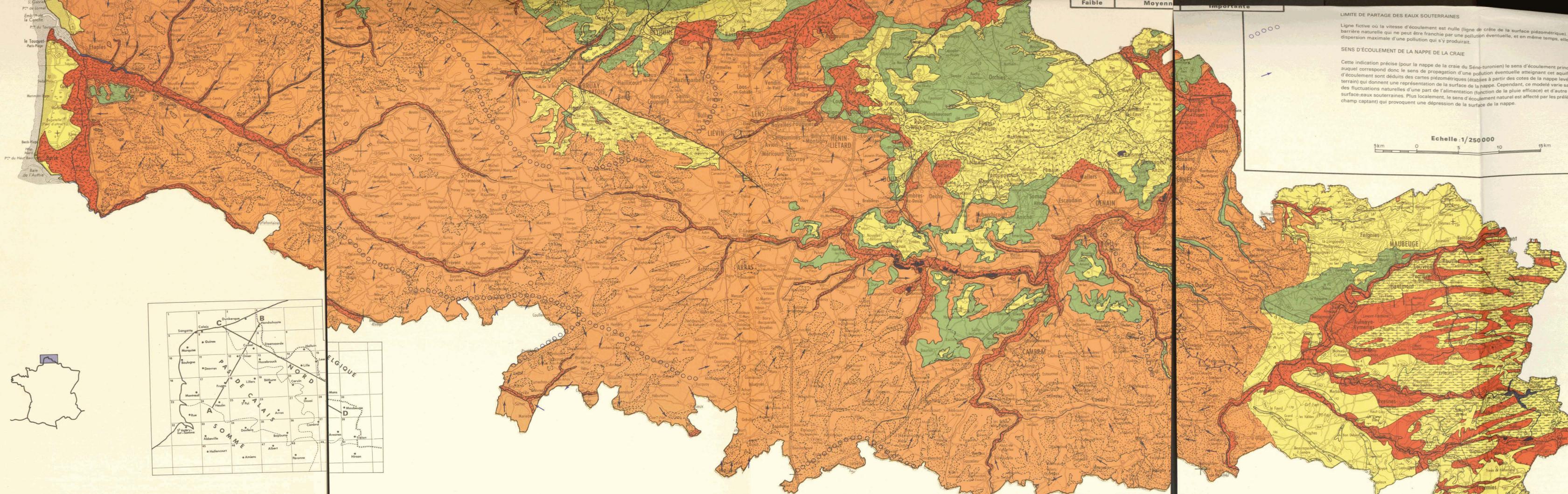
Elle a été conçue pour orienter l'étude et l'application de mesures visant à la conservation et la protection des eaux souterraines. Ces actions sont d'autant plus nécessaires que la décontamination d'une nappe est une entreprise souvent très longue et coûteuse.

Pour fournir un outil de réflexion le plus accessible à cette échelle, il a été indispensable d'effectuer des choix. Ainsi, cette carte est le résultat d'un compromis entre précision et clarté. Dans cette optique, d'une part le nombre de classes de terrains a été limité, d'autre part n'ont été représentés que les facteurs naturels de la vulnérabilité : les lieux de pollutions effectives ou les sites potentiels n'ont pas été indiqués.

Il a été admis que les nappes captives dans des aquifères profonds, recouverts par des terrains de faible perméabilité, sont protégées naturellement contre des pollutions d'origine superficielle. Dans ce sens, le rejet direct d'effluents polluants dans une nappe par forages n'a pas été considéré ; il est évident que toutes les nappes sont également vulnérables à la pollution par ce moyen.

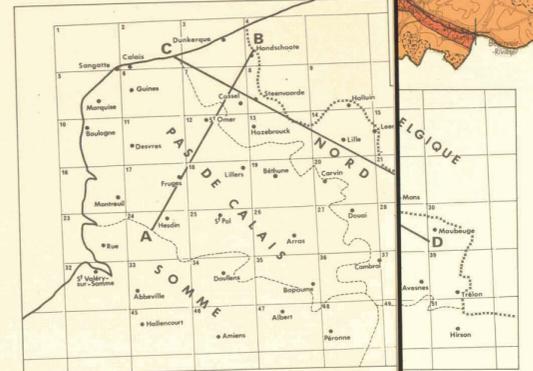
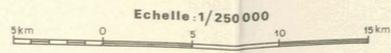
Enfin, pour faciliter la compréhension des structures géologiques régionales et des relations pouvant exister entre les aquifères, sont présentés deux coupes hydrogéologiques schématiques.





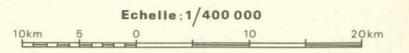
LIMITE DE PARTAGE DES EAUX SOUTERRAINES
 Ligne fictive où la vitesse d'écoulement est nulle (ligne de crête de la surface piézométrique). Cette barrière naturelle qui ne peut être franchie par une pollution éventuelle, et en même temps, elle coïncide avec la dispersion maximale d'une pollution qui s'y produirait.

SENS D'ÉCOULEMENT DE LA NAPPE DE LA CRAIE
 Cette indication précise (pour la nappe de la craie du Séno-turonien) le sens d'écoulement principal auquel correspond donc le sens de propagation d'une pollution éventuelle atteignant cet aquifère. Ce sens d'écoulement est déduit des cartes piézométriques (établies à partir des cotes de la nappe levées sur terrain) qui donnent une représentation de la surface de la nappe. Cependant, ce modèle varie saisonnièrement en raison des fluctuations naturelles d'une part de l'alimentation (fonction de la pluie efficace) et d'autre part de la consommation des eaux souterraines. Plus localement, le sens d'écoulement naturel est affecté par les prélèvements en champ captant qui provoquent une dépression de la surface de la nappe.

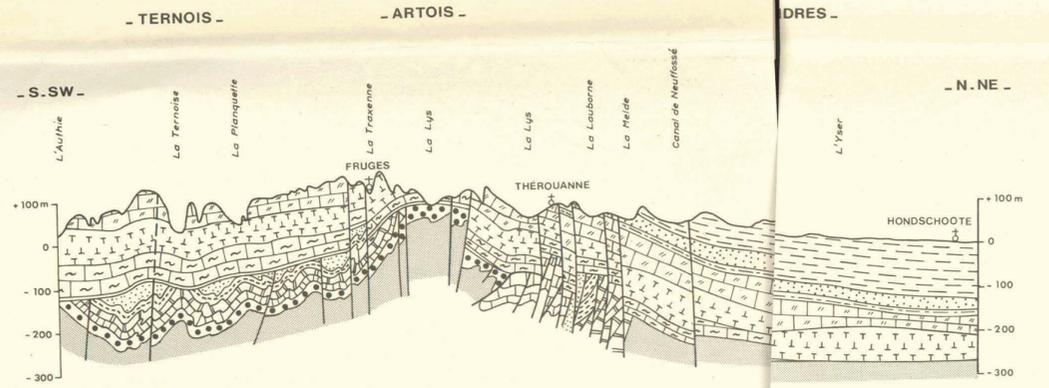


LÉGENDE DES COUPES HYDROGÉOLOGIQUES

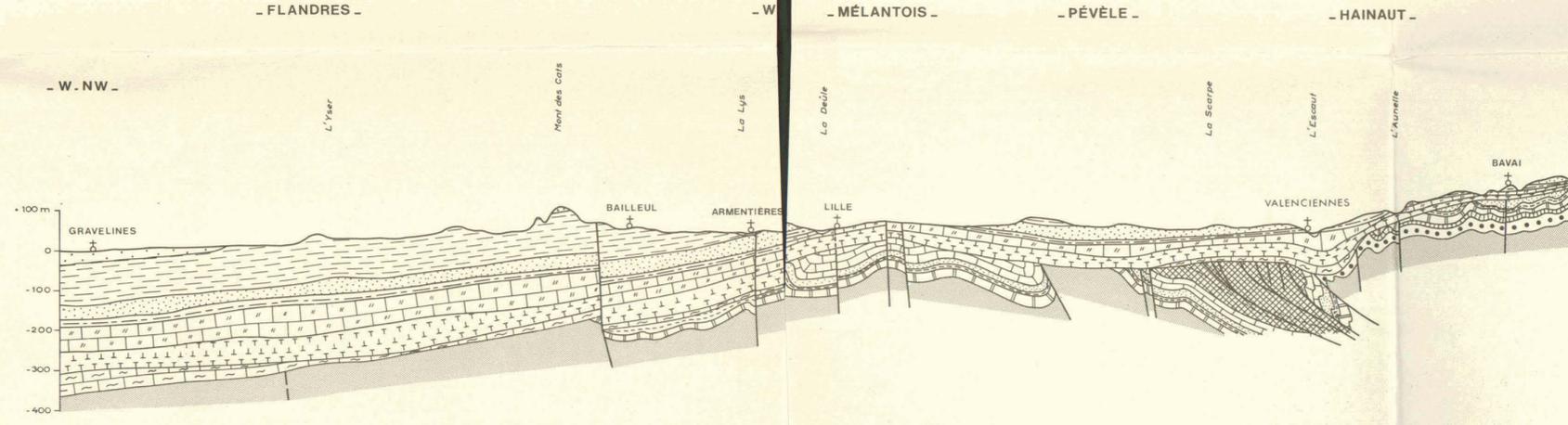
- Sables (Flandrien) - *Nappe libre des sables pissards.*
- Argiles des Flandres (Yprésien).
- Sables et Grès d'Ostricourt (Landénien supérieur) - *Nappe des sables tertiaires.*
- Argile de Louvil et tuffeau (Landénien inférieur).
- Craie blanche et craie grise (Séno-turonien) - *Nappe de la craie.*
- Marnes crayeuses (Turonien moyen et inférieur).
- Craie marneuse (Cénomannien) - *Nappe captive de la craie cénomannienne.*
- Argiles du "Gault" (Albien).
- Grès, schistes et houille (Carbonifère supérieur : Westphalien et Namurien).
- Calcaires, dolomies et schistes (Carbonifère inférieur : Tournaisien et Viséen) - *Nappe captive du "Calcaire carbonifère".*
- Grès, schistes et calcaires (Dévonien supérieur et moyen) - *Nappe des calcaires givétiens et frasniens, nappe des grès fameniens.*
- Grès, schistes et calcaires (Dévonien inférieur).
- Schistes (Silurien).
- Faille.



COUPE SUIVANT A-B



SUIVANT C-D



Année 1977

Éléments considérés : SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , TH

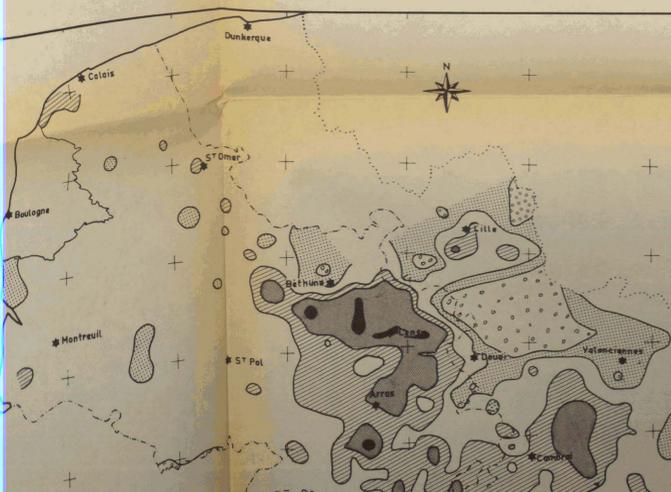
LÉGENDE

-  Limite du recouvrement tertiaire
-  Bassin minier
-  Limite d'état
-  Limite de département

Classe de qualité:

-  Mauvaise
-  Médiocre
-  Correcte
-  Bonne

ECHELLE: 1 / 250 000
5 km 0 5 10 15 km



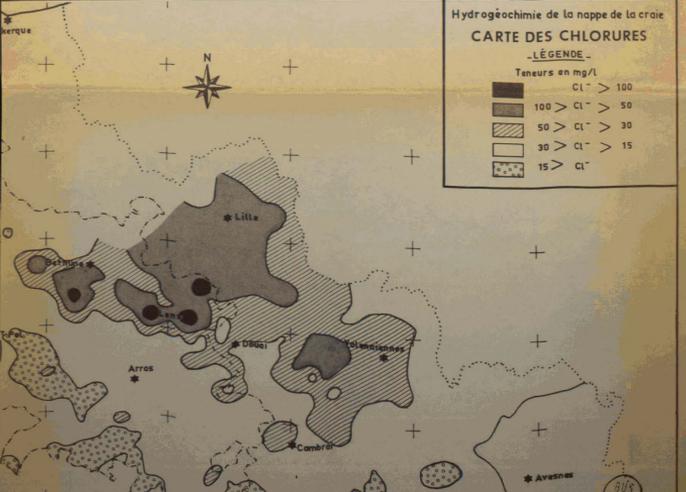
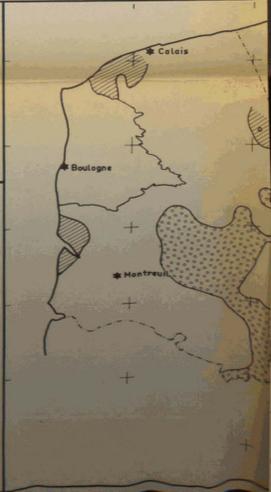
Hydrogéochimie de la nappe de la craie
CARTE DES NITRATES
-LÉGENDE-
Teneurs en mg/l

	$NO_3^- > 80$
	$NO_3^- > 44$
	$NO_3^- > 30$
	$NO_3^- > 15$
	$NO_3^- > 5$



Hydrogéochimie de la nappe de la craie
CARTE DES SULFATES
-LÉGENDE-
Teneurs en mg/l

	$SO_4^{2-} > 250$
	$SO_4^{2-} > 100$
	$SO_4^{2-} > 50$
	$SO_4^{2-} > 25$



Hydrogéochimie de la nappe de la craie
CARTE DES CHLORURES
-LÉGENDE-
Teneurs en mg/l

	$Cl^- > 100$
	$Cl^- > 50$
	$Cl^- > 30$
	$Cl^- > 15$
	$Cl^- > 5$

1

2

32



5 360

6

7

350

10 340

11

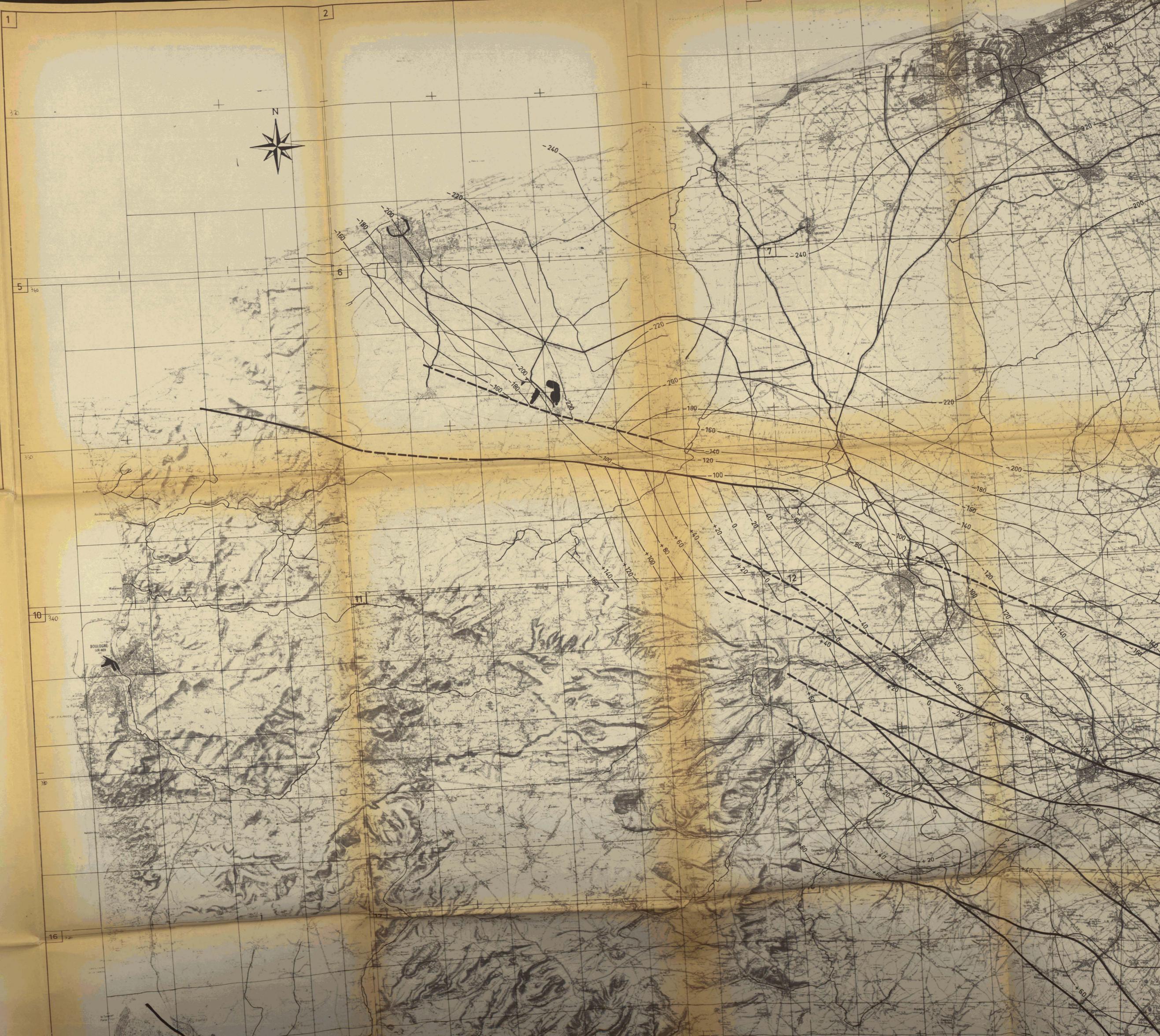
12

330

16 320

BOULOGNE
sur MER

LA LAIS



Annexe XII

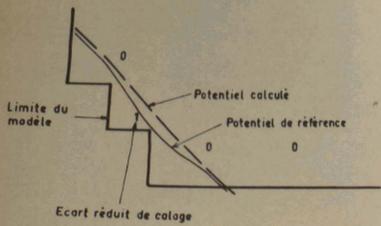
50876
1981
197

- BASSIN DE L'AA ET DE LA MOYENNE LYS -

- Modélisation de l'aquifère crayeux -

- Comparaison entre piézométrie de référence et calculée -

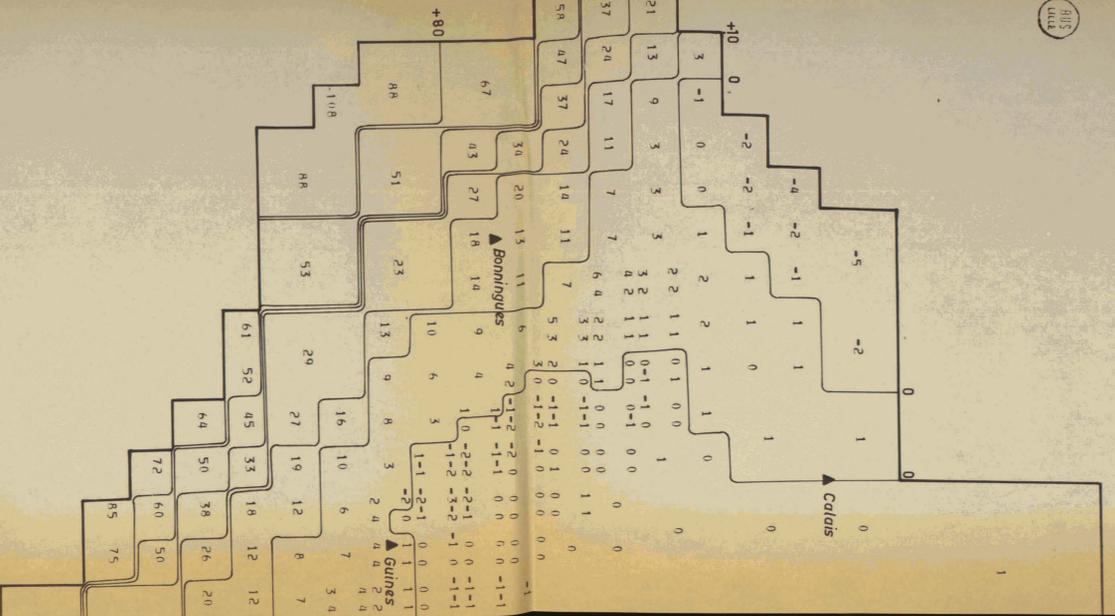
- LÉGENDE -



Echelle: 1/100 000

0 40 km
ECHELLE: -----





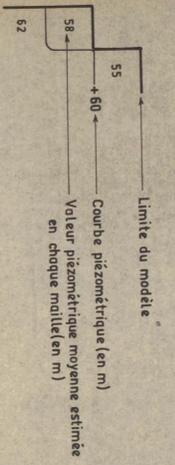
Annexe XI
50376
1981
197

- BASSIN DE L'AA ET DE LA MOYENNE LYS -

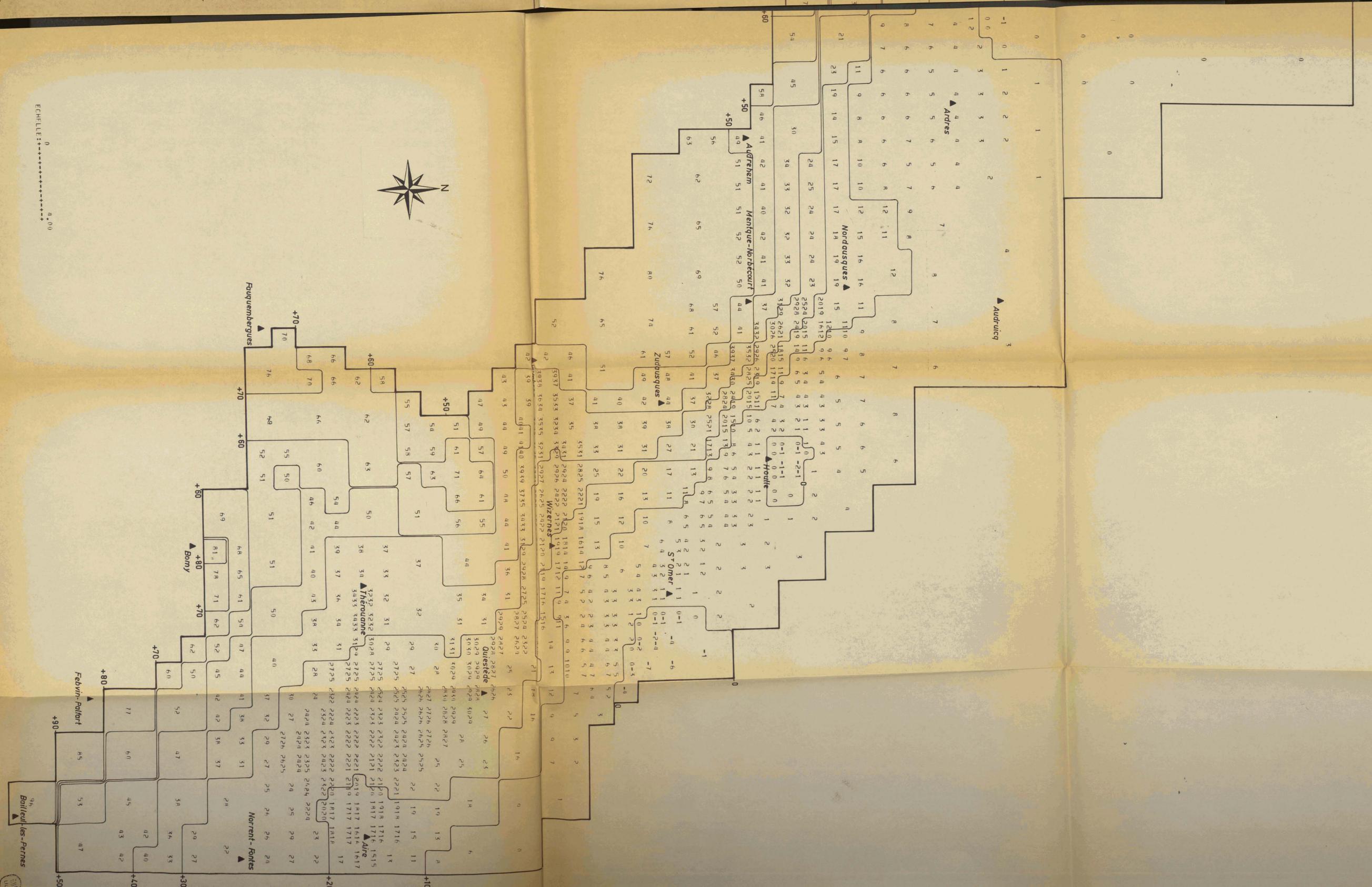
- Modélisation de l'aquifère creux -

- Piézométrie de référence obtenue par krigage -

- LÉGENDE -



Echelle: 1/100 000 environ



ECHILLE:+++++0.00

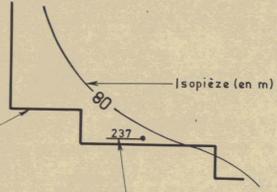
50376
1981
197

- BASSIN DE L'AA ET DE LA MOYENNE LYS -

- Modélisation de l'aquifère crayeux -

- CARTE PIÉZOMÉTRIQUE DE BASSES EAUX -

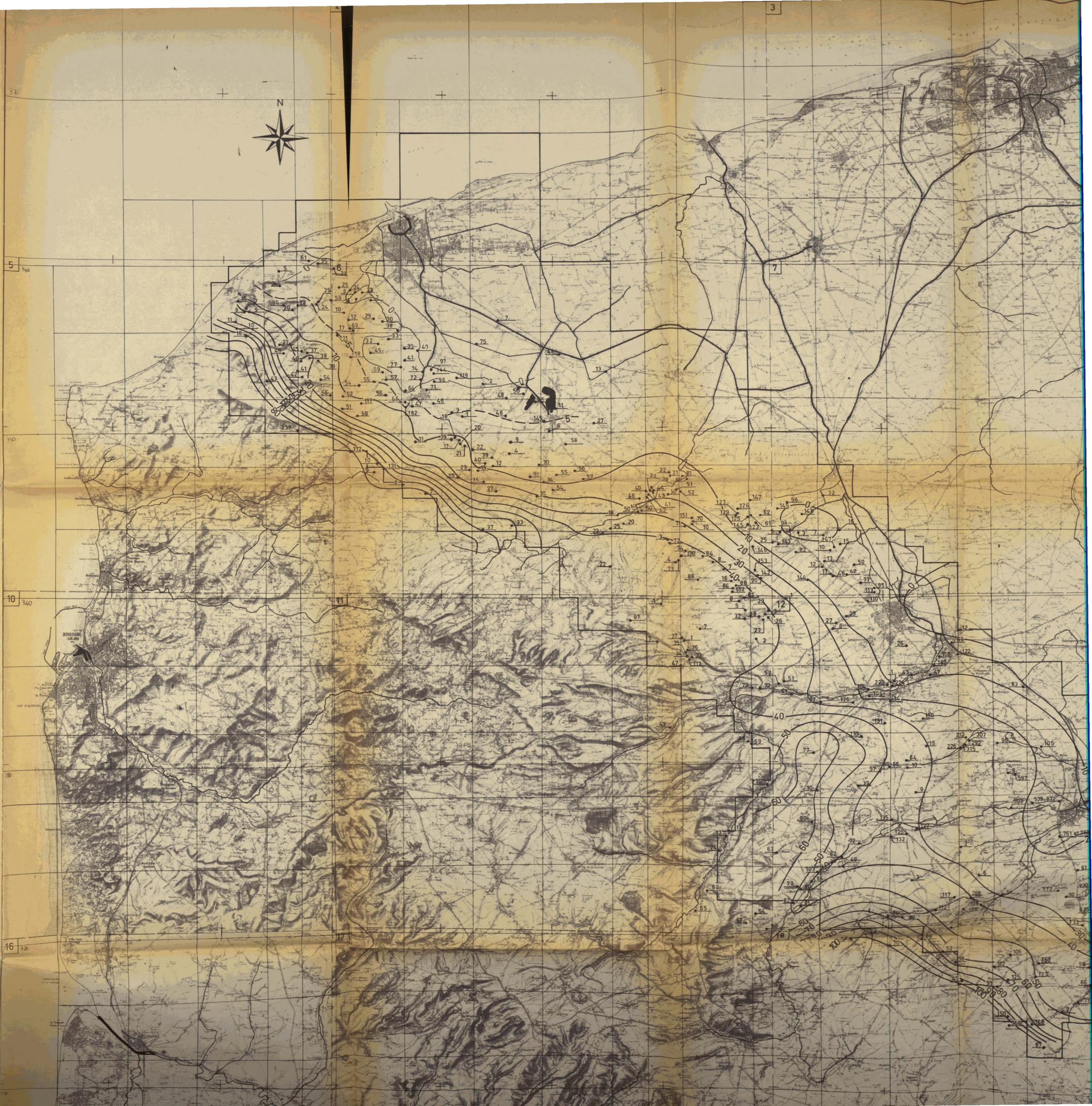
- LÉGENDE -



Point de prélèvement et numéro de l'ouvrage dans le huitième



Echelle: 1/100 000



- Modélisation de l'aquifère crayeux -

- CARTE DU TOIT DU SÉNONIEN -

LÉGENDE

- - 20 - - Courbe isohypse du toit du Sénonien -
-  Limite du recouvrement tertiaire -
-  Faille observée ou probable -



Echelle: 1/100 000

