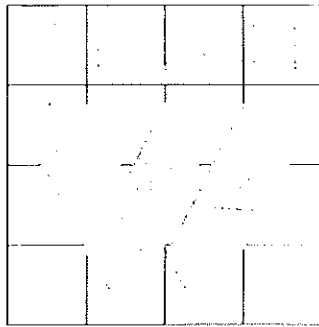




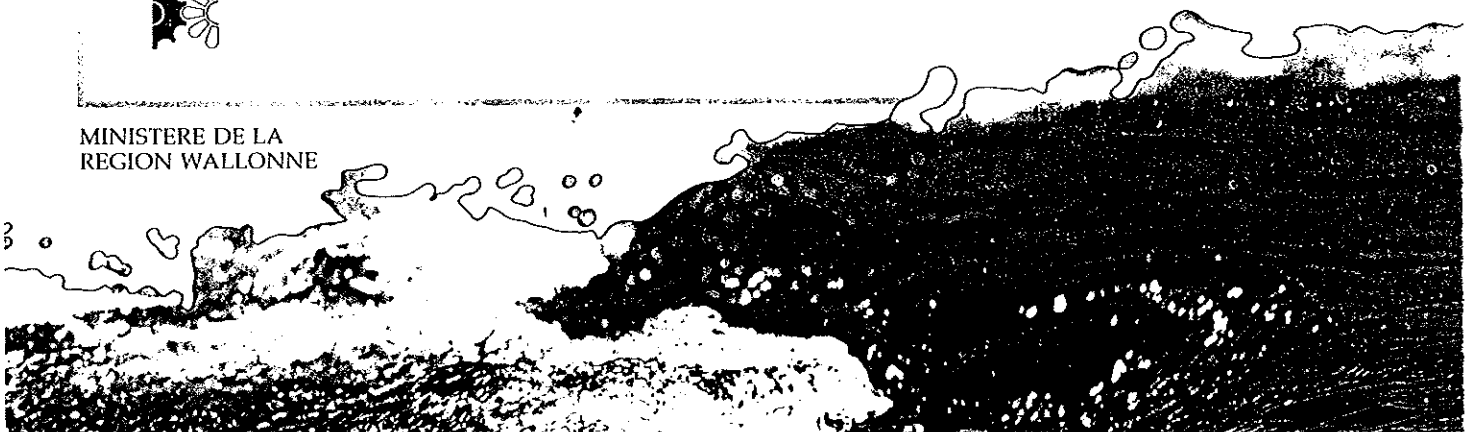
LES EAUX SOUTERRAINES EN WALLONIE

BILAN ET PERSPECTIVES

ESO '87



MINISTRE DE LA
REGION WALLONNE



MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA
NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

Ir. P. Y. BOLLY (1)(2)
Ir. A. DASSARGUES (1)

RESUME

La nappe aquifère de Hesbaye est logée dans les craies du Crétacé près de Liège. Quarante-cinq kilomètres de galeries captantes et de nombreux puits permettent un prélèvement journalier de 60.000 m³ fournissant l'alimentation en eau de la région de Liège. Des modèles mathématiques ont été réalisés afin de pouvoir fournir l'évolution des hauteurs d'eau dans la nappe, les flux et les axes drainants principaux en fonction de tous les facteurs extérieurs que l'on serait susceptible de lui imposer.

Le programme NEWSAM de calcul par différences finies a été utilisé pour l'étude de l'aquifère en mode permanent et en quasi-3D. D'autre part, des modèles 2D et 3D par éléments finis ont été développés sur un programme LAGATHER (conductivité thermique) adapté aux écoulements en milieu poreux, en mode transitoire et avec une surface libre.

Ces deux types de modèle ont donné d'excellents résultats et sont d'une aide très précieuse pour la détermination des variations de perméabilité (durant le calage) ainsi que des estimations de bilans hydrogéologiques. Les conclusions soulignent la complémentarité pour ce type d'étude des deux modèles envisagés et la possibilité de les utiliser à présent à des fins prévisionnelles.

(1) Ingénieur de recherches aux Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de l'Université de Liège (LGIH).

(2) Actuellement ingénieur à la Société Intercommunale de Développement Economique du Hainaut Occidental, détaché au Service Géologique de Belgique (SIDEHO, SGB).

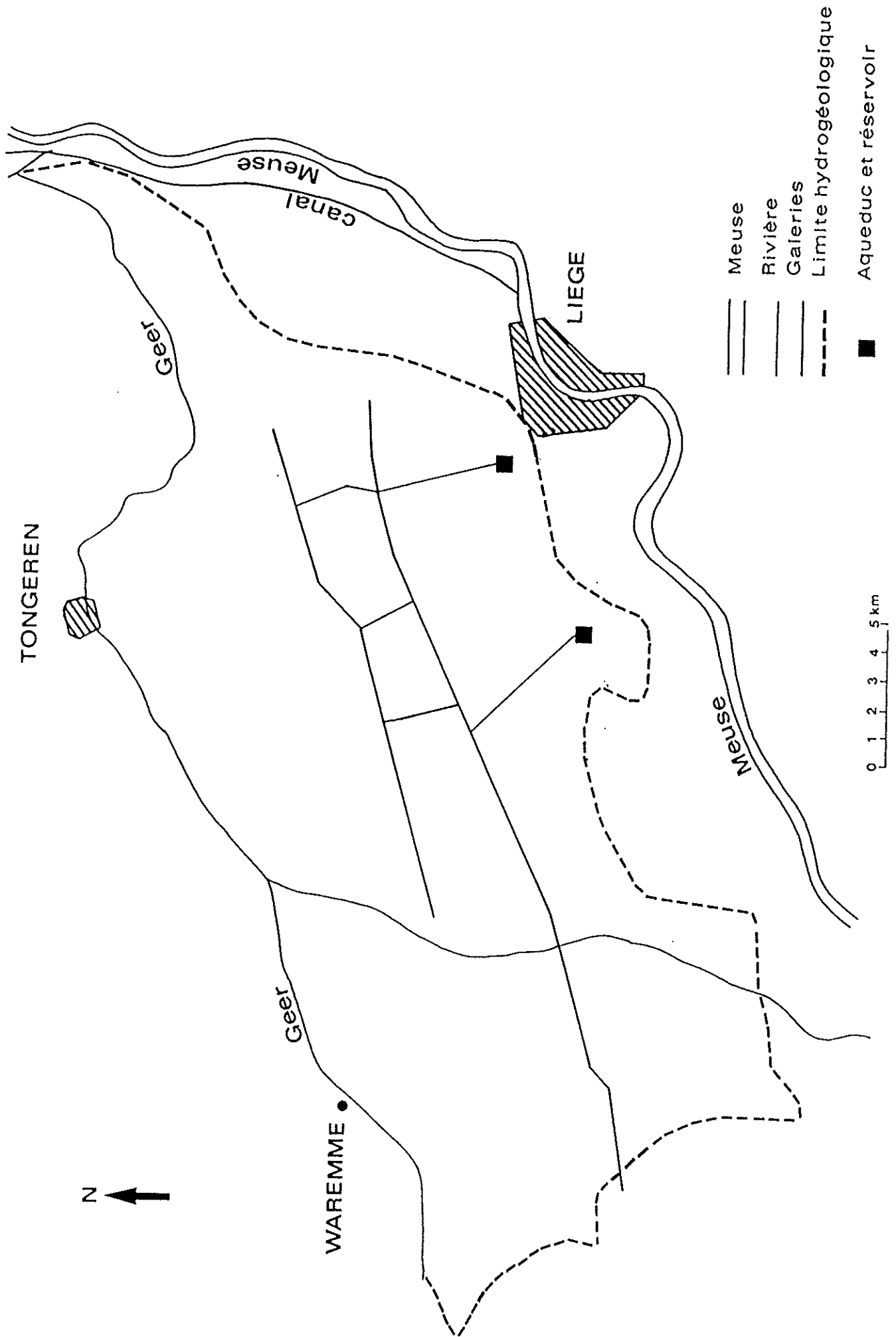


FIGURE 1

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

1. INTRODUCTION

La nappe de la Hesbaye correspond au versant Sud du bassin hydrographique du Geer. Comprise entre la Meuse, le Geer et la Méhaigne (figure 1), elle couvre une superficie de 350 km².

L'aquifère, logé dans les craies du Crétacé, assure l'alimentation en eau de la région de Liège et du plateau hesbignon. Quarante-cinq km de galeries captantes et de nombreux puits permettent un prélèvement moyen de 60.000 m³/jour. Des calculs de bilans hydrogéologiques établis sur de longues périodes ont montré que la nappe pourrait fournir environ 100.000 m³/jour.

Pour optimiser l'utilisation d'une telle ressource, il a été jugé utile de disposer d'un outil mathématique capable de permettre une "gestion dynamique" de l'aquifère, tant du point de vue qualitatif que quantitatif.

Deux types de modèles ont été utilisés :

- un modèle par différences finies, modèle NEWSAM du service Géologique de Belgique, travaillant en régime permanent en 2D le plan, ou en quasi 3D
- un modèle par éléments finis, développement particulier du programme LAGAMINE utilisé et développé aux Laboratoires de Mécanique du Solide et des Matériaux (Service du Professeur Fonder) à l'Université de Liège.

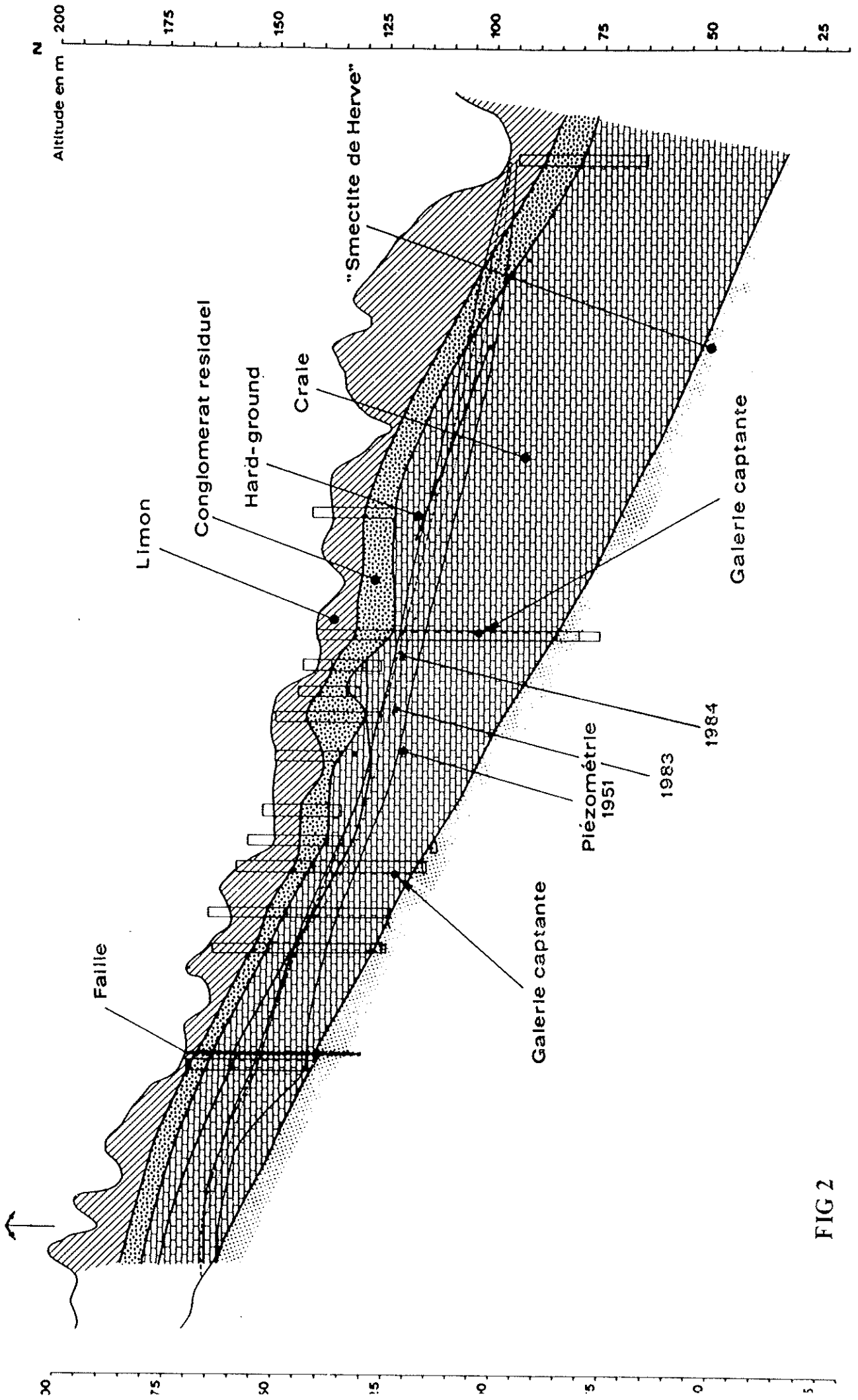


FIG 2

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

2. CADRE GEOLOGIQUE ET GEOGRAPHIQUE

La précision d'un modèle mathématique dépend fortement de la densité et de la précision des données prises en compte. Elles couvrent les domaines de la géologie, de l'hydrogéologie, de l'hydrologie, de la géomorphologie et de la géophysique.

2.1. Géologie

Les formations présentes comprennent, de bas en haut :

1) Le socle primaire affecté de failles et de bombements d'importance diverses.

L'anomalie la plus importante est la faille de Horio-Hozémont ou faille bordière du Massif du Brabant, mettant en contact les calcaires du Viséen inférieur (compartiment SE) et les schistes et grès du Silurien (compartiment NW). Elle a rejoué après les dépôts du Secondaire, provoquant, outre une intense fracturation des craies, un rejet de plusieurs mètres dans la base du réservoir aquifère.

Les autres failles et bombements ont également provoqué une fracturation de la craie y induisant localement de plus grandes perméabilités.

2) Les formations secondaires constituées par les terrains du Crétacé comprenant (figure 2):

- la "smectite de Herve", argile calcareuse constituant le mur imperméable de l'aquifère, présentant une légère pente vers le Nord;
- la craie blanche (Campanien supérieur) d'une épaisseur moyenne de 20 mètres. La circulation des eaux se fait essentiellement dans les réseaux denses de diaclases et fissures associées aux vallées sèches, failles et bombements du socle. La porosité de la matrice est élevée (30 à 40 %), mais la porosité efficace est nettement plus faible (quelques %);
- le Hard-Ground constitué d'un banc induré d'épaisseur inférieure à 1 mètre et incliné de 1 à 3 % vers le NW. Il sert souvent d'horizon repère bien qu'absent dans certaines zones plus fracturées;
- la craie grise plus marneuse et la craie tigrée, regroupées sous le terme de craie supérieure, totalisent de 10 à 15 mètres d'épaisseur. Exposées à des phénomènes de détente et d'altération, elles ont une perméabilité supérieure à celle de la craie blanche;

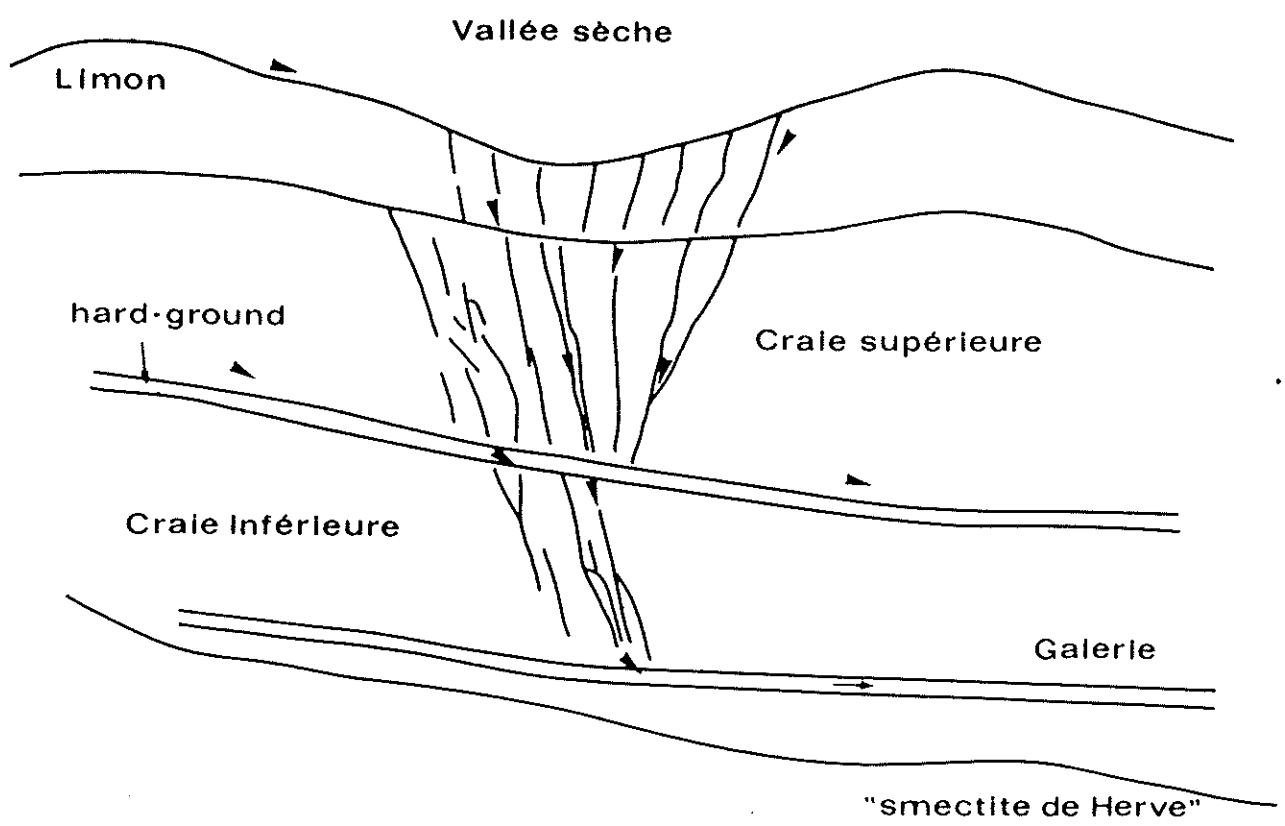


FIGURE 3

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

- plus au Nord, se sont déposés des tuffeaux ou calcarnites à gros bancs de silex du Maastrichtien supérieur. Dans la région étudiée, ces tuffeaux ont subi d'intenses phénomènes d'altération superficielle, avec formation de ravines, de phénomènes karstiques, de niveaux phosphatés et d'un conglomérat résiduel à silex. La surface supérieure du Crétacé est de ce fait très irrégulière.

3) Les formations tertiaires et quaternaires sont constituées :

- des sables tertiaires interstratifiés de graviers, argiles et marnes, surtout présents à la limite Nord de la zone étudiée;
- les loess du Quaternaires en formation puissante de 2 à 20 mètres jouant le rôle de filtre pour l'alimentation de la nappe;
- les colluvions et alluvions récentes essentiellement dans la vallée du Geer.

2.2. Géomorphologie et hydrologie

La Hesbaye présente une surface topographique en pente douce vers le NNW. Le réseau hydrographique actif est peu dense mais de nombreuses vallées sèches de direction générale N-S définissent un réseau hydrographique fossile. Elles sont, pour la plupart, d'origine periglaciaire mais l'assèchement de certaines d'entre elles semble être dû à la dissolution des craies au droit d'axes plus fracturés (figure 3), induisant des perméabilités accrues.

Concernant le cycle hydrologique, le bilan approximatif s'établit comme suit (A. MONJOIE 1965) :

- | | |
|--|--|
| - pluviosité annuelle moyenne | P = 740 mm |
| - évapotranspiration réelle moyenne | ET = 525 mm |
| - infiltration efficace annuelle moyenne | I _{eff} = 175 à 275 mm |
| - débit annuel moyen du Geer | Geer = 52 10 ⁻⁶ m ³
soit 120 mm |
| - débit total des captages | Capt = 60.000 m ³ /jour
soit 65 mm |
| - emmagasinement moyen | : 15 mm/an |

d'où $P = ET + \text{Geer} + \text{Capt} + \text{Emmagasinement} + \text{"pertes"}$

$$740 = 525 + 120 + 65 + 15 + 15$$

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

2.3. Paramètres hydrogéologiques

L'interprétation des résultats de près de 150 essais de pompage fournit les valeurs suivantes :

- pour les craies inférieures (compactes) :

$$K = 1 \cdot 10^{-5} \text{ à } 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$$

- pour les craies supérieures (fracturées) :

$$K = 2 \cdot 10^{-4} \text{ à } 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}$$

- pour le conglomérat résiduel :

$$K = 1 \cdot 10^{-5} \text{ à } 8 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}$$

- pour le limon :

$$K = 1 \cdot 10^{-9} \text{ à } 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/sec.}$$

Des pompages d'essais supplémentaires ont été réalisés par le Service Géologique de Belgique à Bovenistier, dans le cadre de cette étude, afin d'apprécier l'augmentation de la perméabilité au droit des vallées sèches. Les valeurs obtenues sont :

- pour la craie inférieure : $K = 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

- pour la craie supérieure : $K = 1.4 \text{ à } 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec.}$

La porosité efficace, déterminée par essais de pompage et par observation des fluctuations de la surface piézométrique en fonction de l'infiltration efficace, serait de l'ordre de 5 %, elle dépasse toutefois 10 % dans de nombreuses zones où la craie est plus fracturée et altérée.

3. MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES

3.1. Spécificités du programme NEWSAM

La nappe aquifère a été étudiée dans un premier temps à l'aide d'un programme NEWSAM modifié, solutionnant le système d'équations aux dérivées partielles par une méthode de différences finies intégrées.

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

Les principes généraux de cette méthode sont exposés dans la partie concernant les aspects théoriques des modèles mathématiques.

Les principales spécificités du programme sont :

- la discrétisation du domaine d'intégration à l'aide d'un réseau de mailles carrées emboîtées, de quatre tailles différentes;
- l'idéalisation tridimensionnelle approchée au moyen de couches aquifères superposées et communiquant par drainance verticale, via des semi-perméables représentés implicitement;
- l'imposition éventuelle de conditions aux limites de type Dirichlet, Neumann mais aussi Fourier;
- la possibilité d'intégrer l'équation de diffusivité en nappe à surface libre et ce, tant en régime transitoire que permanent.

3.2. Idéalisation - Discrétisation

Compte tenu, d'une part de la superficie de la nappe et de la précision requise pour la représentation des galeries, d'autre part des données disponibles et du temps de calculs, la nappe a été initialement discrétisée à l'aide de mailles de 800 m de coté, ramenées à 400 m au voisinage des galeries et des principaux axes drainants (vallée sèche de Xhendremael et faille de Horion-Hozémont).

On a obtenu ainsi à 1212 mailles, sensiblement orientées suivant les deux directions principales d'anisotropie de l'aquifère crayeux. Ce réseau de base a été successivement utilisé :

- pour la modélisation, en aquifère monocouche et en régime permanent, des années 1951 et 1984 (années respectivement de basses eaux et de hautes eaux, permettant de caractériser la craie inférieure peu altérée et la craie supérieure altérée et fissurée);
- pour la modélisation, en aquifère bicouche (2424 mailles de ces deux mêmes années).

Par la suite, la discrétisation a été considérablement modifiée, la représentation implicite des galeries ne permettant pas de rendre compte correctement de l'influence fondamentale et complexe de celles-ci, à savoir :

- les galeries définissent, au même titre que les vallées sèches, une direction principale d'anisotropie;

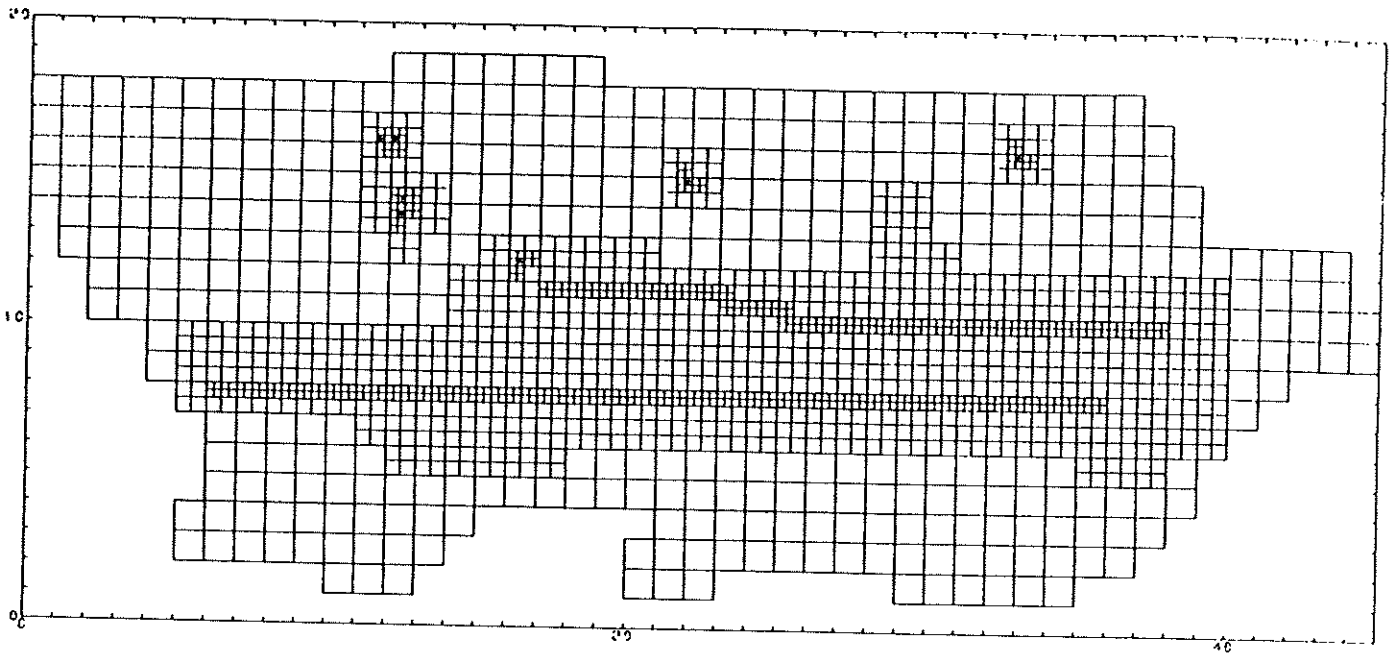


FIG 4

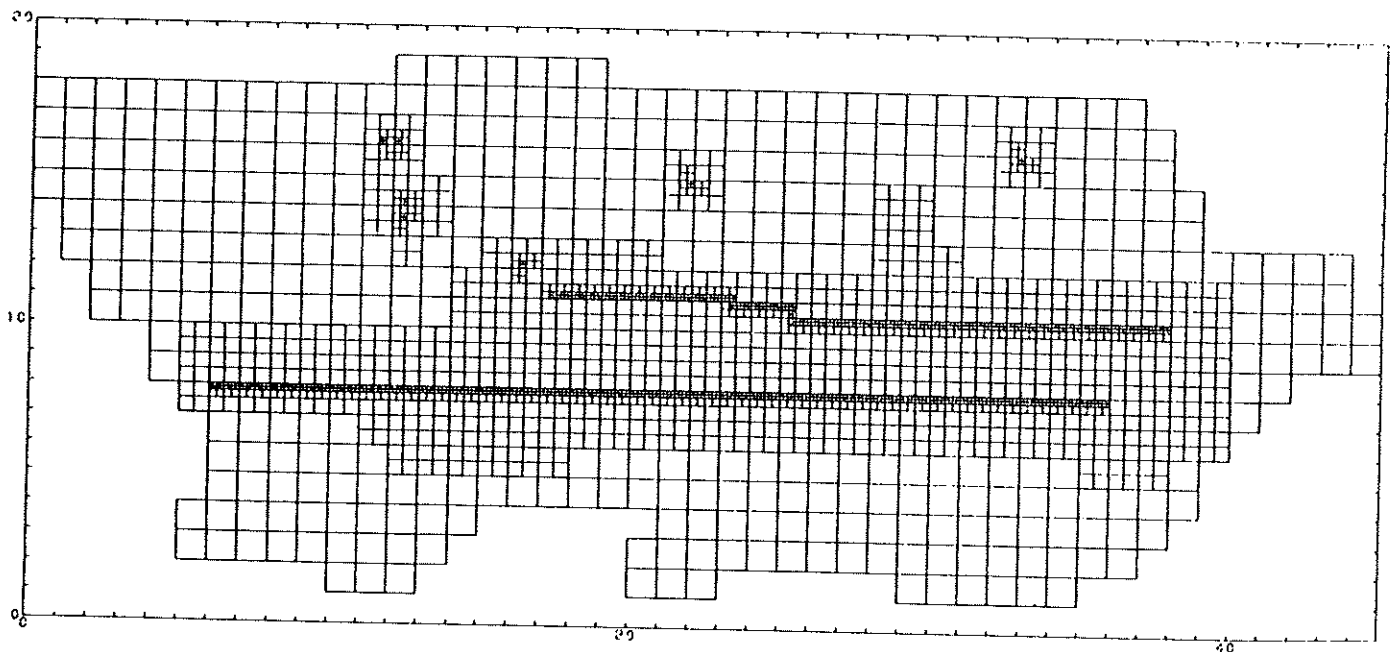


FIG 5

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

- au sein d'une même galerie, les débits captés par mètre varient extrêmement rapidement, en relation avec l'intensité de la fracturation de la craie et la valeur locale de la charge piézométrique;
- les débits globaux associés aux différentes galeries interfèrent par le biais d'aqueducs, de serrements et de puits de pompage (facteurs anthropiques). Notamment, la confluence des eaux captées dans la Nouvelle Captante, dans la galerie du Puits Régulateur et dans la partie amont de l'Ancienne Captante, détermine la mise en charge de la partie aval de cette dernière, qui devient dès lors réalimentante.

Une représentation explicite du réseau des galeries captantes s'est donc avérée nécessaire et a conduit à un modèle tricouche (représentation tridimensionnelle approchée), totalisant 4647 mailles réparties comme suit :

- une première couche de 1653 mailles (de 800 à 200 m de côté), idéalisant la craie supérieure altérée et fissurée (figure 4);
- une deuxième couche de 2576 mailles (de 800 à 100 m de côté), idéalisant la craie inférieure peu perméable (figure 5);
- une troisième couche de 418 mailles (de 100 m de côté), simulant le réseau des galeries.

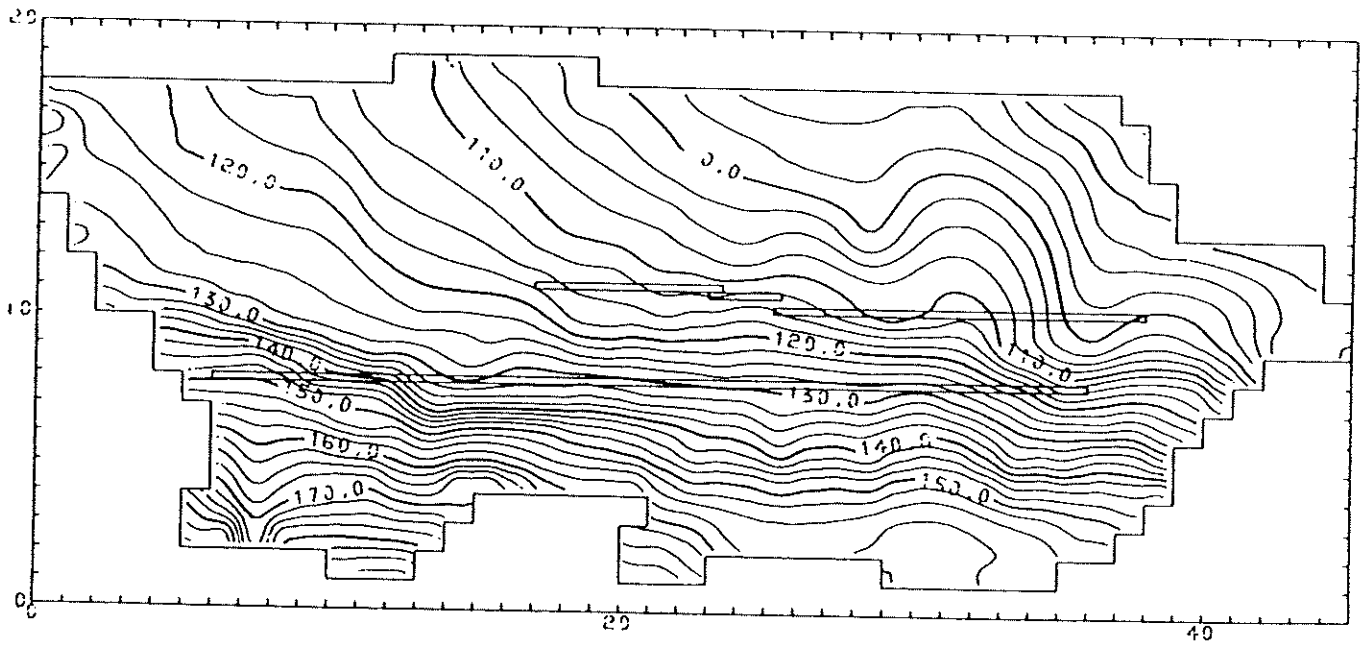
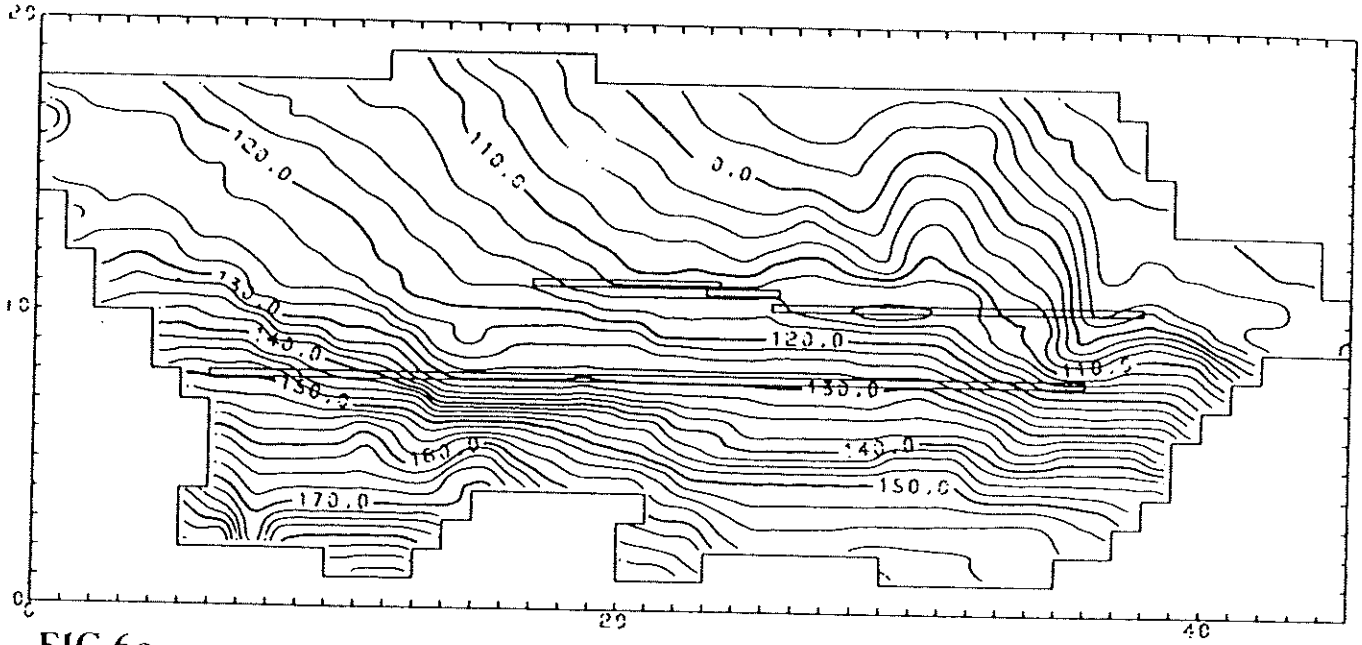
Dans ce(s) modèle(s), des conditions de Dirichlet (potentiels hydrauliques) sont imposées, d'une part, sur les limites de la nappe, en vue de prendre en compte les éventuels flux échangés latéralement (notamment le débit de base du Geer au Nord et les apports à la nappe alluviale de la Meuse à l'Ouest) d'autre part, sur la partie amont drainante de la Yerne.

Une piézométrie d'initialisation est par ailleurs définie précisément pour chacune des mailles.

3.3. Calage, résultats et exploitation

Les principales étapes du calage et les résultats associés peuvent être résumés comme suit :

- calage de la piézométrie de l'année 1951 (figure 6). Il requiert l'introduction de nombreux axes drainants. Ceux-ci correspondent pour la plupart à des vallées sèches, dont le réseau serré détermine, en accord avec les résultats de la prospection géophysique et des pompages d'essai, un accroissement de la perméabilité d'ensemble. Celles-ci croît vers le Nord (phénomène d'altération et de dissolution intensifiés par circulation préférentielle).



MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

- calage de la piézométrie de l'année 1984. Il nécessite une augmentation des transmissivités de la majeure partie de l'aquifère; ceci s'explique tant par la plus grande épaisseur d'aquifère saturé (+ 7 m en moyenne) que par l'augmentation de perméabilité avec l'élévation de la nappe dans la craie.

Dans la partie Est de l'aquifère, les transmissivités doivent par contre décroître, ce qui est incompatible avec la réalité hydrogéologique.

- en vue de mieux satisfaire celle-ci, un modèle bicouche, discrétisant distinctement les craies supérieures et inférieures ainsi que le Hard-Ground qui les sépare, a été développé. Les avantages sont appréciables, puisque des champs de transmissivité invariants pour les deux types de craies, permettent le calage tant en régime de hautes eaux que de basses eaux. Le comportement différentiel du Hard-Ground peut expliquer l'anomalie précitée : l'effet d'écran de celui-ci (vis-à-vis de la drainance verticale) varie en fonction de la densité locale du réseau de vallées sèches et/ou de failles.
- dans un dernier temps, le réseau des galeries captantes est reproduit explicitement afin de mieux rendre compte des importants phénomènes de mise en charge et de réalimentation (suivant le principe des vases communicants) qui lui sont inhérents.

En l'occurrence, sa représentation consiste en une couche propre de largeur unitaire, strictement limitée au tracé des galeries; les valeurs de perméabilité y sont choisies entre 1 et 20 m/sec de manière à réaliser un compromis entre stabilité numérique et rapidité de convergence d'une part, minimalisation des pertes de charge dans les galeries d'autre part.

Malgré la difficulté de tenir compte simultanément deux champs de paramètres (coefficients de perméabilité et de drainance verticale), le calage a été obtenu de manière satisfaisante :

- les grands traits de la surface piézométrique sont correctement reproduits ainsi que le montre la figure 7;
- les débits captés par les différents tronçons de galeries sont restitués, moyennant des échanges modérés aux frontières Ouest, Sud et Est;
- le bilan hydrique global simulé est en concordance avec celui calculé.

A titre exemplatif, le champ de transmissivité de la craie supérieure est repris figure 8.

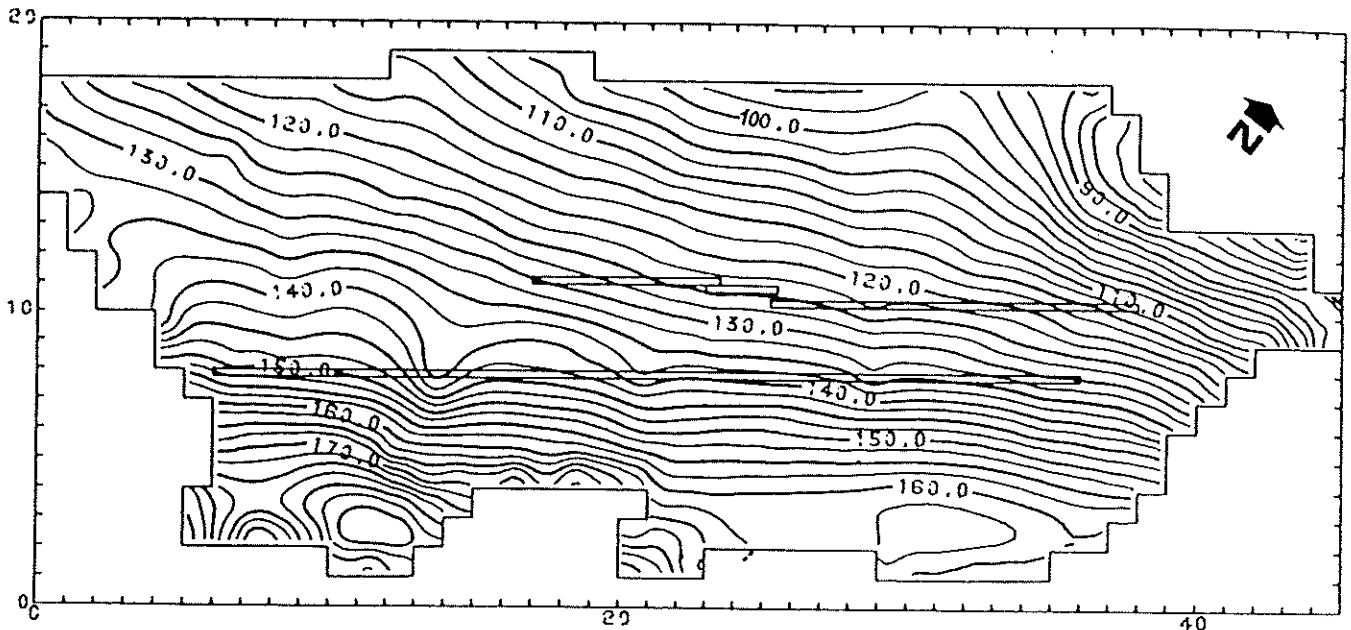


FIG 7

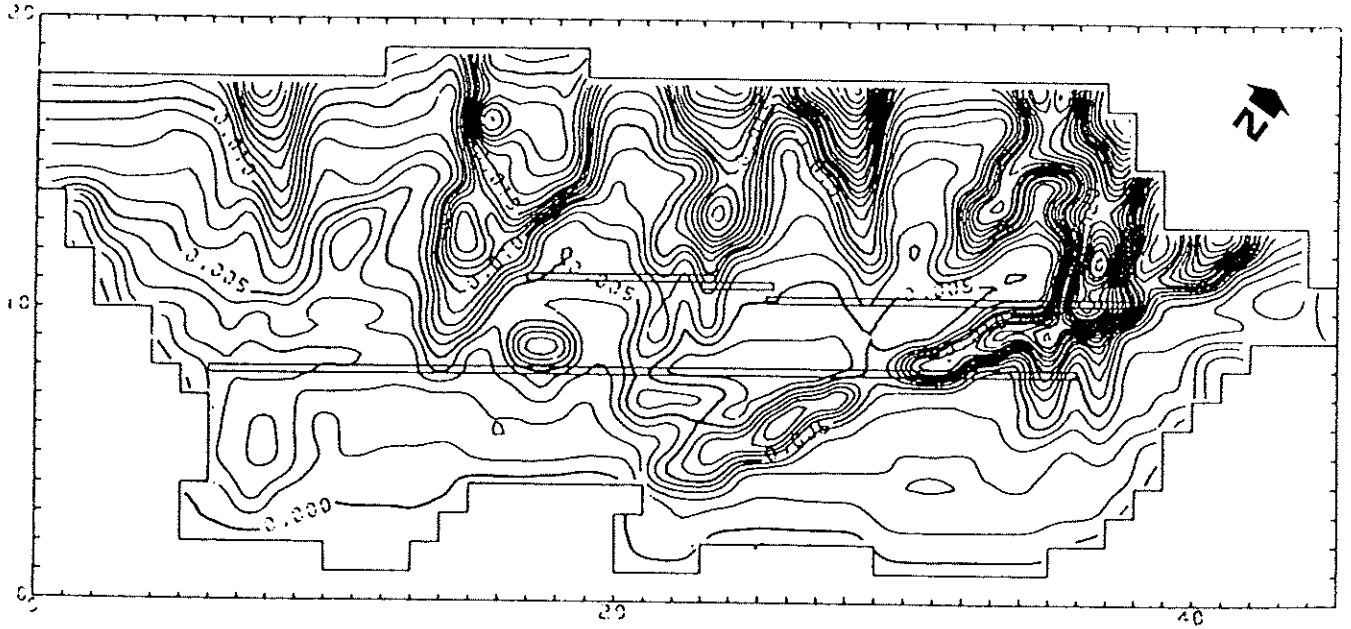


FIG 8

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

3.4. Conclusions - Perspectives d'avenir -----

Le modèle tricouche peut donc être utilisé en vue de déterminer l'évolution des ressources en eau en fonction des taux de prélèvements et de réalimentation, en vue de localiser idéalement de nouveaux sites de captage ou encore d'étudier l'influence mutuelle d'ouvrages existants.

Les principaux résultants fournis par le modèle consistent en :

- un bilan hydrique global, avec quantification des échanges aux frontières de la nappe;
- un ou plusieurs bilans hydriques partiels, intéressant une ou plusieurs régions précises de la nappe, telles que par exemple, un tronçon donné de galeries;
- cartes de la piézométrie, des transmissivités, des coefficients, de drainance entre couches, des débits pompés, injectés ou encore échangés entre couches.

En cas de simulation de pollutions, des cartes d'isoconcentration pourraient être fournies.

4. MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS

4.1. Caractéristiques du code LAGAMINE -----

LAGAMINE est un ensemble de programmes d'éléments finis du type cinématiquement admissible et non linéaire. LAGATHER est un des modules de LAGAMINE, plus particulièrement destiné à la modélisation de la conduction thermique et des écoulements en milieu poreux. Certains sous-programmes, l'architecture générale et le pré-processeur sont communs à tous les modules. De nouveaux éléments et de nouvelles lois constitutives peuvent aisément être introduits.

Le programme procède par pas de temps successifs et itère dans chaque pas jusqu'à obtenir l'équilibre selon la précision imposée par l'utilisateur, suivant la méthode de Newton-Raphson.

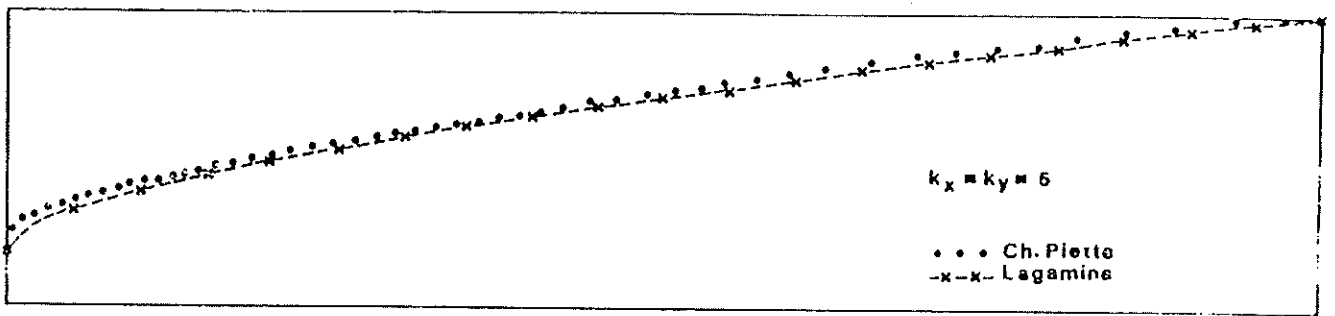


FIG 9

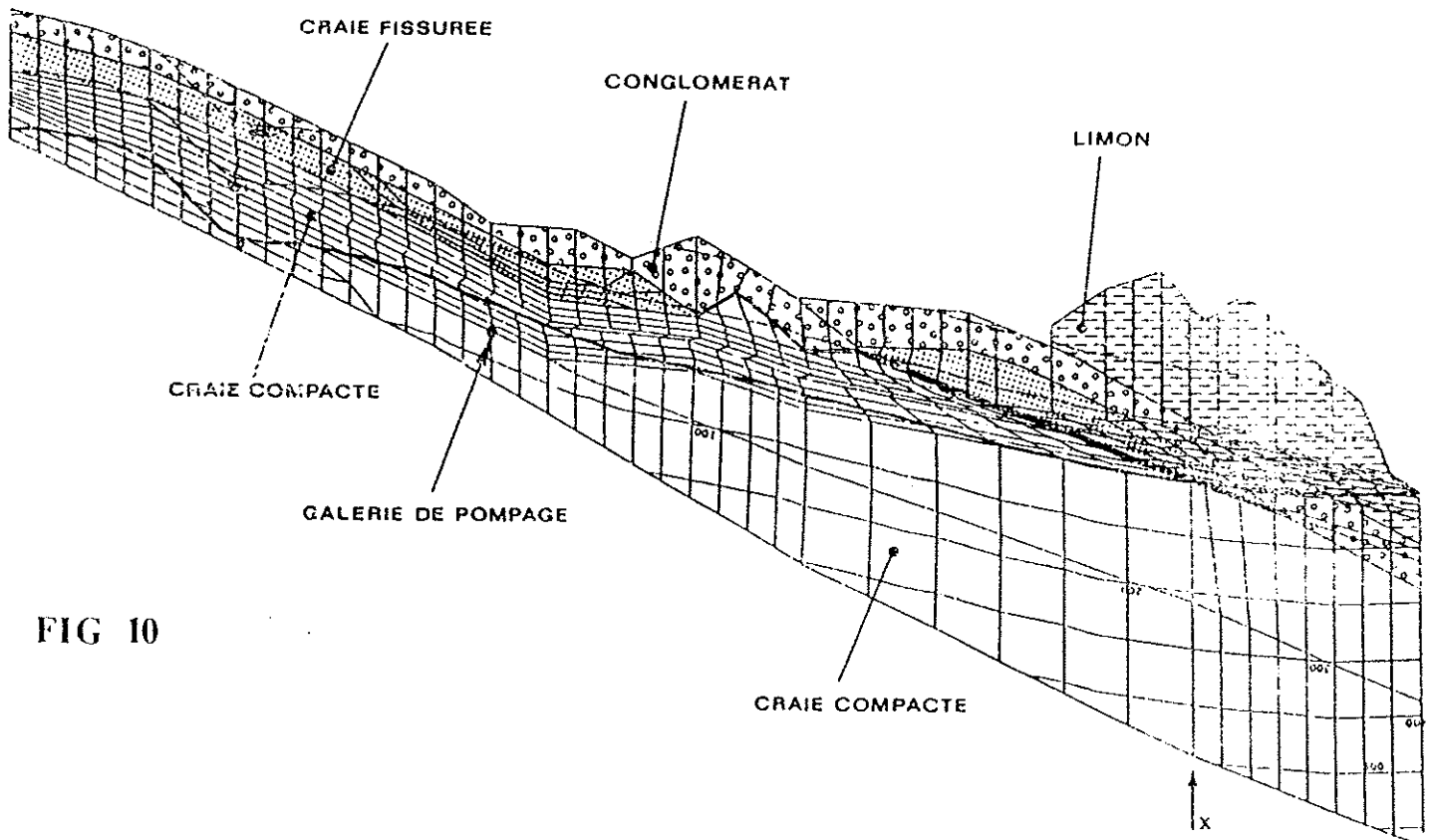


FIG 10

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

4.2 Modélisation de la surface libre en mode transitoire -----

Jusqu'à ce jour, les programmes d'éléments finis visant à modéliser des nappes aquifères à surface libre travaillaient généralement avec un maillage variable limité à la zone saturée du milieu poreux. A chaque pas de la simulation, la nouvelle hauteur piézométrique calculée provoquait un remaillage automatique de la zone saturée. Ce système est précis mais extrêmement lourd et gros consommateur de temps ordinateur. Vu les dimensions de la nappe de Hesbaye, il était rigoureusement impossible d'envisager ce procédé.

Une méthode originale a été trouvée par l'équipe du MSM (ULg) s'inspirant de la technique "enthalpique" de modélisation des changements de phases en conduction thermique. En thermique, les changements de phases se font à température constante, tout en emmagasinant une certaine quantité de chaleur. Dans notre cas, nous considérons que le milieu passe de l'état non saturé à l'état saturé à pression constante nulle.

La quantité d'énergie ou d'enthalpie de changement d'état correspond ici à la porosité efficace (coefficient d'emmagasinement) du milieu.

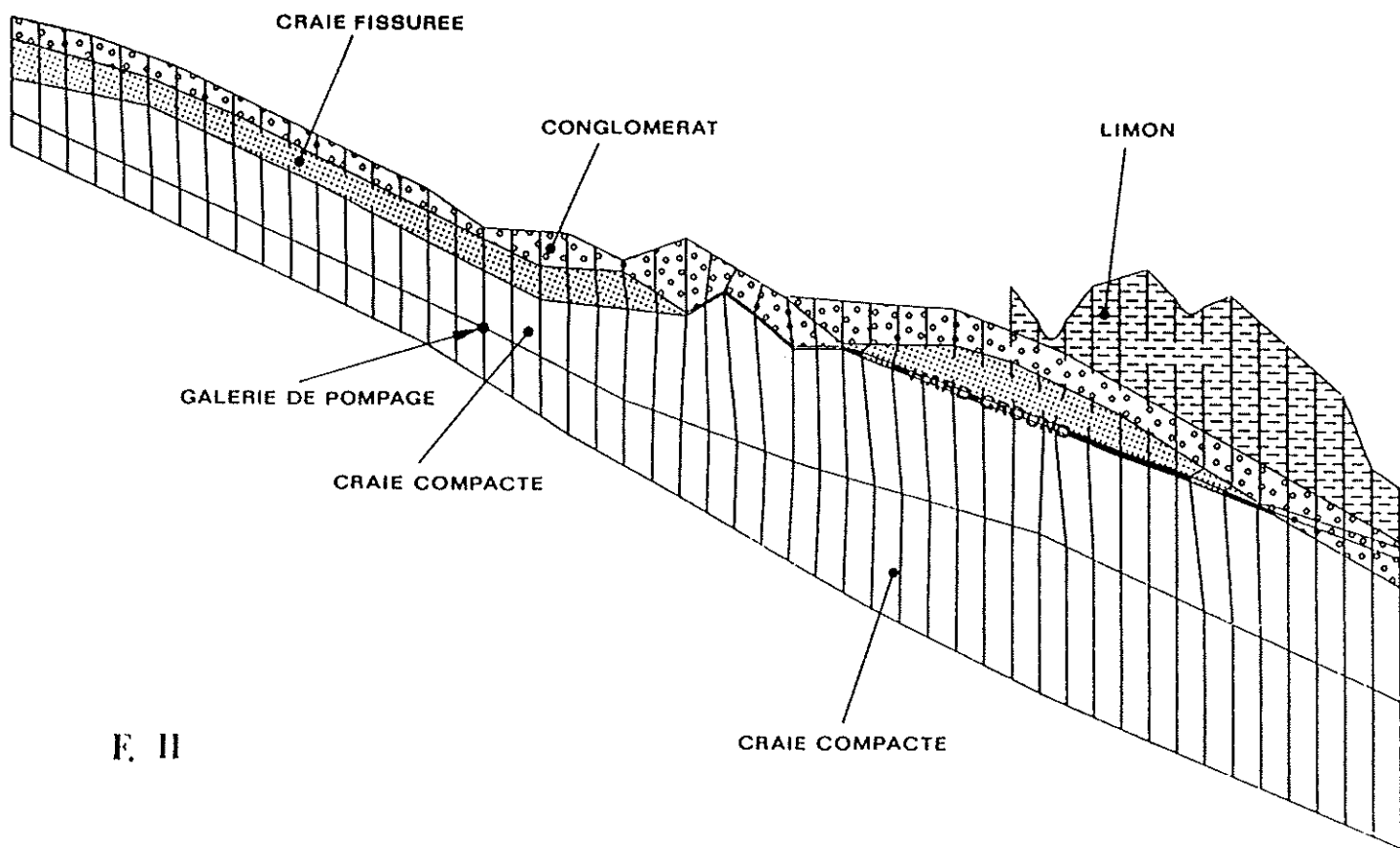
Cette méthode a été implantée dans le module LAGATHER qui fait partie du programme LAGAMINE utilisé au MSM. Plusieurs tests sur une colonne d'eau uniaxiale ont été réalisés avec succès pour vérifier l'exactitude de la méthode dans diverses conditions de pressions, de débits, d'alimentation et de pompage.

Un exemple bidimensionnel simple a été modélisé; on impose brutalement en un point de la coupe une pression atmosphérique simulant ainsi le creusement d'un tunnel de drainage. On obtient la courbe donnant le niveau de la nappe après un temps dit infini (état permanent). Cette courbe est comparable à celle obtenue par les travaux de PIETTE et CESCOTTO (1976) sur le même problème en régime permanent (Figure 9).

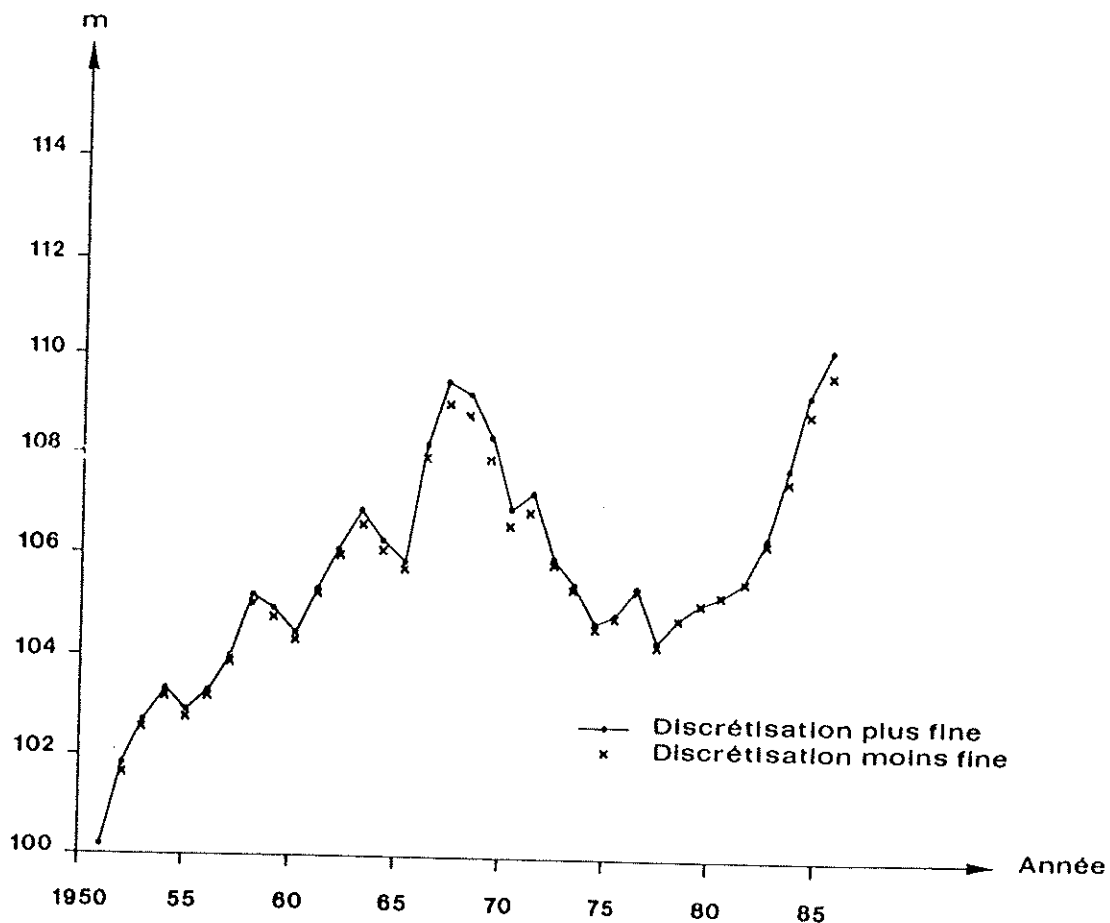
4.3. Modélisation de la coupe VH2 -----

Dans un premier temps, la coupe VH2 a été discrétisée avec un maillage fin et en y distinguant 5 types de terrains (Figure 10). Un début de calage a été réalisé avec les valeurs suivantes:

- craie inférieure	: $K_x = 2.10^{-4}$ m/sec	S = 0.12
	$K_y = 2.10^{-5}$ m/sec	
- craie supérieure	: $K_x = 2.10^{-3}$ m/sec	S = 0.12
	$K_y = 2.10^{-4}$ m/sec	



F. 11



F. 12

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA
NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

- Hard-Ground	: K = 2.10^{-7} m/sec	S = 0.12
- conglomérat	: K = 2.10^{-6} m/sec	S = 0.12
- limon	: K = 2.10^{-8} m/sec	S = 0.12

Les débits de captage et de réalimentation sont considérés sur une tranche verticale de 1 mètre d'épaisseur. Le modèle a tourné pour la période 1951 - 1984 montrant une montée trop rapide de la nappe malgré un choix de perméabilité horizontale dix fois plus élevée que les perméabilités verticales dans les couches de craie.

Dans le but de passer à l'état tridimensionnel, il était nécessaire d'obtenir des résultats satisfaisants en coupe bidimensionnelle.

Une discrétisation plus grossière (figure 11) a été testée avec succès en utilisant comme précédemment des éléments isoparamétriques à 8 noeuds.

La comparaison de l'évolution de la piézométrie en point (d'abscisse X de la coupe) pour les 2 discrétisations utilisées (figure 12) montre que l'écart entre les 2 courbes est très faible et en tout cas peu significatif en comparaison de la simplification apportée à la discrétisation.

L'analyse bidimensionnelle de la coupe VH2 n'a pas été poursuivie avec plus de détail vu la difficulté de prendre en compte des écoulements latéraux et l'imprécision des débits de pompage et d'infiltration à prendre en compte pour une telle tranche de 1 m d'épaisseur.

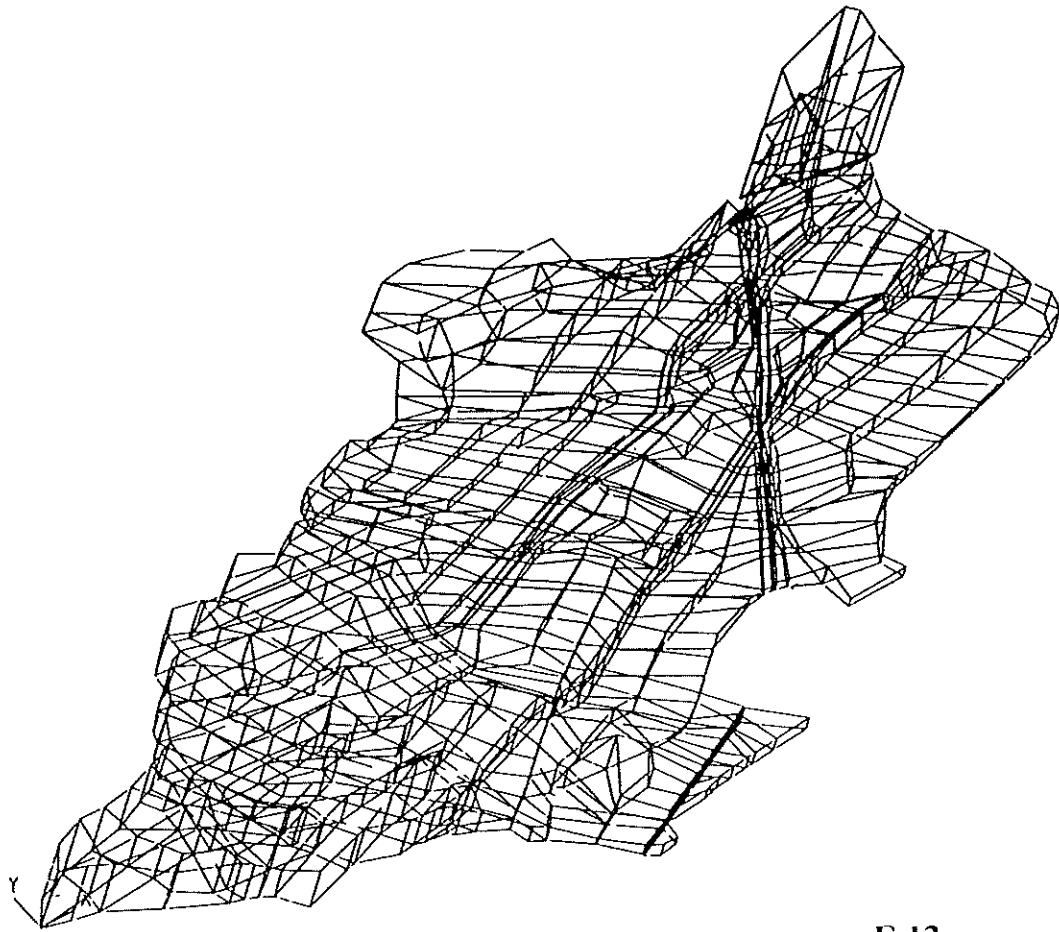
La modélisation de cette coupe a mis en évidence la bonne précision du modèle même en utilisant des éléments de taille importante.

4.4. Modélisation 3D de la nappe

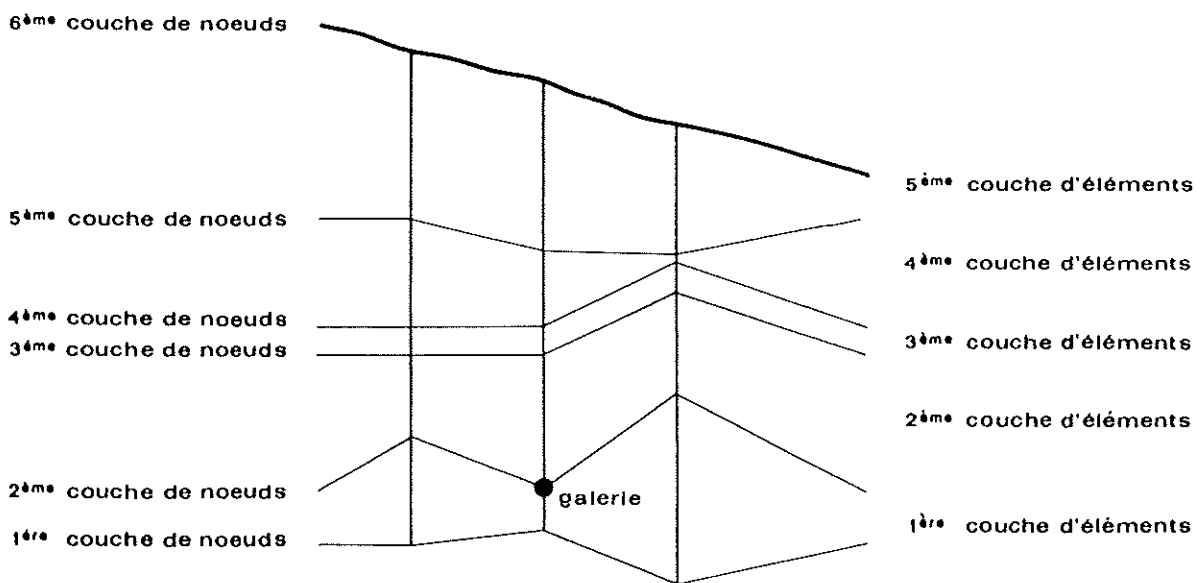
4.4.1. Idéalisations et discrétisation

.....

Les éléments utilisés dans le modèle 3D sont isoparamétriques à 3 dimensions et à 8 noeuds. Leurs arêtes sont des segments de droite. Les fonctions d'interpolation sont linéaires et satisfont la compatibilité des déplacements et de la géométrie entre les éléments.



F. 13



F. 14

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

La discrétisation géométrique 3D doit tenir compte de beaucoup de contraintes géométriques : l'emplacement des galeries et des puits de pompage, les limites des différents horizons géologiques, les failles importantes et les limites hydrogéologiques du bassin. La complexité de la structure est grande comme l'illustre la figure 13 représentant la quatrième couche d'éléments.

Cinq couches de 534 éléments chacune ont été distinguées et donc 6 couches de noeuds. D'une couche de noeuds à la suivante, seule la coordonnée Z change, ce qui permet une manipulation aisée des fichiers par l'emploi d'incréments.

La modélisation des galeries captantes est réalisée par l'utilisation d'"éléments tuyaux" à une dimension (figure 14), affectés d'une perméabilité de 1000 à 10000 fois plus élevée que dans les éléments voisins. Un resserrement des mailles de la structure a été effectué à proximité de ces galeries en vue d'obtenir une très bonne précision dans ces zones où la soustraction d'eau est importante.






Des conditions de potentiel imposé (condition de Dirichlet) ont été placées, au Geer, limite Nord de la nappe. Sur les autres côtés, vu les échanges très faibles qui ont été estimés, des conditions de flux nul ont été imposées (condition de Neuman).

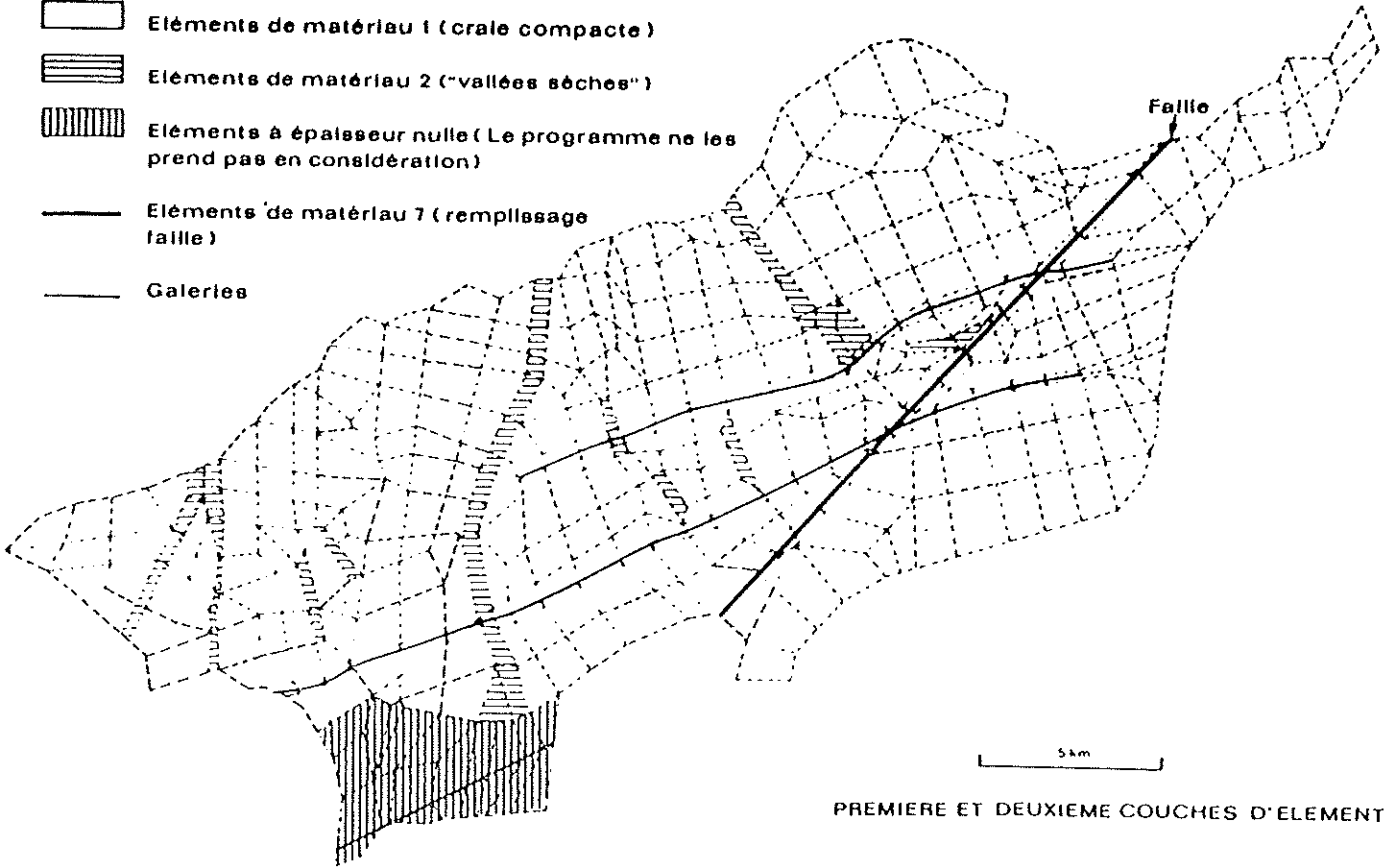
Les paramètres hydrogéologiques à affecter aux différents éléments sont la perméabilité K et le coefficient d'emménagement S. La répartition de ces paramètres dans les 2670 éléments du modèle peut se faire de manière très souple; à la limite, nous pourrions imposer 2670 couples de paramètres différents. Dans la pratique, pour éviter des coûts de passage ordinateur prohibitifs, nous définissons des "matériaux" en regroupant sous un "matériau" les éléments affectés des mêmes paramètres.

Au départ du calage du modèle, nous distinguons les matériaux suivants :

- | | |
|-------------------------------|---|
| - matériau 1 : craie compacte | $2.10^{-5} \leq K \leq 5.10^{-4}$
$0.075 \leq S \leq 0.12$ |
| - matériau 2 : vallées sèches | $2.10^{-4} \leq K \leq 2.10^{-3}$
$0.075 \leq S \leq 0.20$ |
| - matériau 3 : hard-ground | $5.10^{-6} \leq K \leq 2.10^{-4}$
$0.075 \leq S \leq 0.10$ |
| - matériau 4 : craie facturée | $2.10^{-4} \leq K \leq 1.10^{-2}$
$S = 0.15$ |






LEGENDE

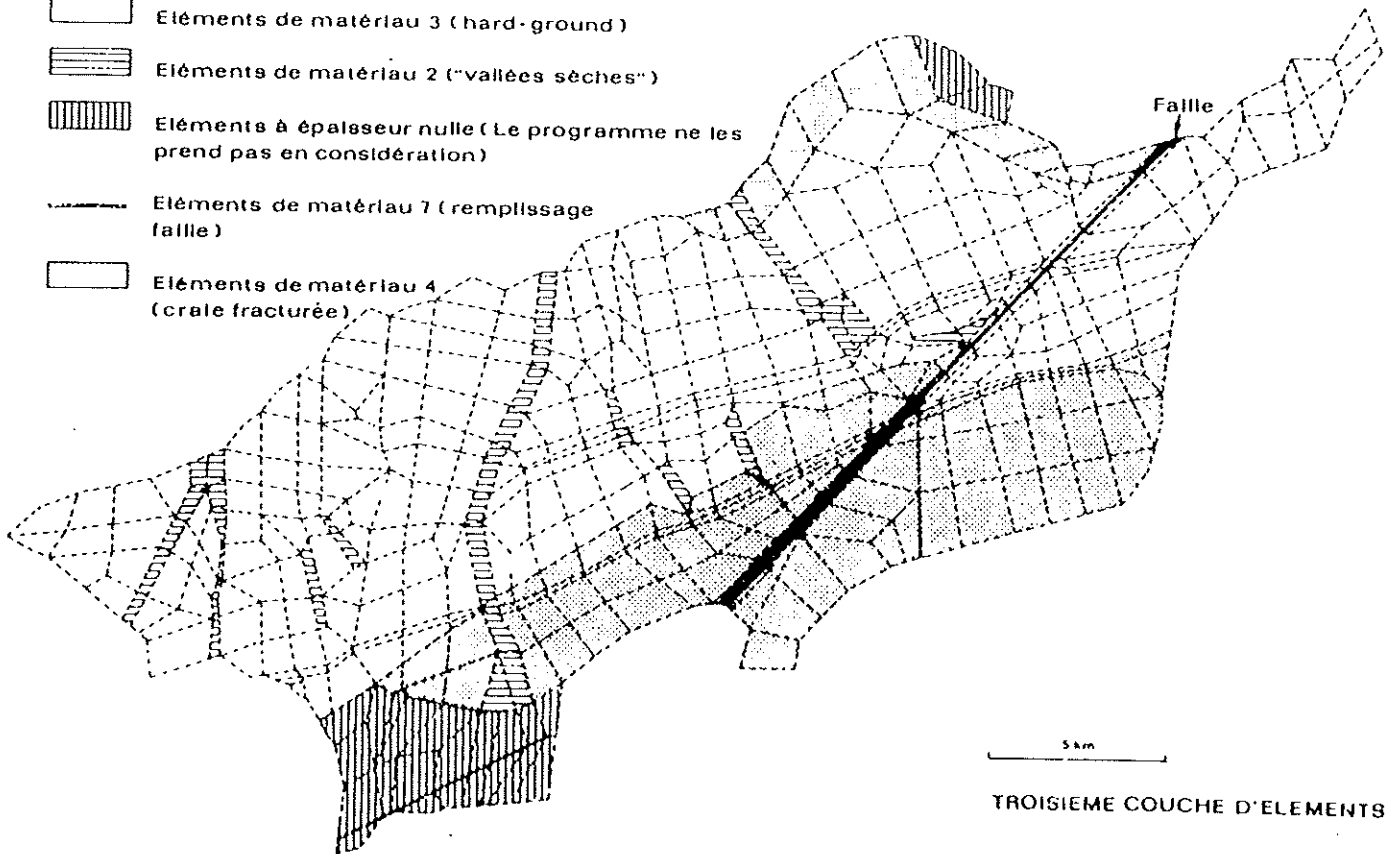
-  Éléments de matériau 1 (craie compacte)
-  Éléments de matériau 2 ("vallées sèches")
-  Éléments à épaisseur nulle (Le programme ne les prend pas en considération)
-  Éléments de matériau 7 (remplissage faille)
-  Galeries



PREMIERE ET DEUXIEME COUCHES D'ELEMENTS

LEGENDE

-  Éléments de matériau 3 (hard-ground)
-  Éléments de matériau 2 ("vallées sèches")
-  Éléments à épaisseur nulle (Le programme ne les prend pas en considération)
-  Éléments de matériau 7 (remplissage faille)
-  Éléments de matériau 4 (craie fracturée)



TROISIEME COUCHE D'ELEMENTS

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

- matériau 5 : alluvions et/ou
conglomérat
résiduel $3.10^{-5} \leq K \leq 1.10^{-3}$
 $0.075 \leq S \leq 0.20$
- matériau 6 : conglomérat et
limons $1.10^{-6} \leq K \leq 1.10^{-5}$
 $0.075 \leq S \leq 0.10$
- matériau 7 : remplissage de la
faille de Horion-
Hozémont $1.10^{-4} \leq K \leq 1.10^{-2}$
 $0.075 \leq S \leq 0.15$

La répartition de ces matériaux dans les différentes couches est réalisée en respectant au maximum les conditions géologiques et hydrogéologiques (figures 15 et 16).

Pour le calage, le pas de temps a été fixé à un an du fait de la fréquence généralement annuelle des mesures, et en particulier des mesures piézométriques. D'autre part, la dimension du problème permettrait difficilement d'utiliser des pas plus courts sur une durée de 33 ans (1951 - 1984).

La simulation, en mode transitoire, débute en 1951 avec comme condition initiale la piézométrie de cette année.

Les débits captés chaque année dans les galeries et dans les puits durant la période 1951 - 1984 ont été introduits ainsi que les valeurs de l'infiltration efficace.

Le calage est effectué principalement en comparant les piézométries obtenues par le calcul aux piézométries connues (mesures). De plus, des coupes et des points de contrôle ont été choisis afin d'y comparer les niveaux calculés et mesurés.




4.4.2. Calage et résultats

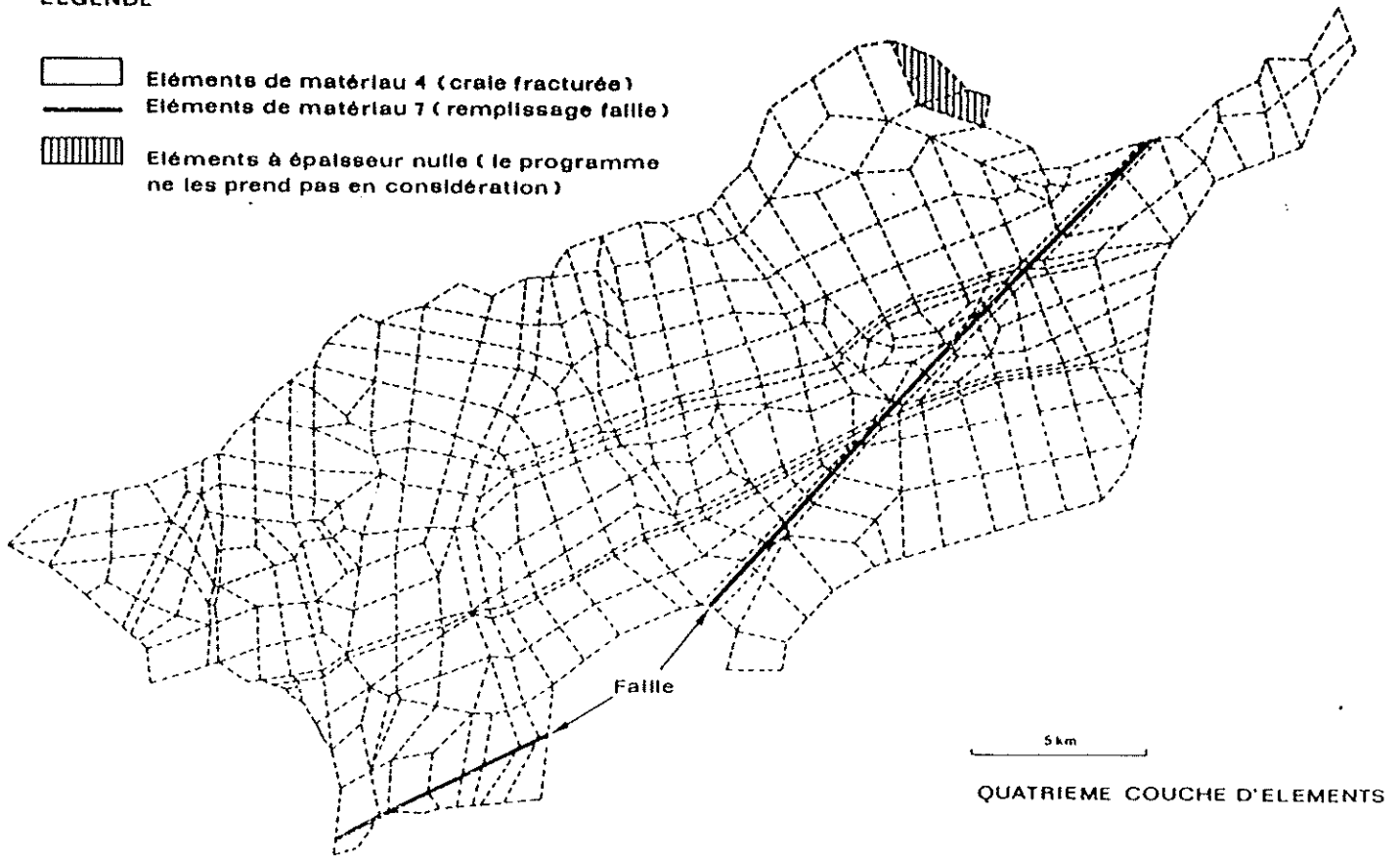
.....

Lors du calage du modèle 3D, les principales difficultés numériques rencontrées ont été les suivantes :



- l'introduction des débits d'infiltration de manière compatible numériquement avec la façon de modéliser les surface libre;
- l'introduction de contrastes de perméabilité très importants au droit des galeries;
- l'imposition des débits captés dans les galeries en évitant des rabattements artificiels localisés.

LEGENDE

-  Éléments de matériau 4 (craie fracturée)
-  Éléments de matériau 7 (remplissage faille)
-  Éléments à épaisseur nulle (le programme ne les prend pas en considération)



LEGENDE

-  Éléments de matériau 6 (conglomérat et limons)
-  Éléments de matériau 5 (alluvions et /ou conglomérat altéré)

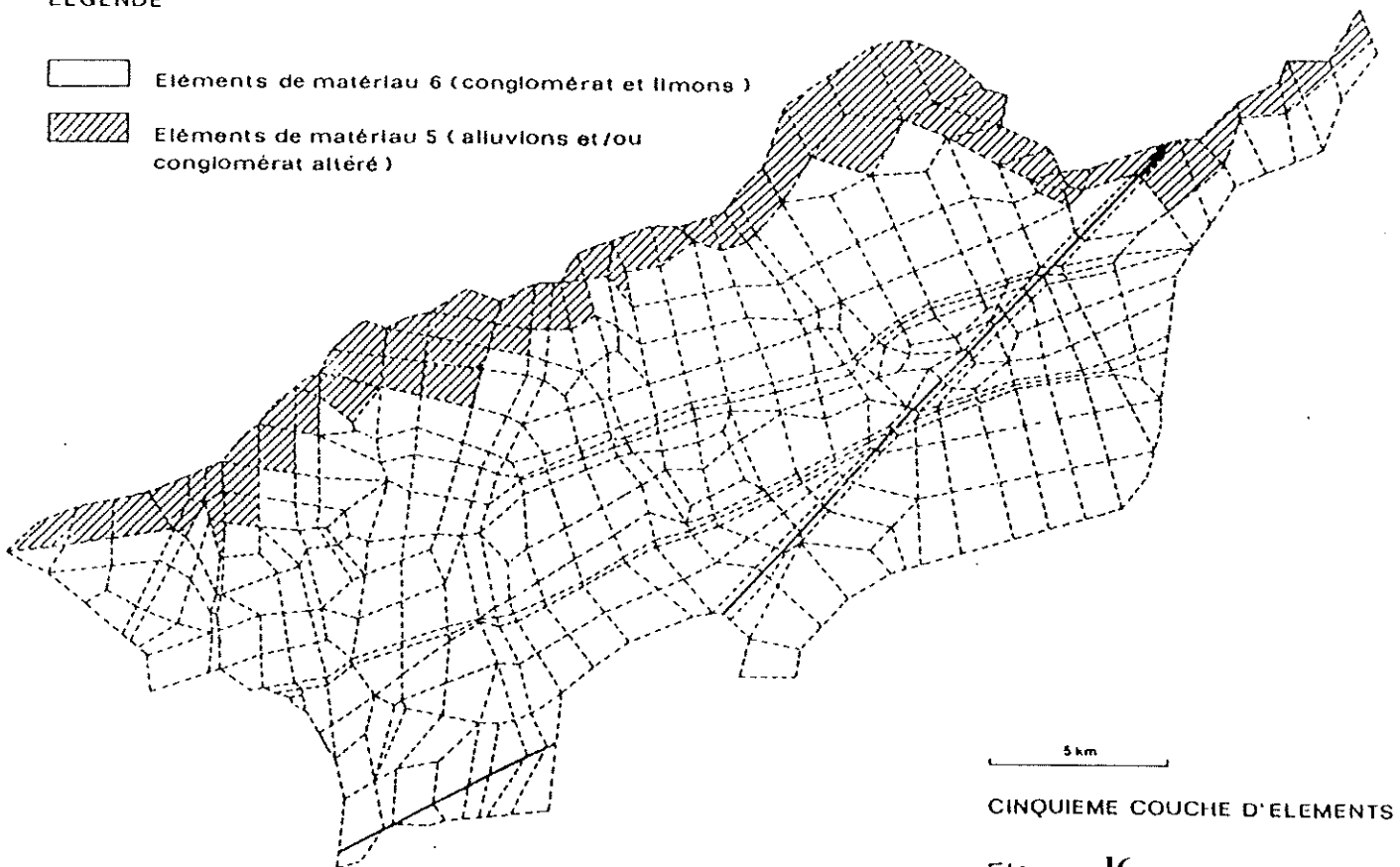


Figure 16

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

Par la suite, le calage du modèle a consisté principalement dans la détermination des valeurs des paramètres hydrodynamiques de chaque matériau, la définition de matériaux supplémentaires, des changements de matériau pour certains éléments, etc., afin que les valeurs piézométriques et les gradients calculés par le modèle soient proches des valeurs mesurées sur la durée comprise entre 1951 et 1984.

Les modifications suivantes ont été apportées pour caler le modèle :

- les valeurs annuelles de l'infiltration efficace ont été réduites de 15 % pour tenir compte de l'effet du ruissellement;
- les valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement de tous les matériaux ont été adaptées;
- une valeur de perméabilité différente a été affectée à une zone de craie fracturée situé à l'amont-Ouest, près de Seraing-Le-Château;
- l'effet d'une vallée sèche a été diminué et une vallée sèche a été simulée dans la zone Nord-Est.

Après toutes ces modifications, les caractéristiques hydrodynamiques de fin de calage sont les suivantes :

matériau 1 : craie compacte	: $K = 2 \cdot 10^{-4}$ m/s et $S = 0.10$
matériau 2 : vallées sèches	: $K = 4 \cdot 10^{-3}$ m/s et $S = 0.12$
matériau 3 : hard-ground	: $K = 8 \cdot 10^{-5}$ m/s et $S = 0.08$
matériau 4 : craie fracturée	: $K = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s et $S = 0.12$
matériau 5 : alluvions et conglomérat résiduel	: $K = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s et $S = 0.15$
matériau 6 : conglomérat et limon	: $K = 1 \cdot 10^{-6}$ m/s et $S = 0.075$
matériau 7 : remplissage de la faille	: $K = 2 \cdot 10^{-3}$ m/s et $S = 0.10$
matériau 8 : craie fracturée, zone amont-Ouest	: $K = 2.7 \cdot 10^{-4}$ m/s et $S = 0.12$
matériau 9 : nouvelle vallée sèche au N-E, à proximité de la faille	: $K = 2 \cdot 10^{-3}$ m/s et $S = 0.12$

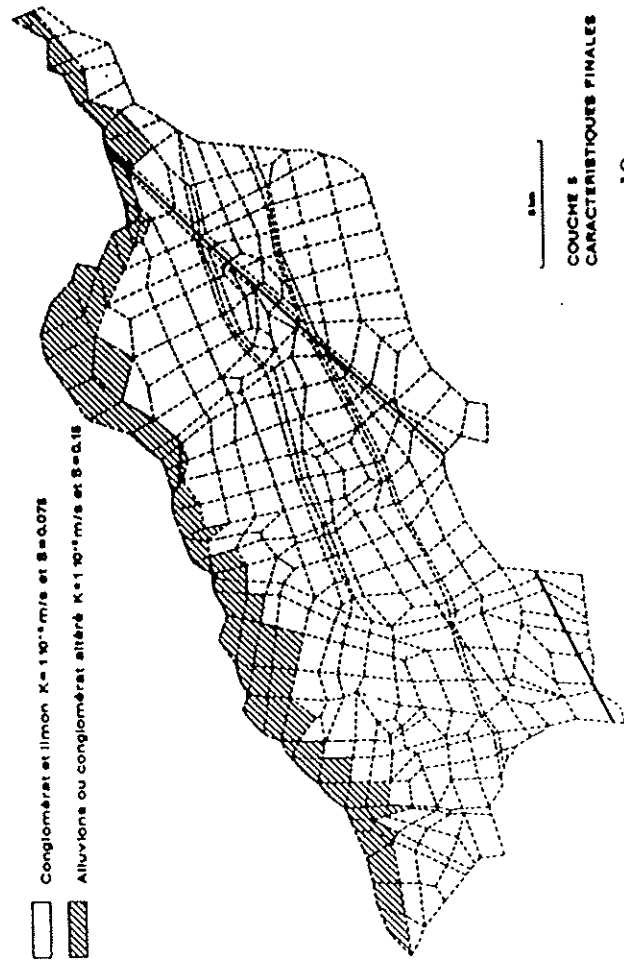
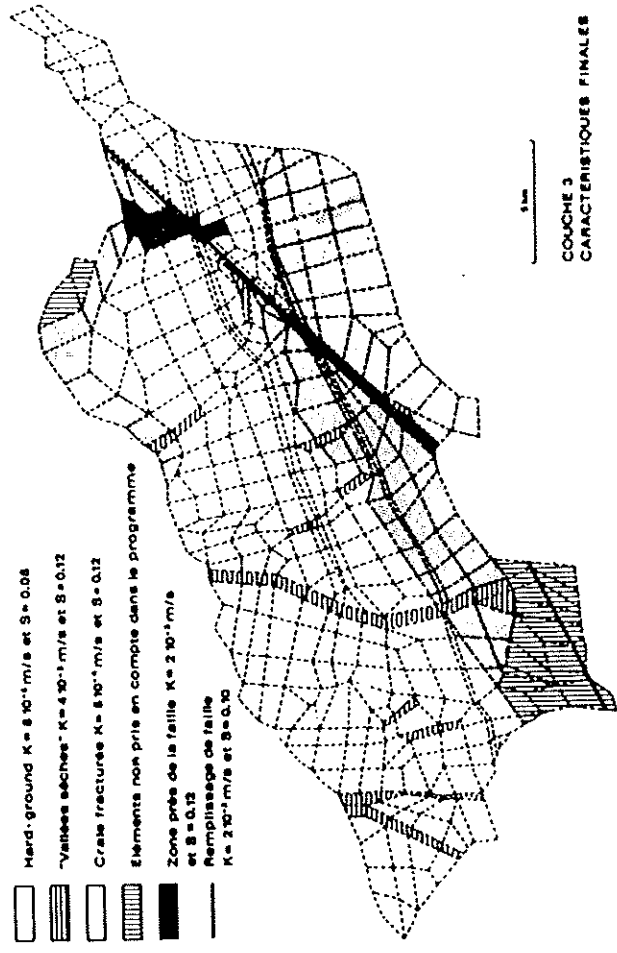
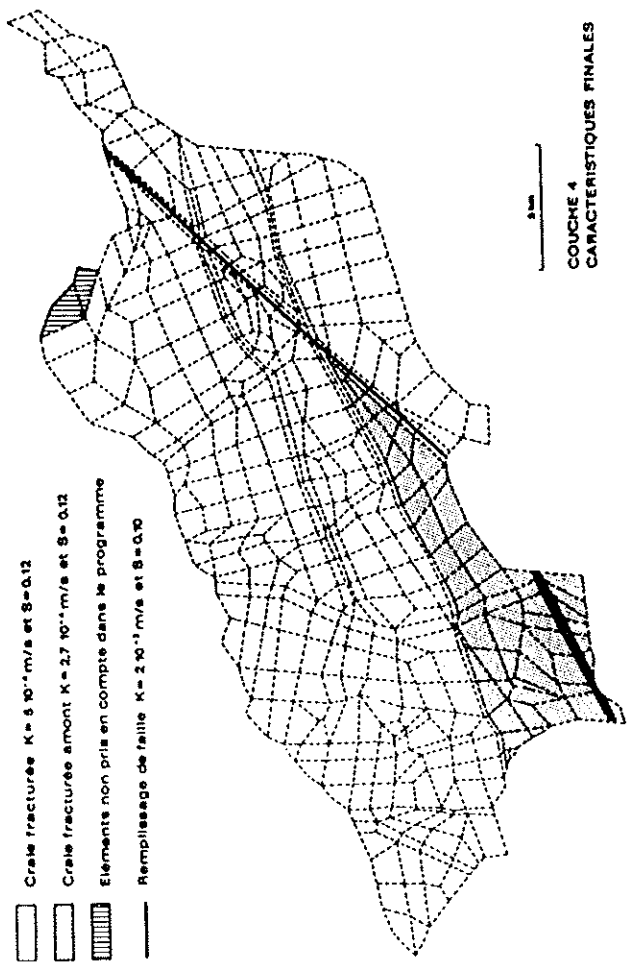
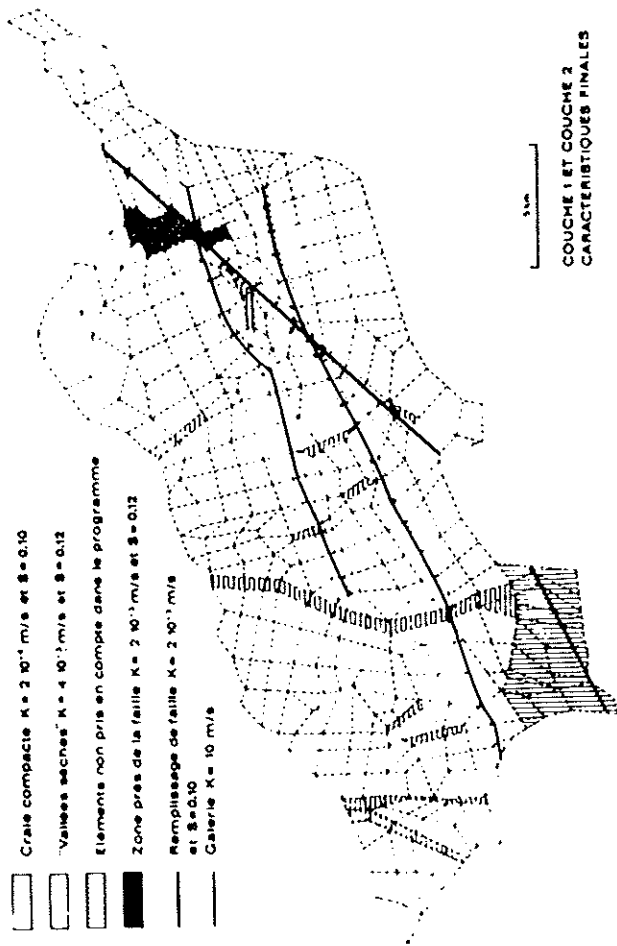


Figure 17

Figure 18

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

La répartition finale (après calage) des matériaux dans les différentes couches est légèrement modifiée par rapport au début du calage (figures 17 et 18); seule la couche 5 est rigoureusement inchangée.

La figure 19 illustre la piézométrie de 1966.

Des cartes de flux peuvent être dressées automatiquement pour toutes les couches et toutes les années; elles permettent une bonne visualisation des écoulements principaux et des axes de drainance (figure 20).

4.4.3. Conclusions et perspectives

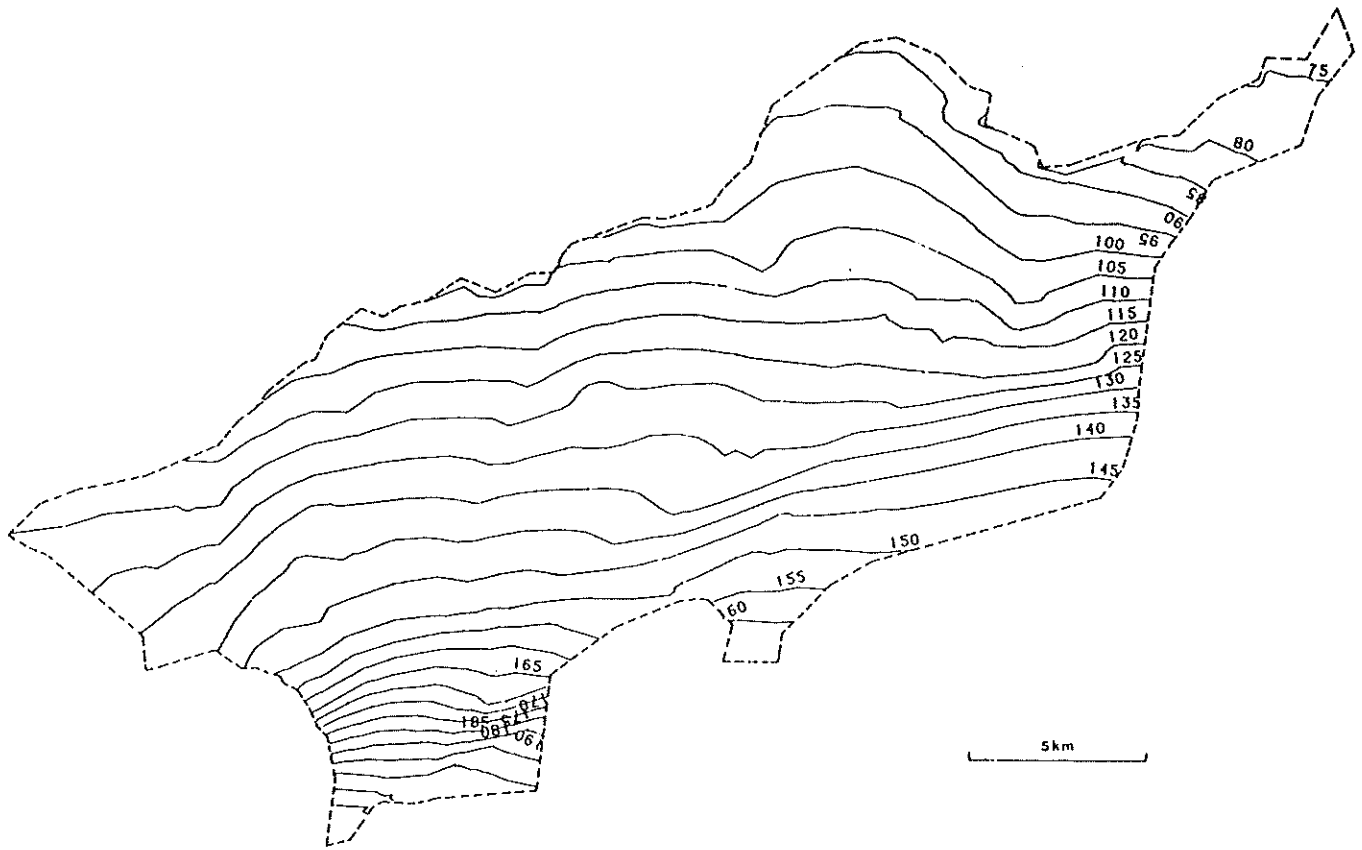
.....

La complexité des conditions géologiques dans ce vaste domaine justifie l'utilisation des éléments finis qui constituent une méthode souple pour ce genre de modélisation.

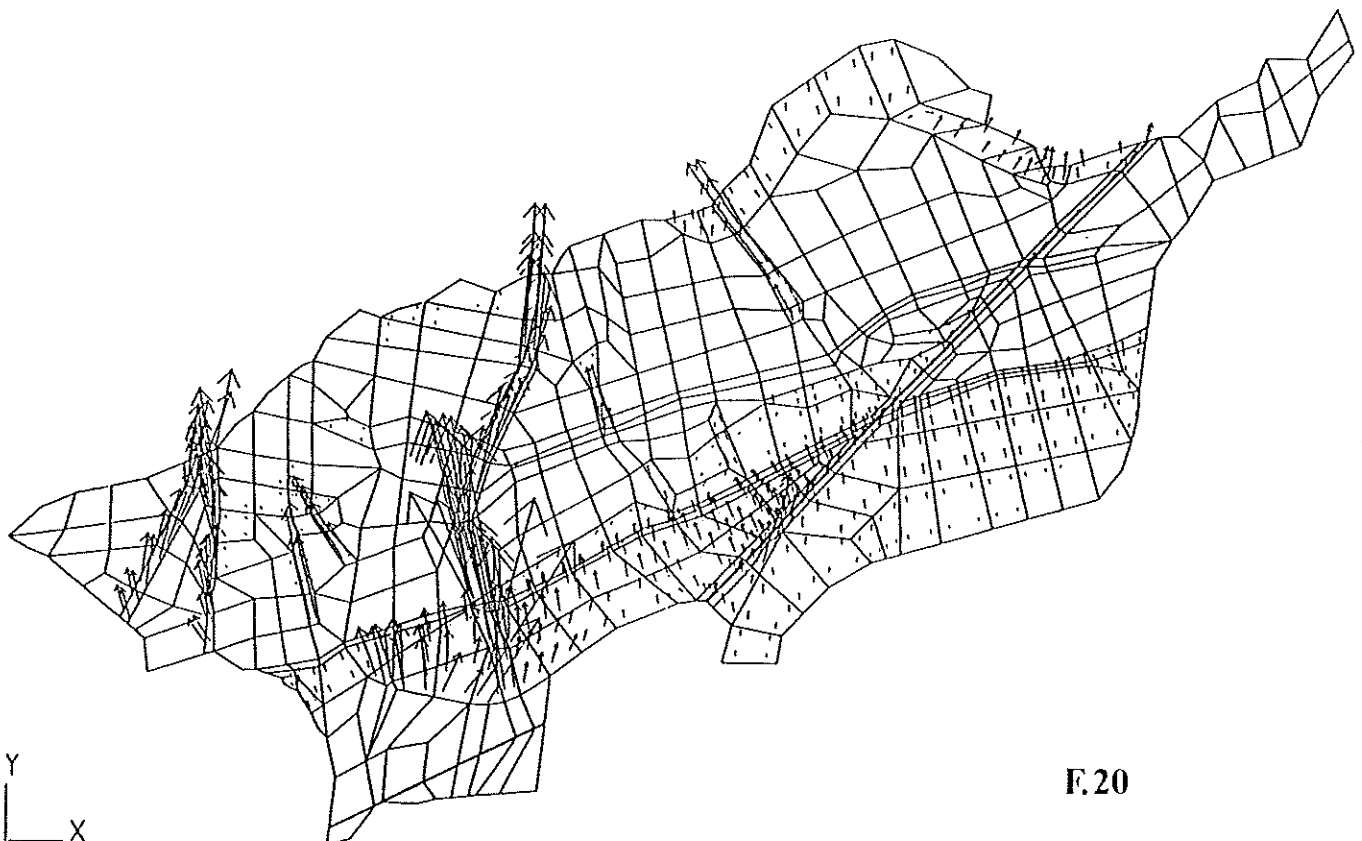
Actuellement, le calage est considéré comme satisfaisant, le modèle reproduisant correctement toutes les tendances générales de la nappe.

On peut encore améliorer un calage en affinant le maillage dans certaines zones et en distinguant une plus grande dispersion des valeurs de perméabilité et de coefficient d'emménagement. Il s'agit d'opérations coûteuses en temps ordinateur et rendant le programme de plus en plus lourd à manipuler. Actuellement, chaque passage complet entre 1951 et 1984 prend entre 48 et 55 heures CPU sur Micro VAX II.

Dans sa forme actuelle, le modèle peut être utilisés à des fins prévisionnelles, dans le but par exemple, de déterminer l'évolution de la piézométrie en fonction de débits que l'on voudrait pomper. D'autre part, pour aborder la modélisation de transport de polluant, on peut coupler au modèle actuel, des lois de transport par diffusion moléculaire et par convection.



F.19



F.20

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

5. CONCLUSIONS GENERALES

Les deux modèles mathématiques testés permettant une bonne simulation de la nappe, le modèle par différences finies en mode permanent et le modèle par éléments finis en mode transitoire avec aquifère en 3 dimensions.

La complémentarité des deux modèles pour l'étude de la nappe aquifère de Hesbaye s'est montrée très utile.

Le modèle par différences finies a permis notamment d'étudier les gammes de valeurs de transmissivité. Il a mis en exergue le rôle important du Hard-Ground et des vallées sèches malgré des approximations géométriques importantes. Une quantification approchée du bilan hydrique global a par ailleurs été obtenue.

Le modèle 3D par éléments finis, en tenant compte avec précision des différentes couches géologiques, des galeries et des limites a prévu d'affiner la simulation malgré la complexité des conditions géologiques. L'utilisation des éléments finis s'est révélée performante pour ce genre de modélisation en 3D et en régime transitoire.

L'introduction, dans le modèle éléments finis LAGAMINE en 3D et en régime transitoire de lois de transport par diffusion moléculaire et par convection permettra d'aborder les problèmes de pollution de l'aquifère.

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA
NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

REFERENCES

BATHE K.J. et KHOSHGOFTAAR M.R. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech, 3, 13-22 - 1979.

BREBBIA C.A., WANG S.Y., Finite elements in Water Resources. Proceedings of the 5th International Conference Burlington, Vermont, U.S.A. 823 p. - 1984.

BRIXKO A., L'alimentation en eau de l'agglomération liégeoise. in la Technique de l'eau et de l'assainissement n° 402-403, p. 87-95. 1980.

CALEMBERT L. Le Crétacé supérieur de la Hesbaye et du Brabant. Ann. Soc. Géol. de Belgique. Tome LXXX. pp. 129-165. - 1956.

GHIJSEL P. Crétacé de Hesbaye. Rapport final M.R.W.- C.I.L.E. - 1985.

JUNGELS P., Sondages en Hesbaye. Professionnal paper n°15. - 1968.

LEDOUX E. Programme Newsam : principe et notice d'emploi. Centre d'Informatique Géologique. E.N.S.M.P. 55p. - 1978.

LEGRAND R;, Précision sur le rejet de la Faille Bordière. Professional Paper n° 146.- 1977.

LEROUX E., RICOUR J., WATERLOT G., La surface piézométrique de la nappe de la craie du Nord de la France. Société Géologique du Nord. Annales. Tome LXXX. pp. 234-240 - 1960.

MONJOIE A. Observations nouvelles sur la nappe aquifère de la craie en Hesbaye.- 1966.

MONJOIE A. Hydrogéologie. Notes de cours U.Lg. - 1984.

MONJOIE A., Compléments de Géologie de l'Ingénieur et d'Hydrogéologie. Notes de cours. Inédit.- 1985

MODELISATION PAR DIFFERENCES FINIES ET PAR ELEMENTS FINIS DE LA
NAPPE AQUIFERE DE HESBAYE

NIHOULJ.C.J., WOLLAST R. Hydrodynamic and Dispersion Models. Boundary Fluxes and Boundary Conditions. pp. 11-198.-
1983.

PEL J., Observations géologiques et hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Vottem. Ann. Soc. Géol. de Belgique. Tome LXXXIII, pp. 345-350.-
1960

PIETTE Ch., Application des éléments finis à la détermination de la surface piézométrique d'une nappe d'eau souterraine. Travail de fin d'étude, F.S.A. Université de Liège.-
1976.

PIETTE Ch., et CESCOTTO S., Application des éléments finis à la détermination de la surface piézométrique d'une nappe d'eau souterraine. Journée d'études. La méthode des éléments finis appliquée. -

SANDHU R.S., WILSON E.L., Finite element analysis of seepage in elastic media. Proc. A.S.C.E., Engineering Mechanics Div., 95, EM3, 641-651. -
1969.

SANDHU R.S., LUI H., et SINGH K.J., Numerical performance of some finite element schemes for analysis of seepage in porous elastic media. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 1, N°3, pp. 177-194.-
1977.

TAILOR R.L., et BROWN C.B., Darcy flow solution with a free surface. A.S.C.E., Soil Mechanics and Foundation Div., 98, SM11, pp. 1143-1162.-
1972.

THOREZ J. et MONJOIE A., Lithologie et assemblages argileux de la smectite de Herve et des craies campaniennes et maastrichtiennes dans le Nord-Est de la Belgique. Ann. Soc. Géol. de Belgique. Tome 96, pp. 651-670.-
1981.

VOLKER R.E., Non linear flow in porous media by finite elements. Proc. A.S.C.E., Hydraulics Div., 95, HY6, 1093-114. -
1969.