

Etude régionale par éléments finis d'une nappe libre située dans les craies du crétacé en Belgique

Finite element model of a regional
water-table aquifer in cretaceous
chalk (Belgium)

A. DASSARGUES¹, A. MONJOIE¹, J. LAMBERT², A. PIERLOT³

Reçu le 28 mars 1988, accepté pour publication le 19 septembre 1990*

RÉSUMÉ

La nappe aquifère de Hesbaye située au Nord-Ouest de Liège (Belgique) est logée dans les craies du Crétacé, surmontées d'une épaisse couche de limon. L'alimentation en eau de la région est assurée par les 60 000 m³ extraits journellement des galeries captantes et des puits.

Un modèle mathématique par éléments finis a été construit pour simuler numériquement le comportement de l'aquifère en régime transitoire. La complexité de la géologie locale a nécessité l'emploi d'une méthode par éléments finis permettant une discrétisation 3D souple et détaillée de la zone étudiée, modélisation réalisée avec un maillage fixe en condition de nappe libre.

Des développements numériques comprenant la simulation de la surface libre en mode transitoire, ont été introduits dans le modèle LAGATHER du programme LAGAMINE (Université de Liège). Le programme a été testé sur des exemples bidimensionnels avant d'être appliqué en 3D à l'aquifère de Hesbaye.

La discrétisation et les principaux résultats sont présentés.

Mots clés : *Modélisation, nappe libre, modèle hydrogéologique régional, éléments finis.*

SUMMARY

The Hesbaye aquifer located in Cretaceous chalks near Liège (Belgium), is recharged by infiltration through the overlying loess and conglomerate.

1. Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'hydrogéologie et de Prospection Géophysique (LGIH), Université de Liège, B 19, B. 4000 Liège, Belgique.
2. Service Distribution d'Eau de la Région Wallonne de Belgique.
3. Service des Eaux Souterraines de la Région Wallonne de Belgique.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 octobre 1991.

Wells and collecting adits produce a daily flow of 60 000 m³ out of this aquifer, to provide the alimentation of the area of Liège and its suburbs.

More than 500 boreholes, piezometers and wells give many informations for the idealization and the calibration procedures. Variation ranges of permeability and effective porosity are determined from 150 pumping tests. The main drainance axis of the aquifer (called « dry valleys ») are located and characterized by higher permeabilities.

Finite element modelling has been developed to foresee the evolution of the water table and to get some additional informations especially about these main drainance axis.

The modelling method is based on the LAGAMINE code (from Liège University). The LAGATHER code is one of the module of the LAGAMINE which is initially adapted to treat non-linear thermic problems. Here, it has been developed to compute flows in porous media in transient conditions. The water table is calculated with a fixed mesh structure using a new method developed by (CHARLIER *et al.*, 1988). Constitutive laws of the flow are changed to take into account the state of saturation or no-saturation of the media. Then the flow equation (the Darcy's law) becomes non-linear. The transition from unsaturated to saturated field is treated at a constant zero pressure, according to the analogy with thermodynamical phase changes at constant temperature. The method has been checked on uniaxial and two dimensionnal sections.

3D discretisation and modelling of the whole aquifer has been realized. The problem requires about 2 670 8-nodes isoparametric brick finite elements. The complexity of the geological conditions justifies fully the use of finite element method by the diversity and the wide range of the hydrogeological parameters to introduce in the model.

The discretisation is described and some of the most significant results are presented.

Key-words : *Groundwater modelling, water-table aquifer, large-scale model, finite element method.*

INTRODUCTION

Située au nord-ouest de la Meuse près de Liège en Belgique (*fig. 1*) la zone étudiée s'étend sur 350 km² et correspond à la partie sud du bassin hydrographique du Geer. La nappe aquifère de Hesbaye est contenue dans les craies du Crétacé et assure l'alimentation en eau de la région de Liège, à partir de 45 km de galeries captantes et de nombreux puits. Le prélèvement moyen est de 60 000 m³/jour en moyenne (BRIXKO, 1980).

En vue de pouvoir réaliser une « gestion dynamique » de l'aquifère tant du point de vue qualitatif que quantitatif, un modèle mathématique a été réalisé.

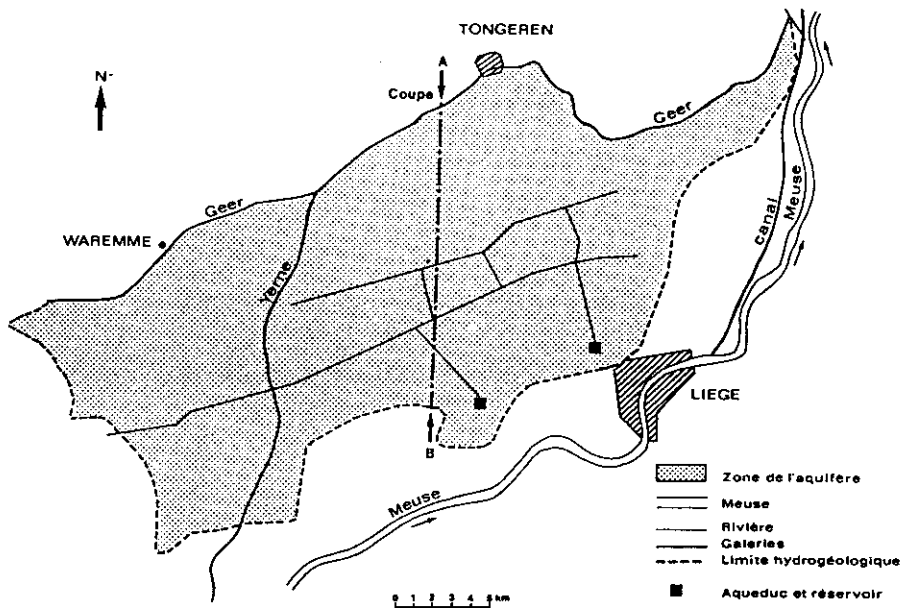


Figure 1 Plan de situation.
Location map.

CADRE GÉOLOGIQUE ET GÉOMORPHOLOGIQUE

De bas en haut, les différentes unités géologiques sont les suivantes (CALEMBERT, 1956) (fig. 2) :

- Les *formations primaires* du socle, affectées de failles. La principale, faille de Horion-Hozémont, met en contact les calcaires du Viséen (compartiment SE) et les schistes et grès du Silurien (partie NW).

Elle a rejoué après les dépôts du Secondaire provoquant un rejet de plusieurs mètres de la base de l'aquifère ainsi qu'une fracturation plus intense au sein de celui-ci.

- Les *formations secondaires* datant du Crétacé et constituées de :

- La « smectite de Herve », couche d'argile calcareuse indurée, formant le mur imperméable de l'aquifère.

- Les craies blanches, d'une épaisseur moyenne de 20 m et dans lesquelles la circulation des eaux se fait par les réseaux de diaclases et fissures associées le plus souvent aux vallées sèches, failles et bombements du socle (CALEMBERT, 1956 et GHIJSEL, 1985).

- Le « hard-ground », un banc de craie indurée d'épaisseur souvent inférieure à 1 mètre.

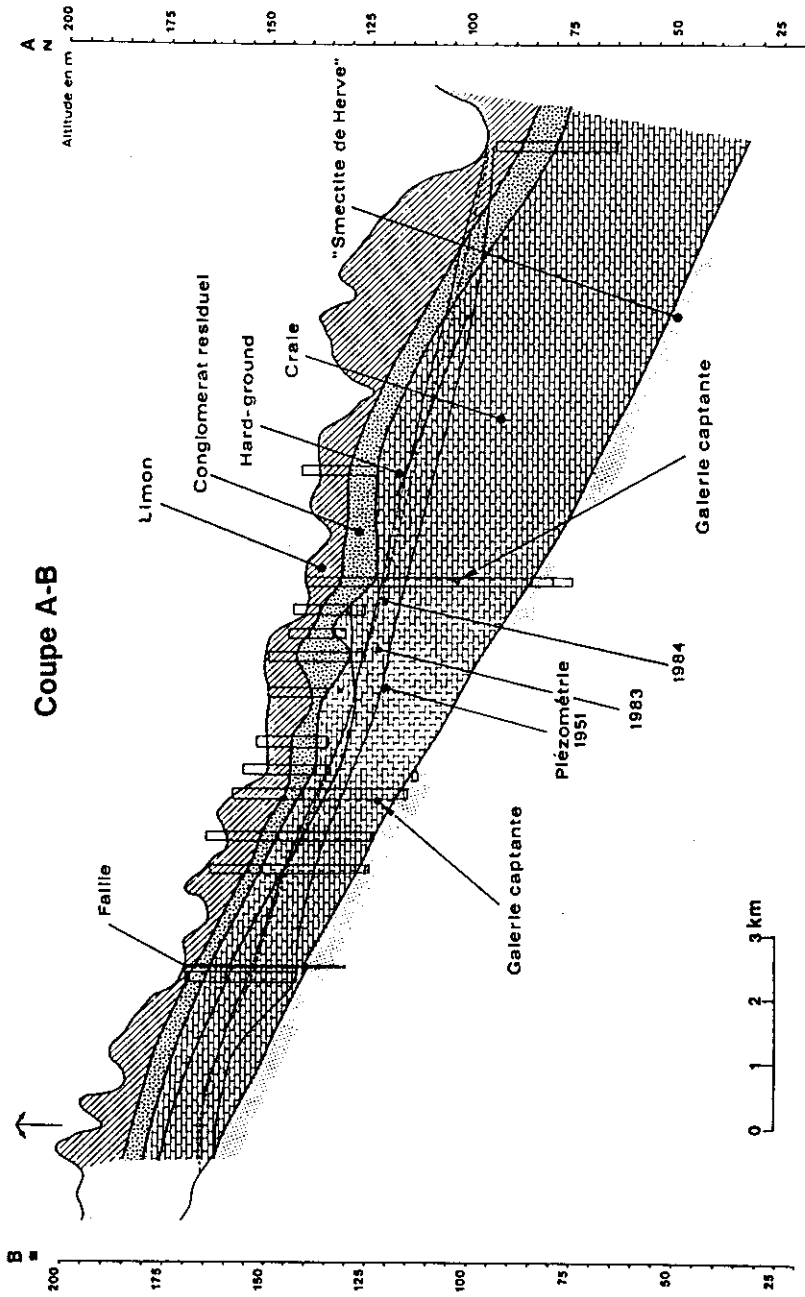


Figure 2
Une des coupes géologiques de la nappe de Hesbaye.
One of the cross-sections of Hesbaye aquifer.

Figure 2

– Les craies grises et tigrées, regroupées sous le terme de « craie supérieure » totalisant de 10 à 15 m d'épaisseur. Leur perméabilité est supérieure à celle de la craie blanche suite aux phénomènes superficiels de détente et d'altération (CALEMBERT, 1956 et GHIJSEL, 1985).

– Des tuffeaux et calcarénites à gros bancs de silex ayant subi d'intenses phénomènes d'altération conduisant à une surface supérieure du Crétacé fort irrégulière et à la formation d'un conglomérat résiduel à silex.

• Les formations tertiaires et quaternaires représentées principalement par des lentilles sableuses, par les loess du quaternaire d'une épaisseur de 2 à 20 mètres, et par les colluvions et alluvions récentes dans la vallée du Geer.

De nombreuses coupes géologiques ont été tracées ainsi que des cartes des isohypes des différentes couches.

Du point de vue géomorphologique, la surface topographique de la Hesbaye est en pente douce vers le N.NW. Le réseau hydrographique actif est peu dense mais de nombreuses vallées sèches de direction générale N-S définissent un réseau hydrographique fossile d'origine périglaciaire (gélifraction). L'assèchement de certains vallons résulte de la dissolution des craies au droit d'axes fracturés (fig. 3), induisant des augmentations de perméabilité.

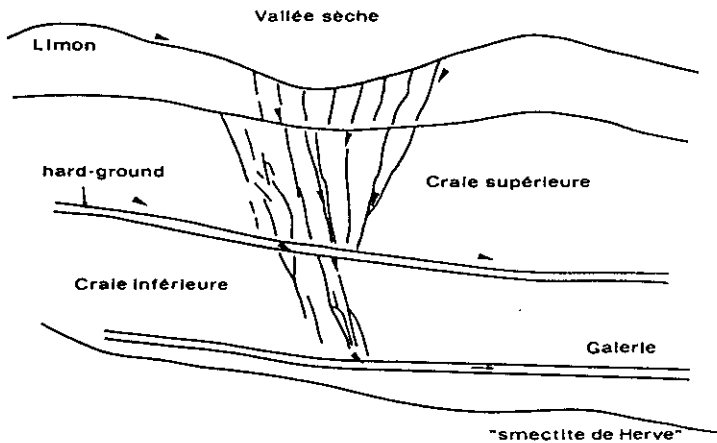


Figure 3 « Vallées sèches ».
Dry valleys.

BILAN HYDROLOGIQUE

Le bilan hydrologique de la nappe pour la période entre 1951 et 1966, s'établit de façon suivante (MONJOIE, 1967) :

- pluviosité annuelle moyenne : $P = 740$ mm
- évapotranspiration réelle moyenne : $ET = 525$ mm
- infiltration annuelle moyenne : $175 - 275$ mm
- débit annuel moyen du Geer : $52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ soit
 $Q_{\text{Geer}} = 120$ mm
- débit total des captages : $60\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$ soit
 $Q_{\text{capt}} = 65$ mm
- emmagasinement annuel moyen : $E = 15$ mm

$$\text{d'où } P = ET + Q_{\text{Geer}} + Q_{\text{cpt}} + E + \text{« pertes »}$$

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

PARAMÈTRES HYDROGÉOLOGIQUES

L'interprétation des résultats de près de 150 essais de pompage fournit les valeurs suivantes (DASSARGUES *et al.*, 1987) :

- pour les limons : $1 \cdot 10^{-9} < K < 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/sec}$
- pour le conglomérat résiduel : $1 \cdot 10^{-5} < K < 8 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}$
- pour les craies supérieures (fracturées) : $2 \cdot 10^{-4} < K < 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/sec}$
- pour les craies inférieures (compactes) : $1 \cdot 10^{-5} < K < 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/sec}$

La porosité efficace (CASTANY, 1982) ou de drainage (DE MARSILY, 1981), déterminée par les 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 dépasserait toutefois 10 % dans de nombreuses zones où la craie est plus fracturée et altérée.

FORMULATION MATHÉMATIQUE

L'équation bidimensionnelle des écoulements horizontaux (hypothèses de Dupuit) en milieu poreux, dans le cas d'une nappe libre, peut s'écrire (DE MARSILY, 1981) :

$$\text{div} \left[\left(\int_b^h K dz \right) \cdot \overrightarrow{\text{grad } h} \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (1)$$

C'est une équation différentielle du second degré aux dérivées partielles, non-linéaire en h .

où : h = hauteur piézométrique
 b = hauteur de la base de l'aquifère
 K = tenseur des perméabilités, permettant d'envisager les anisotropies
 S = coefficient d'emmagasinement de la nappe
 q = débit extérieur entrant ou sortant par unité de surface.

Le coefficient d'emmagasinement S est le rapport du volume d'eau emmagasinée sur le volume concerné de l'aquifère. En nappe libre, l'emmagasinement d'eau réalisé par compressibilité peut être négligé par rapport à celui dû à la porosité efficace du milieu soit $S \simeq n_e$ (porosité efficace ou de drainage).

A l'équation (1) se joignent les conditions initiales et les conditions aux limites :

- *Conditions initiales* constituées, en régime transitoire, d'une piézométrie de départ à partir de laquelle la simulation mathématique débute.

- *Conditions aux limites* de trois types :

- la condition de Neuman ou de flux imposé : le flux nul est imposé à la

$$\text{frontière } \frac{\partial h}{\partial n} = 0$$

n étant la normale à la frontière imperméable.

- la condition de Dirichlet ou de potentiel imposé : le potentiel imposé h = valeur imposée définie.

- la condition de Fourier qui correspond à des limites avec infiltration constitue une combinaison des 2 autres conditions, le plus souvent utilisée pour représenter des murs de quais à travers lesquels le débit de suintement n'est pas en relation avec la hauteur piézométrique.

La méthode des éléments finis, appliquée à une structure totalement tridimensionnelle, permet de résoudre numériquement l'équation de diffusivité dans l'ensemble du domaine étudié en tenant bien compte de l'hétérogénéité et de la complexité géométrique.

En effet, les méthodes analytiques sont imprécises car elles impliquent des hypothèses trop simplificatrices pour des modèles régionaux : homogénéité, isotropie, limites infinies, pas de recharges ponctuelles, etc.

Un modèle par différences finies a été utilisé précédemment pour l'étude de la nappe de Hesbaye, par Bolly (1986). Cependant, les approximations géométriques qu'impose cette méthode sont très importantes surtout lorsque le domaine étudié est complexe.

Le programme éléments finis, utilisé ici est le LAGAMINE, développé depuis 7 ans au département MSM de l'Université de Liège (CHARLIER, 1987).

Généralement, les programmes d'éléments finis (2D verticaux ou quasi 3D) visant à modéliser des nappes aquifères à surface libre fonctionnent avec un maillage variable limité à la zone saturée du milieu poreux. A chaque pas de la simulation, la nouvelle hauteur piézométrique calculée nécessite un remaillage automatique de la zone saturée. Le système est précis mais extrêmement lourd et gros consommateur en temps ordinateur. Vu les dimensions de la nappe de Hesbaye, il était impossible d'envisager ce procédé.

Une méthode originale a été trouvée par CHARLIER *et al.*, (1988) s'inspirant de la technique « enthalpique » de modélisation des changements de phase en conduction thermique et sur base des travaux et recherches de BATHE et KHOSHGOFTAAR, 1979 ; NEUMAN, 1973 ; PIETTE et CESCOTTO, 1976 ; et TAYLOR et BROWN, 1972.

En thermique, les changements de phase se font à température constante tout en emmagasinant une certaine quantité de chaleur. En considérant que le milieu passe de l'état non saturé à l'état saturé à pression constante nulle, la quantité d'énergie de changement d'état correspond ici à la quantité d'eau emmagasinée par le milieu (coefficient d'emmagasinement). La figure 4 illustre la « loi d'emmagasinement » pour une nappe libre :

- l'emmagasinement correspondant au passage de la zone non saturée à la zone saturée est égal à la porosité efficace du milieu poreux, n_e ,
- ensuite ($p > 0$), l'emmagasinement en conditions de nappe captive est dû à la compressibilité du milieu.

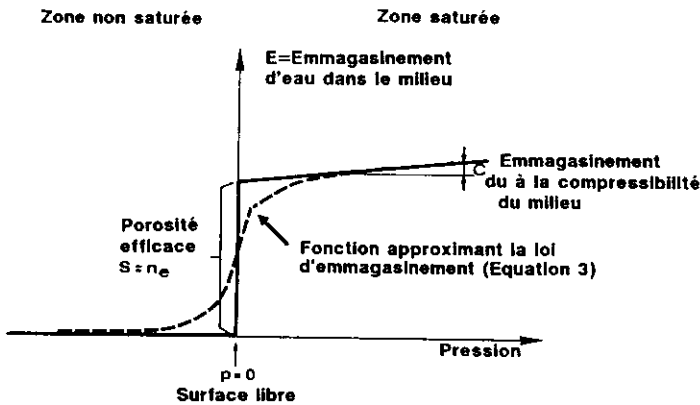


Figure 4 Loi d'emmagasinement en fonction de la pression.
Storage law, function of the pressure.

Pour implanter cette « loi d'emmagasinement » en fonction de la pression dans le programme LAGAMINE, il a fallu exprimer l'équation de diffusivité à 3 dimensions en termes de pression :

$$\operatorname{div} \left[\frac{K}{\rho \cdot g} \overrightarrow{\operatorname{grad}} p + K \overrightarrow{\operatorname{grad}} z \right] + \frac{dE}{dt} = Q \quad (2)$$

- où : ρ = densité de l'eau
 p = pression de l'eau
 z = coordonnée verticale
 E = emmagasinement d'eau dans le milieu
 Q = débit extérieur

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dp} \cdot \frac{dp}{dt}$$

La loi d'emmagasinement en fonction de la pression est approchée dans le programme par une fonction du type :

$$E = n_e \left[\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{p}{\alpha} \right) + \frac{1}{2} \right] + C < p >$$

où : E = emmagasinement d'eau dans le milieu

n_e = porosité efficace

p = pression d'eau

C = coefficient d'emmagasinement dû à la compressibilité du milieu en conditions de nappe captive.

α = coefficient d'ajustement de la fonction arctangente (fig. 4).

L'approximation est d'autant meilleure que le coefficient α est petit.

Accessoirement, la zone à pression négative, qui constitue la représentation numérique de la zone non-saturée du milieu, doit pouvoir être traitée par le modèle. C'est pourquoi, la loi de Darcy est artificiellement multipliée par un

facteur $\frac{E}{n_e}$ qui tient compte du degré de saturation du milieu.

Cette méthode implantée dans le module LAGATHER (module du programme général LAGAMINE) conduit à une équation du flux non linéaire.

Plusieurs tests sur une colonne d'eau uniaxiale ont été réalisés avec succès, pour différentes conditions de pressions, de débits, d'alimentation et de pompage. Ensuite, une coupe bidimensionnelle simple a été modélisée (fig. 5) avec en un point A de cette coupe, imposition de la pression atmosphérique, simulant ainsi le creusement d'un tunnel de drainage. La courbe obtenue donnant le niveau de la nappe après un temps dit infini (état permanent) est très proche de celle obtenue par les travaux de PIETTE et CESCOTTO (1976) sur le même problème mais en régime permanent (fig. 5).

MODÉLISATION D'UNE COUPE 2D

La coupe géologique verticale représentée à la figure 2 a été discrétisée avec un maillage fin et en distinguant 5 types de terrains (fig. 6). Un début de calage est 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	
– 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

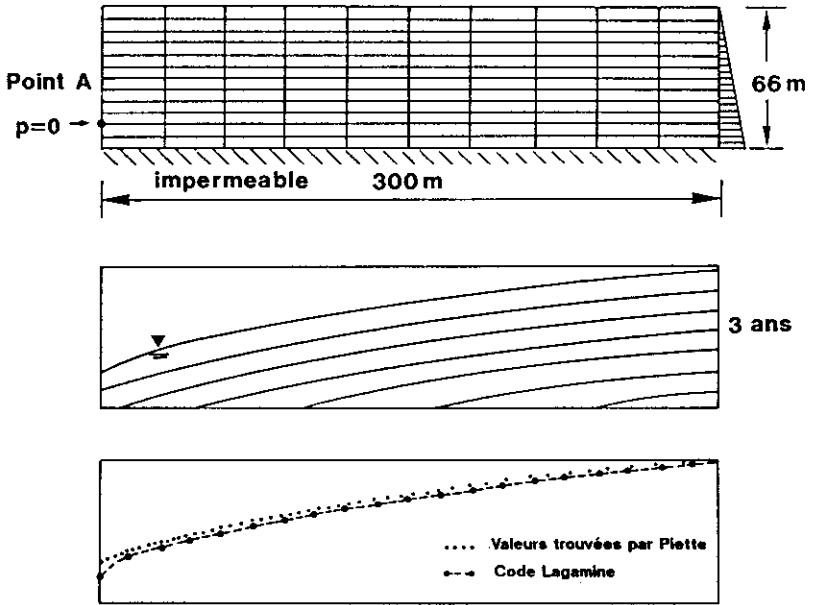


Figure 5 Comparaison des résultats du programme LAGAMINE avec ceux obtenus par Piette et Cescotto en régime permanent (1976) pour une coupe verticale.

Results of the LAGAMINE program compared with those obtained by Piette et Cescotto (1976) for vertical cross-section in permanent conditions.

Les débits de captage et de réalimentation sont considérés sur une tranche de 1 mètre d'épaisseur. De 1951 à 1984 le modèle montre une montée trop rapide de la nappe par rapport aux valeurs mesurées, malgré un choix de perméabilités horizontales 10 fois plus élevées que les perméabilités verticales dans les couches de craies (fig. 7).

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

L'évolution de la piézométrie mesurée en un point (d'abscisse X sur les coupes des figures 6 et 8) pour les 2 discrétisations utilisées montre (fig. 9) que l'écart est très faible et en tout cas peu significatif en comparaison de la simplification apportée à la discrétisation.

L'analyse bidimensionnelle de la coupe n'a pas été poursuivie car les écoulements latéraux ne sont pas pris en compte.

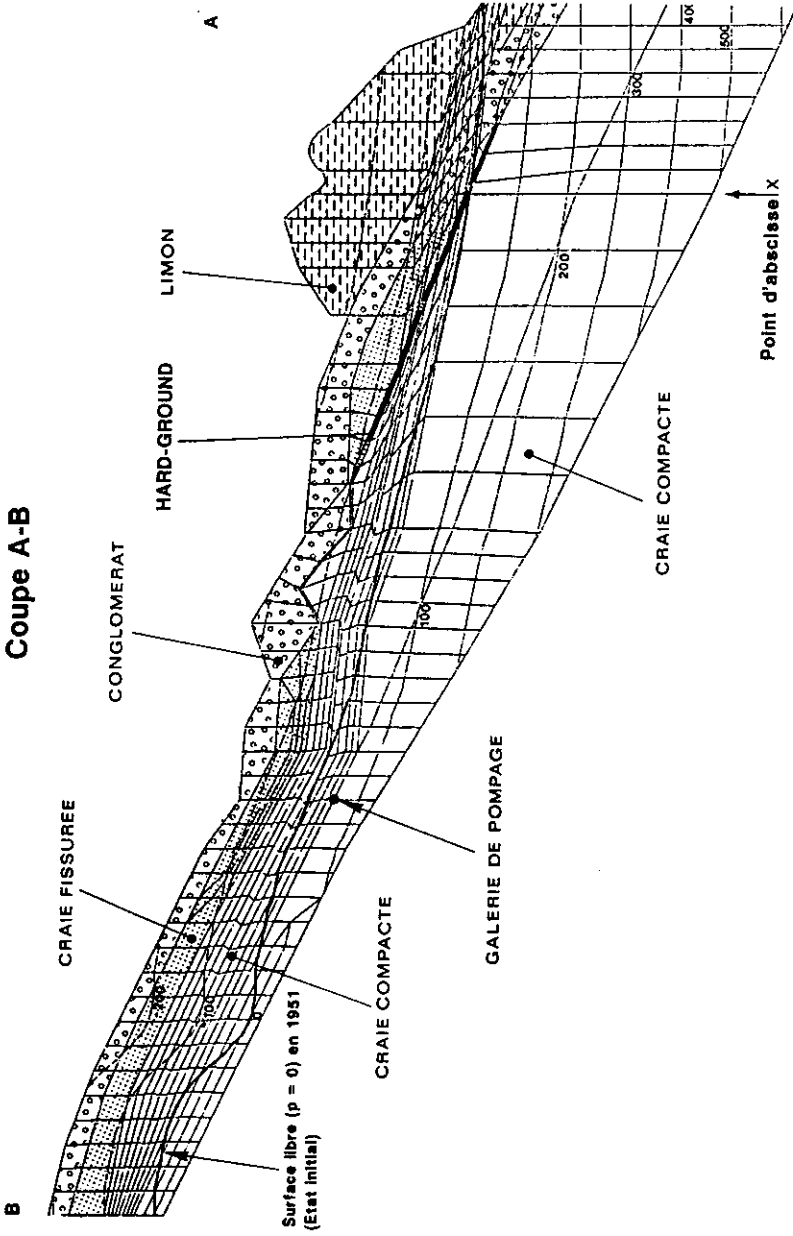


Figure 6 Discretisation d'une coupe verticale avec un maillage fin.
Fine meshing discretization of the vertical cross-section.

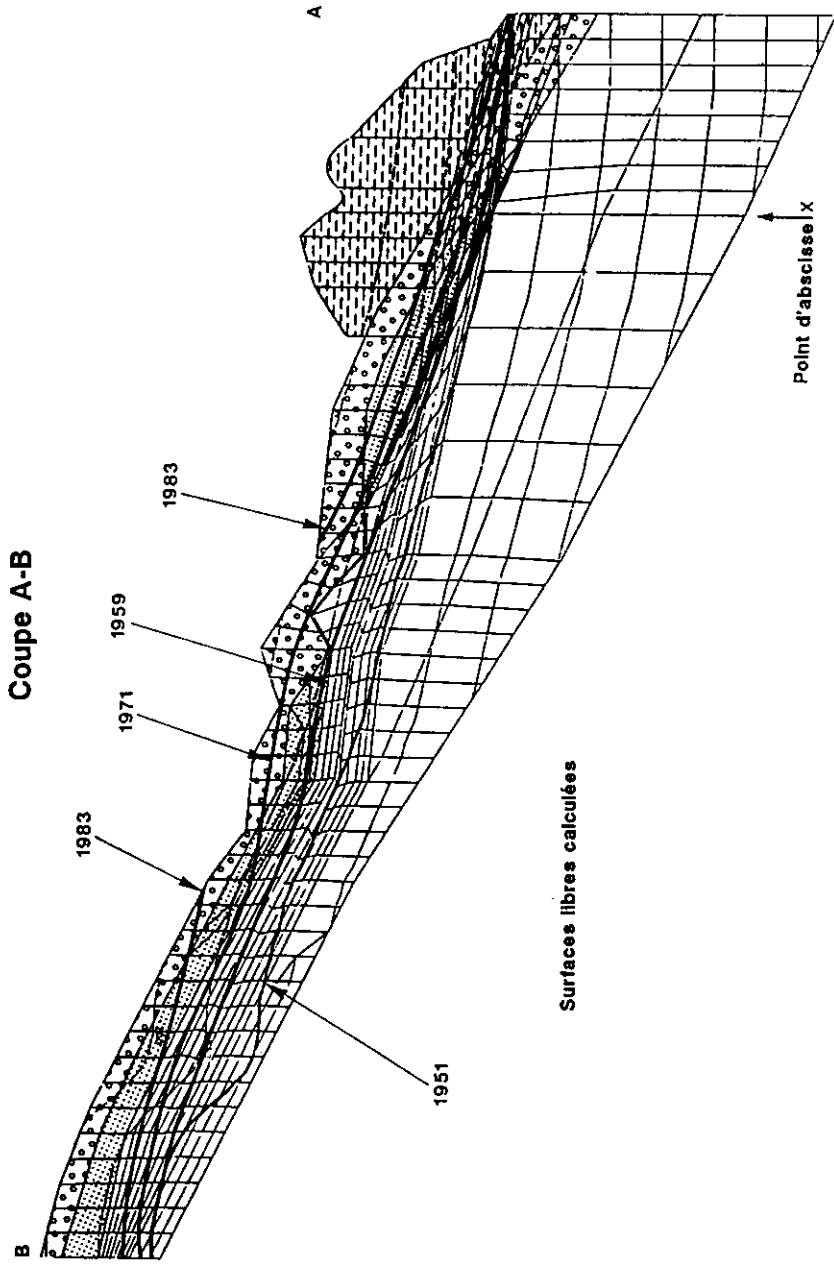


Figure 7 Niveaux piézométriques calculés pour la coupe verticale.
Computed piezometric heads for the vertical cross-section.

Figure 7

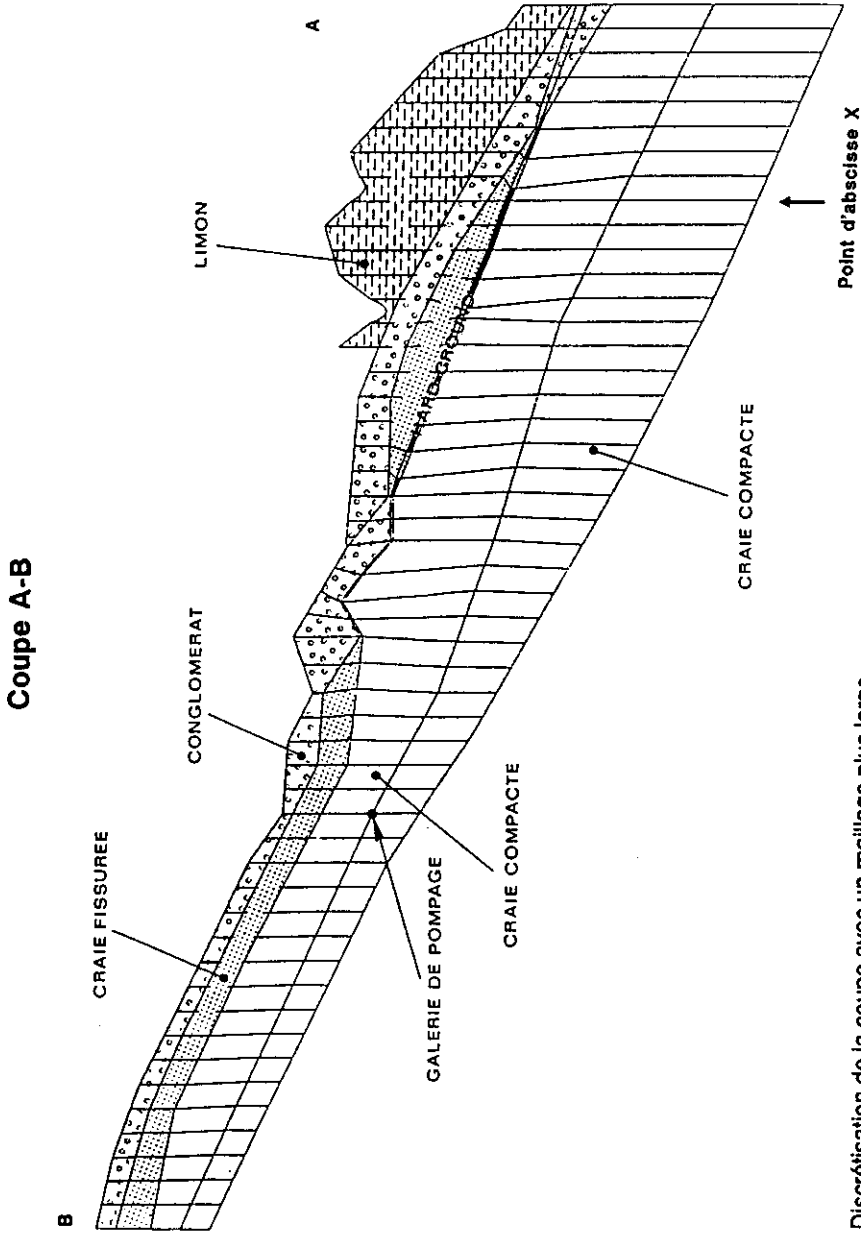


Figure 8 Discretisation de la coupe avec un maillage plus large.
Wide meshing discretization of the vertical cross-section.

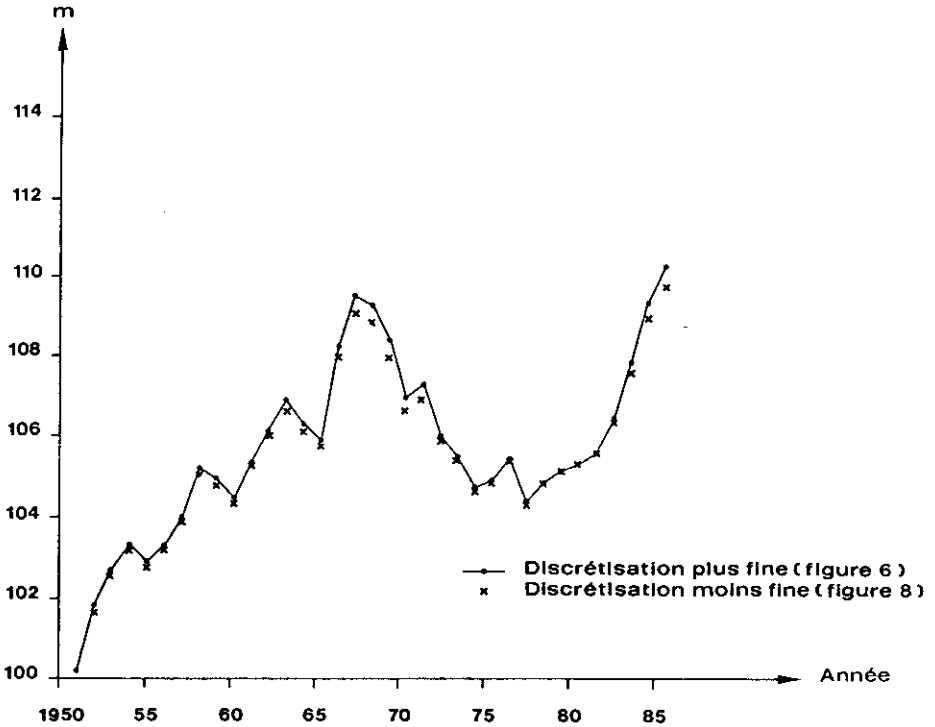


Figure 9 Evolution de la piézométrie en un point d'abscisses X pour les deux discrétisations utilisées.

Piezometerhead at the point of X coordinate for the two different discretizations.

MODÉLISATION 3D DE LA NAPPE

Description du modèle

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

La discrétisation 3D tient compte de nombreuses contraintes géométriques : emplacement des galeries et des puits de pompage, limites des différents horizons géologiques, failles importantes et limites hydrogéologiques du bassin.

Cinq couches de 534 éléments ont été distinguées, et donc 6 couches de nœuds. D'une couche de nœuds à la suivante, seule la coordonnée Z change, ce qui permet une manipulation aisée des fichiers par l'emploi d'incréments. La figure 10, montrant la couche 4 du modèle, illustre la complexité du maillage utilisé.

La *modélisation des galeries captantes* est réalisée par l'utilisation d'« éléments tuyaux » à une dimension (fig. 11), affectés d'une perméabilité de 1 000 et 10 000 fois plus élevée que dans les éléments voisins. Un resserrement des mailles de la structure a été effectué à proximité des galeries en vue d'obtenir une 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 à la 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 choisies (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 2 670 éléments du modèle peut se faire de manière très souple ; à la limite, on peut imposer 2 670 couples de paramètres différents. Dans la pratique, on a défini des « matériaux » en regroupant sous un « matériau » les éléments affectés de mêmes paramètres.

Au départ du calage, on a distingué les différents matériaux sur base des résultats des essais de pompage, leur répartition dans les différentes couches respecte au maximum les conditions géologiques et hydrogéologiques.

Le pas de temps a été fixé à un an compte tenu de la fréquence, le plus souvent annuelle, des mesures, et en particulier de la piézométrie. D'autre part, la dimension du problème permettrait difficilement d'utiliser des pas plus courts sur une durée de 33 ans (1951 à 1984).

La simulation en mode transitoire a débuté 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 sont introduits ainsi que les valeurs de l'infiltration efficace, calculées sur base des données hydrométéorologiques.

Le calage est effectué en comparant principalement les piézométries obtenues par le calcul aux piézométries mesurées, avec coupes et points de contrôle choisis afin d'y comparer les niveaux calculés et mesurés.

Calage du modèle

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 la surface libre, a été réalisée par l'addition d'éléments fins surfaciques spéciaux, situés au sommet de la structure et induisant une infiltration uniforme.

COUCHE 4

LAGAMINE

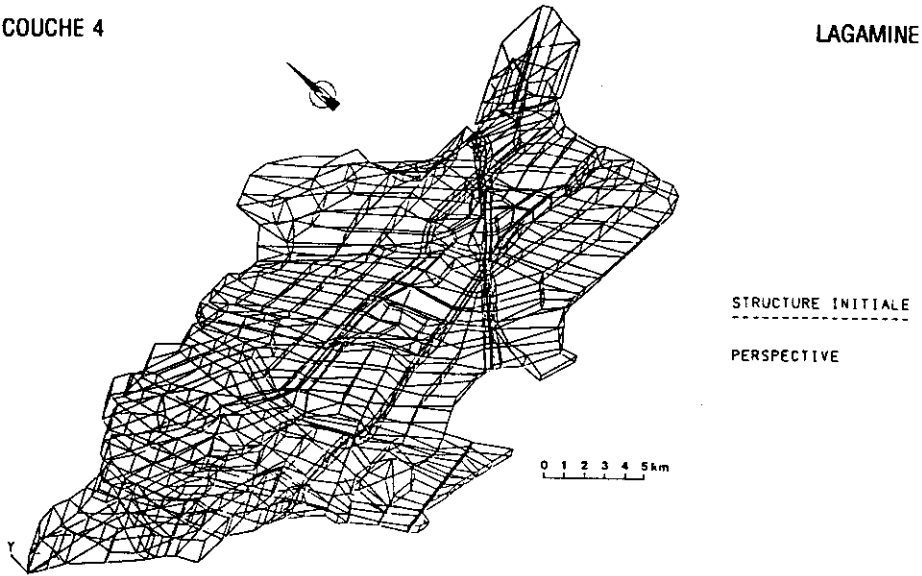


Figure 10 La quatrième couche de la structure discrétisée.
The 4th layer of the discretized structure.

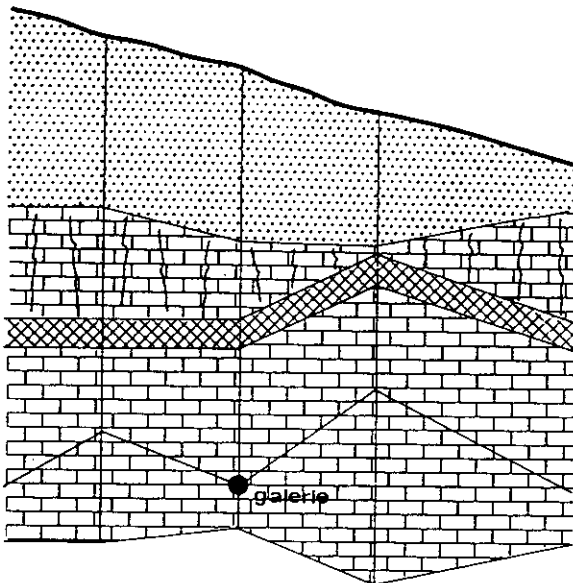


Figure 11 « Éléments tuyaux » représentant les galeries.
« Pipe elements » modelling the pumping adits.

– des contrastes de perméabilité très importants, entre le milieu poreux et les galeries, sont nécessaires afin de simuler réellement les écoulements dans ces galeries. Ces contrastes ont dû être limités à 10^3 alors qu'on aurait souhaité les imposer à 10^4 . Il s'en est suivi l'observation de rabattements calculés artificiels, localisés au droit des nœuds où ont été imposés les débits sortant des galeries.

Par la suite, le calage du modèle a consisté principalement en 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 des piézométries et des gradients calculés par le modèle soient proches des valeurs mesurées pour la période comprise entre 1951 et 1984.

Les modifications suivantes ont été apportées :

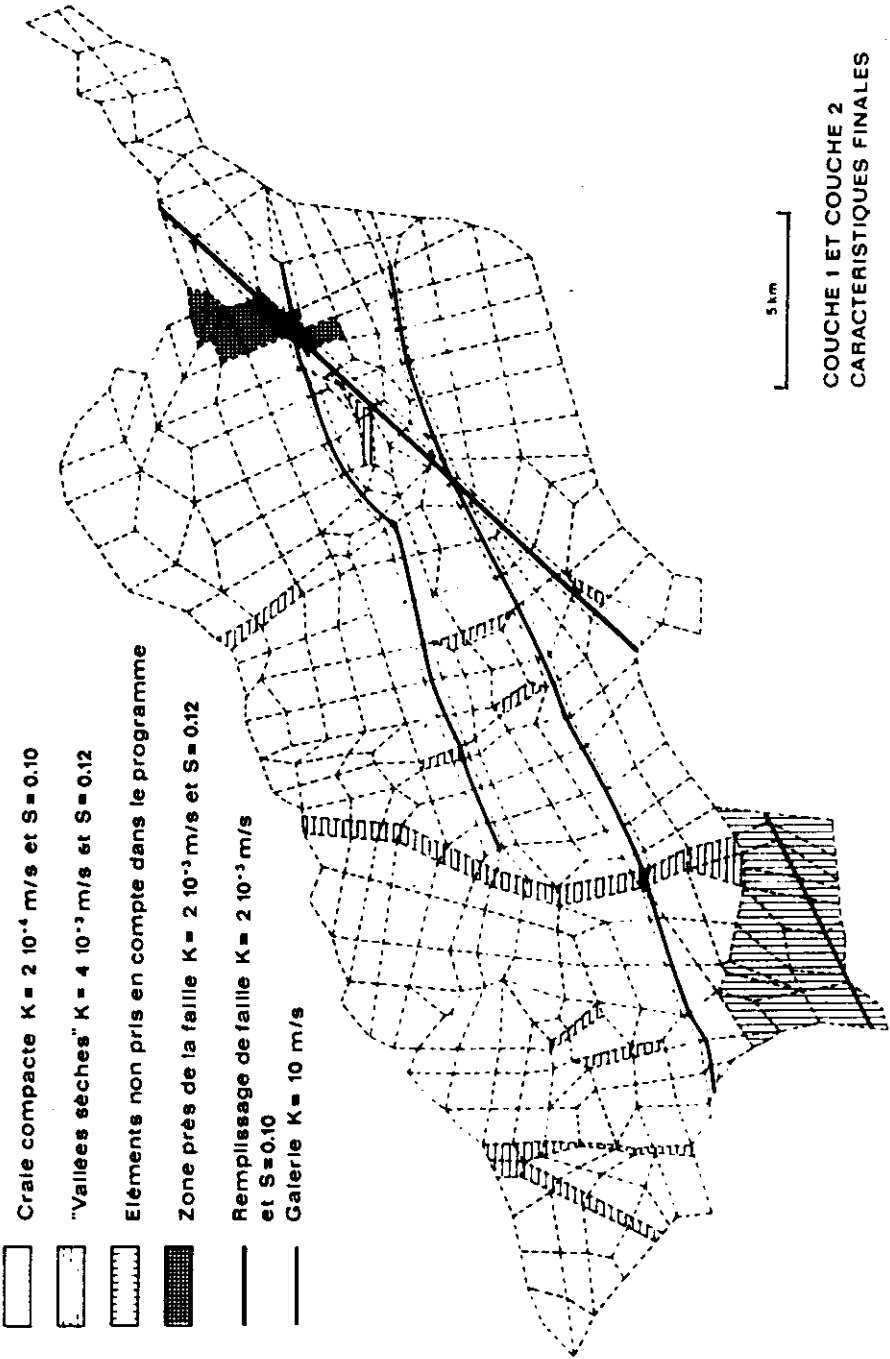
- les valeurs annuelles de l'infiltration efficace ont été réduites de 15 %, pour tenir compte de l'effet du ruissellement,
- les valeurs de la perméabilité et du coefficient d'emménagement de tous les matériaux ont été adaptées,
- une valeur de perméabilité différente a été affectée dans une zone de craie fracturée située à l'amont-Ouest de la zone étudiée,
- l'effet d'une vallée sèche a été diminué et une nouvelle vallée sèche a été créée dans la zone Nord-Est.

Après modifications, les caractéristiques hydrodynamiques de fin de calage sont :

– matériau 1 : craie compacte	$K = 2.10^{-4}$ m/s	et	$S = 0.10$
– matériau 2 : vallées sèches	$K = 4.10^{-3}$ m/s	et	$S = 0.12$
– matériau 3 : hard-ground	$K = 8.10^{-5}$ m/s	et	$S = 0.08$
– matériau 4 : craie fracturée	$K = 5.10^{-4}$ m/s	et	$S = 0.12$
– matériau 5 : alluvions et conglomérat résiduel	$K = 1.10^{-5}$ m/s	et	$S = 0.15$
– matériau 6 : conglomérat et limon	$K = 1.10^{-6}$ m/s	et	$S = 0.075$
– matériau 7 : remplissage de la faille	$K = 2.10^{-3}$ m/s	et	$S = 0.10$
– matériau 1 : craie fracturée, zone amont-ouest	$K = 2.7 \cdot 10^{-3}$ m/s	et	$S = 0.12$
– matériau 9 : nouvelle vallée sèche au N-E à proximité de la faille	$K = 2.10^{-3}$ m/s	et	$S = 0.12$

Les figures 12 et 13 présentent la répartition de ces matériaux dans les différentes couches du modèle.

La figure 14 montre la piézométrie calculée de 1966. Des cartes de flux peuvent être dressées automatiquement pour toutes les couches et à toutes les années, permettant une bonne visualisation des écoulements principaux et des axes de drainance (fig. 15).



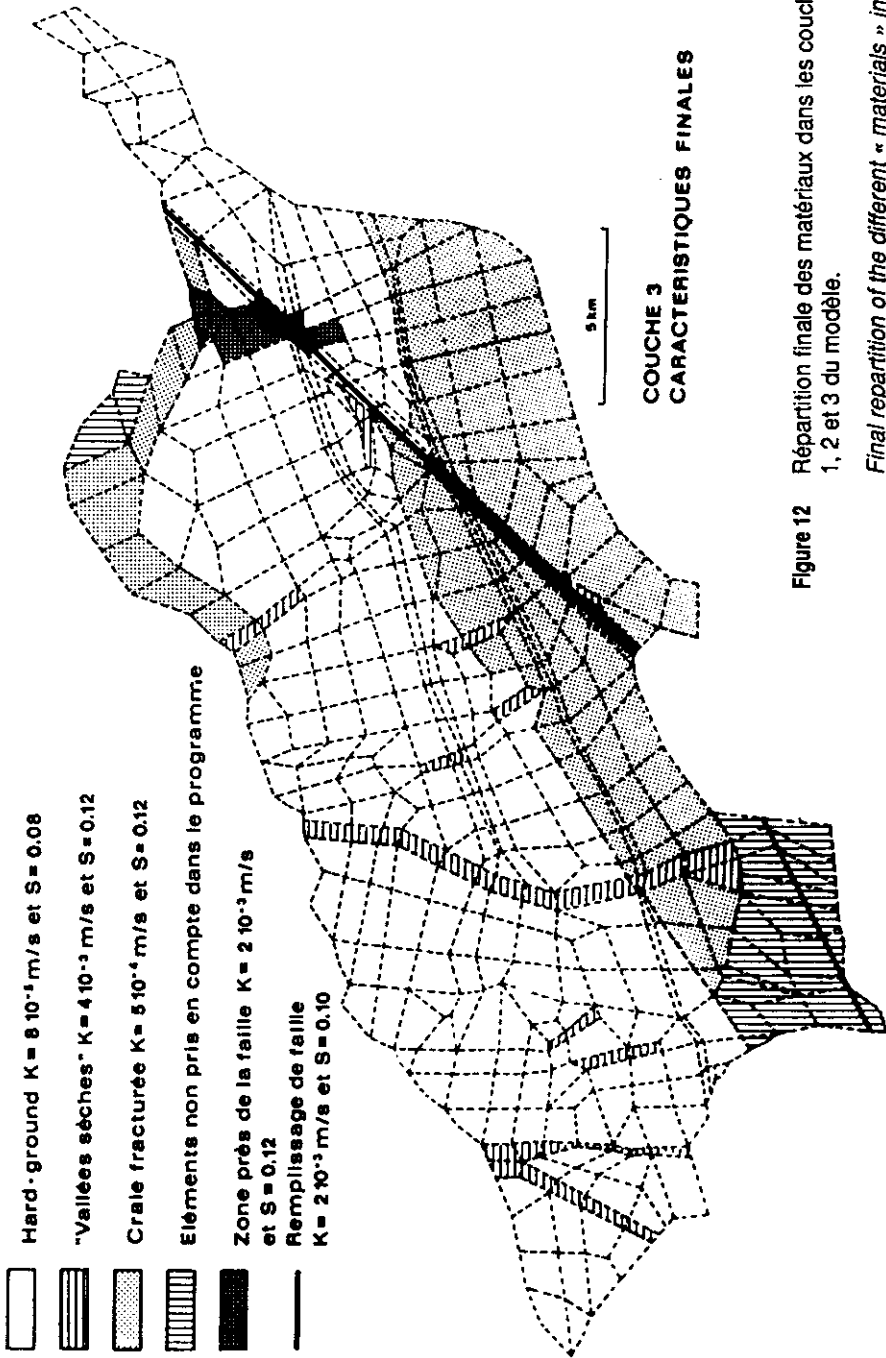
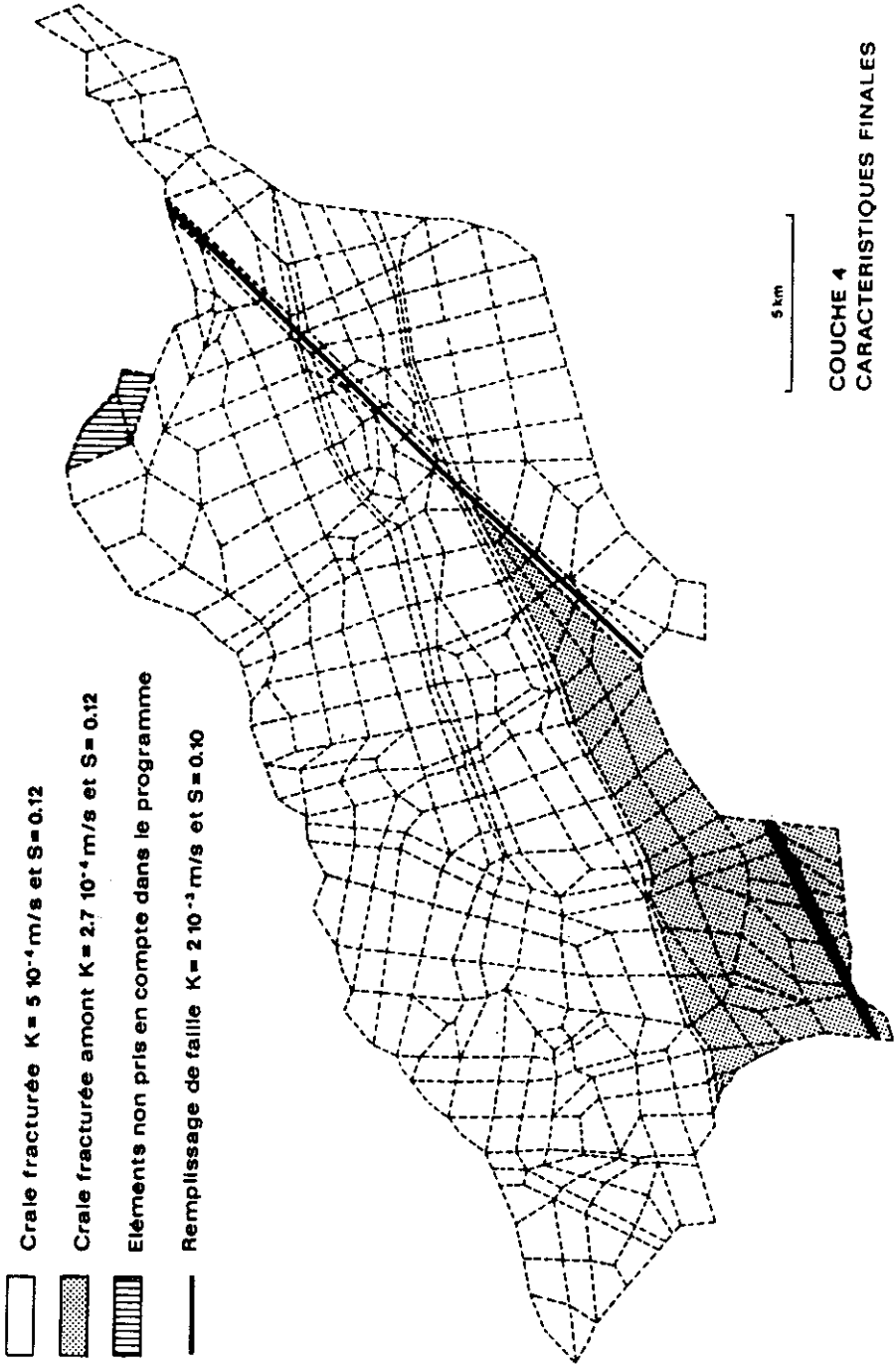


Figure 12 Répartition finale des matériaux dans les couches 1, 2 et 3 du modèle.

Final repartition of the different "materials" in the model structure, for layers 1, 2 and 3.



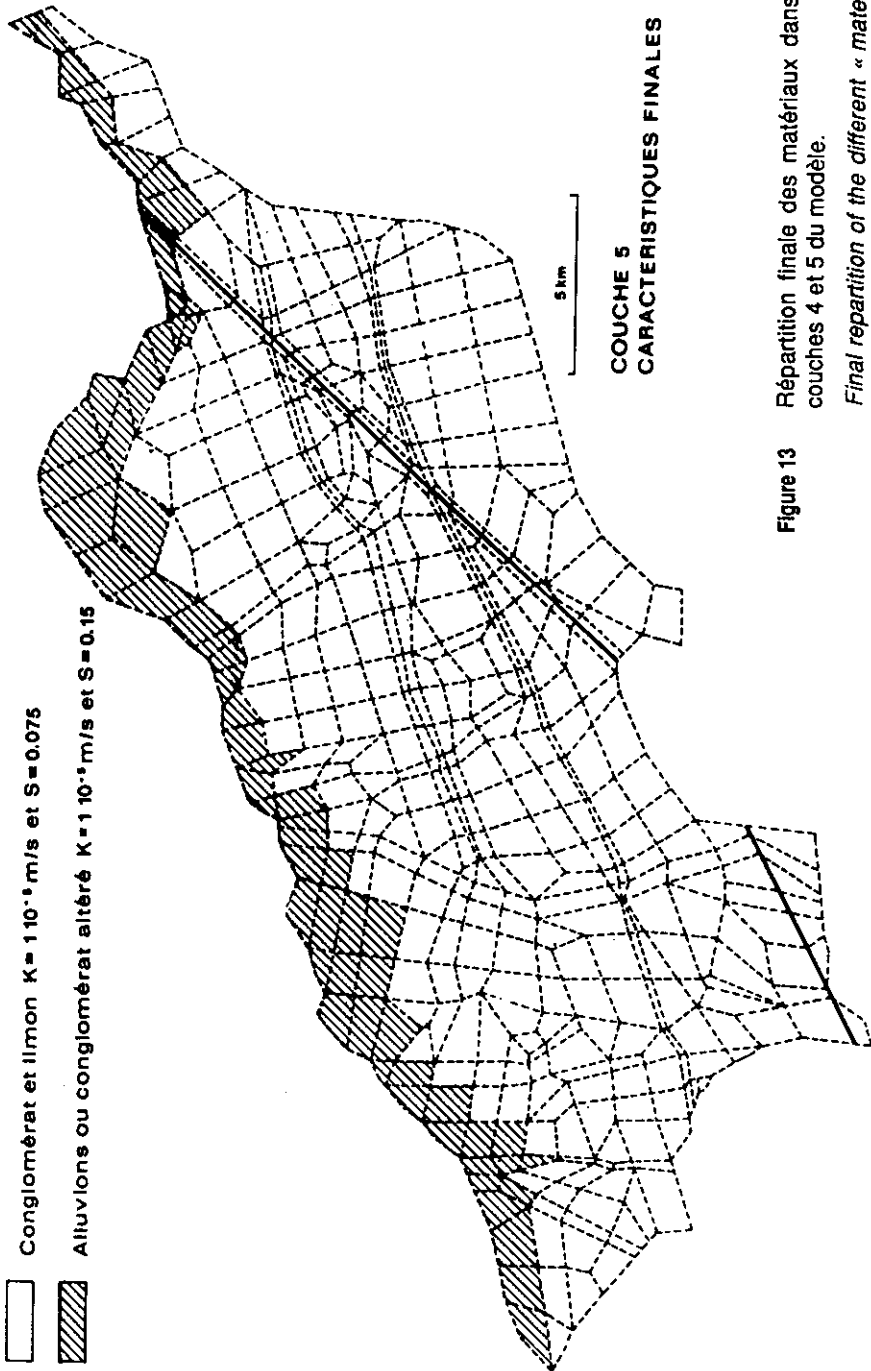


Figure 13 Répartition finale des matériaux dans les couches 4 et 5 du modèle.
Final repartition of the different « materials » in the model structure, for layers 4 and 5.

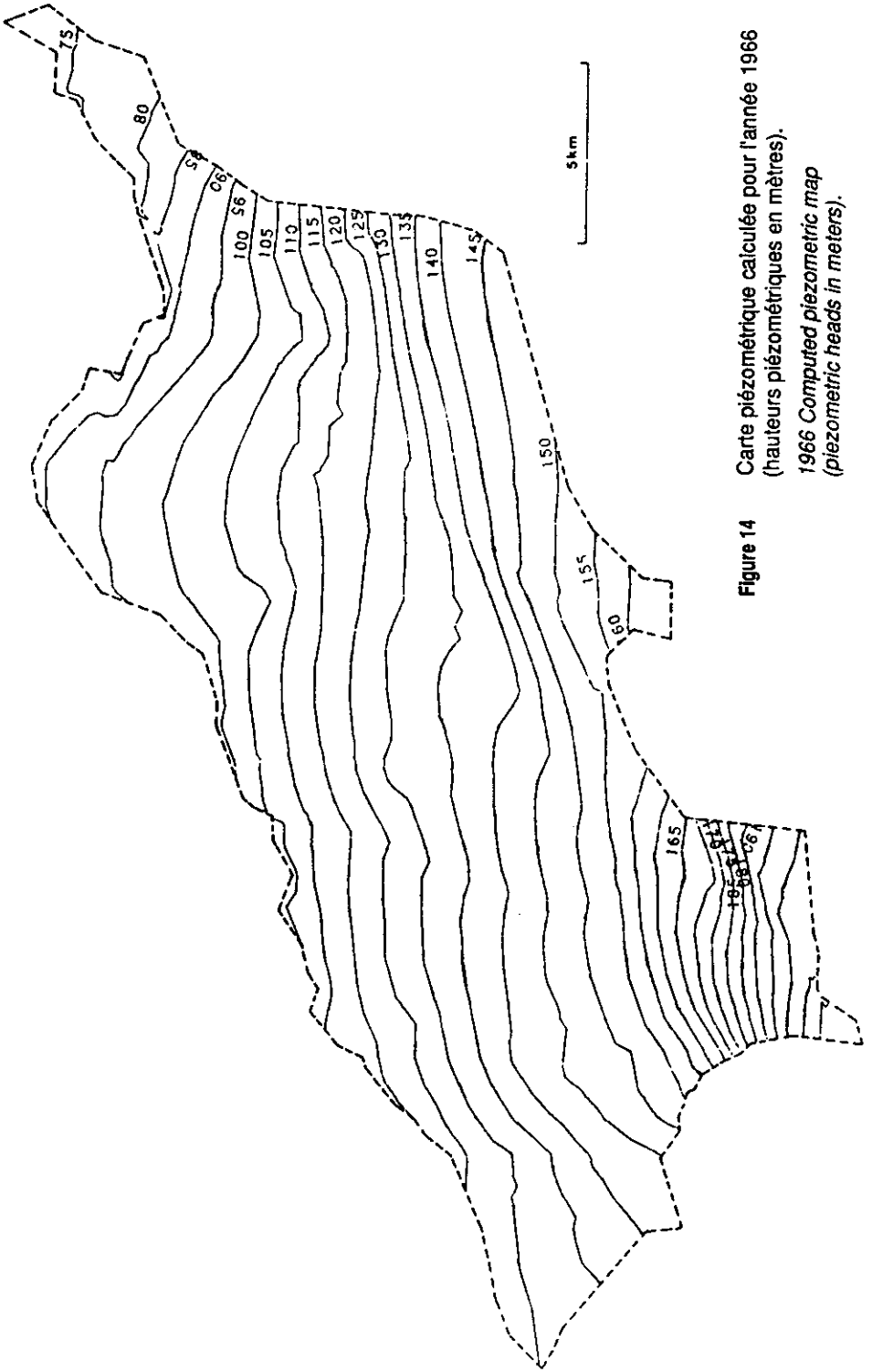


Figure 14 Carte piézométrique calculée pour l'année 1966 (hauteurs piézométriques en mètres).
1966 Computed piezometric map (piezometric heads in meters).

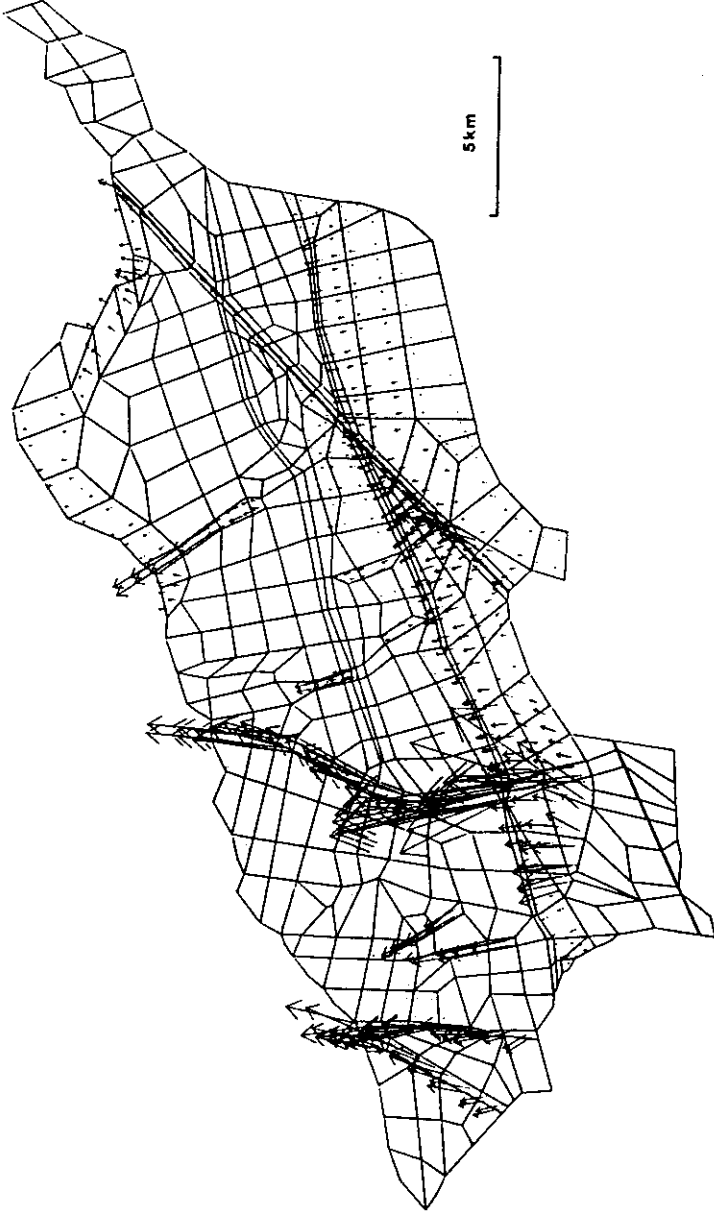


Figure 15 Carte des flux calculés pour l'année 1966 montrant les grandeurs relatives de ces flux.
1966 Computed flow map in the 3rd layer, showing the relative values of the flux.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La complexité des conditions géologiques de l'aquifère étudié justifie l'utilisation des éléments finis qui constituent une méthode très souple pour ce genre de modélisation.

Actuellement, le modèle reproduit bien toutes les tendances de la nappe, le calage est donc considéré comme satisfaisant. Il consomme actuellement, environ 30 heures CPU sur Micro VAX II, pour la calibration complète entre 1951 et 1984, avec un pas de temps d'une année. La simulation de la nappe libre est réalisée avec un maillage fixe en régime transitoire par l'utilisation d'une nouvelle loi d'emmagasinement. Cette méthode, très économique du point de vue temps ordinateur, permet d'étudier dans ces conditions des nappes régionales.

Le modèle est actuellement utilisé à des fins prévisionnelles et constitue un outil indispensable à la gestion dynamique de l'aquifère étudié. Il permet de calculer les flux et la piézométrie correspondant à tout schéma de pompage et d'infiltration.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené par les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de Liège (LGIH) dans le cadre d'un contrat financé par le Ministère de la Région Wallonne pour l'Eau, l'Environnement et la Vie Rurale.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BATHE K.J., KHOSGOFTAAR M.R., 1979. Finite element free surface seepage analysis without mesh iteration. *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, 3, 13-22.
- BOLLY P.Y., 1986. Modélisation mathématique de la nappe aquifère de Hesbaye. Mémoire de fin d'études, Sciences appliquées, Université de Liège.
- BRIXKO A., 1980. L'alimentation en eau de l'agglomération liégeoise dans *La technique de l'eau et de l'assainissement* n° 402-403, 87-95.
- CASTANY G., 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod Université, 237 p.
- CALEMBERT L., 1956. Le Crétacé supérieur de la Hesbaye et du Brahant. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*. Tome LXXX, 129-165.
- CHARLIER R., 1987. Approche unifiée de quelques problèmes non-linéaires de

- mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. Thèse de Doctorat. Collection des publications de la Faculté des Sciences appliquées, n° 109, Université de Liège, Belgique.
- CHARLIER R., RADU J.P., DASSARGUES A., 1988. Numerical simulation of transient unconfined seepage problems. Proceedings of the 1st International Conference in Africa on Computer Methods and Water Resources, Rabat, Marocco.
- DASSARGUES A., BOLLY P.Y., MONJOIE A., 1987. Modélisation de la nappe aquifère de Hesbaye, *Rapport LGIH*, n° HES/871, Université de Liège, 262 p.
- DE MARSILLY G., 1981. *Hydrogéologie Quantitative*, Masson, Paris, 217 p.
- GHIJSEL P. 1985. Crétacé de Hesbaye. Rapport final Ministère de la Région Wallonne. Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux.
- MONJOIE A., 1967. Observations nouvelles sur la nappe aquifère de la craie en Hesbaye (Belgique). *Mémoires de l'Association Internationale des Hydrogéologues*, Istantoul.
- NEUMAN S.P., 1973. Saturated-unsaturated seepage by finite elements. *ASCE, Hydraulics Div.*, 99, HY12, 2233-2250.
- PIETTE Ch., CESCOTTO S., 1976. 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. Université de Liège.
- TAYLOR R.L., BROWN C.B., 1967. Darcy flow solution with a free surface. *ASCE, Hydraulics Div.*, 93, HY2, 25-33.